

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie



Kateřina Pecáková

3D MODELY SKALNÍCH STĚN Z RŮZNÝCH DAT A JEJICH POROVNÁNÍ

**3D MODELS OF ROCK WALLS FROM VARIOUS DATA AND THEIR
COMPARISON**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Filip Hartvich, Ph.D.

Praha 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne ??

.....

Kateřina Pecáková

Poděkování

Touto formou bych chtěla poděkovat vedoucímu mé práce RNDr. Filipovi Hartvichovi, Ph.D., za jeho čas, cenné připomínky, rady, propůjčení veškerého vybavení a za terénní práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům, kteří mi vyjadřovali podporu během studia a při psaní této práce.

Abstrakt

Tvorba digitálních modelů terénu, respektive povrchu je metoda, která se stává díky rozvoji technologií a možnostem zpracování velkých objemů dat, čím dál častěji využívanou. Metodou, která výrazně usnadňuje sběr dat je UAV mapování a následná tvorba digitálního modelu metodou structure from motion (SfM). Druhou využívanou metodou je Laserové skenování pomocí pozemního LiDARu (TLS). Zmíněné metody nachází své uplatnění zejména v oblasti geomorfologie a fyzické geografie.

Práce si klade za cíl vytvořit digitální modely z těchto metod, vzájemně je porovnat a zhodnotit. Zpracování probíhalo v prostředí programu Agisoft Metashape pro a CloudCompare. Dále byl zkoumán vliv využití georeferenčních bodů na kvalitu a přesnost modelů. Na závěr bylo provedeno porovnání jednotlivých metod z hlediska parametrů časových, cenových, flexibility dat, vlivu prostředí a další. Součástí práce bylo rovněž zkoumat možnosti podrobného digitálního modelu na získávání sekundárních informací, jako jsou sklony a směry strukturních ploch a puklin, využívané mimo jiné kvůli prevenci potenciálního skalního řícení. Výsledky práce naznačují, že využití UAV je pro geomorfologické úkazy vhodné, ne-li nejlepší možností s ohledem na rychlost, ekonomické hledisko a přesnost dat. Využití georeferenčních bodů sice zlepšuje výslednou kvalitu, ale pouze nepatrně, nicméně body jsou stěžejní, je-li potřeba modely dále interpretovat skrze morfometrické analýzy.

Klíčová slova: 3D model, skalní reliéf, skalní řícení, SfM, UAV, pozemní LiDAR

Abstract

The use of digital elevation models is becoming increasingly used as a scientific method, thanks to the advancement of technologies and public accessibility, particularly in the fields of geomorphology and physical geography. The use of UAV significantly facilitates data collection and subsequent creation of a digital model through the structure from motion (SfM) process. Another data collection method employed in the research is the laser scanning using terrestrial laser scanner (TLS).

The aim of the study is to create digital models using these methods and to compare them using the software environment of Agisoft Metashape and CloudCompare software. Additionally, it investigates the influence of georeferencing points on the quality and accuracy of the models. Furthermore, a comparison of the individual methods is conducted based on such parameters as time, costs, data flexibility, environmental impact, and others. The study also seeks to determine the influence of the digital model parameters on obtaining secondary information from the DEMs, such as slope azimuth and geometry of structural planes and joints, used for example in the research of the prevention of potential rockfalls. The results indicate that the use of UAVs is suitable, if not the best option, for geomorphological features in terms of speed, economic considerations, and data accuracy. Although the use of georeferencing points improves the resulting DEM quality slightly, they are crucial if further interpretation of the models through morphometric analyses is required.

Keywords: 3D model, rock relief, rockfall, SfM, UAV, TLS

Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých zkratek.....	8
1.Úvod.....	9
1.1. motivace a cíle práce.....	9
1.2. FG charakteristika zájmových lokalit.....	10
1.2.1. Lom V Doubí – Prosečnice.....	10
1.2.2. Údolí Svitávky.....	13
2.1. Vybrané typy skalního reliéfu a jeho dynamika (včetně skalních řícení – příčiny, průběh a následky).....	16
2.1.1. Skalní stěny.....	17
2.1.2. Svahové pohyby.....	17
2.2. Konstrukce DMR.....	21
2.2.1. Tvorba DMR pomocí LiDARu.....	23
2.2.2. Tvorba DMR metodou structure from motion.....	24
2.2.3. Další metoda tvorby DMR.....	26
2.2.4 Georeferencování terénních dat.....	27
3. Metodika.....	28
3.1 Terénní práce.....	28
3.1.1. Laserový skener (LiDAR).....	28
3.1.2. Bezpilotní letecký nosič (UAV).....	29
3.1.3. Terénní měření – lokalita pískovcová stěna v údolí Svitávky.....	30
3.1.4 Terénní měření lokalita – skalní stěna lomu V Doubí.....	31
3.2 Zpracování dat.....	32
3.2.1 Tvorba 3D modelu v Agisoft Metashape.....	32
3.3. Porovnání modelů v programu CloudCompare.....	35
3.3.1. Freeware CloudCompare.....	35
3.3.2. Porovnání modelů v CloudCompare.....	35

3.3.3. Registrování laserscanerových mračen v programu CloudCompare.....	36
3.4. Analýza strukturních ploch, trhlin.....	37
3.4.1. Plugin Compass 2.0.....	37
4. Výsledky.....	38
4.1 Vybrané nástroje pro porovnání digitálních modelů	38
4.1.1. RMSE (reprojekční chyba).....	38
4.1.2. Prostorové rozlišení a rozlišení digitálního výškového modelu.....	39
4.1.3. Rozdíly mezi obsahy povrchů v obdélníkovém výřezu.....	41
4.1.4. M3C2 (multiscale model to model cloud comparison)	43
4.2 Porovnání DMR pořízených pomocí LiDARu, UAV fotogrammetrie s GCP a UAV fotogrammetrie bez GCP.....	45
4.2.1 Obecné parametry.....	46
4.2.2. Časové rozpětí	47
4.2.3 Parametry prostředí	48
4.3. Analýza strukturních ploch, trhlin.....	48
5. Diskuse	50
6. Závěr.....	54
Seznam obrázků	55
Seznam tabulek.....	56
Seznam použité literatury:.....	57
Datové zdroje	60

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
ALS	Aerial Laser Sensor
ČÚZK	Český úřad zeměřický a katastrální
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DMP	Digitální Model Povrchu
DMR	Digitální Model Reliéfu
DPZ	Dálkový Průzkum Země
GCP	Ground Control Point
GIS	Geografický Informační Systém
GLONASS	GLObalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
IMU	Inertial Measurement Unit
IR	InfraRed light
LiDAR	Light Detection And Ranging
MLS	Mobile Laser Sensor
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Real Time Kinematics
SBAS	Satelite Based Augmentation System
SfM	Structure from Motion
sw	Software
TIN	Triangulated Irregular Network
TLS	Terrestrial Laser Scanner
UAV	Unmanned aerial vehicle

1. Úvod

1.1. motivace a cíle práce

Tvorba digitálních modelů v oblasti geomorfologie je čím dál využívanější metoda pro mapování geomorfologických prvků, například pro vyhodnocení rizika skalního řízení či sesuvů. Zejména kvůli ochraně majetku a životů je třeba porozumět příčinám a mechanismům skalních řízení, a dále je klíčové místa, kde hrozí riziko skalního řízení, monitorovat, aby se minimalizovalo potenciální nebezpečí. Jednou možností monitoringu je instalace tyčových dilatometrů na pukliny a sledovat, zdali dochází k expanzi. Další možností je tvorba digitálního modelu, která se stává čím dál více cenově dostupnější, a to hlavně díky rozvoji technologií pro sběr dat pořizovaných tzv. UAV neboli bezpilotních leteckých prostředků. UAV jsou nyní schopny pořizovat vysoce kvalitní fotografie, které mohou zabrat reliéf pod drobnohledem a docílit vysokého detailu. V porovnání s leteckými či družicovými snímky nejsou schopny zachytit tak velkou oblast, nicméně pro zmapování menších objektů nebo například pro zachycení změny v prostředí jsou vhodnou metodou. Tvorba digitálního modelu skrze UAV fotogrammetrii vyžaduje kvalitní hardware počítače a software schopný vytvořit ze snímků mračno bodů, metodou Structure from Motion. S metodou SfM se pojí využití georeferenčních kontrolních bodů, které jsou nezbytné pro přiřazení geografických souřadnic k digitálnímu modelu a také ho zpřesňují. Druhou hojně využívanou metodou tvorby digitálního modelu je Laserové skenování (LiDAR), která je schopná zaměřovat objekty pod vysokým detailem v řádu milimetrů i na delší vzdálenosti. LiDAR také není ovlivněn počasím a viditelnými podmínkami a je schopen zaměřit i vnitřní prostory, kam se prozatím UAV nedostane. Jeho nevýhodou je však cena a bodové mračno bez pravých barev.

Hlavními cíli této práce je vytvořit digitální modely a porovnat tyto dvě metody sběru dat z lokalit skalního řízení v oblasti údolí Svitávky a v lomu V Doubí v Hornopožárském lese. Interpretace získaných dat byla prováděna na základě hodnocení dílčích ukazatelů – kvalita modelu, flexibilita dat či časová náročnost. Pro vizualizaci a zpracování dat bude využit program Agisoft Metashape a pro následnou analýzu a porovnání sw CloudCompare. Dílčími cíli bude zvolit nejvhodnější postup pro přípravu dat, průběh práce a zpracování dat. Dalším cílem vyhodnotit význam georeferenčních kontrolních bodů (GCP) při konstrukci podrobného modelu skalní stěny. A v neposlední řadě je analýza sekundárních dat (strukturních ploch a puklin) na digitálním modelu.

1.2. FG charakteristika zájmových lokalit

1.2.1. Lom V Doubí – Prosečnice

Lom V Doubí se nachází v Hornopožárském lese, který spadá do geomorfologické soustavy Českomoravské subprovincie. Součástí provincie je geomorfologická oblast Středočeská pahorkatina, s geomorfologickým celkem Benešovská pahorkatina. Benešovská pahorkatina se rozkládá se na pravém břehu Vltavy a dolním levém břehu Sázavy s nadmořskými výškami 400–500 m n.m. Povrch pahorkatiny je mírně zvlněn, místy nad povrch vyčnívají tvrdoše, které jsou tvořeny z hornin metamorfovaného algonkia a paleozoika. Také jsou zde elevace v horninách českého plutonu např. v granidioritech. Odolné horniny jílovského pásma tvoří hřbety směru SV–JZ podél toku Vltavy (Demek a kol., 1965). Vrchovina má silně rozčleněný denudační povrch. Podcelkem Benešovské pahorkatiny je Dobříšská pahorkatina, která je dle Demka popsána „*Pro reliéf Dobříšské pahorkatiny je charakteristické uplatnění odolnějších hornin v podobě hřbetů a suků, zejména v oblasti metamorfovaných algonkických hornin a porfyrů*“ (1965). Na území se nacházejí také horniny jílovského pásma, granidiority prostoupeny porfyrovými žilami a sedimenty mlado třetihorního stáří, tj. šterky písky a jíly, významné pro sledování vývoje říční sítě. Okrskem na území lomu V Doubí je Kamenická vrchovina, který je charakterizována jako plochá vrchovina, tvořena převážně granodioritem požárského typu. Kamenické vrchovina je porušena příčným zlomem severozápadně-jihovýchodního směru (Demek a kol., 1965) Nejvyšší bodem v okrsku je Grybla 513 m n. m. Charakteristické pro lokalitu povrch velmi členitý a pahorkovitý se strmými svahy do hluboce zařízých údolí se spoustou drobných potůčků pramenišť, rašelinišť a studánek (Kordula, 2018).

Lom se nachází v geologické jednotce karbon-permských hlubinných vyvřelin na území moldanubika (ČGS, 2024). Z hornin jsou zde zastoupeny granodiority Požárského typu, tonality a křemenné diority sázavského typu. Z minerálů jsou to amfibol a biotit. Požárský granodiorit je světlý biotický, homogenní s vysokým obsahem křemenu. Rozpadá se v balvany oblých tvarů s hladkými plochami s ojedinělými výčnělky bazických uzavřenin. Tvoří zde mrazové sruby a kamenná moře (Čepek a Koutek, 1941).

Půdní substráty v Posázavském bioregionu mají deficitní množství CaCO_3 . Jsou zde nasycené a kyselé kambizemě, na sprašových hlínách, dále luvizemě typické až pseudoglejové, občas se vyskytují primární pseudogleje, gleje a slatiny. Na svazích se nacházejí rankery a litozemě. Na území lomu je kambizem dystrická (Culek a kol., 2013).

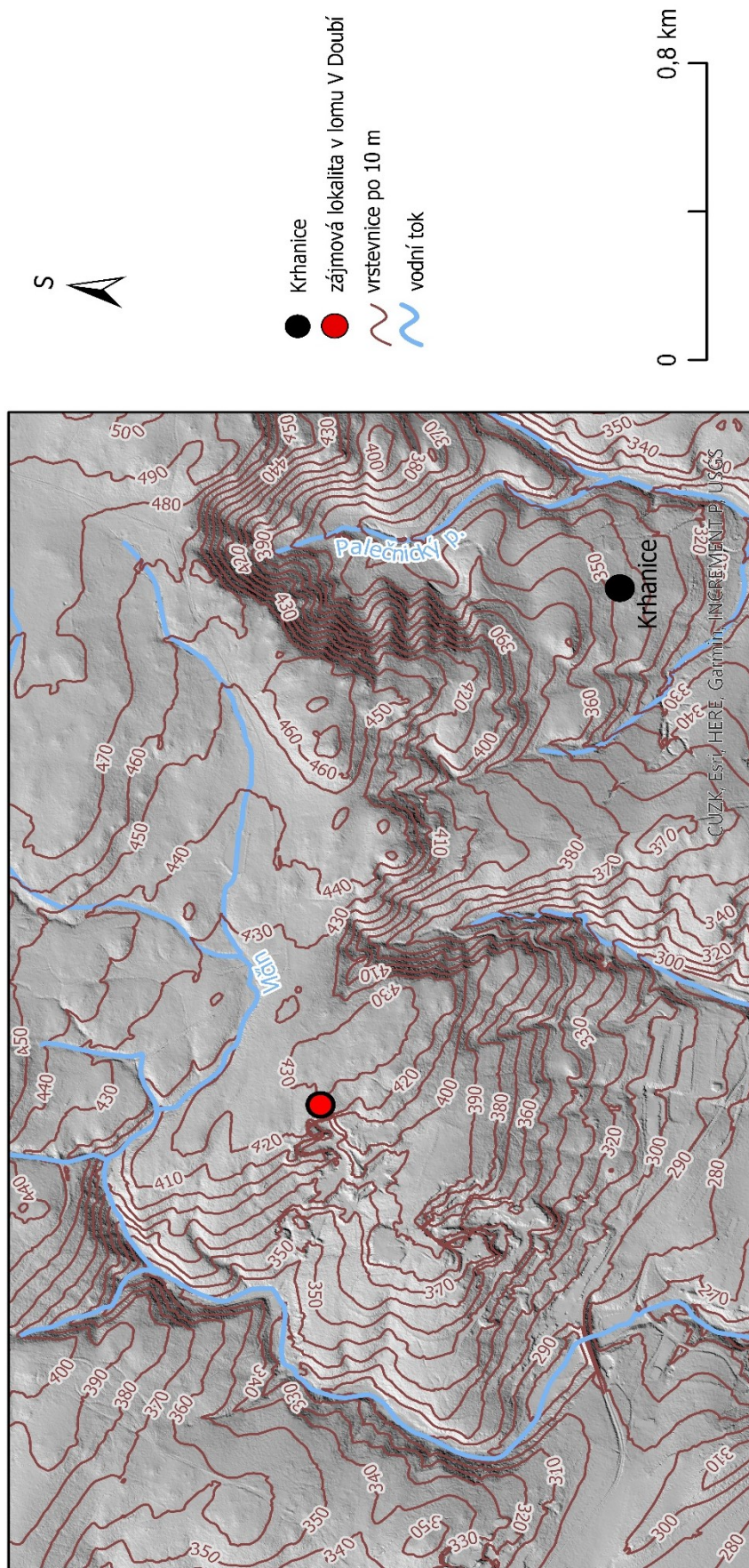
Biogeografická podprovincie dle Culka a kolektivu autorů (2013) je Hercynská. Součástí podprovincie je Posázavský bioregion. Podnebí v bioregionu je zde relativně teplé a vlhké, což je způsobeno tím, že je území na návětrném svahu Vysočiny. Nejteplejší částí je údolí Sázavy. Tato část spadá dle Quittovy klasifikace (1971) do nejteplejší mírně teplé MT 11., v bioregionu ale nejvíce

území spadá do mírně teplé oblasti MT 10, výše položená území se definují jako MT 9 a MT 7. Lom konkrétně spadá do MT 9, průměrná roční teplota vzduchu se pohybuje mezi 8 až 9 °C, průměrný roční úhrn srážek mírně převyšuje 600 mm (Quitt,1971). Zima je mírná s nestálou sněhovou pokrývkou a četnými inverzními situacemi. Podnebí má lokální výchyly, jako jsou teplé suché jižní svahy a teplotní inverze v údolí Sázavy.

Území je osídleno od neolitu, od středověku se poměr lesů a bezlesí prakticky nezměnil. Většina plochy Hornopožárského lesa je pokryta smíšenými lesy, které tvoří převážně smrky ztepilé, modřín opadavý, borovice lesní, dub, buk, olše a v novodobé snaze o porušení monokultury byly vysázeny jedle bělokoré. Během středověku se zde vysazovaly primárně smrky a borovice, to zejména kvůli těžbě dřeva, jež bylo potřeba k těžbě zlata v nedalekém dolu u Jílového u Prahy. Dnes je zde přírodní park kvůli přirozeným bučinám a jejich podrostům a lesním ekosystémům doubrav, které jsou pro toto území typické a původní. V lesním porostu jsou žokovité balvany žuly, tvořící různě velké skalky. Květena je zde rozmanitá, převládají zde druhy středoevropské a někde subatlantsky laděné, např. rozrazil horský a vzácně i druhy horské např. prha arnika. Z fauny jsou významní ježek východní, netopýr pestrý, výr velký, ještěrka zelená, zmije obecná, skokan štíhlý a mihule potoční (Culek, a kol. 2013). Celý Hornopožárský les je hojně využíván jako rekreační a turistická oblast, zejména pro trampy, houbaře a turisty. Název oblast dostala podle zámečku s myslivnou Horní požáry, který si nechal postavit František Ferdinand d'Este, aby mu sloužil jako výchozí bod pro jeho lov v okolních lesích. Arcivévoda v lesích také vybudoval několik vycházkových tras a velkou zahradu s tisem červeným. V oblasti se nachází přírodní památka Vlčí rokle s kamenným mořem, dále přírodní rezervace Grybla a žulové lomy Borovičko, Na Vrších a V Doubí (Hartvichová, Pišna, 2010)

V lomu V Doubí se těžila žula od 18. století do poloviny 20. let, žula zde vytěžená tvoří například podstavec sousoší sv. Václava na Václavském náměstí, a také pomník Františka Palackého na Palackého náměstí. Kámen se zde těžil blokovým způsobem, kdy se odstřeľovaly velké bloky horniny. Konec těžby způsobilo nalezení drolivého nekvalitního diabasového tufu tzv. Žabáka. V současnosti skalní stěny lomu využívány jako horolezecké stěny. Stěna, na níž proběhlo mapování slouží Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie Věd České republiky jako testovací skála.

