

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra geotechniky

Autoreferát dizertačnej práce na získanie
akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

APLIKÁCIA BEZPILOTNÉHO SNÍMKOVANIA V STAVEBNÍCTVE A LOMOVOM HOSPODÁRSTVE

Ing. Tomáš Bukový

Žilina jún 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci externého doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Tomáš Bukový

Školiteľ: doc. Ing. Juraj Mužík, PhD.

Oponenti: 1. dr hab. inž. Violetta Sokoła-Szewioła, prof. PŚ
2. doc. Mgr. Milan Koreň, PhD.
3. doc. Ing. Milan Mikoláš, PhD.

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.

v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou spoločnou odborovou komisiou dňa

študijný odbor: stavebníctvo

študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda spoločnej odborovej komisie

OBSAH

ÚVOD	4
1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	4
2 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
2.1 Výber lokality a experimentálne prostredie:	5
2.2 Spracovanie údajov	6
3 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ	7
PROBLEMATIKY	7
3.1 Bezpilotné letecké systémy	7
3.2 Spracovanie fotogrametrických a skenovacích výstupov	8
3.3 Technické obmedzenia využívania UAV	9
4 TEORETICKÁ ČASŤ	9
4.1 Bezpilotné letecké systémy	9
4.2 Pozemné geodetické meranie	10
5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	10
5.1 Vstupné údaje a pracovné prostredie:	11
5.2 Projekt bol založený v sústave S-JTSK / Bpv.	11
5.4 Tvorba digitálneho modelu reliéfu (DEM)	11
5.5 Integrácia terestrických meraní	12
5.6 Analýza presnosti podľa morfológie terénu	12
6 ZÁVER	16
7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	17

ÚVOD

V poslednom desaťročí zaznamenali bezpilotné letecké systémy (UAV) výrazný rozmach v oblasti zberu geopriestorových údajov, najmä v technických odvetviach ako stavebníctvo, geodézia a ťažobný priemysel. Tieto technológie poskytujú efektívny, rýchly a bezpečný spôsob získavania údajov aj v náročných alebo rizikových podmienkach, kde tradičné geodetické prístupy narážajú na limity z hľadiska efektivity, dostupnosti alebo bezpečnosti.

V prostredí lomového hospodárstva, kde sa spracúvajú veľké objemy materiálu a prebiehajú dynamické zmeny v teréne, vzniká potreba kontinuálneho monitorovania produkcie, svahovej stability a celkovej bezpečnosti. UAV technológie sa v tomto kontexte ukazujú ako mimoriadne účinný nástroj. Príkladom praktickej aplikácie je vápenecový lom Ladce (okres Ilava), ktorý prevádzkuje spoločnosť Lafarge Cement, a.s. UAV systémy tu nachádzajú uplatnenie pri dokumentácii ťažobnej činnosti, presnom určovaní objemov, sledovaní morfológie a tvorbe detailných 3D modelov lomového prostredia.

Bezpilotné snímkovanie v lokalitách typu Ladce prináša možnosť:

- získavania aktuálnych, presne georeferencovaných ortofotografií a následného generovania 3D modelov,
- výpočtu objemov ťažby medzi dvoma časovými stavmi,
- monitorovania svahov, hald a skládok,
- overovania súladu ťažobnej činnosti s geologickou dokumentáciou a environmentálnou legislatívou.

Lom Ladce predstavuje vhodné testovacie prostredie na aplikáciu UAV technológií v reálnych podmienkach ťažby. Jeho rozmanitý reliéf, premenlivý povrch a potreba častého monitoringu poskytujú reprezentatívne podmienky na porovnanie UAV metód s tradičnými geodetickými a geologickými postupmi.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je komplexne analyzovať a porovnať možnosti využitia bezpilotných leteckých systémov (UAV) a klasických terestrických geodetických meraní v kontexte ťažobnej činnosti, s osobitným zameraním na aplikáciu v prostredí vápenecového lomu Ladce. Východiskom je potreba efektívneho, presného a nákladovo optimalizovaného získavania geopriestorových údajov, ktoré sú nevyhnutné pre riadenie a kontrolu ťažobných procesov, ako aj pre zabezpečenie súladu s technickými a environmentálnymi normami.

Dizertačná práca si kladie za cieľ najmä:

Analýzu a porovnanie klasických geodetických metód a metód využívajúcich bezpilotné prostriedky v kontexte lomového hospodárstva a stavebníctva. Práca sa zameriava na hodnotenie týchto metód z hľadiska presnosti, efektivity a ekonomických aspektov.

