

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**ČASOPROSTOROVÁ ANALÝZA VÝŠKY
SNĚHOVÉ POKRÝVKY V NPR PRADĚD**

Bakalářská práce

Jan DEDIČ

Vedoucí práce RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

Olomouc 2023

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Bakalářská práce se zaměřuje na určení metrik sněhové pokrývky ve vymezeném území Vysoké hole nacházejícího se v národní přírodní rezervaci Praděd pomocí bezpilotní fotogrammetrie. Byla porovnána výška sněhové pokrývky v průběhu měsíců únor, březen a duben odečtením vytvořeného digitálního modelu povrchu z UAV snímkování a digitálního modelu povrchu získaným leteckým snímkováním. Byla zjištěna výška sněhové pokrývky v podélném profilu a čtyřech příčných profilech. Zhodnocena celková, maximální a minimální výška ve 12 vymezených čtvercích (20 x 20 metrů), rozmístěných rovnoměrně ve vymezeném území. Zkoumání výšky z hlediska orografie lokality, zvláště území Velkého kotle, kde sníh setrvává do letních měsíců. Výsledky práce poslouží pro analýzu a určování lavinového nebezpečí v oblasti Vysoké hole, potažmo Velkého kotle.

KLÍČOVÁ SLOVA

UAV fotogrammetrie; Metriky sněhové pokrývky; Vysoká hole; výška sněhové pokrývky

Počet stran práce: 54

Počet příloh: 21 (z toho 20 volných a 1 elektronická)

ANOTATION

The bachelor thesis focuses on the identification of snow cover metrics in the defined area of Vysoké Hole located in the Praděd National Nature Reserve using unmanned photogrammetry. The snow cover during the months of February, March and April was compared by subtract the digital surface model created from UAV imagery and the digital surface model obtained by aerial photography. It was obtained the snow cover height in the longitudinal profile and four transverse profiles. The total, maximum and minimum heights in 12 defined squares (20 x 20 meters), distributed evenly in the defined area. Examination of the height in terms of the orography of the site, especially the area of the Velkého kotle where snow persists into the summer months. The results of the work will be used for the analysis and determination of avalanche danger in the area of the Vysoké hole, and Velkého kotle

KEYWORDS

UAV photogrammetry; snow cover metrics; Vysoká hole; snow cover height

Number of pages 54

Number of appendixes 21

Autorským prohlášením se student explicitně přihlašuje k výhradnímu autorství práce a současně vyjadřuje znalost práv UP Olomouc k tomuto dílu. Odevzdáním práce v digitální podobě do evidence STAG student autentizuje toto prohlášení. V případě, že autor v práci navázal na cizí autorské dílo, musí být tato skutečnost v prohlášení výslovně uvedena.

Prohlašuji, že

- bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji bakalářskou 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, bakalářskou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, že údaje o mé bakalářské práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé bakalářské práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé bakalářské 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).

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakubu Miřjovskému PhD. za podněty a připomínky při vypracování práce, kterému tímto zároveň děkuji za zapůjčené přístroje.

Národní přírodní rezervaci Praděd za povolení ke vstupu na území.

A na závěr děkuji všem těm, kteří se mnou podstoupili terénní práce na Vysoké holi.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Jan DEDIČ
Osobní číslo: R200207
Studijní program: B0532A330011 Geoinformatika a kartografie
Téma práce: Časoprostorová analýza výšky sněhové pokrývky v NPR Praděd
Zadávající katedra: Katedra geoinformatiky

Zásady pro vypracování

Cílem práce je provést časoprostorovou analýzu vývoje výšky sněhové pokrývky v oblasti NPR Praděd. Autor naváže na výstupy Marie Pajdové a provede vlastní letecké snímkování a referenční měření výšky sněhové pokrývky na vytipovaných plochách v oblasti. Letecké snímkování a měření bude rozptřeno, pokud možno rovnoměrně do celého období zimní sezóny s přihlédnutím k aktuálnímu stavu sněhové pokrývky. Celkový počet měření a snímkování bude během sezóny minimálně šest. Autor provede zpracování dat s následnou časoprostorovou analýzou, ve které bude hodnotit vývoj sněhové pokrývky s ohledem na orografii lokality (návětrná, závětrná strana atd). Bude provedeno základní statistické zhodnocení.

Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data) se odevzdá v digitální podobě na paměťovém nosiči (CD, DVD, SD karta, flash disk). Text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student 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 bakalářské práce: tištěná

Seznam doporučené literatury:

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
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. ISSN 0043-1397
LENDZIOCH, Theodora, Jakub LANGHAMMER a Michal JENICEK. Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry. *Sensors* [online]. 2019, 19(5) ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19051027
PAVELKA, K. (2002). *Fotogrammetrie* 10, 2.přepac. vyd. Praha: FSv ČVUT, 198 s.
VOŽENÍLEK, V. (2002): *Diplomové práce z geoinformatiky*. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.

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

Datum zadání bakalářské práce: 5. května 2022
Termín odevzdání bakalářské práce: 5. května 2023

L.S.

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan



prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.
vedoucí katedry

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
ÚVOD	11
CÍLE PRÁCE	12
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	13
2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	17
3 PŘEDLETOVÁ PŘÍPRAVA	20
3.1 Vymezení území	21
3.1.1 Meteorologické podmínky	22
3.1.2 Plán letu	23
3.2 Vlíčovací body	25
4 SNÍMKOVÁNÍ A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	28
4.1 Problémy	32
4.2 Postup zpracování dat v programu Agisoft Metashape	35
4.2.1 Postup v programu Cloud Compare a ArcGIS Pro	38
5 METRIKY SNĚHOVÉ POKRÝVKY	39
6 VÝSLEDKY	49
7 DISKUZE	51
8 ZÁVĚR	52

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
UAS	Unmanned aircraft system
UAV	Unmanned aircraft system
DMP	Digitální model povrchu
GNSS	Global Navigation Satellite System
3D	3 dimensional
DMR	Digitální model reliéfu
DEM	Digital elevation model
SfM	Structure from motion
DHP	Digital Hemispherical Photographs
LAI	Leaf Area Index
RTK	Real Time Kinematic
MF	Manual focus
AF	Autofocus
CD	Compact disc
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
GPS	Global Positioning System
CCD	Charge-coupled device
FMC	Forward Motion Compensation
IMU	Inertial measurement unit
HD	High Definition
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
FPS	Frames per second
USB	Universal seriál bus
GIS	Geographic Information System
RGB	Red, Green, Blue
DMT	Digitální model terénu
JPG	Joint Photographic Group
ČR	Česká republika
CHKO	Chráněná krajinná oblast
NPR	Národní přírodní rezervace
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
ICAO	International Civil Aviation Organization
AOPK	Agentura ochrany přírody a krajiny
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
GSD	Ground sample distance
GCP	Ground Control Points
DOP	Dilution of precision
PDOP	Position dilution of precision
GLONASS	Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema

SIM	Subscriber identity module
SD	Secure Digital
CSV	Comma-separated values
WGS	World Geodetic System
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
TIFF	Tag Image File Format

ÚVOD

Sníh, neodbytná součást zimního období, která zvláště na horách je hlavní příčinou lavinového nebezpečí. Horské služby, záchranáři a ostatní využívají různých poznatků, které napomáhají při detekci lavinového nebezpečí a jiných nebezpečí spjatých s táním sněhu. Jedním z nich jsou i ochránci přírody z CHKO Jeseníky, kteří provádí vlastní měření sněhoměrnými latěmi. Tato bakalářská práce se zabývá o vymezené území Vysoké hole, kde se nachází oblast Velké kotliny, která je svojí orografií umožňuje růst jedinečné flóry, ale je i místem, ve kterém se často vyskytují lavinová nebezpečí. Sníh zde přetrvává do brzkých letních měsíců. Pro zjištění výšky sněhu by bylo velmi obtížné a nebezpečné použití kontaktních metod (sněhoměrné latě). V poslední době, díky rozvoji bezpilotní systémů, se stává tzv. UAV fotogrammetrie čím dál více využívanou. Z hlediska přístupnosti, nákladů na snímkování, dostupnosti zařízení a jiných výhod je používána širší a veřejností a v mnoha ohledech zastoupí fotogrammetrii leteckou.

CÍLE PRÁCE

Cílem práce je provést časoprostorovou analýzu vývoje výšky sněhové pokrývky v oblasti NPR Praděd. Autor naváže na výstupy Marie Pajdové a provede vlastní letecké snímkování a referenční měření výšky sněhové pokrývky na vytipovaných plochách v oblasti. Letecké snímkování a měření bude rozprostřeno, pokud možno rovnoměrně do celého období zimní sezóny s přihlédnutím k aktuálnímu stavu sněhové pokrývky. Celkový počet měření a snímkování bude během sezóny minimálně šest. Autor provede zpracování dat s následnou časoprostorovou analýzou, ve které bude hodnotit vývoj sněhové pokrývky s ohledem na orografii lokality (návětrná, závětrná strana, atd). Bude provedeno základní statistické zhodnocení.

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

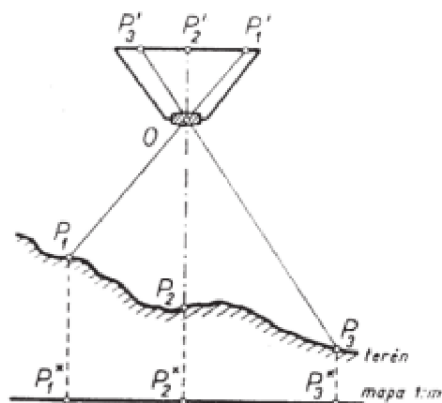
Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je umění, věda a technologie získávání důvěryhodných informací o fyzických objektech a životním prostředí prostřednictvím procesu zaznamenávání, měření a interpretace obrazů a vzorů zaznamenaných pomocí elektromagnetické energie a dalších jevů. (Wolf, DeWitt 2000; Mullen 2004). „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“ (Pavelka, 2003).

Fotogrammetrie je dělena do několika kategorií: podle počtu snímků, konfigurace snímků, technologického postupu zpracování a podle polohy stanoviště. Pro nás bude důležité rozdělení podle polohy stanoviště, a to na leteckou a pozemní. Letecká fotogrammetrie má stanoviště umístěné v letadle nebo jiném pohyblivém se nosiči (Pavelka 2003).

Základem tradiční fotogrammetrie je fotografický záznam, který můžeme pořídit klasicky analogovou formou nebo dnes častějším digitálním způsobem. Pořízený snímek zobrazuje zachycenou realitu. Z poloh bodů na snímku je možné vyhodnotit polohopis a výškopis nebo odvodit tvar, velikost a umístění předmětu (Pavelka 2003).

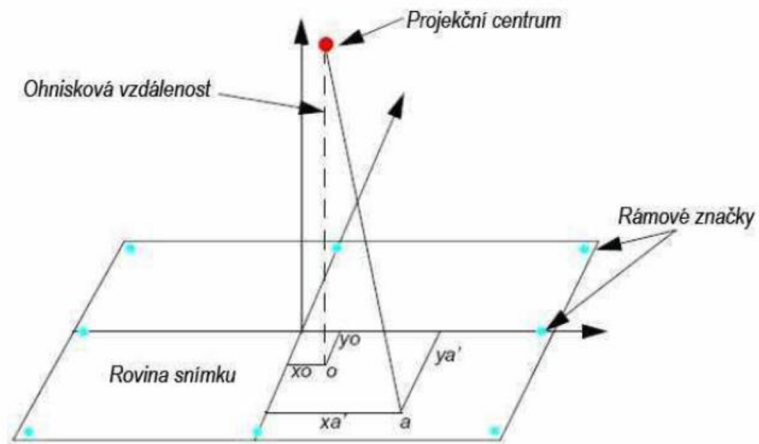
Každá fotografie vzniká centrální projekcí části zemského povrchu na čip digitálního fotoaparátu. Geometrické znázornění ideální centrální projekce je na obr. 1.



Obr. 1 Princip centrální projekce (Böhm, 2002)

Světelné paprsky bodů zemského povrchu P_1 , P_2 , P_3 procházejí přes střed promítání O a dopadají pod stejným úhlem na čip digitálního fotoaparátu, kde jsou zaznamenány jejich obrazy P'_1 , P'_2 , P'_3 . Souhrn těchto paprsků bývá označován jako fotogrammetrický svazek paprsků (Böhm, 2002). Aby bylo možné převést centrální projekci na paralelní rovinu mapy, musíme znát tvar a polohu fotogrammetrického svazku paprsků (Maršík 1982). Prvky vnitřní orientace matematicky popisují průběh svazku paprsků uvnitř komory a definují nám tvar fotogrammetrického svazku paprsků. Mezi prvky vnitřní orientace patří:

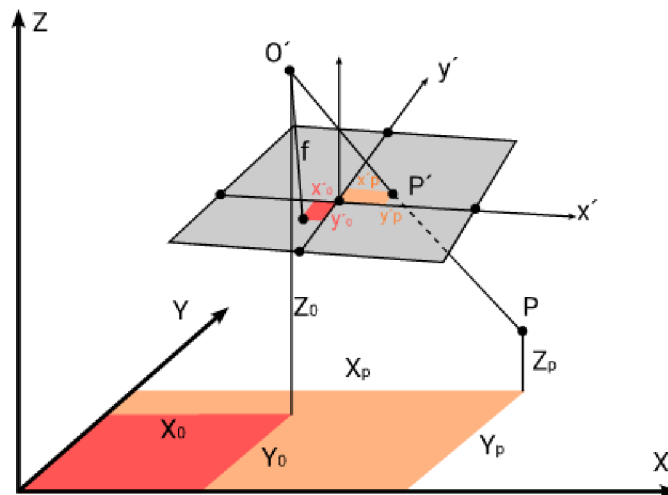
- poloha hlavního snímkového bodu
- konstanta komory
- průběh radiální distorze, případně tangenciální distorze



Obr. 2 Prvky vnitřní orientace (Erdas, 2010)

Pro prostorové vyhodnocení se v letecké fotogrametrii využívá systém, kde osy (x, y) jsou polohopisné a vertikální osa (z) je tzv. prostorovou složkou. Při definování modelových systémů a odvozování dalších vztahů se budeme držet doporučení Mezinárodní společnosti pro fotogrametrii a DPZ (ISPRS), které je založeno na principech letecké fotogrametrie:

- osa x je položena přibližně ve směru letu
- kladný směr rotací je volen ve směru chodu hodinových ručiček
- primární je osa x , sekundární y a terciální z
- počátek souřadnicové soustavy je umístěn v průběhu levého stanoviska stereodvojice



Obr. 3 Souřadnicové soustavy v letecké fotogrametrii (Pavelka, 2003; upraveno: autor práce)

Výzkum sněhové pokrývky pomocí DPZ/fotogrammetrie

Podrobné informace o časoprostorovém rozložení hloubky sněhu jsou klíčovým vstupem pro řadu aplikací v hydrologii, klimatologii, ekologii a lavinovém vyhledávání. Rozložení výšky sněhu se dnes obvykle odhaduje kombinací bodových měření z meteorologických stanic nebo od pozorovatelů v terénu s prostorovými interpolačními algoritmy. Avšak ani hustá měřicí síť, jako je ta ve Švýcarsku, s více než jednou měřicí stanicí v průměru na 10 km² není schopna zachytit velkou prostorovou variabilitu výšky sněhu, která se vyskytuje ve vysokohorském terénu.

K mapování variability výšky sněhu v místním a regionálním měřítku se v poslední době úspěšně používají metody dálkového průzkumu, jako je laserové skenování nebo digitální fotogrammetrie. Ve většině zemí je však takové získávání dat nákladné, pokud jsou zapojena letadla s posádkou. Na druhé straně efektivitě pozemních měření často brání zákryty způsobené složitým terénem nebo ostrými úhly pohledu. (Bühler et al. 2016) se zabývali použitím bezpilotních leteckých systémů (UAS) v kombinaci s fotogrammetrií struktury z pohybu k mapování rozložení hloubky sněhu. Ve srovnání s manuálním měřením jsou tyto systémy relativně cenově výhodné a lze je velmi flexibilně použít k pokrytí terénu nepřístupného ze země. Byla mapována výška sněhu na dvou různých místech: (a) na chráněném místě na dně údolí Flüela (1900 m n. m.) a (b) na exponovaném místě na vrcholu (2500 m n. m.) v lyžařském středisku Jakobshorn, obojí v blízkosti Davosu ve Švýcarsku. Na prvním testovacím místě byla sledována ablace ve třech různých termínech. Fotogrammetrické mapy výšky sněhu byly ověřeny manuálním měření výšky sněhu.

Klíčem k robustním fotogrammetrickým měřením hloubky sněhu (HS) je přesná koregistrace digitálních modelů povrchu bez sněhu a se sněhovou pokrývkou (DSM). I malé posuny ve směru x a/ nebo y mohou vést k velkým posunům v z, zejména ve strmém terénu. Aby bylo zabráněno posunům způsobeným měření GNSS (Global Navigation Satellite System), je vhodné odkazovat zasněžený DSM přímo na DSM bez sněhu; to je však možné pouze v případě, že existují oblasti bez sněhu, které obsahují dobře viditelné bodové nebo liniové prvky. Dalším důležitým bodem je, že vysokohorská vegetace, jako jsou keře a vysoká tráva, vede k nadhodnocení nadmořských výšek DSM bez sněhu, což má za následek neodhadnuté hodnoty HS. To může způsobit chyby v hodnotách HS až 0,5 m.

Výsledné hodnoty hloubky sněhu dosahovaly chyb ve výšce do 15 cm na loukách, do 30 cm na skalách a územích pokrytých vegetací (keře, vysoká tráva) (Bühler et al. 2016).

Druhá studie je zaměřena na mapování sněhových podmínek ve vysokohorských oblastech, které má význam z hlediska místní hydrologie a rozhodování o hospodaření s vodními zdroji. V poslední době se začalo využívat vícepolohové stereorekonstrukce 3-D (neboli fotogrammetrie SFM) k odvození digitálních modelů reliéfu (DMR) s vysokým rozlišením.

V této studii byly na případové studii z francouzských Alp představeny metody pro sdělování prostorových nejistot v hloubce sněhu vypočtené z DEM odvozených ze SFM. Prostorově proměnlivý odhad přesnosti hloubky sněhu byl stanoven pomocí modelu šíření chyb (anglicky propagation of uncertainty) založeného na přesnosti získaných DEM odvozených ze SFM, které byly získány z opakovaných letů bezpilotních letadel. Prostorově se měnící limity detekce výšky sněhu byly stanoveny pomocí Studentova t-rozdělení. Bylo zjištěno, že na většině studované oblasti lze s vysokou spolehlivostí detekovat hloubku sněhu 1 až 5 cm. Oblasti s vysokou nejistotou se obecně vztahovali na místa, kde se pokrytí pozemních kontrol neshodovalo při průzkumech na oblastech se sněhem a bez sněhu a v oblastech s vyšší drsností povrchu.

Tato studie představila metodu výpočtu prostorově proměnlivého odhadu přesnosti hloubky sněhu a limitů detekce pomocí opakovaných průzkumů UAV. Při použití

prostorově proměnlivých detekčních limitů bylo zjištěno, že ze snímků z UAV a fotogrammetrie SfM je možné s 95% spolehlivostí pozorovat hloubku sněhu zpravidla již od 2 cm. (Goetz, Brenning 2019).

Kvantifikace prostorového rozložení sněhu je klíčová pro předvídaní a hodnocení jeho potenciálu vodních zdrojů a pro pochopení interakcí mezi půdou a atmosférou. Snímání hloubky sněhu s vysokým rozlišením se dosud omezovalo na pozemní a letecké laserové skenování a v poslední době na aplikaci technik SfM (structure from motion) na letecké snímky (pilotované i bezpilotní). V této studii byly fotografie z malého bezpilotního letounu (UAV) použity k vytvoření digitálních modelů povrchu (DMP) a ortomozaik pro sněhovou pokrývku v kultivované zemědělské kanadské prérii a na řídké porostlém alpském hřebeni Skalistých hor pomocí SfM. Přesnost a opakovatelnost této metody pro kvantifikaci výšky sněhu, její změny a prostorovou variabilitu byla hodnocena pro různé typy terénu v čase. Střední kvadratické chyby odhadu hloubky sněhu z rozdílných DMP se sněhovou pokrývkou a bez ní byly 8,8 cm pro povrch krátkého prérijního strniště, 13,7 cm pro povrch vysokého prérijního strniště a 8,5 cm pro povrch vysokohorské hornatiny. Tato technika poskytla užitečné informace o maximální akumulaci sněhu a úbytku zasněžené plochy na všech lokalitách, přičemž na vysokohorské lokalitě bylo možné kvantifikovat i časové změny výšky sněhu díky hlubší sněhové pokrývce. Aplikace SfM na snímky pořízené UAV přináší smysluplné informace v oblastech s průměrnou výškou sněhu větší než 30 cm, ale přímé pozorování úbytku výšky sněhu v mělkých sněhových vrstvách touto metodou není možné. Přesnost se lišila v závislosti na vlastnostech povrchu, slunečním svitu a rychlosti větru během dne (Harder et al. 2016).

Výzkum sněhové pokrývky pomocí DPZ/fotogrammetrie v Česku

Další studie představuje nový přístup k použití snímkování bezpilotními letadly (UAV) pro společné hodnocení hloubky sněhu a zimního indexu listové plochy (LAI), strukturální vlastnosti vegetace, která ovlivňuje akumulaci sněhu a tání sněhu.

Tato studie představila potenciál dat UAV pro odvození metrik, jako je hloubka sněhu (metrika sněhu) a LAI (metrika lesa), pomocí jednotlivých letů. Výška sněhu byla vypočtena odečtením DMP (digitální model povrchu) bez sněhu od DMP se sněhovou pokrývkou během různých sněhových podmínek a porovnána s menším počtem a s větším počtem manuálních pozemních měření. Rozdíly v naměřených hodnotách získaných těmito strategiemi vzorkování sněhu ukazují rozdíly. Efektivní zimní odhady LAI prováděné rovněž ze svislých k zemi směřujících snímků UAV byly porovnány s konvenčními optickými metodami (např. Digital Hemispherical Photographs (DHP) a LAI-2200 canopy analyzer), které poskytly přiměřené, ale podhodnocené hodnoty LAI_{eff}. S rostoucí výškou letu UAV byly pro všechny lesní struktury stanoveny nižší odhadované hodnoty LAI.

Výsledky ukázaly, že touto kombinovanou metodou lze současně zaznamenat hloubku sněhu a LAI pomocí jednoho průzkumu UAV. Spojený průzkum může významně zlepšit efektivitu leteckého i terénního mapování rozložení sněhové pokrývky v oblastech s proměnlivou strukturou a zdravotním stavem lesních porostů. V takových oblastech prokázalo spolehlivost při určování variability hloubky sněhu spolu s LAI, což umožnilo interpretovat vliv pokryvu korun na akumulaci a ablacii sněhu.

