

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**  
**Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie**

Studijní program: Aplikovaná geografie  
Studijní obor: Sociální geografie a geoinformatika



Vít Kadlec

**Stanovení objemu dřeva na venkovních skladovacích plochách  
metodou letecké fotogrammetrie**

Monitoring outdoor storage areas using aerial photogrammetry for  
determining wood volume

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Kolář, CSc.

Praha 2025

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji,

že jsem tuto bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval. Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity. Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Kladně dne 29. 4. 2025



.....

Vít Kadlec

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tento prostor bych rád využil k tomu abych poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Janu Kolářovi, CSc. za ochotu, trpělivost a cenné rady. Dále chci poděkovat RNDr. Jakubu Lysákovi, Ph.D. za velmi ochotnou a důležitou pomoc se sběrem a zpracováním dat. Poděkování si zaslouží i zaměstnanci Střediska dřevařské výroby Lesů ČZU, kteří svolili k provedení snímkování v jejich podniku a ochotně poskytli detailní data o skladových zásobách. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině a svým přátelům za podporu během celé doby mého studia.

## **ABSTRAKT**

Práce se věnuje využití bezpilotních letounů, fotogrammetrie a geografických informačních systémů za účelem přesného a efektivního vyhodnocení objemu skládek surového dřeva. V teoretické části jsou popsány principy UAV snímkování, tvorby ortofotomap a digitálních modelů povrchu, stejně jako metody práce s prostorovými daty v prostředí GIS. Pozornost je věnována také automatizaci výpočtů pomocí Python skriptů a možnostem minimalizace chyb v procesu analýzy.

Praktická část práce zahrnuje sběr dat ve Středisku dřevařské výroby Lesů ČZU v Jevanech, zpracování dat v softwaru Agisoft Metashape a ArcGIS Pro, tvorbu polygonových shapefilů jednotlivých skládek a následnou analýzu rozdílů mezi modelem povrchu a modelem terénu. Výpočty objemů byly realizovány pomocí automatizovaných skriptů, které umožnily rychlé, systematické a opakovatelné zpracování rozsáhlých datových sad. Výsledky byly přepočítány na prostorové metry a porovnány s inventarizačními údaji podniku.

Výsledky ukázaly vysokou shodu s oficiálními inventarizačními daty, přičemž byly identifikovány možné příčiny odchylek a navrženy způsoby optimalizace metodiky. Cíle práce byly splněny – byl navržen, implementován a ověřen kompletní metodický postup, který je přenositelný na další lokality a umožňuje efektivní a přesnou evidenci objemu zásob dřeva v praxi.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Agisoft Metashape, ArcGIS Pro, bezpilotní letoun, dálkový průzkum, digitální model povrchu, digitální model terénu, dron, skládka dřeva, fotogrammetrie, GIS analýza, lesnictví, ortofoto, Python skriptování, rastrová data, UAV

# **ABSTRACT**

This thesis focuses on the use of unmanned aerial vehicles (UAV), photogrammetry, and geographic information systems (GIS) for the accurate and efficient assessment of wood log pile volumes. The theoretical part outlines the principles of UAV-based aerial imaging, the creation of orthophotos and digital surface models (DSM), as well as methods for working with spatial data in GIS environments. Attention is also given to the automation of calculations using Python scripts and to strategies for minimizing errors throughout the analytical process.

The practical part of the thesis includes data collection at the University Forest Establishment of the Czech University of Life Sciences in Jevany, data processing in Agisoft Metashape and ArcGIS Pro, the creation of polygon shapefiles for individual log piles, and subsequent analysis of differences between the surface model and the terrain model. Volume calculations were carried out using automated scripts, enabling rapid, systematic, and repeatable processing of large datasets. The resulting volumes were converted to stacked cubic meters and compared with the University Forest Establishment official inventory records.

The results showed a high level of coherence with the official inventory records, while also identifying potential sources of deviation and proposing ways to optimize the methodology. The objectives of the thesis were achieved – a complete methodology was designed, implemented, and validated. The approach is transferable to other locations and enables efficient and precise tracking of wood stock volumes in practice.

# **KEYWORDS**

Agisoft Metashape, ArcGIS Pro, unmanned aerial vehicle, remote sensing, digital surface model, digital terrain model, drone, wood log piles, photogrammetry, GIS analysis, forestry, orthophoto, Python scripting, raster data, UAV

# OBSAH

ÚVOD.....	8
TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1. <u>Monitoring venkovních skladovacích ploch</u> .....	11
1.1 <u>Význam a využití v lesnictví a dřevařském průmyslu</u> .....	11
1.2 <u>Běžné způsoby stanovení objemu</u> .....	12
2. <u>Digitální modely terénu a povrchu (DMT, DMP)</u> .....	13
2.1 <u>Definice a rozdíly mezi DMT a DMP</u> .....	14
2.2 <u>Možnosti jejich využití při výpočtu objemů</u> .....	15
2.3 <u>Výhody a omezení jednotlivých přístupů</u> .....	16
3. <u>Fotogrammetrie a bezpilotní letouny (UAV)</u> .....	17
3.1 <u>Charakteristika použitých UAV</u> .....	17
3.2 <u>Princip sběru dat pomocí UAV</u> .....	18
4. <u>Softwarové nástroje pro zpracování obrazových dat</u> .....	19
4.1 <u>Agisoft Metashape: generování DMP a DMT, obecný princip</u> .....	19
4.2 <u>ArcGIS: využití pro tvorbu shapefile, předzpracování dat</u> .....	20
4.3 <u>Python (kódování segmentace a výpočtů)</u> .....	21
5. <u>Výpočet objemu skládek dřeva</u> .....	21
5.1 <u>Způsob výpočtu objemu pomocí rozdílu DMP a DMT</u> .....	22
5.2 <u>Vysvětlení prostorového metru</u> .....	22
5.3 <u>Přepočet hrubého objemu na čistý objem</u> .....	23
PRAKTICKÁ ČÁST.....	24
6. <u>Sběr dat a příprava podkladů</u> .....	24
6.1 <u>Popis lokality</u> .....	24
6.2 <u>Vybavení</u> .....	26
6.3 <u>Výčet vstupních dat</u> .....	27
7. <u>Zpracování dat v Agisoft Metashape</u> .....	27
7.1 <u>Důvody volby parametrů zpracování</u> .....	29
7.2 <u>Export rastrů pro další analýzu</u> .....	29
7.3 <u>Vysvětlení práce s body snímkování</u> .....	30
8. <u>Předzpracování dat v ArcGIS</u> .....	30
8.1 <u>Vytvoření shapefilů jednotlivých skládek</u> .....	31
8.2 <u>Vytvoření vrstvy oblasti zájmu</u> .....	32
9. <u>Automatizace výpočtu objemu – Python skriptování</u> .....	32