Špecifické ciele práce sú definované v súlade s upravenými tézami dizertačnej práce:

1. Analýza údajov získaných z klasických geodetických spôsobov merania a výsledkov získaných použitím bezpilotných prostriedkov pre špecifické požiadavky lomového hospodárstva resp. stavebníctva.
2. Porovnanie metód v kontexte náročnosti realizácie a spracovania údajov, presnosti merania a kvantity získaných údajov.
3. Zhodnotenie prínosov zberu údajov použitím inovatívnych bezkontaktných prístrojov v procesoch tvorby modelov reliéfu a ich vplyv na kvalitu a ekonomickosť tvorby 3D modelov.

2 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

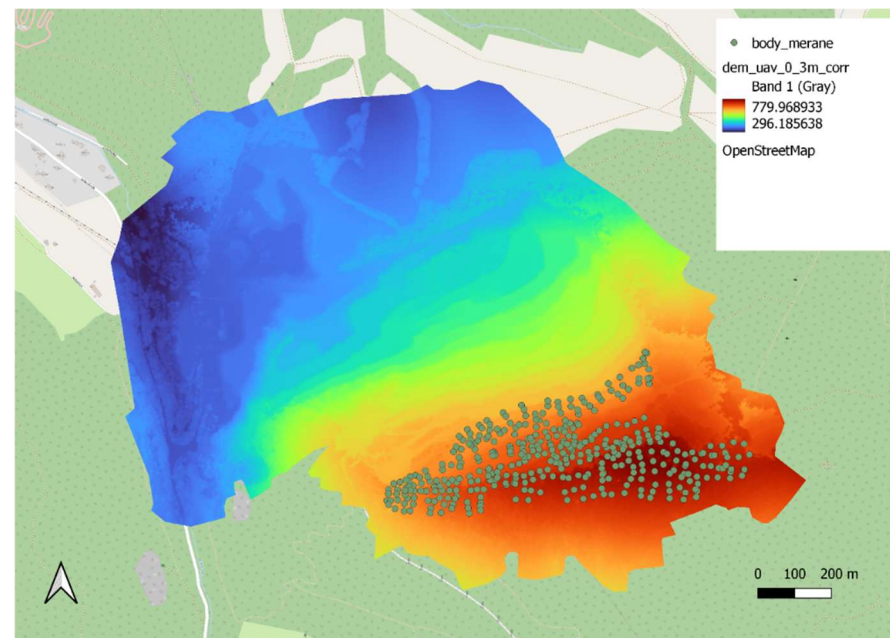
Metodický rámec dizertačnej práce bol navrhnutý s cieľom komplexne preskúmať možnosti využitia bezpilotného snímkovania v podmienkach reálnej lomovej prevádzky a porovnať ho s konvenčnými geodetickými metódami. Práca bola realizovaná ako experimentálna štúdia v podmienkach aktívneho vápencového lomu Butkov, pričom výskum bol rozdelený do niekoľkých logických fáz s dôrazom na systematickú akvizíciu, spracovanie, a analýzu priestorových údajov. [1] [2]

2.1 Výber lokality a experimentálne prostredie:

Lom Butkov predstavuje vhodné experimentálne prostredie vďaka členitému terénu, výrazným morfológickým diskontinuitám a súčasnému nasadeniu tradičných geodetických procesov. Lokalita s rozlohou vyše 75 hektárov umožnila otestovanie UAV snímkovania v širokom rozsahu, vrátane vertikálnych stien, vegetačne krytých plôch aj technologicky aktívnych zón. [3] Priestorové pokrytie je zobrazené na Obr. 2.1.

Kombinácia metód a princíp komparácie

Hlavným metodickým východiskom bolo porovnanie UAV fotogrametrie s terestrickými geodetickými metódami na úrovni presnosti, pokrytia, časovej a personálnej náročnosti a vhodnosti pre konkrétne aplikácie v lomovom hospodárstve. Dôraz sa kládol na komplementaritu metód, teda ich možnosť synergického využitia. [4]



Obr. 2.1 Priestorové pokrytie UAV DEM s vyznačením oblastí výskumu

Akvizícia údajov

Priestorové údaje boli získané dvojicou metód:

UAV snímkovanie pomocou dronu DJI Phantom 4 Pro, ktoré poskytlo 855 spracovateľných snímok s priemerným GSD ~3 cm/pix.

Terestrické merania (GNSS a totálna stanica), ktoré poskytli súbor 406 referenčných bodov s presnosťou $\pm 1-2$ cm.

2.2 Spracovanie údajov

Dáta z UAV boli spracované v softvéri Agisoft Metashape, kde prebehla aerotriangulácia, generovanie hustého mračna bodov a následná interpolácia digitálneho modelu reliéfu (DEM). Presnosť modelu bola overená porovnaním výškových hodnôt DEM s terestrickými bodmi pomocou štatistických nástrojov v QGIS. Hodnotila sa stredná kvadratická chyba (RMSE), priemerná absolútna chyba a maximálna odchýlka.