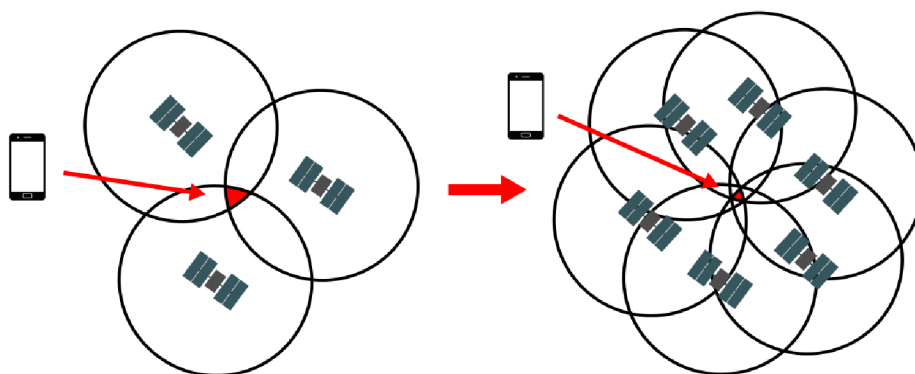
Největší výhodou technologie UAV je zde však vysoké rozlišení a vysoká úroveň podrobnosti týkající se zasněženého terénu a rychlé sledování nepřímého LAI ve srovnání s jednoduchým manuálním měřením hloubky sněhu a bodovým měřením DHP nebo pomocí LiCor-2200. Zdokonalením této metody by mohly být oba parametry, hloubka sněhu i nepřímý LAI, použity jako vstupní parametry pro modely sněhu zachycené ve zkráceném čase (Lendzioch, Langhammer, Jenicek 2019).

2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

V rámci bakalářské práce bylo použito spektrum různých metod. Zaměříme se na snímkování, bylo zde použito metod fotogrammetrie, konkrétně UAV fotogrammetrie pro terén se sněhem a letecké fotogrammetrie pro referenční terén. Pro měření souřadnic (přesné polohy) vličovacích a referenčních bodů jsme využili globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) a metodu Real Time Kinematic (RTK).

Použité metody

Přesného zaměření vličovacích bodů a referenčních bodů, které vznikly v místě referenčního měření výšky sněhu, bylo dosaženo pomocí GNSS. Z obecného pohledu jde o systém družic o známé poloze, které vysílají signál skládající se z nosné vlny, dálkoměrného kódu, který moduluje nosnou vlnu a navigační zprávy (tato zpráva obsahuje informace potřebné pro určení polohy).



Obr. 4 Princip určování polohy pomocí GNSS

Pro snímání terénu byla použita metoda fotogrammetrie. Konkrétně se jednalo o fotogrammetrii leteckou, pro snímkování terénu bez sněhu a UAV (unmanned aerial vehicle) fotogrammetrii pro snímkování terénu se sněhovou pokrývkou. Drony, mohou být vybaveny kamerami a dalšími senzory, které pořizují snímky zemského povrchu. V následujících odrážkách jsou postupně zpracovány kroky fotogrammetrie:

Plánování letu: UAV je naprogramováno tak, aby létalo nad zájmovou oblastí (Vysoká hole) podle plánu letu, který byl vytvořen dosažením rohových bodů o přesných souřadnicích, a pořizovalo snímky v určitém kontinuálním intervalu a výšce. Software pro plánování letu pomáhá určit vhodné parametry pro danou misi.

Pořizování snímků: UAV pořizuje snímky terénu pomocí kamery umístěné na nosiči (dron). Kamera směřuje svisle k zemi, po dosažení výšky 90 metrů je kamera přepnuta na manuální ostření (MF) a zaostří na terén. Následně je přepnuta na automatické ostření (AF), se kterým snímkuje celou letovou misi.

Zpracování obrazu: Snímky jsou staženy z UAV a zpracovány pomocí fotogrammetrického softwaru (Agisoft Metashape), který nám umožní vytvořit spojitý terén, a to díky společným vličovacím bodům (CD disky nabarvené na černě), které nalezneme na jednotlivých snímcích. Agisoft následně vygeneruje mračno bodů (Dense cloud). Po vytvoření mračna bodů došlo k vytvoření digitálního modelu povrchu (DMP).

Závěrečným krokem je analýza dat, kde je zjištěna výška sněhové pokrývky pomocí odečtením vytvořeného DMP z UAV fotografií a DMP z letecké fotografie.

Použité přístroje

Trimble R4

Pro měření přesné polohy vřícovacích a referenčních bodů, byl použitý přijímač od značky Trimble, model R4, podporující technologii Real Time Kinematic (RTK). Bytelná a nárázu odolná konstrukce, interní paměť v přijímači. Pro postprocesní měření lze data ukládat přímo do přijímače. Umožňuje lokální a globální transformaci do S-JTSK (*Trimble R4 GNSS - NOVINKA - GEOServer*). R4 je 72 kanálový přijímač, který je schopen získávat signály GPS L1/L2, L2E a GLONASS. Technologie R-Track poskytuje spolehlivý a přesný výkon v náročných oblastech, jako je například les nebo při zhoršené viditelnosti kvůli oblačnosti (Trimble R4 GNSS).

Juno T41/5

Při měření byl společně s Trimble R4 připojen přijímač Juno T41/5, vybavený přijímačem GPS, WiFi, Bluetooth a jinými funkcemi. Který zajišťoval konstantní datový tok s mobilním zařízením pro přenos RTK korekcí. A konstantní spojení s Trimble R4. (Juno T41/5).

Cessna 172

Snímkování terénu bez sněhové pokrývky proběhlo pomocí jednomotorového hornoplošného letadla Cessna 172, které je díky svým vlastnostem vhodné pro snímkování (Aeroweb.cz).

DigiCam - Phase One iXA-R 180

Letadlo bylo vybaveno leteckou kamerou firmy DigiCam, a to Phase One iXA-R 180. Kamera je vybavena snímačem CCD (Charge-coupled device) s rozlišením 80 Mpx a pokrytím 10 328 pixelů napříč stopou, přesto váží méně než 950 gramů. Je vybavena funkcí FMC (Forward Motion Compensation), která kompenzuje pohyb letadla vpřed (*Swiss Flight Services - Aerial Survey AIR OPERATOR*).

DJI Phantom 4 Pro

Pro snímkování terénu se sněhovou pokrývkou bylo použito bezpilotní zařízení (UAV) DJI Phantom 4 Pro. Kvadrokoptéra zhotovená ze slitin titanu a hořčíku, obsahující duální kompas a zdvojené IMU (Inertial Measurement Unit) jednotky a schopností satelitní stabilizace pro udržování stále výšky letu. Jedná se o další vývojový stupeň v řadě Phantom, který přidává mnoho vylepšení, jako jsou například ultrazvukové a infračervené kolizní senzory pro detekci překážek. Rychlost letu až 72km/h, dosah ovládní 7 km, dosah senzoru na vzdálenost 30 metrů a dobou letu až 27 minut.

DJI Phantom 4 Pro je vybavený 4K Ultra HD (high-definition) kamerou s jednopalcovým 20 Mpx CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) snímačem, snímkovací frekvencí 60 FPS a mechanickou závěrkou. O stabilitu kamery se stará tříosý závěs (DronPro; *DJI Phantom 4 PRO+*).

Použité programy

Trimble Access

Na již zmiňovaném přijímači Juno T41/5 pracuje software Trimble Access verzi 2015.00. Jedná se o software, který nabízí řadu specializovaných terénních aplikací určených pro usnadnění práce v terénu. Díky snadno použitelnému rozhraní a synchronizaci dat v reálném čase (*Trimble - Transforming the Way the World Works*).

DJI Pilot

Fotogrammetrický software jsem zvolil DJI Pilot v2.5.1.15 jedná se o mobilní aplikace, která je kompatibilní s operačním systémem Android a zaručuje komunikaci s UAV ovladačem pomocí datového USB. Aplikace umožňuje vytvoření plánu letu, který je

pro naše účely velmi podstatný. Mimo jiné obsahuje spousty nastavení, ať už nastavení ovládání UAV nebo nastavení kamery. Pro UAV si zde můžeme zvolit ze tří volitelných ovládacích módů, rychlostí letu, maximální výšky, maximální vzdálenosti, nastavení upozornění pro kritický stav baterie a mnoho dalšího. Co se týče nastavení UAV kamery, nalezneme zde volitelné nastavení ISO, expozice, EV, rozlišení, aj.

Agisoft Metashape Professional

Agisoft Metashape je software, který provádí fotogrammetrické zpracování digitálních snímků a generuje 3D prostorová data pro použití v GIS aplikacích. Osobně jsem používal verzi 1.8.2 build 14127 (64 bit). Systém je navržen tak, aby přinášel specifické výsledky opírající se o techniky strojového učení, post-processing a analytické úlohy. Software umožňuje zpracovat snímky z RGB nebo multispektrálních kamer, včetně vícekamerových systémů, do vysoce hodnotných prostorových informací, a to různou formou vizualizace, například formou hustých bodových mračen, texturované polygonální modely, georeferencované ortomozaiky a DMP/DMT. Hlubší post-processing umožňuje eliminovat stíny a vyhlazovat textury z modelů, počítat vegetační indexy a extrahovat informace, automaticky klasifikovat hustá mračna bodů (*Agisoft Metashape; Agisoft Metashape - manuál*).

CloudCompare

Jedná se o software, který slouží k zpracování 3D mračen bodů (a trojúhelníkových sítí). Je navržený tak, aby porovnával hustá mračna bodů (například získaných metodami fotogrammetrie). Nicméně jeho škála využití je mnohem širší. Jedná se například o pokročilé algoritmy (převzorkování, zpracování barevných a skalárních polí, výpočet statistik, interaktivní nebo automatická segmentace, apod.) Pro účely bakalářské práce slouží k oříznutí bodových mračen získaným leteckou fotogrammetrií. Vše probíhalo na verzi softwaru 2.12.4 Kyiv (*CloudCompare*).

Microsoft Excel

Excel je tabulkový procesor od společnosti Microsoft, který je součástí skupiny produktů Microsoft Office a Office 365 (*What is Excel? Everything You Need to Know - Definition by WhatIs.com*).

Inkscape

Inkscape je volně dostupný vektorový grafický open source editor. Nabízí bohatou sadu funkcí a je široce používán pro různé ilustrace (*Inkscape*).

Použitá data

Získávání dat pro bakalářskou práci proběhlo formou letecké a UAV fotogrammetrie. Získané snímky vstupují do programu Agisoft Metashape, kde byla pro jednotlivé lety vytvořena bodová mračna, která dále vstupují do analýz výšky sněhové pokrývky. Jednotlivá mračna bodů se odečetla od vytvořeného mračna bodů získaného ze snímků leteckého snímkování.

Zvláště byla potřeba získat data referenční výšky sněhu, které bylo použito jako kontrolní měření přesnosti modelů, a to pomocí pozemního měření sněhoměrnou latí.

Data získaná fotogrammetrií

Pro zjištění výšky sněhové pokrývky bylo za potřebí referenční model terénu, který byl získaný snímkovým letem provedeným v prosinci, koncem roku 2022 již zmiňovaným letadlem Cessna 172, které bylo vybaveno kamerou Phase One iXA-R 180. Snímkování provedl vedoucí práce RNDr. Jakub Mířijovský, Ph.D.

K získání výsledných modelů a hodnot výšky sněhové pokrývky, potřebné pro následné zpracování v programu Agisoft Metashape, bylo zapotřebí snímků vymezeného území Vysoké hole, které byly získány bezpilotní fotogrammetrií zařízením DJI Phantom 4 Pro se zabudovanou digitální kamerou. Všechny UAV snímkovací lety byly provedeny autorem bakalářské práce. Snímkování bylo provedeno celkem šestkrát v průběhu zimy (únor, březen, duben). K prvnímu snímkování došlo 15. února 2023, celkem bylo získáno 245 snímků ve formátu JPG (Joint Photographic Group). Druhé snímkování 1. března 2023, zde bylo získaných 255 snímků. Třetí snímkování proběhlo 16. března 2023 s výsledným počtem 250 snímků. Čtvrté 6. dubna s počtem 264 snímků. Páté 10. dubna s počtem 249 snímků. Šesté 22. dubna s počtem 255 snímků. Z veškerých získaných snímků byly vytvořeny 3D bodové mračna (dense cloud) a modely povrchu.

3 PŘEDLETOVÁ PŘÍPRAVA

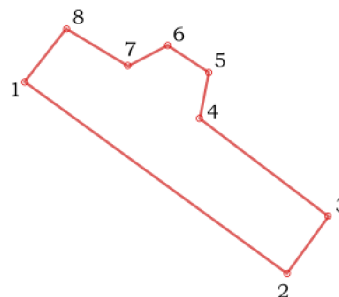
Vysoká hole s výškou 1 464 metrů je po Pradědu (1 492 m) druhá nejvyšší hora Hrubého Jeseníku. Vysoká hole je zároveň druhá nejvyšší hora Moravy. Její plochý a rozlehlý vrchol o ploše asi 20 ha představuje trosku původního zarovnaného povrchu budovaného fylity a kvarcity (*Treking.cz*).

Mnohem zajímavější jsou hluboké kotliny na úbočích hory. Na jihovýchodním úbočí Vysoké hole se nachází Velká kotlina (též Velký kotel), prameniště řeky Moravice s malým vodopádem. Na severovýchodní hraně se nachází rozsáhlé kamenné moře zvané Suť. Tento mohutný skalnatý kar byl modelován svahovým horským ledovcem v poslední době ledové. Na jeho dně je dodnes dobře patrný pozůstatek ledovcové morény, na jejímž dně se sníh udržuje až do června či července. Velká kotlina (Velký kotel) je téměř bezlesá, často se zde vyskytují laviny. Vlivem příhodných životních podmínek na úbočí Vysoké hole ve Velké kotlině se zde vyskytuje nebývalé množství vzácných rostlinných i živočišných druhů s velkou řadou endemitů. Velká kotlina patří nejen k druhově nejbohatším lokalitám ČR, ale i střední Evropy. Řada odborných publikací uvádí Velkou kotlinu jako vůbec nejvýznamnější botanickou lokalitu na území České republiky (*Treking.cz*).

3.1 Vymezení území

Snímkované území Vysoké hole bylo vybráno vedoucím bakalářské práce, a to zadáním 8 lomových bodů (ty lze vidět na obrázku v *Tab. 1*) tak, aby vybraná oblast zahrnovala návětrnou i návětrnou stranu a Velký kotel. Vybraná oblast se nachází na vrcholu Vysoké hole kolmo k červeně značené turistické cestě.

č. bodu	X	Y
1	50,059427192	17,227453231
2	50,056657474	17,234714068
3	50,057680902	17,235636949
4	50,059104033	17,232054802
5	50,059885530	17,232181490
6	50,060274506	17,231046811
7	50,059860777	17,230088393
8	50,060385058	17,228377830



Tab. 1 Souřadnice lomových bodů vymezeného území Vysoké Hole

Cíleně byla vybraná lokalita Velkého kotle kvůli lavinovým nebezpečím. Jedná se o místo, na kterém dosahuje výška sněhové pokrývky až několik metrů a sníh tu přetrvává až do letních měsíců. Díky těmto faktorům je Velká kotlina nebezpečným místem a je zde vhodné, případně potřebné pozorovat aktuální stav sněhové pokrývky a s tím spjatou případnou lavinovou situaci. Z důvodu nebezpečí a ochrany místní fauny a flóry je dovoleno chodit pouze po vyznačených cestách správou CHKO Jeseníky, proto je zapotřebí speciálního povolení o vstup mimo vyznačené cesty, které zařídil vedoucí práce.

Zkouška na bezpilotní letoun

Prvním krokem bylo zapotřebí získat pilotní průkaz na bezpilotní letoun v podkategoriích OPEN A1 a A3. Tento pilotní průkaz vydává úřad pro civilní letectví (ÚCL), který je podřízen Ministerstvu dopravy. ÚCL vykonává dohled nad civilním letectvím, licencuje piloty a certifikuje letadla a letecká technická zařízení (ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ).

Bezpilotní letouny se dělí do několika kategorií a tříd. V otevřené kategorii (Open) se jedná o „běžné drony“ například modely od RYZE Tello přes DJI Mavic Mini až po řadu DJI Phantom. Pro provoz všech těchto zmíněných dronů, je potřeba mít registraci. Kategorie Open má svá pravidla a záleží zde, do jakých tříd drony dle specifikací řadíme, k tomu slouží parametry dronů.

Třídy bezpilotních systémů se dělí do 5 základních kategorií: C0, C1, C2, C3 a C4 (modely). Nicméně pokud máte dron třídy C2, s průkazem způsobilosti A2, můžete létat dle provozních pravidel pro A2 (*Pravidla pro létání s drony 2020*; *Pravidla UAV* nedatováno).

Letový prostor, povolení pro snímkování

Mezinárodní organizace civilního letectví (ICAO) definuje 7 tříd vzdušného prostoru označených písmeny A-G. V českém vzdušném prostoru jsou vymezeny třídy C, D, E a G. Zvláště speciální pravidla platí pro národní přírodní rezervace a chráněná krajinná území. Lety nad takovými oblastmi jsou primárně zakázány a povoluje je Úřad pro civilní letectví. V zvláště chráněných územích (přírodní rezervace, národní přírodní rezervace, přírodní památky a národní přírodní památky) a na území I. až III. Zóny chráněných krajinných oblastí potřebujete souhlas Agentury ochrany přírody a krajiny ČR (AOPK ČR), bez kterého Úřad pro civilní letectví nemůže povolit let. V případě CHKO Jeseníky byl před každým výjezdem na Vysokou holi poslán e-mail Mgr. Radku Štenclovi, který působí jako botanik správy CHKO Jeseníky. Následně byli informováni o snímkování strážci CHKO Jeseníky (*Povolení k létání v CHKO* nedatováno; *AirGuru.cz* 2019).

3.1.1 Meteorologické podmínky

Snímkování bezpilotním letounem je možné pouze za příznivých podmínek. Nejlepší podmínky jsou tedy bezvětří a slunečné počasí. Pro snímkování v zimním období na horách je obtížné najít ideální podmínky. Vysoká hole je ničím nekrytá, rychlost větru a nárazy větru se zde pohybují v řádech desítek metrů za sekundu, počasí je zde poměrně rychle proměnlivé (*vyvolej.to*).

Pro bezpečný let se uvádí rozpětí hodnot rychlosti větru mezi 15 km/h a 35 km/h. Při vyšších rychlostech větru dochází k vyšší zátěži na baterii a zároveň je potřeba větší koordinace. Vybíjení baterií zároveň závisí i na teplotě, čím nižší teplota okolí, tím rychleji se baterie vybíjí, proto je vhodné udržovat baterie v teple. Dalším důležitým faktorem je oblačnost. Při výšce letu 90 metrů nad zemí je pro snímkování problematická pouze nízká, případně střední oblačnost, která zabraňuje snímkování a vizuálnímu spojení mezi pilotem a UAV zařízením. S oblačností jsou spjaté sněhové/dešťové srážky (případná mlha), které působí problémy s viditelností při snímkování a zároveň způsobují riziko zkratu v elektrických součástkách (*vyvolej.to*).

Pro zjištění podmínek byly použity meteogramy na stránkách Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), konkrétně se jednalo o meteorologickou družici Aladin. Zde byly převážně sledovány předpovědi pro rychlost/nárazy větru [m/s], oblačnost [%] a případné srážky [mm/h]. Jako dílčí ukazatel je zde teplota [°C]. Jako sekundární kontrola počasí byl použitý windy.com, který sloužil pro upřesnění a korekci informací, hlavně pokrytí oblačností (*Windy.com*; *Aladin Meteogramy*).

3.1.2 Plán letu

Předletová příprava zahrnovala vytvoření plánu letu. Letový plán se skládá z přesných instrukcí a pokynů, které slouží k vedení dronu při plnění konkrétní mise. Je výhodné jej použít pro snímkování rozsáhlého území (například Vysoké hole) (Wright 2023). Plán letu byl vytvořen v aplikaci DJI Pilot. Vytvořený plán byl zároveň exportovaný ve formátu GPX a nahraný do mapové aplikace Mapy.cz, kde sloužit jako orientační mapa při rozmisťování vlíčovacích bodů.

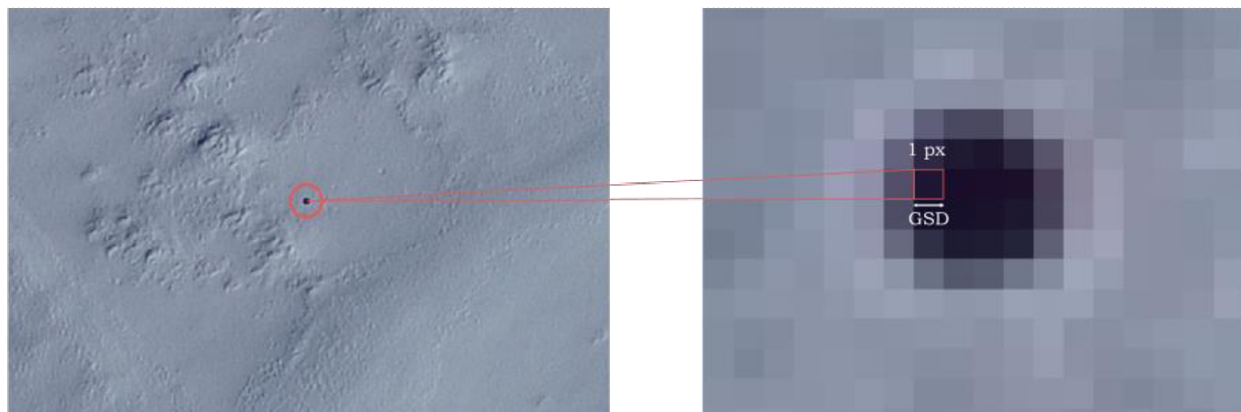


Obr. 5 Plán letu v aplikaci DJI Pilot a vymezené území Vysoké hole

Prostorové rozlišení snímku

Důležité je určení hodnoty GSD (Ground Sample distance), jedná se o prostorové rozlišení, neboli vzdálenost měřená v centimetrech mezi středy dvou sousedních pixelů na snímku na povrchu země (*Mission Planning*). Čím větší hodnota GSD na snímku, tím vyšší výška, ze které UAV pořizuje snímky, a tím nižší je prostorové rozlišení snímku ve spojitosti s méně viditelnými detaily na snímku. (Comer a kol., 1998) Říká, že k identifikaci prvku na snímku je vhodné, aby byl prvek na snímku tvořen 4 až 9 pixely. Je třeba brát na paměť, že hodnota GSD determinuje ostatní parametry letu. Při pokrytí rozsáhlých oblastí je doporučeno nastavit let ve vyšších výškách z důvodu zkrácení doby pořizování snímků a tím pádem zrychlit čas mise. Hodnota GSD byla zadána vedoucím bakalářské práce.

Pro bakalářskou práci byla zvolena hodnota GSD 2,5 cm/px (jeden pixel na snímku představuje 2,5 cm na povrchu země). Odpovídající výška snímkování 90 m.



Obr. 6 Vlícovací bod (CD) o rozměru 12 cm, hodnota GSD = 2,5 cm/px

Ohnisková vzdálenost

Ohniskovou vzdálenost definuje použitá kamera. DJI Phantom 4 Pro disponuje ohniskovou vzdáleností 24 mm (ekvivalent 35 mm formátu) (DronPro), která se používá pro snímkování při nižších výškách od 20 do 300 m. Kvůli nízkým výškám letu se tedy používají krátké ohniskové vzdálenosti, protože čím menší je ohnisková vzdálenost, tím větší je velikost snímku. Oproti delším ohniskovým vzdálenostem je zde nevýhoda vyšší radiální distorze (Mirijovský 2013). Na základě ohniskové vzdálenosti a výšce letu je možné spočítat měřítko snímku (Minařík 2015).