<u>9.1 Popis skriptů extent_area.py a segmentace.py</u> .....	33
<u>9.2 Krok 1: Načtení rastrů a shapefilů</u> .....	37
<u>9.3 Krok 2: Výpočet rozdílu mezi DMP a DMT</u> .....	37
<u>9.4 Krok 3: Vertikální segmentace a eliminace šumu</u> .....	38
<u>9.5 Krok 4: Výpočet objemu jednotlivých skládek</u> .....	39
<u>10. Vyhodnocení a interpretace výsledků</u> .....	40
<u>10.1 Výsledné objemy skládek</u> .....	40
<u>10.2 Přepočet na prostorové metry</u> .....	41
<u>10.3 Porovnání s inventarizačními daty podniku</u> .....	41
<u>10.4 Diskuse: Odchytky, důvody nepřesností, návrhy na zlepšení</u> .....	42
<u>10.5 Závěrečné shrnutí a aplikační možnosti výsledků</u> .....	44
<u>ZÁVĚR</u> .....	46
<u>SEZNAM zdrojů</u> .....	48
<u>SEZNAM obrázků</u> .....	51
<u>SEZNAM příloh</u> .....	51

# ÚVOD

Sledování objemu uskladněného dřeva na venkovních plochách představuje důležitou součást efektivního řízení dřevařské výroby. Přesné a pravidelné stanovení objemu skládek umožňuje lepší plánování výroby, logistiky i těžby. Tradiční metody měření objemu, jako jsou vizuální odhady nebo manuální měření, často bývají časově náročné, zatížené lidskými chybami a finančně nákladné při vyšší frekvenci opakování. Moderní technologie, jako jsou drony a fotogrammetrie, nabízejí nové možnosti pro rychlé, přesné a opakovatelné získávání prostorových dat o stavu skladovacích ploch. Využití metody digitálního modelování povrchu a segmentace obrazových dat pomocí geografických informačních systémů (GIS) vytváří základ pro automatizované stanovení objemu surového dřeva s relativně vysokou přesností.

Vývoj bezpilotních letounů, a především jejich klesající pořizovací náklady vedly v posledních letech k zásadnímu rozšíření využití UAV (Unmanned Aerial Vehicle) nejen v lesnictví a dřevařství. Drony umožňují efektivní a cenově dostupné pořizování dat s vysokým rozlišením, přičemž kombinace ortofotomap, digitálních modelů povrchu (DMP) a digitálních modelů terénu (DMT) vytváří komplexní podklady pro přesné měření objemů zájmových objektů. Snímkování venkovních skladovacích ploch z nízkých výšek nabízí unikátní výhodu v podobě zachycení detailních strukturálních vlastností jednotlivých skládek dřeva. Což při správné metodice vede ke zpřesnění odhadů zásob a možnosti častějšího či méně nákladného provádění inventur pro potřeby podniku. Pro účely efektivního zpracování těchto dat se využívají specializované softwary jako Agisoft Metashape pro tvorbu fotogrammetrických modelů a ArcGIS Pro pro správu, analýzu a tvorbu prostorových dat.

Rozdílová analýza DMP a DMT, identifikace hodnotových odskoků a filtrace šumů představuje přístup, který umožňuje eliminovat chyby způsobené nepřesností vstupních dat. Využití Python skriptů pro automatizované zpracování přináší další výhodu v podobě snadného opakování analýzy na různých datech bez nutnosti větších manuálních zásahů, což podtrhuje rostoucí význam digitalizace procesů ve výrobních podnicích.

Přesné stanovení objemu uskladněného dřeva má nejen přímý dopad na vnitropodnikové řízení zásob, ale také pozitivně ovlivňují obchodní a logistická rozhodnutí v rámci celého řetězce zpracování dřeva. Kvalitní a přesná data o zásobách jsou základním vstupem pro plánování těžby, optimalizaci přepravy a predikci kapacitních potřeb výroby. Metody založené na letecké fotogrammetrii přinášejí možnost přesného, rychlého a ekonomicky výhodného řešení této potřeby, a nabízejí tak podnikům zajímavou možnost, jak zvýšit svoji konkurenceschopnost.

Cílem práce je ověřit možnost přesného stanovení objemu dřeva sledováním venkovních skladovacích ploch prostřednictvím metody založené na analýze rozdílů mezi digitálním modelem povrchu (DMP) a digitálním modelem terénu (DMT). Práce si klade za úkol prověřit použitelnost kombinace UAV snímkování, fotogrammetrického zpracování v prostředí Agisoft Metashape, předzpracování dat v systému ArcGIS a následné automatizované analýzy v jazyce Python při určování objemů dřevních skládek na venkovních skladovacích plochách.

Cílem je vyhodnotit, zda lze touto metodou dosáhnout výsledků srovnatelných s tradiční podnikovou inventurou, a posoudit praktickou aplikovatelnost takto získaných dat v rámci optimalizace výroby a logistiky dřevařského podniku.