Presnosť a verifikácia

Overenie presnosti DEM prebehlo na základe rozdielov medzi výškami extrahovanými z UAV modelu a terestricky zameranými GCP (Ground Control Points). UAV DEM dosiahol RMSE_Z = 0,083 m, pričom najväčšie odchýlky boli evidované v zónach s nízkym kontrastom a ostrými morfológickými prechodmi.

Analýza časovej efektivity

Metodika zahŕňala aj časový rozbor pracovných fáz, čím sa preukázala 6,7-násobne vyššia plošná efektívnosť UAV metódy pri porovnateľnom časovom rozsahu (UAV workflow: 18,3 h vs. terestrické merania: 17,0 h).

Vyhodnotenie synergických prínosov

V záverečnej fáze metodiky bola vytvorená integrovaná výpočtová schéma, ktorá kombinuje výstupy z UAV a terestrických meraní. Cieľom bolo vytvoriť hybridný model s optimalizovaným pomerom medzi rozsahom pokrytia a presnosťou. Kombinovaný model dosiahol RMSE 4,1 cm a predstavuje prakticky využiteľný kompromis pre inžiniersko-geodetické aplikácie.

Navrhnutá metodika umožnila nielen technické porovnanie metód, ale aj strategické zhodnotenie ich vhodnosti v kontexte geodetických úloh v lomovom hospodárstve. Výsledky slúžia ako podklad pre formuláciu odporúčaní k zavádzaniu UAV technológií do praxe, pričom výskumný dizajn je reprodukovateľný aj pre iné podobné lokality.

3 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Súvislosť medzi geodetickými údajmi a geologickým prieskumom je mimoriadne úzka, najmä v inžinierskej a banskej geológii, ťažobnom priemysle a stavebníctve. Spoľahlivé určenie polohy, tvaru a objemu geologických štruktúr a surovinových telies si vyžaduje koordinovaný zber a interpretáciu priestorových (geodetických) a materiálových (geologických) dát. Bez prepojenia týchto disciplín by bolo nemožné dosiahnuť presnosť, ktorá je nevyhnutná pre hospodárne a bezpečné riadenie ťažobných a stavebných procesov.

3.1 Bezpilotné letecké systémy

V posledných rokoch došlo k dynamickému rozvoju bezpilotných leteckých systémov (UAV), ktoré predstavujú výraznú konkurenciu tradičným terestrickým metódam. UAV umožňujú rýchly zber veľkého množstva údajov a efektívne pokrytie rozsiahlych území, čím sa stávajú kľúčovým prvkom moderných geodetických a fotogrametrických postupov. Vďaka technologickému pokroku, dostupnosti senzorov

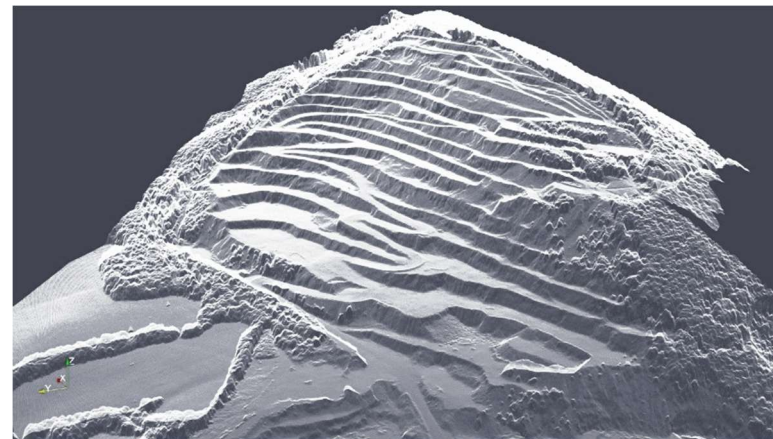
a pokročilým spracovateľským algoritmom našli UAV plnohodnotné uplatnenie v celom spektre činností od ťažby cez dokumentáciu až po rekultiváciu ťažobných priestorov.

Súčasný UAV určený pre geoinžinierske aplikácie disponujú vysokou mierou autonómie, presnosti a modularity. V praxi prevládajú kvadrokoptéry a pevné krídla vybavené GNSS modulmi pracujúcimi v režimoch RTK (Real-Time Kinematic) a PPK (Post-Processed Kinematic). RTK poskytuje centimetrovú až milimetrovú presnosť v reálnom čase, zatiaľ čo PPK dosahuje obdobnú presnosť v post-procesingu po prenose dát do počítača. Významnou výhodou UAV je aj absencia potreby rozsiahleho pozemného značenia.