Délka základny

Udává vzdálenost mezi středy snímků a je závislá na příčném a podélném překrytu. Hodnoty přerytu se vztahují k použitému objektivu. Při širokoúhlých objektivách dosahuje radiální distorze vysokých hodnot a je proto vhodné použít překryv okolo 80 % (Mirijovský 2013). Pro účely bakalářské práce je vedoucím bakalářské práce tedy zvolený podélný překryv 80 % a příčný 75 %

Nastavení kamery, smaz

Zapotřebí je i vhodně nastavit parametry kamery. Expozice (rychlost uzávěrky) a ISO jsou nastaveny dle světelných podmínek, a to z možností 1/500, 1/640 a 1/800 sekundy. Čím delší dobu je otevřená uzávěrka kamery, tím více světla dopadne na světlo-citlivý čip, a tím je snímek světlejší (například: Slunečné počasí, tím pádem vysoká odrazivost světla od sněhu. Je nastavena hodnota expozice 1/800 s, aby světlo dopadalo po kratší dobu na čip v kameře a snímek nebyl přesvětlený). Hodnota ISO citlivosti je nastavena ISO 100.

Podle hodnot expozice byla upravena rychlost letu, aby na snímcích byl co nejmenší hodnota smazu. Smaz se počítá vzorcem: $smaz = \frac{v}{t}$ kde v je rychlost letu v cm/s a t je čas expozice. Maximální přípustná hodnota smazu je polovina hodnoty GSD.

Pro každou rychlost uzávěrky byla spočítána rychlost letu.

Expozice [s]	Rychlost letu [m/s]	smaz
1/500	6	1,2
1/640	8	1,25
1/800	10	1,25

Tab. 2 Hodnoty smazu v závislosti na expozici a rychlosti letu

3.2 Vlícovací body



Obr. 7 Vlícovací bod (č. 3)

Vlícovací body (anglicky Ground Control Points (GCP)) jsou body o známých, přesně změřených souřadnicích X, Y, Z, které slouží pro výpočet vnějších prvků orientace na snímku a napomáhají ke zmapování velkých ploch. Vlícovací body snižují chybovost z měřítka metrů na centimetry. Při umísťování vlícovacích bodů je potřeba myslet na to, aby byli vlícovací body dobře viditelné a identifikovatelné. Zároveň je potřeba rozmístění bodů rovnoměrně po celém snímkováném území (Wawrzyn 2022). Po snímkování byly všechny body sesbírány, aby nedocházelo ke znečištění krajiny.

Signalizace takových bodů je problematická z hlediska umístění v národní přírodní rezervaci, ve které je nevhodné použít takzvanou „dočasnou signalizaci“ vlícovacích bodů, která se provádí například sprejováním barvy přímo na terén (sněhovou pokrývkou). Proto byla použita „trvalá signalizace“.

Na viditelnosti vlícovacích bodů se podílí faktory, jako jsou výška letu, viditelnost, rozměry vlícovacích bodů a barva vlícovacích bodů. Jako vlícovací body byly použity kompaktní disky o průměru 12 cm, které byly zapůjčené vedoucí práce. Pro viditelnost CD ve sněhu byla použita matná černá barva ve spreji, kterou byla CD předem nasprejována. Naneštěstí se na Vysoké holi nacházelo spousta turistů, kteří CD viděli jako znečištění přírody, a došlo k jejich odcizení. Z toho důvodu byly po třech měřeních použity dva nové vlícovací body, a to víka od kýblů o průměru 29 cm, která byla rovněž nasprejovaná černou matnou barvou. Taktéž jsou všechny body očíslované a je zde nápis „vlícovací bod“. Všechny body byly připevněny doprostřed hřebíkem, aby zůstali na přesně známých souřadnicích (viz Obr. 7).

Každému bodu byla zaměřena přesná poloha v jeho středu, pomocí přístroje Trimble R4, který byl neustále datově připojený pro získávání RTK korekcí. Všechny body byly zaměřeny s přesností v řádech jednotek centimetrů. Tato přesnost závisí na počtu, rozmístění družic, atmosférické refrakci a přesnosti efemerid (v zastavěným nebo těžko přístupných oblastech do celkové nepřesnosti vstupuje odražení signálu od okolních objektů). Obecně se chybě přesnosti říká DOP z anglického dilution of precision. Nicméně přijímač použitý v bakalářské práci zobrazuje PDOP (Position Dilution of Precision), kterou lze chápat jako nepřesnost ve vertikální i horizontální poloze (GISGeography 2017). Přijímač GPS a GNSS komunikují s viditelnými družicemi a triangulují naši polohu (viz Obr. 4). V terénu, jakým je oblast Vysoké hole, DOP (PDOP) nabývá velmi nízkých hodnot, a to z důvodu otevřenosti a ničím neblokované komunikaci mezi GPS přijímačem a družicí. Obvyklý počet viditelných družic je zde kolem 10 až 15 (GPS, Galileo, GLONASS) (www.agsgis.com).



Obr. 8 Zameření vřícovacího bodu (Zdroj: Martin Panák)

Referenční měření výšky sněhové pokrývky

Pro referenční měření sněhové pokrývky bylo zapotřebí sněhoměrné latě a metru. Vybrána byla místa, nacházející se mimo pozici vřícovacích bodů, aby nedocházelo ke zkreslení referenčních bodů. V místě měření výšky sněhové pokrývky došlo k přesnému změření souřadnic, stejně jako u vřícovacích bodů (viz kapitola 3.2 *Vřícovací body*), a ke změření výšky sněhu sněhoměrnou latí. Sněhoměrná lať, zde sloužila plastová tyč k venkovním rostlinám o délce 180 cm, byla zavedena od povrchu sněhu až po povrch terénu, následně zaznamenána výška hladiny sněhové pokrývky pomocí metru.

Datová komunikace

Datová komunikace pro RTK korekce byla zajištěna pomocí SIM (subscriber identity module) karty mobilního operátora Vodafone Czech Republic a O2 Czech Republic a.s., kteří byli vybráni na základě map pokrytí. (Po prvním snímkování bylo zjištěno, že nejlepší pokrytí má Vodafone, který zde má 4G síť).

Mapy pokrytí:

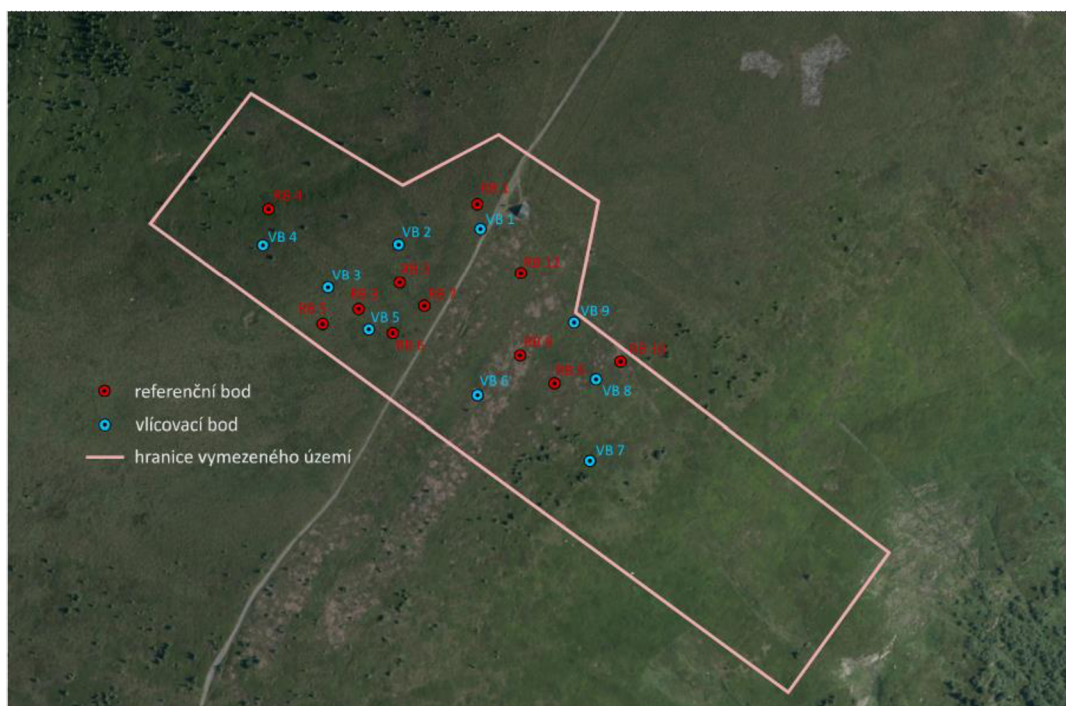
Vodafone: <https://www.vodafone.cz/mapa-pokryti>

O2: <https://www.o2.cz/osobni/mapa-pokryti>

4 SNÍMKOVÁNÍ A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

První snímkování

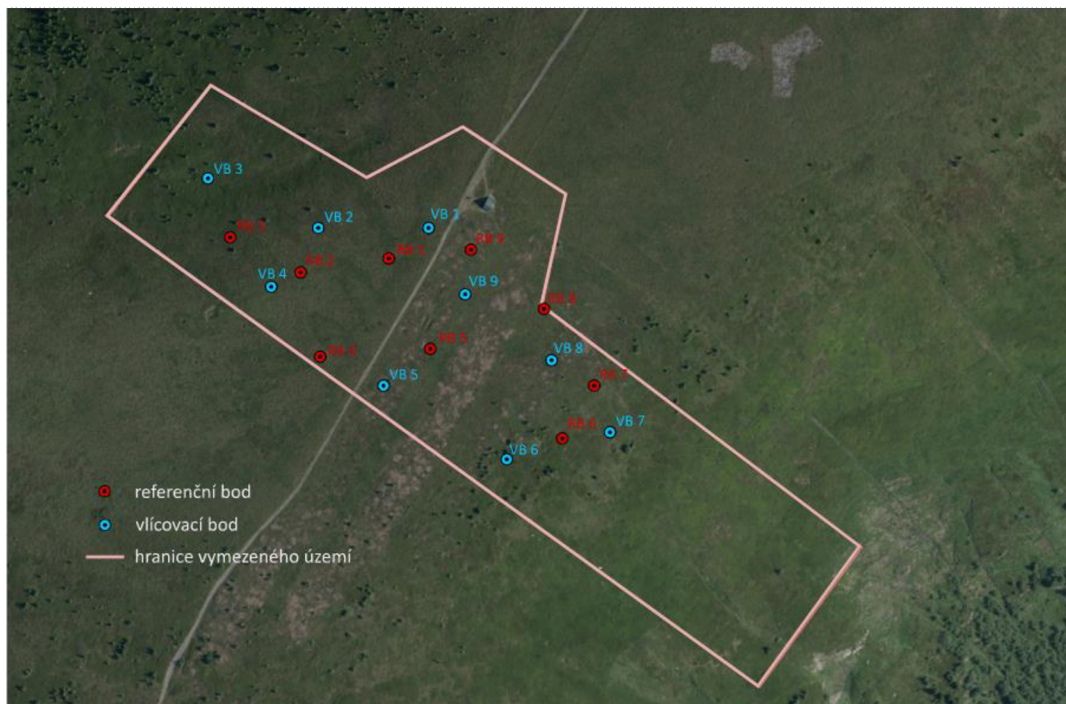
První snímkování bylo provedeno autorem práce dne 15. 2. 2023 v ranních a dopoledních hodinách. Po vybraném území Vysoké Hole bylo rozmístěno a zaměřeno devět vřícovacích bodů, podle aplikace Mapy.cz došlo k rovnoměrnému rozmístění (s ohledem na možné nebezpečí u oblasti Velkého Kotle). Každému vřícovacímu i referenčnímu bodu byla změřena poloha pomocí RTK GPS, která byla umístěná ve výšce dvou metrů. Následně bylo zahájeno snímkování pomocí bezpilotního letadla DJI Phantom 4 Pro s celkovým počtem 245 snímků o velikosti 2 GB. Během snímkování byla změněná expozice, kvůli problému s vysokou odrazivostí sněhu směrem k Velkému Kotli. Dle meteorologických podmínek bylo jasné, slunečné počasí a panovalo bezvětří. Po snímkování byly posbírány všechny vřícovací body a zároveň provedeno referenční měření. Referenčních měření bylo celkem 12, a to buď na spojnici mezi dvěma sousedními body, nebo v okruhu 40 metrů od vřícovacího bodu. Průměrná výška sněhu byla 33,4 cm. Po importování referenčních bodů do programu ArcGIS Pro bylo zjištěno, že referenční bod č. 11 se nachází mimo vřícované území Vysoké Hole a z toho důvodu byl smazán.



Obr. 9 Rozmístění vřícovacích a referenčních bodů (15. 2. 2023)

Druhé snímkování

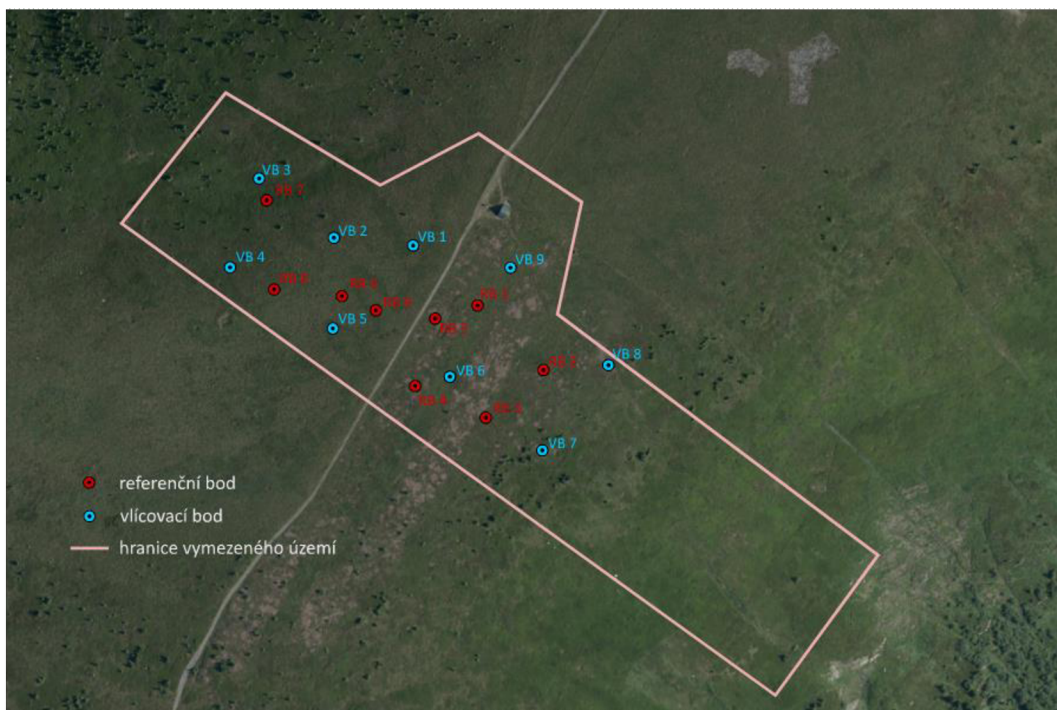
Bylo provedeno autorem práce dne 1. 3. 2023 v ranních a dopoledních hodinách. Zaměřeno bylo devět vlíčovacích i referenčních bodů. Celkový počet snímků byl 255 (vyšší počet snímků z důvodu rychlosti letu) o velikosti 2 GB. Meteorologické podmínky odpovídali slunečnému a jasnému počasí a foukal velmi slabý vítr. Po snímkování byly posbírány všechny vlíčovací body a zároveň provedeno referenční měření. Průměrná výška sněhu byla 29,7 cm.



Obr. 10 Rozmístění vlíčovacích a referenčních bodů (1. 3. 2023)

Třetí snímkování

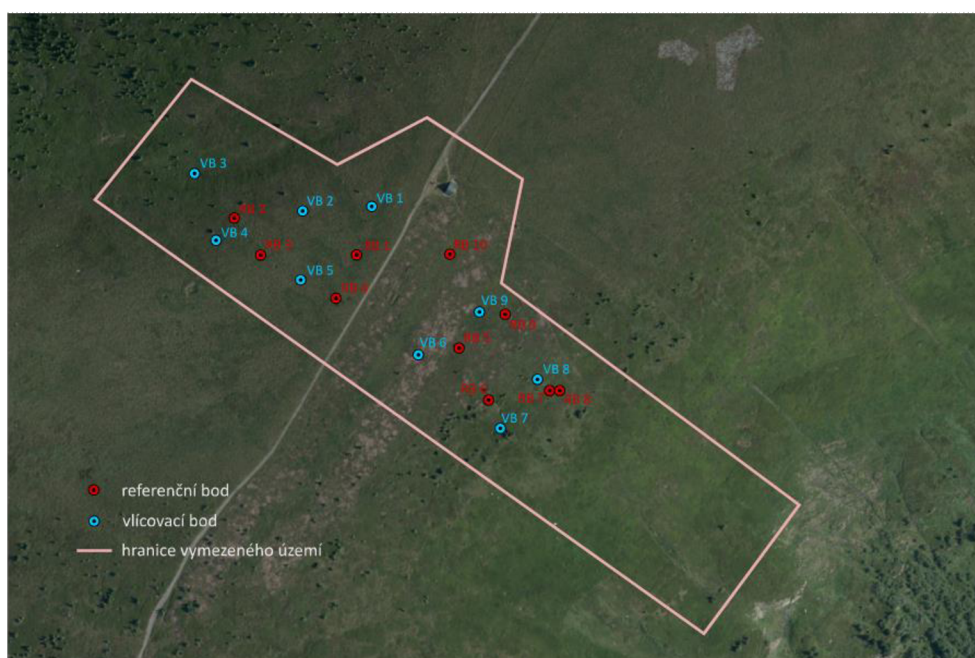
Bylo provedeno autorem práce dne 16. 3. 2023 v ranních a dopoledních hodinách. Zaměřeno bylo osm vlíčovacích a devět referenčních bodů. Celkový počet snímků byl 250 o velikosti 2 GB. Bylo polojasné počasí (kvůli tomu je na snímcích vidět stín způsobený oblačností) a foukal slabý vítr. Po snímkování byly posbírány všechny vlíčovací body a zároveň provedeno referenční měření. Průměrná výška sněhu byla 41,7 cm.



Obr. 11 Rozmístění vlíčovacích a referenčních bodů (16. 3. 2023)

Čtvrté snímkování

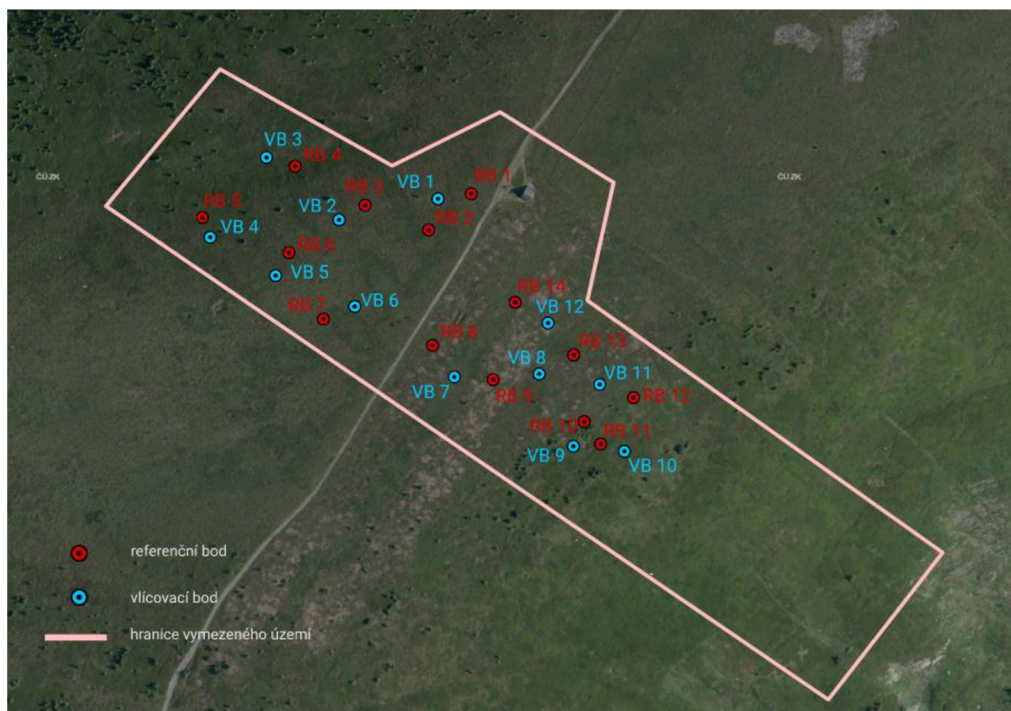
y Bylo provedeno autorem práce dne 6. 4. 2023 v ranních a dopoledních hodinách. Zaměřeno bylo devět vlíčovacích a deset referenčních bodů. Celkový počet snímků byl 264 o velikosti 2,16 GB. V ranních hodinách byla mlha, poté mraky zahály území Vysoké hole a vyskytlo se jenom málo příležitostí pro snímkování. Jedna letová řada byla focena při přeletu mraků, proto musela být manuálně nesnímkována znovu. Vítr dosahoval rychlosti 10 m/s až 12 m/s. Výška sněhu na návětrné straně dosahovala zhruba 10 cm, proto jsou na snímcích výčnělky (borovice kleč, tráva), kvůli kterým bylo těžší rozpoznání vlíčovacích bodů. Po snímkování byly posbírány všechny vlíčovací body a zároveň provedeno referenční měření. Průměrná výška sněhu byla 15,2 cm.



Obr. 12 Rozmístění vlíčovacích a referenčních bodů (6. 4. 2023)

Páté snímkování

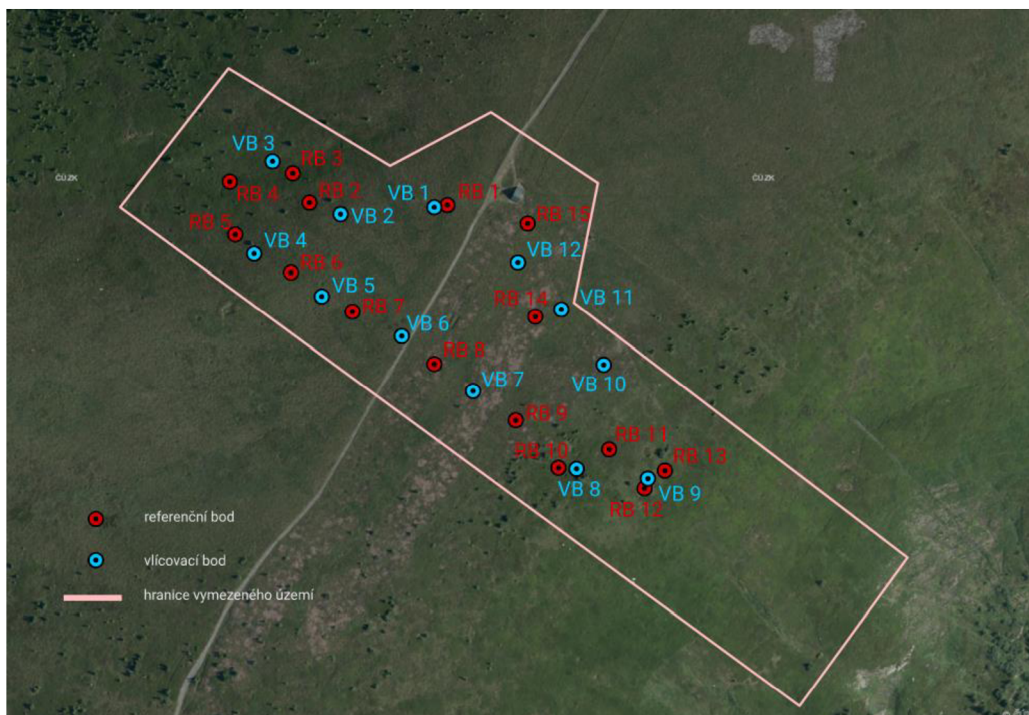
Provedeno autorem práce krátce po čtvrtém snímkování, konkrétně 10. 4. 2023 v ranních a dopoledních hodinách. Zaměřeno bylo 14 referenčních a 12 vlícovacích bodů. Celkový počet 249 snímků o velikosti 2,05 GB. Bylo zataženo a foukal mírný vítr. Ačkoliv snímkování proběhlo čtyři dny od posledního snímkování (čtvrtého), tak zde přibyl sníh, ale i přes to se vynořovaly větve borovice kleč. Průměrná výška sněhu dosahovala 33,3 cm.