Zájmová lokalita v lomu v Doubí



Obrázek 1 Mapa lokality v lomu V Doubí (zdroj: Digitální model reliéfu (GEOPORTÁL), vlastní zpracování)

1.2.2. Údolí Svitávky

Údolí Svitávky se nachází v subprovincii Česká tabule. Území se nachází na geomorfologickém celku Ralské pahorkatiny. Její součástí je podcelek Zákupská pahorkatina. Základním prvkem reliéfu Zákupské pahorkatiny je dle Balatky (Demek a kol.1965): „...*strukturní plošiny a četné čedičové a znělcové suky, výrazně porušené mrazovým větráním a obklopené pleistocenními sutěmi, které se nápadně zvedají o 200–300 m nad své okolí.*“ Nachází se zde výše položené plošiny ukloněny k J až JZ ve směru vodních toků, ty jsou považovány za zbytky preglaciální denudační úrovně, vytvořeny ve svrchním miocénu a dotvořeny mladší denudací a pliocenními a kvarténními tektonickými pohyby (Demek a kol. 1965). Do těchto úrovní se zařezávají relativně mělké údolní rýhy, často v charakteru mělkých kaňonů. Vyskytují se zde rovněž suché rokle se skalními městy. V pahorkatině se nacházejí glaciofluviální a glacienní sedimenty jako pozůstatek ledovce v době maximálního zalednění. Na území se též vyskytuje několik pánví, které vyplňují kvarténní usazeniny.

Geologická soustava pod mapovaným územím je Český masív, a regionem je česká křídlová pánev. Regionální jednotka je lužický vývoj a jizerský vývoj. Jednotka vznikla ukládáním mořských sedimentů ve svrchní křídě v turonu středním až svrchním. Vespuď jsou sedimenty jezerní a brakické ve vyšších sedimentačních vrstvách jsou sedimenty mořské. Ve středních vrstvách podloží jsou významnou součástí jílovce a slínovce někdy i vápence. Během mořské regrese, tj. ve vyšších vrstvách sedimentů, vznikají a převládají pískovce. Souvrství je jizerské o mocnosti 90 m a uklánějí se 2° k severozápadu. Na území se nachází tzv. Lasvická kra, což lichoběžníková kra, která je na jihovýchodě omezena velickým zlomem, v jeho průběhu se vyskytují soubory puklin a drobné zlomy v obou směrech. V dolní části odhalených pískovců převažují jednozrnné prachové sedimenty ve vyšších vrstvách se pak vyskytuje hrubozrnný, šikmo zvrstvený pískovec. Lasvická kra vytváří pískovcovou kuestu, do které je zahlobeno údolí Svitávky. Ve předu kuesty se nacházejí věže a pískovcové stěny o výšce až 20 m. Na území se také nacházejí příčně členitými strmými údolními. (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010)

Území se nachází v Ralském bioregionu. Bioregion charakterizován málo členitou pískovcovou tabulí s podmáčenými sníženinami a neovulkanickými kužely, které mohou mít podobu výrazných skalních útvarů jako je Ralsko nebo Lysá hora. Nachází se zde také terciérní čedičové vyvěřeliny, dlouhé žíly a výplně přírodních kanálů. Má nejpestřejší bioty ze všech českých bioregionů pískovců, a to díky různým kvalitám pískovců a střídání mokřadních a suchých stanovišť. Potenciální vegetace je složena z borových doubrav, rašelinišť, olšin a květnatých bučin na neovulkanitech, místy se skládá z dubohabrových hájů na málo vyskytujících se spraších. V současné době na území převažují rozsáhlé kulturní bory, dále rašeliniště, vlhké louky a velké rybníky jezerního typu (Máchovo jezero), jež byly vytvořeny ve středověku z močálů a mělkých nádrží. (Culek a kol., 2013)

Na území se podle Quittovy klasifikace nacházejí klimatické oblasti MT 9 na většině území Ralského bioregionu, na severu MT 7 a místa s nejvyšší nadmořskou výškou mají polohu MT 4. Podle aktuálnějších dat klimatických poměrů Květoně a Voženilka (2011) se většina území nachází v kategorii T2, jež je definována jako „*Jaro je poměrně krátké, teplé až mírně teplé, léto je teplé dlouhé a suché, podzim je poměrně krátký, teplý až mírně teplý, zima je krátká, suchá až velmi suchá, s krátkým trváním sněhové pokrývky*“ (Quitt, 1971). T2 se vyznačuje 50–60 letními dny v roce, 160–170 dní s průměrnou teplotou 10 °C, 100–110 a 30–40 mrazových a ledových dní. Průměrná teplota v lednu činí -2 až -3 °C a v červenci 18–19 °C. Součet celoročního srážkového úhrnu za vegetační období a zimní období je 550–700 mm.

Půdy jsou zde humoso-železité arenické podzoly. Na křídových zvětralinách se nacházejí primární pseudogleje a pseudoglejové luvizemě. Na vápenatých pískovcích jsou chudé půdy ohrožené podzolizací. Na čedičových kuzelech jsou eutrofní kambizemě a rankery. Na podmáčených nížinách se nacházejí organozemě typu slatin a rašelin (Culek a kol., 2013)

Území bylo trvale osídleno až ve vrcholném středověku. Po roce 1945 se ze střední části Ralského bioregionu vytvořil vojenský prostor, tím byla oblast ponechána přirozenému vývoji. Polovina území je zalesněna. Na pískovcích se nacházejí kulturní bory, reliktní bory se nacházejí pouze na skalách. Na rašeliništích se nacházejí přirozené rašelinné bory. Dále se na území nacházejí bučiny a suťové lesy. Na odlesněném území jsou pole, louky a větší rybníky (Neuhäuslová a kol. 1997). U Stráže pod Ralskem se dříve chemicky těžil uran.

V oblastech regionu s minimálním lidským zásahem se vyskytuje významné množství vzácného ptactva jako např. skřivan lesní, a endemické květeny jako je tučnice obecná česká, prstnatec český a apomiktický jeřáb (Culek a kol., 2013)

Na okrajích bioregionu se nachází CHKO České středohoří a CHKO Lužické hory.

Pekelské doly, v nichž se nachází mapované říční, byly v minulosti nazývány jako Lindavské kostely (někdy uváděny jako Pusté), v nichž se nachází rozsáhlé podzemní prostory a chodby. První zmínky jsou již ze 14. a 15. století a název pochází z domněnky, že zde žili středověcí mniši. Je to v současnosti největší uměle vytvořené podzemí v Evropě o přibližné rozloze 3500 m². Jeskyně původně sloužily jako mlýny, hamr, skladiště, brusírny skla, koncem 2. sv. války se zde vyráběla letecká děla, díky tomu jsou jeskyně vybetonovány. Po válce byla do 80. let 20. století využívána jako sklad zeleniny, v současnosti je zde motorkářská hospoda „Pekelské doly“. V 18. století, za vlády hraběte Kinského, vznikl u Lindavských kostelů náhon přehrazením Svitávky. Náhon vedl vodu ke dvou zrcadlárnám a prochází tunelem skrz pískovcovou skálu k jezu. Na boční stěně tunelu vznikla umělá prostorná jeskyně, pravděpodobně kvůli těžbě písku (světlého šedého jemnozrnného pískovce), který se využíval jako brusný materiál pro sklářskou výrobu (Adamovič, Mikuláš, Cílek, 2010). Prostor ústí širokým portálem do údolí Svitávky. Právě zde se na jaře roku 2020 zřítíl vstupní portál.

Šupina se oddělila od skály, z důvodu srážek a nasycením vodou. a přehradila vstup do jeskyně. Řízení také ohrozilo komunikaci, která vede kolem Svitávky před vstupem do jeskyně (ČGS, 2023). Během roku 2021 zde proběhla sanace skalní stěny, odklid zříceného materiálu a zasypání předstupu do jeskyně pískem. Nyní je stupeň aktivity řízení stabilizovaný a pozastavený.

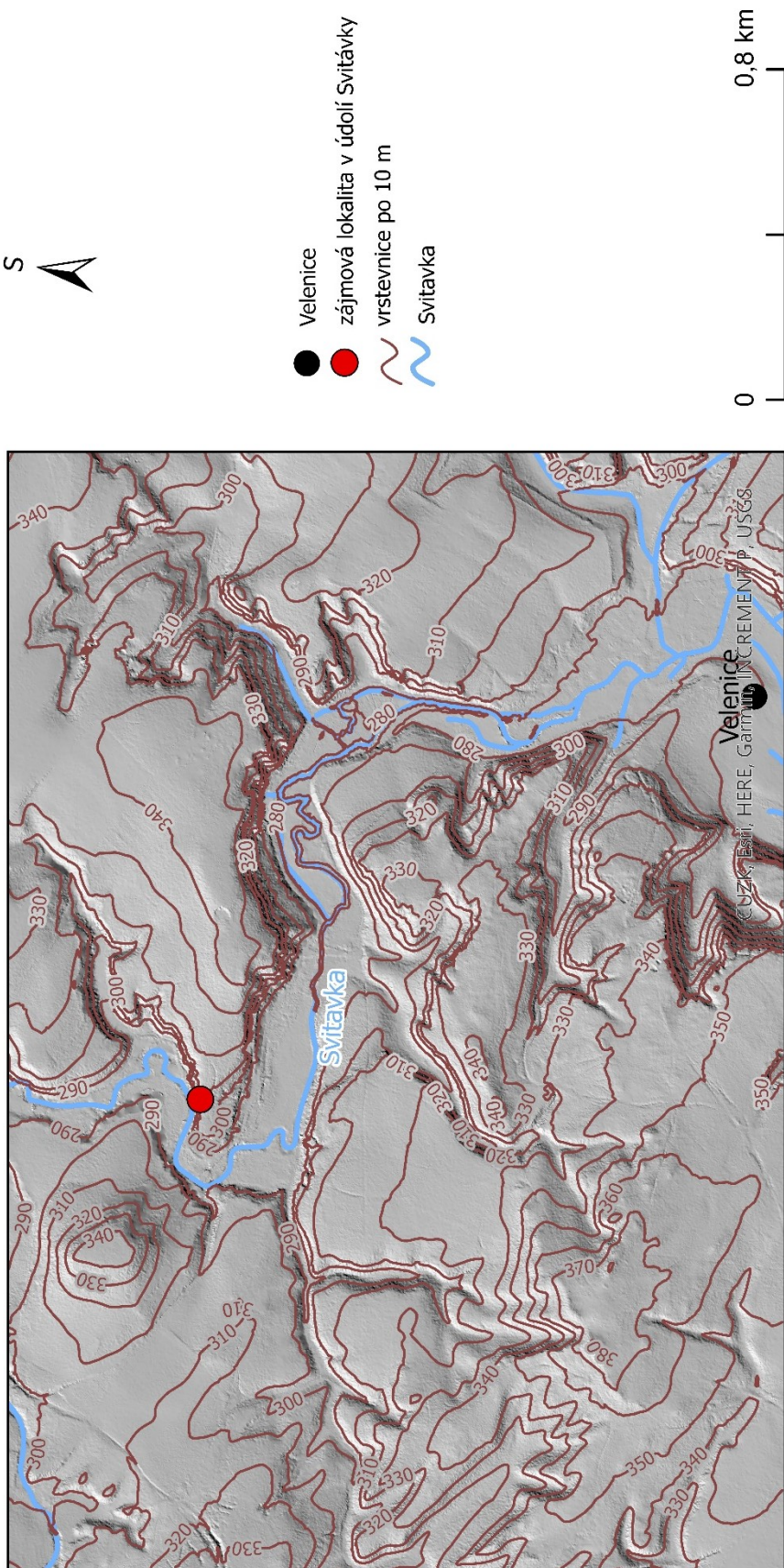


Obrázek 2 pískovcová stěna po úklidu skalního řízení v údolí Svitávky



Obrázek 3 ukotvená skalní šupina pomocí hřebů v údolí Svitávky

Zájmová lokalita v údolí Svitávky



Obrázek 4 Mapa lokality v údolí Svitávky (zdroj: Digitální model reliéfu (GEOPORTAL), vlastní zpracování)

2.1. Vybrané typy skalního reliéfu a jeho dynamika (včetně skalních řícení – příčiny, průběh a následky)

2.1.1. Skalní stěny

Rubín a Balatka (1986) ve své publikaci definují skalní stěnu jako „*Subvertikální nebo příkře ukloněná skalní plocha z obnažené kompaktní horniny. Může být založena buď strukturně tektonicky (na puklinách, trhlinách, vyzdvižených vrstevních plochách, čelech vrstev, na exfoliačních klenbách aj.) nebo vnějšími reliéfovými procesy (erozí, zvětráváním).*“. Sklon skalních stěn (více než 55°) se rovná stavu rovnováhy mezi exogenními procesy a vnitřními vlastnostmi horniny (Culek, 2015). Při narušení stability faktory chemického a mechanického zvětrávání, jako je například činnost srážkové vody a ledu, dochází k uvolňování a řícení horninových částí a bloků. Stěna díky těmto procesům snižuje svou strmost, stěna ustupuje a pata stěny je překryta suťovým pláštěm. Skalní stěny se vyskytují zejména v oblastech, kde převládá mechanické zvětrávání, tj. velehory, subpolární, aridní a semiaridní oblasti. V České republice se nacházejí zejména v pískovcích a vápencích (Rubín a Balatka, 1986). Skalní stěny rovněž vznikají uměle, například při těžbě stavebního kamene. Tento typ lomové stěny se nachází na zkoumané lokalitě v lomu V Doubí.

2.1.2. Svahové pohyby

Němčok, Pašek a Rybář (1974) definují svahové pohyby jako „*Svahové pohyby sdružují všechny gravitační pohyby horninových hmot na svazích, s výjimkou těch, kde materiál odnášejí transportační média (voda, led, sníh, vítr). Ve vývoji přírodních svahů se gravitační pohyb a transport mísí.*“. Autoři dále definují čtyři základní skupiny svahových pohybů

1. **Ploužení** (angl. creep) – neboli pomalé tečení hmoty. Jedná se o pohyb s dlouhým časovým intervalem, který zpravidla nezvyšuje rychlost pohybu hmoty a stěží se odděluje hranice proudu a pevného podloží. Ploužením zrychlením přechází do sesuvného pohybu, stékání nebo řícení. Jinými slovy je ploužení přípravnou fází pro další rychlejší svahové pohyby. Ploužení lze dále dělit na podpovrchové, kam patří rozvolňování svahů vznikem puklin u okrajů svahu a dna erozního údolí, nebo otevřením tahových trhlin v jeho horní části. Dále gravitační vrásnění, které může způsobit deformaci vysokých horských svahů a jejich následné roztrhání stupňovitými poklesy svahů, shrnování hmoty u okrajů pánví a vytlačování mělkých hornin na dně údolí. A třetí podpovrchový pohyb je vytlačování mělkých hornin ze dna údolí. Mezi povrchové ploužení pak patří slézání suti a svahových hlín, ohýbání, hákování a vyvlečení vrstev a plošná soliflukce (Němčok, Pašek, Rybář, 1974 a Fussgänger, 1986).

2. **Sesouvání** (angl. sliding) je pohyb relativně rychlý, s krátkým časovým intervalem v řádu (m/den až m/s), kdy horninové hmoty na svahu klouzají podél jedné či více průběžných smykových ploch (Němčok, Pašek, Rybář, 1974 a Müllerová a kol., 2017). Část hmoty se přesune na původní terén v tzv. předpolí. Jedná se o nejčastější typ svahových deformací. Obvykle se hmota sesouvá podle smykových ploch, a to podél rovinné, rotační a podél složené smykové plochy. Výsledné svahové deformace jsou tedy např. rotační sesuvy, planární sesuvy ve skalních horninách, skalní sjíždění a laterální sesuvy (Němčok, Pašek, Rybář, 1974 a Fussgänger, 1986).
3. **Stékání** je rychlý pohyb horninových hmot během krátkého časového intervalu, které mají viskózní strukturu. Část hmoty vytéká z tzv. odlučné jámy a přemístí se po svahu na poměrně velkou vzdálenost. Výsledná svahová deformace je proud. Pokud je v proudu více vody nežli hmoty, dále již nepatří mezi svahový pohyb. Stékání se děje zpravidla za přítomnosti vody v jílovitých, hlinitých a hlinitopísčitých zeminách při přívalových vodách, v období tání a nadměrných srážek. Stékání lze probíhat i bez příměsi vody, a to v úlomkových horninách. Výsledné svahové deformace u stékání jsou: zemní, bahnité, soliflukční proudy, kamenité, hlinitokamenité, hlinité, bahnité přívalové proudy a mury. (Němčok, Pašek, Rybář, 1974, Fussgänger, 1986 a Malgot, Klepsatel, Trávníček, 1992).
4. **Řícení** je katastrofický, náhlý, rychlý, krátkodobý pohyb hornin na strmých svazích, během kterého ztrácí horniny kontakt s podložím. Řícené horniny (výrazně rozvolněné) padají volným pádem, současně s ostatními druhy pohybů. Ostatní sesuvné pohyby nastávají před řícením (ploužení, až sesouvání) i po řícení (sesuvy, stékání). Mezi říctivé pohyby patří sesypávání, opadávání úlomků, odvalové řícení a planární řícení. Výsledné tvary řícení jsou např. opadové kužely, haldy, osypy, kamenná moře, skalní řícení, odvaly, sesutí... (Němčok, Pašek, Rybář, 1974 a Müllerová a kol., 2017).

Druhé dělení svahových pohybů popisuje Záruba a Mencl (1969) ve své publikaci podle faktorů, které mohou způsobit svahovou deformaci:

1. **Změna sklonu svahu, způsobená přirozeně;** podemletím paty svahu vodní tokem, tektonickým pohybem, poklesem či zdvihem a uměle; podkopáním paty svahu. Změna sklonu má za následek změnu napětí ve smyku a v horninách a narušení rovnováhy.
2. **Přetížení násypy.** Tím, že se haldami či skládkami zatěžuje horní hrana svahu, může vést opět ke zhoršení stability (Müllerová a kol. 2019).
3. **Otřesy a vibrace.** Zemětřesení, výbuchy trhavin či otřesy strojů vedou k dočasnému narušení napětí v horninách, což přispívá k nestabilitě svahu. V případě spraší a nezpevněných písků dochází k narušení soudržnosti. U jemného mokrého písku a písčitých jílu se otřesy pootočí zrna a dochází k jejich zkapalnění.

4. **Změny obsahu vody.** Vliv atmosférických srážek má velký podíl na svahových procesech. Dešťová voda a tající sníh se dostává do puklin, čím způsobuje vzrůstající tlak vody v hmotě, tím klesá soudržnost a vzniká tření. Často vznikají sesuvy právě v době silných intenzivních srážkových období. Druhý spouštěč může být rychlá změna hladiny vody, například u umělých vodních nádrží.
5. **Působení podzemní vody.** Pokud podzemní voda proudí, způsobuje nestabilitu svahu. Proud vody také může vyplavit tmel, čímž zmenší soudržnost horniny. Napjatá hladina vody působí jako vztlak. Sníží či zvýší se hladina, vyvolává to nestabilitu ve vyšších vrstvách
6. **Působení mrazu.** Led má větší objem, čímž se zvětšuje a vytváří nové trhliny. To může způsobit rozpukání a ulomení horniny při rozmrzání ledu.
7. **Mechanické a chemické zvětrávání horniny.**
8. **Změna ve vegetačním porostu.** Kořeny stromů udržují stabilitu svahu, dopomáhají také k vysoušení svahům díky čerpání podzemní vody. Odlesnění může způsobit vznik svahových pohybů.

Třetí klasifikaci autoři Záruba a Mencl (1969) vytvořili podle charakteru postižených hornin.