Okrem štandardných RGB kamier sa stále častejšie nasadzujú LiDAR senzory, termovízne a multispektrálne kamery, ktoré rozširujú možnosti akvizície a analýzy dát aj v podmienkach nízkej viditeľnosti, vysokej členitosti terénu či hustého vegetačného pokryvu.

3.2 Spracovanie fotogrametrických a skenovacích výstupov

Spracovanie fotogrametrických a skenovacích výstupov zabezpečujú nástroje ako Paraview, Pix4Dmapper, Agisoft Metashape, DroneDeploy, či Bentley ContextCapture. Z týchto dát je možné generovať ortofotomapy a digitálne modely terénu (DTM); príklad takéhoto modelu je uvedený na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Model terénu

Diferenciálne analýzy viacerých časových snímok umožňujú presné odhady objemových zmien, čo je nevyhnutné pri plánovaní ťažby, výpočte kubatúr, monitorovaní svahovej stability a kontrole stavu lomových čelieb.

Prevádzka UAV v banskom priestore podlieha prísnej regulácii. V kategórii „špecifickú prevádzku“ je potrebné vypracovať analýzu rizík SORA, získať oprávnenie prevádzkovateľa a registrovať zariadenie. V praxi to predstavuje významnú administratívnu a personálnu záťaž, najmä pre stredné a menšie ťažobné podniky.

3.3 Technické obmedzenia využívania UAV

Technické obmedzenia sa prejavujú najmä v situáciách s veľkou prašnosťou, tieňovaním lomových čelieb a výrazným členením terénu, čo môže negatívne ovplyvňovať presnosť fotogrametrických výstupov. Zabezpečenie konzistencie a právnej akceptovateľnosti dát UAV voči štandardným geodetickým metódam zostáva otvorenou otázkou, ktorá si vyžaduje medziodborovú spoluprácu geoinformatikov, banských inžinierov, IT špecialistov a legislatívnych orgánov.

Bezpilotné letecké systémy priniesli do geodetickej a geologickej praxe nové možnosti rýchleho, presného a bezpečného zberu geopriestorových údajov. Ich implementácia v lome Ladce a v ďalších ťažobných a stavebných lokalitách potvrdzuje potenciál UAV ako efektívneho nástroja pre monitorovanie a optimalizáciu ťažobných procesov. Zároveň však pretrvávajú technické, legislatívne a organizačné výzvy, ktorých riešenie je nevyhnutné na úplné využitie prínosov tejto technológie.

4 TEORETICKÁ ČASŤ

Vývoj geodetických a meracích metód v posledných desaťročiach významne ovplyvnil aj oblasť dokumentácie územia a zberu priestorových dát. V kontexte využitia bezpilotných leteckých prostriedkov (UAV) a terestrických metód v stavebníctve a ťažbe sa ukazuje potreba podrobného preskúmania ich technických základov, možností nasadenia a komparácie s cieľom optimalizovať procesy snímkovania, spracovania a vyhodnocovania údajov. Teoretická časť práce preto zhrňuje kľúčové poznatky a metodické východiská, ktoré sú nevyhnutné pre porozumenie praktickej aplikácie UAV a terestrických metód v inžinierskej praxi.

4.1 Bezpilotné letecké systémy

Bezpilotné letecké systémy, ktoré sa v posledných rokoch rozšírili ako efektívny nástroj na získavanie geodát, umožňujú detailné snímkovanie z nízkych letových hladín s vysokou hustotou a presnosťou získaných údajov. V tejto súvislosti je

nevyhnutné zaoberať sa parametrami samotného UAV systému, ako sú typ senzora, rozlíšenie kamery, výška letu, prekrytie snímok či algoritmy fotogrametrického spracovania. Fotogrametria ako vedný odbor poskytuje základné teoretické rámce pre rekonštrukciu trojrozmerného modelu povrchu na základe dvojrozmerných snímok, pričom ortofotomapy, husté mračná bodov, digitálne modely terénu (DTM) a digitálne modely povrchu (DSM) predstavujú výstupy s vysokým využitím v praxi. [5] [6]

4.2 Pozemné geodetické meranie

Zároveň je potrebné venovať pozornosť pozemnému geodetickému meraniu, najmä metódam GNSS, totálnym staniciam a skenovacím technológiám, ktoré sa v mnohých prípadoch používajú ako referenčný zdroj presných údajov, alebo v kombinácii s UAV dátami. Terestrické metódy sú charakteristické svojou stabilnou presnosťou, možnosťou priamych meraní v ťažko dostupných lokalitách a významnou úlohou pri kalibrácii alebo validácii fotogrametrických modelov. Ich aplikácia je neoddeliteľnou súčasťou komplexného geodetického spracovania, najmä pri tvorbe geodetických bodových polí, výpočte objemových zmien či zabezpečení presnosti pri dlhodobom monitoringu zmien v ťažobných priestoroch. [6] [7]

Základom pre spoľahlivú integráciu oboch metód je dôkladná znalosť ich teoretických predpokladov, výhod a limitácií, ako aj schopnosť navrhnúť optimálny postup zberu a vyhodnotenia dát vzhľadom na konkrétny účel použitia. V práci sú preto ďalej analyzované metódy registrácie, georeferencovania a optimalizácie výstupov z UAV a terestrických meraní, vrátane spracovania bodových mračen, tvorby 3D modelov a importu do softvérového prostredia pre ďalšie analýzy.