Obr. 13 Rozmístění vlícovacích a referenčních bodů (10. 4. 2023)

Šesté snímkování

Jednalo se o poslední snímkování, které bylo provedeno 22. 4. 2023 v odpoledních hodinách. Vysoká hole byla v tuto dobu téměř bez sněhové pokrývky. Výjimkou byla oblast Velkého kotle, malý pás na opačné straně Velkého kotle a menší deprese v terénu. Zaměřeno bylo 12 vlícovacích a 16 referenčních bodů. Celkový počet snímků byl 255 o velikosti 2,04 GB. Počasí bylo jasné a bylo bezvětří. Výška naměřena sněhoměrnou latí i přes velký úbytek sněhu dosahovala 116 cm v místě referenčního bodů. Jelikož během snímkování 22. 4. 2023 na vrcholu nebyl sníh, byl výsledný model použit jako kontrolní digitální model povrchu (DMP). Z odečtení digitálního modelu bez sněhu získaného vedoucím práce byl odečtený model vytvořený ze snímkování 22. 4. 2023. Výsledný model vykazuje mírně záporné hodnoty (světle modrá), a to zhruba do 10 cm (viz Obr. 31).



Obr. 14 Rozmístění vlíčovacích a referenčních bodů (22. 4. 2023)

4.1 Problémy

Chybějící rozmístění vlíčovacích bodů

Rozmístění vlíčovacích bodů v rámci bezpečnosti autora práce probíhalo maximálně po modrou tečkovanou čáru (Obr. 15), z toho důvodu oblast dosahuje nižších přesností (nicméně se jedná o hodnoty v řádech jednotek centimetrů)



Obr. 15 Vlíčovací body nejsou rozmístěné směrem k Velkému kotli kvůli nebezpečnému terénu, dochází k nevýrazné chybě v přesnosti

Problémy s rozpoznáním vlíčovacích bodů

Během snímkování 6. 4. 2023 byla výška sněhové pokrývky v průměru 15 cm. Na snímcích se to projevuje výstupky, pahýly borovic kleč a travnatými plochami. To způsobuje problémy s identifikací vlíčovacích bodů na snímcích.



Obr. 16 Borovice kleč a travnaté plochy

Zhoršená viditelnost způsobená nízkou oblačností

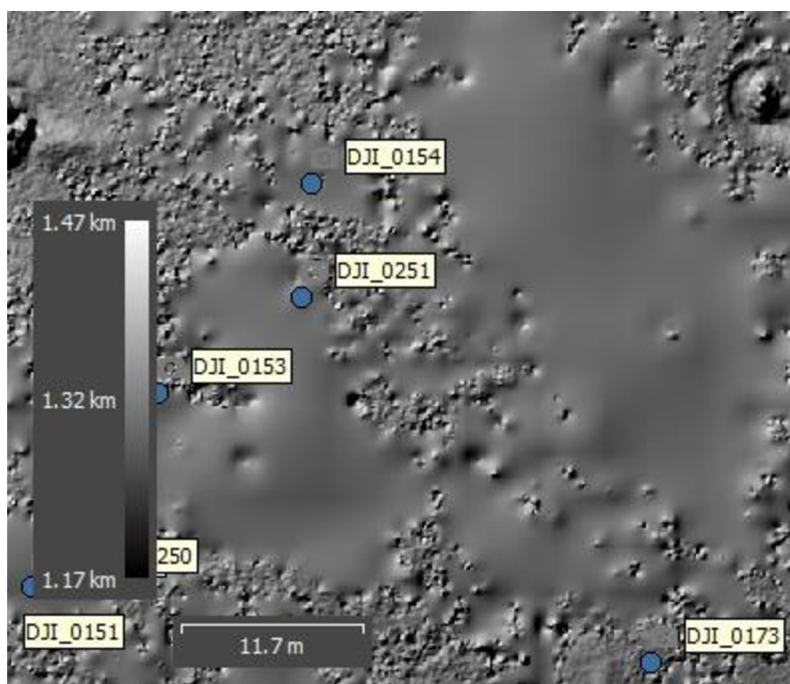
Při snímkování 6. 4. se na území Vysoké hole vyskytovala nízká oblačnost. V jedné letové řadě podle plánu letu bylo několik snímků kompletně v mraku, to způsobilo namrzání vrtulí u bezpilotního letounu a znepřístupnilo výhled na oblast Vysoké hole. Během generování bodového mračna vzniklo několik bodů na místě výskytu mraků.



Obr. 17 Snímek zahalený v mracích

Vzniklé mezery v modelu

Generování mračna bodů (dense cloud) z 6. 4, při kterém byl povrch snímkaný během nízké oblačnosti. Oblačnost způsobila vzniklé mezery. Tyto mezery způsobují Agisoft Metashape automaticky zaplní, interpoluje terén v oblasti vzniknutých mezer. Nicméně interpolace zapříčinila vznik nepřesností při určení metrik sněžové pokrývky.



Obr. 18 Interpolovaný terén (shlazený) na digitálním modelu povrchu (DMP), automaticky vytvořený v Agisoft Metashape. (modré tečky s čísly označují UAV snímky).

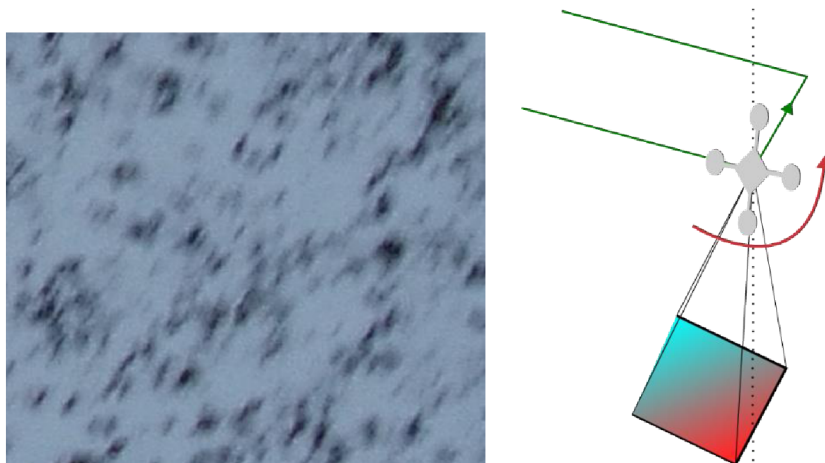
Body nacházející se mimo území

Po vygenerování mračna bodů byly vytvořeny body, které leží výrazně mimo oblast Vysoké hole. Takových bodů se v bodovém mračnu nevyskytuje velké množství. Jelikož jsou započítávány při generování modelů do výpočtů a způsobují výrazné deformace. Proto je třeba takové body manuálně odstranit.



Obr. 19 Manuálně vybraný bod, ležící mimo oblast (vyznačený v červeném kolečku)

Na obrázku č. 20 je viditelný smaz, který je zapříčiněn pohybem dronu na konci letových drah, kde dochází ke změně směru. Pokud při otáčení dronu kolem své osy pořídí dron snímek, je viditelný smaz. Čím blíže na snímku ke středu otáčení UAV v době pořízení snímku, tím je smaz menší (smaz se vyskytuje u okrajů snímku, jelikož tam je úhlová rychlost nejvyšší).



Obr. 20 Smaz způsobený rotací UAV kolem své osy. Nalevo je roh snímku, ve kterém je nulový smaz. Napravo ilustrační obrázek (červená: smaz, světle modrá: bez smazu, zelená šipka: směr letu UAV)

4.2 Postup zpracování dat v programu Agisoft Metashape

Pro stanovení metrik sněžové pokrývky bylo zapotřebí zpracovat data pořízená bezpilotním letounem (povrch se sněžovou pokrývkou). Ze zpracovaných snímků byly vytvořena bodová mračna (Dense Cloud), která vstupují do analýz s bodovým mračnem pořízeným leteckou fotogrammetrií vedoucím práce (povrch bez sněžové pokrývky).

Import dat, transformace souřadnic, zarovnání snímků

Prvním krokem bylo samostatné exportování snímků z SD (Secure Digital) karty umístěné v UAV ve formátu JPS a export naměřených bodů ve formátu CSV. Prvním krokem bylo importování UAV snímků do programu Agisoft Metashape. V horní výběrové liště se nachází záložka „Workflow -> Add Photos...“, která umožňuje nahrání snímků do programu. Pořízené snímky jsou v souřadnicovém systému WGS 84, souřadnice vřícovacích a referenčních bodů v souřadnicovém systému S-JTSK. Z toho důvodu byly snímky transformovány pomocí nástroje „Convert Reference“ do souřadnicového systému S-JTSK, použita byla transformační rovnice z S-JTSK do WGS 84 (Pajdová, 2022).

Longitude	Latitude	Altitude (m)	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)
17.229242	50.060224	1479.606000	-543574.236426	-1069695.915086	1436.621800
17.229089	50.060267	1479.806000	-543584.645450	-1069690.048015	1436.821708
17.228903	50.060322	1479.806000	-543597.264495	-1069682.650032	1436.821601
17.228682	50.060334	1479.806000	-543612.897956	-1069679.739370	1436.821402

Obr. 21 Souřadnice v souřadnicovém systému WGS 84 (nalevo), transformované souřadnice do S-JTSK (napravo)

Po transformaci byla změněná nadmořská výška snímků (na Obr. 21, atribut „Altitude“). Problém s nadmořskou výškou byl vyřešený přidáním vřícovacích bodů.

Dalším krokem bylo zarovnání snímků, záložka „Workflow -> Align Photos“. Software na snímcích vyhledává odpovídající si body, a tím dochází ke spojení/skládání snímků. Provádí výpočet prvků vnitřní a vnější orientace. Při snímkování UAV zaznamenává pomocí GPS a IMU jednotky své souřadnice, které vstupují do výpočtů aerotriangulace.

Obrázek 24 ukazuje podrobné nastavení použité v bakalářské práci. Parametr „Accuracy“ označuje přesnost. Čím vyšší přesnost, tím přesnější vypočítaná poloha kamery, na úkor časové náročnosti způsobenou výpočty. Generic preselection se snaží najít překrývající se obrazy pomocí zmenšených kopií původního obrazu a poté zarovnat pouze ty, které se skutečně překrývají. Reference preselection, režim předvýběru „Source“ funguje na překrývajících dvojicích fotografií, které se vybírají na základě naměřených hodnot kamery. Jelikož známe polohu kamery, můžeme tím výrazně snížit čas zarovnání snímků.

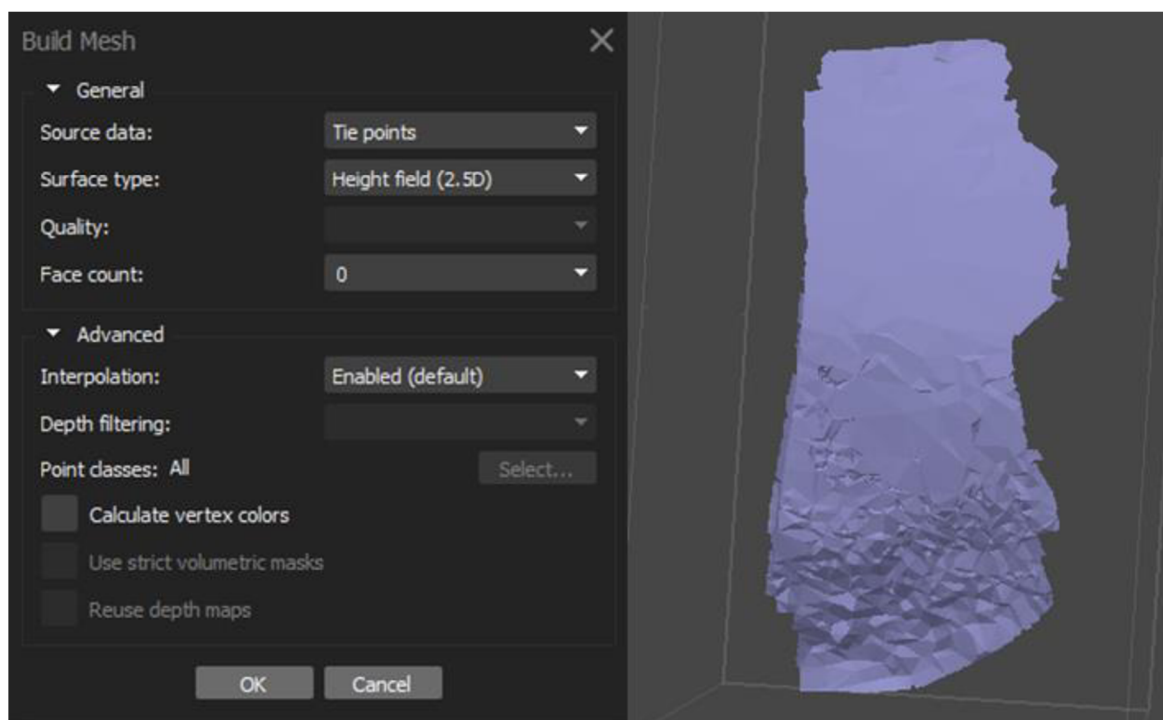
V kategorii „Advanced“ se nachází „Key point limit“ a „Tie point limit“. První zmíněné označuje horní hranici bodů na každém snímku. Při použití nulové hodnoty aplikace Metashape nalezne co nejvíce klíčových bodů, nicméně může mít za následek velký počet méně spolehlivých bodů. Tie point limit udává horní hranici vázacích bodů pro každý snímek.

Úprava bodového mračna, vytvoření modelu

Dalším krokem byl „Gradual Selection“, který se nachází v horní liště, v záložce „Model“. Metoda „Reprojection Error“, která označí všechny body, které jsou vzdálenostně více než 0,2 pixelů mezi promítaným 3D bodem a původním 3D bodem. Tyto body byly následně vymazány, jelikož ovlivňují přesnost výsledného modelu (*Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.0*).

Po odstranění bodů byl spuštěný nástroj „Build Mesh“, nacházející se v horní záložce „Workflow“. Z vytvořeného bodového mračna vznikne polygonální síťový model. Vstupním parametrem je zdroj generování „Tie points“ označující vytvořené a upravené bodové mračno. Surface type vybraný „Height field (2.5D)“ je optimalizovaný pro rovinné povrchy, jako je například terén. Pro tento výběr je vhodné mít data z letecké nebo UAV fotogrammetrie. Quality určuje požadovanou kvalitu rekonstrukce hloubkových map (depth maps) za předpokladu, že jsou vybrány jako možnost v „Source data“. Face count určuje maximální počet polygonů ve výsledné síti. Při zapnuté interpolaci („Interpolation: Enabled (default)“) dochází k interpolování ploch o určitém poloměru kolem každého bodu bodového mračna. (*Agisoft Metashape User Manual – Professional Edition, Version 2.0*)

Vlčovací body, výsledný model



Obr. 22 Nástroj Build Mesh, vygenerovaný polygonový síťový model

Následujícím krokem bylo importování vlčovacích bodů. Po exportování bodů z GPS byly body importovány ve formátu CSV do programu Agisoft Metashape. Záložka „Reference – Import Reference“. Při importu je důležité správně zadat pořadí sloupců a řádků. Po importu se vlčovací body zobrazí vysoko nad terénem, nenachází se v jeho blízkosti. A to z důvodu převodu ze souřadnicového systému WGS 84 do S-JTSK. Pro vyřešení této chyby je zapotřebí manuálně přepsat „Altitude“ vlčovacích bodů, dokud nebyly dostatečně blízko terénu, aby se mohla použít funkce „Filter Photos by Marker“. Na základě změřené polohy se umístí značky (Markers) do blízkosti vlčovacích bodů na snímku. Další krokem bylo manuálním způsobem umístění značky do středu vlčovacího bodu na snímku (tento proces se opakuje na každém vybraném snímku programem Agisoft Metashape). Tenhle krok je z hlediska přesnosti velmi důležitý, protože na základě přesnosti umístění značek na vlčovací body se později počítají rovnice kolinearit. Agisoft Metashape vyhledá snímky, na kterých se vlčovací bod z největší pravděpodobnosti vyskytuje a zobrazí se ve spodní liště. Snímky jsou označené bílou vlajkou, která značí, že Marker dosud nebyl umístěn na vlčovací bod. Po umístění se vlajka v dolní liště u snímku změní na zelenou (*Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.0*).

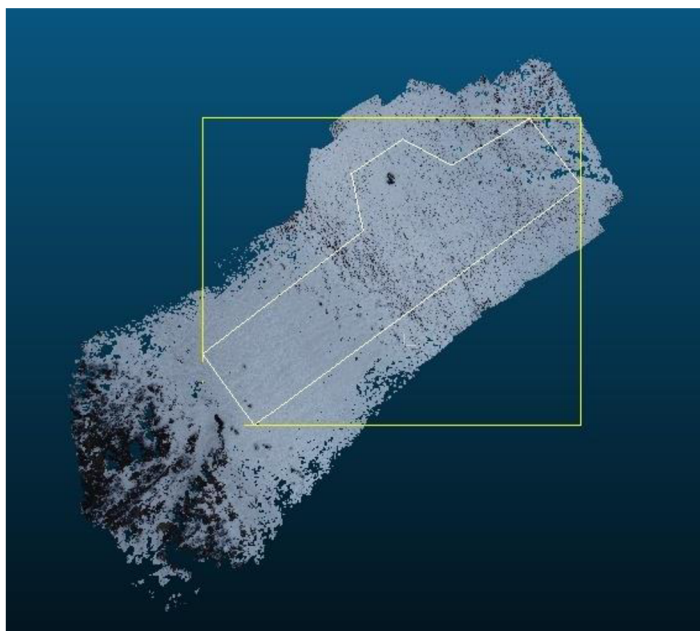
Po přiřazení značek k vlčovacím bodům, byla vrácena zpět nadmořská výška (Altitude) všem bodům.

Velmi důležitým procesem byl takzvaný „Optimize Camera Alignment“ který vypočítal rovnice kolinearit. „Fit f“ je ohnisková vzdálenost, „Fit k1, k2 a k3“ jsou koeficienty radiální distorze. „Fit p1 a p2“ jsou koeficienty tangenciální distorze. „Fit cx, cy“ jsou souřadnice hlavního bodu (průsečíku osy objektivu s rovinou snímače). „Fit b1 a b2“ jsou koeficienty transformace afinity a šikmosti (*Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.0*).

Posledním krokem bylo vygenerování bodového mračna (Dense Cloud). Kvalita (Quality) je zde zvolena „High“, což vyžaduje vyšší dobu zpracování, ale za ziskem podrobnější a přesnější geometrie. „Depth filtering - Mild“, nastavení parametru „Mild“ je ideální k zachování důležitých rysů reliéfu. Vhodná například pro letecké snímkování. Zpracování procesu „Build Dense Cloud“ proběhlo do 40 až 50 minut. S výsledným počtem vygenerovaných 100 až 130 milionů bodů (*Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.0*).

4.2.1 Postup v programu Cloud Compare a ArcGIS Pro

Pro zjištění výšky sněhové pokrývky bylo zapotřebí odečíst digitální model povrchu (DMP) bez sněhové pokrývky s digitálním modelem povrchu se sněhovou pokrývkou. Prvním krokem bylo zapotřebí importovat bodové mračna (Dense Cloud) exportované z programu Agisoft Metashape v souřadnicovém systému S-JTSK, ve formátu ASPRS LAS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - LASer) a bodové mračno získané vedoucím bakalářské práce. Bodová mračna byla oříznuta polygonem vymezeného území Vysoké hole, který byl vytvořen v programu ArcGIS Pro v souřadnicovém systému S-JTSK (EPSG: 5514). Oříznutá bodová mračna byla exportována ve formátu TIFF. Bylo zde zapotřebí dávat pozor, aby se zachovala stejná velikost rastru. Výsledné rastry byly nahrány do programu ArcGIS Pro, ve kterém byly odečteny pomocí funkce "Raster Calculator", tím byla zjištěna výška sněhové pokrývky pro celé vymezené území Vysoké hole. Od DMP se sněhovou pokrývkou byl odečten DMP bez sněhové pokrývky. Tento proces byl použit pro všechny měření. Výsledné hodnoty vykazovali chyby při vegetaci, hlavně u stromů, a chybu v blízkosti rádiové stanice nacházející se na vrcholu Vysoké hole. Dále chyby ve Velkém kotli.



