

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky

**STANOVENÍ METRIK SNĚHOVÉ POKRÝVKY
POMOCÍ METOD FOTOGRAMMETRIE A DPZ**

Diplomová práce

Bc. Marie PAJDOVÁ

RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2022
Geoinformatika

ANOTACE

Cílem práce je otestovat přístupy bezkontaktního monitoringu pro výpočet metrik (výška, objem, rozloha) sněhové pokrývky. Na vytipované testovací lokalitě byly hodnoceny různé přístupy a použití odlišných technologií. Práce byla zaměřena zejména na využití fotogrammetrických metod, které byly doplněny o testování využitelnosti radarových dat. Na datech byl sledován vliv intenzity osvětlení, zastínění oblačností, stáří a čistota sněhové pokrývky pro správné vyhodnocení.

Veškeré postupy byly aplikovány na případové studii v oblasti NPR Praděd, kde byla zaměřena výška sněhové pokrývky pomocí leteckého a UAV snímkování. Jako referenční datová sada bylo vytvořeno vlastní geodetické měření. Dále bylo použito pozemní měření sněhové pokrývky, které provedli pracovníci Správy CHKO Jeseníky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sněhová pokrývka; UAV; výška sněhu; letecká a UAV fotogrammetrie; NDSI

Počet stran práce: 89

Počet příloh: 7 (z toho 5 volné a 2 elektronické)

ANOTATION

The main goal of the diploma theses is to test non-contact monitoring approaches for estimating snow cover metrics (height, volume, area). Different approaches and the use of different technologies were evaluated at the selected test area. The work was mainly focused on the use of photogrammetric methods, which were supplemented by testing the usability of radar data. The effect of the lighting intensity, cloud shading, age and cleanness of the snow cover was monitored on the data for a correct evaluation.

All procedures were applied to a case study in the Praděd National Reservation area, where the height of the snow cover was focused using aerial and UAV imaging. An own geodetic measurement was created as a reference data set. In addition, the ground measurement of the snow cover was used, which was carried out by the staff of the Jeseníky Protected Area Administration.

KEYWORDS

Snow cover; UAV; Snow depth, Aerial and UAV photogrammetry, NDSI

Number of pages 89

Number of appendixes 7

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu
- jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),
- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,
- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,
- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Bc. Marie Pajdová

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakobovi Miřjovskému, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce a za výpomoc při realizaci pozemního měření a snímkování terénu.

Za poskytnutá data a výsledky pozemního měření děkuji Správě Chráněné krajinné oblasti Jeseníky.

Své rodině děkuji za trpělivost a podporu při zpracování diplomové práce.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Marie ŠABATOVÁ**
Osobní číslo: **R190017**
Studijní program: **N1301 Geografie**
Studijní obor: **Geoinformatika**
Téma práce: **Stanovení metrik sněhové pokrývky pomocí metod fotogrammetrie a DPZ**
Zadávající katedra: **Katedra geoinformatiky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je otestovat přístupy bezkontaktního monitoringu pro výpočet metrik (výška, objem) sněhové pokrývky. Studentka se na vytipované testovací lokalitě zaměří na hodnocení různých přístupů a použití odlišných technologií. Během práce se zaměří zejména na využití fotogrammetrických metod, ale tyto metody budou doplněny o testování využitelnosti radarových dat, případně laserového skenování. Bude sledován vliv směru a intenzity osvětlení, stáří a čistota sněhové pokrývky. Současně budou postupy aplikovány na jedné případové studii v oblasti NPR Praděd. Jako referenční datová sada bude použito vlastní geodetické měření.

Studentka vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořila nebo získala v rámci práce, do Metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně vytvoří zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci studentka vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI. Povinnou přílohou práce bude poster formátu A2.

Rozsah pracovní zprávy: **max. 50 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:


1. Deems, J. S., Painter, T. H., & Finnegan, D. C. (2013). Lidar measurement of snow depth: a review. *J. Glaciol*, 59(215), 467-479.
2. Lendziach, T., Langhammer, J., & Jenicek, M. (2019). Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry. *Sensors*, 19(5), 1027.
3. Goetz, J., & Brenning, A. (2019). Quantifying uncertainties in snow depth mapping from structure from motion photogrammetry in an alpine area. *Water Resources Research*.
4. Bühler, Y., Adams, M. S., Stoffel, A., & Boesch, R. (2017). Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 3135-3158.
5. Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.

Vedoucí diplomové práce: **RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.**
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 7. října 2019
Termín odevzdání diplomové práce: 6. května 2021

L.S.

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan



prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.
vedoucí katedry

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 CÍLE PRÁCE.....	10
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ.....	11
2.1 Použité metody	11
2.2 Použité přístroje.....	13
2.3 Použitá data	14
2.4 Použité programy	16
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	19
4 FOTOGRAMMETRICKÉ A TERÉNNÍ ZPRACOVÁNÍ	25
4.1 Vymezení území.....	26
4.2 Přípravné práce pro snímkování	27
4.2.1 Výběr území a povolení k letu	27
4.2.2 Kontrola území a meteorologická situace	29
4.2.3 Parametry snímkování a plán letu	29
4.3 Práce v terénu	31
4.3.1 Vlíčovací body	32
4.4 Snímkový let.....	38
4.5 Zpracování dat.....	39
4.5.1 Zpracování zaměření souřadnic vličovacích bodů	39
4.5.2 Zpracování snímků a tvorba bodového mračna v programu Agisoft Metashape.....	40
4.5.3 Vnější vlivy působící na kvalitu zpracování snímků v programu Agisoft Metashape.....	47
5 SNĚHOVÉ METRIKY.....	52
5.1 Tvorba rozdílového bodového mračna	52
5.1.1 Import bodového mračna.....	53
5.1.2 Cloud-To-Cloud Distance	55
5.1.3 Srovnávací území	56
5.2 Výška sněhové pokrývky	57
5.2.1 Stanovení výšky sněhu v oblasti se stromy.....	57
5.2.2 Stanovení výšky sněhu v území zastíněném oblačností.....	60
5.2.3 Stanovení výšky sněhu v okolí vegetace	61
5.3 Objem a rozloha sněhové pokrývky.....	64
6 SNĚHOVÁ POKRÝVKA POHLEDEM DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ	65
6.1 Spektrální vlastnosti sněhu.....	65
6.2 Vymezení a získání dat	65
6.3 Sentinel-1	66
6.3.1 Wet Snow Map	67
6.4 Sentinel-2.....	68
6.4.1 NDSI.....	68

7	VÝSLEDKY	72
7.1	Výsledky stanovení metrik pomocí metod fotogrammetrie	72
7.1.1	Porovnání mezi jednotlivými mračny bez sněhu.....	72
7.1.2	Porovnání stanovené výšky sněhu s daty naměřenými v terénu	75
7.2	Výsledky stanovení metrik pomocí metod DPZ.....	76
8	DISKUZE	77
	ZÁVĚR	79
	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
DPZ	Dálkový průzkum Země
DMR	Digitální model reliéfu
DOP	Dilusion of Precision
ESA	European Space Agency
GCP	Ground Control Points
GIS	geografický informační systém
GLONASS	Global Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
JPEG	Joint Picture Experts Group
k.ú.	katastrální území
LAS	LAS file format = standardizovaný formát pro bodová mračna
NDSI	Index sněhové pokrývnosti
RTK	Real Time Kinematic
ŘLP	Řízení letového provozu
SfM	Structure from Motion
SGI	Soubor geodetických informací
SHP	Shapefile
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UAV	Unmanned Aerial System (bezpilotní zařízení)
VFR	Visual Flight Rules

ÚVOD

Sledování stavu sněhové pokrývky je důležité nejen pro sportovce a horskou službu pro stanovení předpovědi lavinového nebezpečí, ale je také nedílnou součástí při předpovědi klimatu v horských oblastech. Je důležité pro globální modely předpovědi počasí a v neposlední řadě pro výzkum zadržování vody v půdě, jelikož sníh je pro mnoho nejen horských oblastí důležitým vodním zdrojem v přírodě.

Tradičně se metriky sněhové pokrývky určují pozemním měřením, nejčastěji za pomoci měřicích tyčí neboli sněhoměrných latí, kterými se při terénním průzkumu měří výška sněhové pokrývky. Rozloha pokrývky se pak určuje pomocí geodetického měření a následně je z těchto údajů vypočítáván objem sněhové pokrývky. Sníh se však nachází často ve velmi nepřehledných a nebezpečných úsecích, kde je takovéto pozemní měření rizikové, a ne všude ho lze provádět, případně jen s velmi nízkou přesností. Proto do stanovení metrik sněhové pokrývky vstupují fotogrammetrické metody a metody dálkového průzkumu Země, které umožňují kvalitnější výsledky a lze pomocí nich mapovat i nedostupný terén.

V Alpských zemích se již řadu let využívá pro určování metrik sněhové pokrývky letecké snímání povrchu Země. Ze získaných snímků se poté vypočítávají metriky sněhové pokrývky. V posledních letech se díky rychlému technologickému vývoji do mapování sněhové pokrývky zapojují také bezpilotní zařízení, která rozšiřují možnosti mapování sněhu.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je stanovení metrik sněhové pokrývky (výška, objem, rozloha) pomocí metod fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země. K naplnění hlavního cíle práce byly vymezeny následující dílčí cíle:

- rešerše odborné literatury
- příprava a realizace terénního geodetické měření
- příprava a realizace leteckého a UAV snímkování
- zpracování a analýza získaných dat
- výpočet metrik sněhové pokrývky
- vizualizace výsledných dat

Hlavním cílem práce je otestovat přístupy bezkontaktního monitoringu pro výpočet metrik (výška, objem, rozloha) sněhové pokrývky. Na vytipované testovací lokalitě budou testovány různé přístupy a použití odlišných technologií. Práce bude zaměřena zejména na využití fotogrammetrických metod, ale tyto metody budou doplněny o testování využitelnosti radarových dat. Bude sledován vliv směru a intenzity osvětlení, stáří a čistota sněhové pokrývky.

Současně budou postupy aplikovány na jedné případové studii v oblasti NPR Praděd. Jako referenční datová sada bude použito vlastní geodetické měření, doplněné o pozemní měření vytvořené Správou CHKO Jeseníky.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

V průběhu vypracování diplomové práce bylo využito různých metod, jež jsou vypsány v této kapitole. Pro zaměření souřadnic bodů v terénu bylo využito GNSS rychlé statické metody a metody Real Time Kinematic. Při snímkování pak bylo využito metod letecké a UAV fotogrammetrie. Během zpracování získaných dat byly použity fotogrammetrické metody Multi-Image Matching, Structure for Motion a následně klasifikace mračna bodů.

Ve druhé části práce zabývající se stanovením metrik sněhové pokrývky pomocí družicových snímků a metod dálkového průzkumu Země bylo využito obrazové spektrometrie, radarové interferometrie. V rámci tvorby výsledného zobrazení sněhové pokrývky na snímku byl použit spektrální index NDSI a S3 index.

Dále jsou v této kapitole popsány přístroje, programy a data využitá pro účely práce.

2.1 Použité metody

Zaměření souřadnic bodů v terénu probíhalo pomocí globálních navigačních satelitních systému (GNSS), které představují dálkoměrný systém družic založený na měření vzdálenosti přijímače k minimálně čtyřem družicím. Tímto principem lze určit trojrozměrnou polohu přijímače, polohu i přesný čas v místě měření. U tohoto způsobu určování polohy je signál vysílán z družice do přijímače GPS. Datová komunikace je založena na standardech RTCM SC-104 a RINEX. Tyto standardy definují formát přenosu dat (Rapant, 2002).

Rychlá statická metoda kombinuje měření sledováním dálkoměrného kódu a fázového měření, což umožňuje získat výslednou souřadnici efektivněji a spolehlivěji než při kinematickém a statickém způsobu měření. Měření se provádí pouze jednou za delší jednotku času, která závisí na počtu viditelných družic. Při počtu šesti a více družic odpovídá doba měření pěti až deseti minutám. Na rozdíl od toho, kinematické měření metodou Real Time Kinematic (RTK) umožňuje urychlit proces měření za pomoci připojení přijímače ke čtyřem družicím s využitím připojení přes mobilní signál. Mezi referenčním a pohyblivým přijímačem je vybudován komunikační kanál, na mobilní stanici jsou přenášeny kompletní data získaná při kódových a fázových měření, na základě jejich zpracování pak tato stanice vyhodnocuje svou polohu v reálném čase s přesností do jednotek centimetrů (Rapant, 2002).

K získání a zpracování měřických snímků byly využity metody fotogrammetrie. V dnešní době se nejvíce využívá metod letecké a UAV fotogrammetrie při získávání snímků. Letecká fotogrammetrie využívá pro umístění stanoviska jako nosič letadlo nebo jiný pohybující se letecký prostředek. UAV fotogrammetrie představuje fotogrammetrické měření s využitím UAV platform jako nosičů. Výhodou je vertikální pohled a poměrně blízká vzdálenost terénu za zachování detailního snímku. Na snímku je tak zobrazena větší plocha území (Aber, a kol, 2010; Miřijovský, 2013).

Pro výpočet polohy a orientace na snímku jsou použity matematické postupy a principy, které jsou u letecké i UAV fotogrammetrie velmi podobné. U letecké fotogrammetrie je nutné, aby stereodvojice snímků měla rovnoběžnou osu záběru a směr snímkování směřoval do nadíru, vzdálenost kamera – terén by měla být přibližně stejná u všech snímků. Nejčastější metodou určení prvků vnitřní orientace u snímků

pořízených UAV fotogrammetrií je využití vřícovacích bodů se známou souřadnicí X, Y, Z (Mirijovský, 2013).

Ke zpracování snímků bylo využito metody Mutli-Image Matching, jejímž základním principem je obrazová korelace umožňující za pomoci automatizovaných postupů vyhledat identické prvky na snímcích. Lze tak zpracovat velké množství datových sad v relativně krátkém časovém úseku za zachování velké přesnosti. Metoda Structure from Motion pak umožňuje zpracovat snímky s rovnoběžnými i konvergentními osami záběru, což umožňuje zjednodušení snímkování. Metoda tak kombinuje výhody stereofotogrammetrie a průřekové fotogrammetrie. Výstupem zpracování snímků touto metodou jsou ortorektifikované snímky a 3D bodová mračna (Dense Cloud).

Další zpracování Dense Cloudu probíhalo v programu *CloudCompare*, kde byla ke stanovení výška sněžové pokrývky využita funkce Cloud-To-Cloud Distance, která založena na aproximacím odhadování vzdálenosti pomocí algoritmu nejbližšího souseda (Nearest Neighbor). Algoritmus je součástí algoritmu *Problém obchodního cestujícího* a je definován jako soubor bodů S , v prostoru \mathcal{M} ($S_i \in \mathcal{M}$) a řadě bodů q ($q_i \in \mathcal{M}$), kdy pro body souboru S je vyhledáván nejbližší soused v řadě q (Knuth, 1968).

Dílčí částí zpracování diplomové práce je stanovení metrik sněžové pokrývky na snímcích pořízených metodami dálkového průzkumu Země. Ke splnění tohoto cíle práce byla využita metoda radarová interferometrie, jež se řadí mezi metody aktivních radarových systémů. Interferometrie je metoda přesných výškových měření založená na základě rozdílů ve fázi dvou radarových signálů získaných z rozdílných pozic (Dobrovolný, 1998). Výsledkem zpracování snímků radarovou interferometrií je interferogram neboli konkrétně v této práci mapa vodní hodnoty sněhu.

Další požívanou metodou v rámci této práce je obrazové spektrometrie rozšiřující multispektrální přístup na hyperspektrální. Metoda pracuje na principu pořízení velkého množství obrazových záznamů ve velmi úzkých na sebe navazujících intervalech spektra v oblasti viditelného, blízkého a středního infračerveného elektromagnetického záření. Jakákoli tři pásma takto pořízená pak lze různě kombinovat v barevné syntéze v systému RGB a pomocí této syntézy zobrazovat prostorové a spektrální informace o konkrétním území.

Na základě spektrálních znalostí lze použít pro zpracování obrazu také spektrální indexy, které představují aritmetické operace se dvěma či více pásmy multispektrálního obrazu. Pro účely této práce byly vybrány spektrální indexy využívající viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra, jelikož sněžová pokrývka má v této části spektra nejvyšší odrazivost.

Index NDSI Normalized Difference Snow Index se řadí mezi poměrové spektrální indexy, je odvozen od vysoké odrazivosti sněhu v zelené viditelné části spektra (*GREEN*) a nízké odrazivosti v krátké infračervené části elektromagnetického spektra (*SWIR*). Vztah je vyjádřen podle vzorce (1).

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (1)$$

Hodnoty NDSI se pohybují od -1 do 1, kdy pixely se sněhovou pokrývkou nabývají hodnot větší než 0,4, pixely rovny této hodnotě jsou alespoň částečně zasněžené a pixely s hodnotou nižší než 0,4 jsou bez sněhové pokrývky.

Dalším indexem pro identifikaci sněhové pokrývky je S3 index, ten mezi sebou kombinuje tři spektrální pásma, červenou viditelnou část, blízkou infračervenou část a krátkou infračervenou část elektromagnetického spektra. Díky tomu index dobře identifikuje smíšené pixely. Výpočet vychází ze vzorce (2).

$$S3 = \frac{NIR*(RED-SWIR)}{(NIR+RED)*(NIR+SWIR)} \quad (2)$$

2.2 Použité přístroje

Pro pozemní měření byl využit GNSS přijímač Trimble R4 podporující technologii Real Time Kinematic (RTK). Detailněji je použití GPS přístroje a zvolené metody zaměření popsáno v kapitole 4.3.1 Vřicovací body.

Při snímkování území byla v prvním zimním leteckém snímkování 8. března 2020 použita letecká kamera IGI DigiCam, umístěná v letadle Cessna 172. Při dalších snímkování sněhové pokrývky bylo využito bezpilotního zařízení DJI Phantom 4 Pro se zabudovanou kamerou.

Cessna 172

Jedná se o malé jednomotorové letadlo splňující obecné podmínky pro pomalý a nízký let. Jeho maximální rychlost letu může být 228 km/h a maximální dolet 1272 km (Cessna 172, 2014). Letadlo startovalo ze svého domovského letiště v Olomouci.

DJI Phantom 4 Pro

Dron společnosti DJI patří do skupiny kvadrokoptér, je vybaven čtyřmi motory, GNSS přijímačem pro navigaci letu a vestavěnou Ultra HD palubní kamerou. Tato kamera má 1-palcový CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) snímač s 20 Mpx, mechanickou uzávěrkou a zorným úhlem až 85°. Kamera dokáže pořizovat sekvenční fotografie při 14 snímcích za vteřinu a eliminuje zkreslení obrazu vznikající při snímání za rychlého letu. Kamera je zavěšena na stabilizovaném tříosém závěsu, který se klopí, otáčí a kloní. Ovládání dronu umožňuje aplikace DJI GS PRO v dálkovém zařízení, které obvykle představuje chytré zařízení (Phantom 4 Pro/ Pro+ User Manual, 2016).

2.3 Použitá data

Data vytvořená pro účely práce

Ke stanovení metrik sněhové pokrývky je důležité mít terén se sněhovou pokrývkou a bez, aby bylo možné oba terény od sebe odečíst a získat tak metriky sněhové pokrývky. Za tímto účelem bylo provedeno několik snímkových letů, při kterých byly pořízeny měřické snímky, z nichž byla následně vytvořena 3D bodová mračna (Dense Cloud). Ta sloužila jako základ pro určování metrik sněhové pokrývky.

Vstupním snímkem pro tvorbu bodového mračna bez sněhové pokrývky je výsledek snímkování provedeného na podzim v roce 2019. Letecké mapování a následné zpracování snímků provedl vedoucí práce RNDr. Jakub Mířijovský, Ph.D. Jedná se o letecký snímek celého území Vysoké Hole ve formátu TIFF v souřadnicovém systému S-JTSK. Z tohoto snímku bylo pro potřeby této práce vytvořeno bodové mračno, které vstupovalo do porovnání a dalších procesů.

Druhé mračno bodů bez sněhové pokrývky vstupující do analýz tvoří výsledek snímkování vybrané části území Vysoké hole pomocí bezpilotního letounu, které také provedl vedoucí práce v červnu 2021. Snímkování bylo provedeno pomocí bezpilotního zařízení DJI Phantom 4 Pro s vestavěnou digitální kamerou za slunečného počasí. Data byla poskytnuta jako jednotlivé snímky ve formátu TIFF.

Bodové mračno se sněhovou pokrývkou bylo tvořeno celkem ze tří výsledků snímkových letů. První letecké snímkování území Vysoké Hole se sněhovou pokrývkou proběhlo 8. března 2020 pomocí letadla Cessna 172. Druhé snímkování sněhu již nebylo prováděno na celém území Vysoké Hole, ale pouze v jedné zájmové oblasti. Tato oblast byla vybrána na základě zhodnocení prvního snímkování a dat o výšce sněhové pokrývky pořízených správou NPR Praděd. Výběr oblasti byl vytvořen tak, aby do ní spadal jak úsek homogenního terénu na vrcholu Vysoké Hole, tak horní část Velké Kotliny na jihovýchodní straně vrcholu. Zájmová oblast je nepravidelného tvaru a měří na délku zhruba 800 metrů, na šířku 300 metrů ([Mapa 3](#)). Druhé bodové mračno se sněhovou pokrývkou bylo vytvořeno ze snímkování 10. března 2021. Bylo provedeno vedoucím práce pomocí bezpilotního zařízení DJI Phantom 4 Pro s vestavěnou digitální kamerou. Poslední snímkování terénu pro tvorbu bodového mračna se sněhovou pokrývkou bylo provedeno 17. března 2022, taktéž vedoucím práce.

Detailní parametry a výsledky snímkování jsou rozepsány v kapitole 4.4 *Snímkový let*.

Data z měření sněhové pokrývky správou NPR Praděd

Správa Národní přírodní rezervace Praděd (NPR Praděd) každoročně provádí měření výšky sněhové pokrývky pomocí sněhoměrných laťí a mobilního GPS systému. Měření je prováděno ve čtyřech transektech, které tvoří čtyři rovnoběžné profily jdoucí kolmo vrcholem Vysoké Hole. V těchto transektech je měřena výška sněhu v rozmezí pěti až deseti metry mezi jednotlivými body, k měření vzdálenosti mezi měřenými body se využívá kroková metoda. Hloubka sněhu je měřena pomocí sněhoměrné latě Ortovox Probe, tato lať má na konci kovový hrot, pomocí kterého se dostane i skrz starý a zmrzlý sníh až na zem. Lať má na sobě stupnici, ze které se následně odečítá výška sněhové pokrývky.

Z důvodu použití nepřesného přijímače GPS signálu (tablet Asus a Lenovo), který není možné toto měření použít jako referenční, ale pouze jako orientačně kontrolní měření.

Datová sada poskytnutá NPR Praděd byla poprvé měřena 9. března 2020, podruhé 2. března 2021 a naposled 8. března 2022. K zaměření souřadnic bodů byl využit v prvních dvou případech tablet *Lenovo Tab4 8 Plus TB-8704F* s podporou navigačního systému GPS, GLONASS a BeiDou a tablet *Asus Zenpad 10 P01T_1* s podporou navigačního systému GPS a GLONASS. V roce 2022 bylo využito mobilních zařízení *Xiaomi MI 9* a *Xiaomi Redmi 10* s podporou navigačního systému GPS. Výška sněhové pokrývky byla změřena u 263 bodů pro měření v roce 2020, u 395 bodů v roce 2021 a 274 bodů v roce 2022 s přesností na 5 cm. Nejmenší naměřená výška sněhu byla 5 cm a nejvyšší nad 320 cm, což je maximální možná výška, kterou lze ze sněhoměrné latě odečíst.

Referenční měření výšky sněhu

Při snímání území v období se sněhovou pokrývkou bylo vždy zaměřeno několik bodů s referenční výškou sněhové pokrývky, které slouží pro následnou kontrolu přesnosti modelů při určení hloubky sněhu. Nejprve byl daný bod zaměřen geodeticky, aby byla známá nadmořská výška bodu se sněhovou pokrývkou a následně byla změřena výška pomocí metru nebo odečtením z výtyčky.

Radarová data

Pro práci s radarovými snímky byla využita data družicového systému Sentinel-1A, ze kterých byla tvořena *Wet Snow Map* – mapování tajícího sněhu a *Snow Avalanche Detection* – detekce sněhových lavin. Pro výpočet poměrového indexu k určení zasněženého území *NDSI* byla využita data družicového systému Sentinel-2B. Veškerá tato data jsou k dispozici na stránkách *Copernicus Open Acces Hub* (<https://scihub.copernicus.eu>), pro jejich bezplatné získání je nutné se registrovat. Data poskytuje Evropská kosmická agentura.

Digitální model reliéfu 5G

Pro výsledné srovnání a ověření kvality stanovení výšky sněhové pokrývky byl použit digitální model reliéfu 5G (DMR 5G) dostupný jako webová služba WMS z Geoportálu ČÚZK.

2.4 Použité programy

V jednotlivých krocích předletové přípravy bylo využito postupně několika aplikací. Při přípravě na zaměření souřadnic bodů v terénu byl využit online nástroj Trimble GNSS online Planing zá účelem získání informace o ideálním rozložení družic v dané lokalitě. Ke kontrole letového prostoru v území navrženému pro snímkování byla použita online aplikace DronView. Plán letu bezpilotního zařízení byl vytvořen v aplikaci DGI GS Pro, dále aplikace IGIPlan pro tvorbu letového plánu letadla. Všechny tyto programy jsou podrobněji rozepsány v kapitole 4.2. *Přípravné práce pro snímkování.*

K vyhodnocení měření souřadnic bodů v zimním snímkování 2022 byl v postprocessingu využit program RTKLIB. Jedná se o Open Source program, umožňující manipulaci s daty GNSS a zpracování měření pomocí klasických diferenčních metod a technikou PPP (Precise Point Positioning). V programu lze navolit vstupní RINEX soubory s korekcemi a navigační zprávu vztahující se ke konkrétnímu měření. Transformace souřadnic proběhla pomocí online INSPIRE služby transformace souřadnic dostupné na webu Geoportálu ČÚZK. Tento nástroj umožňuje převod digitálních geodat mezi souřadnicovými systémy S-JTSK, S-JTSK/05, ETR S89 a WGS 84. Služba se řídí standardy INSPIRE a OGC verze 0.4.0.

Zpracování snímků získaných leteckým snímkováním a následné generování bodového mračka proběhlo v programu Agisoft Metashape verze 1.8.3 build 14331. Tento software umožňuje zpracování digitálních snímků pomocí fotogrammetrie a tvorbu trojrozměrných prostorových dat. Je distribuován pod zpoplatněnou licenci, ale nabízí bezplatnou 30denní licenci, která byla využita pro zpracování snímků v této diplomové práci. Po vypršení bezplatné zkušební licence bylo využito časově omezeného licenčního souboru, který v rámci propagace a zpřístupnění programu širší veřejnosti, byl zveřejněn na webových stránkách helpdesku programu Agisoft. Tato licence umožňovala použití veškeré funkcionality programu bezplatně do 31. srpna 2022.

Bodová mračka byla následně zpracována v Open Source programu CloudCompare verze 2.12 alpha, který slouží pro analýzy trojrozměrných bodových mračen. Program byl využit k vytvoření bodových mračen sněhové pokrývky, na těch byly následně stanoveny metriky sněhové pokrývky. Software je dostupný pod licencí GNU GPL (General Public License).

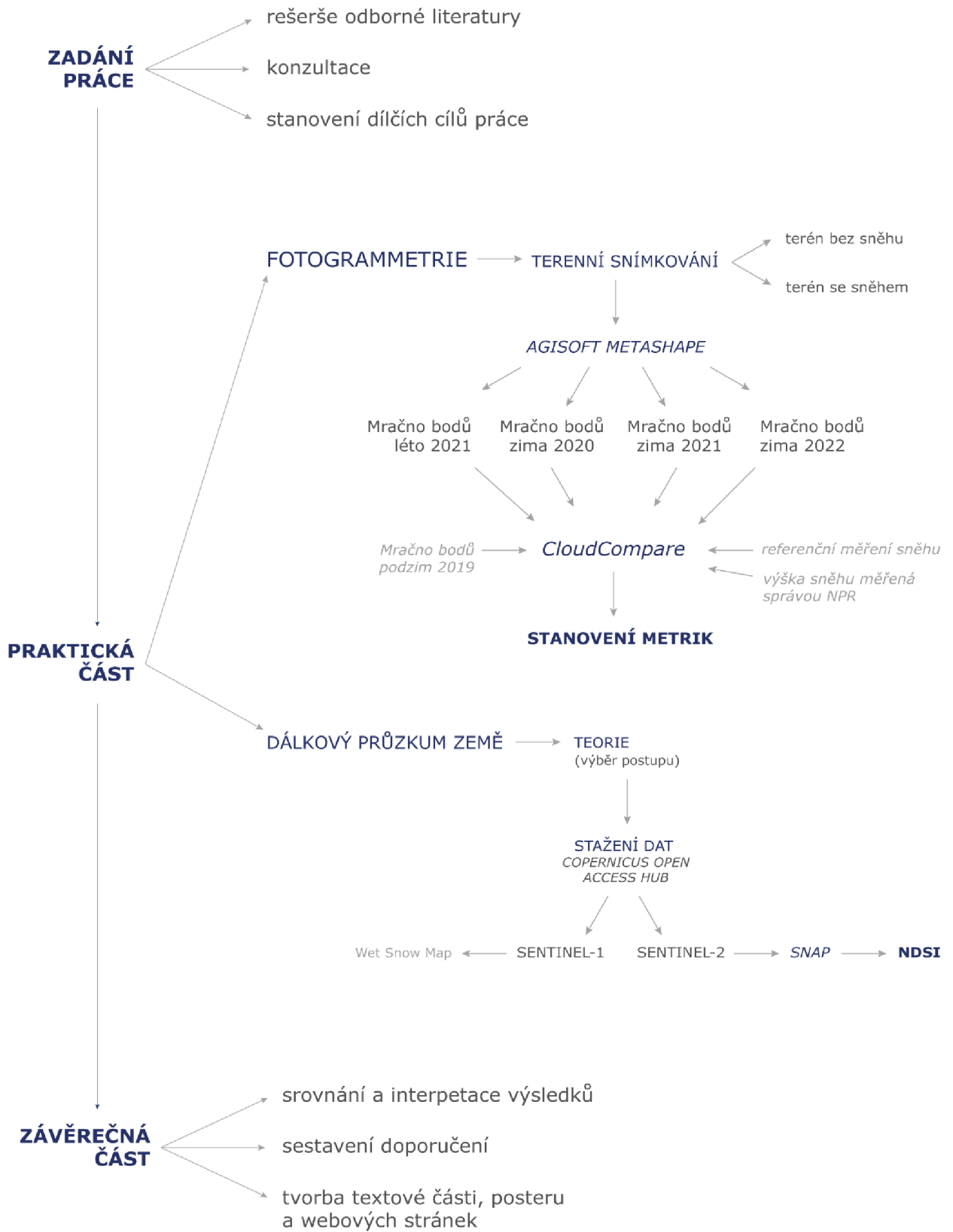
Porovnání modelů bylo provedeno jak ve výše zmíněném programu Cloud Compare tak i v softwaru ArcGIS Pro firmy ESRI, ve verzi 2.9.0. Zde byly také tvořeny veškeré mapové výstupy, pomocná vektorová data pro úpravu bodových mračen a v neposlední řadě byla v tomto programu zpracována data z pozemního a referenčního měření sněhové pokrývky. Pro práci v tomto programu bylo využito univerzitní licence.

Pro statistické porovnání bodů změřených v terénu, úpravu dat a tvorbu grafů byl využit tabulkový software Microsoft Excel dostupný pod studentskou univerzitní licenci.

Radarové snímky byly zpracovány pomocí programu SNAP (Sentinel Application Platform), poskytovaném Evropskou kosmickou agenturou (ESA). Jedná se o *Free Open*

Source softwarem obsahující několik toolboxů určených ke zpracování radarových snímků mise Sentinel, pod záštitou Evropské kosmické agentury (ESA). Tato agentura vyvinula evropský program STEP umožňující volný přístup k softwaru, dokumentaci a návodům pro mise ERS-ENVISAT a Sentinel 1, 2 a 3. Toolboxy vhodné pro Sentinel 1, 2 a 3 spadají pod architekturu softwaru SNAP (<https://step.esa.int/main/>).

Postup zpracování



Obr. 1 Postup zpracování diplomové práce

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V prvotní fázi vypracování diplomové práce proběhlo studium odborné literatury, vědeckých článků a předchozích prací s podobnou tematikou. Pro stanovení vhodných postupů zpracování bylo nutné vymezit terminologii. V první části této kapitoly jsou obecněji popsány vědní obory fotogrammetrie a dálkový průzkum Země, dále jsou zde vymezeny charakteristiky a vlastnosti sněhové pokrývky a její spektrální chování. Ve druhé části se kapitola zabývá vědeckými články a pracemi zabývající se související tematikou.

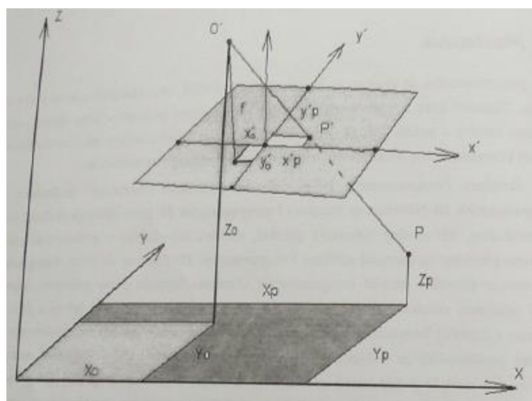
Fotogrammetrie je vědní obor zabývající se zpracováním informací o objektech měření na fotografických snímcích. Jedná se o měřickou metodu zkoumající rekonstrukci tvaru, velikosti a polohy předmětu z těchto snímků. Pavelka (2009) uvádí obecnou definici: „Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu“.

Existuje několik způsobů dělení fotogrammetrie, podle polohy stanoviště se dělí na pozemní a leteckou fotogrammetrii. Díky rozvoji technologií lze do této kategorie zařadit také fotogrammetrii digitální a analytickou, jejichž metodami je v současnosti řešena většina úloh (Pavelka, 2011). **Letecká fotogrammetrie** má nejširší využití při zhotovování map různých měřítek, jejich použití a aktualizaci. Při pořizování snímků je stanovisko snímku umístěno v pohybujičím se nosiči (letadlo, vrtulník, bezpilotní zařízení, ...). Za jednotku času je fotograficky zpracována mnohem větší oblast zájmového území (Böhm, 2002).