Táto časť práce tak vytvára teoretický rámec pre následnú aplikačnú a analytickú časť dizertačného výskumu, kde sú uvedené praktické aplikácie UAV a terestrických metód v prostredí ťažobného lomu, vrátane ich komparácie z hľadiska presnosti, efektivity a hospodárnosti.

5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Táto kapitola dokumentuje kompletný pracovný postup spracovania priestorových údajov z UAV fotogrametrie a terestrických meraní v lome Butkov (apríl 2023) a nadväzuje na metodické východiská uvedené v Teoretickej časti. Cieľom experimentu bolo vytvoriť vysoko presný digitálny model reliéfu a overiť presnosť UAV metódy voči referenčným údajom získaným klasickými geodetickými postupmi.

5.1 Vstupné údaje a pracovné prostredie:

UAV dataset – 878 snímok (DJI Phantom 4 Pro, GSD ~ 3 cm/pix); po vizuálnej kontrole ostalo 855 snímok (97,4 %).

Terestrické údaje – 406 bodov zameraných kombináciou totálnej stanice

Sokkia SET 500 a GNSS Altus APS-3 (presnosť RTK ± 1 cm horiz./ ± 2 cm vert.).

Softvér – Agisoft Metashape Professional 2.1, Trimble Business Center, QGIS 3.36, Python skripty (kontrola EXIF, štatistiky).

Snímky boli ručne skontrolované v Adobe Lightroom; rozmazané, preexponované či nadbytočne pokrývajúce zábery (23 ks) boli odstránené. RAW súbory sa konvertovali do bezstratového formátu TIFF a autokorektúrou expozície sa vyrovnali rozdiely v jasových úrovniach. Finálny vstupný súbor obsahoval 855 TIFF snímok, pri ktorých bolo zabezpečené prekrytie ≥ 85 % pozdĺžne a ≥ 75 % priečne, čo garantovalo redundanciu pre spoľahlivú 3D rekonštrukciu.

5.2 Projekt bol založený v sústave S-JTSK / Bpv.

Kalibrácia kamery – self-calibration (ohnisková vzdialenosť = 8,8 mm, hlavný bod 0,01 mm od stredu, rad. skreslenie $k_1 = -0,082$).

Extrakcia a zväzovanie kľúčových bodov – algoritmus SIFT; vytvorené riedke mračno $\approx 1,2$ mil. bodov.

Georeferencia – 12 vlčovacích bodov (GCP) identifikovaných na min. 8 snímkach; bundle-adjustment znížil reprojekčnú odchýlku z 1,7 pix na 0,34 pix.

Presnosť bloku (RMSE): 0,028 m XY / 0,035 m Z.

5.3 Generovanie hustého mračna bodov

Metóda Multi-View Stereo s nastavením *High* (1/4 pôv. rozlíšenia); filtrácia odľahlých hodnôt *Moderate*.

- Výpočtový čas ≈ 12 h (CPU 32 jadier | GPU RTX 3080).
- Výsledok: 85 mil. bodov, priem. hustota 120 bodov $\cdot m^{-2}$, priem. vzdialenosť 0,09 m.
- Klasifikácia na „terén“, „vegetácia“, „budovy“, „šum“; manuálna revízia v kritických zónach (hrany etáží, technologické zariadenia).

5.4 Tvorba digitálneho modelu reliéfu (DEM)

Z klasifikovaných terénnych bodov bol interpolovaný DEM metódou IDW:

- Priestorové rozlíšenie 0,5 m; rozsah výšok 382,5 – 702,8 m n. m.
- Kontroly: hillshade, analýza sklonov, hydrologická konzistencia (bez uzavretých depresí).

Výstupy: GeoTIFF DEM, mapa sklonov, mapa expozícií.