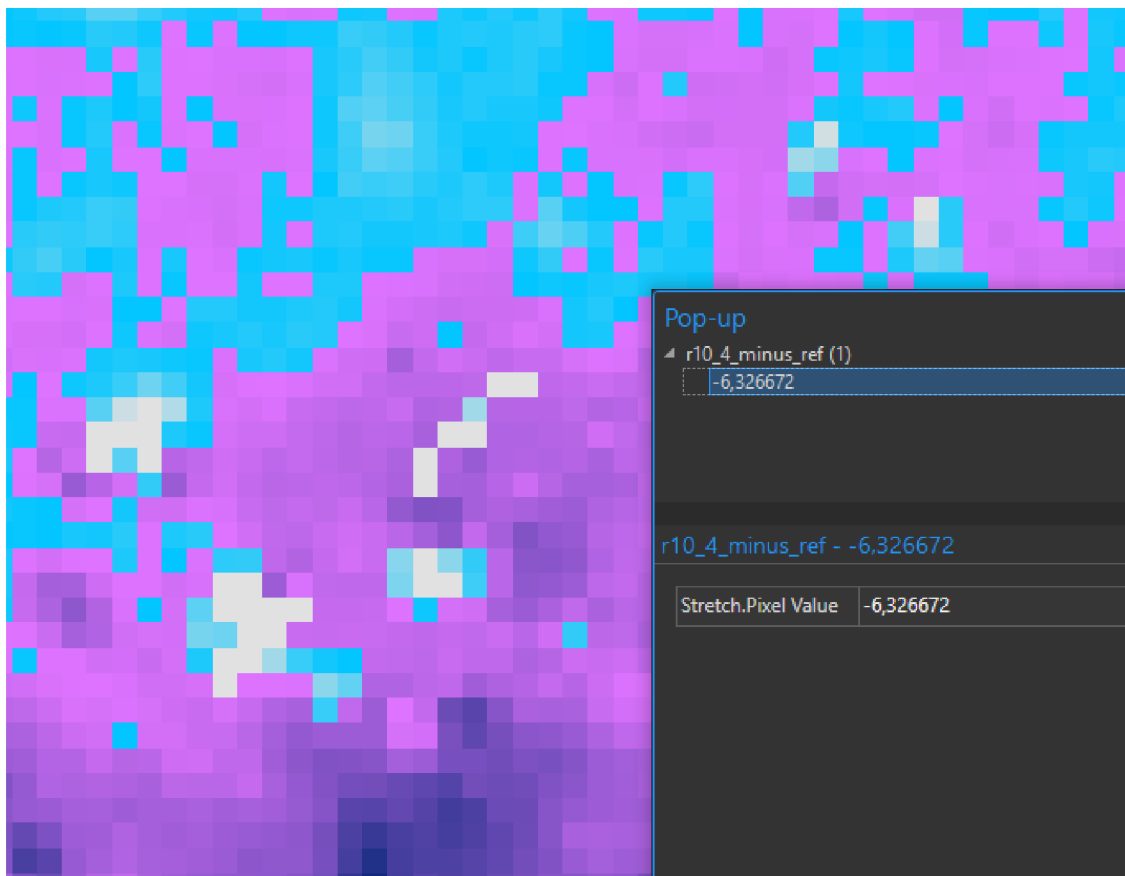
Obr. 23 CloudCompare - polygon vymezeného území Vysoké hole, kterým bylo ořezáno bodové mračno (pohled zespodu)

5 METRIKY SNĚHOVÉ POKRÝVKY

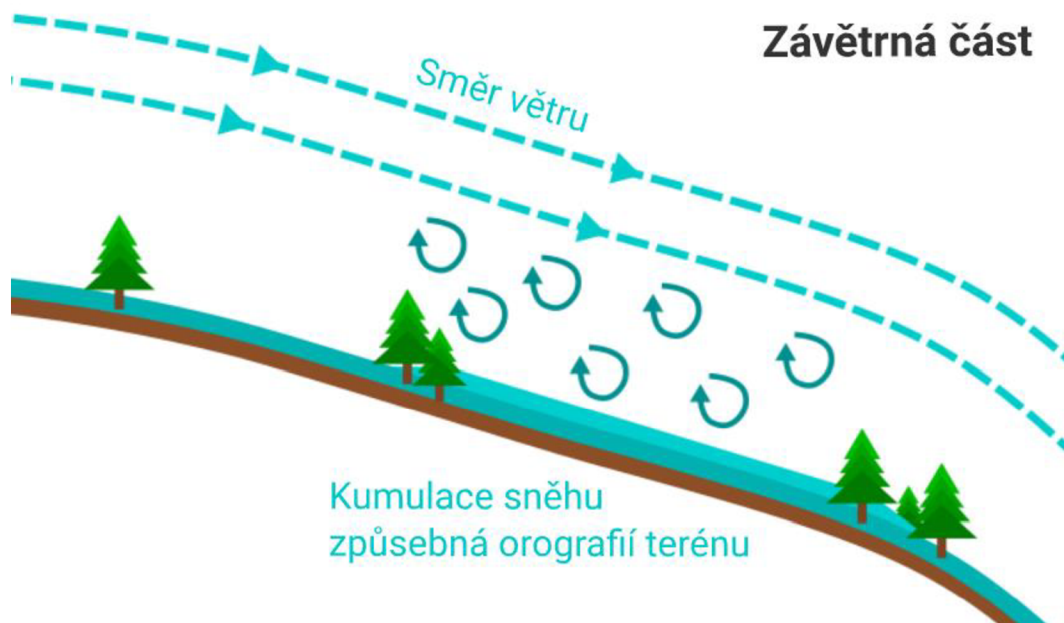
Hlavním cílem práce bylo vypočítání metrik sněhové pokrývky. Tento cíl byl zpracován více způsoby pro co nejpřesnější a nejužitečnější výsledky. Pro výpočet metrik sněhové pokrývky bylo zapotřebí odečíst digitální model terénu (DMP) bez sněhové pokrývky od DMP se sněhovou pokrývkou. Tím byla zjištěna výška sněhové pokrývky napříč vymezeným územím. V místech referenčních bodů byla výška sněhu zjištěna sněhoměrnou latí.

První zpracování bylo provedeno již zmíněným odečtením DMP bez sněhové pokrývky od DMP se sněhovou pokrývkou pro celý vymezený terén Vysoké hole. Na některých částech digitálního modelu došlo k chybám ve výšce. Tato chyba je způsobena výskytem vegetace, potažmo stromů, kde na pozici výskytu stromů a sněhu na ležícího na stromech došlo k chybám. Tato chyba výšky (na stejném místě) byla změřena pouze při snímkování 10. 4.

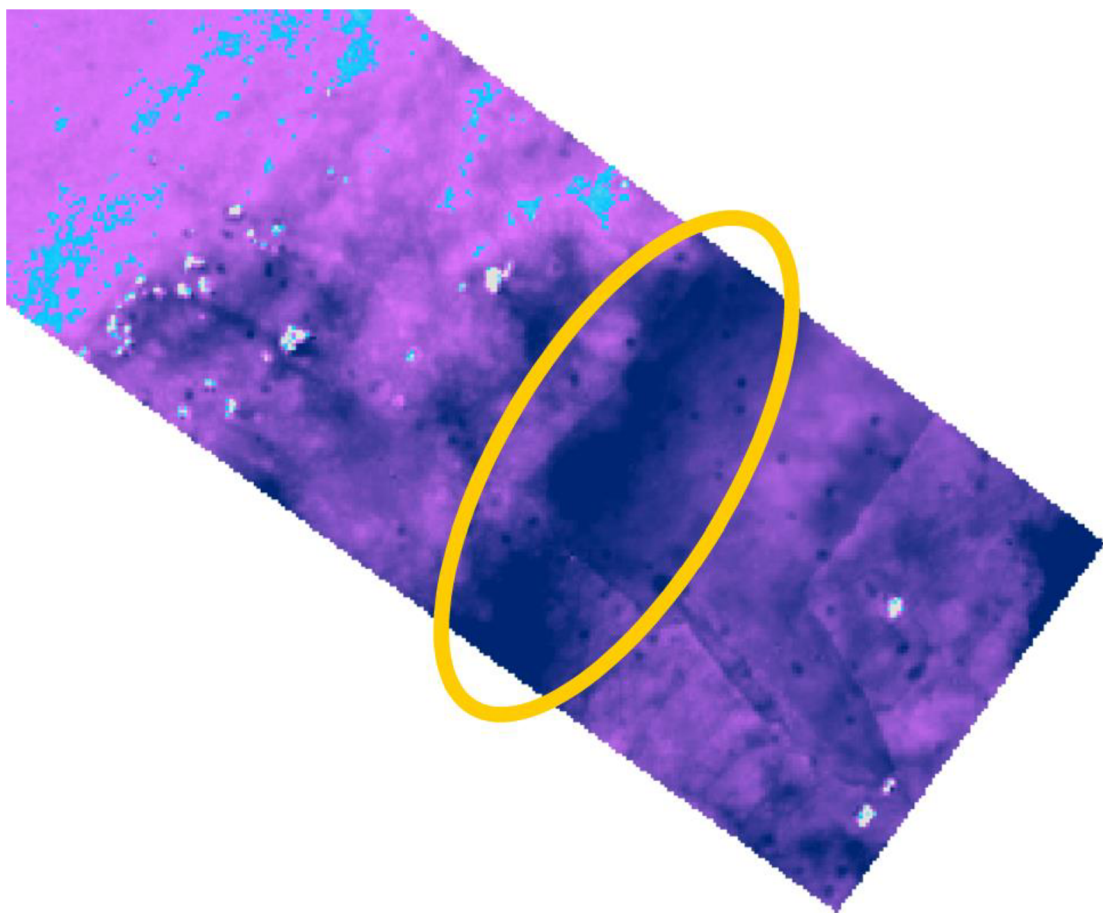
Na následujících obrázcích (*Obr. 27 až Obr. 31*) je znázorněna pomocí barevné hypsometrie výška sněhové pokrývky. Nejvyšší výška sněhové pokrývky se nachází ve Velkém kotli. Vzhledem k orografii lokality je zde sníh navátý a udržuje se zde do letních měsíců. Proto zde výška sněhu dosahuje nejvyšších hodnot (2-3 metrů). Na obrázku 26 je znázorněný pás vysokých hodnot. V pravém rohu obrázku se vyskytují hodnoty dosahující až 5 metrů.



Obr. 24 Chyba způsobená vegetací (snímkování 10.4.)

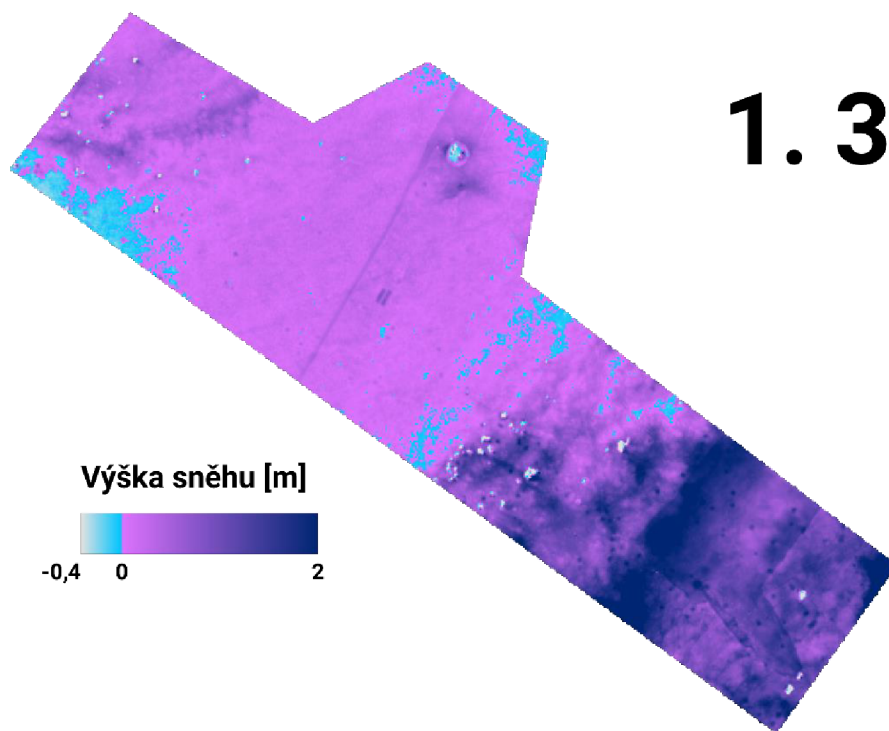


Obr. 25 Kumulace sněhu způsobená orografií terénu



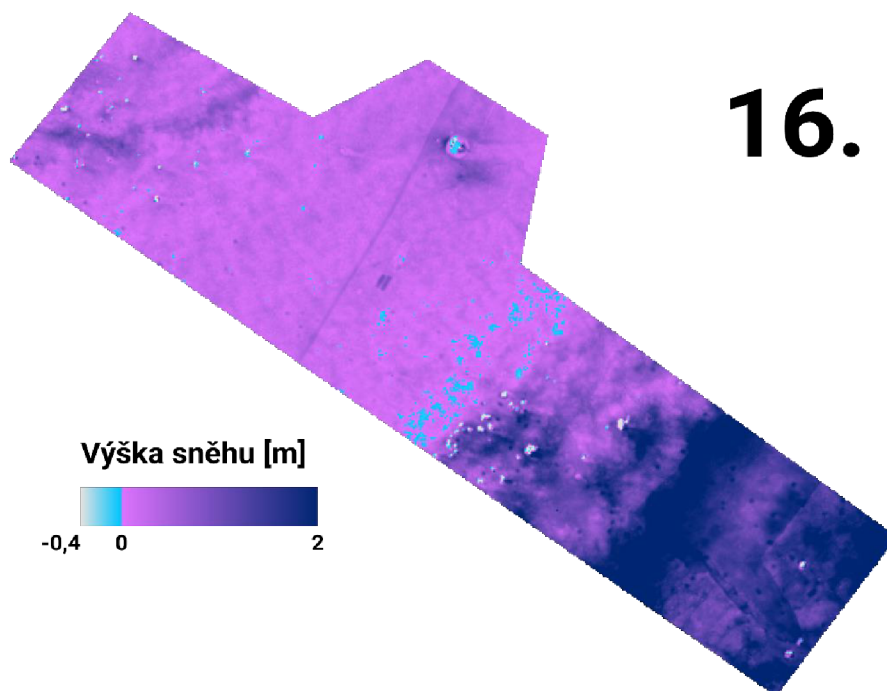
Obr. 26 Červená elipsa znázorňující vysoké hodnoty výšky sněhové pokrývky v oblasti Velkého kotle (snímkování 1. 3.)

1. 3.



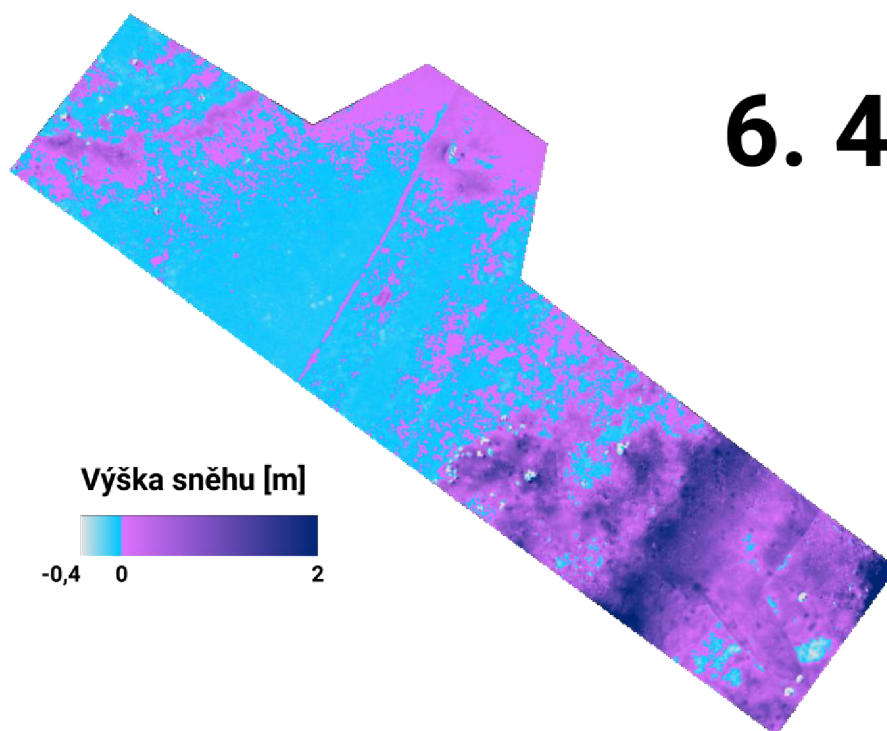
Obr. 27 Výška sněhové pokrývky v metrech (snímkování 1. 3.)

16. 3.



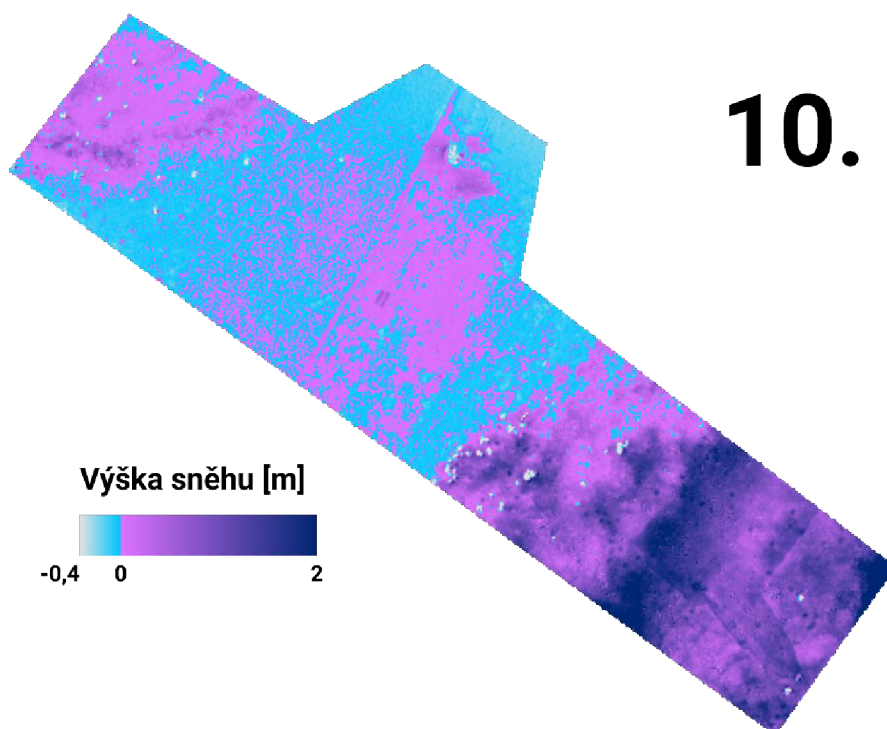
Obr. 28 Výška sněhové pokrývky v metrech (snímkování 16. 3.)

6. 4.



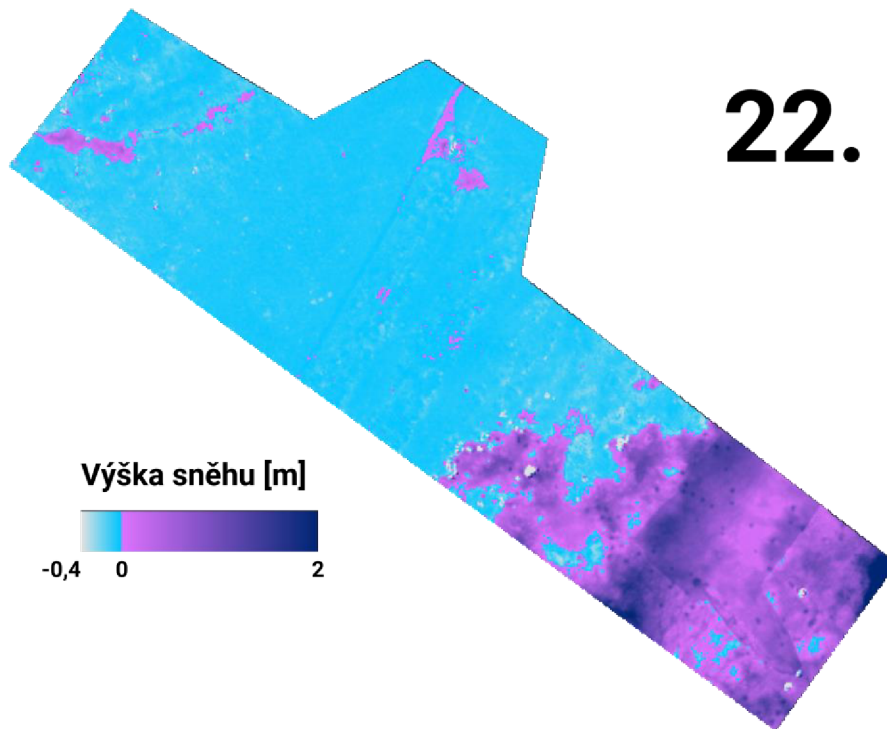
Obr. 29 Výška sněhové pokrývky v metrech (snímkování 6. 4.)

10. 4.



Obr. 30 Výška sněhové pokrývky v metrech (snímkování 10. 4.)

22. 4.



Obr. 31 Výška sněhové pokrývky v metrech (snímkování 22. 4.)

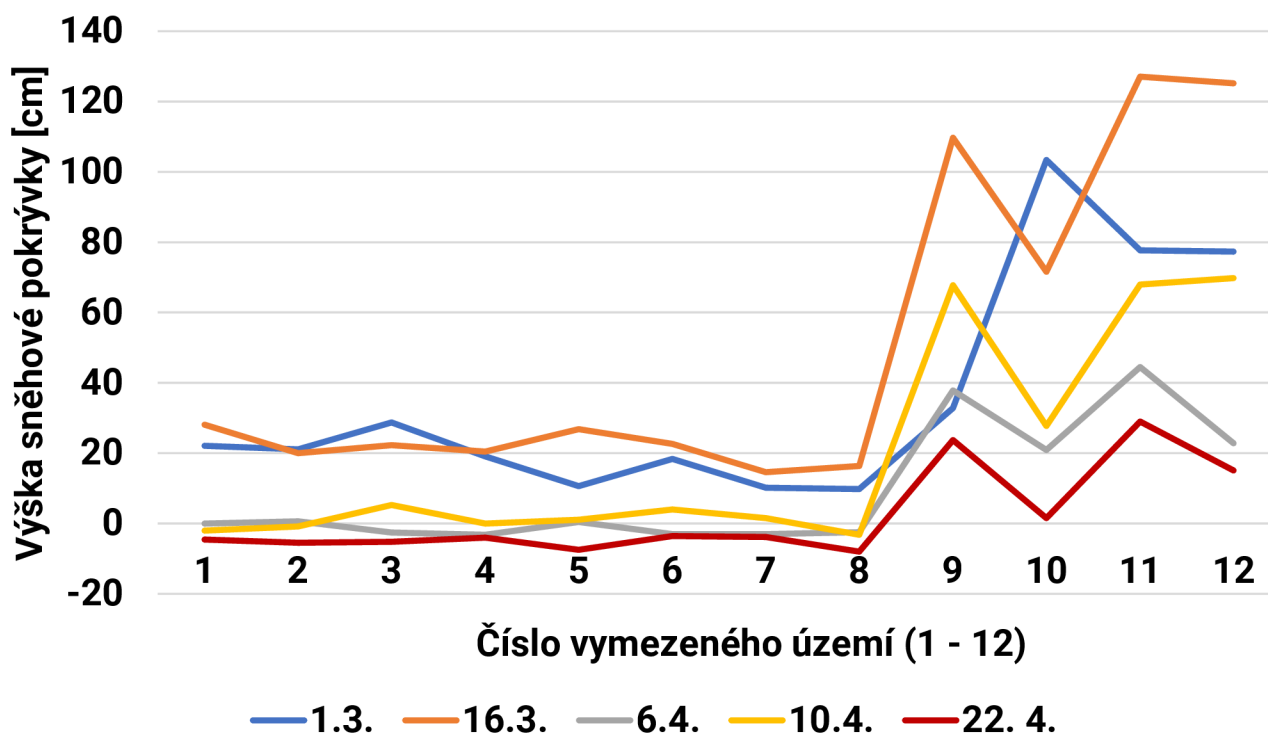
Vytvoření menších území

Dalším způsob zpracování spočíval ve vytvoření celkem 12 menších čtverců rovnoměrně rozmístěných po území Vysoké hole. Každý čtverec představuje zájmové území, ve kterém bude porovnávána výška sněhové pokrývky. Čtverce jsou o velikosti 20 x 20 metrů, byly rozmístěny tak, aby zasahovaly co nejmenší, případně žádnou, vegetaci, kvůli problematickému odčtení rastrů v místech s vegetací, kde hodnoty sněhu dosahovali záporných hodnot. Následně byla použita funkce "Extract by Mask", jako vstupní parametry zde vstupují odečtené (rozdílové) rastry za každé měření. Tyto rastry byly ořezané čtverci. V každém čtverci tak byla pozorována maximální a minimální hodnota výšky sněhové pokrývky a průměr všech hodnot ve čtverci.