Mezi principy letecké fotogrammetrie podle *Mezinárodní společnosti pro fotogrammetrii a DPZ (ISPRS)* patří:

- Osa x je položena přibližně do směru letu
- Kladný směr rotací je volen ve směru chodu hodinových ručiček
- Primární osa je x , sekundární y a terciální je z
- Počátek souřadnicové soustavy je umístěn v průmětu levého stanoviska stereodvojice

Tyto principy jsou důležité při volbě souřadnicových soustav pro leteckou fotogrammetrii. Vztah mezi snímkem a referenčním systémem je vyobrazen na obrázku Obr. 2 (Pavelka, 2011).



Obr. 2 Vztah mezi obecným snímkem a referenčním systémem (Pavelka, 2011)

Základem fotogrammetrie je geometricko-matematická rekonstrukce paprsků vyzářených a dopadajících na senzor v momentu expozice snímku. Pro orientaci

a určení polohy na snímku je klíčová znalost vnitřních a vnějších prvků orientace. Prvky vnitřní orientace udávají vztah mezi projekčním centrem a rovinou snímku, řadí se mezi ně konstanta komory f v mm (neboli ohnisková vzdálenost komory), poloha středu snímku (hlavní snímkový bod) a průběh radiální distorze objektivu. Prvky vnější orientace představují vztah mezi projekčním centrem a vnějšími souřadnicemi a orientaci osy záběru vůči souřadnicovým osám. Řadí se mezi ně tři souřadnice středu optického systému (X_0, Y_0, Z_0) a tři úhly definující polohy osy záběru (směr osy ω , sklon osy φ , pootočení snímku κ) (Böhm, 2002; Pavelka 2009).

Díky znalosti prvků vnitřní a vnější orientace pak lze provést transformaci mezi souřadnicovými systémy. Pořízený snímek má své vlastní souřadnice, výsledný snímek je zasazen do geodetického souřadnicového systému. Transformace se provádí okolo jednotlivých výše zmíněných os a úhlu, k jejímu účelu slouží rovnice kolinearit, do které se dosazují matice rotace. Pro dosažení správného výsledku je nutné dodržet podmínku kolinearit, která říká, že projekční centrum, bod v terénu a jeho obraz na snímku leží v jedné přímce. Více se touto tematikou zajímá ve své práci Mirijovský (2013).

Také **UAV fotogrammetrie** vychází z matematických principů fotogrammetrie. Pro pořízení snímků jsou využívány bezpilotní UAV zařízení se snímkovacími kamerami, jež mají specificky odlišné vlastnosti, díky kterým se požadavky na přesnost určení polohy a orientace na snímku odlišují od požadavků letecké fotogrammetrie. Prvky vnitřní orientace jsou určovány pomocí vřícovacích bodů, jejich přesnost závisí na způsobu určení jejich polohy, tedy metodě zaměření souřadnic. K tomuto účelu se nejčastěji využívá metody GNSS pomocí GPS přístroje. Prvky vnitřní orientace kamery podléhají kalibračním metodám, na rozdíl od leteckých kamer jejich kalibrace není známá (Wolf a kol., 2014).

Pro **stanovení metrik sněhové pokrývky** pomocí metod fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země bylo klíčové studium charakteristik a metrik sněhové pokrývky. Samotný **sníh** je podle mezinárodní klasifikace usazeného sněhu *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground* (Fierz a kol., 2009) se u usazené sněhové pokrývky rozlišují vlastnosti:

- Forma – tvar zrna sněhu
- Velikost zrna
- Hustota sněhu
- Tvrdost sněhu
- Obsah vody
- Teplota
- Obsazení nečistot
- Tloušťka vrstvy sněhu

Pro výše uvedené vlastnosti je možné u usazené sněhové pokrývky měřit:

- Výška – vztaženo k vertikální souřadnici
- Tloušťka
- Výška sněhové pokrývky – hloubka sněhu
- Výška nově napadnutého sněhu
- Snow Water Equivalent – obsah vody ve sněhu
- Síla pokrývky
- Prostupnost povrchu sněhové pokrývky
- Vlastnosti povrchu sněhové pokrývky
- Rozloha zasněžené oblasti
- Slope angle
- Aspect of slope
- Time

Encyklopedie sněhu, ledu a ledovců vymezuje v rámci fyzických parametrů sněhu parametry jako density, albedo, velikost a tvar sněhového zrna, vlastnosti povrchu a propustnost (Domine, 2011). Dong (2018) ve svém článku udává přehled o proměnných sněhové pokrývky, které se používají v hydrologii, především za využití technik dálkového průzkumu Země. Jedná se o parametry:

- Snow covered area (SCA)
- Snow depth
- Snow water equivalent (SWE)
- Snow cover duration
- Snow onset date
- Snow end date

Snow cover area (SCA) udává procentuální rozsah sněhové pokrývky v rámci dané plochy, Snow depth vyjadřuje hloubku sněhové pokrývky v centimetrech a je úzce spjat s parametrem Snow water equivalent (SWE), jenž vyjadřuje obsah kapaliny ve sněhové pokrývce. Další tři výše uvedené parametry se vztahují k časové složce zkoumání sněhové pokrývky (Dong, 2018).

Výška sněhové pokrývky neboli *snow depth* je klíčovou metrikou zjišťovanou v této práci. Definovat ji lze jako vyjádření absolutní výšky akumulovaného sněhu, ledových krystalků a ledu na zemském povrchu.

Monitoring sněhové pokrývky pomocí metod fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země

Zkoumání sněhu je nezbytné pro mnoho odvětví nejen hydrologie. Sníh hraje velkou roli v zadržování vody v přírodě, a tak již historicky patří jeho monitoring mezi důležité vědní disciplíny. Historicky se rozloha sněhové pokrývky, a především hloubka sněhu měřila pozemním měřením, pomocí sněhoměrných latí. Tato metoda je především časově velmi náročná, a tak se s rozvojem dálkového průzkumu Země a fotogrammetrie nabízely postupem času nové možnosti. Studie prováděná v 70. letech minulého století se zabývala využitím leteckých snímků ke stanovení výšky sněhové pokrývky. Autoři ve svém článku uvádějí, že mnoho vědců tuto metodu považuje za nemožnou, avšak autoři jsou přesvědčení, že s vývojem technologií bude využití fotogrammetrie zcela běžné při monitoringu sněhové pokrývky (Smith a kol., 1967).

Díky přechodu z analogových do digitálních kamerových systémů a zlepšení možností zobrazovacích technik se otevřelo mnoho nových možností, mezi nimi i tvorba přesného digitálního modelu terénu se sněhovou pokrývkou. Autoři studie zaměřené na tvorbu DEM z leteckých snímků zasněženého území australského lyžařského střediska Falls Creek došli k závěru, že snímky s vysokým prostorovým i spektrálním rozlišením jsou vhodné ke stanovení hloubky sněhu i terénu, kde výška sněhu může dosáhnout hloubky větší než 2 m. Jediným problémem, se kterým se při své práci potýkalo bylo, že v některých místech jimi vytvořený digitální model dosahoval vyšší nadmořské výšky než jaká byla v daných místech zjištěna výška z pozemního měření provedeného GPS-RTK metodou (Lee a kol., 2008).

Rozvoj fotogrammetrie přinesl možnost zpracování dat metodou Structure from Motion (SfM). Tato metoda kombinuje principy stereoskopické fotogrammetrie s principy průsekové fotogrammetrie. Při porovnání modelů vzniklých zpracováním dat pomocí metod stereoskopické fotogrammetrie a metody Structure from Motion, jsou modely vzniklé metodou SfM mnohem přesnější. Detailní hodnocení popisuje ve své disertační práci Mířijovský (2013). I z pohledu snímání zasněženého terénu jsou přesnější a přínosnější výsledky vytvořené při zpracování dat ze snímání pomocí metody Structure from Motion. Goetz a Brenning (2019) se ve své studii zaměřili na zjištění

limitů ovlivňujících výslednou přesnost hloubky sněhu zjištěnou z DEM. Na zkoumaném území se nacházel jak ledovec, tak méně členitý reliéf, území bylo nasnímáno dronem v letové výšce přibližně 60 metrů nad terénem. Při výsledné střední kvadratické chybě modelu (RMSE) 7 až 9 cm, byly schopni z modelu zjistit hloubku sněhu od 0,2 do 194 centimetrů. Vyšší chybovost při určení hloubky sněhu se nacházela v místech z více členitým terénem, tedy na území ledovce. Toto zjištění vychází z faktu, že více členitý reliéf, v tomto případě se skalními úlomky, je obecně složitější při převedení do bodového mračna a vytváří tak příliš mnoho bodů, které jsou následně chybě zatřízeny a působí tak vyšší chybu modelu (Goetz, Brenning, 2019; Hendrickx a kol., 2019; Cook, 2017).

Pro metodu SfM je důležité více opakovaných letů dronu nad zájmovým územím, což může být velmi problematicky proveditelné především ve vysokohorských prostředích díky rychle se měnícím podmínkám. Pod tuto metodu spadají další metody, které jsou schopny řešit takovéto případy, kdy není zcela možné provést SfM s více nálety. Metoda Multiscale Model to Model Cloud Comparios je založena na jedné realizaci rekonstrukce povrchu, v závislosti na nadmořské výšce může docházet při použití této metody k chybě 10 cm až 3 metry (Hendrickx a kol., 2019). Další možností je použití metody popsané Jamesem, Robsonem a Smithem, která k vytvoření výsledku využívá dobře distribuované body v řídkém mračnu bodů (James, Robson, Smith a kol., 2017). V zasněženém terénu je však těžké využít řídkého mračna bodů, proto se jako nejvhodnější ukazuje přímo metoda Structure from Motion, bez dalších zásahů (Goetz, Brenning, 2019).

Studie prováděná v letech 2013 až 2014 na třech různých rozsáhlých území na Aljašce ověřovala, s jakou přesností je možné určit hloubku sněhu z leteckých snímků bez použití vličovacích bodů. Byla definována jedna referenční mapa, na které byly lokalizovány kontrolní vličovací body z pozemního měření. Ostatní mapy vytvořené ze snímkování byly pomocí koregistrace přiřazovány k referenčnímu snímku. Aby bylo možné takto použít koregistrace, v daném území bylo vždy určité místo v terénu, které nepodléhalo zakrytí sněhovou pokrývkou, jednalo se například o letištní ranvej, která je i v zimě udržována bez sněhu. Díky tomu byli autoři schopni odhadovat z digitálních modelů terénu vytvořených z koregistrovaných leteckých snímků hloubku sněhové pokrývky s 30 cm odchylkou. Vzhledem k tomu, že v jednom ze sledovaných území se hloubka sněhu pohybovala v rozmezí jednotek až desítek centimetrů, byla tato odchylka nedostatečná a autoři došli k závěru, že v takovém případě je důležité použít vličovací body (Nolan a kol., 2015).

Jiná studie prováděná v australské Tasmánii v roce 2013 se zaměřila na možnosti zjištění hloubky sněhu ze snímků získaných při použití bezpilotního letounu. Cílem bylo najít takové nastavení parametrů snímání, které zajistí, že použití komerční kamery a bezpilotního letounu bude vhodná metoda pro zjišťování hloubky sněhu v malém horském terénu za podmínky zachování co nejnižších nákladů. Jako u předchozí studie, autoři zjišťovali, s jakou přesností budou schopné odhadnout hloubku sněhu při použití vličovacích bodů a bez nich. Jako v předchozím případě, použití vličovacích bodů zaručuje vyšší přesnost. Při použití afinní transformace vztahené k přesně danému bodu viditelnému jak na modelu bez sněhu, tak na modelu se sněhem, je možné chybu eliminovat a zpřesnit, záleží však na počtu bodů, které je možné použít pro danou velikost území (Vander Jagt a kol., 2015).

Vysokohorský terén představuje pro fotogrametrii mnoho překážek a faktorů, které ovlivňují a znesnadňují mapování takovýchto oblastí. Bezpilotní letouny přinášejí nové možnosti a snižují náklady na mapování vysokohorských oblastí. Především na malém území mohou přinést výsledky, které by jinak nebylo možné získat díky rychle se měnícím meteorologickým podmínkám a velké výškové rozmanitosti terénu. Studie prováděná na území švýcarských a rakouských alp, se zabývala vlivem počasí na snímkování v závislosti na použití sensorů pro snímání. Bylo provedeno přes 100 letových misí, za použití sensoru snímajícího ve viditelné části spektra a blízké infračervené části elektromagnetického spektra. (NIR_UD a NIR830). Autoři na základě měření došli k závěru, že pro kvalitní výsledný model není vhodné snímkovat krátce po napadnutí čerstvé sněhové pokrývky a při vzniku difuzního osvětlení terénu, které vzniká buď při úplném zatažení oblohy nebo při zastínění horami kvůli nízké poloze slunce. Model vytvořený ze snímků vytvořených ve viditelné části spektra pak obsahoval „noisy errors“ způsobené amplitudou a množstvím mezer způsobených nízkým počtem bodů bodového mračka. Jako vhodné řešení se jevil model vytvořený na základě snímání území pomocí filtru NIR830 (Bühler a kol., 2017).

Pro mapování sněhové pokrývky lze také využít metodu laserové altimetrie, tedy skenování terénu pomocí Lidaru. Deems, Painter a Finnegan (2013) zkoumali možnosti skenování sněhové pokrývky a optimální nastavení při skenování ve vysokohorském terénu. Lidar může přinést velmi přesné výsledky měření sněhové pokrývky, z takto získaných dat lze jednoduše získat informaci například o SWE (obsahu vody ve sněhu), je však velmi důležité přesně a podrobně předem plánovat let a skenování, jelikož rozmanitost vysokohorského terénu může při standardním nastavením letového plánu způsobit mnoho chyb a děr ve výsledném modelu terénu. Příliš rozmanitý a strmý terén může způsobit opožďování zpětného paprsku a způsobit tak špatné zatřídění. Je tedy nutné při plánování letových linií brát ohled na rozlohu území a především výšku letu nad strmými úseky (Deems, Painter, Finnegan, 2013).

Využití fotogrammetrických metod při zkoumání sněhu v České republice

V České republice bylo bezpilotních letounů k určení výšky sněhové pokrývky použito ve studii *Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry*. Autoři této studie snímali dvě území s rozlišným terénem, aby zjistili, zda lze stanovit výšku sněhové pokrývky ze snímků pořízených z kamery umístěné na bezpilotním letounu. Zájmová území se nacházela v Národním parku Šumavu, první území představovala otevřená plocha, druhé území pak zalesněná oblast. Zároveň s určením sněhové pokrývky autoři zkoumali také index listové pokrývnosti (LAI index) a jejich vzájemný vztah. Na základě svých poznatků dospěli k výsledku, že pomocí bezpilotních letounů lze zkoumat sněhovou pokrývku (Lendzioch a kol, 2019).

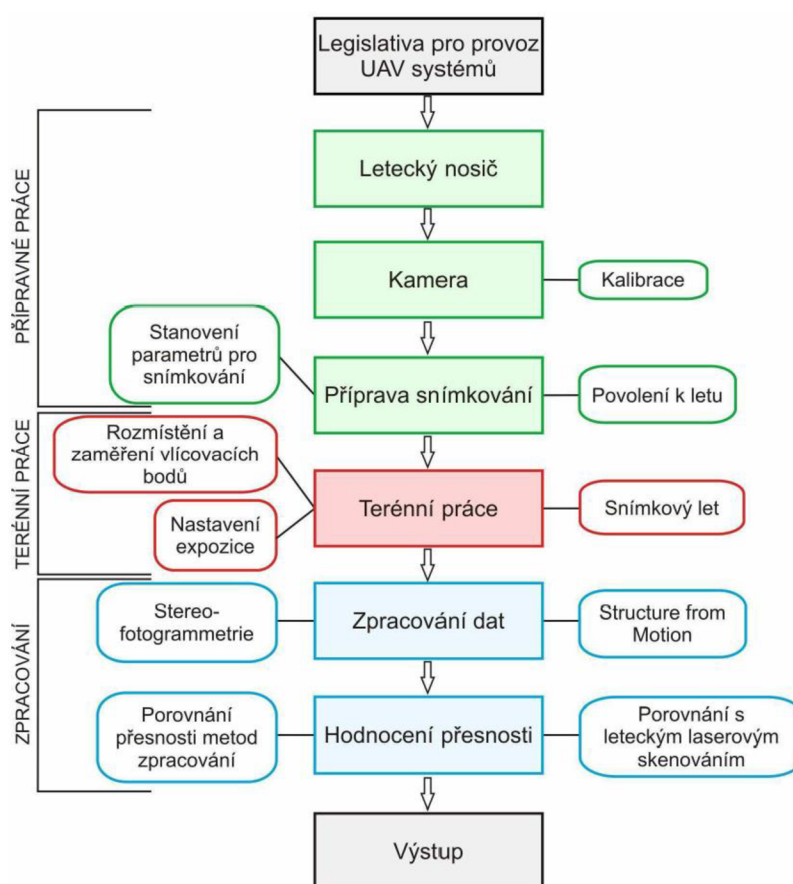
Vědci z přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze vyvinuli unikátní 3D technologii, která dokáže ze snímků pořízených pomocí dronů určit výšku sněhu. Základní ověření funkčnosti jejich technologie a testování bylo provedeno na území Šumavy. V roce 2019 bylo této technologie poprvé použito při zjišťování mocnosti sněhu ve sněhovém poli *Mapa republiky* v Krkonošském národním parku. Toto sněhové pole se nachází na svahu pod Modrým sedlem a na jižním úbočí Studniční hory celkově v rozpětí nadmořské výšky 1420 až 1455 m n. m. Jedná se o sněhové pole, na kterém se na území České republiky drží sníh nejdéle, podle aktuálních podmínek zde sníh roztává v období od konce května do srpna. Historicky zde byla měřena výška a mocnost sněhové pokrývky pomocí sněhoměrných latí, s postupným rozvojem

technologií se začaly používat k měření GNSS přijímače a v roce 2019 bylo poprvé k určení mocnosti sněhu využito bezpilotního letounu. Data o sněhové pokrývce využívají vědci ke zkoumání vlivu sněhu na místní mikroklima, dále z nich odvozují hydrologické podmínky a údaje o vodě v půdě (Lendzioch a kol., 2019).

4 FOTOGRAMMETRICKÉ A TERÉNNÍ ZPRACOVÁNÍ

V této diplomové práci je využito metod letecké fotogrammetrie, které představují letecké snímkování terénu, a následné zpracování takto pořízených dat, založené na rozdílu terénu se sněhovou pokrývkou a terénu bez sněhu. Následující kapitoly se věnují jednotlivým krokům, které bylo nutné provést před snímkováním, v jeho průběhu a při následném zpracování.

Kapitoly se ve svém úvodu zabývají problematikou obecně. Autorka při zpracování kapitoly Fotogrammetrické zpracování postupovala podle *Konceptu nasazení UAV technologií* (Mířijovský, 2013). Jednotlivé dílčí kroky viditelné na obrázku Obr. 1 jsou dále rozepsány v následujících podkapitolách první části zpracování, včetně jednotlivých měření a snímkování. Druhá část se pak zabývá samotným zpracováním a tvorbou výstupů.



Obr. 3 Koncept nasazení UAV technologií (Mířijovský, 2013)

4.1 Vymezení území

Vysoká Hole

Pro provedení případové studie a otestování přístupu letecké fotogrammetrie bylo vybráno území Vysoké Hole, nacházející se v Národní přírodní rezervaci Praděd (NPR Praděd) v Jeseníkách.

Katedra geoinformatiky dlouhodobě spolupracuje se Správou NPR Praděd a podílí se na zkoumání území Vysoké hole z hlediska orografických podmínek a zastoupení vegetace v oblasti.

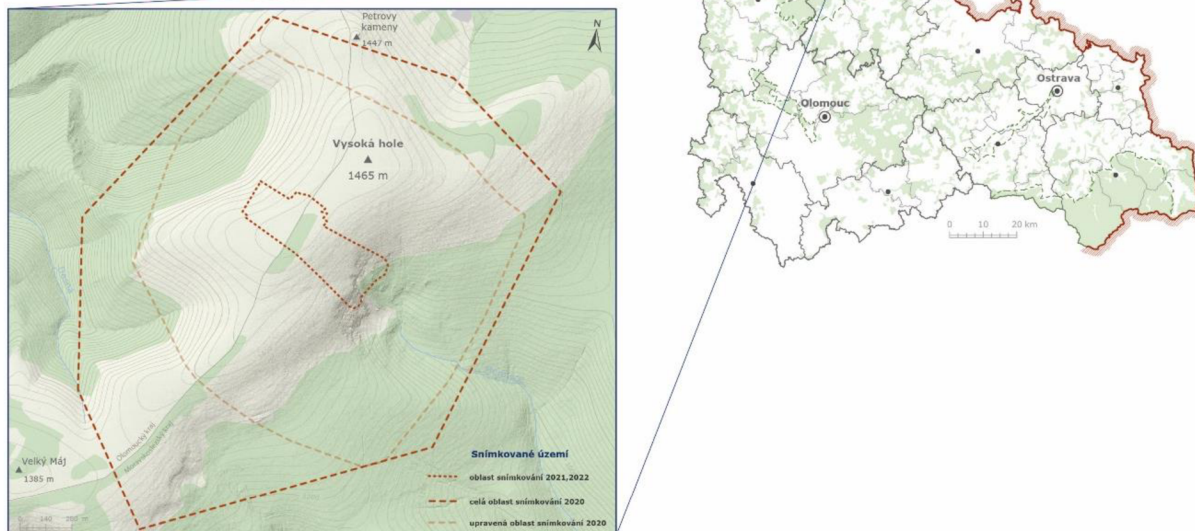
Vysoká Hole se nachází západně od vrcholu Praděd v pohoří Hrubý Jeseník, na pomezí Olomouckého a Moravskoslezského kraje, v okrese Bruntál, resp. Šumperk. S nadmořskou výškou 1465 m je druhým nejvyšším vrcholem Hrubého Jeseníku a osmou tisícovkou Čech, Moravy a Slezska. Vrchol je plochý bez výrazného převýšení o rozloze přibližně 20 ha. Na území Vysoké Hole se nachází plošina s alpskými holemi, velké kamenné moře a ledovcový kar Velká kotlina jinak nazývaný Velký kotel (Jeseníky – Turistický průvodce, 1991).

Jedná se o velmi významné území z hlediska výskytu bohaté a různorodé fauny a flory. Na území se nachází chráněné alpské druhy rostlin, které se jinak vyskytují pouze v Alpách, dále je zde zastoupeno také několik druhů endemitů. Pestrost a množství těchto rostlin a živočichů je dán výskytem horského ledovce v této oblasti, který zde zanechal jedinečné prostředí. Velká kotlina, pozůstatek ledovce, je místem rozlišných podmínek, různých tvarů reliéfu, sklonů a orientací svahů. Každoročně se zde navrší velké množství sněhu a tvoří se pravidelně laviny, které udržují místní klima přístupné pro rostlinná společenství a zamezují růstu stromů, které by jinak vytvořili hustý les. Jejichž rozvoj umožnilo vymizení borovice kleče v určitém období (Kočí a Kočí, AOPK ČR, 2019).

V minulosti byl vrchol Vysoké hole uměle osázen borovicí kleč, která se rozšířila i do dalších částí a zamezila tak růstu některých jiných rostlinných druhů. Proto je Správou NPR Praděd monitorována a ostrovy jsou jednou za čas vykáceny, díky tomu se některé druhy opět vrací. Také velmi rozšířené alpské trávníky a vřesoviště při svém rozšíření brání růstu některých druhů, proto jsou také jednou za čas vysekávány.

VYSOKÁ HOLE

území případové studie



Obr. 4 Mapa Vysoká hole (vymezení území případové studie)

4.2 Přípravné práce pro snímování

Před provedením jednotlivých snímování bylo nutné provést předletovou přípravu, která zahrnuje mimo jiné výběr lokality, zajištění povolení k letu, kontrolu území, kontrolu meteorologické situace, vytvoření letového plánu, stanovení parametrů snímování.

Pro první snímování byly tyto přípravné práce prováděny s ohledem na provedení mapovacího letu za pomoci letecké kamery IGI DigiCam z letadla Cessna 172. V ostatních případech pak byly práce prováděny pro snímování pomocí UAV zařízení.

4.2.1 Výběr území a povolení k letu

Diplomová práce má za cíl otestovat vybrané metody na území případové studie situované do oblasti Vysoké hole, nacházející se v pohoří Jeseníky (viz kapitola 4.1 *Vymezení území*). Díky tomu nebylo nutné provádět práce nutné pro výběr lokality, byla pouze určena konkrétní oblast pro provedení snímkového letu. Vybrané území se však nachází v Národní přírodní rezervaci a můžou se na něj vztahovat zvláštní pravidla pro provedení letu.

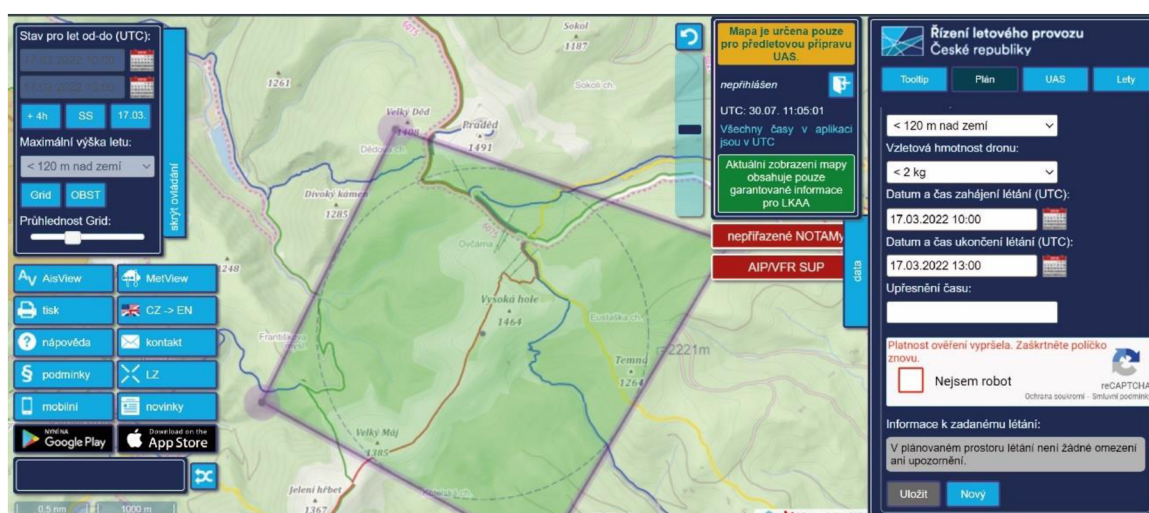
Pro oba způsoby provedení mapování terénu je důležité zajistit povolení k letu a řídit se aktuálně platnou legislativou. V rámci území České republiky jsou rozeznávány čtyři třídy letových prostor, jejichž hranice jsou vymezeny letovými hladinami (Flight level, FL). Každý takto vymezený prostor má dané své využití, které jsou popsány v tabulce Tab. 1. Pro účely této práce bylo využito prostoru třídy G.

Tab. 1 Letové prostory v ČR, zdroj: VFR příručka ČR vydaná Leteckou informační službou ŘLP ČR, s.p.

VZDUŠNÝ PROSTOR ČESKÉ REPUBLIKY			Letové povolení
Třída	Popis		
C	Flight Level specifika minimum VMC	od FL 95 do FL 660 řízený prostor, vyžadováno oboustranné radiové spojení min. dohlednost 5 km, rozestup od oblačnosti 300 m vertikálně a 1500 m horizontálně	ano
D	Flight Level specifika minimum VMC	CTR a TMA (řízené okrsky a koncové řízené oblasti) řízený prostor, vyžadováno oboustranné radiové spojení min. dohlednost 5 km, rozestup od oblačnosti 300 m vertikálně a 1500 m horizontálně	ano
E	Flight Level specifika minimum VMC	od 300 m AGL do FL 95 neřízený prostor min. dohlednost 5 km, rozestup od oblačnosti 300 m vertikálně a 1500 m horizontálně	ne
G	Flight Level specifika minimum VMC	do 300 m AGL neřízený prostor, lze létat s UAV min. dohlednost 1500 m, létat lze pouze při viditelnosti VFR (Visual Flight Rules)	ne

*VMC = minima letové dohlednosti a vzdálenosti od oblaků; AGL = Above Ground Level (nad zemí)

Kromě letových prostorů je také nutné se při plánování a následném provedení letu řídit i dalšími pravidly, informace lze získat například v Plánu využití vzdušného prostoru nebo v mapové aplikaci Řízení letového prostoru AIS View, respektive Dron View, pro plánování snímkového letu pomocí UAV zařízení. Tato aplikace sloužila ke kontrole dočasně vyhrazených a omezených prostor a ke zjištění navigačních výstrah, které by mohly být v den snímkování aktivovány. Z obrázku Obr. 5 je patrné, že pro poslední zimní snímkování dne 17.03.2022 nebyly ve vymezeném prostoru žádná omezení ani upozornění, stejně jako ve všech dalších dnech snímkování. Jak již bylo zmíněno výše, vybrané území se nachází v lokalitě spadající pod ochranu přírody a vztahují se na ni pravidla pro zvláštní povolení letu z důvodů ochrany životního prostředí, vodních zdrojů, živočichů nebo vegetace. Povolení k letu tedy získal vedoucí diplomové práce po domluvě se Správou CHKO Jeseníky.



Obr. 5 Aktuální situace ŘLP pro den 17.03.2022, zdroj: <https://dronview.rlp.cz/>

4.2.2 Kontrola území a meteorologická situace

Vzhledem ke vzdálenosti území případové studie předem neproběhla kontrola území přímo v terénu, ale byla využita ortofotomapa vytvořená ze snímkování na podzim 2019 provedeného vedoucím práce a letecké snímky dostupné online v mapové aplikaci Google Maps a Mapy.cz aktuální pro konkrétní roky. Díky tomu bylo předem stanoveno přibližné území pro snímkování jak letadlem, tak následně dronem a vybrána místa pro umístění vličovacích bodů.

Znalost meteorologické situace je velmi důležitá pro provedení snímkování. Především bezpilotní zařízení za špatné meteorologické situace nemůžou vzlétnout, i pro letadlo platí pravidla za kterých by při zhoršených podmínkách nesmělo vzlétnout. Proto byl vždy předem stanoven určitý týden, ve kterém bylo plánováno provést snímkování a rozhodování pak probíhalo ze dne na den podle meteorologické předpovědi pro konkrétní den. Sledována byla především rychlost větru a viditelnost, potažmo oblačnost a případné přehánky sněhové či dešťové.

Kontrola území i podrobnější popis meteorologické situace jsou konkrétně popsány v kapitole 4.3.1 Vličovací body u jednotlivých popisů provedených snímkování.

4.2.3 Parametry snímkování a plán letu

Jako parametry snímkování se určují výška letu, prostorové rozlišení snímků a stanovení ohniskové vzdálenosti kamery, měřítko snímku a délka základny mezi středy snímků. Obvykle je dána ohnisková vzdálenost a požadovaná minimální prostorová rozlišovací schopnost snímku, na základě těchto parametrů se pak dopočítávají ostatní parametry.

Výška letu se řadí mezi základní parametry pro provedení snímkování a má přímý vliv na prostorovou rozlišovací schopnost a velikost zabírané scény. Stanovení výšky letu se musí řídit i podle platné legislativy a technických specifikací použitého UAV zařízení.

Minimální prostorová rozlišovací schopnost GSD (Ground Sample Distance) je hodnota, která udává skutečnou vzdálenost v terénu zaznamenanou jedním pixelem kamery, určuje tedy vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími středy pixelů. Při vyšší hodnotě GSD je sníženo prostorové rozlišení obrazu, detaily jsou hůře viditelné. Je tedy důležité zvolit hodnotu GSD podle nejmenšího hodnoceného prvku na snímku. K identifikaci takového prvku je vhodné, aby byl na snímku tvořen 4–9 pixely neboli jeho velikost musí být 4–9 × větší než hodnota GSD (Comer a kol., 1998).

Jednotlivé parametry snímkování se navzájem ovlivňují, například hodnota GSD ovlivňuje výšku letu. Ze vztahu (3)

$$Hg = \left(\frac{GSD \times f}{p} \right), \quad (3)$$

kde Hg představuje průměrnou výšku letu nad terénem, GSD = Ground Sample Distance, f značí ohniskovou vzdálenost a p je skutečná velikost obrazového prvku senzoru), vyplývá, že čím větší hodnota GSD, tím vyšší výška letu nad terénem.

Ohnisková vzdálenost definuje použitý objektiv kamery. V dnešní době lze použít jakoukoliv kameru, existuje mnoho druhů objektivů s různou vzdáleností. Při nižší výšce letu je vhodné použít objektivy s kratší ohniskovou vzdáleností, od 20 mm. Oproti

tomu výhodou při použití kamery s delší ohniskovou vzdáleností je menší radiální distorze a vyšší prostorové rozlišení snímku, které záleží také na výšce letu. Jedná se o objektivy s ohniskem dlouhým 150-300 mm při výšce letu 1000 až 1500 m (Pavelka, 2009).

Při použití UAV zařízení se používají nejčastěji širokoúhlé nebo normální objektivy (Mířijovský, 2013).

Měřítka snímku vychází ze znalosti výšky letu a ohniskové vzdálenosti kamery, na základě těchto parametrů lze měřítko snímku dopočítat podle vztahu (4)

$$m_s = \frac{H}{f}, \quad (4)$$

kde m_s odpovídá měřítku snímkování (1 : m), H představuje výšku nad srovnávací rovinou a f je ohnisková vzdálenost. Měřítka snímku odpovídá snímku v době pořízení, při zobrazení snímku na zobrazovacím zařízení pak může být měřítko odlišné. Při vynásobení měřítka snímku rozměrem snímače lze získat výsledný rozměr fotografie (Minařík, 2015).