- A. **Svahové pohyby pokryvných útvarů** (svahových hlín, sutí) působením povětrnostních podmínek jsou slézání sutí (zároveň i hákování vrstev, plošné povrchové sesuvy, proudové sesuvy, mury a vyplavování písků).
- B. **Sesuvy na nezpevněných nebo částečně zpevněných horninách** (jílech, slínech, jílovcích, jílovitých břidlicích). Zde vznikají svahové pohyby podél rotačních smykových ploch, také po starých smykových plochách a vytlačováním měkkých hornin v podloží.
- C. **Svahové pohyby pevných skalních hornin.** Horniny se mohou pohybovat podle předurčených smykových ploch, tj. vrstevnatosti, puklinách, břidličnatosti. U horských skal se mohou objevovat dlouhodobé svahové deformace a skalní řícení.
- D. Mezi zvláštní případy svahových pohybů patří **soliflukce a quickclays**, tj. pohyby citlivých jílů.

Sesuvy lze dle autorů Záruba a Mencl (1969) a Němčok, Pašek, Rybář (1974) dále rozdělit na aktivní a stabilizované nebo jako současné, dočasně uklidněné a fosilní sesuvy.

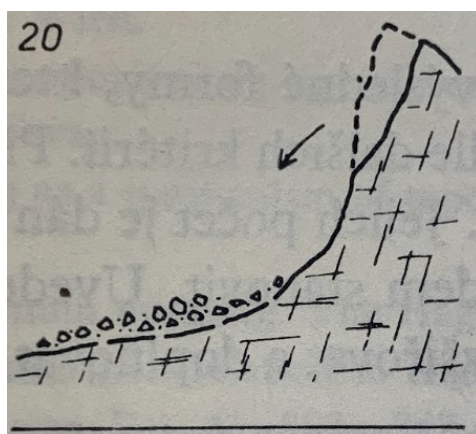
2.1.3.1. Skalní řícení

Skalním řícením se označují říťivé pohyby (s převládajícím volným pádem) uvolněných bloků nebo vrstev hornin na strmých skalních stěnách a u stropů jeskyň. Rozměry skalního řícení mohou být od malých úlomků přes padání jednotlivých kamenů až po řícení celých skalních komplexů (Müllerová a kol. 2019).

Mezi faktory vzniku patří zemská gravitace, rozpukání a strukturní tektonické porušení hornin, větrné podmínky, zvětšující se objem zamrzlé vody v puklinách, hydrostatický tlak vody, zvětrávání mechanické či chemické, ale i tlak kořenů či pád stromu. Příčinou jsou také antropogenní vlivy, jako je povrchová těžba horniny, během níž může vzniknout krátkodobá nestabilita těžební stěny. Dále řízení u starých lomů, které nesplňují nové bezpečnostní normy, umělé zatížení okraje skály a podkopávání strmých skalních svahů se vznikem převisů či antropogenní znečištění srážek. A přirozené vlivy jako zemětřesení či zasažení skály bleskem, vulkanismus, povodně, zkrasovatění (Záruba a Mencl, 1969). Důsledkem řízení může být například přehrazení vodního toku. Řízení může omezit územní plán, zemědělskou činnost, těžbu a hospodářské využití lesa. Ohrožit může také lesní porost, lidské životy, kulturní a historické památky, technologie, infrastrukturu, soukromý a státní majetek (ČGS, 2023).

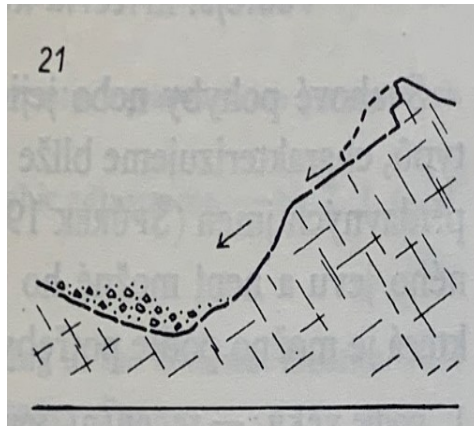
Typy skalního řízení jsou popsány v publikacích Němčoka, Paška a Rybáře (1974) a Malgota Klepsatele a Trávníčka (1992) :

1. Odvalové řízení je přemístění skalních stěn volným pádem zejména v horských a vysokohorských oblastech. Nejdříve dochází k pozvolnému oddělování jednotlivých bloků nebo jednotlivých částí skalního masívu, podél puklin a systému tektonických ploch, poté dojde k uvolnění bloku a volnému pádu, ten bývá doprovázen tlakovou vlnou a hlasitým ořesem. Po dopadu se oddělené bloky dále valí do údolí, obvykle mnohonásobnou rychlostí, než byl samotný pád. Velikostně může mít na délku 10 m až kilometry a výškové 1 m až stovky metrů a pohybovat se rychlostí až 100 km/hod.



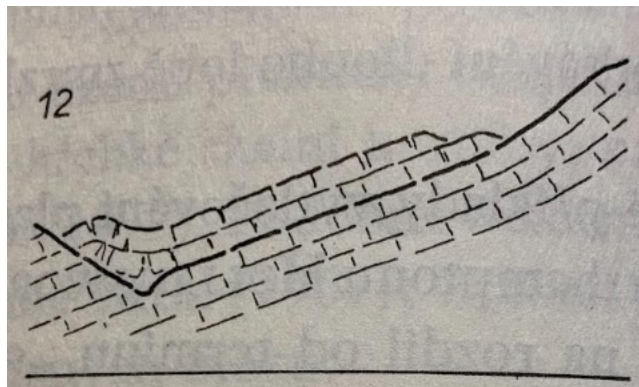
Obrázek 5 odvalové řízení (zdroj: Němčok, Pašek, Rybář, 1974)

2. Planární řízení. Při něm se kombinuje kluzný pohyb s předurčenou plochou skluzu a volným pádem. Obvykle se vyskytuje v horských oblastech. Velikostně má na délku 10 m až kilometry, výškově 1 m až stovky metrů a pohybovat se rychlostí až 100 km/hod.



Obrázek 6 planární řízení (zdroj: Němčok, Pašek, Rybář, 1974)

3. Skalní sesuvy jsou sesouvání podél rovinné smykové plochy. Přičemž fáze sesouvání je delší než fáze volného pádu. Smykové vrstvy, po nichž se sesouvají horniny jsou vrstevní plochy, břidličnaté vrstvy nebo o tektonické zlomové plochy.



Obrázek 7 skalní sesuvy (zdroj: Němčok, Pašek, Rybář, 1974)

2.2. Konstrukce DMR

Digitální modelování terénu je proces, při němž se vytváří matematická reprezentace reálného reliéfu, obvykle jde o reliéf Země (též Georeliéf). Digitální model reliéfu (DMR) je zjednodušený, schematizovaný model reálného povrchu, který lze využít pro nejrůznější morfometrické analýzy (Moore, Grayson, Ladson 1991).

Digitální model reliéfu bývá nejčastěji zkonstruován jako bodové mračno (point cloud), lomený 3D povrch (TIN) anebo rastr, tvořený čtvercovými poli. Kromě toho se ještě rozlišuje digitální model povrch (DMP), který zachycuje nejvýše položené body hmotných sfér (povrch vegetace, budov, hladina vody apod.) (Li, Zhu, Gold 2004). Dle definice portálu VÚGTK (2016): „DMR představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemské povrchu v digitálním tvaru ve formě

výšek diskrétních bodů v nepravidelné síti (TIN) bodů o souřadnicích X,Y,H.“ Sběr dat pro konstrukci DMR/DMP lze provádět mnoha způsoby, zejména:

- 1) Pozemní geodézie: geodetické měření, tedy zjišťování souřadnic bodů manuálně, skrze polygonální tachymetrická měření. Dnes také TLS (pozemní LiDAR) (Kycl, Hartvich, eds., 2021)
- 2) Pozemní / UAV fotogrammetrie: využití metody Structure from motion (SfM) (Kycl, Hartvich, eds., 2021)
- 3) GNSS měření: měřeno přímo v každém bodě pomocí geodetického GNSS přístroje, případně s RTK korekcemi. Pracný a časově náročný způsob (Liao, Zhou, Yang 2021)
- 4) Letecká fotogrammetrie: Dříve stereoskopie leteckých snímků, fotogrammetrickou metodou a skrze laserové skenování.
- 5) Metody dálkového průzkumu Země (DPZ): využití družic s nejrůznějšími typy senzorů (radar, viditelné světlo, IR, ...)

Druhý typ dělení, který zmiňují ve svých publikacích Bayer a Klimánek (Bayer,2016; Klimánek, 2006), je dle použitého algoritmu pro tvorbu modelu.

- 1) Vrstevnice: Tvorba modelu pomocí výpočtu vrstevnic skrze interpolaci (průběh vrstevnic se vytváří z množin výškových bodů se známými souřadnicemi X,Y,Z). Lineární interpolační algoritmus, pracuje s konstantní vzdáleností (spádem) dvou interpolovaných vrstevnic, zpravidla ale nekoreluje s realitou modelu. Naopak nelineární interpolační algoritmus se snaží vystihnout opravdové tvary terénu. Nepracuje s konstantním rozestupem vrstevnic, ale s jejich plynulou změnou spádu. Algoritmus využívá kvadratické, nebo kubické interpolace.
- 2) Polyedrické modely terénu (TIN). Model se skládá ze sítě trojúhelníkových ploch, jež se vytvářejí triangulací. Jednotlivým trojúhelníkem je prokládána rovina, která přimyká k terénu. Triangulační algoritmus by měl produkovat trojúhelníky, co nejpodobnějším rovnostranným, aby síť byla co nejvíce totožná s měřeným povrchem. Model by též měl zachovat hranice objektů či prvky terénu (hřbetnice, údolnice). Nejčastější metoda je Delaunay triangulace, která maximálně zvětšuje nejmenší vnitřní úhel vytvořených trojúhelníků, čím vytváří pravidelnější síť (Bayer, 2016 a Li, Zhu, Gold 2004). Při tvorbě triangulační sítě z fotografií se využívá fotogrammetrická triangulace. Zahrnuje matematické protínání sbíhajících přímek v prostoru pro výpočet trojrozměrných souřadnic bodu. Algoritmus počítá s polohou fotoaparátu a orientací snímku, toho je dosaženo díky procesu resekce. Ta také umožňuje měřit více bodů najednou bez omezení počtu (Karagiannis, Antón Castro, Mioc 2016).
- 3) Rastrové modely terénu. Jedná se o model vytvořen z pravidelné mřížky ze souřadnic X,Y. Výškové souřadnice Z jsou hodnoty buněk (pixelů) samotného rastru. Rastrový model pracuje s pravidelnými maticemi uzlových bodů, které jsou snadno dopočitatelné, lze tedy

kompresovat data (zmenšovat jejich velikost). Tento model je problematický, pokud je reliéf s významnou diferenciací (vysoké hory s velkými jezery), tehdy je obtížné zvolit vhodnou hustotu rastru, aby nebyl datově objemný nebo naopak nedostatečný pro další analýzu. Rastrové modely využívají metody inverzních vzdáleností, metody přirozených sousedů, kriging a metody splinové funkce (Bayer, 2016 a Li, Zhu, Gold 2004).

- 4) Plátování rozděluje povrch na nepravidelné a křivé plochy, které mají trojúhelníkový tvar nebo čtyřúhelníkový tvar a jejich hranice vedou po singularitách (Bayer, 2016).

Mezi aktuálně nejvíce využívané technologie sběru dat pro tvorbu DMR pro získání vysoce kvalitních a přesných digitálních modelů skal a skalních stěn patří TLS (terrestrial laser scanner, tedy pozemní laserový skener nebo pozemní LiDAR) a metoda Structure-from-Motion (SfM), fotogrammetrická technika, která využívá stereoskopického efektu pro konstrukci 3D modelu (Liao, Zhou, Yang 2021). Tyto metody jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

Pro účely sběru dat do této práce bylo využito pozemního LiDARu a SfM zpracování snímků z UAV, a to zejména proto, že pro tvorbu modelů strmého až svislého reliéfu skalních stěn jde o nejvhodnější metody, protože umožňují zaměřit senzor kolmo na mapovaný povrch. Rovněž by bylo možné využít metod pozemní geodézie, ale jednak by bylo měření na skále obtížně realizovatelné, jednak by nemělo dostatečné rozlišení.

2.2.1. Tvorba DMR pomocí LiDARu

LiDAR, z angl. Light Detection And Ranging, představuje aktivní metodu dálkového měření vzdáleností využívající laserového záření. Princip fungování spočívá v tom, že LiDAR emituje krátké pulzní laserové paprsky směrem k pozorovaným objektům (Peterková 2016 a McManamon 2019). Po dopadu na povrch se část záření absorbuje a část je odražena zpět ke skeneru. Zde je pomocí detektoru zaznamenán čas, který uplynul mezi vysláním paprsku a přijetím odraženého signálu. Alternativou je měření fáze přijatého signálu. Pro výpočet vzdálenosti je klíčový časový interval mezi emisí paprsku a příjmem odraženého záření. Relativní souřadnice bodu jsou pak vypočítány z této vzdálenosti a ze známého horizontálního, svislého a vertikálního úhlu, pod kterými byl paprsek vyslán. Frekvence světelného záření se pohybuje obvykle ve spektru viditelného až blízkého infračerveného záření (Peterková 2016; McManamon, 2019). McManamon (2019) dále doplňuje, že každý aparát (skener) s LiDAREm disponuje těmito základními komponenty; laserem, který vysílá světelný paprsek z aparátu umožňující přesnou rotaci emitoru v horizontální a vertikální rovině a senzorem, který detekuje čas a charakteristiky odraženého paprsku z objektu. Nejčastěji využívanými senzory jsou rozdělovač paprsku a dírkované zrcadlo. Dále LiDARový skener může disponovat aparaturou GNSS pro znalost okamžité polohy, (IMU) inerciální měřicí jednotkou, pro měření vnější orientace a velmi přesnými hodinami.

Skenery lze dělit také podle principu měření; prvním typem jsou skenery pulsní, u kterých laser vyšle světelný paprsek a během toho senzor zaznamená polohu skeneru, čas vyslání světelného paprsku, orientaci v prostoru a úhel pod kterým byl vyslán. Detektor dále zaznamená čas příchodu odrazů a jejich intenzitu. Druhým typem jsou fázové skenery, které využívají fázový posun signálu, který je modulován harmonickou vlnou. Výpočet vzdálenosti je složen z fázového rozdílu mezi vyslanou a přijatou vlnou (Mikita, 2014). V této práci bude využit skener pulsní.

Liao a.kol. (2021) dále doplňuje, že je LiDARový senzor je možné připevnit na jakékoliv pohyblivé nosiče, ať už na pilotem řízená letadla či na bezpilotní létající zařízení (UAV), nebo jiné nosiče např. batohy, automobily (MLS). Stacionární LiDAR jako například pozemní laserový skener (anglicky Terrestrial Laser Scanner, dále jen TLS). Právě TLS bude v této práci využito.

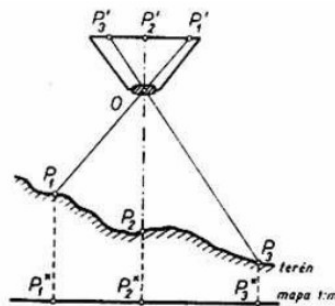
Výstupními daty z LiDARu jsou bodová mračna (point cloud), což jsou body, které mají tři prostorové souřadnice. Pokud je ve skeneru instalována kamera, jsou tyto body zobrazeny pravých barvách. Během zpracování dat je nutné data očistit od šumu, který vzniká divergencí svazku laserových paprsků (průnik paprsků skrze např. vegetaci způsobuje vícenásobný odraz). Dalším krokem je registrace neboli spojování jednotlivých záběrů skeneru pomocí identifikace identických bodů nebo použitím algoritmů na základě vzájemného překryvu. Poté je možná georeference dat (Moore, Grayson, Ladson 1991). Zpracování a vizualizace dat získaných pomocí TLS je prováděno ve specializovaných softwarech, jde například o freeware CloudCompare, nebo placený software Agisoft Metashape (Yan a kol. 2022; Agisoft, 2020). Digitální model z LiDARových dat nachází uplatnění při tvorbě modelů zalesněných oblastí, kdy je na rozdíl od UAV snímkování, laserový paprsek schopen proniknout skrze vegetaci. DMR vytvořený z TLS dat může rovněž dosáhnout velmi vysoké přesnosti (v řádu jednotek až desítek mm) (Yan a kol., 2022).

2.2.2. Tvorba DMR metodou structure from motion

Structure from motion (dále jen SfM) je fotogrammetrická metoda, která využívá pro tvorbu digitálního modelu výpočty založené na identifikaci shodných bodů na fotografiích pořízených s různou pozicí fotoaparátu.

Principem fotogrammetrické metody je centrální projekce (fotografický snímek), jejíž střed promítání je střed objektivu (na obrázku 6. vyznačeno jako O) Paprsky (fotogrammetrický svazek paprsků) značeny jako P vedou přímočaře od jednotlivých bodů na objektu skrze střed promítání a zobrazují se na snímku. Tvar fotogrammetrického svazku paprsku je definován prvky vnitřní orientace snímku. Prvky vnitřní orientace jsou vlastnosti objektivu kamery, jako je ohnisková vzdálenost, která udává vzdálenost mezi středem objektivu a obrazovou rovinou, dále hlavní bod, což je pata kolmice paprsku, který prochází středním promítáním a obrazovou rovinou. Třetím prvkem je distorze kamery, která ukazuje, jak velké je zkreslení prvku na snímku, čím dále se nachází od středu snímku. Obrazová

vzdálenost je totožná s ohniskovou vzdáleností objektivu. Polohu fotogrammetrického svazku určují prvky vnější orientace. Prvky vnější orientace určují reálné souřadnice snímku. Jsou to souřadnice středu optického systému X_0, Y_0, Z_0 a tři úhly které určují polohu osy záběru vůči souřadnicovým osám, tedy jaký má směr, jaký má sklon a jaké pootočení snímku, viz obrázek 1. Z jednoho snímku lze získat pouze jednu dvourozměrnou informaci. Pro tvorbu trojrozměrné informace a výpočtu prostorových souřadnic je třeba vícero snímků z různých úhlů a s překryvy snímků neboli stereofotogrammetrickou metodu (Böhm 2002). V kombinaci stereofotogrammetrické metody s průsekovou fotogrammetrií vzniká metoda SfM.



Obrázek 8 centrální projekce (zdroj: Böhm, 2002)

Pro tvorbu trojrozměrné informace je využívána metoda SfM. Brook (2017) ji popisuje jako metodu, při níž se vytváří digitální model terénu pomocí vzájemně se překrývajících snímků, pořízených z různých perspektiv způsobených pohybem nosiče. Osy záběru nemusí být konvergentní ani rovnoběžné. K SfM fotogrammetrii je nutné pořídit 3 a více snímků, pro jeden digitální model.

SfM fotogrammetrie se dle článku Eltner a Sofia (2020) využívá v geomorfologii díky následujícím čtyřem parametrům: prostorová přesnost a časová frekvence, nízké náklady a rychlost a snadná manipulace.

Nosičem pro fotoaparát může být jakékoliv pohyblivé zařízení (Brook 2017). Pro menší objekt je možné využít fotoaparát a vyfotografovat ho z každého úhlu, aby byla nasnímána celá vnější plocha objektu. V dnešní době existují aplikace jako je například Polycam 3D scanner nebo Qlone 3D scanner. Pro větší objekty či celé krajiny se pak využívají družice, letecké snímky a v poslední době stále častěji bezpilotní létající prostředky (unmanned aerial vehicle), dále v textu jako UAV nebo dron (Budiharto a kol. 2021).