Výzkumnými otázkami práce jsou:

**VO1:** *„Jaká je míra shody mezi objemem skládek stanoveným metodou letecké fotogrammetrie a objemem zjištěným podnikovou inventurou?“*

Tato otázka se zaměřuje na porovnání dvou nezávislých způsobů určení objemu surového dřeva. Tradiční inventury a nové metody založené na analýze rozdílů DMP a DMT. Cílem je ověřit, zda výsledky získané metodou letecké fotogrammetrie odpovídají údajům, které podnik běžně využívá při evidenci zásob, a zda jsou odchylky v rámci akceptovatelného rozmezí pro praktické použití.

**VO2:** *„Jaký vliv má použitá metodika filtrace hodnotových odskoků v DMP na přesnost stanovení objemu skládek?“*

Tato otázka zkoumá, jak významná je potřeba odstranění šumu a extrémních hodnot při výpočtu objemů. Protože v rastrových datech vznikají různé anomálie (například odrazy, stíny, odlesky nebo kondenzace ve vzduchu), je důležité posoudit, jak aplikace filtrů ovlivňuje výsledný objem. Cílem této otázky je ověřit do jaké míry je filtrace nežádoucích odlehlých hodnot ovlivňujícím faktorem pro dosažení vyšší přesnosti.

**VO3:** „Je možné efektivně využít kombinaci dat pořízených běžným UAV snímkováním a následné analýzy v Pythonu pro automatizované stanovení objemu skládek bez nutnosti ručního zásahu?“

Tato otázka se zaměřuje na praktickou proveditelnost plné automatizace procesu. Cílem je zjistit, zda zpracování pořízených dat v Agisoft Metashape, příprava shapefilů v ArcGIS a následné běhy Python skriptů vedou k výsledkům, které nevyžadují rozsáhlou manuální korekci. Úspěšné ověření by znamenalo, že celý proces je vhodný pro rutinní nasazení v reálném provozu podniku.

V práci budou použity postupy, které spojí snímkování pomocí dronu, fotogrammetrické zpracování snímků, geografické informační systémy a automatizovanou analýzu dat. Nejdříve budou pořízeny snímky venkovních skládek dřeva bezpilotním letounem (dronem). Bude přitom zajištěno vysoké překrytí snímků. Dále budou s vysokou přesností zaměřeny kontrolní vlíčovací body (Ground Control Point, GCP), aby mohlo být při vytváření prostorového modelu co nejlepší přesnosti a co nejvyššího rozlišení.

Z nasnímaných dat bude v programu Agisoft Metashape vytvořen digitální model povrchu (DMP). Jako digitální model reliéfu (DMR) bude využita datová sada nadmořské výšky ČR INSPIRE volně dostupná ze serveru ČUZK (ČUZK 2025). DMP zobrazí skutečný povrch skládky včetně dřeva, zatímco DMT ukáže pouze podklad, na kterém dřevo leží. Rozdílem mezi těmito modely bude možné odvodit objem naskládaného dřeva.

V prostředí ArcGIS budou připraveny podklady pro výpočty. Bude vytvořeno ohraničení jednotlivých skládek pomocí shapefile souborů, které budou vymezovat oblast, ve které se bude výpočet provádět. Takto připravená data budou následně zpracována pomocí skriptů v jazyce Python.

Python skript bude sloužit k automatickému výpočtu rozdílu mezi DMP a DMT, odstranění chybných hodnot a sečtení objemu dřeva v jednotlivých skladištích. Výsledky budou přepočítány na prostorové metry (PRMR) a porovnány s inventurou poskytnutou podnikem, aby bylo možné ověřit přesnost celého postupu.

# TEORETICKÁ ČÁST

## Monitoring venkovních skladovacích ploch

Monitorování venkovních skladovacích ploch je proces, který využívá prostorová data k zachycení a sledování změn v objemu materiálu umístěného pod širým nebem. V podmínkách dřevařského provozu se tento postup stává důležitým prostředkem, jak získat aktuální informace o množství dřevěné suroviny. Podle Avery a Burkarta (2002) patří k důležitým znakům kvalitního měření schopnost snímat velké plochy rychle, přesně a opakovatelně, což moderní technologie umožňují. Snímkování drony a následné zpracování dat nabízejí cestu k automatizaci tohoto procesu bez nutnosti fyzického přístupu ke každé jednotlivé skládce. Využití bezpilotních letounů pro odhad zásob dřeva ve skladovacích areálech se ukázalo jako účinná metoda, která výrazně zrychluje sběr dat a snižuje potřebu fyzického měření, jak ukazují výsledky pilotních studií v Amazonii (Locks et al., 2017).

Postupy založené na dálkovém průzkumu Země hrají při sledování venkovních ploch zásadní úlohu. Snímkování ze vzduchu umožňuje zachytit fyzické charakteristiky povrchu s vysokou mírou podrobnosti a následně je analyzovat bezprostředně po jejich pořízení. Díky tomu lze operativně sledovat stav zásob, reagovat na změny a optimalizovat hospodaření s materiálem. Dálkový průzkum je navíc vhodný i pro opakovaná měření, což umožňuje sledovat dynamiku pohybu materiálu na ploše v čase. Významným pokrokem v oblasti sledování venkovních ploch bylo nasazení digitálních modelů terénu a povrchu. 3D rekonstrukce povrchu založená na fotogrametrii umožňuje získávat nejen snímky, ale také přesné prostorové modely, které se následně využívají pro kvantifikaci změn objemu. Tento přístup eliminuje závislost na subjektivních odhadech a posouvá monitoring na vyšší úroveň přesnosti.

Technologický rozvoj v oblasti geoinformatiky otevřel nové možnosti při monitorování skladovacích ploch. Podle Bolstada (2019) spočívá hlavní výhoda moderních metod v kombinaci prostorového zobrazení s možností analýzy dat v geografických informačních systémech. Takto získaná data lze snadno spravovat, porovnávat a využívat pro podporu rozhodovacích procesů, což přináší vyšší efektivitu do provozního řízení zásob surového dřeva.