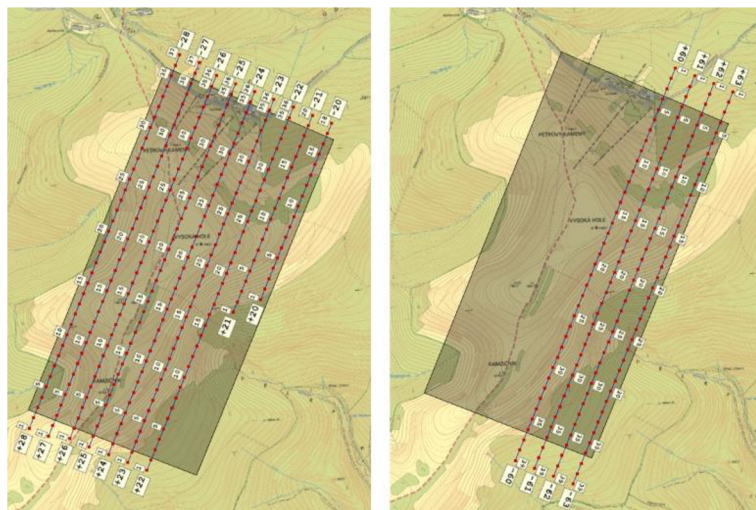
Délka základny udává vzdálenost mezi středy snímků a je závislá na volbě překryvu dvou snímků. V letecké fotogrammetrii se udává vhodný podélný překryv od 60 % a příčný od 40 %, v UAV fotogrammetrii překryv ovlivňuje použití objektivu. Při použití širokoúhlých objektivů dosahuje radiální distorze snímku vysokých hodnot a je proto vhodné použít příčný i podélný překryv okolo 80 % (Mířijovský, 2013).

Výpočty těchto, ale i dalších potřebných parametrů proběhly v programu IGIPlan pro letadlo a pro dron v programu DJI GS Pro. Tato část předletové přípravy byla provedena vedoucím práce.

Snímkování v zimním období 2020

Předletová příprava se při tomto snímkování týkala snímkování pomocí letadla Cessna 172 a byla provedena vedoucím práce. Nastavení jednotlivých parametrů proběhlo ve výše zmíněném programu IGIPlan. Plánovaná letová výška byla nastavena na 500 m nad terénem, při této výšce odpovídá velikost jednoho pixelu 6 cm, podélný překryv tvořil 80 % a příčný 60 %.

Jelikož se v tomto případě jednalo o snímkování celého území Vysoké hole, letový plán obsahoval devět letových linií (Obr.6).

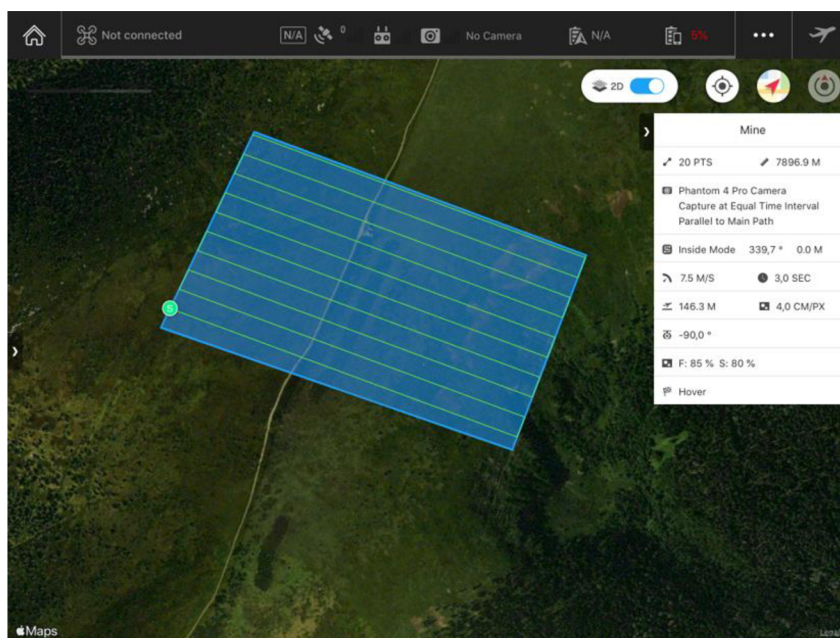


Obr. 6 Letové linie pro snímkování 08.03.2020

Snímkování v zimním období 2021, 2022 a letním období 2021

Při dalším snímání bylo vybráno konkrétní malé území v centrální oblasti Vysoké Hole (Obr.13). V této oblasti se nachází jak vrcholová část území, tak také část Velkého kotle, což je lavinové území. Jsou tak zahrnuty místa s hloubkou sněhové pokrývky od jednotek centimetrů až po metry. Tato oblast byla vybrána na základě vyhodnocení předchozího snímání celého území Vysoké Hole a porovnání s daty z pozemního měření dodaného správou NPR Praděd. Dodané pozemní měření probíhalo ve čtyřech transektech, z nichž jeden leží uprostřed vybraného zájmového území pro všechna další snímání (Obr.13).

Snímání nad vybranou menší oblastí byla provedena za pomoci bezpilotního zařízení DJI Phantom 4 Pro. Plán letu byl vytvořen v aplikaci DJI GS Pro. Pro plánovanou výšku letu okolo 150 m nad terénem, odpovídala velikost jednoho pixelu 4 cm. Podélný překryv představoval 85 % a příčný 80 %. Letové osy jsou vyobrazeny na Obr. 7. Předletovou přípravu i snímání opět provedl vedoucí práce.



Obr. 7 Nastavení parametrů a letových os v aplikaci DGI GS Pro

4.3 Práce v terénu

Jednotlivým snímáním území předcházela práce v terénu zahrnující rozmístění a zaměření vřícovacích bodů a zaměření kontrolních bodů s výškou sněhové pokrývky.

Snímání Vysoké hole bylo provedeno třikrát v zimním období a dvakrát v období bez sněhu. Každému snímání předcházely přípravné práce v terénu, které zahrnovaly nalezení vhodných míst pro umístění a zaměření vřícovacích bodů, a také zaměření referenčních bodů s výškou sněhové pokrývky. Území Vysoké hole spadá pod národní přírodní rezervaci Praděd a je zde zakázáno chodit mimo vyznačené trasy. Pro provedení terénních prací bylo nutné se předem dohodnout se Správou CHKO Jeseníky o volném pohybu v této oblasti.

První snímání terénu bez sněhu bylo provedeno vedoucím práci na podzim 2019 jako součást projektu monitorování vegetace a poskytnuto již ve zpracované podobě, proto v této kapitole nebude více rozvedeno.

4.3.1 Vlíčovací body

Vlíčovací body, jinak označené jako Ground Control Points (GCP) jsou body se známou souřadnicí X, Y, Z. Musí být snadno identifikovatelné na pořízeném snímku, jelikož k jejich středu se vztahuje změřená souřadnice. Přesné definování vličovacích bodů je důležité pro další zpracování snímků, na jejich základě se počítají prvky vnitřní a vnější orientace. Proto je nutné předem správně určit podobu použitého vličovacího bodu s ohledem na podmínky daného terénu, výšku letu a hodnoty GSD (Ground Sample Distance) (Miřijovský, 2013).

Signalizace vličovacího bodu v terénu může být provedena uměle či přirozeně. Body musí být v terénu zřetelně identifikovatelné, musí být dobře určitelný střed bodu a velikost by měla být zhruba pětinašobná oproti hodnotě GSD. Pro snímkování bez sněhové pokrývky byly použity jako vličovací body staré kompaktní disky o průměru 12 cm. Tyto disky nejsou vhodné do terénu se sněhovou pokrývkou, protože by nebyly dostatečně rozlišitelné. Nemohla být použita ani signalizace barevným sprejem, jelikož se jedná o území podléhající ochraně krajiny a neekologický signalizační sprej by zůstal dlouho vidět na sněhu. Proto byly jako signalizace zvoleny body vytvořené z černého pevného igelitu, který nepodléhá vlhkosti ani jiným vlivům. Body byly ve tvaru čtverce o velikosti 30 × 30 cm, každý čtverec byl ukotven ve sněhu pomocí čtyř roxorových tyčí s průměru 4 mm a délce 25 cm, provedení je zobrazeno na obr. 8. Body byly rozmístěny rovnoměrně po zájmové oblasti, jejich počet se pohyboval mezi sedmi až deseti body v závislosti na velikosti území.



Obr. 8 Provedení vličovacího bodu (Zdroj: Autor práce)

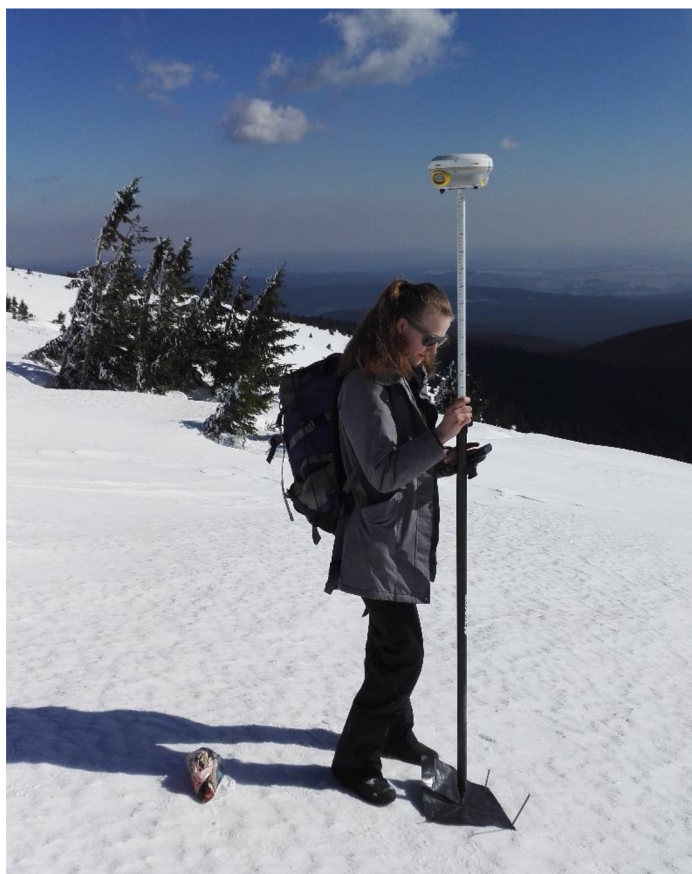
Zaměření vličovacích bodů

Každý bod byl zaměřen technologií GNSS RTK pomocí přístroje GPS Trimble R4 vybaveného SIM kartou pro možnost přenosu korekčních dat pro metodu RTK pomocí mobilního signálu. Měřená souřadnice je vztahena ke středu čtverce každého vličovacího bodu (obr. 8).

Při měření pomocí technologie GNSS se informace o poloze určuje pomocí družic. Geometrické uspořádání družic a vzdálenost od nich určuje kvalitu přesnosti měřené souřadnice. Kvalita přesnosti je ovlivněna parametrem snížení přesnosti (DOP – Dilution of Precision). Tento parametr je vypočítáván na základě vzdálenosti od polohy jednotlivých družic a mezi nimi. Čím nižší je hodnota parametru DOP tím přesnější je určení polohy, naopak s vyšší hodnotou DOP je přesnost měření určena s horší kvalitou

a větší chybou. Snížení přesnosti je rozlišeno podle dalších parametrů, které ovlivňují přesnost na relativní (RDOP), polohové (PDOP), horizontální (HDOP), vertikální (VDOP) a časové (TDOP). Nejčastěji používaný, a v této práci dále sledovaný, je polohový parametr snížení přesnosti PDOP, který ovlivňuje horizontální a vertikální měření. (Rapant, 2002). Proto je vhodné před měřením v terénu zjistit hodnoty PDOP předem, například pomocí online nástroje *Trimble GNSS Planning Online* (Dostupné z: <https://www.gnssplanning.com>).

Při špatném přenosu mobilního signálu bylo využito rychlé statické metody s delší observací na jednotlivých bodech. Následně byly při postprocessingu staženy RINEX soubory pro dané období dostupné ze stanice CZEPOS Jeseník.

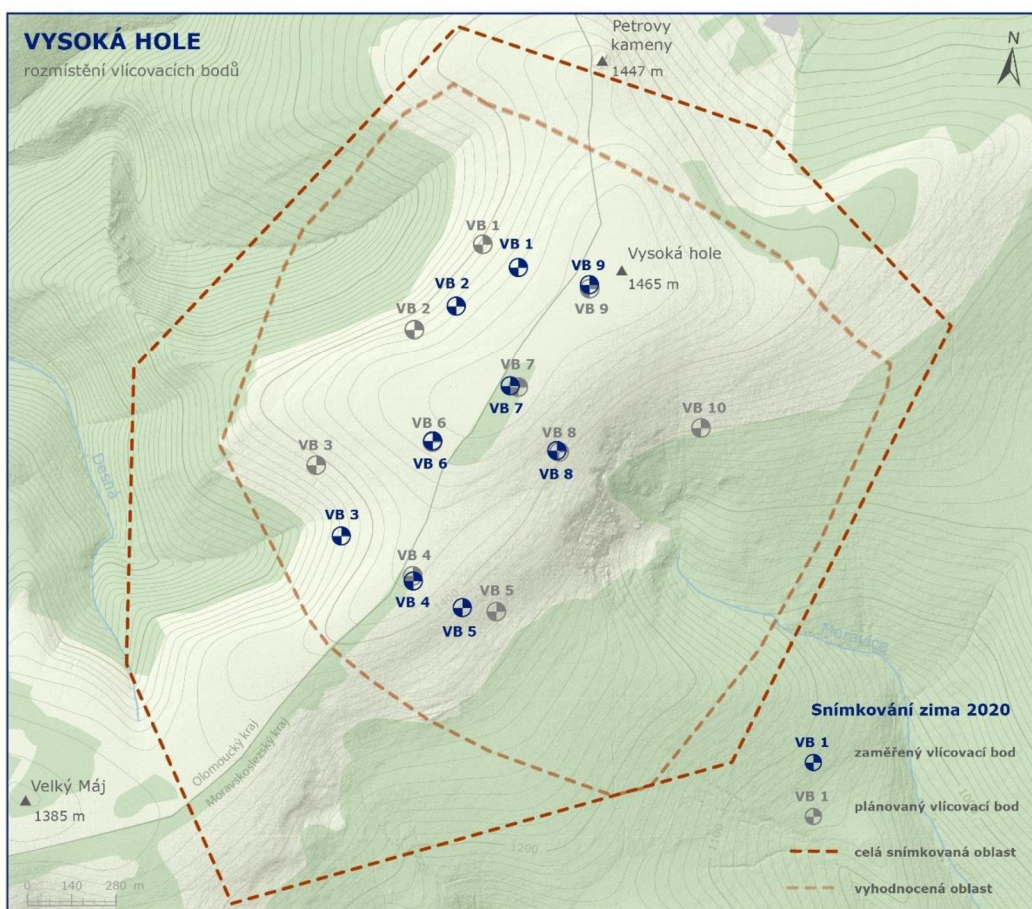


Obr. 9 Zaměření vřícovacího bodu, souřadnice vztažena ke středu čtverce (Zdroj: Vedoucí práce)

Vzhledem k tomu, že zkoumaná lokalita se nachází na chráněném území, vřícovací body byly umístěny v terénu před jednotlivým snímkováním a ihned po ukončení letu odstraněny, aby nedošlo k narušení rázu krajiny.

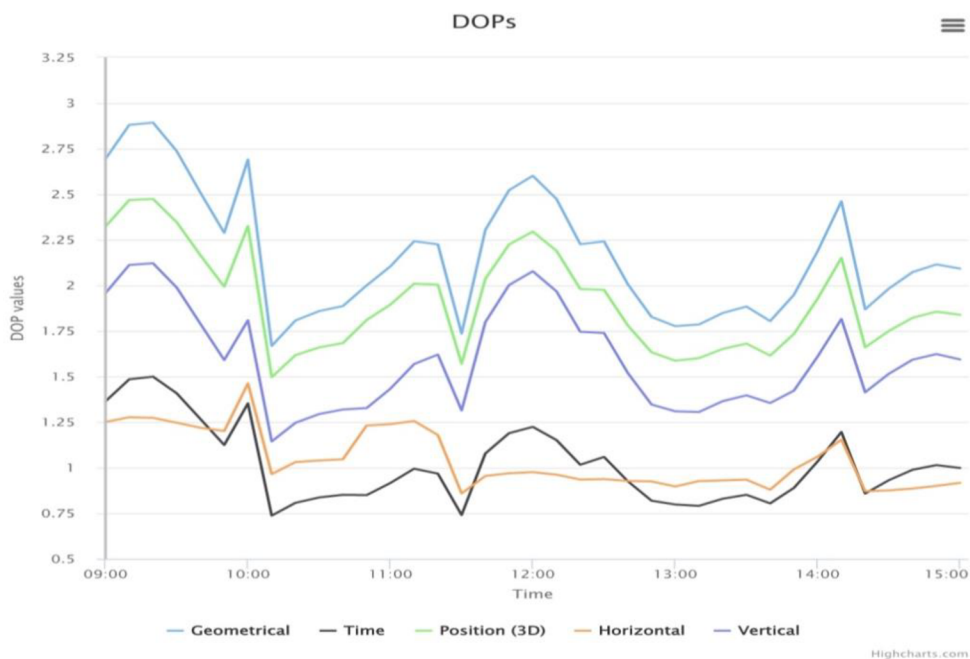
Snímkování v zimním období 2020

První zimní snímkování území bylo provedeno v březnu 2020, kdy bylo zahrnuto celé území Vysoké hole. Bylo tedy nutné rozmístit vřícovací body rovnoměrně po celé zájmové oblasti. Na Vysokou holi navazuje na východní straně lavinové území Velké kotliny, plánování rozmístění vřícovacích bodů tedy muselo být přizpůsobeno bezpečnému pohybu po sněhu. Na území o rozloze tři km² bylo ve výsledku umístěno devět vřícovacích bodů, jejich rozmístění v rámci oblasti je znázorněno na Obr.10 modrou barvou.



Obr. 10 Návrh rozmístění a reálné zaměření vřícovacích bodů – zimní období 2020

Rozmístění bodů bylo předem určeno pomocí ortofoto snímku tak, aby body byly rovnoměrně rozprostřeny po území, následně byly body vyexportovány ve formátu GPX, nahrány do přístroje GPS a orientace v terénu probíhala pomocí těchto předpřipravených bodů (na Obr. 10 jsou vyznačeny šedou barvou). Výsledné umístění pak podléhalo místním podmínkám terénu, výšce sněhu a vzdálenosti od stromů či keřů, které by zamezily rozpoznání daného bodu na snímku. Při rekognoskaci reálného stavu terénu bylo zjištěno, že bod č.10 byl umístěn do úbočí srázu Velkého kotle, za výstražnou ceduli ohraničující lavinové území, proto byl ze zaměření vypuštěn. Každý bod byl následně zaměřen technologií GNSS RTK pomocí přístroje GPS Trimble R4, jak je již uvedeno výše. Jak bylo již výše zmíněno, před samotným měřením v terénu byla provedena analýza dostupných družic pomocí online nástroje Trimble GNSS planning online. Měření souřadnic vřícovacích bodů v terénu bylo plánováno na dopolední hodiny. Jak ukazuje graf na obr. 3, nejpřesnějšího měření bylo možné dosáhnout v čase 10.00-11.30. Naopak okolo poledne měla být polohová přesnost v důsledku špatného rozložení družic výrazně zhoršena.



Obr. 6 Graf vývoje parametru snížení přesnosti (DOP), zdroj: Trimble GNSS Planning Online

Rapant uvádí, že ideální uspořádání družic je při hodnotě PDOP nižší než 4, při hodnotě 5 až 7 ještě lze měřit, ale při hodnotě nad 7 jsou družice ve špatném uspořádání a měření může být velmi nepřesné. Tomu odpovídá i reálná situace v terénu, osm z devíti bodů bylo měřeno zhruba od 9. do 12. hodiny bez větších problémů, pokud přístroj GPS hlásil vysokou hodnotu PDOP, s ohledem na terén, byl konkrétní vlíčovací bod posunut o několik metrů, dokud nebyly vhodné podmínky pro zaměření souřadnice. Při posledním měřeném bodu č.1 dosahovala hodnota PDOP čísla 11. Při pokusu o nalezení vhodnějšího místa následně vypadal i signál GPS, bod tedy nebylo možné změřit ani pomocí rychlé statické metody, proto byl provizorně změřen pomocí mobilního telefonu s aplikací změření GPS polohy přes mobilní síť, tímto měřením však bylo měřeno s odchylkou 5 metrů, proto byl z výsledného zpracování bod č.1 vyloučen. Na obr. 12 lze z náhledu zápisníku staženého z přístroje GPS vidět jednotlivé hodnoty u změřených bodů z prvního zimního snímkování 08.03.2020.

Seznam GNSS observací a průměrných souřadnic

Číslo bodu	Třída	Y	X	H	H-ant	GDOP	PDOP	Datum	Počátek-konec	m. 3Dkv.
Stkd9	M	543198.889	1069526.677	1463.213	2.000	1.9	1.4	08.03.2020	09:14:42-09:15:41	0.011
Stkd8	M	543301.516	1070051.106	1411.882	2.000	2.3	1.7	08.03.2020	09:41:41-09:42:40	0.010
Stkd7	M	543448.446	1069846.699	1464.119	2.000	2.1	1.7	08.03.2020	11:57:51-11:58:10	0.015
Stkd6	M	543692.583	1070020.354	1455.214	2.000	2.5	2.0	08.03.2020	10:03:08-10:04:07	0.012
Stkd5	M	543599.290	1070545.565	1380.580	2.000	1.9	1.5	08.03.2020	11:01:08-11:01:20	0.019
Stkd4	M	543753.626	1070461.692	1419.435	2.000	1.6	1.2	08.03.2020	10:37:29-10:38:28	0.010
Stkd3	M	543980.470	1070319.950	1375.662	2.000	2.3	1.9	08.03.2020	11:25:49-11:26:08	0.020
Stkd2	M	543618.327	1069594.301	1426.262	2.000	1.7	1.3	08.03.2020	12:11:40-12:11:59	0.018
Stkd1	M	543420.548	1069472.637	1436.262	2.000	12.7	11.3	08.03.2020	13:30:40-13:31:59	1.112

Obr. 7 Zápisník z měření 08.03.2020

Snímkování v zimním období 2021

Druhé zimní snímkování proběhlo 10. března 2021. Na základě zpracování výsledků prvního snímkování bylo, po konzultaci s vedoucím práce, území pro analýzu sněhové pokrývky zmenšeno a jako zájmová oblast byla vybrána pouze středová část území Vysoké hole. Tato oblast byla vybrána tak, aby kopírovala transekt s měřenou výškou sněhu správou NPR Praděd (kapitola 2. *Použitá data*), celková rozloha tohoto zájmové území je 0,21 km². Po zkušenosti z prvního snímkování nebyly vřícovací body navrženy předem, ale určeny přímo v terénu podle navrženého území pro snímkování a reálného stavu terénu. Celkem bylo umístěno a zaměřeno osm vřícovacích, ty jsou znázorněny na Obr.13 zeleně.

Předem byly opět pomocí online nástroje Trimble GNSS Planning zjištěny vhodné podmínky pro práci v terénu, na jejich základě měření probíhalo v dopoledních hodinách.

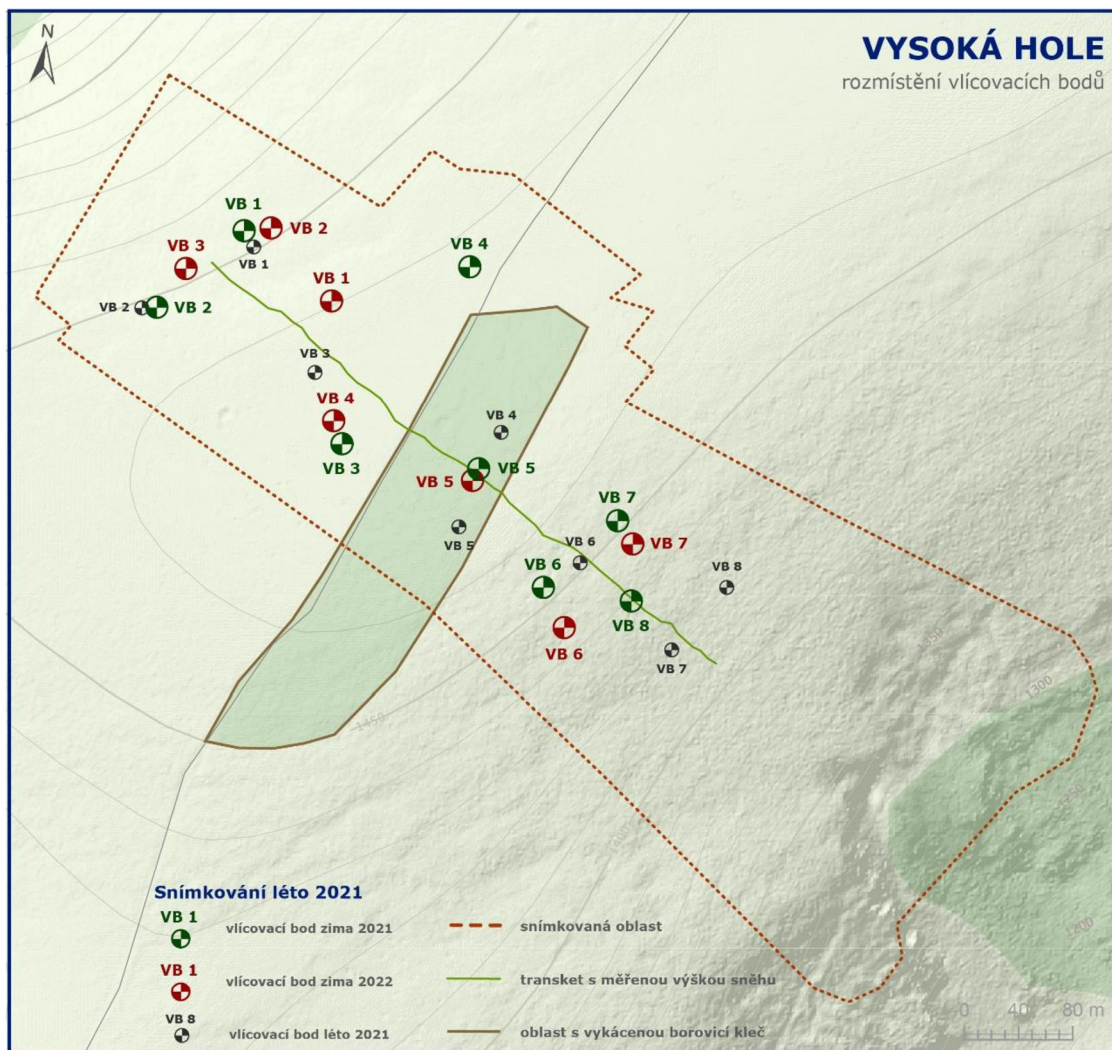
Nedílnou součástí plánování měření a snímkového letu je také předpověď počasí. Při prvním snímkování v roce 2020 bylo zcela jasné počasí, proto byl při plánování tohoto měření předem vybírán den, ve kterém mělo být spíše polojasné počasí, ale bez sněhových či deštivých přeháněk, aby mohl být otestován vliv zastínění při snímkování a následném zpracování dat. Dále byla sledována viditelnost a v neposlední řadě rychlost větru, která ovlivňuje především snímkový let. Podle předpovědi byl tedy vybrán den 10. března jako nejlépe vyhovující výše zmíněným podmínkám počasí, při reálném provádění terénních prací bylo skoro jasné a nad částí zájmové oblasti byly mraky vrhající temný stín, vliv zastínění tedy mohl být otestován. Při následném zpracování bylo zjištěno, že při takto zastíněném území není střed vřícovacího bodu signalizovaného černou barvou zcela přesně možné určit. Tato problematika bude rozvedena níže, v samotném zpracování dat.

Snímkování v zimním období 2022

Poslední snímkování terénu Vysoké hole se sněhovou pokrývkou proběhlo v březnu 2022. Na základě předpovědi a aktuálního počasí byl po dvou odkladech zvolen pro snímkování 17. března. Aktuální podmínky však neodpovídaly předpovědi jasného dne, díky tomu však bylo možné zahrnout do zpracování snímky získané z polojasného počasí, kdy byla polovina oblohy zakryta mraky a zájmové území leželo ve stínu.

Rozmístění vřícovacích bodů se tentokrát řídilo podle bodů zaměřených v předchozím roce, i tentokrát bylo jejich aktuální rozmístění přizpůsobeno terénu. Reálné rozmístění vřícovacích bodů z tohoto měření je zobrazeno na Obr.13 červeně.

I tentokrát bylo předem provedeno zhodnocení podmínek pro měření pomocí výše zmíněného online nástroje a znovu bylo měřeno v dopoledních hodinách. Při reálném provádění terénních prací ale nebyly vhodné podmínky přijímání mobilního signálu pro přenos korekčních dat nutných pro měření pomocí metody Real Time Kinematic (RTK), proto byly body zaměřeny rychlou statickou metodou.



Obr. 13 Rozmístění vřícovacích bodů při snímkování v březnu 2021, 2022 a v červnu 2021

Snímkování terénu bez sněhové pokrývky 2021

Bodové mračno vytvořené ze snímkování na podzim 2019 se ukázalo jako ne zcela dostačující k porovnání a stanovení výšky sněhu ve vrcholové části Vysoké hole z důvodu vysekání borovice kleč v období před provedením prvního zimního snímkování, tento výsek se týká i všech následujících porovnání snímkování, proto bylo po konzultaci rozhodnuto o provedení ještě jednoho snímkování území bez sněhové pokrývky. Pro potřeby porovnání snímků bylo dostačující zmapovat pouze vybranou část, kopírující zimní snímkování 2021 (Obr. 13).

V tomto případě byly jako vřícovací body použity kompaktní disky o průměru 12 cm, uchyceny do terénu pomocí kovových hřebů. Celkem bylo rozmístěno osm vřícovacích bodů, k jejichž středům se vztahovalo zaměření souřadnice metodou RTK pomocí GNSS přijímače Trimble R4. Body byly v terénu rozmísťovány stejným způsobem jako je popsán v zimním období, na základě navigace pomocí mapové aplikace Mapy.cz probíhala orientace v terénu podle bodů zaměřených v březnu 2021. Aktuální body byly rozmístěny podle kvality dostupného GPS signálu, s ohledem na reliéf terénu.

Provedení snímkování bylo plánováno na dřívější termín, ale kvůli meteorologickým výstrahám před silným větrem bylo den předem zrušeno a odloženo. I v den provádění zaměření a snímkování (28.06.2021) foukal silný vítr

4.4 Snímkový let

Samotné letecké snímkování provedl vedoucí diplomové práce, první snímkování bylo provedeno 8. března 2020 z letadla Cessna, let byl veden ve výšce 500 m nad terénem, trval půl hodiny, začínal v 13.15 hodin. Počasí bylo skoro jasné, oblačnost se vyskytovala pouze ojediněle a nevrhala temné stíny.

Ostatní snímkové lety naletěl vedoucí práce UAV zařízením DJI Phantom 4 Pro ve dnech 10. března 2021, 28. června 2021 a 17. března 2022, autorka diplomové práce byla také přítomna. Ve všech případech byla letová výška okolo 120 m nad terénem, let trval přibližně 20 minut a byl prováděn mezi 11.30h až 12.30h v závislosti na délce trvání terénních prací v konkrétním dni.

Dne 10. března 2021 byl let nad polovinou území opakován z důvodu přecházející oblačnosti, která vrhala na část území temný stín. Proto bylo vyčkáno na mezeru mezi oblačnostmi, kdy bylo možné dotčenou část území nasnímat ještě jednou bez zastínění. Pořízeno bylo 282 fotografií.

Dne 17. března 2022 byl let v polovině snímkování přerušen kvůli rychle se vybíjející baterii z důvodu velmi mrazivého počasí, po výměně baterie se dron napojil na přerušenu letovou osu a snímkování bylo dokončeno. Celkem bylo pořízeno 222 fotografií.

Snímkování provedené dne 28. června 2021 bylo plánováno na dřívější termín, ale několikrát muselo být den předem zrušeno a odloženo z důvodu meteorologické výstrahy před silným větrem. Silnější vítr foukal i v den snímkování, čemuž musela být věnována zvláštní pozornost při provádění letu dronem. Celkem bylo pořízeno 217 fotografií.

Detailnější popis parametrů letu a meteorologické situace v konkrétní dny jsou popsány v předchozích kapitolách a níže uvedeny v tabulce Tab. 2.

Tab. 2 Detaily jednotlivých snímkových letů

	datum	oblačnost	teplota	rychlost větru	nosič	ohnisková vzdálenost kamery	délka expozice	počet fotografií	prostorové rozlišení (v pixelech)
snímkování zima 2020	08.03.2020	skoro jasno	-5°C	11 km/h	Cessna 172	50 mm	1/1600 sec	319	10328×7760
snímkování zima 2021	10.03.2021	polojasno	-9°C	10 km/h	DJI Phantom 4 Pro	10 mm	1/1000 sec	282	5472×3648
snímkování zima 2022	17.03.2022	oblačno	-3°C	31 km/h	DJI Phantom 4 Pro	10 mm	1/800 sec	222	5472×3648
snímkování léto 2021	28.06.2021	skoro jasno	19°C	18 km/h	DJI Phantom 4 Pro	10 mm	1/800 sec	217	5472×3648

4.5 Zpracování dat

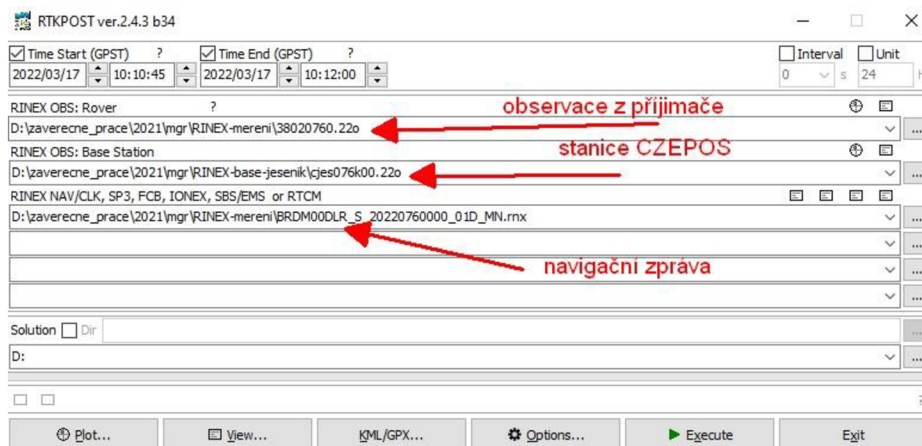
Data pořízená při snímkování a měření v terénu byla dále zpracována tak, aby bylo možné vytvořit digitální model sněhové pokrývky a na něm následně stanovit metriky.