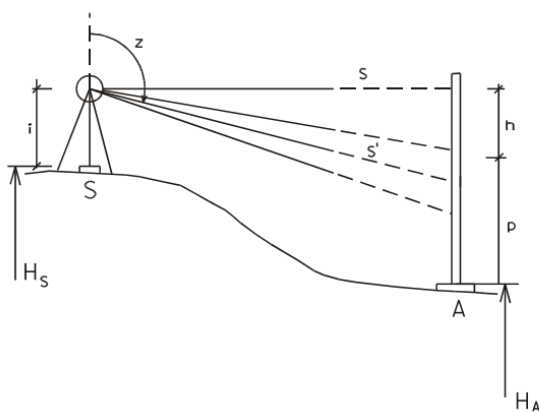
V přesnosti a možnosti nejmenšího pixelu vynikají jako nosiče právě drony, protože snímají cílový objekt z velmi malé vzdálenosti. Výhodami dronů je i to, že jsou cenově poměrně dostupné, mohou vzlétnout odkudkoliv, jsou personálně nenáročné, relativně lehké, snadno přenosné, a díky snadné ovladatelnosti a bezpečnostním sensorům mohou létat v blízkosti špatně přístupných terénů jako jsou skály, aktivní vulkány, strmé útesy, nebo v lesním porostu (Mohsan a kol. 2022).

Snímky získané pomocí UAV by měly pokrýt celou oblast s dostatečným překryvem, přičemž by mělo být zajištěno, že každý bod je pokryt alespoň z 60 % ve směru letu a z 30 % ve směru kolmém k letové dráze. V případě, že je terén pokryt hustou vegetací, je vhodné provést snímání v období vegetačního klidu, kdy jsou překážky minimalizovány. Zejména v terénech s různorodým reliéfem je doporučeno získat data z různých výšek a pod různými úhly, aby byla zajištěna co nejpřesnější a úplná reprezentace terénu. (Miřijovský, 2013).

2.2.3. Další metoda tvorby DMR

2.2.3.1. Tachymetrie

Tachymetrie je geodetická metoda, při níž se současně měří polohopis a výškopis terénu, pomocí tachymetru, nebo totální stanice (Vondrák, 2004). Tachymetr je teodolit, který je vybaven svislým kruhem a dálkoměrnými ryskami. Jedna ze starších až historických metod je nitková tachymetrie s nivelační latí. Při níž se odečítávají vzdálenosti pomocí dálkoměrných rysek na nivelační lati a následně se dopočítávají úhly a výšky (Hánek a kol. 2021). Změřené body slouží k tvorbě trojúhelníkové sítě a z ní se dále dají interpolovat vrstevnice. Souřadnice jednotlivých bodů jsou vypočteny z polárních souřadnic, relativních vůči stanovisku, jejichž parametry jsou vodorovný úhel, svislý úhel a vzdálenost měřeného bodu.



Obrázek 9 schéma tachymetrické záměry (zdroj: Vondrák, 2004)

V současnosti se častěji používá digitální tachymetr neboli totální stanice, která výrazně urychluje práci a zpřesňuje měření. Totální stanice měří vzdálenost pomocí laserového paprsku. V totální stanici se zaměří požadovaný bod a rovnou se dopočítá relativní, popřípadě zeměpisná souřadnice daného bodu. Totální stanice je stále využívána při měření stavebních parcel, kde je na malé vzdálenosti potřeba velká přesnost (Váchová 2023). Je však možné s ní zaměřit i skalní útvary. Tachymetrie v této práci nebyla využita z následujících důvodů: časová náročnost měření jednotlivých bodů, omezený dosah laserového paprsku tachymetru, a náročný terén nevhodný k měření tachymetrem.

2.2.4 Georeferencování terénních dat

Georeferencování je proces přiřazení geografických souřadnic k souboru prostorových dat, mapovému obrazu či digitálnímu modelu, což umožňuje jejich umístění v prostoru a zobrazení (Hackeloeer a kol. 2014). Ke georeferencování modelu není třeba znát veškeré souřadnice všech bodů, ale v závislosti na území je potřeba zaměřit pouze několik bodů (minimálně však 3). Tyto body se nazývají georeferenční kontrolní body (ground control points, dále jako GCP) nebo také vlíčovací body, se známými souřadnicemi X, Y a Z (Villanueva, Blanco 2019).

K jejich zaměření se využívá GNSS přijímač (Global Navigation Satellite System), který zachycuje signál ze satelitního systému. Těch je v současné době v provozu již několik (GPS, GLONASS, Galileo a Beidou). Tyto satelitní systémy se skládají ze satelitů na střední orbitě Země, ve vzdálenosti přibližně 20 000 km od povrchu Země, s inklinací 55° a periodou průměrnou 12 hodin. Nejpodstatnější součástí satelitů jsou atomové hodiny, které určují přesný čas. Pozice objektu se totiž určuje podle času, který uplynul od vyslání po přijetí signálu. Pro určení přesné pozice bodu je potřeba zachycení signálu z minimálně 4 satelitů (Rao a kol, 2012, Kycl, Hartvich eds, 2021).

Pro vylepšení přesnosti polohy jsou k GNSS systému přidány další metody. SBAS (satellite based augmentation system), který dodává sekundární informace o pozici satelitů, posuvu času atomových hodin a o aktuálním stavu ionosféry. pomocí geostacionárních satelitů. Druhá metoda pro zpřesnění je DGNS, což je síť pozemních stanic, u kterých je známá jejich přesná poloha. Informace o poloze slouží k porovnání se změřenou hodnotou ze satelitů a se známou referenční hodnotou (Kaplan, Hegarty 2017). Vzniklá hodnota slouží jako korekce, která se následně posílá dalším přijímačům. Dalším nástrojem je Real time kinematics (RTK), ten funguje na principu dvou GPS přijímačů, jednoho se známými souřadnicemi (základny) a druhého na měření místě (rover). Rover přijímá signály od satelitů a zároveň přijímá signál s korekcemi od základny. Touto metodou se opravují chyby signálu ze satelitů a zlepšuje se přesnost určování souřadnic na cm až mm (Naciri, Bisnath 2023). GNSS přijímač je tedy výpočetní jednotka, která dokáže vyhodnotit signál z antény a z něj dopočítat pozici na mm až cm, kde se přijímač nachází. (Kaplan, Hegarty 2017, Naciri, Bisnath 2023)

Pro identifikaci GCP (Ground Control Points) na snímcích se používají různé typy značek. Často se jedná o černobílé terčíky nebo šachovnicové vzory, nicméně lze využít jakoukoli značku, která kontrastuje s okolím. Možné je zaměřit i hrany a rohy objektů nebo křižovatky silnic. GCP nejsou pouze klíčové pro georeferencování digitálního modelu, ale slouží také k jeho zpřesnění zejména je při tvorbě modelu metodou SfM. Užití GCP při metodě SfM umožňuje lépe registrovat snímky a vylepšit polohy jednotlivých bodů bodového mračka. (Hackeloeer a kol. 2014). Znalost geografických souřadnic u digitálních modelů také usnadňuje další geografickou analýzu a práci v GIS.

3. Metodika

Kapitola metodika je rozdělena na čtyři podkapitoly; práce v terénu s UAV, s georeferenčními body a s LiDARem na lokalitách lomové stěny lomu V Doubí a na pískovcové stěně v údolí Svitávky. Dále je v kapitole uveden postup pro zpracování snímků z UAV v prostředí sw Agisoft Metashape a postup pro registraci mračen a modelů. Popisuje také georeferencování modelu pomocí georeferenčních bodů a zpracování bodových mračen z LiDARu v sw CloudCompare. Čtvrtá podkapitola obsahuje pracovní postup s nástrojem Compass 2.0 pro analýzy strukturních ploch.

3.1 Terénní práce

V průběhu terénní části bakalářské práce byly zaměřeny dvě lokality; skalní stěna v lomu V Doubí a pískovcová stěna v údolí Svitávky. Byly využity tři postupy sběru dat, konkrétně laserové skenování (LiDAR) pozemním laser skenerem (TLS), UAV mapování pomocí dronu a UAV mapování s využitím georeferenčních bodů (GCP). Pro laserové skenování byl využit LiDAR Optech ILRIS 3D6 a pro UAV mapování kvadrokoptéra DJI Phantom 4 pro.

3.1.1. Laserový skener (LiDAR)

Laserový skener Optech ILRIS 3D6 je přenosný zaměřovací a zobrazovací systém s dosahem laserového paprsku až na 3 kilometry. Má vysoké úhlové rozlišení s přesností na 4 mm na 100 m. Opakující se pulzující frekvence skeneru je 10000 Hz. Laserová vlnová délka je 1064 nm. Výdrž baterie až 5 hodin, váží 14 kg. Celkem 6 laserových měření laser skenerem ILRIS 3D z 20. 2. 2024 má následující parametry popsány v tabulce 1.

Tabulka 1 parametry měření laserovým skenerem na lokalitě údolí Svitávky .

Měření	Počet vyslaných paprsků (number of shots)	Průměrná vzdálenost LiDARu	Počet bodů / 1 mm na ose x a y
Svitávka A	1692552	16,32 m	2,30
Svitávka B	3006675	24,12 m	1,56
Svitávka C	2340836	18,91 m	1,98
Svitávka D	1874112	16,69 m	2,26
Svitávka E	1936290	18,63 m	2,03
Svitávka F	1871736	24,54 m	1,54

Laserový skener se nejprve na trojnožce vyrovná, následně se namíří na zájmovou oblast. Následně provede zkušební sken, z něhož vypočítá vzdálenost. Podle ní se následně zvolí velikost horizontálního a vertikálního kroku, tedy *x spot spacing* a *y spot spacing*. Což představuje rozstup bodů, který vyjádřen počtem bodů na milimetr (viz tabulka 1 – počet bodů na 1 mm na ose x a y). Poté vyšle příslušný počet paprsků a následně uloží mračno bodů jako formát .xyz.

3.1.2. Bezpilotní letecký nosič (UAV)

Dron využitý pro terénní mapování byla kvadrokoptéra DJI Phantom 4 PRO, konstruována ze slitin titanu a hořčíku s maximální dosahem 7000 m od ovladače, s maximální výškou vzletu 500 m a s maximální rychlostí až 72 km/h. Rozlišení fotografií je 20 megapixelů, kamera má mechanickou uzávěrku a pole záběru 84°. Baterie dronu vydrží až 30 minut letu. Kvadrokoptéra je schopna se vyhýbat překážkám ve 4 směrech a také je vybavena dvojicí kompasů a IMU jednotek.

V současnosti v České republice platí, že je povinné drony nad 250 g s kamerou nebo jiným senzorem schopným zachycovat osobní údaje registrovat a přiřadit jim registrační číslo pro identifikaci dronu. Dále je pro pilotování dronu nutné složit online zkoušku z teoretických znalostí. Na území Česka platí omezení letu dronů v okolí letišť a v ochranných pásmech (zvláště chráněná území, vojenské újezdy, obce elektrárny a jiné...). O povolení k letu je třeba žádat pouze, pokud by měl let probíhat v těchto oblastech neboli tzv. zeměpisných zónách. (Úřad pro civilní letectví, 2020). Mapované lokality se nacházejí mimo chráněná území a mimo osídlenou oblast a proto nebylo nutné žádat o povolení k letu.

Parametry kamery dronu z měření v údolí Svitávky jsou popsány v následující tabulce 2.

Tabulka 2 parametry kamery dronu v údolí Svitávky .

Parametry	31.03.2021	20.02.2024
model kamery	FC6310	FC6310
f (ohnisková vzdálenost kamery)	8,8 mm	8,8 mm
rozlišení	5473 x 3078	1920 x 1080
velikost pixelu	2,53 x 2,53 um	7,2 x 7,2 um
celkem snímků	243	219
průměrná výška letu	8,49 m	11,5 m
celková rozloha	929 m ²	966 m ²

Parametry kamery dronu z měření na lokalitě v lomu V Doubí jsou popsány v tabulce 3.

Tabulka 3 parametry kamery z měření na lokalitě v lomu V Doubí .

Parametry	22.05.2023	12.01.2024	29.03.2024
model kamery	FC6310	FC6310	FC6310
f (ohnisková vzdálenost kamery)	8,8 mm	8,8 mm	8,8mm
rozlišení	1920 x 1080	1920 x 1080	5472 x 3078
velikost pixelu	7,2 x 7,2 um	7,2 x 7,2 um	2,53 x 2,53 um
celkem snímků	155	211	196
průměrná výška letu	13,3 m	13,5 m	11,8 m
celková rozloha	648 m ²	918 m ²	426 m ²

3.1.3. Terénní měření – lokalita pískovcová stěna v údolí Svitávky

Na lokalitě byla využity metody laserového skenování a UAV mapování bez zaměření kontrolních bodů. Měření probíhalo ve dnech 9.7. 2023 a 20. 2. 2024. V následném porovnání a zpracování byly využity také data pořízená vedoucím práce z dne 31. 3. 2021, kde je zaznamenaná skalní stěna, krátce po řízení a před sanací skály. Zbylé dvě měření lokality jsou nasnímány a zaměřeny až po sanaci a odklidu spadných bloků pískovce.

3.1.3.1. Laserové skenování

Dne **9. 7. 2023** probíhalo měření pozemním laserovým skenerem.

- Skenování trvalo 13 minut a rozestup bodů na ose X a Y byl nastaven na 3,2 mm. Celkem proběhly dvě skenování ze dvou pozic skeneru (zleva a zprava od pískovcové skalní stěny),
- Podmínky na lokalitě byly slunečné s částí stěny ve stínu, teplota okolo 30 °C, okolní porost ve vegetačním období, bezvětří a s nulovými srážkami.
- Měření probíhalo okolo 15. hodiny odpolední.

Data z tohoto měření nebyla nakonec využita kvůli technickým problémům spojeným s exportem dat z LiDARu. Tento problém nastal v důsledku krachu firmy, která vyvíjela a poskytovala software nezbytný k exportu bodového mračna.

Dne **20. 2. 2024** probíhalo měření laserovým skenerem Optech ILRIS 3D6. Provedeno vedoucím práce RNDr. Filipem Harvichem, PhD.

- Bylo provedeno celkem šest laserových skenování. Průměrný rozestup bodů na ose X a Y byl nastaven v průměru na 2 mm v závislosti na vzdálenosti skeneru od skalní stěny. Laserový skener byl umístěn na celkem 6 pozic.
- Podmínky na lokalitě byly: zataženo, teplota vzduchu 13,8 °C, nulové srážky a maximální rychlost větru 2 km/h. Mimo vegetační období.
- Měření probíhalo v během dopoledne.

Data z laserového skenování i z UAV byly využity pro porovnání a zpracování dat.

3.1.3.2. UAV mapování

Měření provedené **9. 7. 2023** zahrnovalo:

- Rozmístění pěti georeferenčních kontrolních bodů a následný pokus o jejich zaměření. Nedostatek signálu z družic a hustý lesní porost znemožnily správné zaměření těchto bodů pomocí GNSS přijímačů.
- Následně byl proveden nálet dronu DJI Phantom 4 Pro, který systematicky pořídil snímky z různých úhlů a stran stěn.

- Celková doba UAV mapování trvala 10 až 15 minut okolo 15. hodiny odpolední.
- Podmínky na lokalitě byly slunečné s částí stěny ve stínu, teplota okolo 30 °C, okolní porost ve vegetačním období, bezvětří a s nulovými srážkami.

Data nebyla využita z důvodu absence georeferenčních bodů a horší kvality, proto, nejsou uvedeny informace o průměrné výšce letu a počtu snímků.

Měření **20. 2. 2024** probíhalo následovně:

- Nálet dronu DJI Phantom 4 Pro, během něj byly systematicky pořízeny snímky, tak aby obsahovaly celou lokalitu se vzájemným překryvem.
- Celková doba UAV mapování trvala 10 až 15 minut během dopoledne.
- Průměrná výška letu 11, 5 metru a celkový počet pořízených snímků byl 219.
- Podmínky na lokalitě byly: zataženo, teplota vzduchu 13,8 °C, nulové srážky a maximální rychlost větru 2 km/h. Mimo vegetační období.

Data byla využita pro porovnání s modelem z laserového skenování s georeferencovaným modelem z 31. 3. 2021,

3.1.4 Terénní měření lokalita – skalní stěna lomu V Doubí

Na lokalitě byly využity metody UAV bez georeferenčních bodů a UAV s georeferenčními body. Měření probíhalo ve dnech 12. 1. 2024 a 29. 3. 2024. Pro porovnání byly také využity a zpracovány data z dne 22. 5. 2023 opět pořízené vedoucím práce.

3.1.4.1 UAV mapování bez georeferenční bodů

Měření na oblasti lomu V Doubí proběhlo **12. 1. 2024**.

- Bylo rozmístěno celkem deset georeferenčních kontrolních bodů, rovnoměrně a neuspořádaně po terénu.
- GCP byly zaměřeny GNSS přijímačem. V důsledku špatného signálu byly body GCP zaměřeny s přesností i 20 cm na bod.
- Dron DJI Phantom 4 PRO se automaticky zkalibroval a nálet trval přibližně 5 minut. Během něj byly systematicky pořizovány snímky.
- Náletu probíhal mezi 11:20 až 11:25
- Průměrná výška letu byla 13,5 metru a celkem pořízených snímků bylo 211.
- Během měření bylo zataženo, teplota vzduchu byla kolem -1 °C a nebyl stín, beze srážek. Vítr dosahoval rychlosti max. 5 m/s
- Lokalita se nacházela mimo vegetační období s mírnou sněhovou pokrývkou o tloušťce 2–5 cm na zemi.

V důsledku disfunkce GNSS přijímače, nebylo možné vyexportovat souřadnice GCP, proto do zpracování modelu byly využity pouze fotografické snímky z dronu

3.1.4.2. UAV mapování s georeferenčními body

Měření probíhalo dne **29. 3. 2024** na oblasti skalní stěny lomu V Doubí

- Byly umístěny georeferenční body ve formě černobílých terčů, které byly nerovnoměrně rozloženy po území, celkem jich bylo 10. Sedm bodů bylo rozmístěno pod skalní stěnou a tři body na převisu.
- Georeferenční body byly zaměřeny GNSS přijímačem s RTK korekcemi a s přesností kolem 2 mm.
- Dron DJI Phantom 4 PRO se automaticky zkalibroval a nálet trval přibližně 10 minut.
- Čas náletu byl 11:40.
- Průměrná výška letu byla 11,8 m a bylo pořízeno 196 fotografických snímků.
- Během měření bylo slunečno, bez srážek a s minimální oblačností. Maximální rychlost větru dosahovala 10 km/hod. Teplota vzduchu byla kolem 16 °C Mimo vegetační období.

Data byla zpracována a využita jako referenční model pro lokalitu lomu V Doubí.

3.2 Zpracování dat

3.2.1 Tvorba 3D modelu v Agisoft Metashape

Digitální modely z dat UAV mapování byly zpracovány a vygenerovány v programu Agisoft Metashape.