## Význam a využití v lesnictví a dřevařském průmyslu

V prostředí lesnictví a dřevařského průmyslu má sledování objemu venkovních skládek zásadní vliv na plánování těžby, manipulaci se surovinou i obchodní vztahy. Podle Franklina (2001)

přesné a aktuální informace o stavu zásob umožňují lepší plánování výroby a snižují riziko vzniku provozních problémů v důsledku nedostatku surovin. Zároveň umožňují podniku přesně reagovat na změny poptávky trhu a efektivně řídit logistiku.

Význam využití moderních monitorovacích metod se odráží také v oblasti inventarizace surového dřeva. Gómez et al. (2019) upozorňují, že tradiční přístupy k měření jsou často časově náročné, zatímco snímkování drony a následné fotogrammetrické zpracování dat nabízí rychlejší a méně nákladnou alternativu. Takové metody nacházejí uplatnění především tam, kde je třeba provádět pravidelná opakovaná měření nebo sledovat rozsáhlé skladovací areály.

Nasazení UAV technologií a pokročilého zpracování obrazových dat přináší novou úroveň kontroly nad tokem surovin v rámci celého zpracovatelského řetězce. Hildebrandt (1996) vysvětluje, že letecké snímkování umožňuje nejen přesné mapování skládek, ale i sledování jejich změn v čase, což je důležité pro hodnocení produktivity, plánování těžby a obchodní strategii podniku. Automatizace sběru dat a jejich rychlé vyhodnocení zvyšuje plynulost výrobních procesů. Výsledky dálkového snímání nočního osvětlení ukazují, že průmyslová produkce dřeva je možné sledovat prostřednictvím intenzity světelného záření (Jarron et al., 2022).

Význam využívání těchto metod roste v souvislosti s potřebou větší transparentnosti a zpřesnění evidenčních procesů. Lillesand et al. (2015) zdůrazňují, že kombinace snímkování, fotogrammetrie a geografických informačních systémů vytváří spolehlivý nástroj pro správu dat o objemu dřevní suroviny. Tím se podporuje nejen vnitropodnikové řízení, ale i komunikace se zákazníky, partnery a kontrolními orgány.

## **Běžné způsoby stanovení objemu**

Tradiční způsoby stanovení objemu surového dřeva vycházejí především z ručního měření jednotlivých kmenů nebo celých skládek. Podle Wolfa a Dewitta (2000) se běžně využívají metody odhadu objemu na základě průměrných rozměrů a délek jednotlivých kusů. Tyto postupy jsou ovšem náchylné k chybám způsobeným lidským faktorem a vyžadují značné množství času, zejména při inventarizaci větších zásob.

Další možností, jak stanovit objem skládky, je měření obrysových tvarů a profilů pomocí geodetických přístrojů. Li et al. (2005) popisují techniku sběru výškových dat ve vybraných bodech a jejich následné interpolace za účelem vytvoření odhadu objemu. I přes vyšší přesnost oproti jednoduchému měření průměrů zůstává tento způsob pracný a vyžaduje fyzický přístup ke skládkám, což omezuje jeho využitelnost při častějších kontrolách.

V posledních desetiletích se rozšířilo využívání dálkového průzkumu a fotogrammetrie jako efektivnější alternativy. Jensen (2007) konstatuje, že snímkování z nízkých výšek a následné fotogrammetrické zpracování dat umožňuje generování digitálních modelů povrchu, které slouží jako podklad pro přesné a rychlé stanovení objemu skládek. Tento přístup minimalizuje potřebu fyzického kontaktu a snižuje pracnost celého procesu.

Přesnost odhadu objemu dřevní suroviny metodou fotogrammetrie je ovlivněna nejen kvalitou vstupních dat, ale také kvalitou samotných skládek, přičemž větší a lépe uspořádané skládky vykazují menší odchylky měření (Berendt et al., 2021).

## Digitální modely terénu a povrchu (DMT, DMP)

Digitální modely terénu a digitální modely povrchu patří mezi základní výstupy dálkového průzkumu Země a fotogrammetrie. Podle Longley et al. (2015) slouží tyto modely jako hlavní datové vrstvy v geografických informačních systémech a podporují široké spektrum analýz, od hydrologického modelování po výpočty objemů materiálu. DMT zachycuje skutečný tvar terénu bez nadzemních objektů, zatímco DMP zahrnuje všechny prvky přítomné na povrchu, jako jsou budovy, vegetace nebo skládky.

Následující obrázek ukazuje rozdíl mezi digitálním modelem povrchu (DMP), který zahrnuje všechny objekty na povrchu, a digitálním modelem terénu (DMT), který reprezentuje samotný terén bez nadložních prvků.

**Obrázek 1:** Digitální modely terénu a povrchu



**Zdroj:** Pisano (2022)

Porovnání různých typů výškových modelů ukazuje, že použití stereoskopických snímků, satelitních dat a radarového snímání poskytuje rozdílnou úroveň přesnosti při určování výšky porostu a modelování terénu (Mette et al., 2017).

V současné praxi se generování DMT a DMP stále častěji realizuje metodami fotogrammetrie využívající UAV technologie. Gómez et al. (2019) uvádějí, že kombinace vysokého prostorového rozlišení snímků a hustého překrytí umožňuje rekonstruovat detailní 3D modely terénu i objektů na jeho povrchu. Tento postup se ukazuje jako velmi vhodný právě v aplikacích zaměřených na monitorování zásob materiálu.

Význam digitálních modelů v oblasti přírodních zdrojů potvrzuje i Rocchini (2013), který zdůrazňuje jejich využitelnost při analýze prostorových vztahů v krajině. Možnost odlišit terén od nadložního materiálu přináší nové příležitosti v mnoha oborech, včetně monitorování změn objemu skládek v dřevařském sektoru. DMT i DMP se díky tomu staly standardními produkty při zpracování dat z UAV.