Nejprve byla zpracována data z měření bez sněhové pokrývky a z nich vytvořeno bodové mračno (Dense Cloud) bez sněhové pokrývky. Následně byla zpracována jednotlivá měření ze zimních období a byla vytvořena bodová mračna se sněhovou pokrývkou pro jednotlivé roky. Zimní a letní bodová mračna byly od sebe odečteny a tím byl získán potřebný model sněhové pokrývky. Následující část práce popisuje jednotlivé kroky postupu při zpracování dat z terénního měření a snímkování. Zpracování pořízených snímků proběhlo v programu Agisoft Metashape Professional.

4.5.1 Zpracování zaměření souřadnic vřícovacích bodů

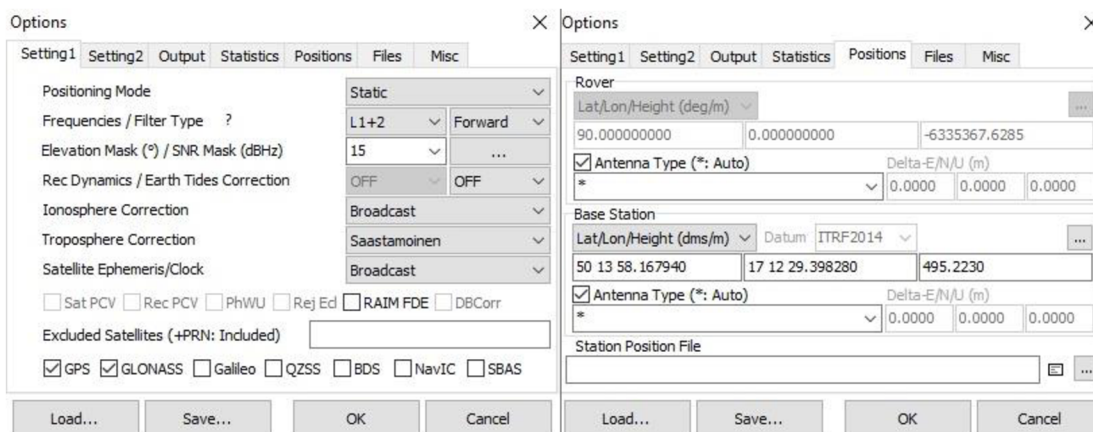
Zaměření vřícovacích bodů proběhlo kromě jednoho případu metodou Real Time Kinematic, která zaměřuje přesnou polohu souřadnice již v terénu. V postprocessingu měření byl z GPS přijímače vyexportován zápisník obsahující souřadnice a informace o přesnosti jednotlivých bodů (Obr.14). Tento zápisník pak byl převeden to textového souboru pouze s hodnotami souřadnic X, Y, Z a číslem měřeného bodu. Před začátkem měření byl v GPS přístroji nastaven souřadnicový systém S-JTSK, proto již nebylo nutné následně transformovat souřadnice při zaměření touto metodou.

V zimním snímkování 2022 však nebyl dostupný mobilní signál nutný pro měření metodou RTK, proto byly body v terénu zaměřeny rychlou statickou metodou, která potřebuje pokročilejší postprocessing. Ke zpracování měření byl využit program RTKLIB, konkrétně modul RTKPost, do kterého vstupovaly RINEX soubory dostupné ze stanice CZEPOS Jeseník, která je od místa měření vzdálena zhruba 19 km. Práce v programu není složitá, v prvním kroku se nastaví vstupní RINEX souborů z přenosného přijímače a RINEX souborů s korekcemi ze stanice CZEPOS, následně se zvolí navigační zpráva (Obr. 12).



Obr. 8 Nastavení vstupních RINEX souborů a navigační zprávy v modulu RTKPost

Dále je nutné omezit čas pro zpracování na měření v jednom konkrétním bodě. V nabídce *Options* se nastaví v záložce *Setting1*, že se jedná o zpracování statickou metodou (*Positioning Mode – Static*), vybere se zpracování pro frekvence L1 a L2, ve spodní části se pak vybere zpracování pomocí GPS a GLONASS navigačních systému. V záložce *Positions* se vyplní souřadnice stanice CZEPOS, na záložce *Files* se vyplní do kolonky *Satellite/Receiver Antenna* hvězdička (*), aby proběhlo načtení hodnot z RINEX souborů (Obr. 15).



Obr. 9 Nastavení parametrů v záložce *Options*

Výsledné souřadnice jsou pak exportovány v souřadnicovém systému WGS 84, proto je nutná jejich transformace do systému S-JTSK. Tato transformace proběhla v online INSPIRE službě *Transformace souřadnic* dostupné na stránkách geoportálu ČÚZK (Obr. 16).

Transformace souřadnic

Jednotlivé souřadnice

Souřadnice: Datum:

Transformace: ►

Výsledek:

Obr. 10 Transformace souřadnic

4.5.2 Zpracování snímků a tvorba bodového mračna v programu Agisoft Metashape

Podkapitola se zabývá jednotlivými kroky zpracování pořízených snímků v programu Agisoft Metashape Professional verze 1.8.3 build 14331. Výstupem této části zpracování je bodové mračno neboli Dense Cloud. Pracovní postup byl aplikován samostatně na každé snímkovací období, proto je výstupem pět modelů vytvořené autorkou práce, jedno bodové mračno bez sněhové pokrývky (léto 2021) a čtyři bodová mračna se sněhovou pokrývkou (zima 2020, 2021, 2022). Bodové mračno ze snímkování 2021 je vytvořeno dvakrát, jednou ze snímků bez stínu a podruhé ze snímků s přecházejícím stínem nad částí zájmového území. Druhé bodové mračno bez sněhové pokrývky (podzim 2019) není v této dílčí části práci zahrnuta, jelikož bylo vytvořeno již dříve vedoucím diplomové práce.

Před zpracováním snímků v programu Agisoft proběhla vizuální kontrola pořízených snímků za účelem případného vyřízení snímků, které by nebyly vhodné

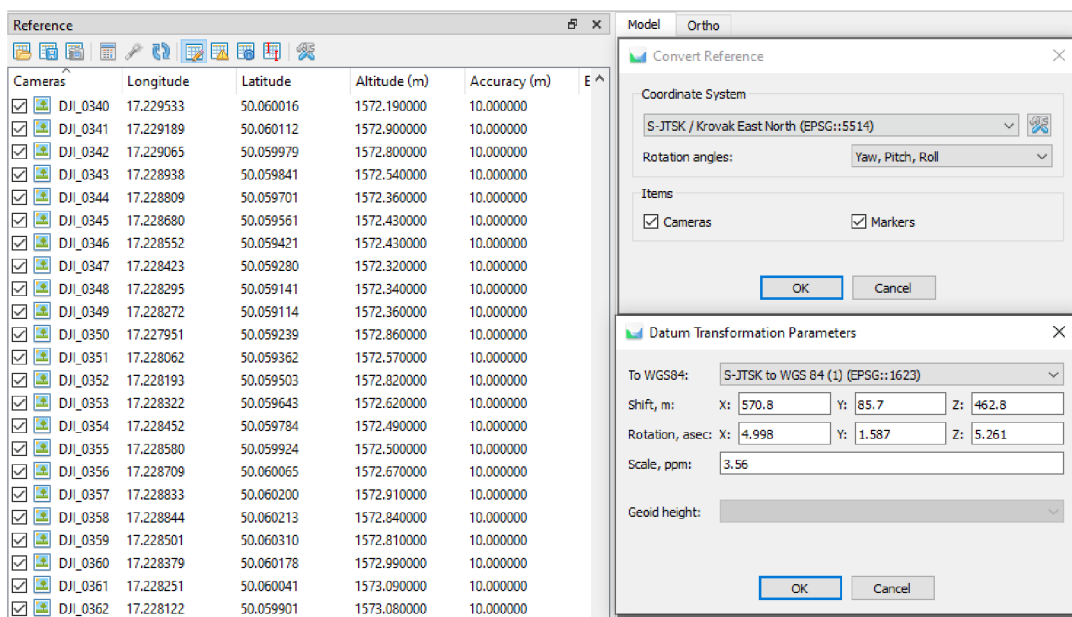
pro zpracování a mohlo by dojít ke špatnému složení snímků. Jedná se například o přehledové snímky nebo snímky s velkým smazem. Při kontrole snímků pořízených při snímkování v zimě 2021 byly vytvořeny dvě sady snímků z důvodu dvojitého snímání jedné části území (viz kapitola 4.4 *Snímkový let*) a do dalších kroků vstupovala samostatně sada obsahující snímky bez stínů a sada se zastíněnými snímky.

Následující dílčí kroky postupu jsou rozepsány obecně, jelikož tvorba bodových mračen probíhala pro všechny snímky stejně. Pokud se při práci objevil problém při zpracování je detailněji rozepsán u konkrétního kroku pro dané mračno bodů. Základní nástroje pro tvorbu bodového mračna jsou dostupné v horní liště rozložení programu, v záložce *Workflow*.

Import a zarovnání snímků

Snímky pořízené ve formátu *.JPG byly importovány do prostředí programu pomocí nástroje *Import Photos*. Lze také využít možnosti *Add Folder*, která nahraje celou složku se snímky. Po importu fotek je vhodné provést ještě dodatečnou kontrolu snímků pomocí nástroje *Estimate Image Quality*, který zhodnotí možné ovlivnění kvality snímků, snímky s hodnotou nižší než 0,5 by měly být vyřazeny z následného zpracování.

Snímky byly pořízeny v souřadnicovém systému WGS 84, zaměření souřadnic vřícovacích bodů proběhlo v souřadnicovém systému S-JTSK, proto byly snímky pomocí nástroje *Convert Reference* (záložka *Reference*) převedeny do souřadnicového systému S-JTSK (EPSG 5514) s použitím první transformační rovnice S-JTSK do WGS 84 1 (EPSG 1623).



Obr. 11 Originální souřadnice snímku ve WGS 84 a jejich transformace pomocí nástroje *Convert Reference* do souřadnicového systému S-JTSK

Na obrázku Obr. 17 lze vlevo vidět původní souřadnice ve WGS 84, ve sloupci *Altitude* lze vyčíst nadmořskou výšku, která ani po převedení do souřadnicového systému S-JTSK neodpovídala reálné výšce, ta se změnila až po vložení a identifikaci vřícovacích bodů.

Po převedení souřadnic byly snímky zarovnány podle pořízení v letových řadách nástrojem *Align Photos*, jenž vyhledává odpovídající body na překrývajících se snímcích. Zarovnání snímků je vypočítáváno také z příčného a podélného překryvu snímků. Dále do výpočtu vstupují i prvky vnitřní a vnější orientaci. Z prvků vnitřní orientace si program přečte známou informaci o konstantě komory obsaženou v metadatech

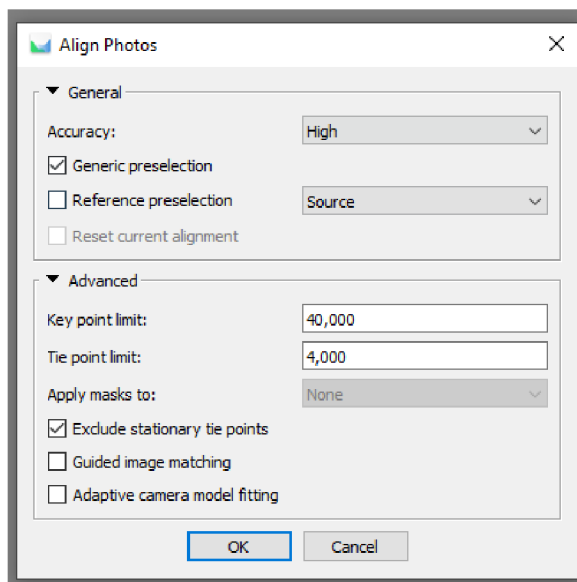
snímku, ostatní prvky si program na pozadí přibližně dopočítává. Stejně tak i prvky vnější orientace si je schopen program optimalizovat na základě známých prvků nebo dopočítat samostatně (Mířijovský, 2013).

Nástroj nabízí možnost nastavení několika hlavních parametrů před začátkem výpočtu. Mezi parametry patří *Accuracy* (přesnost), která ovlivňuje získání přesnějších odhadů pozic kamery, s rostoucí přesností však narůstá také výpočetní a časová náročnost procesu, proto se obecně volí buď možnost *Medium* nebo *High* na základě účelu použití výsledných dat. Obecně nízké nastavení *Low* odhaduje pouze hrubou přesnost pozice kamery a pracuje se zmenšeninami snímků, nastavení *High* a *Highest* pracuje s originální velikostí. Pro účely této práce bylo zvoleno nastavení *High*.

Další parametr představuje *Pair Preselection* umožňující volbu překryvu snímků za účelem snížení výpočetní doby. U možnost *Generic preselection* software pracuje v prvním kroku se zmenšeninami snímků a na základě nalezených bodů těchto překrývajících se snímcích, pak tyto body hledá na snímcích originální velikosti. Možnost *Reference preselection* jsou body na dvojicích snímků dohledávány pomocí známé pozice kamery. Tyto pozice však nejsou vždy známy, proto se častěji volí právě možnost *Generic preselection*, která bylo volena i v tomto případě zpracování dat. Pokud by nebyla vybrána ani jedna možnost *Pair Preselection*, pak by program porovnával každý snímek s každým.

Druhá část nástroje se zabývá pokročilejší možností nastavení parametrů. Zde lze ovlivnit horní hranici počtu klíčových (*Key point limit*) a vázacích (*Tie pint limit*) bodů na každém snímku. U obou parametrů lze nechat doporučenou, přednastavenou, hodnotu (40 000 pro *Key point limit* a 4 000 pro *Tie point limit*), nižší hodnota (u *Tie point limit* i příliš vysoká) by mohla způsobit vznik mnoha nespolehlivých bodů, respektive způsobit ztrátu částí budoucího bodového mračna.

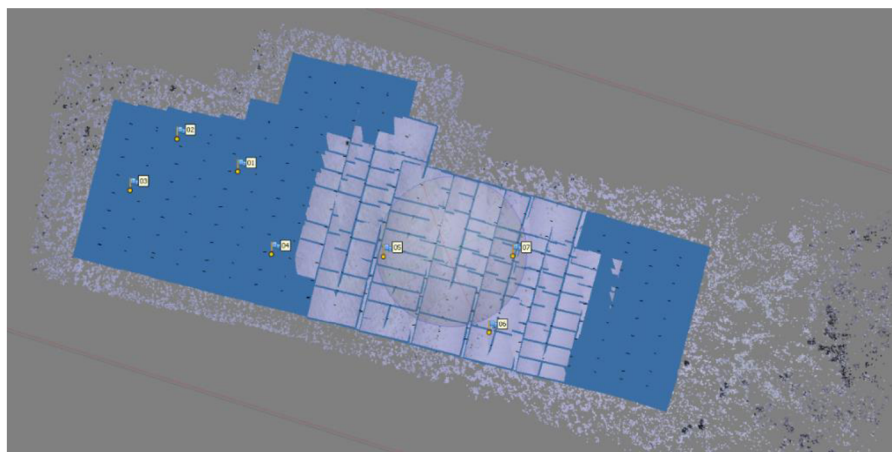
Poslední volitelný parametr *Adaptive camera model fitting* umožňuje automatický výběr parametrů kamery, jsou-li známy. Pokud volba není zaškrtnuta pak software pracuje se základními parametry odpovídajícími prvkům vnitřní a vnější orientace.



Obr. 12 Nastavení parametrů nástroje *Align Photos*

Obrázek Obr. 18 ukazuje použité nastavení nástroje. Celková doba výpočtu se odvíjela od počtu vstupních snímků, technické vybavenosti počítače a zvolených parametrů.

Jako výsledek této fáze postupu vzniká *Point Cloud* což je mračno teček vytvořené na základě zarovnaných snímků (Obr.19).

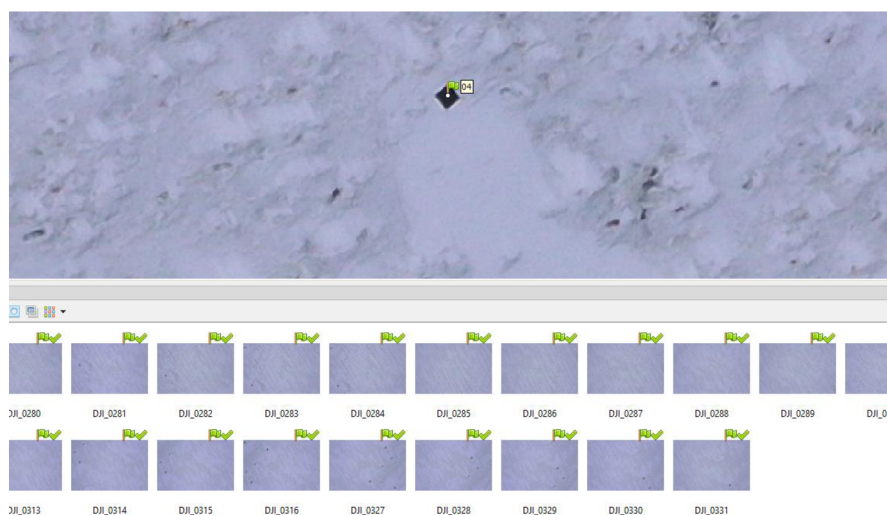


Obr. 13 Výstup nástroje *Align Photos*, ve spodní části Point Cloud, na něm zarovnané snímky a výsledné rozmístění GCP

Identifikace vlíčovacích bodů

Vlíčovací body neboli Ground Control Points jsou důležité pro co nejpřesnější vnější a vnitřní orientaci snímků a vstupují do výpočtu prvků vnitřní a vnější orientace. Ground Control Points (dále GCP) se do programu importují pomocí nástroje *Import reference data from file* na záložce *Reference* ve formátu *.csv nebo *.txt. Importovaný soubor představuje v terénu zaměřené souřadnice v požadovaném formátu, nelze tedy importovat přímo zápisník stažený z GPS přístroje, ale je potřeba je upravit do požadované podoby. GCP byly v terénu zaměřeny v souřadnicovém systému S-JTSK, případně do něj byly v prvotní fázi zpracování převedeny.

Po importu GCP musí být každý bod ručně identifikován na příslušných snímcích pomocí funkce *Place Marker*. Po určení bodu na prvních dvou snímcích pak program sám dohledá další snímky na základě podobnosti a výrazně tím ulehčuje práci. Pak je potřeba každý bod zkontrolovat a umístit z předpokládané pozice do přesného středu GCP na snímku (Obr. 20).



Obr. 20 Umístění Markeru do středu vlíčovacího bodu na snímku

Po identifikaci všech GCP bodů je vhodné identifikovat také kontrolní bod (body), které nevstupují do dalších výpočtů, ale slouží pouze pro kontrolu výsledných snímků (Obr.21). Tento proces je stejný jako umístění vlíčovacích bodů. Následně lze provést

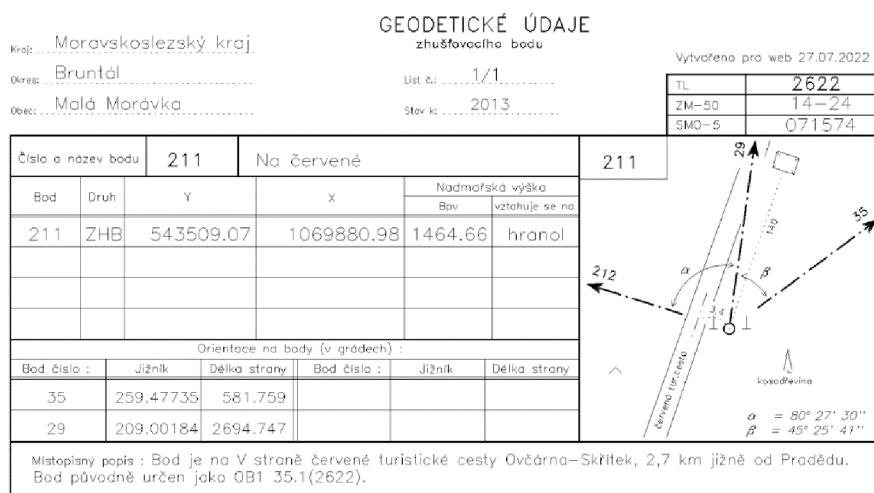
vizuální kontrolu hodnoty chyby v pixelech pro každý bod, pokud je hodnota příliš vysoká je vhodné daný bod vyřadit a nepoužít při následném zpracování, mohl by mít velký vliv na výslednou přesnost.

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 01	-543554.820000	-1069761.749000	1459.684000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> 02	-543599.611000	-1069707.576000	1447.758000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> 03	-543662.539000	-1069737.519000	1446.532000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> 04	-543553.322000	-1069850.488000	1463.756000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> 05	-543450.715000	-1069894.629000	1463.922000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> 06	-543382.933000	-1070003.371000	1445.202000	0.005000
<input checked="" type="checkbox"/> 07	-543332.297000	-1069941.575000	1447.097000	0.005000
<input type="checkbox"/> 10	-543644.219000	-1069754.266000	1450.787000	0.005000
<input type="checkbox"/> 11	-543582.010000	-1069834.196000	1462.710000	0.005000
<input type="checkbox"/> 12	-543359.542000	-1069933.021000	1453.149000	0.005000
<input type="checkbox"/> ID	0.000000	0.000000	0.000000	0.005000

Obr. 14 Přehled vlíčovacích a kontrolních bodů, snímkování zima 2022

V této fázi zpracování bylo při práci se sadou snímků se stínem (snímkování zima 2021) zjištěno, že u snímků zakrytých buď zcela nebo většinou stínem, je identifikace GCP signalizovaného černým čtvercem zhoršena z důvodu splývání černého čtverce na velmi tmavém snímku (viz kapitola 4.5.3 *Vliv intenzity záření*).

Vlícovací body pro snímkování v zimě 2022 byly zaměřeny rychlou statickou metodou. Výsledkem tohoto měření byla poněkud horší přesnost měřených souřadnic, než tomu bylo v předchozích letech. Na vrcholové plošině Vysoké hole se však nachází zhušťovací bod Polohového bodového pole ČR (Obr.22). Souřadnice tohoto bodu jsou dostupné na webu *Geoportálu ČÚZK*. Bod byl identifikován na snímcích a použit pro zpřesnění výškové orientace výsledného bodového mračna.

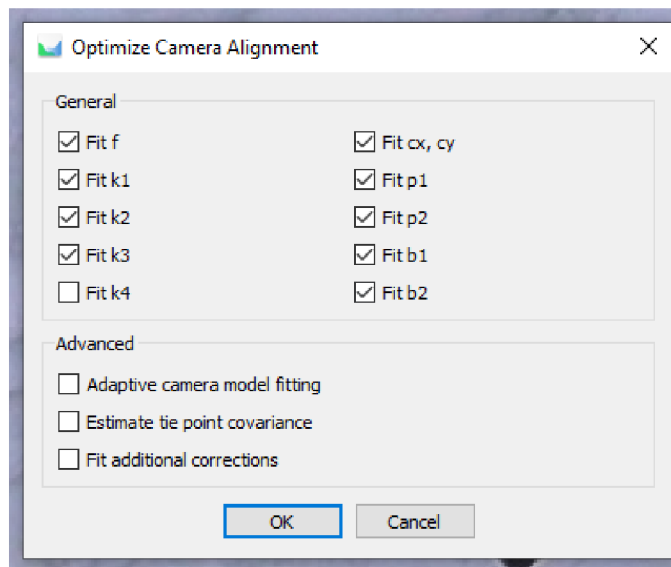


Obr. 15 Náhled geodetických údajů zhušťovacího bodu

Optimalizace zarovnání snímků

Díky známé poloze přesně zaměřených GCP bodů (do jednotek cm) lze pomocí funkce *Optimize Camera Alignment* (záložka Reference) optimalizovat, případně dopočítat prvky vnitřní a vnější orientace. Do výpočtu je nutné zahrnout pouze vličovací body (na záložce *Markers* se zruší zaškrtnutí bodů s vysokou chybou pixelu nebo sloužících jako kontrolní body).

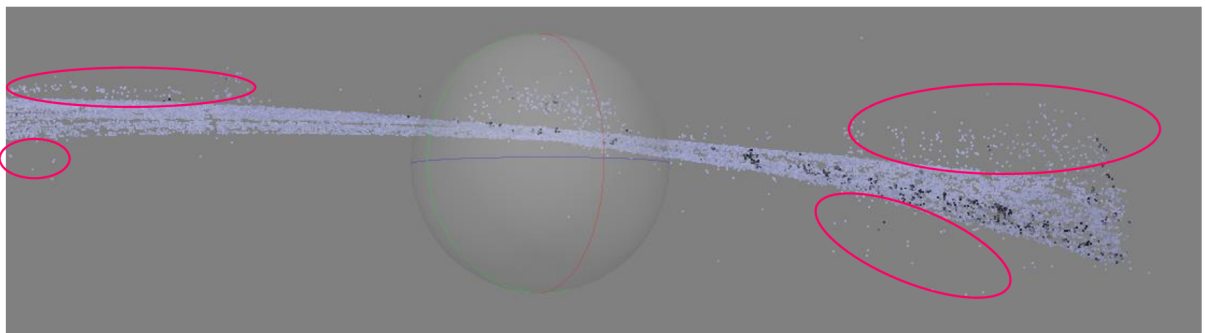
Funkce provádí výpočet, jenž vyrovnává a určuje zbytkové chyby na vličovacích bodech a předem lze vybrat konkrétní vnitřní nebo vnější prvky orientace, které budou optimalizovány. Jsou to ohnisková vzdálenost (f), poloha hlavního snímkového bodu (c_x , c_y), koeficienty radiální distorze ($k1$, $k2$, $k3$ a $k4$) a transformační koeficienty afinity a zkosení ($b1$, $b2$). V tomto kroku zpracování bylo postupováno podle doporučení uvedeného v manuálu programu *Agisoft Metashape User Manual* (Obr.23).



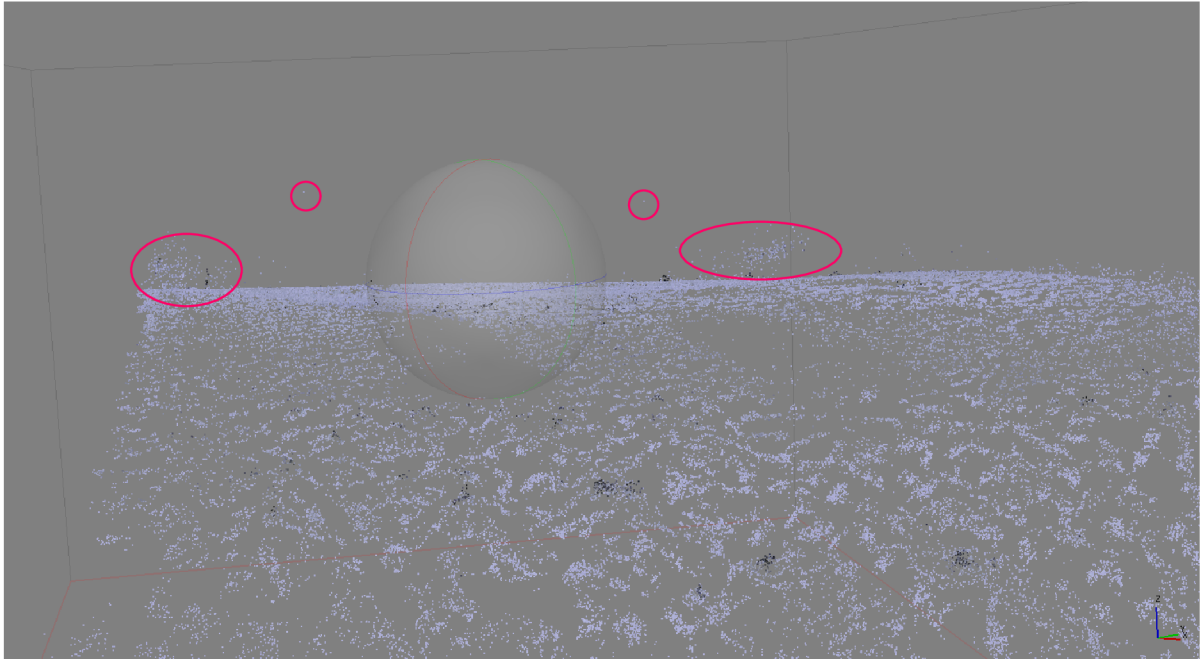
Obr. 16 Použité nastavení funkce Optimize Camera Alignment

Generování bodového mračka (Dense Cloud)

Před samotným generováním bodového mračka musí proběhnout kontrola bodů vzniklých po výpočtu nástroje *Align Photos* nacházejících se mimo *bounding box* neboli zájmové území. Může se jednat o body se špatně určené při zarovnání nebo body s chybně určenou výškou. Nejvíce chybně určených bodů se nachází u krajů modelu, a to z důvodu malého počtu snímků, ze kterých byly tyto oblasti vypočteny. Tyto body je potřeba odstranit, aby výsledné bodové mračno nebylo generováno chybně.



Obr. 17 Chybně vytvořené body, snímkování zima 2022

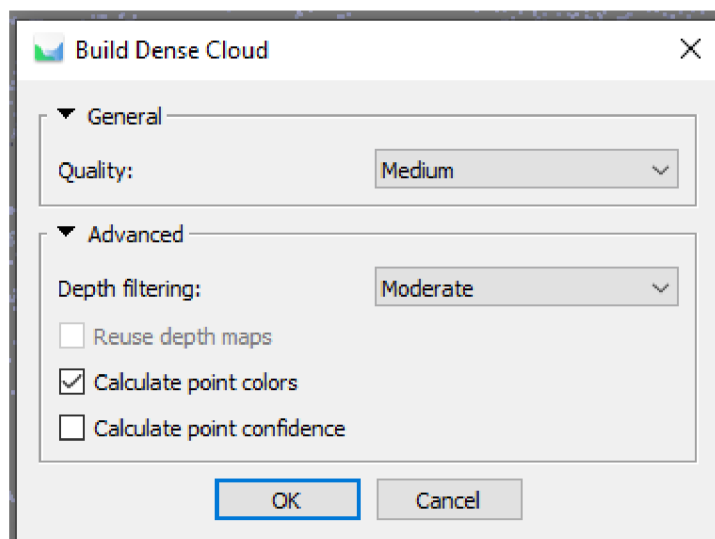


Obr. 18 Chybně vytvořené body, snímkování zima 2021, sada bez stínu

Po identifikaci (obr. 24 a 25) byly vybrané body odmazány pomocí funkce *Free-Form Selection* na záložce *Ortho*. Následně byl otevřen nástroj *Build Dense Cloud*, kde bylo potřeba nastavit parametry ovlivňující tvorbu bodového mračna. V základním nastavení nástroje se vybírá kvalita provedení. Podobně jako u nástroje *Align Photos* i zde hodnota kvality ovlivňuje náročnost a dobu provedení výpočtu a opět podle výšky zvolené kvality program pracuje buď s originálním rozlišením snímků nebo s převzorkovanou zmenšeninou snímku. Při nastavení kvality na *High* je dosaženo odpovídajícího detailu i přesnosti geometrie, na rozdíl od toho nastavení *Lowest* přináší pouze velmi hrubý detail a minimální přesnost. Pro účely práce bylo zvoleno nastavení *Medium*, s ohledem na výpočetní a časovou náročnost tvorby modelu.

Dalším parametrem je, v pokročilejší části nastavení, *Depth filtering*, který ovlivňuje tvorbu hloubkových map modelu v závislosti na míře detailu na snímcích. Lze vybírat mezi *Mild*, *Agressive*, *Moderate* a *Disabled* nastavením, kdy možnost *Moderate*, která byla zvolena v případě této práce, zaručuje kompromis mezi nízkým a vysokým rekonstruovaným detailem.

Posledním nastavitelným parametrem je možnost volby výpočtu konkrétní barvy pro každý bod (*Calculate point colors*) a výpočtu údaje o počtu hloubkových map použitých ke generování bodového mračna (*Calculate point confidence*).



Obr. 19 Výsledné nastavení parametrů nástroje *Dense Cloud*

Přestože nebyla nastavena nejvyšší, respektive vyšší kvalita ani výpočet největších detailů, i tak, v závislosti na předchozích krocích a technické vybavenosti počítače, trval výpočet jednotlivých bodových mračen v průměru okolo 10 hodin.

Export bodového mračna

Výsledné bodové mračno pro každé snímkování podlehlo vizuální kontrole a následně bylo vyexportováno ve formátu *.LAS.

4.5.3 Vnější vlivy působící na kvalitu zpracování snímků v programu Agisoft Metashape

Tvorba bodového mračna je založena na porovnávání dvojic snímků, vyhledávání odpovídajících bodů na překrývajících se dvojicích a na podobnosti bodů. Při zpracování snímků pořízených v nezasněženém terénu je nalezení takovýchto bodů jednodušší, jelikož terén bez sněhové pokrývky obsahuje více barevných proměnných než bílá plocha zasněženého terénu. Na zpracování snímků pořízených nad zasněženým terénem má vliv intenzita slunečního záření, úhel dopadu slunečního paprsku a s tím související stín, jenž vrhají vyšší objekty (stromy, budovy), dopadající stín způsobený přechodem oblaků, stáří a čistota sněhové pokrývky. V této kapitole je zmíněná problematika detailněji rozebrána.

Vliv intenzity záření

Odrazivost sněhové pokrývky je velmi vysoká. Čistý čerstvý hluboký sníh nabývá nejvyšších hodnot odrazivosti, snímky pořízené při jasném slunečném počasí by mohly podávat zkreslenou informaci o sněhové pokrývce.

Vliv úhlu dopadu slunečního záření

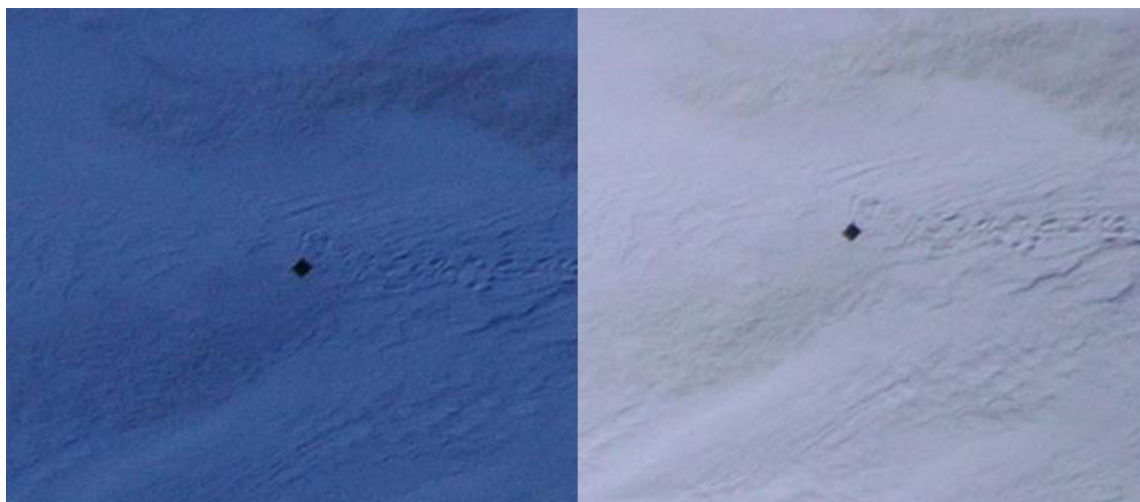
Všechna snímkování v terénu se sněhovou pokrývkou byla provedena okolo poledne, aby stín, který vrhaly vyšší keře a stromy byl co nejkratší. Na jinak bílém povrchu sněhové pokrývky stín vytváří tmavé až černé části, které výrazně zkreslují výslednou získanou hodnotu výšky sněhové pokrývky.