Obr. 32 Rozmístění čtverců na území Vysoké hole

Průměrná hodnota výšky sněhové pokrývky v čase na území vymezených čtverců

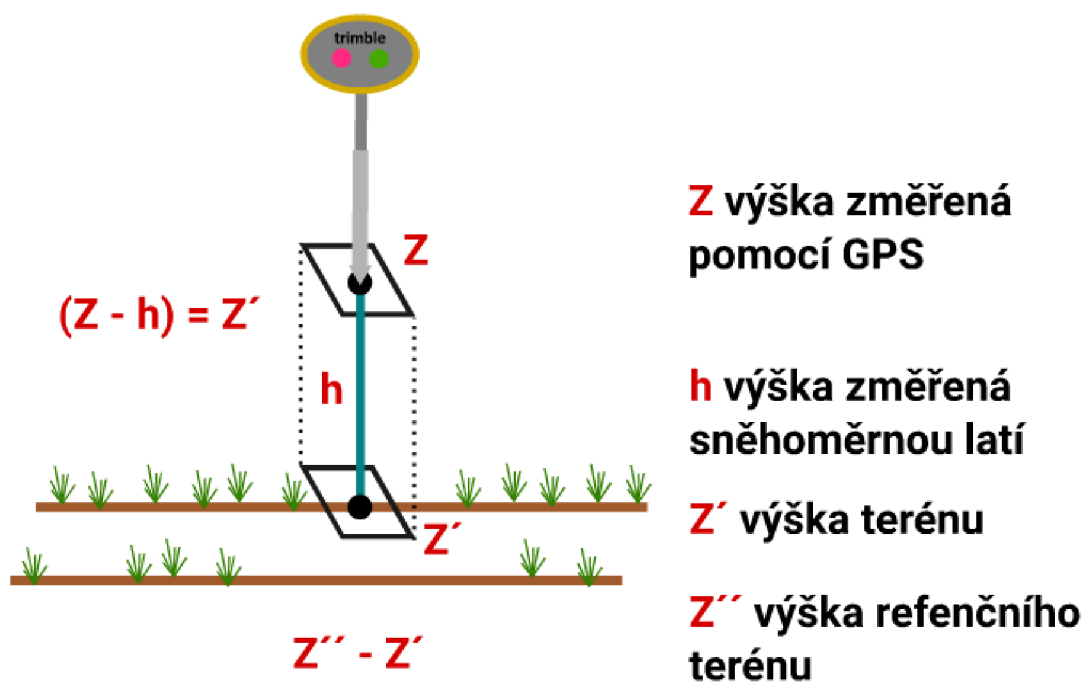


Obr. 33 Průměrná hodnota výšky sněhové pokrývky ve vymezeném území čtverců

V dalším kroku byla porovnána souřadnice vypočítané výšky terénu (Z') referenčního bodu naměřená pomocí GPS na povrchu sněhové pokrývky o souřadnicích X, Y, Z, od které byla odečtena výška (h) naměřená sněhoměrnou latí.

V programu ArcGIS Pro byla do referenčních bodů extrahována výška Z a Z' pomocí funkce „Extract Values to Points“ z DMP. Je zde důležité, aby souřadnice X, Y digitálního modelu se sněhem byla totožná, jako souřadnice X, Y digitálního modelu bez sněhové pokrývky. Pro zjištění odchylky bodu terénu Z' (získané odečtením $Z - h$) a změřeného bodu Z'' (získané pomocí leteckého snímkování) bylo zapotřebí odečíst výšku terénu Z' od výšky Z'' . V ideálním případě by se výška Z měla rovnat výšce Z' . Tyto odchylky způsobené nepřesným měřením jsou způsobeny neúplným probodnutím latě až na povrch (kvůli zmrzlému sněhu nacházejícího se ve spodních vrstvách, nebo vegetací, která mění svou výšku v průběhu roku). Nebo nepřesným měřením (letecká fotogrammetrie nebo chyba GPS). Odchylky jsou zaznamenány v následujících grafech.

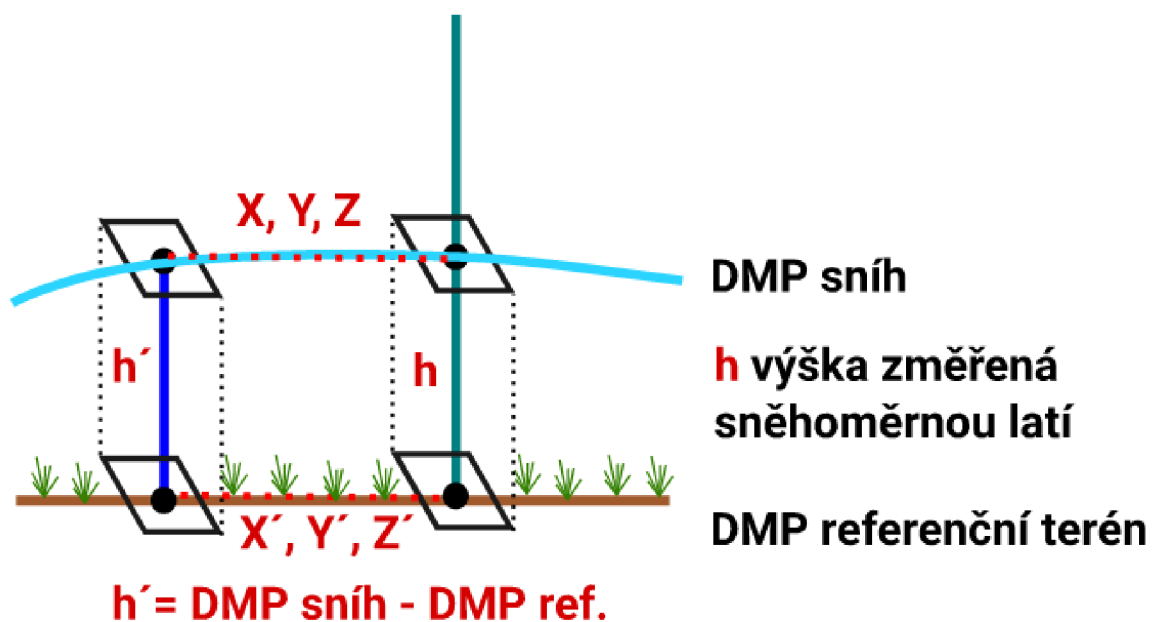
Některé referenční body dosahují záporných hodnot, pravděpodobně způsobené chybou.



Obr. 34 Ilustrační obrázek vysvětlující výpočet rozdílu hodnot mezi souřadnicí terénu (Z') a souřadnicí výšky referenčního terénu v místě referenčního bodu (Z'')

Výška změřená sněhoměrnou latí a výška změřená odečtením DMP

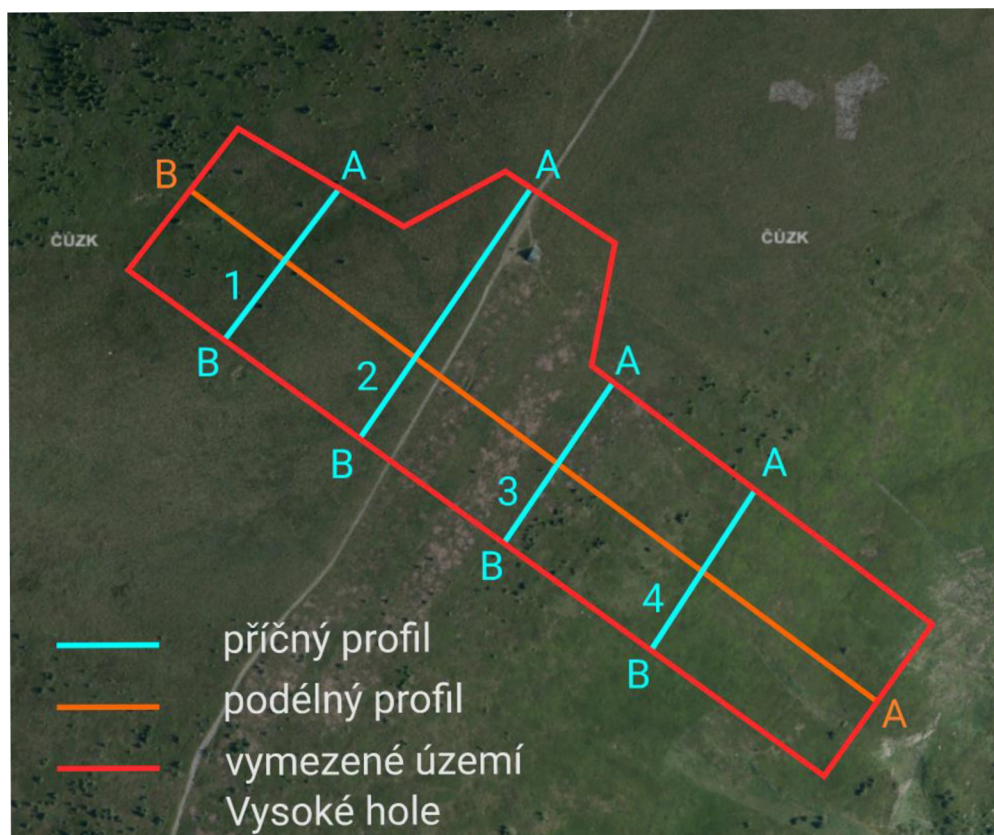
Další krokem bylo porovnání výšky sněhu (h) změřené sněhoměrnou latí, změřenou v referenčních bodech (X, Y, Z) a výšky h' změřené ve stejném bodu (X, Y, Z) získanou odečtením digitálního modelu bez sněhu od digitálního modelu se sněhem.



Obr. 35 Ilustrační obrázek vysvětlující výpočet rozdílu hodnot mezi výškou sněhu (h) získanou sněhoměrnou latí a výškou sněhu (h') získanou odečtením digitálních modelů

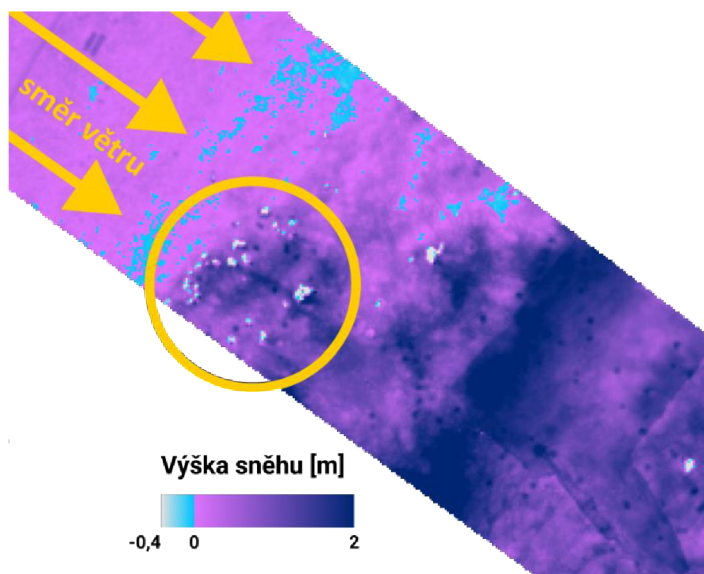
Podélný profil, příčné profily

Napříč území Vysoké hole byl vytvořený podélný profil a čtyři příčné profily, do kterých byla pomocí funkce „Interpolate Shape“ v programu ArcGIS Pro extrahována hodnota pixelů, nacházejících se v průběhu linie profilů. Snímkování 22. 4. a 15. 2. nebylo zařazeno do profilů.

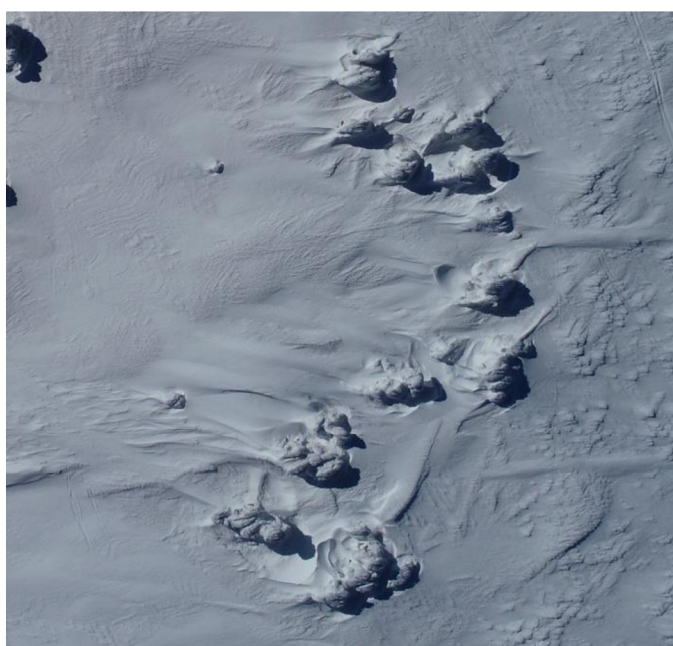


Obr. 36 Podélný profil, příčné profily Vysokou holi

Směrem k Velkému kotli se nacházela vegetace, která je na Obr. 37 vyznačena ve žlutém kruhu, jedná se o stromy (bílé skvrny). Tyto stromy z hlediska výsledků způsobují odchylky záporných hodnot výšky sněžové pokrývky. Za stromy docházelo ke kumulaci sněhu, to lze vidět tmavě fialovou barvou nacházející se ve směru větru za stromy. K tomuto jevu nastalo i v případě mírné depresi nacházející se na terénu.



Obr. 37 Výška sněžové pokrývky v oblasti za stromy, větrem navátý sněh



← Směr větru

Obr. 38 Vliv stromů na výšku sněžové pokrývky ve směru větru směrem do Velkého kotle

6 VÝSLEDKY

Hlavním cílem práce bylo stanovení metrik sněhové pokrývky. Celkem bylo provedeno šest měření, nicméně kvůli neznámé chybě prvního měření (15. 2.) tohle měření nevstupuje do výpočtů, jelikož výška sněhu v oblasti Velkého kotle a na opačné straně Vysoké hole dosahuje záporných hodnot až -15 metrů. Veškerých cílů a získaných výsledků bylo docíleno několika metodami, které budou zmíněny v následujícím textu.

Prvním výsledkem bylo zhodnocení rozdílů výšky bodů, které byly získány leteckým snímkováním nacházejících se v místech referenčních bodů a zaměřené souřadnice Z v místech referenčních bodů, od které byla odečtena výška naměřená sněhoměrnou latí „h“ (viz Obr. 34). Tyto rozdílů jsou zvýrazněny v grafech (viz Graf 1 až Graf 5). Výšky dosahují vysokých hodnot 40 cm, ale i záporných hodnot. Tato chyba je pravděpodobně způsobená vyskytující se vegetací (hlavně křoví), která je zachycena leteckou fotogrammetrií na povrchu terénu a při odečítání modelů vzniká chyba, ale referenční měření vliv vegetace zanedbává.

Druhým výsledkem bylo porovnání rozdílů hodnot výšky sněhové pokrývky naměřené v referenčních bodech sněhoměrnou latí oproti výšce získané odečtením digitálního modelu povrchu bez sněhu od digitálního modelu povrchu se sněhem (viz Obr. 35). Tyto hodnoty byly vyneseny do grafů. (viz Graf 6 až Graf 9). V grafech jsou znovu patrné odchylky výšek, a to kvůli již zmíněné vegetaci a možnosti nedokonalému propíchnutí sněhoměrné latě až na povrch Vysoké hole.

Třetím výsledkem bylo vytvoření menších zájmových oblastí (čtverců) o velikosti 20 na 20 metrů (400 m²) rovnoměrně rozmístěných po území Vysoké hole. Oblasti byly rozmístěny tak, aby co nejméně zachytávaly vegetaci, a to hlavně stromy, které v místech výskytu způsobují chybné hodnoty (viz Obr. 37). Rozmístění čtverců je vyobrazené na Obr. 39. Pro každé území byla vypočítána výška sněhové pokrývky rozdílem digitálních modelů. Následně zjištěna maximální a minimální výška, která, i přes snahu nezasáhnout vegetaci, může být vegetací minimálně ovlivněná.



Obr. 39 Ukázka výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích, podklad: snímkování 1. 3.

Dalším cílem bylo vytvoření modelů výšky sněhové pokrývky ve vymezeném území Vysoké hole. Tyto modely vznikly odečtením digitálních modelů mezi sebou. Každý model vykazoval chybu při výskytu vegetace, nicméně tato chyba byla způsobená součtem více chyb, jako například nepřesností bodového mračna, již zmíněnou chybou vegetace, ale také rozdílem mezi výškou stromu a navátého sněhu (viz *Obr. 37 a Obr. 38*), jelikož hodnoty zde dosahovali -6 metrů. Pro omezení této způsobené chyby byly nastaveny hranice hodnot od - 0,6 do 2 metrů. Měření z 15. 2. vykazuje poměrně smysluplné hodnoty na vrcholu Vysoké hole, ale směrem do Velkého kotle hodnoty dosahují vysoké chyby. Během snímkování 6. 4. se na Vysoké holi nacházelo nejméně sněhu. Na některých místech se sníh nevyskytoval vůbec. Velká část hodnot výšky sněhu se tak pohybuje pod hranicí 0 cm, tudíž jsou záporné. Z logického hlediska se jedná o chybu, pravděpodobně způsobenou vegetací a chybou v modelech. Výsledné modely jsou na *Obr. 27 až Obr. 31*. Pro přehlednost kladných a záporných hodnot byly modely rozděleny divergentní stupnicí. Z modelů jsou patrné kladné hodnoty na vrcholu Vysoké hole (fialová), zároveň záporné hodnoty v oblasti s vegetací (bílá, *Obr. 37*), pás vysokých hodnot (tmavě fialová, *Obr. 26*).

Posledním výsledkem byla tvorba příčných profilů a podélného profilu (viz *Obr. 36*). Do kterých byla importována hodnota výšky sněhu náležících pixelů. Tyto výsledky byly vyneseny do grafů (viz *Graf 11 až Graf 15*). V grafech jsou patrné prudké deprese, které jsou způsobeny vegetací (stromy).

7 DISKUZE

Hlavní zaměření bakalářské práce bylo zjištění výšky sněhové pokrývky ve vymezeném území Vysoké hole pomocí UAV fotogrammetrie, za účelem pomoci při predikci lavinového nebezpečí.

Řešení hlavního cíle předcházela předletová příprava, do které bylo zahrnuto mimo jiné rozmístění vlíčovacích bodů. Tyto body nemohli být kvůli rizikovosti terénu rozmístěny po celém snímkováném území. To mohlo být příčinou nepřesností směrem do Velkého kotle (místo, kde nebyly rozmístěny vlíčovací body). Jak zmiňuje studie (Yves Bühler, Marc S. Adams, Ruedi Bösch a Andreas Stoffel, 2016), je žádoucí mít zvláště ve strmém terénu přesně odpovídající si digitální modely, jelikož i malé posuny v osách X, Y způsobují nepřesnosti ve výškách sněhové pokrývky. Bakalářská práce využívala referenční model povrchu bez sněhové pokrývky nasnímaný z letadla a referenční model povrchu se sněhovou pokrývkou získaný snímkováním dronem. Během posledního snímkování UAV se na vrcholu Vysoké hole nenacházel žádný sníh, krom území Velkého kotle, kde se sníh vyskytuje do letních měsíců, proto lze toto snímkování brát jako druhé referenční (pouze pro vrchol Vysoké hole). Při porovnání referenčních modelů povrchu terénu bez sněhové pokrývky (leteckou a UAV fotogrammetrií) se rozdíl pohybuje kolem jednotek centimetrů. Z toho lze usoudit, že referenční povrch získaný leteckou fotogrammetrií je přesný. Naneštěstí tohle tvrzení nelze posoudit v oblasti strmých skal ve Velkém kotli, kvůli dlouho přetrvávajícímu sněhu.

Další zmíněnou chybou je vysokohorská vegetace. Na Vysoké holi se vyskytují alpské traviny a vykáčené větve borovice kleč, které způsobují chybu výšky sněhové pokrývky digitálního modelu oproti referenčnímu pozemnímu měření sněhoměrnou latí. Nejen vegetace, ale i zmrzlé vrstvy sněhu dávají vzniku chyby ve výšce. Ne vždy se podařilo sněhoměrnou latí dosáhnout terénu. Pro neúplné propíchnutí sněhoměrnou latí by bylo zapotřebí získat kvalitnější lať. Zatímco pro nepřesnosti způsobenou vegetací, případně výčnělky nebo malými depresemi v terénu, by bylo vhodnější většího počtu vzorků referenčního měření, ze kterých by byl vypočítán průměr. S vegetací souvisí i chyba způsobena vyšší vegetací, a to stromy. Na vymezeném území se nacházelo zhruba kolem 50 stromů. Kolem nich dochází ke kumulaci sněhu (viz *Obr. 25 a Obr. 26*) a zároveň během zimního období jsou stromy deformovány vrstvou sněhu, která na nich leží. Ve výsledných modelech tyto stromy způsobují výrazné záporné hodnoty, které je potřeba vyfiltrovat, případně nepočítat s těmito hodnotami.

Snímkování proběhlo celkem šestkrát. Snaha bylo rozdělení snímkování rovnoměrně během měsíců (únor, březen a duben). Nicméně kvůli nepříznivým podmínkám na Vysoké holi (a horách všeobecně), zvláště silnému větru a nízké oblačnosti nemohlo být snímkování prováděno v pravidelných intervalech, ale jen tehdy, pokud to počasí dovolilo (například mezi čtvrtým a pátým snímkováním byl pouze čtyř denní interval). Během dubna byla sněhová pokrývka velmi nízká, to způsobovalo v modelech záporné hodnoty. Pro přesnější predikce vývoje sněhové pokrývky, potažmo dopadu tání sněhu na lavinové nebezpečí, nebo povodňové stavy, by byl vhodný častější počet snímkování, v pravidelných intervalech (případně každý týden, pokud by se změnila sněhová pokrývka) a zároveň během celého zimního období (například začít již v listopadu).

8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést časoprostorovou analýzu vývoje sněhové pokrývky v oblasti NPR Praděd metodami letecké fotogrammetrie. Bylo provedeno základní statistické zhodnocení s ohledem na orografii lokality. Výsledný počet bylo šest snímkování (výsledky v bakalářské práci pouze z pěti snímkování). Na tento cíl bylo nahlédnuto z více hledisek zpracování výsledků. Zpracování výsledků bylo rozděleno na pět částí. Prvním výsledkem bylo porovnání výšky v referenčních bodech digitálního modelu povrchu (DMP) bez sněhu a výšek změřených geodetickou GPS (Z) od kterých byla odečtena výška sněhu (h), naměřená sněhoměrnou latí. Druhým výsledkem bylo porovnání výšky sněhu (h), naměřenou sněhoměrnou latí a výšky (h'), která byla výsledkem odečtení DMP bez sněhu od DMP se sněhem. Třetím výsledkem byly minimální a maximální hodnot výšky sněhové pokrývky naměřené ve 12 územích 20 na 20 metrů rozmístěných rovnoměrně po Vysoké holi. Čtvrtým výsledkem bylo vytvoření vizualizací barevnou hypsometrií výšky sněhové pokrývky, která byla získána odečtením DMP bez sněhu od DMP se sněhem. Pátým výsledkem byla tvorba příčných profilů a podélného profilu napříč území Vysoké hole. Do těchto profilů byla zaznamenána výška sněhu z pěti snímkování.