Vývoj softwarových nástrojů pro generování a analýzu digitálních modelů podpořil širší využití DMT a DMP i v méně tradičních aplikacích. Yakar (2022) říká, že programy jako Agisoft Metashape umožňují relativně snadnou tvorbu vysoce přesných modelů terénu i povrchu, čímž se tyto postupy stávají dostupné i pro menší podniky a instituce bez potřeby specializovaného hardwaru.

## **Definice a rozdíly mezi DMT a DMP**

Digitální model terénu představuje numerické vyjádření výškové struktury přirozeného povrchu Země bez nadzemních objektů. Jensen (2007) vysvětluje, že při tvorbě DMT se odstraňují všechny prvky jako jsou stromy, budovy nebo skládky, aby byla zachycena skutečná topografie území. Tento model slouží jako základní vrstva pro mnoho geografických a environmentálních analýz.

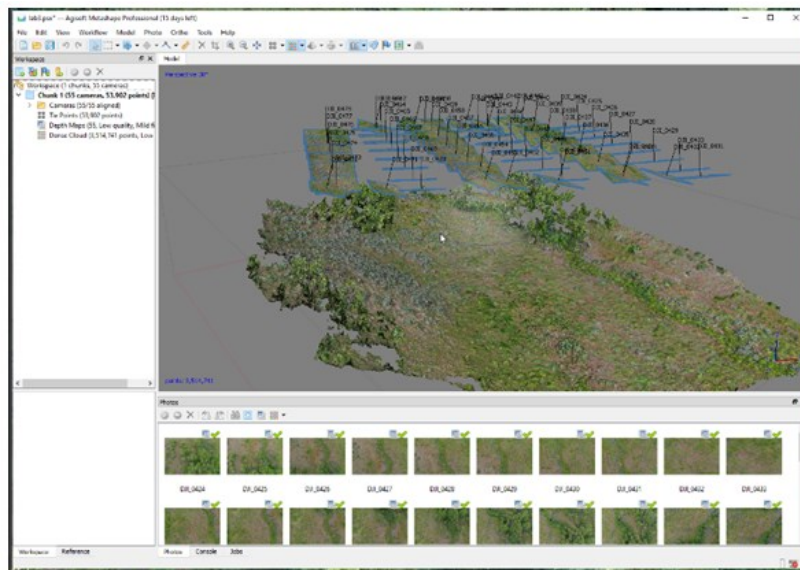
Další obrázek zobrazuje 3D model terénu vytvořený pomocí softwaru Agisoft Metashape. Model byl generován z fotografií pořízených dronem a ukazuje detailní rekonstrukci povrchu terénu včetně nadzemních objektů. Ilustrace slouží k demonstraci rozdílů mezi digitálním modelem terénu (DMT), který reprezentuje samotný terén bez nadložních prvků, a digitálním modelem povrchu (DMP), který zahrnuje všechny objekty na povrchu.

Naopak digitální model povrchu zachycuje kompletní výškový profil včetně všech objektů přítomných nad zemí. Lillesand et al. (2015) říkají, že DMP je výsledkem snímání, při kterém

jsou všechny prvky nad povrchem považovány za součást modelu. Tento přístup je vhodný při mapování urbanizovaných oblastí, hustých lesů nebo skladovacích ploch.

Rozdíl mezi DMT a DMP je zásadní při výpočtu objemů, protože DMT poskytuje referenční rovinu pro výpočet výškových změn. Franklin (2001) zdůrazňuje, že správné odlišení těchto dvou typů modelů je nezbytné pro přesnou analýzu změn objemu, ať už se jedná o monitoring těžby dřeva, pohyby půdy nebo růst vegetace.

**Obrázek 2:** Rozdíly mezi DMT a DMP



**Zdroj:** UI Drone Lab (2024)

Technická náročnost tvorby DMT a DMP se liší v závislosti na použité metodě sběru dat a postprocessingu. Mohd (2022) uvádí, že vytvoření kvalitního DMT vyžaduje dodatečné filtrační kroky na odstranění nadzemních prvků, zatímco DMP lze generovat přímo z hustého mračka bodů bez další editace. Správný výběr postupu závisí na účelu analýzy a charakteru snímaného území.

## **Možnosti jejich využití při výpočtu objemů**

Digitální modely terénu a povrchu se běžně využívají pro odhad objemu materiálu uloženého na venkovních plochách. Wulder a Franklin (2020) uvádějí, že rozdíl mezi výškou DMP a DMT lze interpretovat jako nadložní materiál, jehož objem je možné vypočítat integrací výškových rozdílů přes definovanou plochu. Tento postup je využíván nejen v lesnictví, ale také v těžbě, stavebnictví a při monitoringu skládek.

Ve studiích zaměřených na geomorfologické procesy bylo potvrzeno, že použití digitálních modelů povrchu a terénu umožňuje efektivně kvantifikovat změny objemu sedimentů, což naznačuje široké možnosti využití těchto technik i v jiných odvětvích (Stokes et al., 2018).

Výpočet objemů založený na rozdílové analýze digitálních modelů je efektivní metodou, jak kvantifikovat změny v prostoru bez nutnosti fyzických měření. Rocchini (2020) upozorňuje, že metodika založená na rastrových výškových modelech umožňuje získat přesné výsledky při relativně nízkých nárocích na technické vybavení. Významnou výhodou je také možnost opakovaného vyhodnocení dat v různých časových intervalech.

Díky pokročilému zpracování prostorových dat v GIS prostředích lze objemy vypočítávat s vysokou mírou přesnosti. Bolstad (2019) konstatuje, že současné nástroje GIS umožňují nejen výpočet samotných objemů, ale také jejich automatizovanou správu, vizualizaci a propojení s dalšími atributy, jako jsou druhy skladovaného materiálu nebo jeho kvalita.