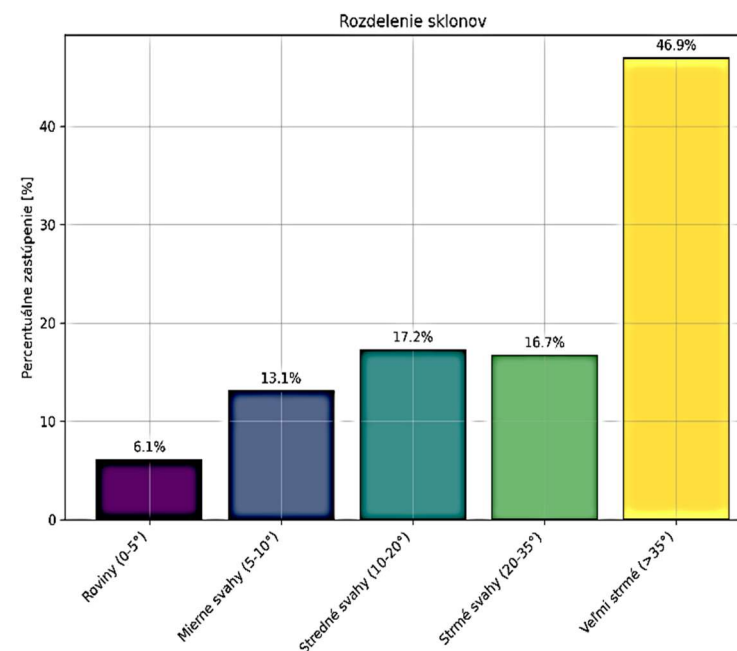
5.5 Integrácia terestrických meraní

Referenčné body (406 ks) boli importované z Trimble Business Center do QGIS. Z DEM sa extrahovali výšky na týchto bodoch; rozdiely (UAV DEM – GCP) slúžili na štatistickú verifikáciu:

Metóda	RMSE_Z (m)	MAE (m)	Max abs. odchylka (m)
UAV DEM vs. GCP	0,083	0,064	0,218

5.6 Analýza presnosti podľa morfológie terénu

Pri klasifikácii sklonových zón ($< 10^\circ$, $10\text{--}25^\circ$, $> 25^\circ$) sa nepreukázal štatisticky významný vzťah medzi sklonom a odchýlkou ($r = 0,021$; $p = 0,672$). Najvyššiu variabilitu vykázali tienisté svahy JV od vrchu Butkov, kde kontinuálne prechody textúr znižovali kvalitu korešpondencie v MVS. Presnosť podľa morfológie terénu je zobrazená na obr.5.1



Obr. 5.1 Morfometrická analýza

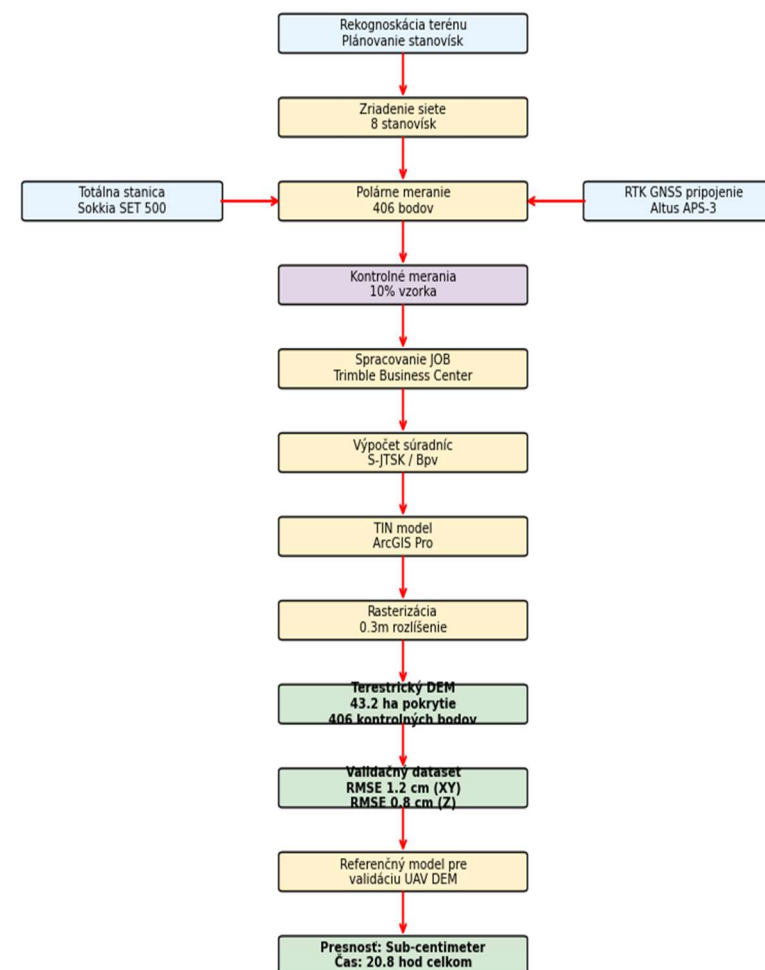
5.7 Časová efektivita pracovného postupu