Všech výsledků bylo dosaženo za pomoci metod letecké fotogrammetrie. Tomu předcházela předletová příprava, do které je zahrnutý kompletní postup získání výsledků. A to rozmístění vřícovacích bodů rovnoměrně po území Vysoké hole. Jejich přesné zaměření středů (X, Y, Z) geodetickou GPS metodou GNSS RTK. Real Time Kinematic byla nevhodnějším řešením, jelikož na celém vymezeném území Vysoké hole se nacházel mobilní signál. Měření referenční výšky sněhové pokrývky, které probíhalo pomocí sněhoměrné latě, kterou byla zjištěna výška sněhu a změřena svinovacím metrem. Tyto body byly zaměřeny stejným způsobem, jakému tomu bylo při měření souřadnic (X, Y, Z) vřícovacích bodů. Snímkování povrchu bezpilotním letounem DJI Phantom 4 Pro. Bezpilotním letoun snímkoval, podle předem vytvořeného plánu letu, vymezené území Vysoké hole. Před každým letem byla upravena rychlost a expozice dle meteorologických podmínek.

Zpracování všech snímků proběhlo v programu Agisoft Metashape Pro, kde byly vytvořeny 3D bodová mračna a modely. Bodová mračna vstupovali do programu CloudCompare ve formátu LAS, kde byly oříznuty polygonem vysoké hole. Výsledné oříznuté modely exportované ve formátu TIFF byly zpracovány v programu ArcGIS Pro, kde byly vypočítány metriky sněhové pokrývky.

Výsledky bakalářské práce zřetelně poukazují na přesnosti UAV fotogrammetrie. Způsob měření výšky sněhové pokrývky za pomoci UAV fotogrammetrie vykazuje spousty výhod, které budou využity při měření i na dalších místech a pomohou tak například v predikci lavinového nebezpečí nebo povodní.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Použitá literatura

BÖHM, Josef, nedatováno. *Fotogrammetrie - učební texty*. Ostrava.

BÜHLER, Yves, ADAMS, Marc S., BÖSCH, Ruedi a STOFFEL, Andreas, 2016. Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations. *The Cryosphere*. online. 23 květen 2016. Vol. 10, no. 3, pp. 1075–1088. DOI 10.5194/tc-10-1075-2016.

GOETZ, Jason a BRENNING, Alexander, 2019. Quantifying Uncertainties in Snow Depth Mapping From Structure From Motion Photogrammetry in an Alpine Area. *Water Resources Research*. online. 2019. Vol. 55, no. 9, pp. 7772–7783. DOI 10.1029/2019WR025251.

HARDER, Phillip, SCHIRMER, Michael, POMEROY, John a HELGASON, Warren, 2016. Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle. *The Cryosphere*. online. 2 listopad 2016. Vol. 10, no. 6, pp. 2559–2571. DOI 10.5194/tc-10-2559-2016.

LENDZIOCH, Theodora, LANGHAMMER, Jakub a JENICEK, Michal, 2019. Estimating Snow Depth and Leaf Area Index Based on UAV Digital Photogrammetry. *Sensors*. online. leden 2019. Vol. 19, no. 5, pp. 1027. DOI 10.3390/s19051027.

MARŠÍK, Zbyněk, 1982. *Fotogrammetrie: I. díl Základy letecké fotogrammetrie*. 2. Nakladatelství technické literatury.

MINAŘÍK, Robert, 2015. *Sestavení a ověření konceptu leteckého snímkování s využitím pilotovaných letadel a neměřických komor*. online. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.

MIŘIJOVSKÝ, Jakub, 2013. *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení*. online. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta.

MULLEN, Roy, 2004. *Manual of Photogrammetry. Fifth Edition*. 5th edition. Bethesda, Md: ASPRS. ISBN 978-1-57083-071-6.

PAVELKA, Karel, 2003. *FOTOGramMETRIE: Fotogrammetrie 10, 20*. online.. ISBN 80-01-02655-8.

WOLF, Paul a DEWITT, Bon, 2000. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. 3rd edition. Boston: McGraw-Hill Science/Engineering/Math. ISBN 978-0-07-292454-1.

WAWRZYN, Dan, 2022. How to Optimize Your Ground Control Point Placement for Drone Surveying. *Propeller*. online. 1 duben 2022. Získáno z: <https://www.propelleraero.com/blog/how-to-optimize-your-ground-control-point-placement-for-drone-surveying/>

WRIGHT, Alex, 2023. Drone Flight Plan 101 for Photogrammetry - Mapware. online. 28 března 2023. Získáno z: <https://mapware.com/blog/what-are-drone-flight-planning-apps-for-photogrammetry/>, <https://mapware.com/blog/what-are-drone-flight-planning-apps-for-photogrammetry/>

Informační zdroje

AEROWEB.CZ. Cessna 172 - Přehled letadel - Aeroweb.cz. online. Získáno z: <https://www.aeroweb.cz/LetadlaMain/DetailLetadlo/cessna-172?kategorie=letouny>

Agisoft Metashape - manuál. online. Získáno z: https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf

Agisoft Metashape. online. Získáno z: <https://www.agisoft.com/>

Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.0. AirGuru.cz, 2019. *AirGuru.cz | Staňte se lepším pilotem*. online. Získáno z: <https://www.airguru.cz/clanky/tridy>

Aladin Meteogramy. online. Získáno z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ov/aladin/results/public/meteogramy/m.html/m.html#Prad%C4%9Bd%20\(okr.%20Brunt%C3%A1l\)](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ov/aladin/results/public/meteogramy/m.html/m.html#Prad%C4%9Bd%20(okr.%20Brunt%C3%A1l))

CloudCompare. online. Získáno z: <https://www.danielgm.net/cc/>

DJI Phantom 4 PRO+ *product*. online. Získáno z: <https://eshop.pro-drony.cz/phantom-4-pro-Phantom4-PRO+-EU.html>

DRONPRO. Dron DJI Phantom 4 Pro. *DronPro*. online. Získáno z: <https://dronpro.cz/dji-phantom-4-pro>

GISGEOGRAPHY, 2017. GPS Accuracy: HDOP, PDOP, GDOP, Multipath & the Atmosphere. *GIS Geography*. online. 13 března 2017. Získáno z: <https://gisgeography.com/gps-accuracy-hdop-pdop-gdop-multipath/>

INKSCAPE, Inkscape Website, nedatováno. About | Inkscape. online. Získáno z: <https://inkscape.org/about/>

JUNO T41/5. JUNO41WN Juno T41/5 User Manual Trimble Juno T41 handheld - User Guide Trimble Navigation. *FCC ID*. online. Získáno z: <https://fccid.io/S9E-JUNO41WN/User-Manual/Users-Manual-2712065>

Mission Planning, nedatováno. online. Získáno z: <https://www.dronemappingtools.com/collections/flight-planning>

Povolení k létání v CHKO, nedatováno. *Jeseníky*. online. Získáno z: <https://jeseniky.nature.cz>

Pravidla pro létání s drony, 2020. *Alza*. online. Získáno z: <https://www.alza.cz/pravidla-pro-drony-legislativa>

Pravidla UAV. online. Získáno z: <https://www.datart.cz/novinky/radce/nova-legislativa-drony>

Trimble - Transforming the Way the World Works. online. Získáno z: <https://apps.trimbleaccess.com/>

TRIMBLE R4 GNSS. Trimble R4 GNSS / GPS Survey RTK Receiver | GPS-1598. *Positioning Solutions*. online. Získáno z: <https://positioningsolutions.com/products/trimble-r4-gnss-gps-survey-rtk-rover-gps-1598>

Trimble R4 GNSS - NOVINKA - GEOServer. online. Získáno z: https://www.geoserver.cz/gnss-gps-gis-software/geodeticke-gnss/trimble_r4_gnss_novinka_-1074?gclid=CjwKCAjwq-WgBhBMEiwAzKSH6LUmGSZJEovSmEs3m38mmIPNdudw9sZ95ZINY9IM2Wo6g5HJyGtdGxoC2gsQAvD_BwE

Vysoká hole (1 464 m) v Hrubém Jeseníku | *Treking.cz*. online. Získáno z: <https://www.treking.cz/vrcholy/vysoka-hole.htm>

vyvolej.to, nedatováno. *www.vyvolej.to*. online. Získáno z: <https://www.vyvolej.to/magazin/5-tipu-pro-letani-s-dronem-jaka-pravidla-plati-a-kde-muzete-letat>

What is Excel? Everything You Need to Know - Definition by WhatIs.com. *Enterprise Desktop*. online. Získáno z: <https://www.techtarget.com/searchenterprisedesktop/definition/Excel>

Windy.com. *Windy.com/*. online. Získáno z: <https://www.windy.com/>

www.agsgis.com. online. Získáno z: https://www.agsgis.com/What-is-PDOP-And-Why-its-Obsolete_b_43.html

PŘÍLOHY

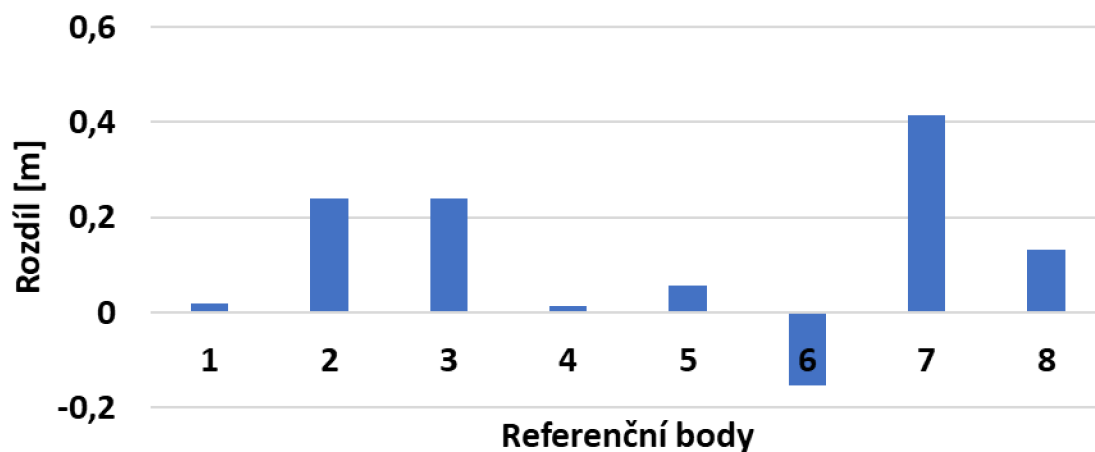
SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

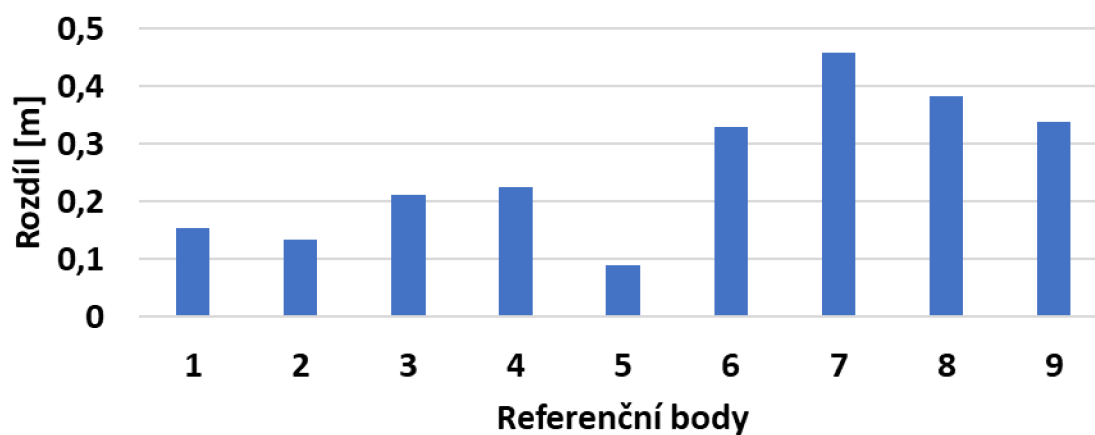
- Příloha 1 Graf rozdílu hodnot nadmořské výšky (Z), od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckém měřením (Z') z 1. 3.
- Příloha 2 Graf rozdílu hodnot nadmořské výšky (Z), od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckém měřením (Z') z 16. 3.
- Příloha 3 Graf rozdílu hodnot nadmořské výšky (Z), od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckém měřením (Z') z 6. 4.
- Příloha 4 Graf rozdílu hodnot nadmořské výšky (Z), od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckém měřením (Z') z 10. 4.
- Příloha 5 Graf rozdílu hodnot nadmořské výšky (Z), od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckém měřením (Z') z 22. 4.
- Příloha 6 Graf rozdílu výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 1. 3.)
- Příloha 7 Graf rozdílu výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 16. 3.)
- Příloha 8 Graf rozdílu výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 6. 4.)
- Příloha 9 Graf rozdílu výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 10. 4.)
- Příloha 10 Graf rozdílu výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 22. 4.)
- Příloha 11 Tabulka maximálních a minimálních hodnot výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích 20 x 20 m (snímkování 1. 3.)
- Příloha 12 Tabulka maximálních a minimálních hodnot výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích 20 x 20 m (snímkování 16. 3.)
- Příloha 13 Tabulka maximálních a minimálních hodnot výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích 20 x 20 m (snímkování 6. 4.)
- Příloha 14 Tabulka maximálních a minimálních hodnot výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích 20 x 20 m (snímkování 10. 4.)
- Příloha 15 Tabulka maximálních a minimálních hodnot výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích 20 x 20 m (snímkování 22. 4.)
- Příloha 16 Graf výšky sněhové pokrývky v podélném profilu
- Příloha 17 Graf výšky sněhové pokrývky v příčném profilu (č. 1)
- Příloha 18 Graf výšky sněhové pokrývky v příčném profilu (č. 2)
- Příloha 19 Graf výšky sněhové pokrývky v příčném profilu (č. 3)
- Příloha 20 Graf výšky sněhové pokrývky v příčném profilu (č. 4)

Volné přílohy

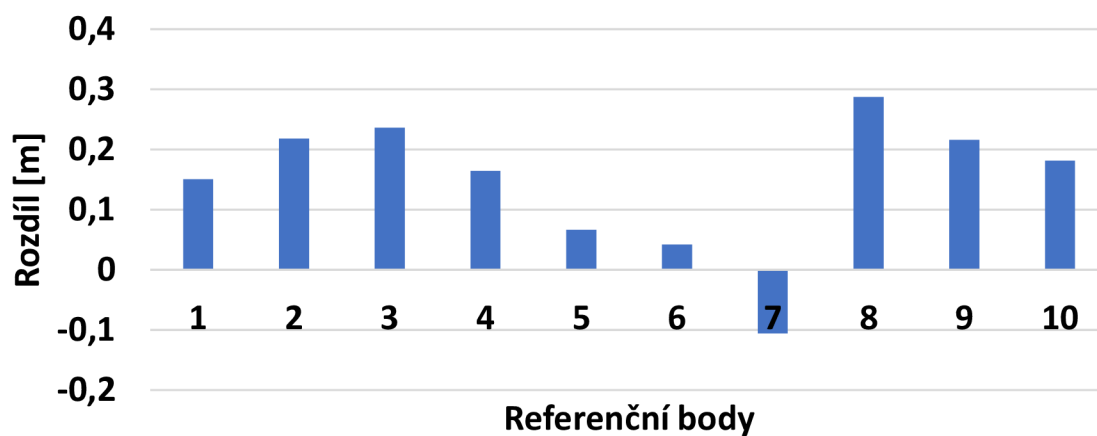
- Příloha 3 Poster



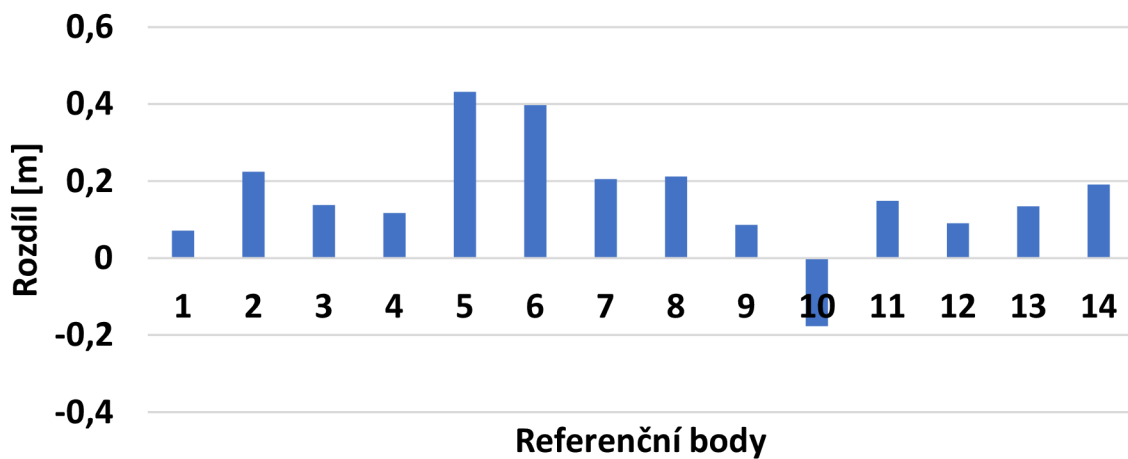
Graf 1 Rozdíl hodnot nadmořské výšky (Z) od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckým měřením (Z') z 1. 3.



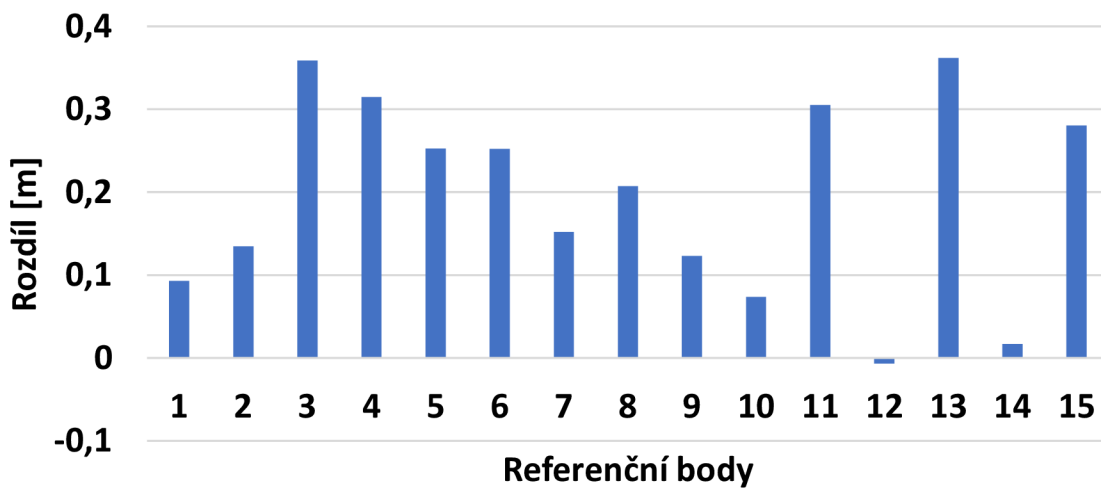
Graf 2 Rozdíl hodnot nadmořské výšky (Z) od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckým měřením (Z') z 16. 3.



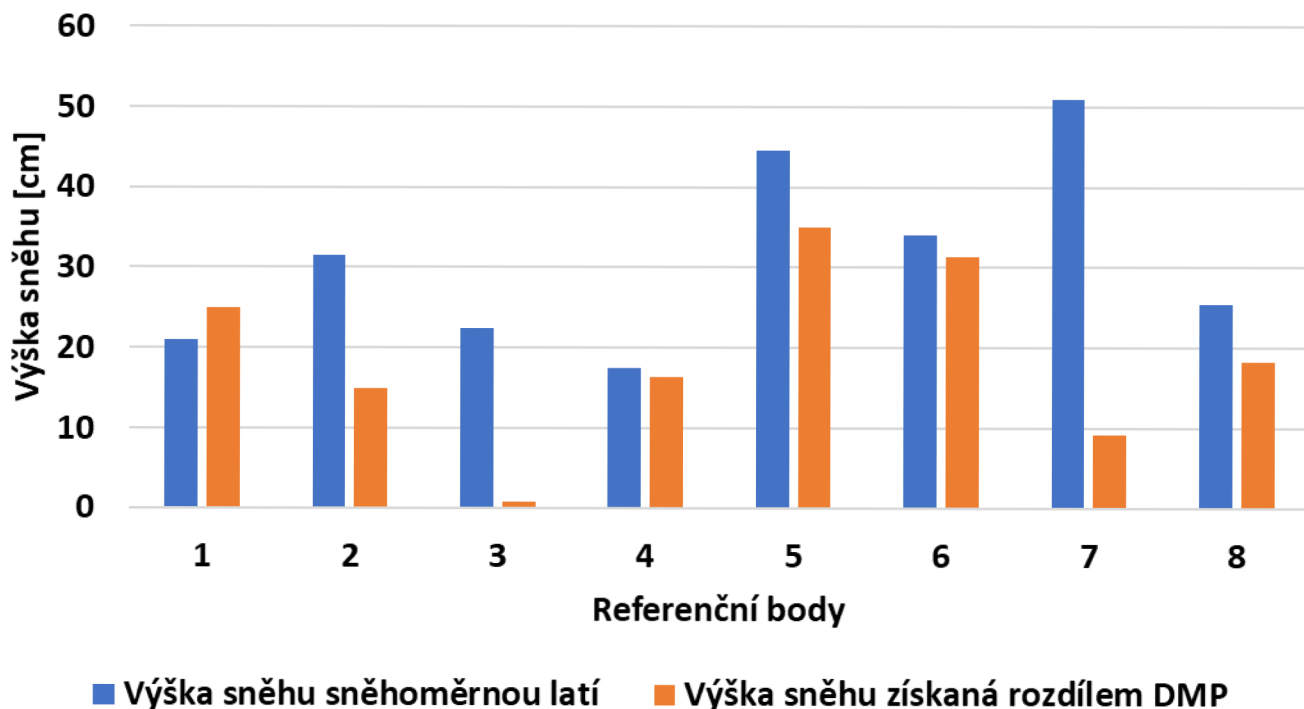
Graf 3 Rozdíl hodnot nadmořské výšky (Z) od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckým měřením (Z') z 6. 4.