Stín má vliv také při samotné tvorbě bodového mračna, kdy v místech s krátkým, ale temným stínem došlo ke vzniku děr v bodovém mračnu.

Vliv zastínění terénu oblačnosti

V zimním snímkování 2021 při provedení snímkového letu procházela přes část území oblačnost, jež vrhala v několika částech temný stín. Snímkování bylo nad polovinou území opakováno pro přechodu oblačnosti, aby mohl být otestován vliv zastínění oblačností.

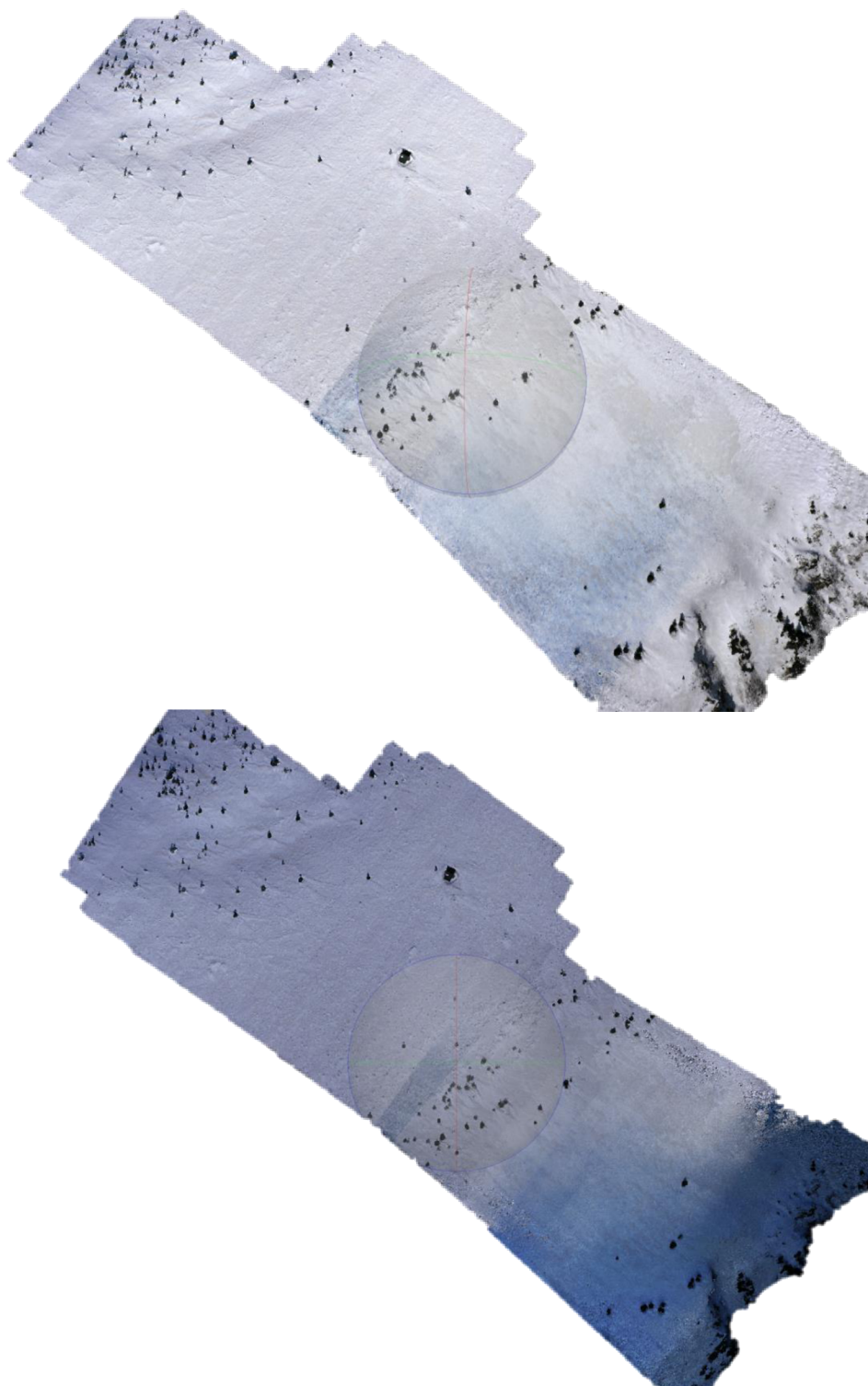
Již při prvotní fázi zpracování byl vliv oblačnosti viditelný. Při umístování *Markeru* do středu GCP na snímcích docházelo ke složitější orientaci na snímcích a horší rozpoznatelnosti vřícovacího bodu. Vřícovací bod byl v terénu na zasněženém povrchu signalizován černým čtvercem, který byl na zastíněných snímcích při menším detailu hůře rozpoznatelný. Po přiblížení snímku pak bylo patrné větší rozmazání bodu a horší určitelnost pravého středu bodu, než tomu bylo na snímcích bez zastínění. Na následujícím Obr. 27 lze vidět rozdíl GCP na snímku se stínem (vlevo) a na snímku bez stínu (vpravo), jedná se o snímky stejného místa.



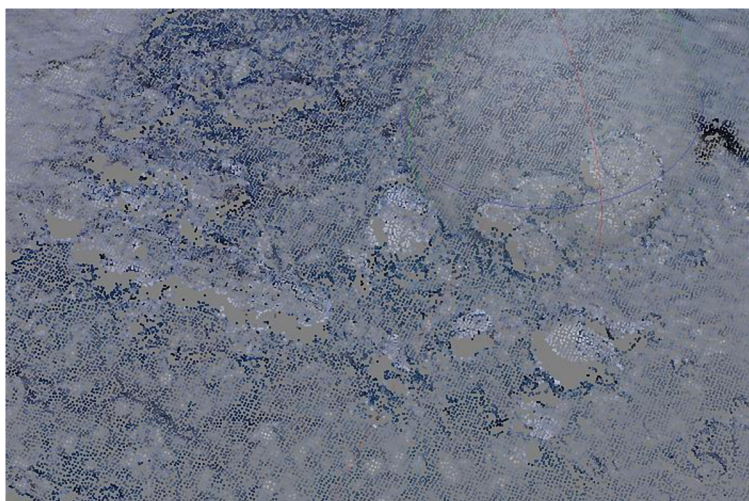
Obr. 20 Vliv zastínění oblačností. Vlevo vřícovací bod na zastíněném snímku, vpravo na snímku bez stínu.

Bodové mračno tedy bylo vygenerováno v případě snímkování v zimě 2021 dvakrát, jednou byly použity snímky se stínem a podruhé bez. Bodové mračno vytvořené ze snímků bez stínu nebo pouze s minimálním stínem mělo výsledné vlastnosti stejné jako mračno vytvořené ze snímků ostatních zimních snímkování.

Mračno vytvořené ze sady snímků se stínem obsahovalo mnohem více chybně umístěných bodů, větší množství děr v modelu bodového mračna při výsledném stanovení metrik nabývaly hodnoty výšky sněhové pokrývky zásadně jiných hodnot. Následující obrázky znázorňují různé problémy a chyby vytvořené při vygenerování bodového mračna se stínem v porovnání s daným územím na modelu bez stínu. První obrázek (Obr. 28) znázorňuje celé území vygenerovaného modelu mračna bodů. Mračno vytvořené ze sady snímků bez zastínění je mnohem detailnější. V mračnu ze zastíněných snímků je vidět mnoho barevných přechodů, nejčastěji v místech, kde navazují jednotlivé fotografie území s přecházejícím dopadajícím stínem a bez dopadu stínu.

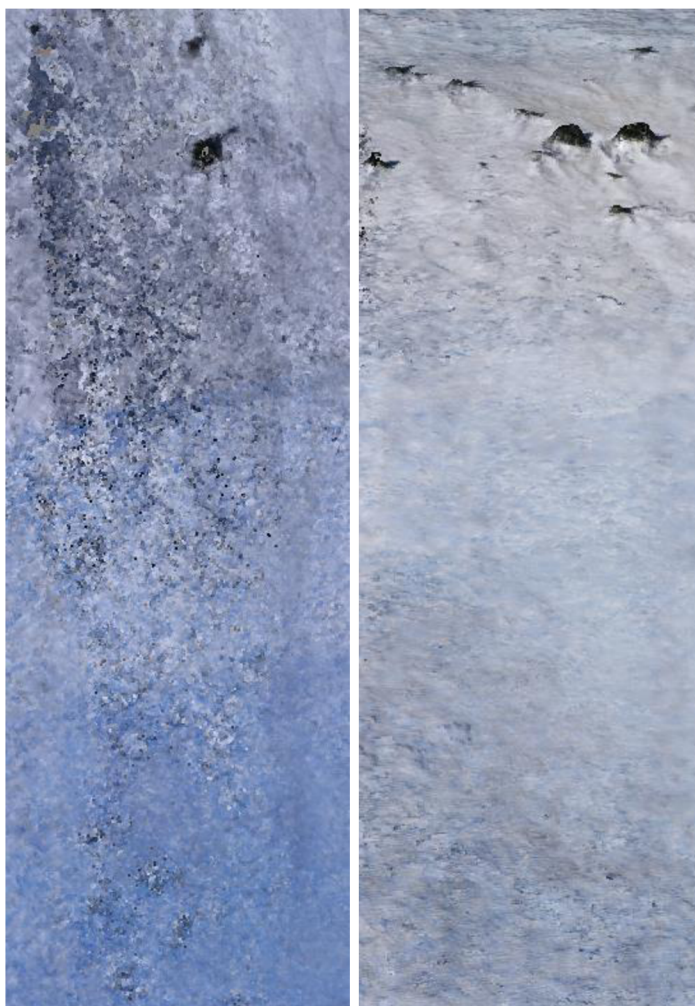


Obr. 21 Bodové mračno celého území snímkování zima 2021, nahoře bez stínu, dole se stínem
Následující obrázek (obr. 29) ukazuje díry ve vzniklém bodovém mračnu, které se nacházejí ve vrcholové části území. V tomto místě docházelo k přechodu mezi snímky se stínem a bez a software nebyl schopen správně zařadit barevné pixely a místo bodů vznikly díry.



Obr. 22 Díry vzniklé při generování Dense Cloudu ze sady snímků se stínem,
v místě přechodu oblaku

Poslední obrázek (Obr. 30) ukazuje rozdíl detailu v levé boční části území, kde model mračna vzniklého ze zastíněných snímků působí jako mnohem členitější, než ve skutečnosti je, což je vidět v pravé části obrázku na mračnu vzniklém ze snímků bez stínu. Opět je tento model bez stínu mnohem podrobnější a méně rozostřený než model vlevo se stínem.

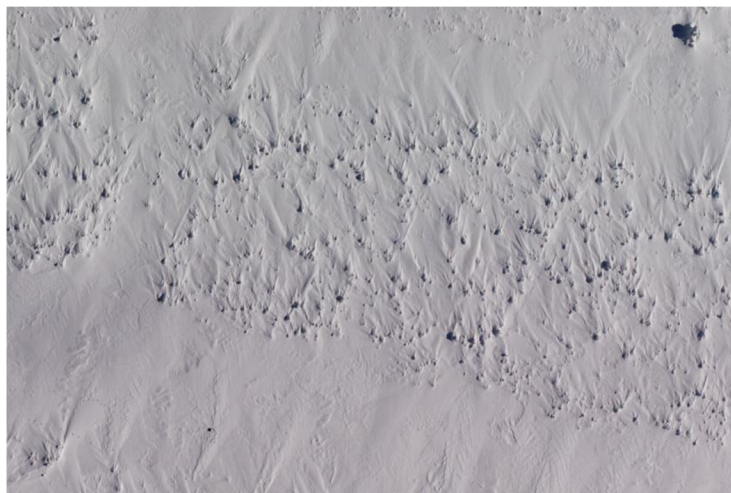


Obr. 30 Porovnání stejného místa na modelu vytvořeného ze zastíněných snímků
a snímků bez stínu.

Vliv čistoty a stáří sněhové pokrývky

V úvodní části zpracování diplomové práce bylo při provádění rešerše vědeckých článků a již dříve provedených prací zjištěno, že vzhledem k fyzikálním a odrazivým vlastnostem sněhu je ideální provádět snímkování sněhové pokrývky v období, kdy není sníh čerstvě napadaný a zároveň už netaje. Původní dílčí cíl testování vlastností fotogrammetrického snímkování sněhu, zahrnující také snímkování bezprostředně po napadení čerstvého sněhu či v době jeho tání, byl vypuštěn z důvodu mírných zimních období v průběhu let zpracování diplomové práce a byl nahrazen poznatky z nastudování již proběhlých prací. Proto byl pro každé snímkování volen termín, kdy uběhlo několik dní od posledního napadnutí čerstvého sněhu a teploty se několik po sobě jdoucích dní pohybovali pod bodem mrazu nebo těsně na nule, aby bylo eliminováno tání sněhu.

Ani vliv čistoty sněhu nemohl být zcela přesně zkoumán, z výše uvedeného důvodu a také kvůli tomu, že zájmové území případové studie se nachází v chráněné krajině Národní přírodní rezervace Praděd, proto zde nemohla být sněhová pokrývka nijak znečištěna. Testování vlivu čistoty tak bylo vztaženo k zimnímu snímkování 2021, kdy v okolí vrcholové části nejvíce z pod sněhu vystupovaly alpské travníky a v horní části území, v místě vykácení borovice kleč, byly viditelné větve a kletí (Obr. 31 a 32).



Obr. 23 Větve a kořeny vystupující z pod sněhu viditelné na snímku



Obr. 24 Větve a kořeny vystupující z pod sněhu viditelné na bodovém mračnu

Na tvorbě bodového mračna však toto „znečištění“ sněhové pokrývky nemělo vliv. Ten se projevil až při určování metrik sněhu, tato problematika je podrobně rozvedena v následujících kapitolách.

5 SNĚHOVÉ METRIKY

Hlavní cíl diplomové práce představuje stanovení metrik sněhové pokrývky. Aby mohly být stanoveny metriky sněhu, bylo nejprve nutné vytvořit rozdílový model bodových mračen, ze kterého byly následně metriky odečítány. V první části této kapitoly následuje proces tvorby rozdílového snímku. V druhé části jsou pak detailně rozebrány jednotlivé metriky sněhové pokrývky získané z bodového mračna vytvořeného z fotogrammetrického snímkování území Vysoké hole.

Práce s bodovými mračny probíhala v prostředí Open Source softwaru *CloudCompare*. Před zpracováním dat se autorka práce podrobně seznámila s programem, jednotlivými plugíny pro práci s bodovým mračnem s pomocí uživatelského manuálu a technické podpory dostupné na webových stránkách programu a *CloudCompare wiki* představující dokumentaci průběžně aktualizovanou pro nejnovější verze programu.

5.1 Tvorba rozdílového bodového mračna

K vytvoření rozdílového bodového mračna je zapotřebí bodové mračno bez sněhové pokrývky a bodové mračno se sněhovou pokrývkou. Postupně bylo vytvořeno šest bodových mračen sněhové pokrývky z jednotlivých zimních a letních původních mračen. Bodové mračno bez sněhové pokrývky z podzimu 2019 bylo použito pouze ve dvou porovnáních, následně bylo po konzultaci s vedoucím práce vynecháno z dalšího postupu a nahrazeno bodovým mračnem bez sněhu z léta 2021. Důvodem tohoto rozhodnutí bylo provedení výseku borovice kleč na vrcholové části zájmového území Vysoké hole, které proběhlo před koncem roku 2019, tudíž na podzimním snímkování porost borovice je patrný, ale na zimním snímkování v březnu 2020 už jsou znatelné pouze ponechané kořeny a klesti. Proto nejde zcela relevantně porovnat tato dvě snímkování. Při filtraci bodů z podzimního mračna bez sněhu či manuálním odstranění bodů z místa porostu borovice by v modelu vznikla díra, která by ani po interpolaci nepodávala relevantní informaci o nadmořské výšce, výška sněhu by tedy byla pouze orientační, nikoliv přesně stanovitelná. Proto proběhlo porovnání s nově vytvořeným modelem bez sněhové pokrývky z letního snímkování 2021. S tímto bodovým mračnem pak byla porovnávána všechna ostatní mračna se sněhem.

Bodové mračno sněhové pokrývky bylo vytvořeno nástrojem *Cloud-To-Cloud Distance*, který vypočítává vzdálenost mezi body jednotlivých mračen na základě *Nearest Neighbor Distance* algoritmu, dále rozepsáno v podkapitole 5.1.2 *Cloud-To-Cloud Distance*.

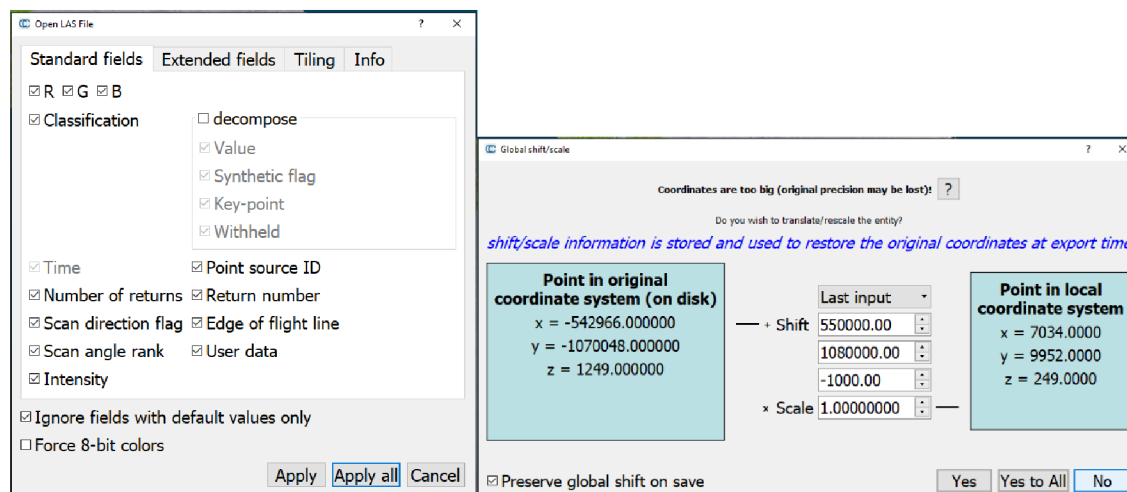
Pro správné porovnání a odečtení výsledného bodového mračna sněhové pokrývky je kritická velikost porovnávaného území. Pokud by bodové mračno nebylo z předchozího zpracování upravené (obsahovalo by chybně určené body) nebo by dvě porovnávaná bodová mračna měla rozlišnou velikost, výsledné mračno by tím bylo ovlivněno a nebylo by možné správně stanovit metriky. Proto je ještě před samotným spuštěním nástroje nutné zkontrolovat, zda obě mračna mají opravdu stejnou velikost a nikde se nevyskytují náhodně, chybně určené body. Vhodným řešením je do programu *CloudCompare* nahrát předem připravený shapefile s polygonem obsahujícím ohraničení porovnávaného území. Vzhledem k tomu, že při generování bodového mračna z měřičských snímků kvalita směrem ke krajům modelu výrazně klesá, je vhodné tento polygon vytvořit s odstupem od krajů modelu. Ve výsledku tedy není porovnáváno celé vzniklé bodové mračno, ale pouze část. Tato úprava má také pozitivní vliv na dobu vypočítávání algoritmu.

V první fázi tedy by vytvořen rozdílový model sněhové pokrývky nad polygonem 80 % území (odstraněny byly okrajové části pomocí nástroje *Segment* a předem vytvořeného polygonu ve formátu *.shp). Model byl vytvořen pro sněhovou pokrývku v roce 2020 a 2021, do porovnání vstupovalo bodové mračno bez sněhové pokrývky z léta 2021. Následně byla, po konzultaci s vedoucím práce a s ohledem na terénní podmínky a naměřená terénní data, vybrána malá území o velikosti X cm, ve kterých probíhala následná porovnání a stanovení metrik. Ostatní bodová mračna sněhové pokrývky byla tudíž tvořena pouze pro tato území, popsána v podkapitole 5.1.3 *Srovnávací území*.

5.1.1 Import bodového mračna

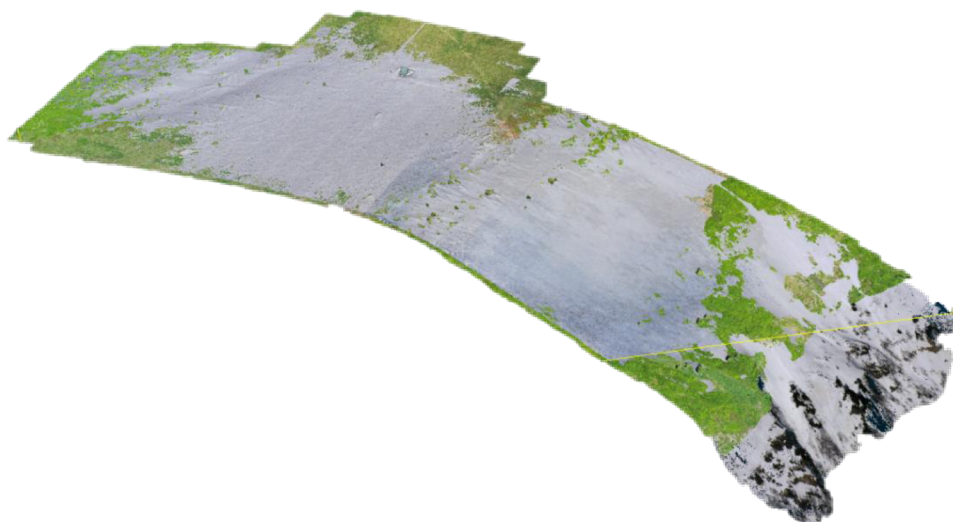
Do prostředí programu *CloudCompare* byla importována bodová mračna ve standardizovaném formátu *.LAS. Import probíhá pomocí nástroje *Open File(s)*, program umožňuje otevření mnoha různých formátů 3D modelů a bodových mračen. Lze otevřít také jiné vektorové a rastrové formáty, v práci bylo dále využito možnosti otevřít v programu vektorový formát *.shp.

Po vybrání konkrétního bodového mračna, které je požadováno pro otevření, je potřeba zkontrolovat nastavení importu a zamítnout převod souřadnic viz obr. 33.



Obr. 25 Nastavení parametrů importu

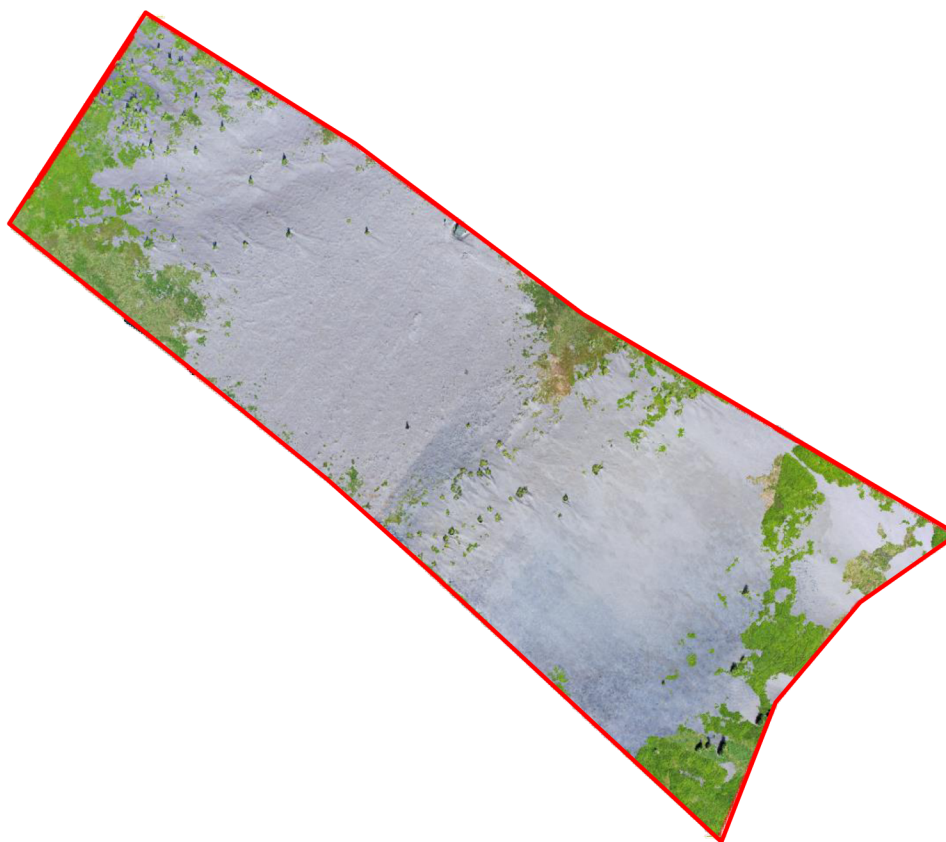
Následně proběhne načtení a otevření bodového mračna. Na obrázku Obr. 34 lze vidět bodové mračno bez sněhové pokrývky (léto 2021) a mračno se sněhovou pokrývkou (zima 2021).



Obr. 26 Bodové mračno letní 2021 a zimní 2021.

Proběhl import připraveného polygonu ve formátu *.shp s územím pro ořezání bodových mračen (polygon znázorněn červenou barvou na obrázku obr. 35), důvod tohoto kroku je popsán v úvodním textu kapitoly 5 *Sněhové metriky*.

Bodová mračna po ořezání (znázorněna na obr. 35) sloužila jako podklad pro další kroky zpracování popsané v následujících podkapitolách.

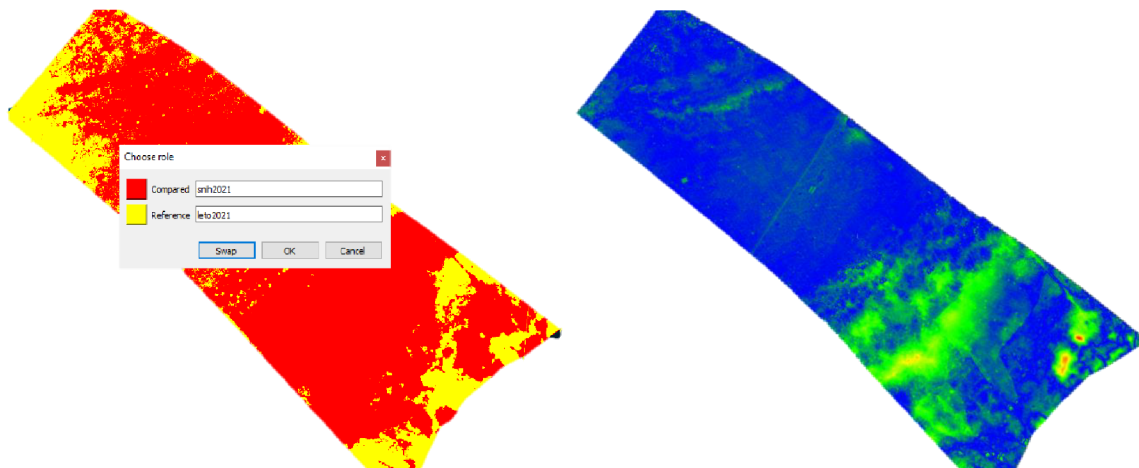


Obr. 27 Ořezání bodových mračen pomocí polygonu (červeně)

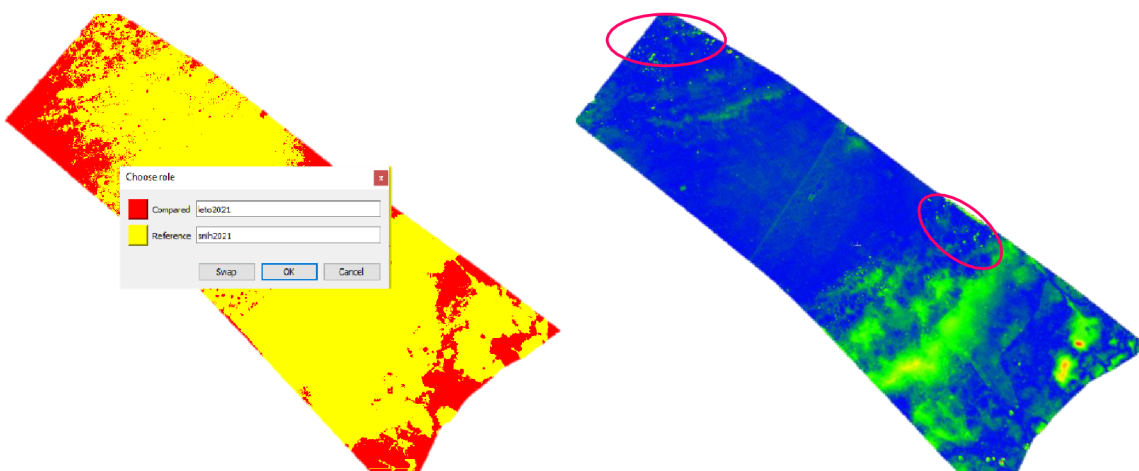
5.1.2 Cloud-To-Cloud Distance

V první fázi tvorby rozdílového snímku byla pro výpočet mračna bodů použita celá, respektive výše zmíněným polygonem ořezaná, území. Na připravené území Bodové mračno sněžové pokrývky bylo vytvořeno nástrojem *Cloud-To-Cloud Distance (C2C)*, který vypočítává vzdálenost mezi body jednotlivých mračen na základě *Nearest Neighbor Distance* algoritmu. Nástroj je v programu *CloudCompare* umístěn v horní liště, k jeho použití musí být označena ta bodová mračna, která mezi sebou mají být porovnávána. Nástroj dopočítává nové bodové mračno na základě dopočítávání nejbližšího sousedního bodu k jednotlivým bodům, tedy vezme bod z množiny referenčního mračna a k němu určuje nejbližší bod z množiny porovnávaného mračna. Proto je důležité správně určit referenční (*Reference*) a porovnávané (*Compare*) bodové mračno.

Pokud by jako referenční bylo zvoleno mračno se sněžovou pokrývkou, pak by se vzdálenost dopočítávala vzhledem k mračnu bez sněžové pokrývky, což při zachování vegetace na modelech přinese výsledek s vysokými hodnotami právě v místech, kde se vyskytují stromy či jiná vegetace, která v období bez sněhu je díky vegetačnímu období výrazně vyšší než na zasněženém snímku, kde je vlivem opadání, či pod tíhou sněhu, nižší než na původním modelu. Z toho důvodu je vhodné volit jako referenční mračno bodů to bez sněžové pokrývky a jako porovnávané mračno se sněhem.



Obr. 28 Tvorba rozdílového mračna nástrojem C2C, vlevo zvoleno jako referenční mračno léto 2021, vpravo výsledek nástroje



Obr. 29 Tvorba rozdílového mračna nástrojem C2C, vlevo zvoleno jako referenční mračno se sněhem z března 2021, vpravo výsledek procesu se zvýrazněnými stromy v místech zalesnění (označeno zakroužkováním)

5.1.3 Srovnávací území

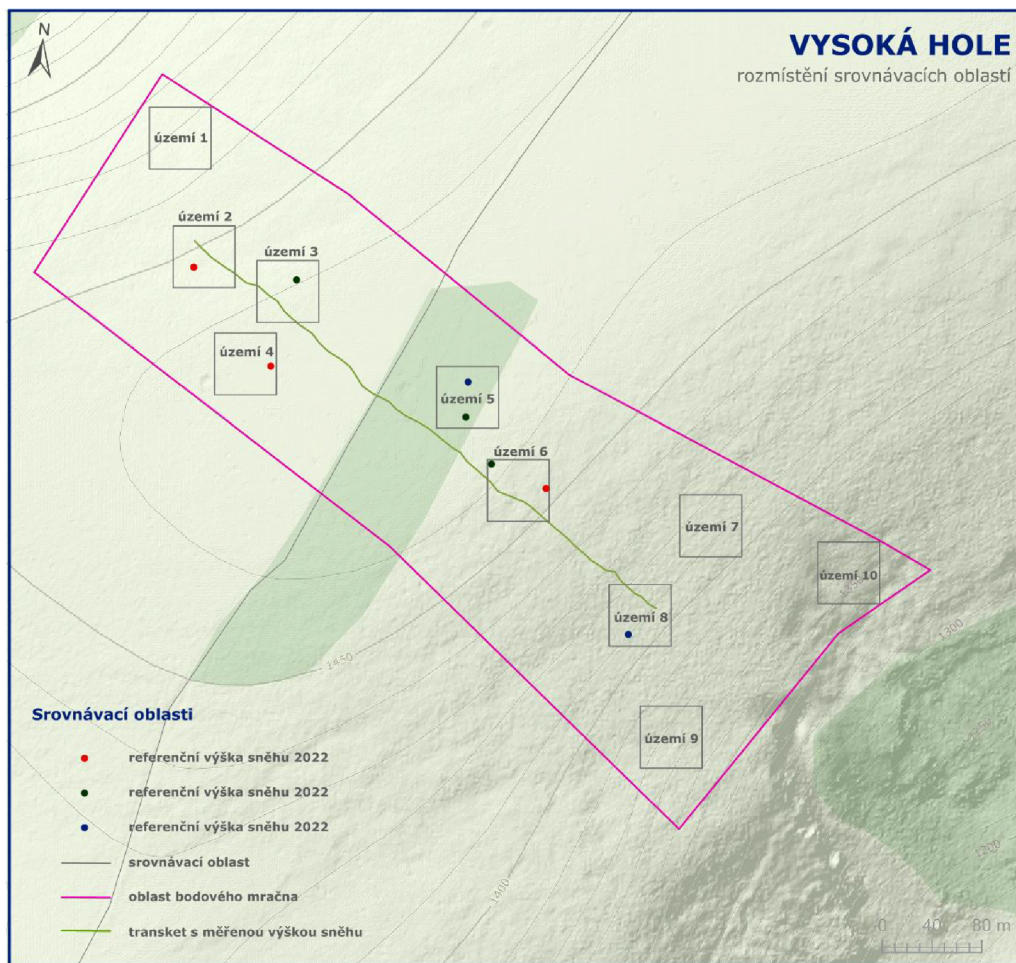
Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 5 *Sněhové metriky* další porovnání proběhlo následně ve vybraných, menších srovnávacích územích. Tato území byla vybrána tak, aby zahrnovala variabilitu terénu zájmového snímkaného území, měřené referenční body nebo body s pozemního měření Správou NPR Praděd. Cílem tohoto postupu bylo zjistit různé vlivy působící na stanovení výšky sněhové pokrývky. Tato podkapitola se zabývá výběrem a stanovením jednotlivých srovnávacích území.