Tab 5.1 Porovnanie časovej náročnosti metód

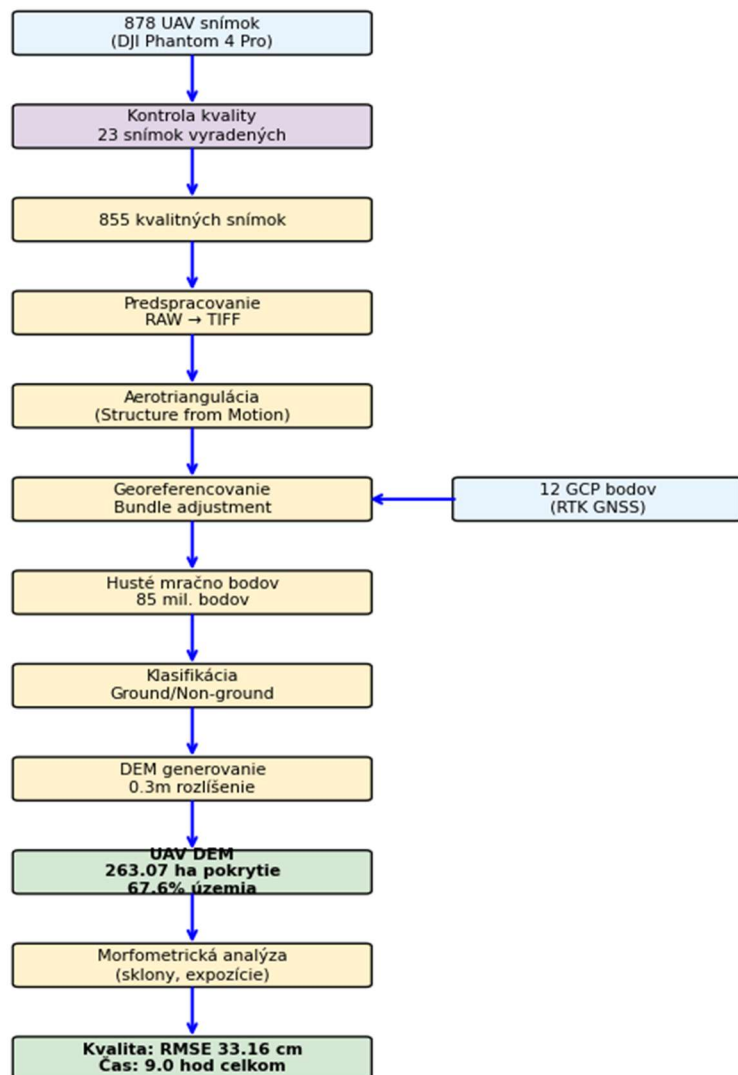
Parameter	UAV fotogrametria	Terestrické meranie	Pomer
Terénne práce			
Príprava techniky	0,5 hod	0,3 hod	1,7×
Vlastné meranie	1,2 hod	16,0 hod	13,3×
Dokončovacie práce	0,8 hod	0,5 hod	1,6×
Súčet terénnych prác	2,5 hod	16,8 hod	6,7×
Kancelárske spracovanie			
Import a kontrola	0,5 hod	0,3 hod	1,7×
Základné spracovanie	4,0 hod	2,5 hod	0,6×
Finálne výstupy	2,0 hod	1,2 hod	0,6×
Súčet spracovania	6,5 hod	4,0 hod	0,6×
Celkový čas	9,0 hod	20,8 hod	2,3×

Celkový súčet UAV workflow (zber + sprac.) 9,0 h v porovnaní s terestrickým 20,8 h, pričom UAV pokrývalo 5-násobne väčšiu plochu. Podrobné spracovanie je uvedené v Tab 5.1. Flowchart pre spracovanie údajov – UAV fotogrametria je zobrazený na obr.5.2 a Flowchart pre spracovaní e údajov – terestrické meranie na obr.5.3.

Experiment potvrdil, že UAV fotogrametria dokáže pri plnom pokrytí lomu dosiahnuť Z-presnosť ± 10 cm, čo postačuje na objemové bilancie a operatívne monitorovanie. Terestrické merania ostávajú nezastupiteľné v kritických zónach, kde je potrebná centimetrová alebo subcentimetrová presnosť, a slúžia ako etalón na validáciu UAV výstupov. Integrácia oboch metód prináša optimálny kompromis medzi rozsahom, presnosťou a časovou náročnosťou a predstavuje reprodučibilný model, ktorý je možné a vhodné používať aj pre iné prevádzky prevádzky. Komplexná analýza spracovaných dát z lomu Butkov poskytla empirický základ pre pochopenie komplementárnej povahy UAV fotogrametrie a terestrických geodetických metód. Kľúčové zistenia zhrnuje tabuľka 5.2.