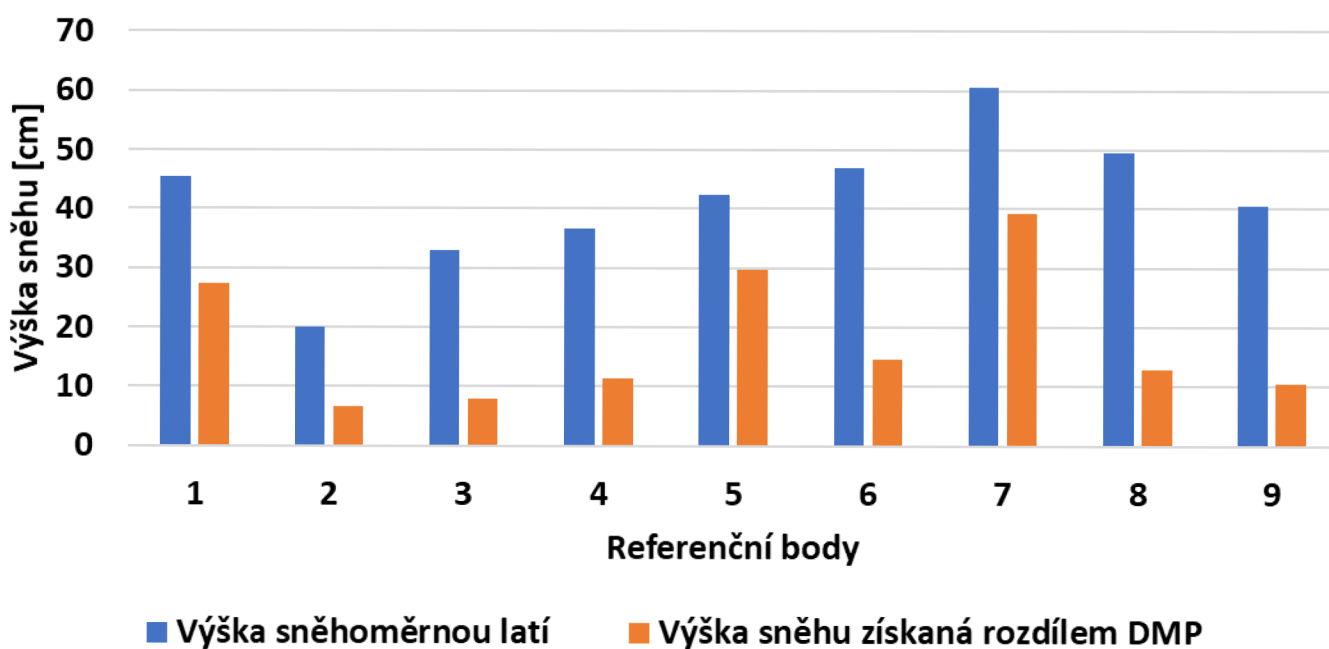
Graf 4 Rozdíl hodnot nadmořské výšky (Z) od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckým měřením (Z') z 10. 4.



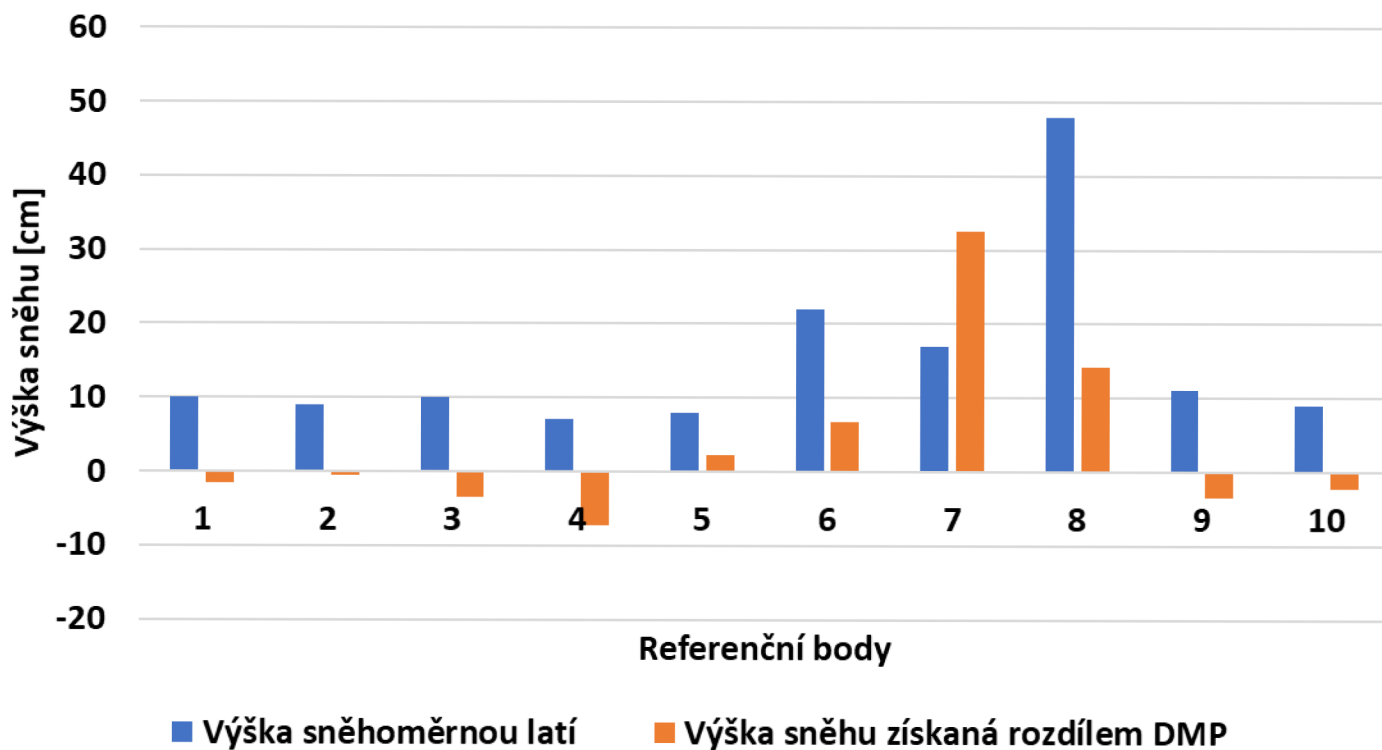
Graf 5 Rozdíl hodnot nadmořské výšky (Z) od které byla odečtena výška sněhu (h) a výšky sněhu získané leteckým měřením (Z') z 22. 4.



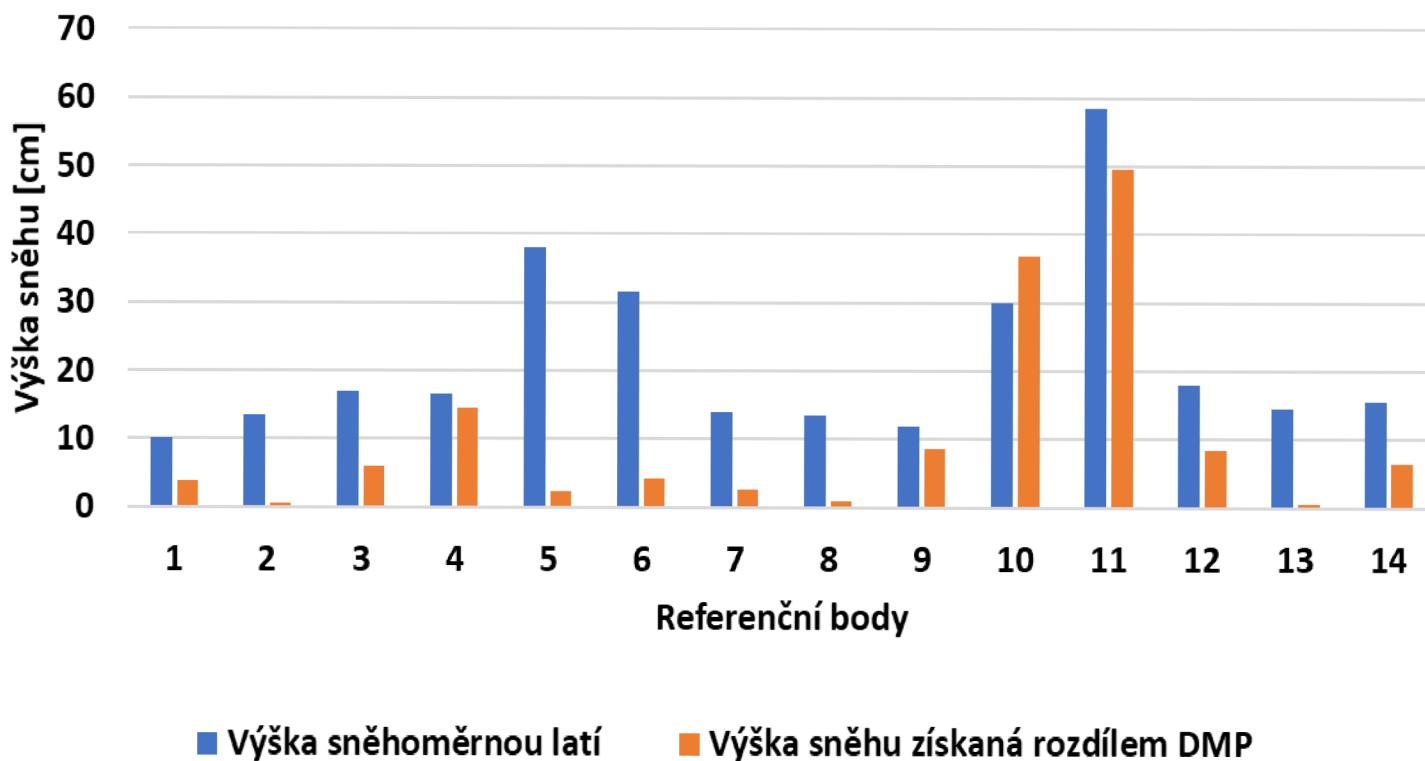
Graf 6 Rozdíl výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 1. 3.)



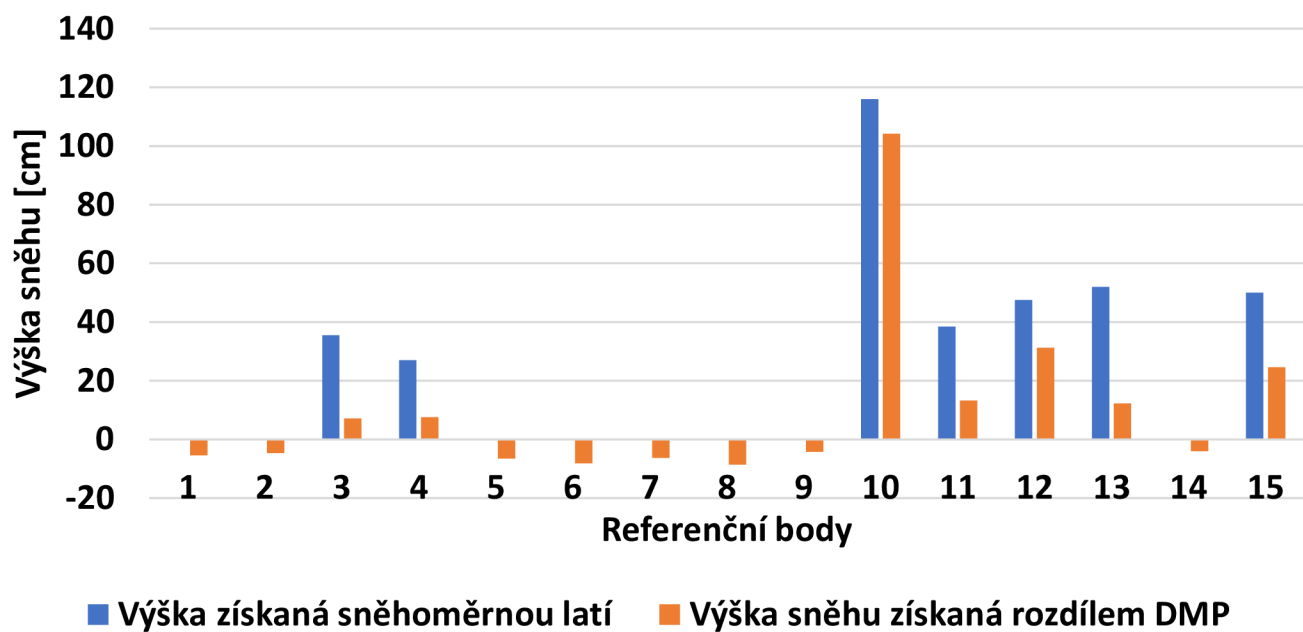
Graf 7 Rozdíl výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 16. 3.)



Graf 8 Rozdíl výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 6. 4.)



Graf 9 Rozdíl výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 10. 4.)



Graf 10 Rozdíl výšky DMP se sněhovou pokrývkou a DMP bez sněhové pokrývky v místech referenčních bodů (snímkování 22. 4.)

Číslo území	Max. výška sněhu [cm]	Min. výška sněhu [cm]
1	40,6	1,74
2	39,4	2,81
3	54,2	7
4	33,5	4,8
5	43,7	-14
6	45	1,7
7	33,6	-8
8	36,8	-19
9	136	59,8
10	143	-24,4
11	128	38,4
12	138,5	37,4

Tabulka 3 Maximální a minimální hodnoty výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích (1. 3.)

Číslo území	Max. výška sněhu [cm]	Min. výška sněhu [cm]
1	45,7	16,1
2	39,9	0,6
3	48,6	3,1
4	36,9	8,5
5	71,4	3,3
6	38	5,7
7	39,5	-2,6
8	45,7	-3
9	133	87,1
10	171	-5,3
11	179	0,91
12	172	88,7

Tabulka 4 Maximální a minimální hodnoty výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích (16. 3.)

Číslo území	Max. výška sněhu [cm]	Min. výška sněhu [cm]
1	2,6	-7,5
2	6,5	-8,1
3	4,2	-16
4	0,2	-7,1
5	22	-10,8
6	1,2	-8,5
7	1,8	-9,8
8	7,5	-21,1
9	106	-28
10	125	-20,1
11	116	-7,7
12	65,8	-13,2

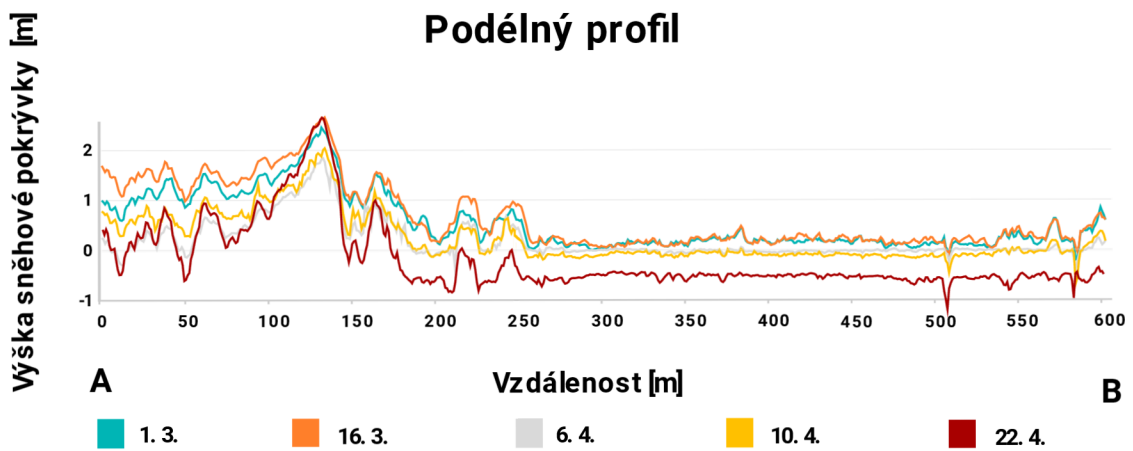
Tabulka 5 Maximální a minimální hodnoty výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích (6. 4.)

Číslo území	Max. výška sněhu [cm]	Min. výška sněhu [cm]
1	6,6	-8,5
2	12	-12
3	15,5	-6,5
4	8,6	-7
5	27,3	-9,7
6	14,3	-2,3
7	20	-6,8
8	6,1	-20
9	132	21,5
10	126	-25
11	127	3,2
12	131	21,8

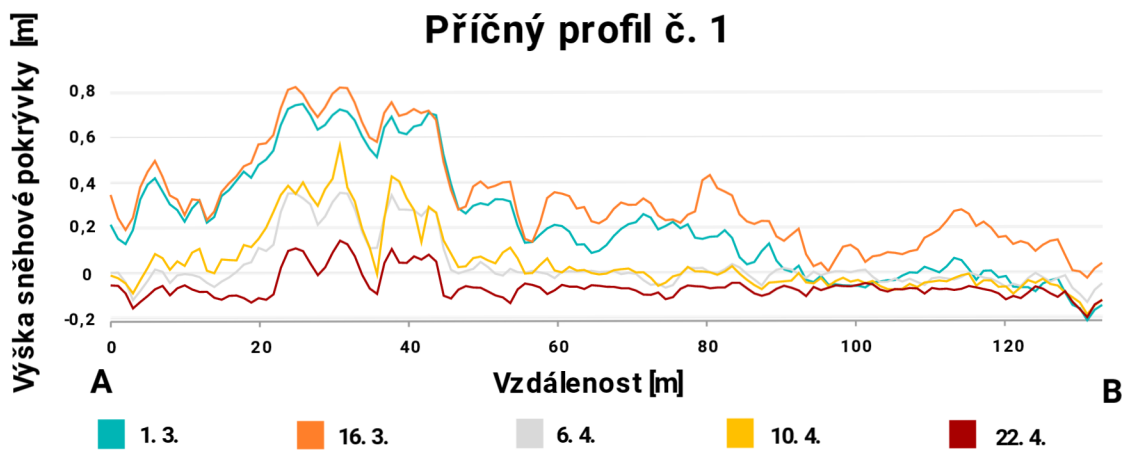
Tabulka 6 Maximální a minimální hodnoty výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích (10. 4.)

Číslo území	Max. výška sněhu [cm]	Min. výška sněhu [cm]
1	-2	-13,5
2	-1	-13,1
3	0,4	-20
4	-1,2	-7
5	-3	-16,7
6	-0,7	-8,6
7	0,1	-11
8	-2,5	-25,7
9	50,5	-0,8
10	75,8	-30
11	75,2	5
12	65	-11,8

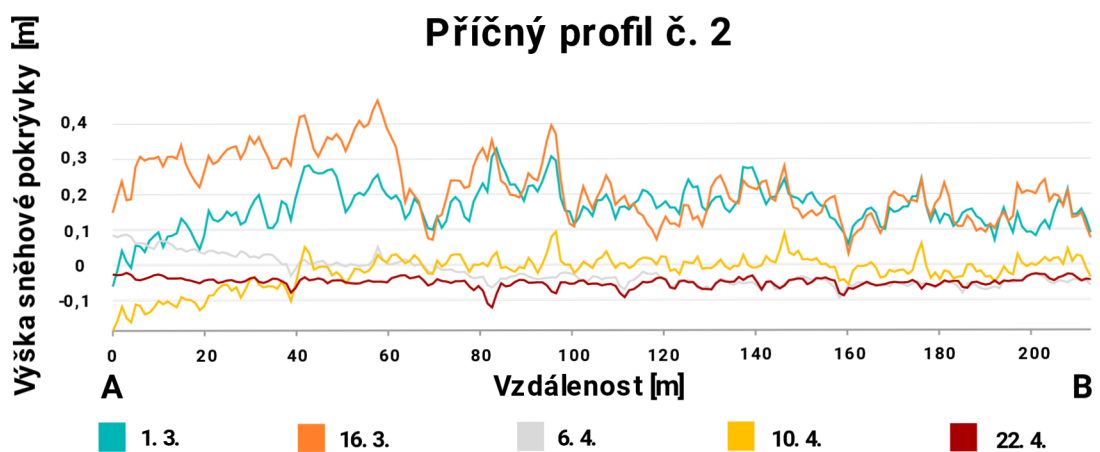
Tabulka 7 Maximální a minimální hodnoty výšky sněhové pokrývky ve vymezených územích (22. 4.)



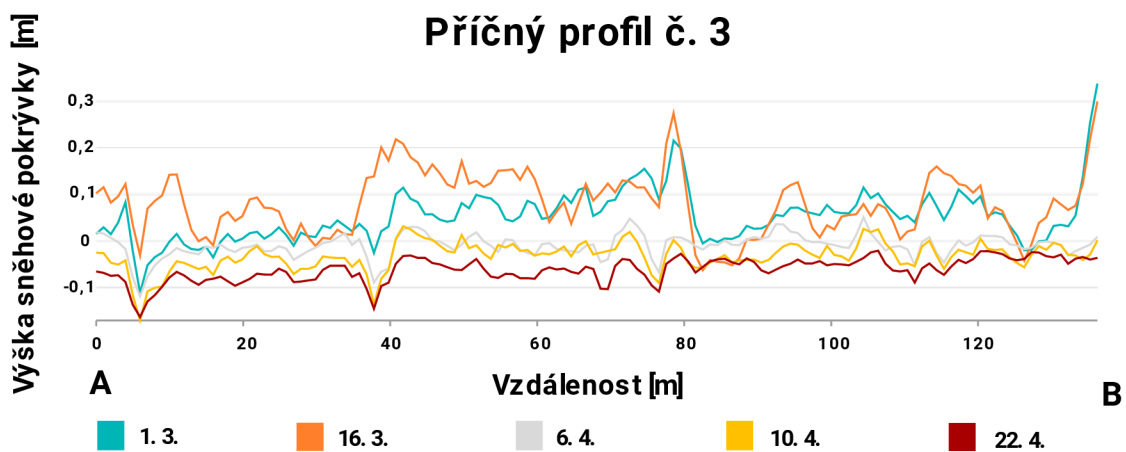
Graf 11 Výška sněhové pokrývky v podélném profilu



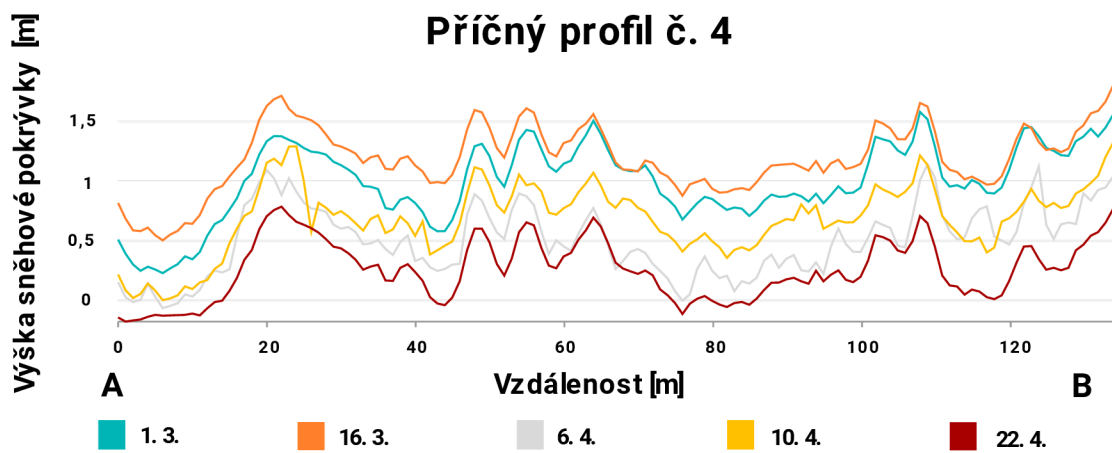
Graf 12 Výška sněhové pokrývky v příčném profilu č. 1



Graf 13 Výška sněhové pokrývky v příčném profilu č. 2



Graf 14 Výška sněhové pokrývky v příčném profilu č. 3



Graf 15 Výška sněhové pokrývky v příčném profilu č. 4