Využití rozdílových analýz DMP a DMT je také důležité při validaci výsledků měření a optimalizaci procesů. Gómez et al. (2019) vysvětlují, že správná kalibrace modelů, výběr vhodného rozlišení rastrů a pečlivá segmentace analyzovaných oblastí jsou důležitými kroky, které přímo ovlivňují kvalitu výpočtu objemu a minimalizují chyby.

## **Výhody a omezení jednotlivých přístupů**

Použití digitálních modelů pro výpočet objemů přináší řadu výhod, především vysokou přesnost a rychlost získávání dat. Rocchini (2013) zdůrazňuje, že využitím metod dálkového průzkumu lze sledovat rozsáhlé oblasti bez nutnosti fyzického přístupu, což šetří čas i náklady. Výhodou je také možnost sledování dynamických změn v krátkých časových úsecích.

Na druhou stranu, práce s digitálními modely vyžaduje dostatečnou kvalitu vstupních dat. Franklin (2001) upozorňuje, že nepřesnosti v měření, šum v datech nebo chyby při rekonstrukci modelů mohou vést k významným odchylkám ve výsledcích. Kvalitní vstupy jsou tedy základním předpokladem pro dosažení spolehlivých výstupů.

Dalším omezením je nutnost odborné znalosti při interpretaci výsledků. Lillesand et al. (2015) konstatují, že správné vyhodnocení rozdílů mezi DMT a DMP vyžaduje pochopení prostorových vztahů a znalost vlastností analyzovaného prostředí. Chybná interpretace může vést k nesprávným závěrům o objemu nebo pohybu materiálu.

Vyšší nároky na zpracování dat a výpočetní výkon představují rovněž určitou překážku při nasazení těchto metod.

## **Fotogrammetrie a bezpilotní letouny (UAV)**

Fotogrammetrie v kombinaci s bezpilotními letouny představuje efektivní způsob pořizování prostorových dat ve vysokém rozlišení. Franklin (2001) uvádí, že díky technickému pokroku v oblasti snímací techniky a pozičních systémů (GNSS) umožňuje UAV fotogrammetrie rychlé a přesné získávání dat bez nutnosti rozsáhlé přípravy terénu. Tento postup se ukázal jako mimořádně vhodný tam, kde je požadována častá aktualizace dat a flexibilní plánování snímkovacích misí.

Nasazení UAV ve fotogrammetrii změnilo tradiční přístupy k tvorbě digitálních modelů terénu a povrchu. Gómez et al. (2019) vysvětlují, že bezpilotní systémy umožňují pořizovat snímky s překrytím a rozlišením, které běžné satelitní nebo klasické letecké systémy nedosahují. UAV snímkování je tím pádem ideálním nástrojem pro tvorbu podkladů pro výpočty objemů materiálu na skladovacích plochách.

Význam UAV fotogrammetrie vzrostl také díky dostupnosti softwarových řešení, která podporují automatizované zpracování snímků. Yakar (2022) uvádí, že programy jako Agisoft Metashape umožňují vytvářet z UAV dat hustá mračna bodů, z nichž je možné rekonstruovat jak digitální modely povrchu, tak i modely terénu. Tento přístup poskytuje uživatelům prostorovou informaci ve formě, která je přímo využitelná pro následné analýzy.

Využití UAV ve fotogrammetrii se neomezuje jen na snímkování, ale pokrývá celý proces sběru a vyhodnocení dat. Rocchini (2020) konstatuje, že moderní postupy integrují plánování misí, samotné snímkování a zpracování výsledků do jednoho uceleného pracovního postupu. Díky tomu lze získat kvalitní prostorová data v kratším čase a s nižšími náklady než při použití tradičních metod.

## **Charakteristika použitých UAV**

Bezpilotní letouny využívané pro účely fotogrammetrie a sběru dat se vyznačují specifickými technickými parametry. Gómez et al. (2019) upozorňují, že mezi hlavní požadavky na UAV patří stabilita letu, možnost autonomního plánování trajektorie a dostatečná nosnost snímacích zařízení. Tyto vlastnosti jsou zásadní pro dosažení kvalitních snímků a přesných prostorových modelů. Autonomní plánování trajektorie však není podmínkou, pro potřeby této práce stačilo manuální nasnímkování především z důvodu relativně malé velikosti zájmového území.

Výběr vhodného UAV pro fotogrammetrické aplikace je úzce spojen s cíli sběru dat a charakteristikou snímaného území. Wulder a Franklin (2020) popisují, že multirotorové drony

se uplatňují tam, kde je potřeba vysoká manévrovatelnost a přesnost snímání na malých plochách, zatímco letouny s pevnými křídly jsou vhodné pro pokrytí větších oblastí při dlouhodobých letech.

Technologický pokrok v oblasti UAV vedl k integraci pokročilých pozičních systémů a senzorů přímo do platformy. Mohd (2022) vysvětluje, že dnešní bezpilotní systémy často využívají kombinaci GNSS přijímačů, inerciálních měřících jednotek a kvalitních optických senzorů, což umožňuje sběr dat s vysokou geolokační přesností a minimálními odchylkami.

Bezpilotní letouny se staly běžným nástrojem i díky zjednodušenému ovládní a vyšší dostupnosti na trhu. Rocchini (2020) konstatuje, že moderní UAV systémy jsou navrženy tak, aby umožnily uživatelům snadné plánování snímkovacích misí prostřednictvím intuitivních aplikací, což snižuje nároky na odborné znalosti obsluhy a rozšiřuje okruh potenciálních uživatelů.

## **Princip sběru dat pomocí UAV**

Sběr dat pomocí UAV vychází z plánovaného letu, během něhož dron pořizuje soubor snímků s vysokým překrytím. Gómez et al. (2019) vysvětlují, že snímky se pořizují pod určitým úhlem tak, aby bylo možné vytvořit stereopáry pro trojrozměrnou rekonstrukci povrchu. Tento způsob snímkování umožňuje generovat hustá mračna bodů, která slouží jako podklad pro tvorbu modelů terénu a povrchu.