Obr. 5.2 Flowchart pre spracovanie údajov – UAV fotogrametria



Obr. 5.3 Flowchart pre spracovaní e údajov – terestrické meranie

Tab 5.2 Syntetické porovnanie metód

Aspekt porovnania	UAV fotogrametria	Terestrické meranie	Optimálne využitie
Presnosť	RMSE 33,16 cm	RMSE 1,2 cm (XY)	Kombinácia podľa potreby
Pokrytie	263,07 ha (67,6%)	43,2 ha (bodové)	UAV + strategické body
Časová náročnosť	9,0 hod celkom	20,8 hod celkom	UAV pre plochy
Hustota údajov	120,5 bodov/m ²	0,0009 bodov/m ²	UAV pre kontinuitu
Ekonomická efektivita	0,035 hod/ha	1,58 hod/ha	UAV pre rutinnú prácu
Nezávislosť od počasia	Obmedzená	Vysoká	Terestrické ako backup
Bezpečnosť	Vysoká	Stredná	UAV v rizikových zónach

6 ZÁVER

Komplexný výskum aplikácie bezpilotného snímkovania v lomovom hospodárstve realizovaný v lome Butkov poskytol rozsiahlu empirickú databázu poznatkov, ktoré objektívne dokumentujú transformačný potenciál moderných geodetických technológií v kontexte tradičného ťažobného priemyslu. Trojročná analýza kombinácie UAV fotogrametrie s terestrickými geodetickými metódami potvrdila fundamentálnu hypotézu o synergických efektoch, kde celková hodnota kombinovaného prístupu presahuje súčet prínosov jednotlivých komponentov.

Empirické výsledky jednoznačne preukázali komplementárnu povahu analyzovaných metód. UAV fotogrametria s RMSE 33,16 cm poskytuje nezastupiteľné kompletne pokrytie 75 hektárov lomu s hustotou 120,5 bodov/m² a 6,7-násobne vyššou časovou efektívnosťou v porovnaní s terestrickými metódami. Terestrické meranie s RMSE 1,2 cm zabezpečuje referenčnú presnosť v kritických oblastiach a explicitnú reprezentáciu 87 morfológických diskontinuití nevyhnutných pre geotechnické analýzy. Kombinovaný model dosahuje RMSE 4,1 cm pri zachovaní kompletného územného pokrytia, čo predstavuje optimálny kompromis medzi presnosťou a efektívnosťou pre praktické aplikácie v lomovom hospodárstve.

Dizertačná práca úspešne splnila všetky tri stanovené tézy prostredníctvom systematickej analýzy údajov z klasických a inovatívnych geodetických metód, komplexného porovnania ich charakteristík a kvantifikácie prínosov pokročilých 3D modelovacích techník. Výsledky poskytujú solídny základ pre širšiu adopciu bezpilotného snímkovania v slovenskom ťažobnom priemysle a prispievajú k transformácii tradičného sektora smerom k digitalizovaným a automatizovaným prevádzkam.

Prínosom práce pre vedeckú komunitu je vytvorenie metodického rámca pre objektívne hodnotenie geodetických technológií v reálnych prevádzkových podmienkach, ktorý môže byť aplikovaný v iných lomových prevádzkach so podobnými charakteristikami. Pre priemyselnú prax práca poskytuje konkrétne implementačné postupy, ekonomické argumenty a strategické odporúčania podporujúce rozhodovanie o investíciách do modernizácie geodetických procesov.

Výsledky dizertačnej práce tak predstavujú významný príspevok k aplikovanému výskumu na pomedzí geodézie, lomového hospodárstva, informačných technológií a priemyselného inžinierstva, s priamym dopadom na efektívnosť, bezpečnosť a udržateľnosť ťažobného priemyslu na Slovensku.

7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] **Hladík, J.** (2020). Fotogrammetrie v teorii a praxi. Praha: České vysoké učení technické.
- [2] **Horáková, M., Uhlířová, L., Bureš, J.** (2021). Moderné meracie technológie v geodézii a kartografii. Bratislava: STU Publishing.
- [3] **Jansa, J. – Hofierka, J.** (2015). Aplikácia UAV systémov v geoinformatike a environmentálnom modelovaní. Košice: TUKE.
- [4] **Kraus, K.** (2004). Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. Berlin: Walter de Gruyter
- [5] **Černota, P.** (2021). *Fotogrametria a diaľkový prieskum Zeme*. STU Bratislava
- [6] **Luhmann, T. et al.** (2020). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter
- [7] **Mikita, T.** (2021). *UAV fotogrametria v inžinierskej geodézii*. VŠB-TUO Ostrava

PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY

V TLAČI

1, Článok

F. Cigáň, M. Buková, T. Bukový. "Physics-Informed Neural Network for 2D Steady Seepage" *TRANSCOM 2025: 16th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, 2025*.