Celkem bylo stanoveno deset srovnávacích oblastí o velikosti 50 × 50 metrů. Oblasti byly vybrány s ohledem na umístění bodu s naměřenou referenční výškou sněhu, výškou sněhu pocházející z pozemního měření Správou NPR nebo se jednalo o území zastíněné oblačností či s výskytem vegetačního porostu. Přesné parametry jednotlivých území jsou přehledně vypsány v následující tabulce, jejich umístění pak na Obr. 38.

Tab.3 Přehled srovnávacích území pro stanovení výšky sněhové pokrývky

oblast	charakteristika
území 1	zalesněné území
území 2	referenční výška sněhu 2022, pozemní výška sněhu
území 3	referenční měření sněhu 2021, pozemní měření sněhu
území 4	referenční výška sněhu 2022, alpské trávníky
území 5	referenční měření sněhu 2020 a 2021
území 6	referenční měření sněhu 2022, pozemní měření sněhu, vřesoviště
území 7	výsek vřesoviště, území bez jiné vegetace
území 8	referenční měření sněhu 2020 a 2021, pozemní měření sněhu
území 9	celkové zastínění mrakem, vegetace
území 10	celkové zastínění mrakem, území spadající do Velké kotliny

Pro ověření vlivu zastínění území na výsledné stanovení výšky sněhové pokrývky slouží oblasti devět a deset, kdy oblast deset spadá do Velké kotliny a na území oblasti se podle modelu letního mračna bodů bez sněhu nenachází vegetace. Oproti tomu území čtyři má na celé své rozloze výskyt alpských trávníků, území jedna se nachází mezi stromy a území šest je porostlé vřesovištěm. Území pět a sedm jsou po výseku borovice, respektive vřesovišť. Území tři, šest a osm pak kopírují transekt s naměřenou výškou sněhové pokrývky z pozemního měření Správou NPR Praděd.



Obr. 38 Mapa srovnávacích oblastí pro stanovení metrik bodového mračna

5.2 Výška sněhové pokrývky

Výška sněhové pokrývky, v angličtině označovaná jako *Snow Deph*, je stanovena jako rozdíl vzdáleností bodů mezi bodovým mračnem bez sněhové pokrývky a mračnem se sněhovou pokrývkou. Přesnost určení výšky sněhu se odvíjí od výškové přesnosti jednotlivých mračen, která je vypočítána na základě vličovacích bodů a měřičských snímků. Přesnost zaměření vličovacích bodů u prvních dvou snímkování (březen 2020 a 2021) do 3 cm, u snímkování v březnu 2022 pak do 10 cm, proto lze říct, že i přesnost určení výšky sněhu nabývá těchto hodnot.

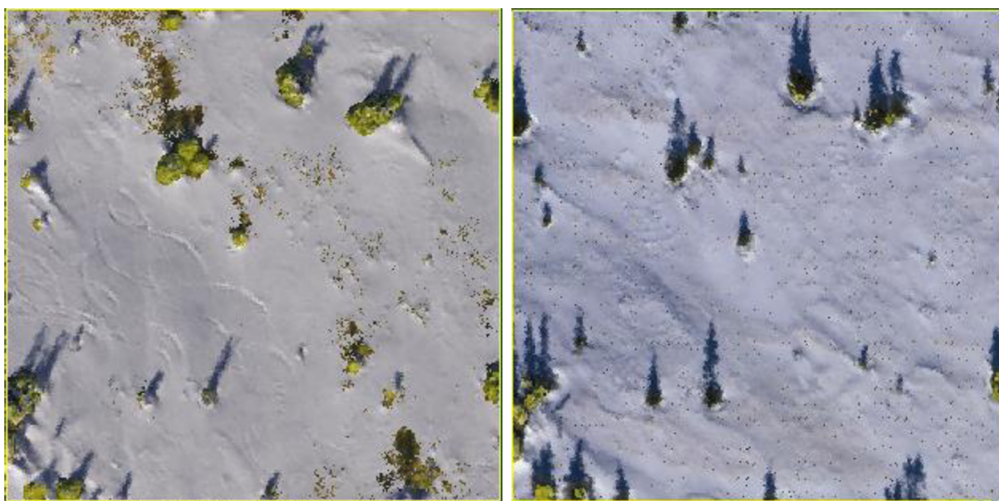
Výška sněhu byla nejprve určena pro celé vybrané území bodového mračna (Obr. 35), následně pak byla vypočítávána pro výše zmíněná srovnávací území.

5.2.1 Stanovení výšky sněhu v oblasti se stromy

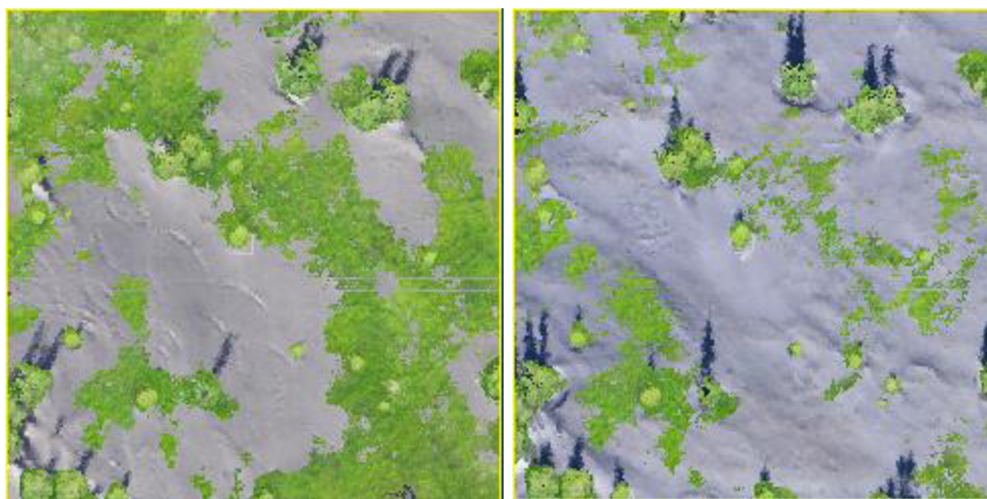
V částech území, kde se nachází stromy, není možné přesně určit výšku sněhové pokrývky v těchto konkrétních místech stromů, jelikož vzdálenost mezi mračny bodů je dopočítávány k vrcholu stromu. Manuální odstranění stromu a vypočítání nadmořské výšky daného místa pomocí interpolace by bylo pouze částečným řešením, jelikož v praxi byl při terénním měření okolo stromů obvykle viditelný navátý sníh, kdy v těsné blízkosti kmene stromů byla výška sněhové pokrývky minimální a v okolí kmene do 30 cm pak výška sněhu dosahovala, v závislosti na intenzitě navátí, okolo 40 cm. Proto by odstranění stromů nepodávalo kvalitní informaci. Řešením může být vizualizace pomocí

terénu bez sněhu, kdy výsledné mračno sněhové pokrývky překrývá nezasněžený terén a vystupují pouze stromy.

Následující obrázky (Obr. 39 a 40) modelů ukazují jednotlivá bodová mračna vytvořená v území 8 (oblast se zalesněním) a vypočítanou výšku sněhové pokrývky.

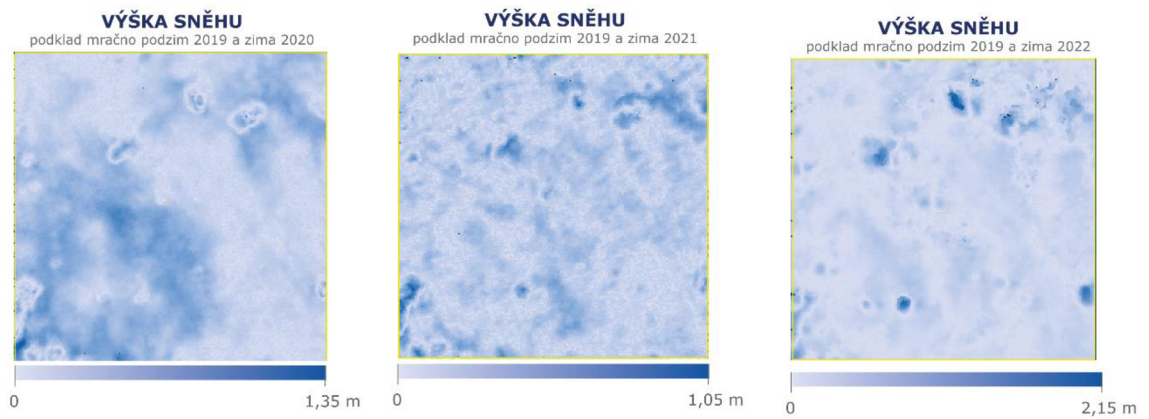


Obr. 30 Vizualizace bodového mračna bez sněhu podzim 2019, vlevo na něm zima 2020 a vpravo zima 2021



Obr. 40 Vizualizace bodového mračna bez sněhu léto 2021, vlevo na něm zima 2020 a vpravo zima 2021

Vzhledem k tomu, že druhé snímkování bez sněhové pokrývky proběhlo v létě 2021, je na těchto mračnech viditelná vegetace, která má v zimě vegetační klid a může být zakrytá sněhem, zatímco v červnu je v plném rozkvětu a může být mnohem vyšší než v zimě pod tíhou sněhu. Proto je tato vegetace na modelech s podkladem letního snímkování viditelnější na rozdíl od podkladu podzimního snímkování, kdy už začínala odrůstat. V tomto případě tedy dává relevantnější výsledek o výšce sněhové pokrývky model, ve kterém je zvoleno jako referenční bodové mračno vytvořené ze snímkování terénu bez sněhové pokrývky na podzim 2019.

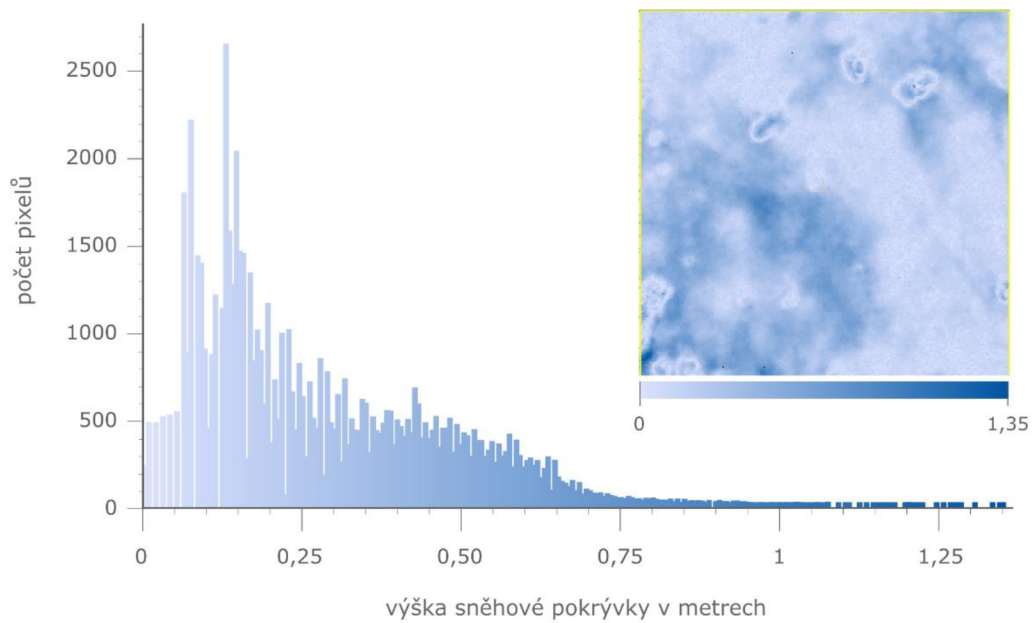


Obr. 41 Porovnání stanovené výšky sněhu z podkladového mračna bez sněhu z podzimu 2019

Jak je vidět z posledního modelu sněhové výšky na obrázku 41, zde došlo k chybě při výpočtu sněhové výšky v místě vzrostlých stromů, ty vykazují výškou sněhu okolo dvou metrů, nejedná se však o výšku sněhové pokrývky, ale o výšku stromu.

VÝŠKA SNĚHU

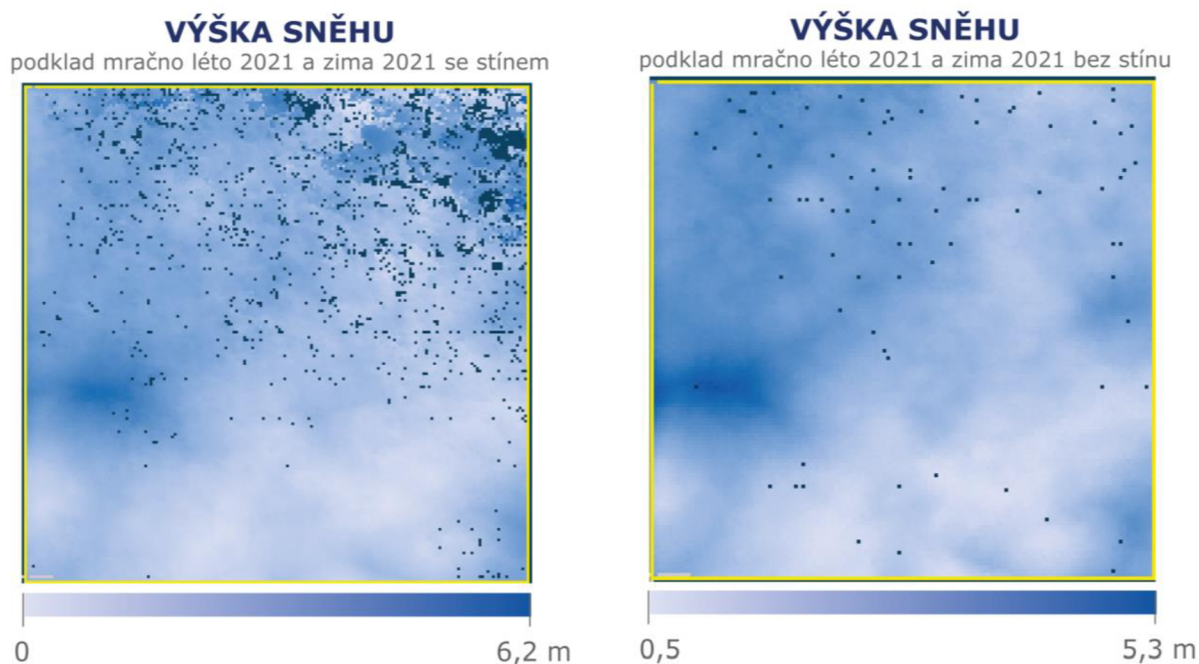
stanovení v území 8, podklad mračno podzim 2019 a zima 2020



Obr. 42 Histogram výšky sněhové pokrývky, podzim 2019 a zima 2020

5.2.2 Stanovení výšky sněhu v území zastíněném oblačností

Vliv zastínění při výpočtu výšky sněhové pokrývky byl zkoumán nad bodovým mračnem pořízeným při zimním snímkování v březnu 2021. Nad územím procházela oblačnost, která vrhala stín na část území, proto bylo využito dvojí sady snímků a byly vytvořeny dva modely výšky sněhové pokrývky, jeden se stínem a druhý bez. Jako referenční bodové mračno sloužilo letní mračno 2021 bez sněhové pokrývky. Stanovení výšky sněhu proběhlo ve srovnávacím území devět a deset, tato území jsou obě plně zakryta stínem oblačnosti.



Obr. 31 Porovnání výsledku stanovené výšky sněhu se stínem (vlevo) a bez stínu (vpravo)

Vstupní bodové mračno vytvořené ze zastíněných snímků již vlivem stínu obsahuje mnoho děr, které vznikly při generování mračna (viz kapitola 4.5.3 *Vnější vlivy působící na kvalitu zpracování*). Stín má vliv také na výpočet výšky sněhu, obecně tmavší místa na mračnu bodů se sněhem jsou při výpočtu vzdáleností brána jako místa s vyšší výškou, proto je i v tomto případě výška stanovena zhruba o metr výš, než když bylo jako srovnávací model použito bodové mračno bez stínu.

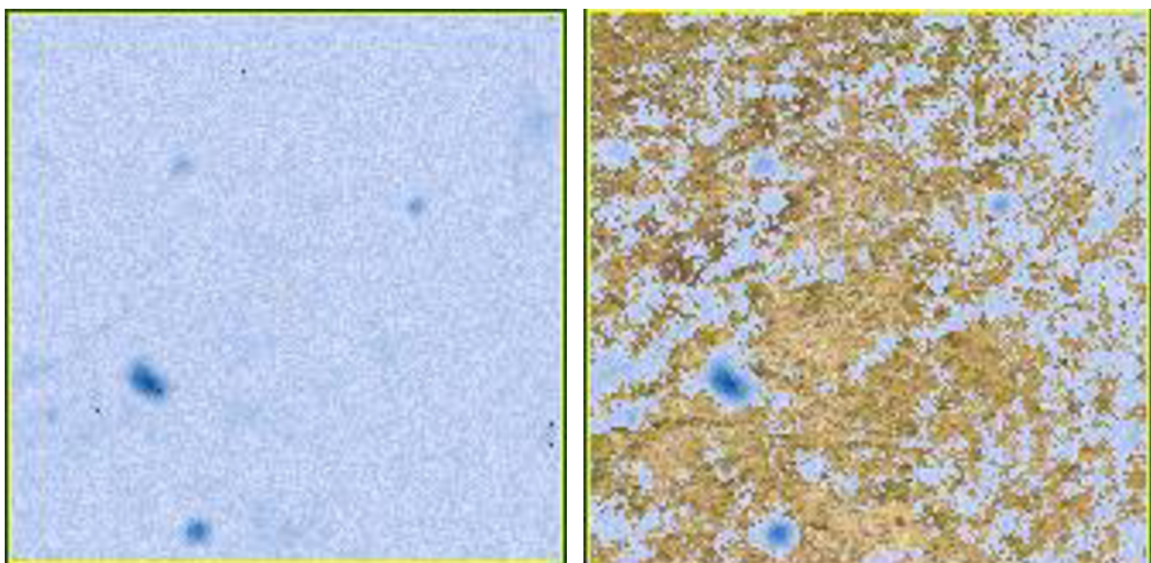
5.2.3 Stanovení výšky sněhu v okolí vegetace

Pokud se v bodovém mračnu nachází oblast s vegetací, která vystupuje nad zasněžený povrch, pak dochází ke stejnému problému jako u výše zmíněných stromů. V terénním šetření při zaměřování bylo zjištěno, že v těsné blízkosti vegetace se obvykle nenachází žádná sněhová pokrývka. Toto zjištění je patrné i na výsledných modelech stanovené výšky sněhu, kdy vegetace je obvykle ohraničena nejsvětlejší barvou (Obr. 44), která představuje nulovou výšku sněhu. V prostoru tohoto ohraničení se poté objevují vyšší hodnoty a z důvodu, že v těchto místech se nejedná o výšku sněhu, ale o výšku vegetace nacházející se v tomto místě.



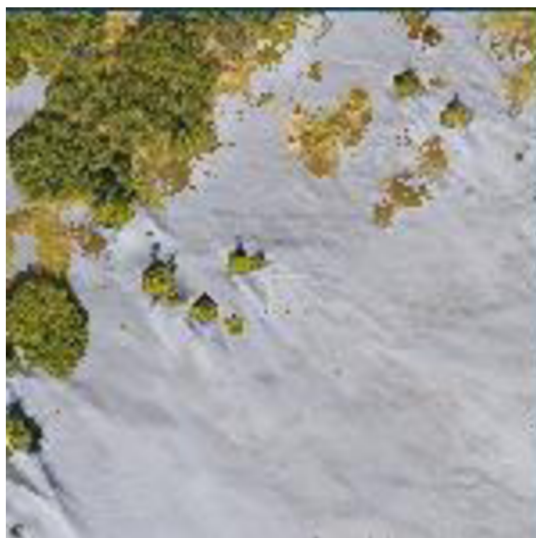
Obr. 32 Viditelné světlé ohraničení vegetace

V případě území deset, byla celá srovnávací oblast porostlá alpínskými trávničky na podzim 2019, které rovnoměrně pokrývaly oblast a měli zhruba stejnou výšku. Díky tomu není na modelu výšky sněhu patrné ohraničení, ale jsou zde rovnoměrně rozestety pixely s minimální hodnotou sněhu (Obr. 45).



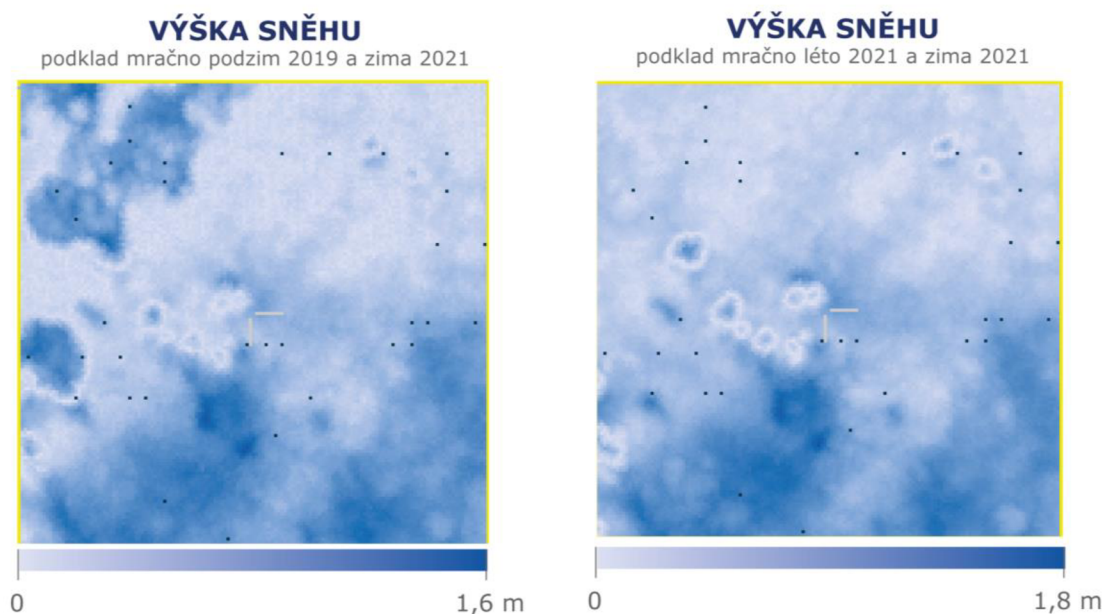
Obr. 45 Vliv rovnoměrně rozmístěné vegetace na výpočet výšky sněhu

Na území šest bylo možné porovnat stanovení výšky sněhové pokrývky před a po výseku vegetace. Na modelu bez sněhu z podzimu 2019 je v části této srovnávací oblasti borovice kleč (obr. 46.), která pak již na dalších modelech je vysekána.



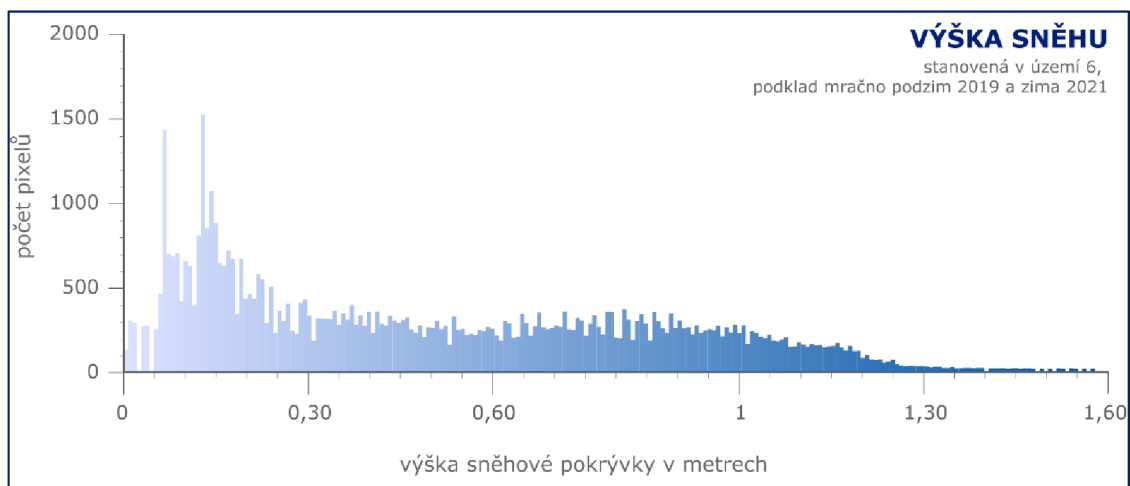
Obr. 33 Borovice kleč vystupující nad zasněžené bodové mračno

Porovnání na obrázku 47 znázorňuje vliv výseku vegetace na stanovenou výšku sněhu.

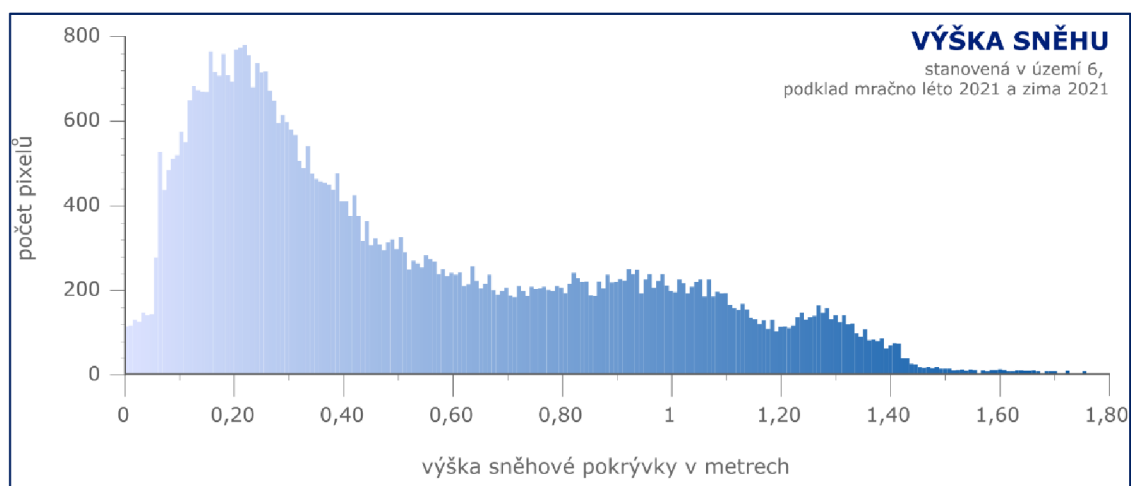


Obr. 34 Porovnání vlivu výseku vegetace

Histogramy na Obr. 48 a 49 ukazují četnost umístění pixelů v jednotlivých nadmořských výškách. Na území 6 byla vypočítána nejvyšší výška sněhu 1,57 m pro model sněhové pokrývky z referenčního mračna 2019 a zimního 2021. U modelu sněhové pokrývky z mračna bez sněhu 2021 a se sněhem 2021 byla stanovena nejvyšší výška 1,73 metrů.



Obr. 48 Histogram výšky sněhové pokrývky v území 6



Obr. 49 Histogram výšky sněhové pokrývky v území 6

5.3 Objem a rozloha sněhové pokrývky

Objem sněhové pokrývky byl vypočítán pomocí nástroje *Volume*, funkce *Compute 2.5D volume*. V nastavení nástroje se jako referenční model (Ground) zvolí mračno bodů bez sněhové pokrývky a jako porovnávaný (Ceil) mračno bodů se sněhem. Výsledkem je pak rozdílový point cloud s informací o objemu (Volume) sněhu a textový soubor obsahující vypočítané hodnoty (Obr. 50).

```
Volume: 57,367.37
Surface: 171,225.00
-----
Added volume: (+)72,290.72
Removed volume: (-)14,923.35
-----
Matching cells: 99.8%
Non-matching cells:
  ground = 0.2%
  ceil = 0.0%
Average neighbors per cell: 8.0 / 8.0
|
```

Obr. 50 Výsledné hodnoty vypočítané nástroje *Volume*, počítáno pro mračno bez sněhu 2021 a se sněhem 2021

Následující tabulky (tab. 4) udává přehled vypočítaných metrik sněhové pokrývky získané z modelu sněhové pokrývky vypočítaného z bodového mračna bez sněhové pokrývky z léta 2021 a mračna se sněhovou pokrývkou z března 2021.

Tab.4 Přehled metrik sněhové pokrývky ve srovnávacích oblastech

2021*	min. výška sněhu	max. výška sněhu	objem v m ³	rozloha v m ²
území 1	0 cm	89 cm	236	2098
území 2	0 cm	85 cm	665	2230
území 3	0,5 cm	97 cm	694	2251
území 4	0 cm	69 cm	378	2175
území 5	0 cm	57 cm	640	2105
území 6	0 cm	178 cm	1374	2398
území 7	0,5 cm	153 cm	1692	2441
území 8	0,5 cm	208 cm	3249	2487
území 9	0 cm	181 cm	1364	1989
území 10	1 cm	406 cm	2409	2500

*porovnání bodového mračna bez sněhu 2021 a se sněhem 2021

6 SNĚHOVÁ POKRÝVKA POHLEDEM DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ

Sněhová pokrývka je pomocí satelitních snímků snímána již mnoho let, pro její zkoumání jsou používány primárně meteorologické satelity a radarové snímky, které po zpracování a vyhodnocení slouží jako výchozí data pro meteorologické předpovědní modely. Na radarových snímcích lze stanovit na zasněženém terénu metriky jako rozlohu zasněžené oblasti, index sněhové pokrývnosti (NDSI), S3 index nebo například objem tajícího sněhu, jehož znalost je důležité právě pro modelování a plánování hydrologické situace v krajině. Dlouhodobě jsou pak data z radarových snímků využívána pro monitoring a předpovědi lavin v horských oblastech.

6.1 Spektrální vlastnosti sněhu

Sněhová pokrývka vykazuje velmi vysokou odrazivost slunečního záření. Čerstvý sníh odráží 80 až 90 % záření, tající sníh odráží okolo 40 % záření a znečištěný sníh zhruba 20 % záření (MAURER, 2002). Vysokých hodnot odrazivosti nabývá sníh také ve viditelné části spektra a s narůstající vlnovou délkou odrazivost výrazně klesá (Dobrovolný, 1998).

Ve vlnových délkách 1,55 – 1,75 μm a 2,1 – 2,3 μm sníh pohlcuje záření, neodráží tedy skoro nic a díky tomu je dobře odlišitelný od vrchní části oblak, která odráží podobné vysoké hodnoty záření, ale odráží je konstantně ve všech vlnových délkách (Halounová, 2005).

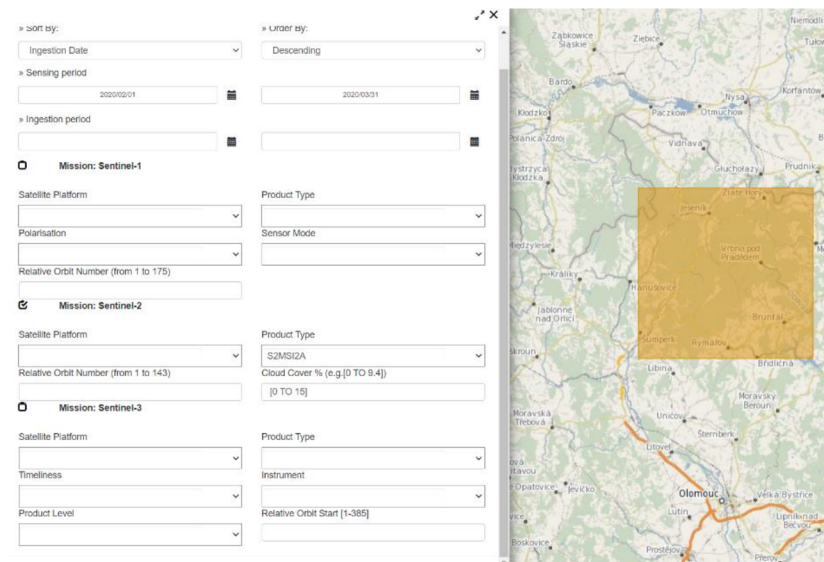
6.2 Vymezení a získání dat

K naplnění dílčího cíle této části práce byla vybrána data z družic Sentinel-1 a Sentinel-2 programu Copernicus, který je zřizován Evropskou komisí a Evropskou kosmickou agenturou. Jedná se o komplexní program zaměřený na monitorování atmosféry, mořského prostředí, území, změn klimatu, bezpečnosti a monitorování důležitého pro krizové řízení a bezpečnost (www.copernicus.eu).

Data byla stažena z Copernicus Open Acces Hub, což je platforma poskytující přístup k datům misí Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 a Sentinel-5P. Registrovaný uživatel může volně stahovat data bez poplatku.

Zájmové území bylo zvoleno tak, aby obsahovalo oblast případové studie Vysokou Holi, jednalo se tedy o území Hrubého Jeseníku (obr. 51).

Při vyhledávání vhodných snímků byly pomocí filtru vymezeny požadavky na parametry jednotlivých snímků. Základním parametrem bylo území a datum pořízení snímků. U jednotlivých družic se pak parametry lišily podle konkrétního zaměření, které je rozepsané níže v následujících podkapitolách.



Obr. 35 Online platforma Copernicus Open Acces Hub pro stažení dat

6.3 Sentinel-1

Mise Sentinel-1 sdružuje dvě družice *Sentinel-1A* a *Sentinel-1B*, vypuštěné v roce 2014 a 2016. K měření využívá mikrovlnného radaru SAR (Synthetic Aperture Radar), který využívá krátkou anténu s možností prodloužení pomocí modifikace zaznamenaného echa. Je zpracovávána pouze střední část paprsku, ve které nedochází k Dopplerovu efektu, čímž nedochází k posuvu frekvence a zvyšuje se tak podélné prostorové rozlišení (Dobrovolný, 1998).