Plánování mise je zásadní pro zajištění kvality sběru dat. Wulder a Franklin (2020) upozorňují, že předpokladem úspěšného snímkování je správné nastavení výšky letu, rychlosti dronu a trasy přeletů, aby bylo dosaženo požadovaného překrytí snímků a optimální kvality výsledného modelu. Správné plánování výrazně ovlivňuje přesnost a využitelnost výstupních dat.

Pořízení snímků je pouze první částí celého procesu. Mohd (2022) konstatuje, že následné kroky zahrnují přenos dat, jejich organizaci a přípravu pro zpracování v specializovaném softwaru. Každý snímek musí být správně geolokalizován, což se provádí pomocí dat z GNSS systémů a případných pozemních referenčních bodů, pokud je požadována vyšší přesnost.

Proces sběru dat je zakončen vytvořením fotogrammetrického modelu, který slouží jako základ pro analýzy. Rocchini (2020) vysvětluje, že výsledné produkty, jako jsou ortofotomapy, digitální modely terénu a povrchu nebo 3D modely, lze dále využívat pro výpočty objemů, analýzu změn krajiny či správu majetku v dřevařském a lesnickém sektoru.

## **Softwarové nástroje pro zpracování obrazových dat**

Zpracování obrazových dat vyžaduje použití specializovaných softwarových nástrojů, které umožňují převod snímků do podoby prostorových modelů a následnou analýzu. Longley et al. (2015) vysvětlují, že moderní softwary kombinují funkce pro fotogrammetrii, geografické informační systémy i pokročilou vizualizaci dat, čímž podporují komplexní pracovní postupy od sběru až po interpretaci výstupů.

Významným přínosem současných softwarových řešení je možnost automatizovaného zpracování velkých objemů dat. Rocchini (2020) konstatuje, že díky pokročilým algoritmům lze rychle a efektivně generovat hustá mračna bodů, digitální modely a ortofotomapy i z rozsáhlých datových sad. Tento pokrok zpřístupnil fotogrammetrické a geoinformační analýzy širšímu spektru uživatelů.

Výběr vhodného softwaru závisí na požadavcích projektu, dostupných vstupních datech a požadované kvalitě výstupů. Bolstad (2019) upozorňuje, že zatímco některé nástroje jsou optimalizovány pro rychlé a jednoduché zpracování, jiné nabízejí hlubší analytické možnosti a pokročilou správu datových vrstev v prostředí GIS. Správná volba softwaru je zásadní pro dosažení požadovaných výsledků.

Softwarové platformy využívané pro zpracování obrazových dat musí být schopné efektivně pracovat s různými formáty dat. Franklin (2001) konstatuje, že interoperabilita, tedy schopnost nástrojů pracovat napříč různými datovými standardy a formáty, je důležitou podmínkou úspěšného nasazení v praxi. Schopnost integrovat výstupy z fotogrammetrie do GIS prostředí podstatně rozšiřuje možnosti jejich využití.

### **Agisoft Metashape: generování DMP a DMT, obecný princip**

Agisoft Metashape je specializovaný software pro fotogrammetrické zpracování obrazových dat, který umožňuje vytvářet vysoce přesné digitální modely terénu a povrchu. Yakar (2022) vysvětluje, že program pracuje na principu struktury z pohledu, kdy na základě překrývajících se snímků rekonstruuje prostorovou geometrii scény a vytváří husté mračno bodů.

Proces generování digitálního modelu povrchu začíná vyhledáním společných bodů na jednotlivých snímcích. Rocchini (2020) konstatuje, že na základě těchto bodů software spojuje snímky do jednoho souvislého modelu a následně interpoluje povrch, který obsahuje všechny nadzemní objekty. Výsledný DMP slouží k analýze výškových poměrů včetně přítomnosti skládek, budov a vegetace.

Výstupy z Agisoft Metashape jsou kompatibilní s běžnými GIS formáty (TIFF) a lze je dále zpracovávat v jiných aplikacích. Franklin (2001) uvádí, že možnost exportu ortofotomap, mračen bodů a digitálních modelů v různých formátech umožňuje propojit výsledky s geografickými informačními systémy a provádět nad nimi analytické operace, jako je výpočet objemů nebo sledování změn.

## **ArcGIS: využití pro tvorbu shapefile, předzpracování dat**

ArcGIS patří mezi nejrozšířenější softwarové platformy pro správu, analýzu a vizualizaci geografických dat. Bolstad (2019) vysvětluje, že systém umožňuje vytvářet a spravovat vektorové i rastrové vrstvy, přičemž shapefile je jedním ze základních formátů pro ukládání geometrie objektů včetně bodů, linií a polygonů.

Tvorba shapefile v ArcGIS je zásadní pro vymezení oblastí zájmu, jako jsou hranice jednotlivých skládek. Rocchini (2020) konstatuje, že správně připravené shapefile umožňují prostorově omezit výpočty, filtrovat data a provádět přesné analýzy v definovaných územích. Při práci s rastrovými daty je tímto způsobem možné jednoduše oddělit sledované objekty od okolního prostředí.

Předzpracování dat v ArcGIS zahrnuje také operace jako reprojekce, úprava rozlišení, maskování a tvorba klipovaných výstupů. Franklin (2001) upozorňuje, že tyto kroky jsou nezbytné pro zajištění konzistence datových sad, správného zarovnání vrstev a optimalizace dat pro následné zpracování. Kvalitní příprava podkladů je základem pro přesné a spolehlivé analýzy.

ArcGIS zároveň nabízí nástroje pro správu atributových dat a prostorových vztahů. Longley et al. (2015) konstatují, že možnost propojení prostorové informace s popisnými údaji o objektech výrazně rozšiřuje využitelnost datových sad v řízení skladovacích ploch, plánování logistiky a sledování vývoje zásob v čase.