3.2.1.1 Software Agisoft Metashape

3D modely skalních stěn byly vytvořeny v sw Agisoft Metashape. Tento software umožňuje tvorbu digitálních modelů terénu na základě zpracování snímků metodou SfM. Jeho uživatelské rozhraní je poměrně uživatelsky přístupné, s velkou mírou automatizace,. Podporuje většinu formátů fotografických snímků jako JPG, TIFF, PNG, BMP, textových xml., txt, dat., csv., bodových mračen obj., ply, txt, las, laz oc3, pdf. Bodová mračna je možno v programu georeferencovat s přesností menší než 5 cm. Jeho nevýhodou je vysoká cena nepřenositelné licence (komerční cena jedné licence agisoftu je okolo 100 000 Kč, pro vzdělávací účely 15 000 Kč) a náročnost na hardware, tj. doporučená RAM je nejméně 16 GB a minimálně 4–12 jádrový procesor. Pro pokročilé nastavení je doporučeno paměť RAM 32 GB a ideálně 32 jádrový procesor a velmi výkonné grafické karty, jejichž procesory jsou využívány pro posílení výpočetního výkonu (Agisoft, 2020).

3.2.1.2 Pracovní postup tvorby 3D modelu

1. **Nahrání fotografií do Metashapu** a vyhodnocení kvality snímků. Skrze funkce *add photos* a *estimate image quality*. Snímky s kvalitou nižší než 0,5 je doporučeno manuálem od Agisoftu (2020) vyřadit.

2. **Zjištění orientace snímků** pomocí funkce *align photos*. S možností výběru kvality (zvolena kvalita *high*, která pracuje s původní velikostí snímků) a možností předvýběr párů snímků *pair preselection enabled/disabled* povolit a zakázat. Během procesu vytváření orientace snímků Agisoft využívá parametry ohniskové vzdálenosti kamery, souřadnice hlavního bodu obrazu a koeficienty distorze kamery. Software identifikuje klíčové body na jednotlivých snímcích a lokalizuje je na ostatních snímcích. Z nich poté určuje pozice a orientaci kamery proti sobě vzájemně. V tomto kroku je možné změnit klíčový bodový limit *key point limit*, což je hodnota nejvyššího možného množství bodů na jednotlivém snímku, ze které se vypočítá pozice kamery. Je také možné upravit množství referenčních bodů *tie point limit*, což je maximální počet párovacích bodů pro každý snímek.

3. **Tvorba hustého bodového mračna** *built a dense cloud*. Ve vyskakujícím okně je možné změnit kvalitu a míru filtrace *depth filtering*. Pro objekty focené zblízka se doporučuje agresivní *agressive* filtrování, pokud se filtrování zcela vypne, může dojít k extrémnímu šumu bodů. Po vygenerování mračna je doporučeno vzdálené body a šum oříznout, skrze filtrování pomocí automatických nástrojů anebo manuálním výběrem.

4. **Vytvoření digitálního modelu** funkcí *built mesh*. Zde je třeba nastavit typ povrchu, tj. libovolný *arbitrary*, který se používá pro detailní povrchy, ale vyžaduje vyšší výpočetní nároky. Druhý typ povrchu je výškové pole *heigh field*, které je vhodné pro dálkové letecké mapování, jelikož vyžaduje méně paměti pro výpočet, což umožňuje zpracování většího množství dat. Dále je potřeba nastavit zdrojové mračno *source data*; husté bodové mračno pro větší přesnost a řídké v případě potřeby rychlé hrubého modelu. Následně je možné zvolit množství polygonů v síti *polygon count* a stupeň interpolace modelu *interpolation*. Pokud je povolena bude sw interpolovat (vyplňovat mezery mezi body mračna) v případě zákazu interpolace budou prázdná místa v modelu zachována.

5. **Tvorba textury povrchu** modelu *built a texture*, která zlepšuje vizuální kvalitu.

6. **Vygenerování reportu** *generate report*, který shrnuje informace o tvorbě modelu, například počet snímků, průměrná výška pořízených snímků a RMSE

7. **Export modelu**

Tabulka 4 Optimalizované výpočetní parametry dílčích procesů zpracování pro modely, vytvořeny z UAV snímků. .

Proces	Parametr	Hodnota
align photos	accuracy	high
	pair preselection	disabled
	point limit	4000
	tie point limit	40000
dense cloud	quality	high
	depth filtering	agressive/ mild
mesh	surface type	arbitrary
	source data	dense cloud
	polygon count	high/medium
	interpolation	enabled

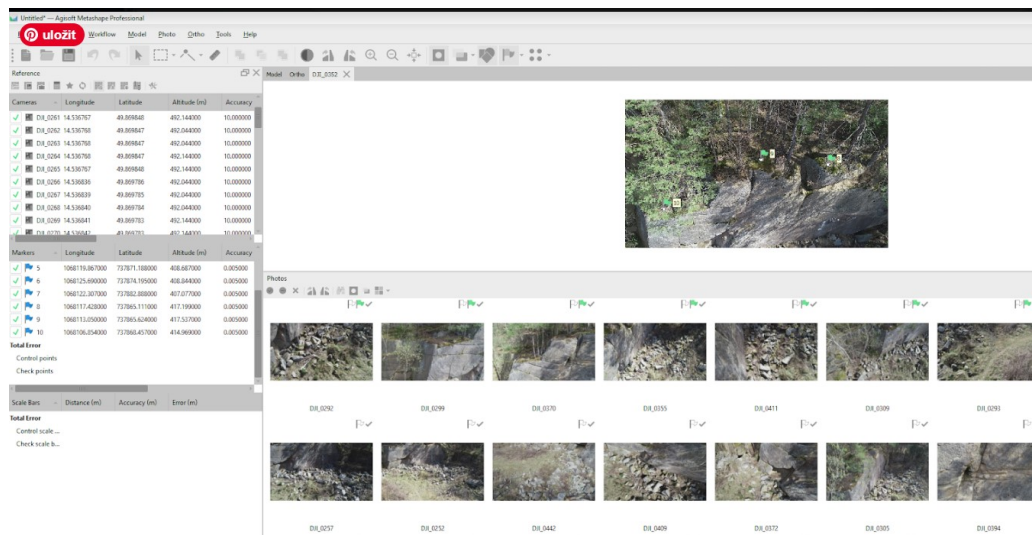
Postup bez georeferencování byl využit u dat ze skalního říční z Svitávky z data 20.2.2024 a z lomu V Doubí 12.1.2024 a 20. 5. 2023

3.2.1.3. Georeferencování modelu pomocí GCP

V případě že jsou zaměřeny georeferenční kontrolní body v terénu, je mezi krokem 2 a 3 pracovního postupu zařazeno georeferencování modelu. Georeferencování funguje na principu přiřazování geografických souřadnic ke každému bodu v modelu, skrze menší množství bodů se známou polohou na ose X, Y, Z.

- Do projektu je nahrán soubor se změřenými souřadnicemi georeferenčních bodů v textovém formátu (.txt, .csv...). Na každém snímku, na kterém se nachází daný GCP, je nutné manuálně značku GCP označit příslušným identifikačním číslem skrze funkci *create marker*. Minimální počet označených snímků s jedním GCP je 3
- Následně je doporučeno provést optimalizaci poloh kamerových snímků, během níž se šedou vlajkou označí pravděpodobné polohy GCP na snímcích. Dalším krokem je, zkontrolovat polohu bodů, a případně upravit pomocí zelené vlajky. Filtrací snímků s daným GCP urychluje zaznačování přesných poloh kontrolních bodů.
- Nastavení Souřadnicového systému modelu funkcí *ground control setting*. Model musí být uveden ve stejném souřadnicovém systému jako GCP (S-JTSK KROVAK east north 5514).
- Vyhodnocení přesnosti a odchylky u jednotlivých bodů, pomocí průměrné chybové odchylky v pixelech a vzdálenosti, následná optimalizace. Následuje krok 3. vygenerování hustého bodového mračka.

Postup s georeferencováním byl využit u dat ze dne 29.3. 2024.



Obrázek 10 Proces georeferencování v Agisoft Metashape

3.3. Porovnání modelů v programu CloudCompare

Pro porovnání a následné analýzy byl zvolen freeware CloudCompare, ve kterém je možné digitální modely porovnávat, registrovat na sebe vzájemně, měřit a analyzovat.

3.3.1. Freeware CloudCompare

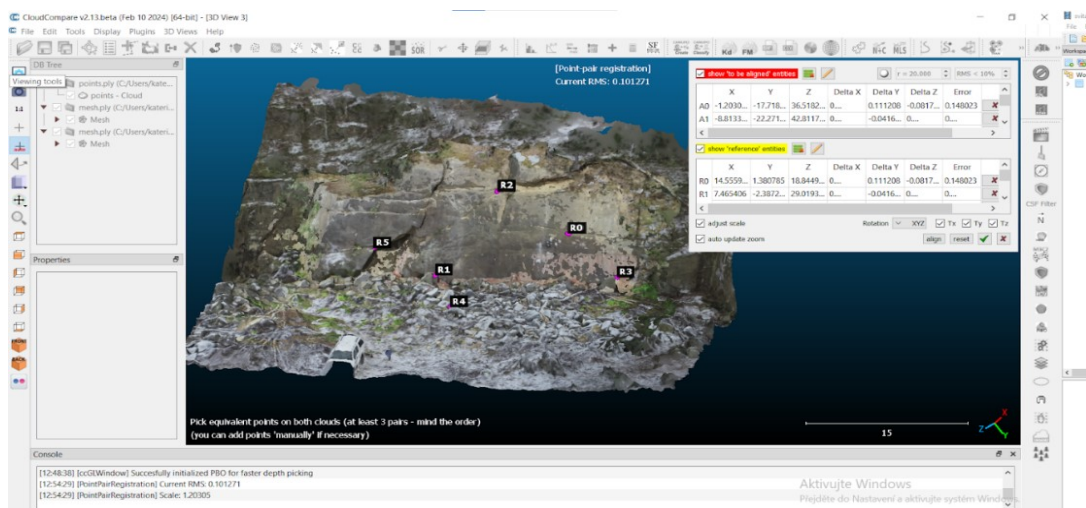
CloudCompare je bezplatný SW určený pro zpracování 3D bodových mračen, ale i pro TIN, mesh a ortografické snímky. Je vhodný pro porovnávání dvou mračen; lze v něm mračna analyzovat, registrovat na sebe. Lze v něm vypočítat statistiky, vzdálenosti a odhady geometrických prvků (zakřivení, drsnost, orientace geologické roviny). Sw podporuje formáty bin, ascii .xyz, ply, obj, las, laz... Uživatelské rozhraní CloudCompare je snadno obslužné, relativně intuitivní a není náročné na hardware, pokud nezpracovává více objemná data (CloudCompare, 2023).

3.3.2. Porovnání modelů v CloudCompare

Porovnání bylo prováděno na všech modelech a bodových mračnách. Registrované mračna a modely byly následně využity pro funkci M3C2 a pro výpočet obsahu povrchu.

- Do rozhraní CloudCompare byly nahrány meshe (sítě) ve formátu ply.
- Pro účely úprav je nezbytné oba modely označit a následně provést jejich rotaci tak, aby bylo možné s nimi efektivně pracovat.
- Dále je využita funkce *Align (points by picking)*. Pro správnou orientaci a registraci jednotlivých modelů na sebe je zapotřebí identifikovat alespoň stejné čtyři vybrané páry bodů na referenčním modelu *reference*, a na modelu který má být orientován *to-be aligned*.

- Pro zjednodušení manipulace s modely je možné do terénu vložit plastické značky, jako jsou kontrastní koule rozmístěné podél hran měřeného pole.
- Při orientaci modelů je klíčové minimalizovat odchylky *errors* mezi jednotlivými body v páru, přičemž přijatelná odchylka je menší než 0,1 m.
- Pokud nejsou modely georeferencované je nezbytné upravit měřítko skrze funkci *adjust scale*
- CloudCompare následně vypočítá transformační matici.
- Překrývají-li se modely ve stejné oblasti, lze je přesněji registrovat s funkcí *finely registers already aligned entities*
- V menu je potřeba zvolit vhodné procento překrytí *finely overlap* .Optimální hodnota se pohybuje 40 % a níže u netotožných modelů.
- Alternativním přístupem je hrubé přiblížení modelů pomocí rotace a posunu a následné použití funkce *finely registers already aligned entities* k jejich přesné registraci



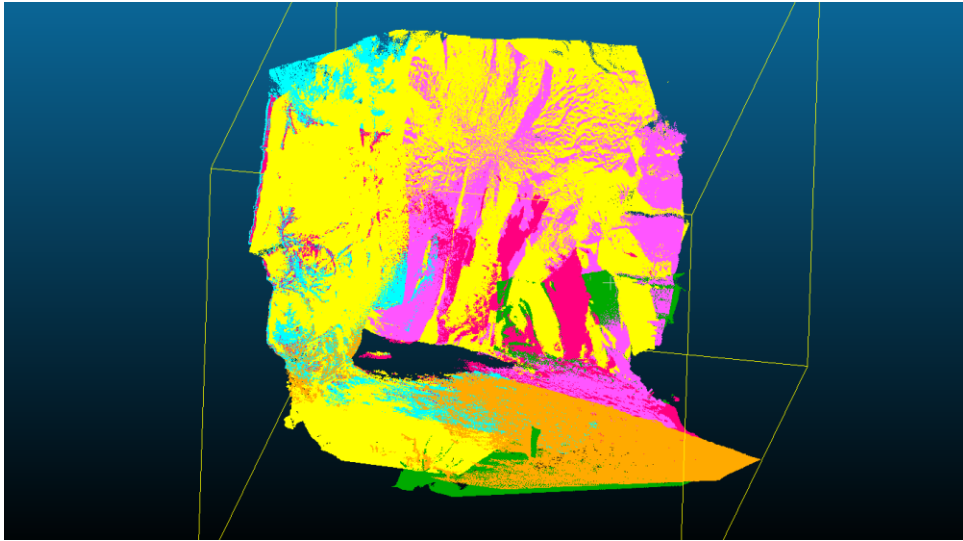
Obrázek 11 registrování mračka na referenční mračka lomu V Doubí. Cloud Compare .

3.3.3. Registrování laserscanerových mraček v programu CloudCompare

Výstupem z LiDARového měření ze dne 20.2.2024 bylo celkem šest bodových neobarvených negeoreferencovaných mraček z 6 úhlů a 6 jednotlivých měření LiDARu. Z uvedených mraček ve formátu .ply bylo nutné vytvořit jedno bodové mračko.

- Pro spojení šesti mraček do jednoho bodového mračka byla využita funkce *Align (points by picking)*, která ale umožňuje manuálně registrovat pouze dvě mračka najednou.
- Po provedení registrace byla provedena fúze mraček do jednoho pomocí funkce *merge*.
- Celkem proběhlo pět manuálních registrací, přičemž každá registrace byla uskutečněna minimálně sedmi páry bodů s odchylkou menší než 0,05 m.
- Pro lepší orientaci je možné bodové mračko obarvit, skrze funkci v panelu *edit, colors* a *set unique*.

- Manuální spojování mračen může vést ke ztrátě přesnosti z důvodu časově náročného procesu. Vyšší přesnost lze dosáhnout identifikací vícero registrovaných párů bodů.



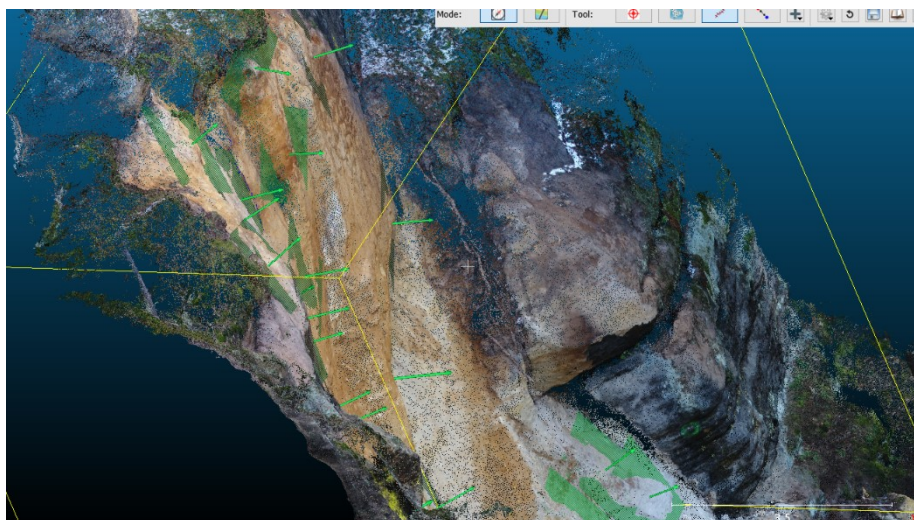
Obrázek 12 registrované obarvené bodové mračno v CloudCompare .

3.4. Analýza strukturních ploch, trhlin

3.4.1. Plugin Compass 2.0

Plugin Compass je určený pro strukturní analýzu a interpretaci modelů. Jeho součástí je režim mapy pro vymezení geologických jednotek a druhý režim kompas, který je schopen měřit orientaci a sklon a velikost strukturních prvků. Plugin funguje pouze na bodových mračcích a ke správné extrakci dat je klíčové, aby bylo mračno georeferencované. Využitý nástroj byl měření orientace povrchu *measure surface orientations*. Tento nástroj slouží k zjištění orientace směru a sklonu strukturních ploch,

Kliknutím na bod uvnitř strukturní plochy pomocí červeného kruhu se vytvoří rovina, která prochází body uvnitř tohoto kruhu a tím se barevně označí strukturní plocha. A následně lze vyexportovat .cvs soubor, ve kterém jsou hodnoty, sklonu plochy a orientace sklonu, směru vrstvy, velikost plochy, délka, a její geografické souřadnice. Z hodnot orientace a sklonu plochy byl vytvořen v bezplatném sw Georse růžicový graf a stereogram. V CloudCompare jsou nástroje pro tvorbu stereogramů strukturních ploch a dva postupy výpočtu všech strukturních ploch na bodovém mračnu. Prvním využitým v této práci je *KD-tree*, během něj je mrak rozdělen na čtvrtinové buňky (roviny), ve kterých jsou obsaženy všechny body s nejmenší střední ohniskovou odchylkou. Mračno pokryje nepravidelná mřížka o různých velikostech buněk. Následně pospojuje sousední buňky, které sdílí společný sklon a směr sklonu, výstup nástrojů je opět .cvs soubor a stereogram. Druhý postup nazývaný jako *fast-marching*, funguje na stejném principu, jen s rozdílem vytvoření pravidelné mřížky, jejíž buňky při nepravidelném povrchu mohou být prázdné, nebo obsahovat příliš malé množství bodů.



Obrázek 13 extrakce strukturálních ploch

4. Výsledky

Při analyzování jednotlivých DMR byly vybrány nástroje pro porovnání mezi sebou vzájemně. Jedná se o hodnotu RMSE (reprojekční chyba) o prostorové rozlišení a rozlišení digitálního výškového modelu. Dále byly využity; výpočet obsahu povrchu obdélníkového výřezu a nástroj M3C2, který vyhodnocuje vzdálenosti bodů mezi mračny vzájemně. Součástí výsledků je také porovnání obecných vlastností jednotlivých metod sběru a zpracování dat z UAV, LiDARu a UAV s GCP. a růžicové grafy strukturálních ploch, které byly extrahovány v CloudCompare z bodového mračna z lokality Svitávky z 31. 3. 2021.

4.1 Vybrané nástroje pro porovnání digitálních modelů

4.1.1. RMSE (reprojekční chyba)

Parametr využitý pro zjištění odchylky mezi reálnou pozicí bodu a pozicí bodu v digitálním modelu byla reprojekční chyba (ang. Root mean square error). Tato hodnota je uvedena v reportu ze sw Metashape. Reprojekční chyba je průměrována přes všechny referenční body (tie points) na všech snímcích. Ukazatel představuje vzdálenost mezi vypočítanou pozicí projekčního bodu na digitálním modelu a skutečnou pozicí tohoto 3D bodu na snímku. RMSE slouží jako míra přesnosti rekonstrukce digitálního modelu reliéfu (DMR) z daných snímků. Ovlivňuje ji řada proměnných jako je například distorze kamery, zkreslení vzdálenosti způsobených pohybem kamery a počet pořízených snímků.