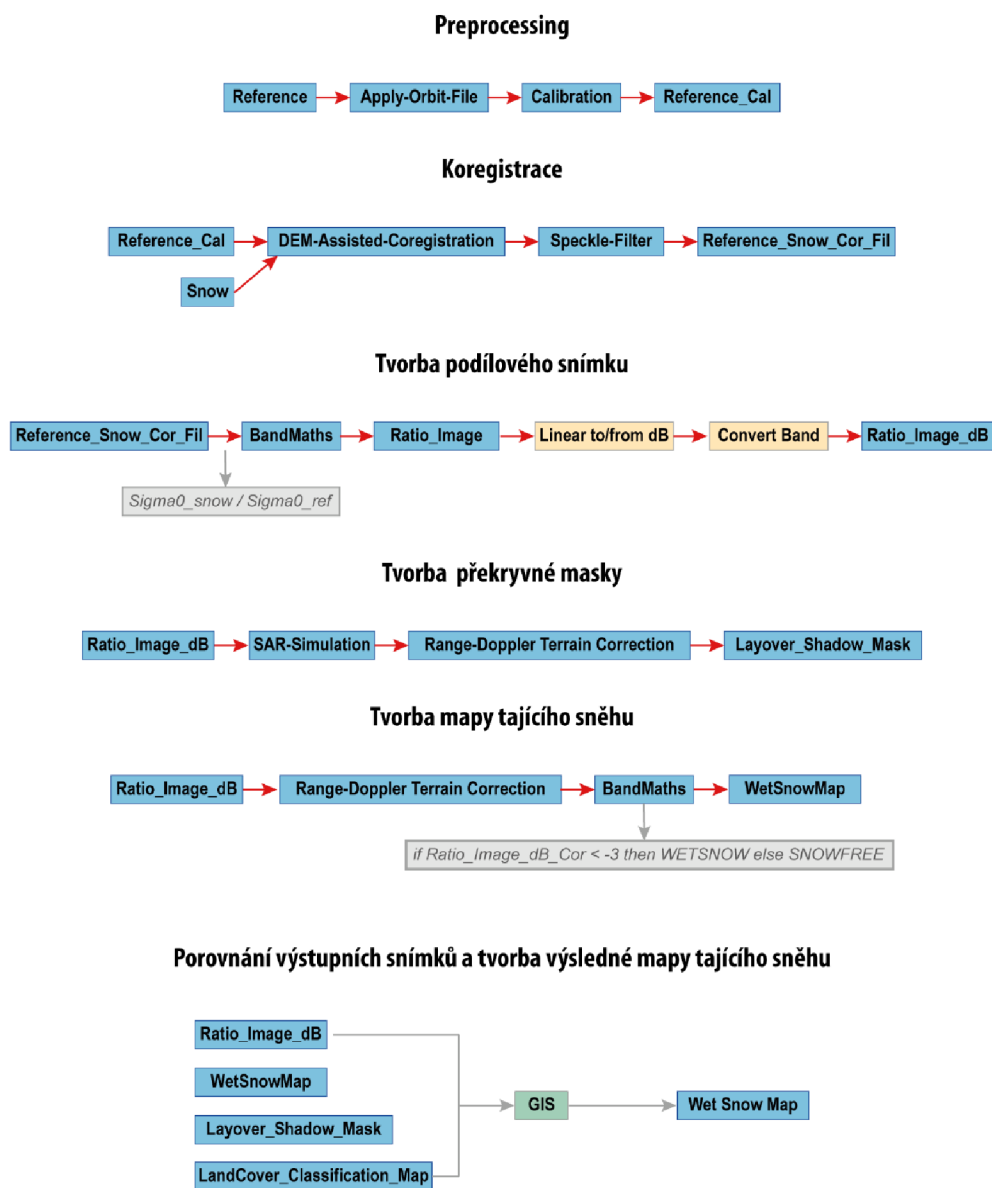
Družice snímá zemský povrch v pásmu C (5404 MHz) ve čtyřech režimech, každý je ideální pro jiný způsob využití. Z režimů *Strip Map Mode (SM)*, *Interferometric Wide Swath Mode (IW)*, *Extra Wide Swath Mode (EW)* a *Wave Mode (WV)* je pro mapování sněhové pokrývky nejvhodnější režim IW, který obstarává hlavní režim snímání nad pevninou, částečně nad mořem a v polárních oblastech. Šířka záběru činí 250 km a prostorové rozlišení je 5×20 m. Snímky z tohoto režimu jsou distribuovány v úrovních zpracování Level-0 (surová data), Level-1 (kalibrovaná data v úrovni Simple Look Complex a Ground Range Detected) a Level-2 (konkrétní produkty Ocean). Úroveň Simple Look Complex poskytuje georeferencovaná data pomocí informací o výšce a poloze družice a zachovávají tak údaje o fázovém posuvu. Data úrovně Ground Range Detected jsou zpracována pomocí multilookingu a georeferencována pomocí referenčního zemského elipsoidu. Sentinel-1 umožňuje vysílání a přijímání pulzů v horizontální i vertikální polarizaci, podle oblastí, ve které se nachází zájmové území, jsou k dispozici polarizační schémata HH-HV nebo HH (polární oblasti a mořské zalednění) a VV-VH nebo VV (ostatní oblasti) (Sentinel-1 User Guide).

Do následující části práce vstupovali snímky snímání v režimu Interferometric Wide Swath Mode (IW) a úrovně Ground Range Detected, s polarizací VV a VH

Ze snímků mise Sentinel-1 byla vytvořena Mapa tajícího sněhu (Wet Snow Map) podle manuálu *Pan-European High-Resolution Snow & Ice Monitoring of the Copernicus Land Monitoring Service – Production of basic product* (www.land.copernicus.eu).

6.3.1 Wet Snow Map

Tato metoda je založena na rozptylu radarového záření (backscattering) dopadajícího na území se sněhem. Podle obsahu vody ve sněhové pokrývce lze rozlišit intenzitu rozptylu. Mokrý, tající sníh, obsahuje větší množství vody než suchý, zmrzlý sníh, a díky tomu má jinou míru rozptylu (backscatter). Pro vytvoření výsledného snímku Wet Snow Map je tedy nutné mít dva vstupní snímky, kdy jeden bude představovat zmrzlý sníh (dry snow image) a druhý tající sníh (wet snow image). Při výběru snímků je potřeba dohledat předpověď počasí pro dané území v konkrétní den, aby bylo možné určit, kdy byly podmínky vhodné pro tání sněhu, a naopak kdy byla teplota pod bodem mrazu a bylo tak zaručeno, že snímek bude pevný či zmrzlý. Dále je pro vytvoření výsledku potřeba získat snímek CLC (Copernicus Land Cover) s klasifikací povrchu a snímek MODIS Snow Based Map. Obrázek 52 ukazuje pracovní postup tvorby mapy Wet Snow Map.



Obr. 52 Pracovní postup pro získání mapy *Wet Snow Map*

6.4 Sentinel-2

Mise Sentinel-2 je zaměřena na sledování vegetačních změn povrchu v rámci zemědělství, lesnictví, sledování tání ledovců a záplav, mapování rizik a dalších aplikací. Mise obsahuje dvě družice Sentinel-2A a Sentinel-2B, které byly vypuštěny v letech 2015 a 2017, pohybují se po subpolární dráze a leží naproti sobě, díky tomu je možné mít jedno území nasnímáno jednou za pět dní. Data jsou pořizována ve 13 optických pásmech od viditelné části až po infračervenou část elektromagnetické záření pomocí multispektrálního senzoru. Snímky jsou pořizovány v prostorovém rozlišení 10, 20 a 60 m, v desetidenním intervalu. Data jsou pořizována v několika úrovních podle stupně zpracování. Surová a nezpracovaná, případně předzpracovaná data, která nejsou pro běžné uživatele tvoří úroveň *Level 0* a *Level 1A*. Data úrovně *Level 1B* jsou uživatelům určena po atmosférické a geometrické korekci. Úroveň *Level 1C* obsahuje ortorektifikovaná a převzorkovaná data ve formátu dlaždic 100 × 100 km. Data úrovně *Level 2A* jsou dostupná po atmosférické korekci a ortorektifikaci ve formátu dlaždic 100 × 100 km (Sentinel-2 User Guide).

6.4.1 NDSI

Index sněhové pokrývnosti využívá vysoké odrazivosti sněhu ve viditelné části spektra a nízké odrazivosti v krátké infračervené části spektra. Sníh je radarových snímcích potřeba odlišit od oblačnosti, čehož je dosaženo pomocí odlišnosti oblačnosti a sněhu ve vlnové délce 1,6 mm, kde sníh výrazně pohlcuje sluneční záření a působí tmavším dojmem než oblačnost. Pokud by na snímcích zůstala oblačnost, nebylo by možné kvalitně určit zasněžené území.

K určení sněhové pokrývky na snímcích Sentinelu-2 byl využit Open Source toolbox ESA SNAP, který slouží k práci s daty mise Sentinel a jako vstupní data sloužily snímky stažené z *Copernicus Open Acces Hubu*. Jedná se o snímky mise Sentinel-2, družice Sentinel-2B. Snímky jsou z období 26. února až 26. března 2021 a data jsou poskytnuta na úrovni Level 2A.

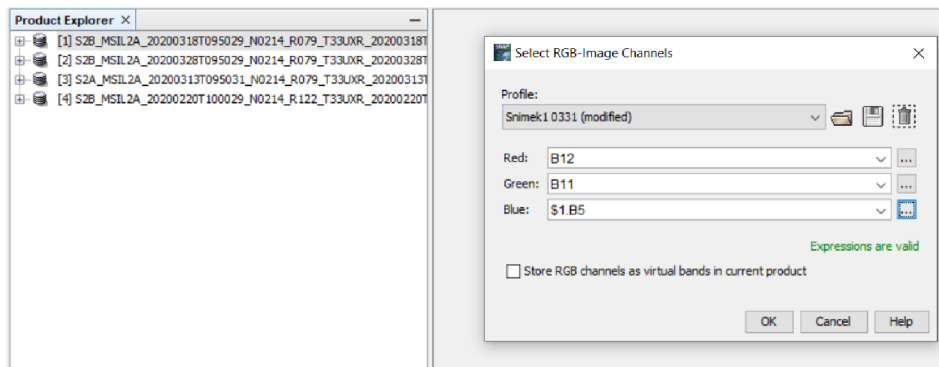
Stanovení rozsahu sněhové pokrývky na snímcích Sentinel-2 bylo vytvořeno po nastudování návodu RUS Copernicus Training: Snow Cover Mapping with Sentinel-2.

The screenshot displays the Copernicus Open Access Hub interface for a Sentinel-2A satellite image. At the top, the product ID is S2B_MSIL2A_20210326T100029_N0214_R122_T33UXR_20210326T124608. Below this, the 'Offline' status and the URL [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('ab727f47-3170-4653-bc66-938b6e3b81f9'\)/\\$value](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('ab727f47-3170-4653-bc66-938b6e3b81f9')/$value) are shown. The interface includes several interactive panels: 'Footprint' (a map showing the satellite's ground track and the specific image footprint), 'Quicklook' (a thumbnail of the satellite image showing a forested area with snow), 'Attributes' (a table of metadata), and 'Inspector' (a tool for viewing the image's spectral bands). The 'Summary' section provides the following metadata:

- Date: 2021-03-26T10:00:29.024Z
- Filename: S2B_MSIL2A_20210326T100029_N0214_R122_T33UXR_20210326T12
- Identifier: S2B_MSIL2A_20210326T100029_N0214_R122_T33UXR_20210326T12

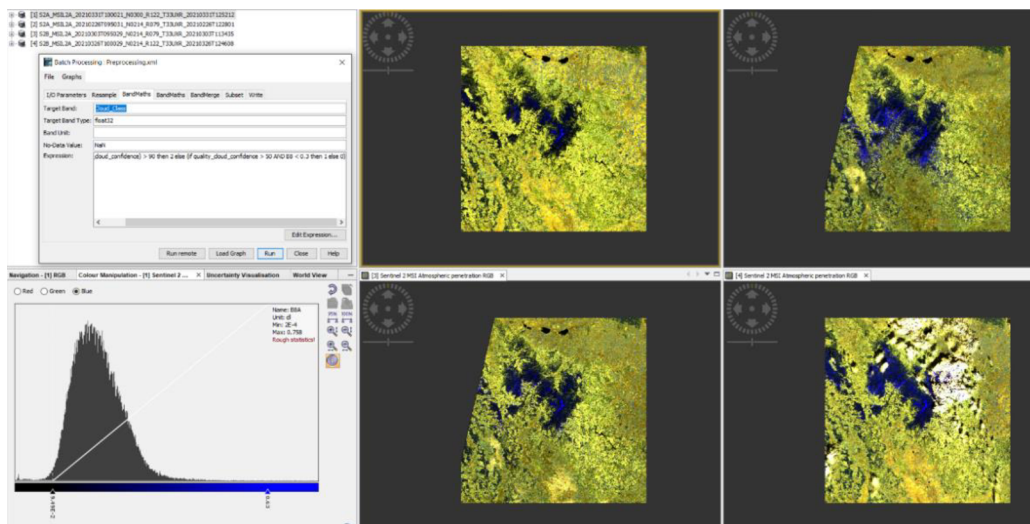
Obr. 53 Detailní informace snímku z Copernicus Open Acces Hub

Stažená data byla nahrána do prostředí programu ESA SNAP, u každého snímku byla pomocí nástroje *RGB Image Window* nastavena pásma RGB (obr.54) podle spektrálních vlastností sněhu.



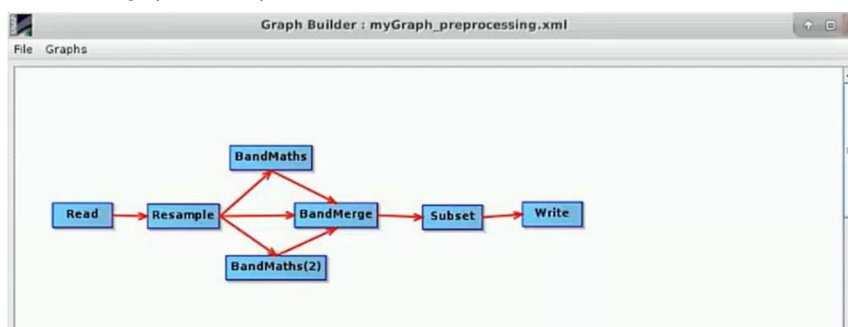
Obr. 54 Nastavení RGB pásem

Následně proběhla úprava barev pomocí histogramu tak, aby jednotlivé snímky byly mezi sebou porovnatelné (Obr. 55).



Obr. 55 Porovnání snímků pomocí histogramu

Preprocessing dat zahrnoval vytvoření masky oblačnosti a výpočet indexu sněhové pokrývnosti NDSI, do kterého vstupuje zelené viditelné pásmo (B3) a krátké infračervené (B11). Processing probíhal pomocí nástroje *Graph Builder*, který umožňuje vytvoření modelu obsahujícího více nástrojů, které se po spuštění provedou nad data automaticky (Obr. 56).

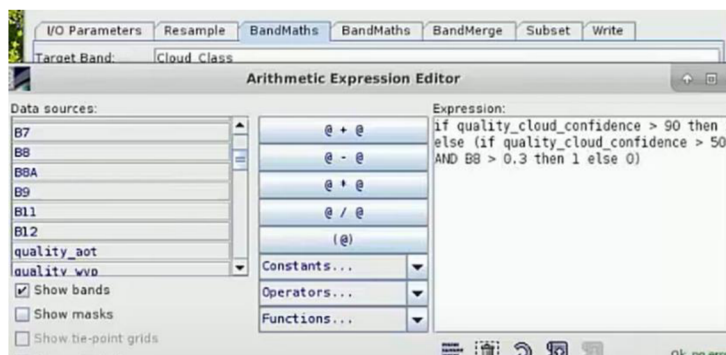


Obr. 56 Preprocessing dat pomocí nástroje *Graph Builder*

Nejprve je potřeba data převzorkovat na stejné rozlišení pomocí nástroje *Resample*. V nástrojích *Band Maths* je v prvním případě vypočítána maska oblačnosti, vycházející ze spektrálního chování mraků (obr. 57), ve druhém případě je vypočítán index sněhové pokrývnosti NDSI podle výrazu (5)

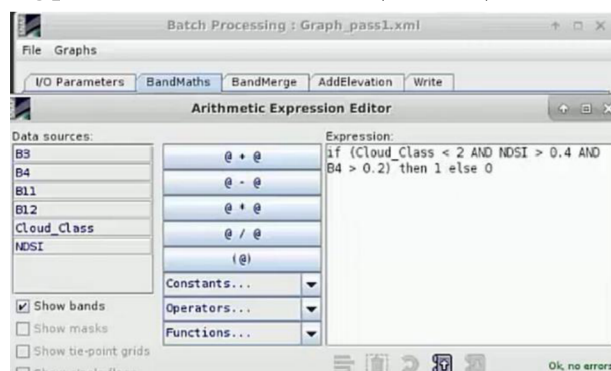
$$(B3 - B11)/(B3 + B11). \quad (5)$$

Nakonec je potřeba data ořezat, v tomto kroku jsou vybírána pásma, která mají být zachována, v tomto případě konkrétně pásma B3, B4, B11, B12, vytvořená maska oblačnosti (*CloudClass*) a vypočítaný index (NDSI).



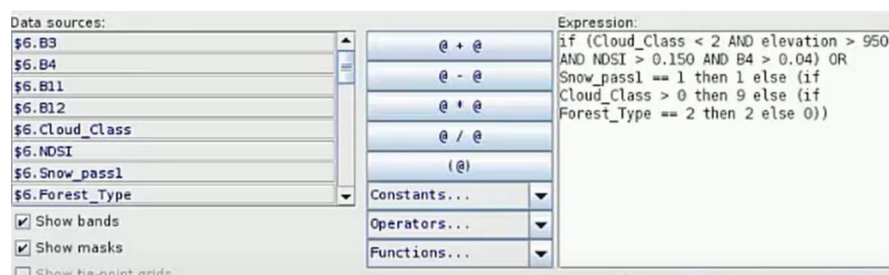
Obr. 36 Vytvoření masky oblačnosti *CloudClass*

V další části zpracování se určuje nad vytvořenými pásmy, zda pixel obsahuje či neobsahuje sníh na základě hodnot vypočítané masky oblaků, hodnot červené části viditelného spektra a vypočítaného indexu NDSI (Obr. 58).

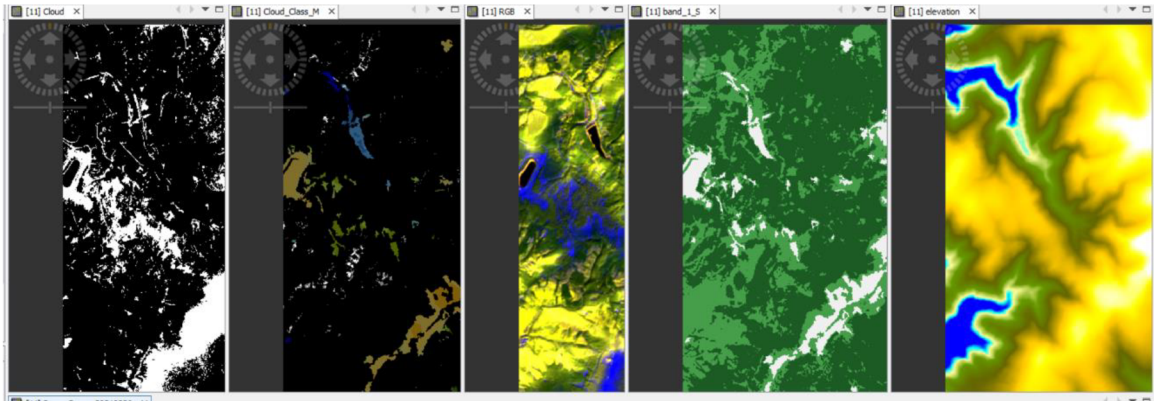


Obr. 58 Výskyt sněhu v pixelu

Následně se k pásmům přidá snímek s informací o zalesnění, konkrétně produkt Copernicus Land Cover *Forest Type*, dostupný z webových stránek Copernicus (<https://land.copernicus.eu>). Jedná se o snímek vysokého rozlišení obsahující typy lesů. Nakonec se z nabídky výškových modelů v programu SNAP se vybere výškový model SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Pomocí výsledného výpočtu hodnot z kombinovaných pásem vznikne výsledný snímek s rozsahem sněhové pokrývky (Obr. 59 a Obr. 60).



Obr. 37 Výraz pro výpočet výsledného rozsahu sněhové pokrývky



Obr. 60 Porovnání kombinovaných pásem. Zleva maska oblačnosti, pásmo B4, RGB kombinace pásem snímku, snímek zalesnění, výškový model

Obrázek 61 ukazuje výsledné stanovení rozsahu sněhové pokrývky pomocí indexu sněhové pokrývnosti na území Jeseníků, v období od 26. února do 31. března 2021.

INDEX SNĚHOVÉ POKRYVNOSTI *NDSI*

rozsah sněhové pokrývky na vybraném území Jeseníků
v období 26.02.2021 - 26.03.2021



Obr. 61 Výsledek stanovení rozsahu sněhové pokrývky pomocí indexu NDSI

7 VÝSLEDKY

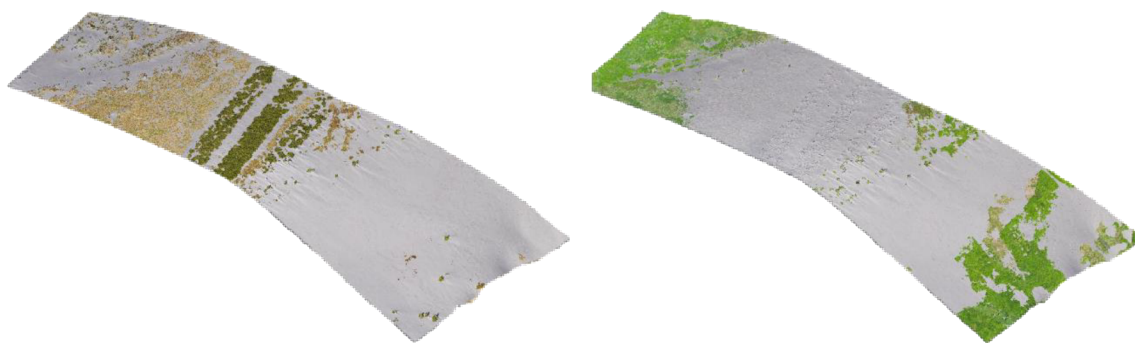
7.1 Výsledky stanovení metrik pomocí metod fotogrammetrie

Cílem diplomové práce bylo stanovení metrik sněhové pokrývky pomocí fotogrammetrie na území Vysoké hole. V první fázi bylo provedeno letecké a UAV snímkování, k tomu terénní zaměření vličovacích bodů a bodů s referenční výškou sněhu. Z takto získaných dat byla následně generována bodová mračna, ze kterých byla stanovena výška sněhové pokrývky a mračna byla mezi sebou porovnávána.

7.1.1 Porovnání mezi jednotlivými mračny bez sněhu

Jako referenční model bez sněhové pokrývky sloužila bodová mračna vygenerovaná ze snímkování na podzim 2019 a v létě 2021. U prvního zmíněného snímkování se na vrcholové plošině Vysoké hole vyskytovala vzrostlá borovice kleč, která byla krátce po snímkování vykácena. Proto bylo pořízeno druhé bodové mračno z léta 2021, které ukazuje stav terénu bez sněhové pokrývky po vykácení. V letním období však byla ostatní vegetace (vřesoviště, alpinské trávníky, keře) na vrcholu vegetačního období.

V případě, kdy bylo srovnáváno bodové mračno se sněhem s mračnem bez sněhu 2019, pak na vrcholu vystupovala nad sněh borovice kleč, v případě letního mračna 2021 vystupovala nad sněh vzrostlejší nízká vegetace nacházející se směrem k okrajům zájmového území (Obr. 62). Pokud byla vegetace příliš vysoká, v jejím místě pak nebyla stanovena výška sněhové pokrývky, ale byla vypočítána výška místní vegetace.

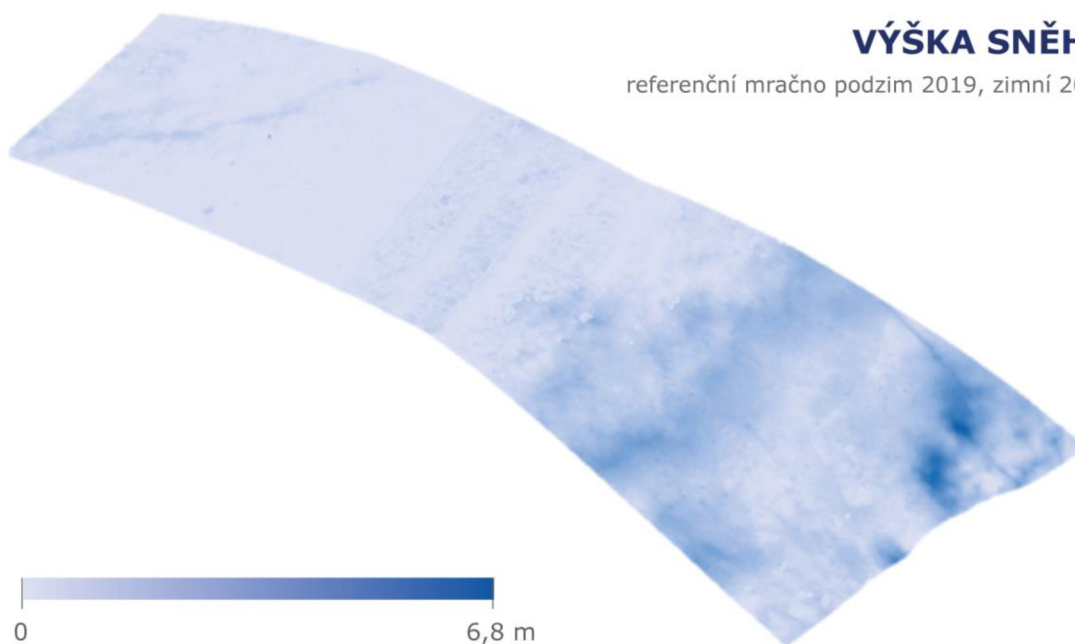


Obr. 62 Srovnání bodového mračna se sněhem 2020 a bez sněhu 2019 (vlevo) a 2021 (vpravo)

Následující srovnání bylo provedeno za účelem ověření možnosti stanovení sněhové pokrývky v místě po výseku borovice. Do výpočtu sněhové pokrývky vstupovala postupně obě bodová mračna bez sněhu (2019 a 2021) a byla porovnávána vůči bodovému mračnu se sněhem 2020. V případě srovnání s mračnem 2019 je celková výška sněhové pokrývky vyšší, stejně jako její objem. Přestože se na vrcholu nachází borovice kleč a alpinské trávníky, směrem k okrajům, především v části, kde se nachází Velká kotlina, je výskyt vegetace minimální, proto zde bylo možné stanovit konkrétnější výsledky sněhových metrik (Obr. 63).

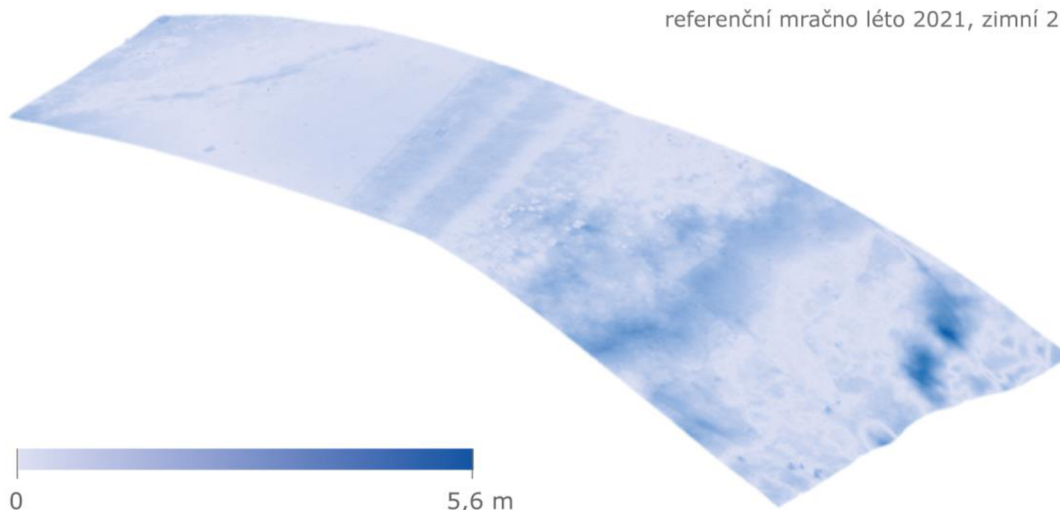
VÝŠKA SNĚHU

referenční mračno podzim 2019, zimní 2020



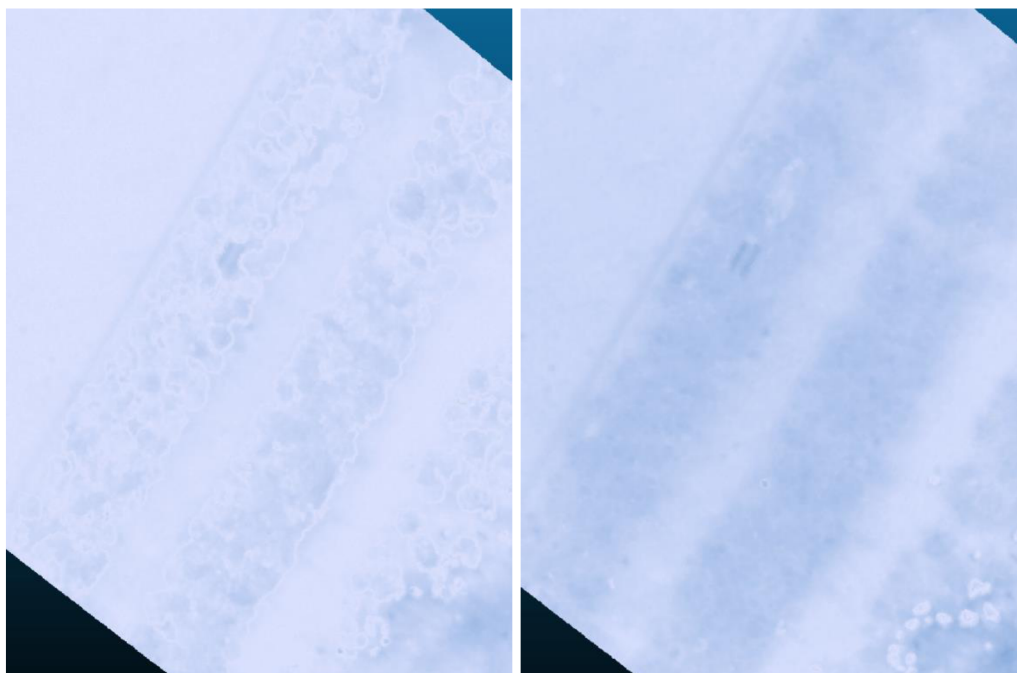
VÝŠKA SNĚHU

referenční mračno léto 2021, zimní 2020



Obr. 63 Porovnání stanovené výšky sněhu na celém zájmovém území u jednotlivých bodových mračen bez sněhu (2019 nahore, 2021 dole)

V kapitole 5.2.3 *Stanovení výšky sněhu v okolí vegetace* je znázorněno světlé ohraničení vegetace na výsledném modelu sněhové pokrývky, toto ohraničení se týká také borovice klec. Na první pohled můžou modely sněhové pokrývky z obr. 63 působit jako prohozené, vzhledem k výše zmíněnému dopočítávání výšky ke stromům nikoli stanovení výšky sněhu, to se však týká pouze vysokých stromů. V tomto případě byla vegetace právě ohraničena světlou barvou v případě referenčního bodového mračna z podzimu 2019 a u referenčního mračna 2021 byla správně vypočítána výška sněhu. Území s výsekem po borovici leží mezi vřesovištěm a je tedy díky výseku nižší než okolní vegetace, proto je zde i výška sněhu vyšší a na modelu vystupují oba pásy výseku. Obr. 64 ukazuje detailní pohled na tyto pásy a v nich stanovenou výšku sněhu.



Obr. 64 Detailní pohled na stanovenou výšku sněhu v pásnu borovice, respektive výseku (vlevo 2019 borovice, vpravo 2021 výsek). Hodnoty výšky sněhu se v pásnu borovice pohybují mezi 10 cm a 40 cm, v místě výseku se pohybují mezi 40 cm a 120 cm.

Výše znázorněné modely výšky sněhu byly vypočítány pro bodové mračno se sněhem 2020. Následující tabulka 5 uvádí přehled jednotlivých stanovených metrik sněhové pokrývky nad referenčním bodovým mračnem bez sněhu 2021.

Tab.5 Přehled metrik sněhové pokrývky pro celé území Vysoké hole

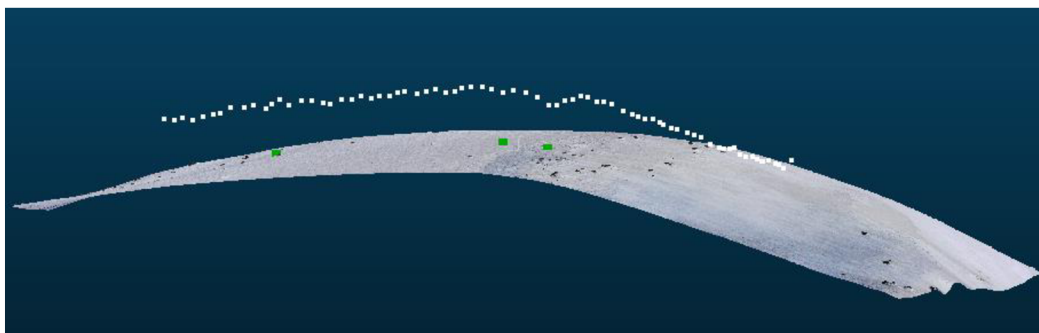
Vysoká hole	min. výška sněhu	max. výška sněhu	objem v km ³	rozloha v km ²
2020	0 cm	560 cm	166,32	0,139
2021	0 cm	406 cm	108,74	0,143
2022	0 cm	640 cm	144,88	0,155

*referenční bodové mračno bez sněhu 2021

Jako možné řešení problému s vegetací na referenčních bodových mračnech bylo otestováno využití digitálního modelu DMR 5G jako referenčního modelu pro stanovení výšky sněhu. Kvalita přesnosti stanovení sněhovými metrik je v tomto případě snížena vlivem horší výškové přesnosti DMR 5G než jaké bylo dosaženo při vlastním měření. Pro srovnání nebo pouze obecnou informaci o metrikách sněhu model využít lze, nejde však na základě něj říci, jaká přesná výška sněhu se v daném místě nachází. Druhým problémem pak je to, že bodová mračna se sněhem obsahují stromy, takže ty budou vždy vypočítávány jako stromy a ne jako výška sněhu. Pro vypořádání se s nízkou vegetací je však model vhodný. Přehledné určení výšky sněhu a dalších metrik na jednotlivých mračnech bodů je uvedeno v přílohách 1 až 4.

7.1.2 Porovnání stanovené výšky sněhu s daty naměřenými v terénu

Pro ověření přesnosti stanovené výšky sněhu pomocí měřičských snímků byla v terénu zaměřena referenční výška sněhové pokrývky pro každý rok snímkování. Tato hodnota pak sloužila pro kontrolu přesnosti odečtení hodnoty výšky sněhu u vytvořeného modelu sněhové pokrývky. Druhou možnost porovnání stanovené výšky pak představuje srovnání s hodnotami pozemního zaměření výšky sněhu, kterou provádí každoročně Správa CHKO Jeseník. Vzhledem k použitým metodám zaměření však nelze využít toto měření jako referenční, ale pouze porovnávací. Na obrázku 65 je viditelný rozdíl mezi výškou bodů změřených při pozemním měření sněhu Správou CHKO Jeseník a modelem výšky sněhové pokrývky vytvořeným z referenčního mračna bez sněhu 2021 a se sněhem 2021. Zelené body představují referenčně změřenou výšku sněhové pokrývky. Výškový rozdíl mezi body z pozemního měření a modely generovanými ze snímkování byl v průměru okolo 40 metrů, což odpovídá chybnému použití geoidu v nekvalitním GPS přijímači použitém pro zaměření bodů.



Obr. 65 Rozdíl mezi výškou sněhu změřenou Správou CHKO a modelem výšky sněhové pokrývky

Tabulka 6 ukazuje rozdíl mezi výškami naměřenými pozemním měřením a výškou odečtenou z vytvořeného modelu výšky sněhové pokrývky (referenční mračno léto 2021, srovnávané zimní 2021).

Tab.6 Srovnání výšky sněhové pokrývky změřené v terénu a odečtené z modelu

číslo bodu	měření 2021 (cm)	model (cm)
31	70	79
32	110	121
33	60	55
34	80	71
35	10	6
36	10	18
37	15	24

Porovnání výšky sněhu s referenčními a srovnávacími výškami proběhlo ve srovnávacích územích uvedených v kapitole 5.1.3 *Srovnávací území*, dílčí výsledky jsou rozepsány v kapitole 5.2 *Výška sněhové pokrývky* a přehledné výsledky stanovení metrik sněhové pokrývky v těchto územích obsahuje příloha 5.

Níže uvedené tabulky 7, 8 a 9 ukazují výšku sněhu zaměřenou referenčně v terénu a porovnání s výškou stanovenou na výsledných příslušných modelech sněhové pokrývky.

Tab.7 Srovnání referenční výšky sněhu 2022 a stanovené výšky

číslo bodu	referenční měření 2022 (cm)	stanovená výška(cm)
10	51,6	102
11	29	8
12	58,5	46

Tab.8 Srovnání referenční výšky sněhu 2021 a stanovené výšky

číslo bodu	referenční měření 2021 (cm)	stanovená výška(cm)
100	12,5	18
101	28	25
102	38	39

Tab.9 Srovnání referenční výšky sněhu 2020 a stanovené výšky

číslo bodu	referenční měření 2020 (cm)	stanovená výška(cm)
1	19	29
2	72	140

7.2 Výsledky stanovení metrik pomocí metod DPZ

Dílčím cílem diplomové práce bylo zjištění možností stanovení metrik pomocí dálkového průzkumu Země. Při mapování sněhové pokrývky pomocí satelitních snímků je využíváno vysoké odrazivosti sněhu a spektrálních vlastností sněhu v jeho různých formách. Rozdílné odrazivosti čerstvého, zmrzlého a tajícího sněhu se využívá například pro detekci lavinového nebezpečí nebo při mapování tání ledovců.

Spektrálních vlastností sněhu se využívá i při odlišení sněhové pokrývky od oblačnosti, kdy pomocí znalosti chování sněhu a oblačnosti v různých částech elektromagnetického spektra lze na družicových snímcích stanovit zasněžená území a rozsah sněhové pokrývky. Stanovením rozsahu sněhové pokrývky na družicových snímcích Sentinel-2 na území Jeseníků se zabývá kapitola 6.4.1 NDSI, výsledek stanovení této sněhové metriky a rozdíl ve velikosti zasněženého území v období od 26. února do 26. března 2021 představuje obrázek 61. A stejný výsledek pro období od 13. března do 28. března 2020 zobrazuje níže uvedený obrázek 66.

INDEX SNĚHOVÉ POKRYVNOSTI NDSI

rozsah sněhové pokrývky na vybraném území Jeseníků
v období 13.03.2020 - 28.03.2020



Obr. 66 Stanovení rozsahu sněhové pokrývky pomocí indexu NDSI na území Jeseníků, v období do 13. března do 28. března 2020

8 DISKUZE

Stanovení metrik sněhové pokrývky probíhalo nad územím Vysoké hole nacházející se v pohorí Hrubý Jeseník. Toto území bylo vybráno na základě již probíhající spolupráce Katedry geoinformatiky se Správou CHKO Jeseník a díky tomu dostupnými daty z již hotového snímkování Vysoké hole na podzim 2019 v rámci jiné studie.

Na začátku zpracování diplomové práce bylo plánováno ověření možností metod mapování sněhové pokrývky pomocí UAV zařízení a vlivů působících na správné stanovení sněhových metrik, v blízkosti města Olomouc. Vzhledem k meteorologickým podmínkám, mírnější zimě a nedostatku sněhové pokrývky v krátké dojezdové vzdálenosti, bylo od tohoto plánu upuštěno a mapování bylo provedeno přímo na území případové studie. S ohledem na vzdálenost Vysoké hole, bylo snímkování a sním související terénní práce, provedeno pouze třikrát v zimním období a jednou v letním období bez sněhové pokrývky. Díky tomu nebylo možné ověřit všechny vlivy působící na stanovení metrik sněhu, ale pouze některé.

První zimní snímkování bylo provedeno pomocí letadla nad celým územím Vysoké hole, následně byla snímkována pouze centrální část vzhledem k časové náročnosti terénních prací a dlouhé výpočetní době při zpracování snímků. Během terénních prací (např. špatná dostupnost signálu při zaměřování vřícovacích bodů) i zpracování se objevily drobné problémy způsobené neznalostí dané problematiky, ale byly vždy řešeny konzultací nebo nastudováním příslušné odborné literatury.

Snímky byly zpracovány v programu Agisoft Metashape Professional, který nabízí kvalitní možnosti pro tvorbu bodových mračen a 3D modelů, jeho nevýhodou je však dostupnost licence, v Demo verzi programu může uživatel vyzkoušet funkcionalitu nástrojů nemůže však exportovat výstupy, krátkodobým řešením tohoto problému 30denní zkušební verze nebo studentská licence. Pro další zpracování se nabízí využití jině programu pro zpracování a tvorbu 3D modelů a bodových mračen a porovnání vytvořených výsledků mezi oběma programy. Alternativní volbou programu může být například software *RealityCapture* od slovenské firmy Epic Games, vytvořený pro fotogrammetrické zpracování fotografií a 3D modelů.

Snímkování bylo provedeno pomocí letecké a UAV fotogrammetrie s využitím měřičské kamery umístěné na nosiči letadla nebo dronu. Těmito metodami byly získány snímky sněhové pokrývky včetně vegetace, která při tvorbě bodových mračen a výsledném stanovení sněhových metrik měla vliv na kvalitu vytvořeného výsledku. Řešením tohoto problému by mohlo být využití laserového skenování terénu bez sněhu a ověření možnosti mapování sněhové pokrývky pomocí Lidarového skeneru. Další možnost představuje využití přídavného infračerveného filtru, který je namontován na objektiv kamery. Kombinace s infračervenými snímky by mohla přinést zajímavé řešení odstranění vegetace a stanovení sněhových metrik. Obě tyto možnosti můžou být podnětem k dalšímu rozvinutí tématu této diplomové práce.

V úvodu je zmíněno, že území případové studie bylo vybráno na základě probíhající spolupráce se Správou CHKO Jeseníky. Správa CHKO poskytla každý rok data s pozemního měření výšky sněhové pokrývky, které byly původně plánována pro kontrolní ověření přesnosti stanovených metrik. Data jsou ale měřena nekvalitním GPS přijímačem, mají velkou odchylku v naměřené výškové souřadnici, proto byla použita pouze pro srovnání. Použitelným údajem z tohoto měření je samotný údaj o změřené výšce sněhu, která je v terénu odečítána ze sněhoměrné latě na přesnost 5 cm. Měření se provádí ve čtyřech transektech napříč územím s ohledem na lavinová území. Pozemní terénní měření je časově i fyzicky velmi náročné a nahrazení fotogrammetrickým

měřeními by mohlo přinést rychlejší a přesnější výsledek. Informace o výšce sněhové pokrývky je pro Správu CHKO Jeseníky důležitý pro odhad případného lavinového nebezpečí a přehled o vodní zásobě vody v přírodě. Data získaná v rámci této diplomové práce proto byla poskytnuta zaměstnancům Správy CHKO Jeseníky k jejich účelům. Pokud by spolupráce mezi Katedrou a Správou pokračovala i nadále a výška sněhové pokrývky by byla fotogrammetricky snímkována pravidelně, mohly by být v terénu zaměřeny kontrolní body (správní budova, pata plotu ohraničujícího meteorologickou stanicí, ...), které by byly viditelné na snímcích bez sněhu i se sněhem a sloužily by pro kvalitnější určení přesnosti bodových mračen v případě špatně dostupného signálu při zaměření vličovacích bodů.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo stanovit metriky sněhové pokrývky pomocí metod fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země. Tento cíl byl rozdělen do dvou částí praktického zpracování práce, kdy fotogrammetrické stanovení metrik sněhové pokrývky tvoří hlavní část diplomové práce a metody dálkového průzkumu Země tvoří dílčí část praktického zpracování. Před praktickou částí práce proběhlo teoretické seznámení se s problematikou a studium odborné literatury.

Zpracování pomocí metod fotogrammetrie bylo rozděleno do přípravné části, terénního měření a snímkování, zpracování získaných dat a do části stanovení sněhových metrik. Přípravná část zahrnovala výběr a kontrolu území, přípravu na terénní zaměření vličovacích bodů a bodů s referenční výškou sněhu a předletovou přípravu. Ve fázi terénního měření autorka práce s pomocí vedoucího práce zaměřila vličovací body pro konkrétní snímkování terénu pomocí technologie GNSS RTK s přístrojem GPS, v jednom případě bylo využito rychlé statické metody na místo Real Time Kinematic metody z důvodu špatné dostupnosti mobilního signálu pro příjem korekcí. Výška sněhu byla měřena pomocí výtyčky a metru, pro správné změření výšky bylo nutné zkontrolovat, že je měřeno opravdu od povrchu Země. Snímkový let prováděl vedoucí práce, v prvním případě snímkování z letadla sám, v ostatních případech snímkování UAV zařízením za účasti autorky práce.

Fotogrammetrické snímky poskytnuté vedoucím diplomové práce byly následně autorkou práce zpracovány fotogrammetrickými metodami do podobny bodových mračen v programu Agisoft Metashape Professional a v prostředí programu CloudCompare z nich byly vypočítávány metriky sněhové pokrývky. Při tvorbě bodových mračen, a následně při určování sněhových metrik byly ověřovány a zjišťovány jednotlivé vlivy působící na přesnost a kvalitu generování mračna bodů, respektive stanovení výšky sněhu. Jedná se například o vliv intenzity slunečního záření, zastínění území oblačností či výskyt vegetace na snímcích. Výsledná stanovená výška sněhové pokrývky byla porovnávána s výškou sněhu získanou referenčním a pozemním terénním měřením.

Výsledky získané fotogrammetrickými metodami zpracování prokázaly, že využití UAV zařízení při mapování sněhové pokrývky může přinést kvalitní informace o sněhové pokrývce a lze je využít při určování výšky sněhu na území Vysoké hole, v pohoří Hrubý Jeseník.

Dílčí část praktického zpracování zabývající se stanovením sněhových metrik metodami dálkového průzkumu Země byla zaměřena na určení rozsahu sněhové pokrývky na snímcích mise Sentinel-2 pomocí poměrového indexu sněhové pokrývnosti NDSI v rámci vymezeného území Jeseníků, i tento cíl práce byl naplněn.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Použitá literatura:

ABER, James S., Irene MARZOLFF a Johannes B. RIES. 2010. *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*. Elsevier Science. ISBN 978-0-444-53260-2.

BÖHM, Jozef. *Fotogrammetrie: učební texty*. Ostrava, 2002. VŠB-TOU.

BÜHLER, Y., M. S. ADAMS, R. BÖSCH, and A. STOFFEL. 2016. "Mapping Snow Depth in Alpine Terrain with Unmanned Aerial Systems (UASs): Potential and Limitations." *The Cryosphere* 10 (3): 1075–1088. doi:10.5194/tc-10-1075-2016.

BÜHLER, Y., A. HÜNI, M. CHRISTEN, R. MEISTER, and T. KELLENBERGER. 2009. "Automated Detection and Mapping of Avalanche Deposits Using Airborne Optical Remote Sensing Data." *Cold Regions Science and Technology* 57 (2–3): 99–106. Dostupné z doi:10.1016/j.coldregions.2009.02.007.

BÜHLER, Y., M. MARTY, L. EGLI, J. VEITINGER, T. JONAS, P. THEE, and C. GINZLER. 2015. "Snow Depth Mapping in High-Alpine Catchments Using Digital Photogrammetry." *The Cryosphere* 9 (1): 229–243. Dostupné z doi:10.5194/tc-9-229-2015.

BÜHLER, Y., L. MEIER, and C. GINZLER. 2015. "Potential of Operational High Spatial Resolution NearInfrared Remote Sensing Instruments for Snow Surface Type Mapping." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 12 (4): 821–825. Dostupné z doi:10.1109/LGRS.2014.2363237.

BÜHLER, Yves, Marc S. ADAMS, Andreas STOFFEL a Ruedi BOESCH. Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2017, 38(8-10), 3135-3158 [cit. 2022-02-08]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2016.1275060

COOK, K. L. (2017). An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278, 195–208. Dostupné z: <https://doi.org/>

COMER, R.P., G. KINN, D. LIGHT a C. MONDELLO. 1998. *Talking Digital. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64, p. 1139-1142.

DEEMS, Jeffrey S., Thomas H. PAINTER a David C. FINNEGAN. Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology* [online]. 2013, 59(215), 467-479 [cit. 2022-02-08]. ISSN 0022-1430. Dostupné z: doi:10.3189/2013JoG12J154

DEGEN, Zdeněk a Zdeněk STEHLÍK. Jeseníky. Ilustroval Jiří KRÁL, ilustroval Stanislav VOREL. Praha: Olympia, 1991. Turistické průvodce České a Slovenské Federativní Republiky. ISBN 80-7033-103-8.

DOBROVOLNÝ, P. Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu. Brno: PřF MU, 1998.

DOMINE F. (2011) Physical Properties of Snow. In: Singh V.P., Singh P., Haritashya U.K. (eds) Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_422

DONG, Chunyu. Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review. Journal of Hydrology [online]. 2018, 561, 573-583 [cit. 2022-02-07]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2018.04.027

FIERZ, C., ARMSTRONG, R.L., DURAND, Y., ETCHEVERS, P., GREENE, E., MCCLUNG, D.M., NISHIMURA, K., SATYAWALI, P.K. and SOKRATOV, S.A. 2009. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology N°83, IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, Paris.

FORMÁNEK, Tomáš a Michal HOLUB. Tisícovky Čech, Moravy, Slezska: průvodce po tisícimetrových vrcholech České republiky. Praha: Jerome, 2003. ISBN 80-903266-0-9.

GOETZ, Jason a Alexander BRENNING. Quantifying Uncertainties in Snow Depth Mapping From Structure From Motion Photogrammetry in an Alpine Area. Water Resources Research [online]. 2019, 55(9), 7772-7783 [cit. 2022-02-08]. ISSN 0043-1397. Dostupné z: doi:10.1029/2019WR025251

HALOUNOVÁ, Lena. Dálkový průzkum Země. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1

HENDRICKX, H., VIVERO, S., de COCK, L., de WIT, B., de MAEYER, P., LAMBIEL, C., et al. (2019). The reproducibility of SfM algorithms to produce detailed digital surface models: The example of PhotoScan applied to a high-alpine rock glacier. Remote Sensing Letters, 10(1), 11–20.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1519641>

JAMES, M. R., ROBSON, S., & SMITH, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. Earth Surface Processes and Landforms, 42(12), 1769–1788. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/esp.4125>

KOČÍ, Kateřina a Martin KOČÍ. Jesenické Horské Hole. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, 2019. ISBN 978-80-7620-028-9.

KOČÍ, Kateřina. Velká kotlina - po stopách ledovce: Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky. Actaea - společnost pro přírodu a krajinu. Karlovice, 2017.

KNUTH, Donald E. The Art of Computer Programming: Fundamental Algorithms. Third Edition. United States: Addison-Wesley, 1968. ISBN 0-201-03801-3.

LEE, C. & JONES, Simon & BELLMAN, Chris & BUXTON, L.. (2008). DEM CREATION OF A SNOW COVERED SURFACE USING DIGITAL AERIAL PHOTOGRAPHY.

LENDZIOCH, Theodora, Jakub LANGHAMMER a Michal JENICEK. Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry. Sensors [online]. 2019, 19(5) [cit. 2022-02-08]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19051027

MAURER, J. (2002). Retrieval of surface albedo from space [online]. 2002, 12. Dostupné z: <http://www2.hawaii.edu/~jmaurer/albedo/>

MIKHAIL, Edward M., James S. BETHEL a J. Chris MCGLONE. Introduction to modern photogrammetry. Chichester: Wiley, c2001. ISBN 0-471-30924-9.

MINAŘÍK, Robert. Sestavení a ověření konceptu leteckého snímání s využitím pilotovaných letadel a neměřických komor. Olomouc, 2015. diplomová práce (Mgr.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Přírodovědecká fakulta

MIRŤOVSKÝ, Jakub. Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení. Olomouc, 2013. disertační práce (Ph.D.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Přírodovědecká fakulta

NOLAN, M. & LARSEN, C. & STURM, Matthew. (2015). Mapping snow-depth from manned-aircraft on landscape scales at centimeter resolution using Structure-from-Motion photogrammetry. The Cryosphere Discussions. 9. 333-381. 10.5194/tcd-9-333-2015.

PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 1. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 200 s. ISBN 978-80-01-04249-6.

PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 2. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04719-4.

RAPANT, Petr. Družicové polohové systémy. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0124-8.

SMITH, F.M.; COOPER, C.F.; CHAPMAN, E.G. Measuring Snow Depths by Aerial Photography. In Proceedings of the 35th Annual Western Snow Conference, Boise, ID, USA, 18-20 April 1967; pp. 66-72

VANDER JAGT, Benjamin, Arko LUCIEER, Luke WALLACE, Darren TURNER a Michael DURAND. Snow Depth Retrieval with UAS Using Photogrammetric Techniques. Geosciences [online]. 2015, 5(3), 264-285 [cit. 2022-02-08]. ISSN 2076-3263. Dostupné z: doi:10.3390/geosciences5030264

VOŽENÍLEK, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.

WOLF, Paul R., Bon A. DEWITT a Benjamin E. WILKINSON. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. 4th Edition. Boston: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780071761123.

Informační zdroje:

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition. Version 1.7. 2021. Dostupné také z: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf

CloudCompare User Manual. Version 2.6.1. 2015. Dostupné z: <https://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>

CloudCompare wiki. Up-to-date Documentation. Version 2.6 and higher versions. Dostupné z: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Main_Page

Cessna 172. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2014-07-28 [cit. 2015-04-21].

Dostupné z: cs.wikipedia.org/wiki/Cessna_172

VFR příručka Česká republika [online]. 28 Jul 2022. Letecká informační služba ŘLP ČR, 2022 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/vfrmanual/>

PHANTOM 4 PRO/PRO+: User Manual [online]. 2016 [cit. 2021-10-27]. Dostupné z: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/Phantom+4+Pro+Pro+Plus+User+Manual+v1.0.pdf

Nástroj pro online plánování GNSS měření, Trimble GNSS Planning Online, Dostupné z: <https://www.gnssplanning.com/#/settings>

Online aplikace ŘLP ČR AisView/ DronView pro předletovou přípravu, Dostupné z: <https://dronview.rlp.cz/>

Nástroj pro online transformace souřadnic – geodetická aplikace Transformace souřadnic. Dostupné z Geoportálu ČÚZK:

[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(oz4ubedg5wyuw1auqswkxi4\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=wcts&menu=191](https://geoportal.cuzk.cz/(S(oz4ubedg5wyuw1auqswkxi4))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=wcts&menu=191)

Archiv počasí. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/archiv.php?historie=2020-03-08®ion=7>

Pan-European High-Resolution Snow & Ice Monitoring of the Copernicus Land Monitoring Service – Production of basic product dostupný z: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/hrsi-snow-s1-atbd/>

Sentinel-1 SAR User Guide. Latest Version. [online].

Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>

Sentinel-2 MSI User Guide. Latest Version. [online].

Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>

RUS Copernicus Training: Snow Cover Mapping with Sentinel-2. [online]. Dostupné z: https://rus-copernicus.eu/portal/wp-content/uploads/library/education/training/CRYO03_SnowCover_Sumava_Tutorial.pdf

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy

- Příloha 1 Tabulka stanovených metrik sněhové pokrývky na jednotlivých mračnech bodů
- Příloha 2 Stanovení výšky sněhové pokrývky na zájmovém území Vysoké hole z referenčního bodového mračna bez sněhu 2019 a se sněhem 2021
- Příloha 3 Stanovení výšky sněhové pokrývky na zájmovém území Vysoké hole z referenčního bodového mračna bez sněhu 2021 a se sněhem 2021
- Příloha 4 Stanovení výšky sněhové pokrývky na zájmovém území Vysoké hole z referenčního bodového mračna bez sněhu 2022 a se sněhem 2021
- Příloha 5 Stanovení výšky sněhové pokrývky v jednotlivých srovnávacích oblastech

Volné přílohy

- Příloha 6 Poster
- Příloha 7 DVD

Popis struktury DVD

Adresář	Podadresář
Text_Prace	-
Vstupni_data	mereni
Vystupni_data	excel Bodova_mracna
Web	

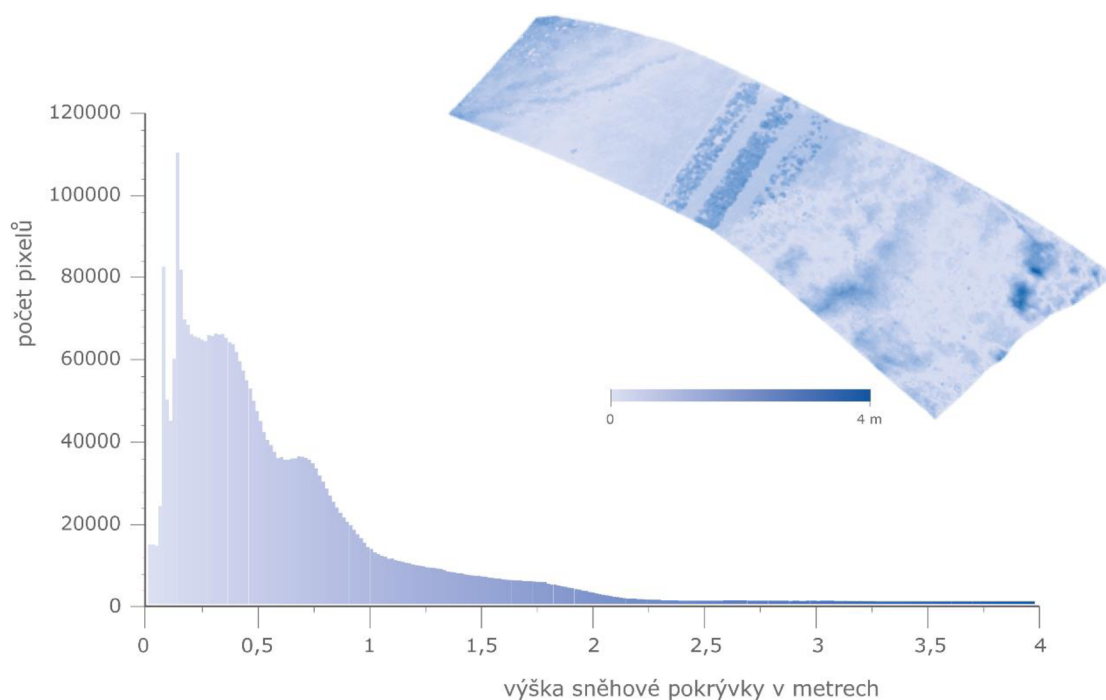
Příloha 1: Tabulka stanovených metrik sněhové pokrývky na jednotlivých mračnech bodů

Vysoká hole	min. výška sněhu			max. výška sněhu		
	podzim 2019	léto 2021	DMR 5G	podzim 2019	léto 2021	DMR 5G
sníh 2020	0 cm	0 cm	0 cm	566 cm	560 cm	670 cm
sníh 2021	0 cm	0 cm	0 cm	401 cm	406 cm	518 cm
sníh 2022	0 cm	0 cm	0 cm	694 cm	640 cm	832 cm
	objem v km ³			rozloha v km ²		
	podzim 2019	léto 2021	DMR 5G	podzim 2019	léto 2021	DMR 5G
sníh 2020	121,55	166,32	-	0,136	0,139	-
sníh 2021	102,45	108,74	-	0,141	0,143	-
sníh 2022	175,41	144,88	-	0,152	0,155	-

Příloha 2: Stanovení výšky sněhové pokrývky na zájmovém území Vysoké hole z referenčního bodového mračna bez sněhu 2019 a se sněhem 2021

VÝŠKA SNĚHU

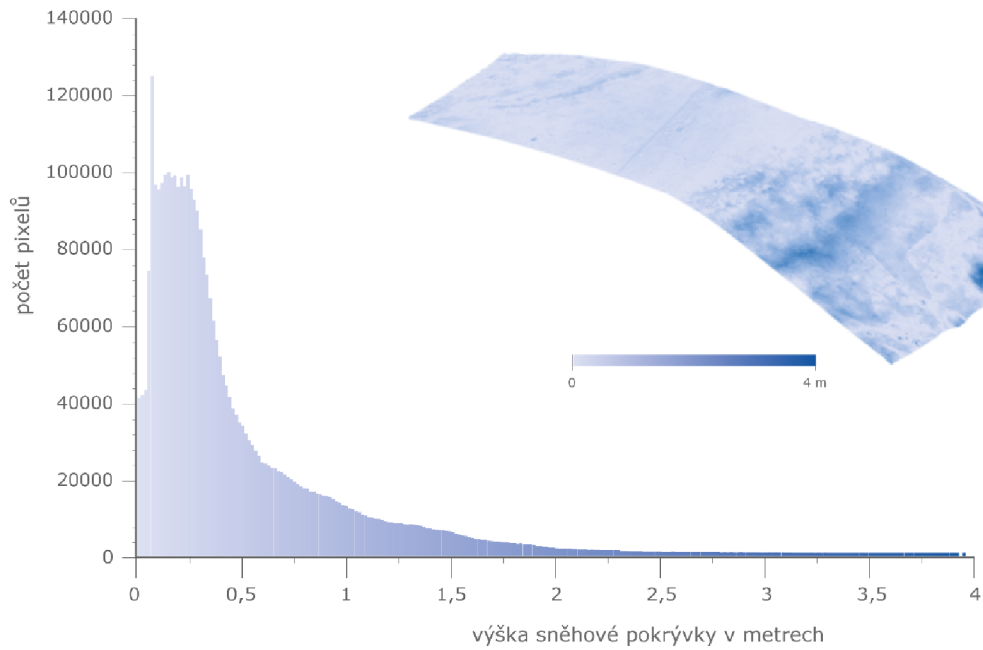
referenční mračno podzim 2019 a sníh 2021



Příloha 3: Stanovení výšky sněhové pokrývky na zájmovém území Vysoké hole z referenčního bodového mračna bez sněhu 2021 a se sněhem 2021

VÝŠKA SNĚHU

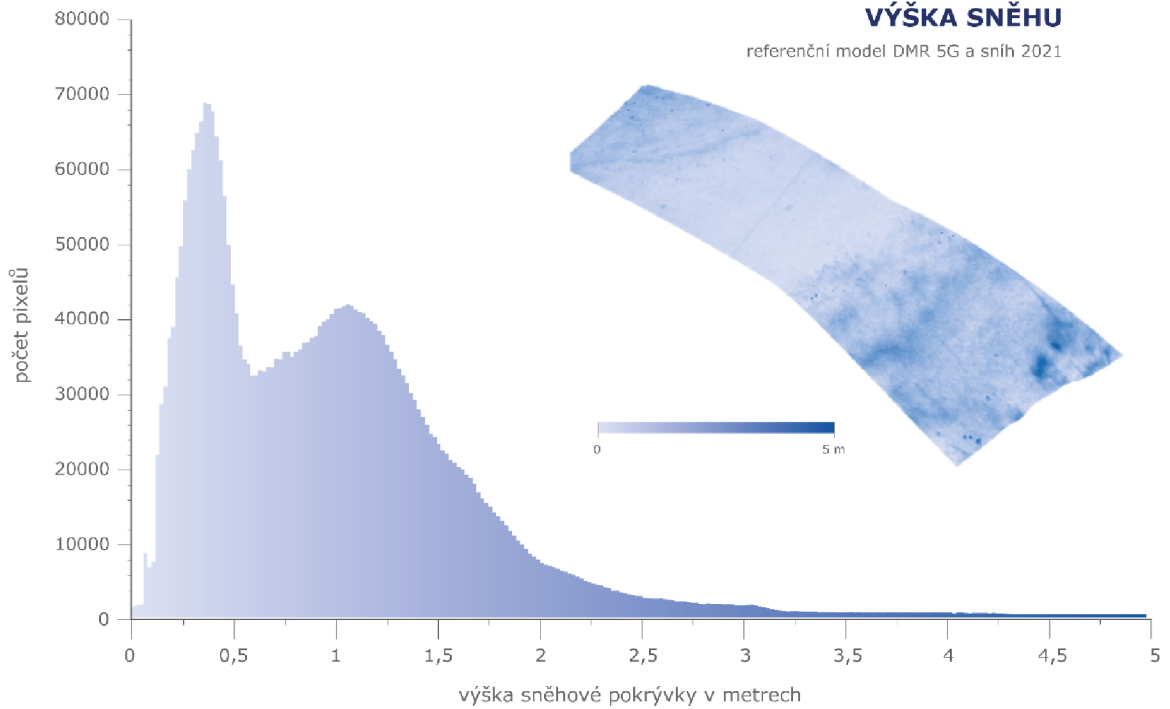
referenční mračno léto 2021 a sních 2021



Příloha 4: Stanovení výšky sněhové pokrývky na zájmovém území Vysoké hole z referenčního modelu DMR 5G a se sněhem 2021.

VÝŠKA SNĚHU

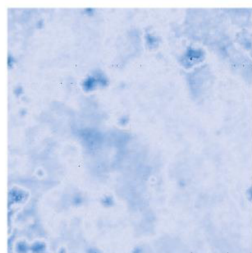
referenční model DMR 5G a sních 2021



Příloha 5: Stanovení výšky sněhové pokrývky v jednotlivých srovnávacích oblastech

území 1

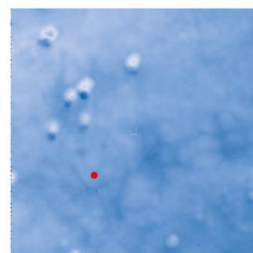
referenční mračno podzim 2019, zimní mračno 2020



0 1,3 m

území 2

referenční mračno léto 2021, zimní mračno 2022

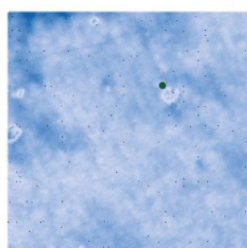


0 1,9 m

51,6 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2022

území 3

referenční mračno léto 2021, zimní mračno 2021

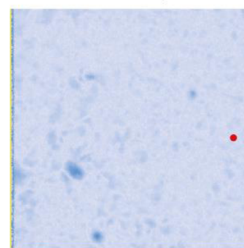


0 1,3 m

38 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2021

území 4

referenční mračno podzim 2019, zimní mračno 2022

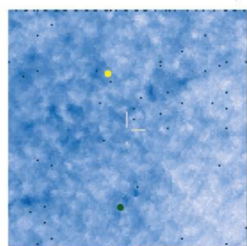


0 60 cm

29 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2022

území 5

referenční mračno léto 2021, zimní mračno 2021

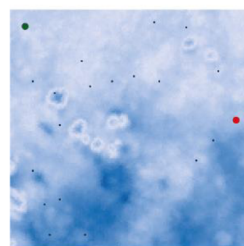


0 70 cm

19 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2020
12,5 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2021

území 6

referenční mračno léto 2021, zimní mračno 2021

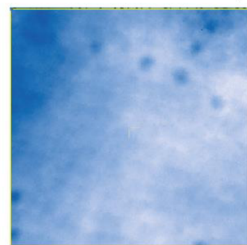


0 1,7 m

58,5 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2021
28 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2022

území 7

referenční mračno léto 2021, zimní mračno 2021



1 1,5 m

území 8

referenční mračno podzim 2019, zimní mračno 2020



1 2,4 m

79 cm
• bod s referenčně měřenou výškou sněhu 2020

území 9

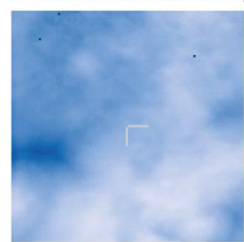
referenční mračno léto 2021, zimní mračno 2021 bez stínu



0 1,7 m

území 10

referenční mračno letní 2021, zimní mračno 2021 bez stínu



0 5,3 m