4.1.1.1. Lokalita lom V Doubí

Tabulka 5 RMSE DMR na lokalitě lomu V Doubí

	22.05.2023	12.01.2024	29.03.2024
reprojection error	0,795 pix/0,172 m	0.605 pix / 0,139 m	0,403 pix /0,209 m
tie points	103577	159916	172600

Jedním z faktorů ovlivňujících RMSE je počet pořízených snímků. Čím větší je počet snímků, tím vyšší je pravděpodobnost, že každý bod v mračnu bodů bude zaznamenán z vícero úhlů a na více snímcích a bude tak lépe umístěn. Počet snímků použitých k zpracování dat z 22. 5. 2023 činil 155, z 12. 1. 2024 bylo zpracováno 211 snímků a z 29. 3. 2024 celkem 196 snímků. Z většího počtu snímků software dokáže identifikovat vícero spojovacích bodů (tie points). Ty zpřesňují registraci a umístění bodů v mračnu a snižují RMSE chybu. S ohledem na velikostní měřítko skalní stěny je průměrná odchylka okolo 20 cm nepatrná. Nejmenší odchylku v pixelech má model z 29. 3. a v centimetrech je to model 12. 1.

4.1.1:2. Lokalita Údolí Svitávky

Tabulka 6 RMSE DMR na lokalitě údolí Svitávky

	31.03.2021 UAV	20.02.2024 UAV
reprojection error	0,659 pix / 0,158 m	0,809 pix / 0,202 m
tie points	174569	155607

Reprojekční chyba se opět odvíjí od počtu snímků, U modelů je rozdíl 24 snímků, tedy 31. 3. 2021 bylo pořízeno a využito celkem 243 a ze snímků 20. 2. 2024 bylo využito 219. Korelaci s RMSE mají i spojovací body. S ohledem na velikostní měřítko pískovcové skály v údolí Svitávky je průměrná RMSE 15 až 20 cm přijatelná. Podle reprojekční chyby lze hodnotit jako přesnější model z 31. 3. 2021.

RMSE u modelu z LiDARového měření nebyla spočítána, jelikož mračno není dopočítáváno ze snímků, ale jsou to výsledná data z laserových pulsů LiDARu.

4.1.2. Prostorové rozlišení a rozlišení digitálního výškového modelu

Prostorové rozlišení, (ground resolution) je minimální vzdálenost na zemi, kterou může software identifikovat při snímání povrchu. Je to vzdálenost mezi středy dvou sousedních pixelů na povrchu, uváděná v jednotkách pix/mm. V případě LiDARového bodového mračna je prostorové rozlišení

průměrný počet bodů na cm² a bylo dopočítáno počtem bodů v bodovém mračně poděleným celkovou plochou. Prostorové rozlišení souvisí s výškou letu, tedy, z jaké vzdálenosti byl objekt zaměřen a jaké má rozlišení fotoaparát. Ovlivňuje vykreslení textury a vizuálního detailu na digitálním modelu.

Rozlišení digitálního výškového modelu, souvisí s implementací georeferenčních bodů do procesu tvorby DMR.

4.1.2.1. Lokalita Lom V Doubí

Tabulka 7 parametry ovlivňují prostorové rozlišení – Lom V Doubí

	22.05.2023	12.01.2024	29.03.2024
prostorové rozlišení	8,22 mm/px	8,94 mm/pix	2,4 mm/pix
průměrná výška letu	13,3 m	13,5 m	11,8 m
rozlišení snímku kamery	1920 x 1080	1920 x 1080	5472 x 3078
rozlišení DEM	1,64 cm/pix	1,79 cm/pix	4,79 mm/pix

Nejmenší prostorové rozlišení má model 29. 3. 2024, kde dron letěl blíže k povrchu, což mělo za následek vyšší prostorové rozlišení i rozlišením snímku kamery. Rozdíl mezi rozlišením DEM mezi daty 22.5. 2023 a 12.1. 2024 je nepatrný v řádu mm a pravděpodobně souvisí s velikostí zaměřené plochy a opět s průměrnou výškou letu. U dat z 29.3. 2024 se rozlišení pohybuje v řádu milimetrů, což je způsobeno použitím georeferenčních bodů. Je zde tedy výrazné zmenšení velikostí jednotlivých pixelů, což může být klíčové pro další analýzy.

4.1.2.2. Lokalita Údolí Svitávky

Tabulka 8 parametry ovlivňující prostorové rozlišení – údolí Svitávky

	31.03.2021 UAV	20.02.2024 UAV	20.02.2024 LiDAR
prostorové rozlišení	2,79 mm/pix	4,01 mm/pix	1,39 bod/cm ²
průměrná výška letu / průměrná vzdálenost od LiDARu	8,49 m	11,5 m	19,87 m
rozlišení snímku kamery	5473 x 3078	1920 x 1080	-
rozlišení DEM	2,79 mm/pix	2,3 cm/pix	-

Hodnota prostorového rozlišení je závislá na výšce letu, velikosti pixelu a rozlišení snímku kamery, přičemž u dat z 31. 3. byla průměrná výška letu 8,49 m, zatímco u dat ze dne 20. 2. 2024 byla průměrná výška letu 11,5 m. Prostorové rozlišení LiDARového mračka bylo vypočítáno v softwaru CloudCompare, který analyzoval obsah povrchu celého mračka a celkové množství bodů. Rozlišení výškového modelu pak souvisí s georeferencováním modelu z 31. 3 a čtyřmi použitými GCP, které zlepšilo rozlišení z cm na mm.

4.1.3. Rozdíly mezi obsahy povrchů v obdélníkovém výřezu

Další parametr pro porovnání 3D modelů bylo vyříznutí obdélníkového výřezu a vypočítání jejich obsahu povrchu v CloudCompare skrze nástroj *calculate surface*. Funkce je možná pouze na meshi, a proto bylo bodové mračno z LiDARového měření převedeno v Agisoftu na mesh, následně byl nahrán do CloudCompare.

4.1.3.1. Lokalita Lom V Doubí

Pro porovnání dat z lomu V Doubí byl vyříznut obdélník o rozměrech 5,4 x 8,9 m. Z obdelníku byl vypočítán obsah plochy.

Tabulka 9 Obsah plochy tří obdelníkových výřezů z meshů z lomu V Doubí

Měření	Plocha (m)	Odchylka od průměru
22.05.2023	50,2461	-0,11
12.01.2024	50,3442	-0,01
29.03.2024	50,4786	0,12
průměr	50,3563	



Obrázek 14 obdélníkový výřez z lomu V Doubí, světle je DMR z 22.5 a tmavě DMR z 12. 1.

Obsahy ploch výřezů příliš neliší, z důvodu soudržného hladké plochy granodioritové stěny, bez větších diskontinuit plochy a puklin, Hladký povrch skalní stěny vznikl v průběhu těžby granodioritu odstřelem velkých rovných bloků horniny. Také se neliší v důsledku minimálních rozdílů v kvalitě a ve vzniku digitálních modelů. U plochy z 29.3 je vyšší hodnota, kdy během tvorby meshe bylo nastaveno filtrování dat na hodnotu *mild* (ponechání většiny bodů hustého bodové mračka i šumem. Povrch meshe z 29. 3 je více zrnitý.

4.1.3.2. Lokalita Údolí Svitávky

Výpočet plochy byl proveden u všech modelů Svitávky na stejném obdélníkovém výřezu o rozměrech 6,509 metru na 3,827 metru. Pro vypočítání obsahu z bodového mračka z LiDARu. Bylo mračno exportováno do Agisoft Metashape, kde byl vytvořen digitální model, podle výše uvedených nastavení.

Tabulka 10 Obsah plochy tří obdelníkových výřezů z meshů v údolí Svitávky .

Měření	Plocha (m ²)	Odchylka od průměru
20. 2. 2024 UAV	28,764	0,09
31. 3. 2021 UAV (GCP)	26,897	-1,78
20. 2. 2024 LiDAR	30,357	1,68
průměr	28,672	



Obrázek 15 obdélníkový výřez z 3 meshe. Růžově je zobrazeno Lidarové měření, světle hnědá je březnové měření a okrově je zobrazeno únorové měření z UAV dat

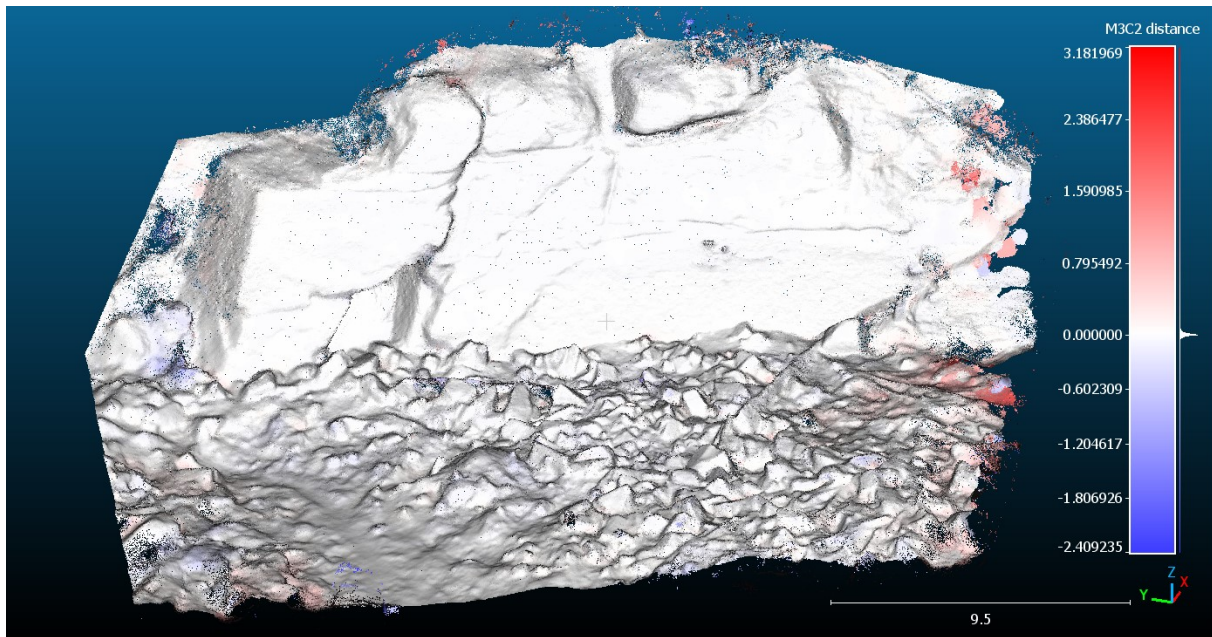
Z tabulky je patrné, že největší odchylku mají LiDARové měření a měření z UAV georeferencované. To, vychází z toho důvodu, že mesh z LiDARového měření vytvořil relativně velké množství nepravých tvarů na reliéfu z důvodu překryvu mračen při jejich registrování. Povrch skalní stěny je nejdetailejší u modelu z 20. 2. 2024.

4.1.4. M3C2 (multiscale model to model cloud comparison)

Nástroj M3C2 v CloudCompare vytváří analýzu a porovnání dvou bodových mračen. Vypočítá vzdálenost mezi identickými body na jednotlivých mračnách. Je vhodný pro analýzu změn a proměn na povrchu, jako jsou například sesuvy půdy a skalní řízení. V této práci byl nástroj využit pro odhalení odchylek bodů na jednotlivých mračnách vzájemně. Výstupem nástroje je referenční mračno bodů obarvené podle skalární stupnice barev, kde modré body mají zápornou vzdálenost od referenčního mračna a červeně jsou zaznačeny body s kladnou vzdáleností. Šedou barvou jsou vyznačeny body, které nenalezly shodu v registrovaném mračnu a bílou jsou body se shodou. Předpoklad pro správnou funkci nástroje je úplné přimknutí mračen.

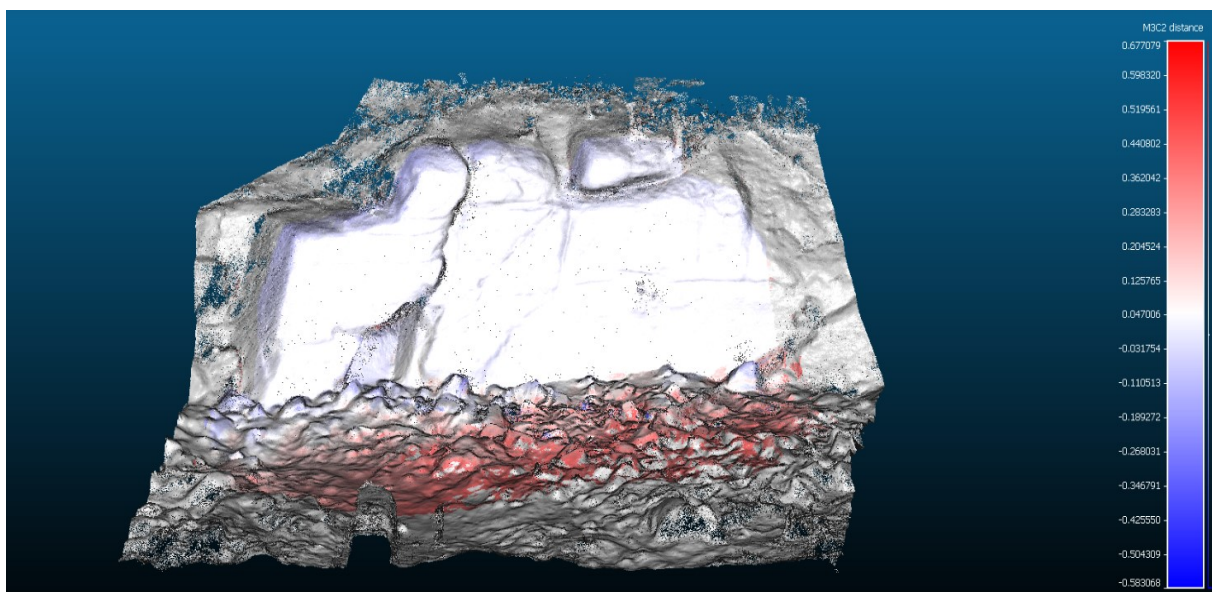
4.1.4.1. Lokalita Lom V Doubí

Při porovnání bodových mračen z 12. 1. 2024 a z 22.5. 2023 byla shoda v bodech na většině skalní stěny. Referenční data byly z 12.1 . 2024 Na okrajích jsou kladné odchylky způsobené nedokonalým ořezem vegetace. Modře zbarvené odchylky se nacházejí na levém okraji, kde u dat z 22.5 bylo pořízeno méně snímků levého okraje . Stupnice vzdáleností vytvořeny od extrémní záporné vzdálenosti -2,409 m po + 3,182 nejvyšší kladnou hodnotu. Tyto extrémní hodnoty vznikly při nedokonalém odřezu Při okrajích a diskontinuitách se vzdálenost bodů pohybuje 0,796 m až – 0,602 m.



Obrázek 16 M3C2 na skále v lomu V Doubí z 12.1.2024 a 22.5. 2023 .

K porovnání s georeferencovaným mračnem z 29. 3. 2024 byl využit model z 12. 1. 2024. Referenční mračno pro porovnání bylo z 29. 3. 2024 s georeferenčními body. Shoda se nachází na rovných plochách lomové stěny. Záporné hodnoty 0,01 m do -0,2 m se nachází v puklinách a na okrajích. Kladné odchylky na zemi jsou způsobeny sněhovou pokrývkou z dat 12. 1. a z nesprávného registrování modelů na sebe, kdy se párové body pro registraci mračen vyskytovaly pouze na skalní stěně.

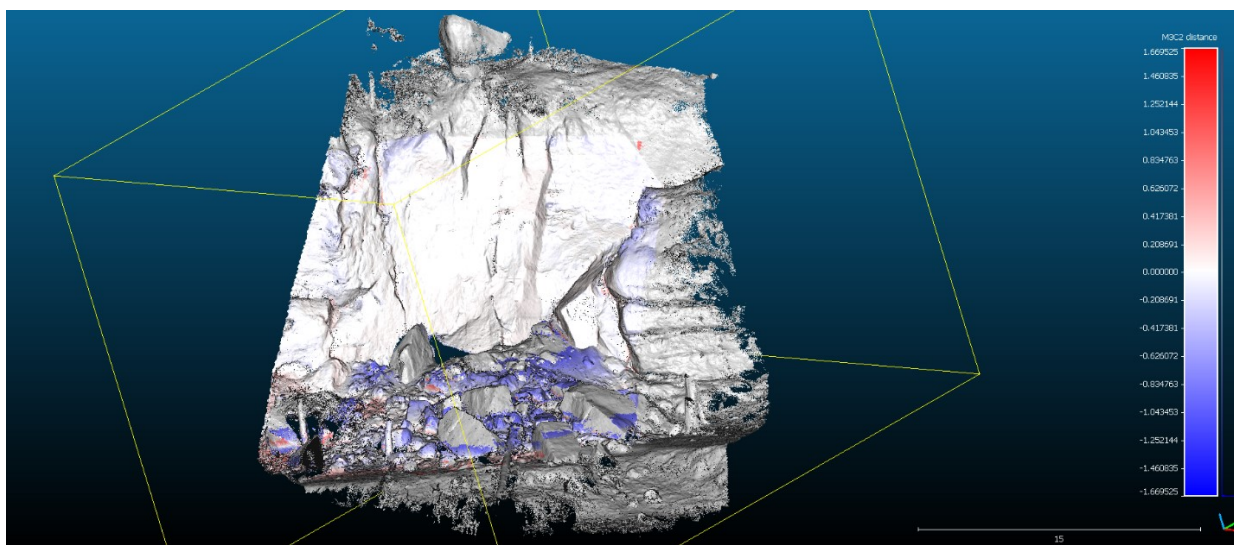


Obrázek 17 M3C2 na skále v lomu V Doubí z 12.1.2024 a 29.3. 2024 .

4.1.4.2. Lokalita Údolí Svitávky

Pro porovnání nástrojem M3C3 bylo využito bodové mračno z laserového skenování a bodové mračno vytvořené metodou SfM z 31. 3. 2021. LiDARové mračno bylo určeno jako referenční.

Skalární stupnice je symetrická v rozsahu -1,67 až + 1,67 m. Záporné hodnoty se primárně nacházejí před vstupní portálem do jeskyně, jelikož data z UAV jsou pořízeny krátce po skalním řícení. Sutiny a bloky horniny byly odklizeny až následující rok. Naopak LiDARové skenování z 20. 2. 2024 zaznamenává oblast po odklidu zříceného materiálu a sanaci pískovcové stěny. Velké zřícené bloky pískovce mají šedou barvu, jelikož nenalezly v referenčním mračnu párový bod. Tmavě modře nástroj vyhodnotil data skalních úlomků s porovnáním se současným povrchem zasypaným pískem. Pro porovnání klíčové jsou hodnoty vyjádřeny světle modrou přímo na skalní stěně. Zde je patrná odchylka vzdáleností ve struktuře a na okrajních skalních útvarech. Po okrajích mračen se hodnoty pohybují od 0,5 m do -0,5 m. Tyto hodnoty plynou z nedostatku snímků zabírajících okrajové skalní útvary. Podíl na vzdálenostních odchylkách má distorze kamery a v případě LiDARových skenů je to nepřesnost vzniklá registrací jednotlivých skenů do jednoho. Průměrná hodnota vzdálenosti mezi body jednotlivých mračen je -0,07 m.



Obrázek 18 výstupné bodové mračno z pluginu M3C2 se skalární stupnicí barev .

4.2 Porovnání DMR pořízených pomocí LiDARu, UAV fotogrammetrie s GCP a UAV fotogrammetrie bez GCP

Hlavní cílem práce bylo porovnat vytvořené modely z LiDARu z UAV fotogrammetrie s GCP a UAV fotogrammetrie bez GCP. Hodnocení obecného postupu metod je shrnuto v následující tabulce:

Tabulka 11 Obecné porovnání jednotlivých metod .

	LiDAR	UAV s GCP	UAV bez GCP
Obecné parametry			
přesnost dat	4 mm@100m	2-5 cm	~ dm
cena vybavení	> 1 000 000 Kč	> 100 000 Kč	> 10 000 Kč
pravé barvy	NE	ANO	ANO
vizuální stránka	neobarvené bodové mračno	flexibilní	flexibilní
administrativní požadavky	nepovinné	povinné oprávnění k pilotování dronu	povinné oprávnění k pilotování dronu
možnost morfometrických analýz	ANO, s GCP	ANO	NE
Časové rozpětí			
terénní práce	1–2 hod (záleží na množství skenů)	1–4 hod (záleží na množství GCP)	0,1 - 0,5 hod
zpracování v sw	0,25 - 4 hod (záleží na úkonu)	4 hod - 20 h (záleží na hw)	0,5 - 20 hod (záleží na hw)
Parametry prostředí			
vliv terénu	ANO	NE	NE
vliv vegetace	NE	ANO	ANO
vliv počasí a viditelnosti	NE	ANO	ANO
vnitřní prostory (jeskyně...)	ANO	NE	NE
proniknutí vodou	ANO	NE	NE

4.2.1 Obecné parametry

Přesnost LiDARových dat je stanovena před začátkem měření a závisí na kroku měření, vzdálenosti od měřeného objektu a chybě měření. Jak už je výše popsáno, skener podle vzdálenosti dopočítá počet bodů na mm v jedné linii, tedy kolik pulsů bude vysláno směrem k měřenému objektu. U modelů z UAV snímkování je přesnost dopočítávána až zpětně skrze RMSE, která se u georeferencovaných snímků blíží hodnotám jednotkách cm. Zatímco u modelu z UAV dat bez GCP se reprojekční chyba pohybuje v menších až vyšších desítkách cm. Přesností vynikají právě LiDARy.

LiDARové přístroje jsou cenově nákladné, pohybují se v řadu milionů Kč. Pořizovací cena TLS je okolo jednotek milionů korun, což je ale výrazně méně než náklady spojené s pořízením LiDARových letadel, dronů či batohů, kde ceny mohou dosahovat až k desítkám milionům Kč. Na druhé straně jsou drony, které jsou cenově dostupné i pro širší veřejnost a dají se pořídit za pár tisíc korun. Pro přesné určení polohy georeferenčních bodů je nezbytný GNSS přijímač, jehož cena se pohybuje kolem 100 000 korun. Metoda UAV snímkování s metodou SfM bez georeferencování je tedy v porovnání výrazně levnější a vhodná pro projekty s menším rozpočtem.

Po vizuální stránce jsou data z UAV snímkování flexibilní díky možné úpravě parametrů v průběhu postupu zpracování. Z metody SfM je možné vytvořit bodové mračno, mesh, triangulační síť, texturovaný model, ortografický snímek, rastr aj. Z laserového skenování je výstupem bodové mračno, které lze dále upravovat.

Pomocí snímků z UAV se vytváří barevný model povrchu, kde jsou jednotlivé body obarveny podle těchto snímků. Naopak, LiDARová data jsou neobarvena, pokud na laserovém skenu není instalovaná kamera. Musí být obarvena pomocí fotografií, které byly pořízeny synchronně s LiDARovými daty, nebo spojením digitálních modelů z LiDARu a z UAV snímkování s metodou SfM. Alternativně je možné provést ruční úpravy barev jednotlivých bodů.

Oprávnění k laserovému skenování je nepovinné, je-li skenování prováděno na neobydleném území. Pro pilotování dronu je ovšem nezbytné mít příslušná povolení a provést registraci zařízení. Dále platí, že bez povolení od Úřadu pro civilní letectví není dovoleno létat a provádět záznamy na určitých lokalitách na území České republiky. V oblastech národních parků a CHKO může být provoz bezpilotních letadel omezen, což zvyrazňuje výhodu využití LiDARu.

Pro další vytváření strukturních analýz je nezbytná znalost geografických souřadnic, k určování např. směru a orientace strukturních prvků. Stejně jako je možné georeferencovat bodová mračna získaná pomocí UAV snímková s metodou SfM, lze také georeferencovat LiDARová bodová mračna. Na modelu bez geografických souřadnic nelze tyto analýzy provádět.

4.2.2. Časové rozpětí

Práce v terénu s LiDAREm obvykle trvá 1–2 hodiny, přičemž pokud je potřeba skenovat objekt z více pozic, může to zabrat více času, někdy i několik dní. U metody SfM z dat UAV je časový rozsah závislý na výdrži baterie dronu a velikosti mapovaného území. U velkých území může být potřeba několik letů, proto časový interval může být od 5 minut až po několik hodin. Rychlost práce s georeferenčními kontrolními body (GCP) závisí na době trvání, přesnosti zaměření jejich polohy pomocí GNSS a zejména na jejich počtu. UAV je obecně rychlá metoda, která nevyžaduje přímý přístup na mapovanou lokalitu, zatímco rozmístění GCP a jejich zaměření vyžaduje důkladnou znalost terénu, jeho dostupnost a časovou investici.

Časový rámeček pro zpracování a vizualizaci modelu z laserového skenování v sw závisí na mnoha faktorech, včetně velikosti dat, složitosti terénu a výkonu počítače. Registrace jednotlivých skenů do jednoho s následným očištěním dat od šumu může zabrat od několika hodin až po několik desítek hodin. Tento proces lze zautomatizovat např. pomocí GCP a tím jej zkrátit. Při použití metody SfM z dat UAV je doba zpracování dat závislá na dostupné procesní paměti, velikosti dat a výkonu grafické karty. To může vést k době zpracování od 30 minut až po několik dní. Při práci s georeferenčními kontrolními body (GCP) je nutné věnovat čas ručnímu přiřazení georeferenčních bodů k jednotlivým

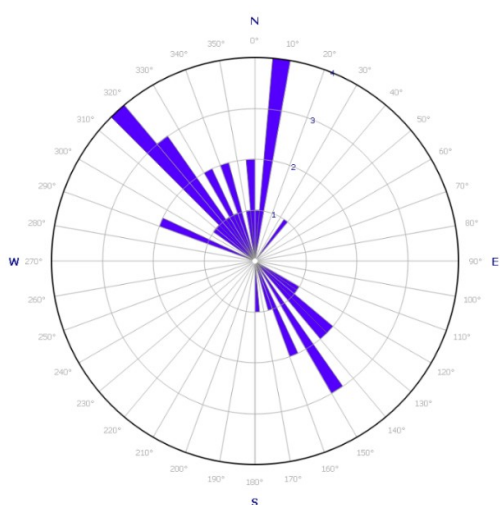
snímkům, což může být náročné, zejména při zpracování velkého množství GCP. Časová náročnost se liší v závislosti na individuálních faktorech, jako je zkušenost uživatele, výkon počítače a rozsah mapovaného území.

4.2.3 Parametry prostředí

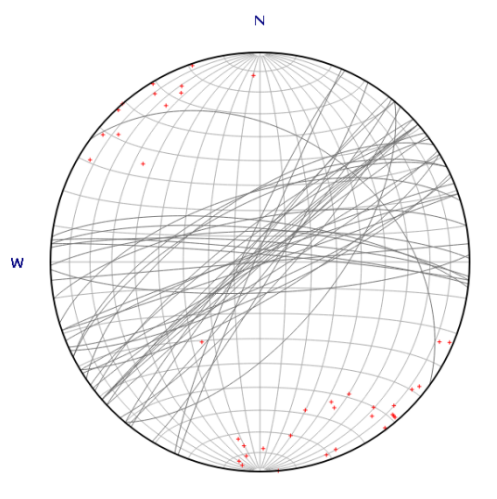
Prostředí je významný faktor, který je nutné zohlednit při výběru technologií a metod pro sběr dat. LiDAR disponuje výhodou, že není závislý na počasí, na povětrnostních podmínkách, osvětlení ani stínu. LiDARový paprsek je sám sobě zdrojem světla, je proto vhodný pro mapování jeskyní bez osvětlení, ve vnitřních prostorech a pro měření za nepříznivého počasí (mlhy, deště nebo silného větru). Díky schopnosti LiDARového paprsku proniknout vodou je možné ho využít i pro mapování zatopených oblastí a dna vodních ploch. Další pozitivní vlastností LiDARu je schopnost laserového paprsku proniknout skrze vegetaci a zaznamenat terén pod ní. Na rozdíl od LiDARu jsou UAV zařízení omezena na ideální podmínky, jako je bezvětří a suché počasí. Vykreslení struktury na DMR může být ovlivněno stínem na mapované lokalitě. Nelze je využít na vnitřní prostory, vodní plochy, a zalesněná území. UAV lze využít na špatně přístupných terénech, kam není možné donést vybavení. UAV také poskytuje perspektivu z vícero úhlů což TLS neumožňuje.

4.3. Analýza strukturních ploch, trhlin

Pro zjištění sekundárních informací bylo z digitálního modelu Svitávky z 30.3 extrahováno celkem 39 strukturních ploch na povrchu modelu pomocí nástroje *measure surface orientations*. Ty byly následně vyexportovány do excelové tabulky, kde byly zjištěny vlastnosti jako sklon *dip* (úhel pod kterým se strukturní plocha uklání), směr sklonu *dip direction* (směr, jakým se hornina uklání) a směr vrstev *strike* (je kolmý na směr sklonu). Hodnoty byly převedeny na celá čísla a vložena do sw Georse, který vytvořil růžicové grafy a stereogramy.



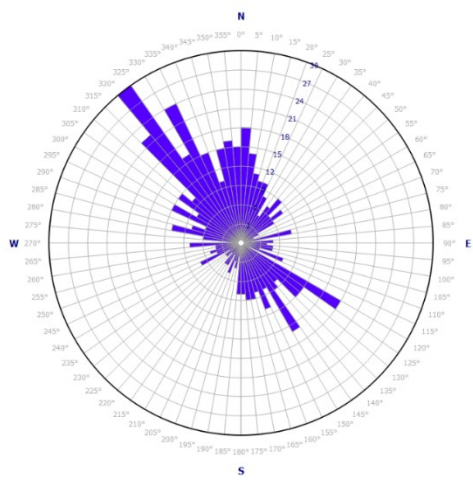
Obrázek 20 růžicový diagram směru sklonu



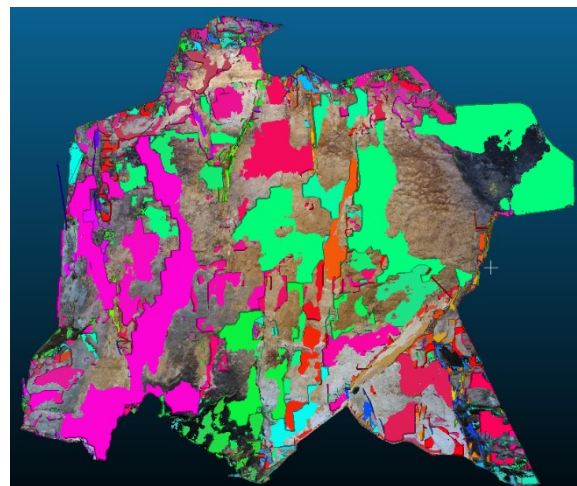
Obrázek 19 stereogram strukturní ploch

Z růžicového diagramu je patrné, že většina ploch je ukloněna směrem SV, S a SZ, čemuž odpovídá i orientace skály na mapách. Zbylé plochy jsou ukloněny JV směrem. Stereogram znázorňuje plochy jako linie, kde velikost oblouku určuje sklon. Čím rovnější oblouk, tím prudší je strukturní plocha a červené křížky znázorňují póly rovin (90° – sklon roviny). Odkud kam vedou křivky určuje směr sklonu roviny neboli *strike*, směr sklonu roviny je tedy kolmý na směr sklonu. Zde je patrný dominantní směr JZ – SV. Extrahované strukturní plochy jsou skalní stěny po skalní řícením, tedy nepřinášejí žádné validní informace o dalším vývoji skalní stěny.

Funkce KD tree z oříznutého modelu Svitávky z 30. 3. vytvořila celkem 597 ploch, z kterých následně byl vytvořen růžicový diagram z hodnot směr sklonu. Směr sklonu je SV, S a SZ, je tedy totožný s výsledky se 39 strukturními plochami.



Obrázek 21 růžicový diagram směru sklonu KD tree



Obrázek 22 strukturní plochy vytvořeny KD tree

5. Diskuse

Tato bakalářská práce se zaměřuje na metody tvorby digitálních modelů skalních stěn z dat získaných pomocí UAV snímkování a zpracované metodou Structure from Motion a z dat získaných z pozemního laserového skeneru. Práce se zakládá na terénních pracích na dvou lokalitách: pískovcové skále v údolí Svitávky, postiženou skalním řícením v roce 2021 a na lomové stěně opuštěného granodioritového lomu V Doubí v Hornopožárském lese. Hlavním cílem práce bylo porovnat tyto dvě metody a zhodnotit jejich využití v různých podmínkách terénu a prostředí. K UAV snímkování byly zaměřeny georeferenční body, u kterých je zjišťován vliv na výslednou kvalitu modelu a na možnosti využití georeferencovaného modelu pro další analýzy a aplikace.

Časově nejrozsáhlejší částí bakalářské práce bylo zpracování modelů, pomocí metody Structure from motion v programu Agisoft Metashape, a georeferencování modelu. Díky vysoce kvalitním fotografiím pořízených z dronu vedoucím práce modely splnily stanovená očekávání. U některých zvláště obsáhlých (s vícero snímky a vyšším rozlišením snímků) bylo však třeba snížit požadavky na kvalitu kvůli technickým parametrům využívaného počítače, které nesplňovaly doporučené parametry manuálem Agisoftu (Agisoft 2020). Což mělo za následek například zhoršení výsledných dat, například u výpočtu povrchu u měření z března 2021. Nutné snížení nároků na výpočet ovlivnilo kvalitu modelu na úkor čtyř GCP, které model vylepšují. Ostatní modely byly vytvořeny bez GCP, což výrazně zrychluje čas nad ním stráveným jak v terénu, tak při zpracování dat. Nedají se ale využít k analýze geomorfologických struktur, kde je třeba znát azimuty podle geografických souřadnic, ani například k tvorbě ortografického snímku. Bez absolutních souřadnic se nedají použít ani v systémech GIS. Georeferencování umožňuje další zpracování digitálních modelů a bodových mračen. Při zaznamenání přesné polohy georeferenčních bodů GNSS přijímačem během terénní práce, na lokalitách často nebyl signál pro zachycení signálu z družic. Vybrané lokality se nachází v hustém vegetačním porostu a jsou daleko od lidských sídel. Muselo být opuštěno od původní plánu zgeoreferencovat obě lokality a georeferenční body byly zaměřeny pouze u měření z 29. 3. 2024, Zde byl využit nově pořízený GNSS přijímač.

Hojně využívaný parametr pro zjištění přesnosti DMR je RMSE, využitý například v článku *Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points* (Liu a kol. 2022). Ve článku se RMSE dopočítává z kontrolních bodů, které nebyly využity pro georeferencování a přičemž se zjišťuje vzdálenost mezi kontrolním bodem na reálném povrchu a na digitálním modelu. V této bakalářské práci byla RMSE vypočítána jako průměrná vzdálenost mezi bodem na snímku a na digitálním modelu softwarem Agisoft Metashape. Pomocí RMSE se dá určit změna přesnosti negeoreferencovaného modelu oproti modelu s GCP. Podle Villanueva a Blanca (2019) se snižuje reprojekční chyba, s větším množstvím GCP, jejich rovnoměrným rozložením a rozestupem. Jak uvádí Park a Yeom (2022) příliš husté rozmístění GCP nejenže nezlepšuje přesnost DMR, ale spíše znamená ztrátu času a finančních prostředků při tvorbě DMR. V publikaci Liu a kol.

uvádějí že v modelu vytvořeným UAV snímkování s metodou SfM, bez GCP, vyšla vertikální RMSE 8,7 cm s horizontální RMSE 4,1 cm a s celkovou přesností digitálního modelu v řádech decimetrů. Při přidání GCP se vertikální RMSE modelu snížila o 5,5 cm a o 2,6 cm horizontálně. Při využití GCP u dat z 31. 3. z údolí Svitávky je patrné, že se zlepšila kvalita digitálního výškového modelu, tím že se prostorové rozlišení DEM se snížilo 2,3 cm/pix na 0,28 cm/pix. Data ze Svitávky byly georeferencované pomocí 4 GCP, které byly rozmístěny po okrajích. Z dat z lomu V Doubí z 29. 3: 2024 se také zlepšila kvalita digitálního výškového modelu z 1,79 cm/pix na 4,79 mm/pix, díky využitím 10 GCP. UAV snímky z 29. 3 byly zpracovány dvakrát: s GCP a bez nich. Průměrná RMSE se změnila využitím GCP, ale pouze nepatrně. z 21,4 cm respektive 0.467 pixelu na 20,9 cm respektive 0.402 pixelu. RMSE ovlivňovalo v této práci zejména počet snímků, proto při práci na lokalitě je důležité, mít na paměti právě tuto korelaci. Příliš málo snímků může vést k vysokému RMSE a tím k nepřesným výsledkům. Na druhou stranu, nadbytek snímků způsobuje značné časové a finanční nároky, stejně jako vyšší nároky na hardware při zpracování digitálního modelu. Je nezbytné najít rovnováhu mezi počtem snímků a přesností výsledného modelu.

Součástí práce bylo porovnání metod pro tvorbu DMR. Pro srovnání a analýzy byl využit freeware CloudCompare. Využitý nástroj freewaru byl výpočet obsahu povrchu výřezu meshe. Výhodou nástroje bylo, že byl schopen porovnat všechny modely dané lokality najednou. Nevýhodou bylo převedení bodového mračka z LiDARu z 20. 2. 2024 na mesh. LiDARové mračno je složeno z celkem šesti jednotlivých skenů, které na sebe v programu byly naregistrovány pomocí spojovací bodů. Na výsledném mračnu se proto nacházejí překryvy a dvojité hrany viz obrázek 20. z nedokonalého přimknutí jednotlivých mraček. Tyto překryvy následně na LiDARovém DMR vytvořily nepřesnosti a nepravé tvary na reliéfu,



Obrázek 23 dvě hrany ve výsledném LiDARovém bodové mračně jako důsledek nepřesné registrace .

Výsledné hodnoty obsahů povrchu výřezu se liší o 4 m², z uvedeného důvodu na LiDARovém meshi oproti zjednodušenému meshi 31.3. způsobeném nižší kvalitou modelu. Nižší kvalita byla nastavena kvůli velkého objemu dat a nízké operační paměti počítače. Pro další podrobné analýzy by bylo vhodné laserové skeny přeregistrovat a následně lépe očistit a vyfiltrovat. U lokality lomu V Doubí

byly hodnoty obsahů téměř identické s drobnými odchylkami, zejména proto, že povrch lomové skály je hladký a celistvý a data mají obdobnou kvalitu.

Dalším využitým nástrojem pro analýzy bodová mračna byl nástroj M3C2 v CloudCompare. Výhodou je že, provádí analýzy přímo na mračnech bodů a mohl proto být využito LiDARové bodové mračno. Nevýhodou je, že vyhodnocuje pouze dvě bodová mračna najednou. M3C2 (*multiscale model to cloud model comparison*), byl využit například v práci Kartini a kol. 2022. Nástroj vyhodnotil body v bodových mračnech na mapovaných skalních stěnách jako totožné. Po okrajích bodových mračen byly kladné i záporné odchylky, způsobené nedostatkem snímků zabírající okraje (v některých případech byly vzdálenosti bodů až 3 m). U porovnání modelů z různých ročních období byly odchylky způsobeny vegetací a sněhovou pokrývkou. Další odchylky mohly být způsobené nedokonalým registrováním snímků na sebe.

V neposlední řadě bylo zjišťováno, zdali je možné extrahovat geologické struktury z digitálních modelů vytvořených metodou SfM v prostředí sw CloudCompare. Publikace Deweze a kol. z roku 2016, se právě touto otázkou zabývá. Podle autorů záleží na tom, jak velké jsou měřené strukturní plochy, aby bylo možné extrahovat přesné informace. Jejich model má nepřesnosti okolo 5 mm, a jejich nejmenší strukturní plocha má rozměry 5 x 5 cm, což může mít vliv na data získané z měření z digitálního modelu. Na těchto menších plochách, je přesnější zaměřit si je pomocí geologického kompasu v terénu. Pokud se strukturní plochy pohybují v měřítku metrů je nepřesnost 5 mm zanedbatelná. Dále při tvorbě digitálních modelů také dochází k zaoblování hran, což snižuje počet známých ostrých hran v terénu a zakresluje model po vizuální stránce, obzvláště při okrajích modelu. Dvě zpracovávané lokality v této práci nejsou naneštěstí pro důkladné testování této metody příliš vhodné, protože skalní stěna v Doubí je ve skutečnosti nedávno uměle vytvořenou lomovou stěnou, a pískovcová stěna v údolí Svitávky je obnažena po skalním řízení podél vertikální odlučné plochy, a strukturní plochy zde tedy nejsou patrné, alespoň ne ve velké míře. Pro analýzu byl vybrán zgeoreferencovaný model ze údolí Svitávky z 31. 3. 2021. Data byly vytvořeny označováním jednotlivých celkem 39 strukturních ploch a následně byly exportovány do růžicového grafu a stereogramu. Dále byl vytvořen růžicový graf z nástroje KD-tree. Stereogram z KD tree se nepodařilo vytvořit. Důvodem bylo přes 500 strukturních ploch které, stereogram dělaly nepřehledným. Pro analýzu strukturních ploch by bylo vhodné využít DMR v jiných horninách s větší odlučností a vrstevnatostí, například v břidlicových horninách, či ve vulkanických horninách, kde jsou strukturní plochy a pukliny dobře identifikovatelné. Také by bylo možné provádět analýzy na tektonicky postižených skalních výchozech (Dewez a kol. 2016). V publikaci Dewez a kol. využili pro analýzu digitálního modelu výchoz tvořený amfibolitem. Během porovnání mezi terénním měřením geologickým kompasem a výsledků z CloudComparové funkce KD tree dosáhli velice podobných výsledků. Kvalitních výsledků dosáhli i autoři publikace *Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities* (Assali a kol. 2016), kteří měřili geologické struktury

z digitálního modelu, tvořeného z dat laserového skenování. Autoři tuto metodu také doporučili hlavně díky výhodám, které z nich plynou. Vyhody podle nich spočívají v technických parametrech, kdy dosáhli vyšší kvality výsledků a po ekonomické stránce, díky zjednodušení práce v terénu a zjednodušení následných analýz. Klíčová pro ně byla i bezpečnost. Lokality s odlučnými strukturními plochami mohou být často nebezpečné a využitím DMR se snižuje čas strávený na lokalitách. Výsledky této bakalářské práce také potvrzují, že využití digitálních modelů a sw CloudCompare jsou vhodným prostředkem pro analýzu strukturních ploch a sekundárních struktur, ale do budoucna by bylo vhodné naměřené hodnoty porovnat s terénním měřením pomocí geologického kompasu.

6. Závěr

Tato bakalářská práce pojednává o tématu mapování skalních stěn skrze tvorbu digitálních modelů reliéfu z dat UAV a dat LiDARu. Zabývá se tvorbou, analýzou a porovnáním DMR skalních stěn, konkrétně pískovcové skály v údolí Svitávky, kde proběhlo skalní řízení na jaře roku 2021 a lomové skalní stěny již opuštěného lomu V Doubí v Hornopožárském lese. Součástí bakalářské práce byl terénní sběr dat na lokalitách pomocí UAV snímkování, laserového skenování a rozmístování a zaměřování georeferenčních bodů GCP pomocí GNSS přijímače. Dále tvorba digitálních modelů metodou SfM a georeference v sw Agisoft Metashape Pro a porovnání výsledných modelů v sw CloudCompare. V freeware CloudCompare byla provedena také analýza strukturních ploch a puklin na digitálním modelu skály z údolí Svitávky.

Při vyhodnocování jednotlivých parametrů jednotlivých metod byla vyzdvížena ekonomická stránka a celková flexibilita dat z UAV snímkování a také rychlost sběru a zpracování dat oproti LiDARu. UAV snímkování s metodou SfM je tedy efektivnější zejména v oblasti geomorfologie při detekování sesuvů, ale i při sledování vegetace a proměn v životním prostředí. Zápory UAV snímkování jsou ale přírodní a meteorologické podmínky, ve kterých dominuje LiDAR, například ve vodním prostředí, za silného větru, při srážkách, ve vnitřních prostorech a za tmy. Při tvorbě v této bakalářské práci lepších výsledků dosahovala metoda UAV snímkování s metodou SfM, zejména kvůli možnosti data upravovat a z nedokonalého registrování jednotlivých skenů z LiDARu na sebe.

Bakalářská práce dále měla za cíl zjistit vliv georeferenčních bodů na výslednou kvalitu modelu. Korelace mezi GCP a kvalitou modelu byla prokázána. Nicméně kvalita DMR bez GCP byla také vysoká, a proto rozdíly nejsou tolik patrné. Využití GCP usnadňuje následné zpracování, tím, že mnoho procesů zautomatizuje, např. registrování mračen na sebe. Známé geografické souřadnice jsou potřeba i pro geologické analýzy strukturních ploch a puklin, kvůli zjišťování sklonu a orientace rovin. Předchozí tvrzení by se dala shrnout jako; tvorba digitálních modelů pomocí UAV snímkování bez GCP je ekonomičtější jak časově tak finančně a je k vhodná k vizuálním analýzám měřených lokalit a kvalitou je téměř shodná s georeferencovanými modely. Zatímco modely s GCP vyžadují větší nároky, ale lze je využít k podrobnějším analýzám a ve vícero sw, zejména v GIS.

V bakalářské práci bylo cílem zjistit, zdali jsou digitální modely vhodné na získávání sekundárních strukturních dat, a jaký mají na ně vliv. Během práce byly využity funkce programu CloudCompare, jako je geologický kompas a KD tree a a programu Georose k tvorbě růžicových diagramů a stereogramů. Bylo prokázáno, že touto metodou lze vytvořit kvalitní analýzy.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Mapa lokality v lomu V Doubí (zdroj: Digitální model reliéfu (GEOPORTÁL), vlastní zpracování	12
Obrázek 2 pískovcová stěna po úklidu skalního říční v údolí Svitávky	15
Obrázek 3 ukotvená skalní šupina pomocí hřebů v údolí Svitávky	15
Obrázek 4 Mapa lokality v údolí Svitávky (zdroj: Digitální model reliéfu (GEOPORTÁL), vlastní zpracování	16
Obrázek 5 odvalové říční (zdroj: Němčok, Pašek, Rybář,1974)	20
Obrázek 6 planární říční (zdroj: Němčok, Pašek, Rybář,1974).....	21
Obrázek 7 skalní sesuvy (zdroj: Němčok, Pašek, Rybář,1974).....	21
Obrázek 8 centrální projekce (zdroj: Böhm, 2002).....	25
Obrázek 9 schéma tachymetrické záměry (zdroj: Vondrák, 2004)	26
Obrázek 10 Proces georeferencování v Agisoft Metashape.....	35
Obrázek 11 registrování mračna na referenční mračno lomu V Doubí. Cloud Compare	36
Obrázek 12 registrované obarvené bodové mračno v CloudCompare	37
Obrázek 13 extrakce strukturální ploch.....	38
Obrázek 14 obdélníkový výřez z lomu V Doubí, světle je DMR z 22.5 a tmavě DMR z 12. 1.....	42
Obrázek 15 obdélníkový výřez z 3 meshe. Růžově je zobrazeno Lidarové měření, světle hnědá je březnové měření a okrově je zobrazeno únorové měření z UAV dat.....	43
Obrázek 16 M3C2 na skále v lomu V Doubí z 12.1.2024 a 22.5. 2023	44
Obrázek 17 M3C2 na skále v lomu V Doubí z 12.1.2024 a 29.3. 2024	44
Obrázek 18 výstupné bodové mračno z pluginu M3C2 se skalární stupnicí barev	45
Obrázek 19 stereogram strukturální ploch	48
Obrázek 20 růžicový diagram směru sklonu	48
Obrázek 21 růžicový diagram směru sklonu KD tree	49
Obrázek 22 strukturální plochy vytvořeny KD tree	49
Obrázek 23 dvě hrany ve výsledném LiDARovém bodové mračně jako důsledek nepřesné registrace	51

Seznam tabulek

Tabulka 1 parametry měření laserovým skenerem na lokalitě údolí Svitávky	28
Tabulka 2 parametry kamery dronu v údolí Svitávky	29
Tabulka 3 parametry kamery z měření na lokalitě v lomu V Doubí	29
Tabulka 4 Optimalizované výpočetní parametry dílčích procesů zpracování pro modely, vytvořeny z UAV snímků.	34
Tabulka 5 RMSE DMR na lokalitě lomu V Doubí	39
Tabulka 6 RMSE DMR na lokalitě údolí Svitávky.....	39
Tabulka 7 parametry ovlivňují prostorové rozlišení – Lom V Doubí	40
Tabulka 8 parametry ovlivňují prostorové rozlišení – údolí Svitávky	41
Tabulka 9 Obsah plochy tří obdelníkových výřezů z meshů z lomu V Doubí.....	41
Tabulka 10 Obsah plochy tří obdelníkových výřezů z meshů v údolí Svitávky	42
Tabulka 11 Obecné porovnání jednotlivých metod	46

Seznam použité literatury:

- ADAMOVIČ, J., MIKULÁŠ, R., CÍLEK, V., (2010): Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky. Academia, Praha, 460 s.
- AGISOFT (2020): Agisoft Metashape. User Manual: Professional Edition, Version 1.6, September.
- ASSALI, P., GRUSSENMEYER, P., VILLEMIN, T., POLLET, N., VIGUIER, F. (2016): Solid images for geostructural mapping and key block modeling of rock discontinuities. *Computers and Geosciences*, 89.
- BAYER, T. (2016): Digitální modely terénu. Dostupné z:
<https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/images/courses/Adk/adk5.pdf> (12.1 2024)
- BÖHM, J.,(2002) Fotogrammetrie. VŠB-TUO, Ostrava, 16 s.
- BROOK, M. (2017): Structure from motion in the geosciences. *New Zealand Geographer*, 2, 73.
- BUDIHARTO, W., IRWANSYAH, E., SUROSO, J. S., CHOWANDA, A., NGARIANTO, H., GUNAWAN, A. A. S. (2021): Mapping and 3D modelling using quadrotor drone and GIS software. *Journal of Big Data*, 1, 8.
- CULEK, M., GRULICH, V., LAŠTŮVKA, Z., DIVÍŠEK, J. (2013): Biogeografické regiony České republiky. Masarykova univerzita, Brno.
- CULEK, M., (2015): Hodnocení krajiny, katalog-tab_IB, Kombinované (malé a střední tvary). Masarykova univerzita, Brno
- ČEPEK, L., KOUTEK, J., (1941) Kamenolomy v Horních Požárech a Mrači v Posázaví. Geologický ústav pro Čechy a Moravu, Praha, 62 s.
- ČGS (2023): Sesuv, Katalog geologických rizik,
<http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-22/> (1. 4. 2024).
- DEMEK, J. (1965): Geomorfologie Českých zemí. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha.
- DEWEZ, T. J. B., GIRARDEAU-MONTAUT, D., ALLANIC, C., ROHMER, J. (2016): FACETS : A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5.
- ELTNER, A., SOFIA, G. (2020): Structure from motion photogrammetric technique. In: *Developments in Earth Surface Processes*.
- FUSSGÄNGER, E., (1982): Klasifikácia a geomechanické posudzovanie rôznych typov svahových porúch. Disertační práce. Slovenská vysoká škola technická, Bratislava.

- HACKELOEER, A., KLASING, K., KRISP, J. M., MENG, L. (2014): Georeferencing: A review of methods and applications. *Annals of GIS*, 1, 20.
- HÁNEK, P., BÍLEK, J., HRUŠTINCOVÁ, G., VACKOVÁ, K., VACEK, T., VOLKMANN, M., LAFEK, J., LATOVÁ, D. (2021) Zeměměřické a astronomické přístroje používané na území ČR od 16. do konce 20. století.
- HARTVICH F., KYCL, P., (2021). Analýza současného poznání obecných faktorů vzniku a vývoje svahových nestabilit (3.1.1) Česká geologická služba, Ústav struktury a mechaniky hornin, Akademie věd ČR, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy. Praha. 228 s.
- HARVICOVÁ V., PIŠNA, J., (2010). Kamenice v proměnách věků. Vydavatel: obec Kamenice, Kamenice. 463 s.
- KAPLAN, E. D., HEGARTY, C. J. (2017): *Understanding GPS/GNSS Principles and Applications*.
- KARAGIANNIS, G., ANTÓN CASTRO, F., MIOC, D. (2016): AUTOMATED PHOTOGRAMMETRIC IMAGE MATCHING WITH SIFT ALGORITHM AND DELAUNAY TRIANGULATION. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III–2.
- KARTINI, G. A. J., GUMILAR, I., ABIDIN, H. Z., YONDRI, L. (2022): THE COMPARISON OF DIFFERENT LIDAR ACQUISITION SOFTWARE ON IPAD PRO M1 2021. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*.
- KLIMÁNEK, M., (2006). Digitální modely terénu. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 85 s.
- KOLÁŘ, J., (1990), Dálkový průzkum Země. SNTL, Praha, 170 s.
- KORDULA M., (2018) Přírodní park Hornopožárský les – hodnocení krajinného rázu. Diplomové práce. České vysoké učení technické v Praze.
- KVĚTOŇ, V., VOŽENÍLEK, V., (2011) Klimatické oblasti Česka: klasifikace podle Quitta za období 1961-2000, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc. 20 s.
- LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. (2004): *Digital terrain modeling: Principles and methodology*.
- LIAO, J., ZHOU, J., YANG, W. (2021): Comparing LiDAR and SfM digital surface models for three land cover types. *Open Geosciences*, 1, 13.
- LIU, X., LIAN, X., YANG, W., WANG, F., HAN, Y., ZHANG, Y. (2022): Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points. *Drones*, 2, 6.

- MALGOT, J., KLEPSATEL, F., TRÁVNÍČEK, I., (1992). *Mechanika hornin a inžinierska geológia*. Alfa, Bratislava
- MCMANAMON, P. F. (2019): *LiDAR Technologies and Systems*.
- MIKITA, T. (2014). *Využití GIS a DPZ pro krajinné inženýrství, přednáška č. 8, Letecké laserové skenování*. Lesnická dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, 36 s.
- MIŘIJOVSKÝ, J. (2013). *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení: Disertační práce*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. 144 s.
- MOHSAN, S. A. H., KHAN, M. A., NOOR, F., ULLAH, I., ALSHARIF, M. H. (2022): *Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review*. 6.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. (1991): *Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. *Hydrological Processes*, 1, 5.
- MÜLLEROVÁ, H., KLIMEŠ, J., HÁLOVÁ, M, BLAHŮT, J., GIBAS, P., WOITSCH, J., PAUKNEROVÁ K., (2017) *Sesuvy – podceňované nebezpečí*. Středisko společných činností AV ČR, v.v.i. pro Kancelář Akademie věd ČR, 78 s.
- NACIRI, N., BISNATH, S. (2023): *RTK-Quality Positioning With Global Precise Point Positioning Corrections*. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 3, 70.
- NĚMČOK, A., PAŠEK, J., RYBÁŘ, J., (1974) *Dělení svahových pohybů, řada HIG, 11*. Sborník geologických věd, Praha. 77-97 s.
- NEUHÄUSLOVÁ, Z., MORAVEC, J., CHYTRÝ, M., SÁDLO, J., RYBNÍČEK, K., KOLBEK, J., JIRÁSEK, J., (1997). *Mapa potenciální přirozené vegetace České republik*. Botanický ústav AV ČR, Průhonice. 1 s.
- PARK, J. W., YEOM, D. J. (2022): *Method for establishing ground control points to realize UAV-based precision digital maps of earthwork sites*. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1, 21.
- QUITT, E. (1971): *Klimatické oblasti Československa*. Academia, Praha. 73 s
- RAJENDRA, Y. D., MEHROTRA, S. C., KALE, K. V., MANZA, R. R., DHUMAL, R. K., NAGNE, A. D., VIBHUTE, A. D. (2014): *Evaluation of partially overlapping 3D point cloud's registration by using ICP variant and cloudcompare*. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*.
- RUBÍN J., BALATKA, B., LOŽEK, V., VÍTEK, J., (1986). *Atlas skalních, zemních a půdních tvarů*. Academia, Praha, 386 s.

ŠIMÍČEK, M., (2014). Implementace metody Structure from Motion do UAV fotogrammetrie. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

VÁCHOVÁ B., (2023) Testování směrodatných odchylek měření totálních stanic s automatickým cílením v rámci geodetické mikrosítě. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. 55 s.

VILLANUEVA, J. K. S., BLANCO, A. C. (2019): Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SFM). In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives.

VONDRÁK, J. (2004) Geogézie II, modul I, geodetické cvičení II. Vysoké učení technické v Brně. 38 s.

VÚGTK. (2016) Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník/> (cit. 15. 1. 2024)

YAN, L., REN, D., XIE, H., WEI, P. (2022): Fusion Method of LiDAR Point Cloud and Dense Matching Point Cloud. Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers, 9, 49.

ZÁRUBA, Q., MENCL, V., (1969). Sesuvy a zabezpečení svahů. Academia, Praha 221 s

Datové zdroje

ARCDATA PRAHA, ArcČR 500, verze 3.3 (2016) <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500> (cit. 8.4.2024)

ČGS: Geologická mapa České republiky 1 : 500 000. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/arcgis/services/Geologie/geologicka_mapa500/MapServer/WmsServer

ČGS, Půdní mapa 1:50000. Dostupné z:

<https://mapy.geology.cz/pudy/>

ČÚZK (2017): ZABAGED – Výškopis- DMR 5G. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace. dostupné online z:

[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(g2cuelwfinfezjutggkaqiqbb\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(g2cuelwfinfezjutggkaqiqbb))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302)

ČÚZK: Geomorfologické jednotky. Dostupné z:

<https://ags.cuzk.cz/arcgis/rest/services/GeomorfologickeJednotky/MapServer>