## **Python (kódování segmentace a výpočtů)**

Použití programovacího jazyka Python v oblasti zpracování prostorových dat se stalo běžnou součástí pracovních postupů v GIS a fotogrammetrii. Rocchini (2020) vysvětluje, že Python umožňuje vytvářet skripty pro automatizaci rutinních úkolů, zrychlení výpočtů a zajištění opakovatelnosti analýz bez nutnosti manuálních zásahů.

Segmentace obrazových dat v Pythonu vychází z principu identifikace hodnot v rastru a jejich prostorového členění podle definovaných pravidel. Výpočty objemů v Pythonu probíhají na základě součtu rozdílů výšek mezi digitálním modelem povrchu a digitálním modelem terénu v definované oblasti. Gómez et al. (2019) vysvětlují, že tento postup je možné plně automatizovat, což umožňuje rychle zpracovat data z rozsáhlých území bez nutnosti ručního vyhodnocování.

Výhodou použití Pythonu je otevřenost, flexibilita a možnost propojení s jinými softwarovými nástroji. Mohd (2022) konstatuje, že skripty vytvořené v Pythonu lze snadno integrovat do pracovních postupů v prostředí ArcGIS, QGIS nebo samostatných aplikací, což podstatně zvyšuje efektivitu práce s prostorovými daty.

## **Výpočet objemu skládek dřeva**

Výpočet objemu skládek dřeva je důležitým krokem v řízení zásob a plánování výroby v dřevařských provozech. Gómez et al. (2019) uvádějí, že přesné určení objemu umožňuje lepší evidenci, efektivnější logistiku a transparentní obchodní transakce. Moderní postupy založené na prostorových datech přinášejí vyšší přesnost a snižují závislost na subjektivním odhadu.

Tradiční metody výpočtu objemu vyžadují přímé měření rozměrů skládek nebo jednotlivých kusů, což je časově náročné a v terénních podmínkách obtížné. Rocchini (2020) konstatuje, že použití digitálních modelů terénu a povrchu výrazně urychluje celý proces a umožňuje získat přesné údaje i u rozsáhlých a nepravidelných skládek. Využití těchto modelů přináší vyšší opakovatelnost měření.

Výzkum v oblasti využití UAV pro měření zásob dřeva ukázal, že 3D rekonstrukce skládek umožňuje s vysokou přesností určit objem uloženého materiálu, a to s odchylkou do 5 %, což odpovídá požadavkům průmyslové praxe (Locks et al., 2017).

Moderní softwarové nástroje umožňují automatizovaný výpočet objemu pomocí analýzy rozdílu výškových hodnot. Wulder a Franklin (2020) vysvětlují, že rozdíl mezi digitálním modelem povrchu, který zahrnuje skládku, a digitálním modelem terénu poskytuje potřebné

informace pro výpočet objemového množství uloženého materiálu. Tento postup je rychlý, efektivní a přesný.

Výpočet objemu skládek dřeva se stal běžnou součástí moderní správy přírodních zdrojů. Mohd (2022) upozorňuje, že integrace dat získaných UAV snímáním a jejich následná analýza v prostředí GIS a Pythonu nabízí praktický způsob, jak pravidelně aktualizovat údaje o stavu zásob a přizpůsobovat rozhodování aktuálním potřebám provozu.

## **Způsob výpočtu objemu pomocí rozdílu DMP a DMT**

Základním principem výpočtu objemu materiálu uloženého na venkovní ploše je analýza rozdílu mezi digitálním modelem povrchu a digitálním modelem terénu. Franklin (2001) vysvětluje, že DMP reprezentuje skutečný povrch včetně nadložního materiálu, zatímco DMT zachycuje samotný terén, a jejich rozdíl tedy přímo odpovídá výšce uloženého materiálu.

Proces výpočtu spočívá v odečtení výškových hodnot DMT od odpovídajících hodnot DMP na úrovni jednotlivých pixelů. Rocchini (2020) konstatuje, že takto získané rozdílové hodnoty se následně integrují přes definovanou plochu, což umožňuje určit celkový objem materiálu na daném území. Tento postup je plně automatizovatelný a poskytuje opakovatelné výsledky. Přesnost výpočtu objemu závisí na kvalitě vstupních dat a správné předzpracování modelů. Gómez et al. (2019) upozorňují, že pro minimalizaci chyb je nutné zajistit dobré překrytí snímků a vhodné nastavení parametrů klasifikace při tvorbě DMT. Použití filtrů pro odstranění extrémních hodnot dále zvyšuje přesnost výpočtu.

Výhodou využití rozdílové metody je její univerzálnost a možnost aplikace na různé typy materiálů a skladovacích ploch. Mohd (2022) konstatuje, že tento postup lze využít nejen v dřevařském průmyslu, ale i v těžbě, zemědělství či stavebnictví, kde je potřeba přesné a efektivní monitorování objemů materiálu.

## **Vysvětlení prostorového metru**

Prostorový metr (PRMR) je jednotka používaná k vyjádření objemu surového dřeva včetně mezer mezi jednotlivými kusy. Avery a Burkhart (2002) vysvětlují, že se jedná o měřítko, které zohledňuje reálný objem zabraný materiálem na skládce, včetně vzduchových kapes mezi kmeny nebo poleny. Tento způsob vyjádření objemu je běžně používaný v obchodní praxi i v evidenci zásob.

Prostorový metr umožňuje srovnatelné oceňování a evidenci dřevní suroviny v různých stádiích manipulace. Franklin (2001) konstatuje, že v oblasti dřevařství je nutné odlišovat hrubý objem

skládky a čistý objem samotné suroviny, což PRMR usnadňuje díky standardizovanému způsobu výpočtu a přepočtu.

Převod mezi různými objemovými jednotkami je zásadní pro správnou interpretaci výsledků měření. Bolstad (2019) upozorňuje, že prostorový metr není totožný s pevnostním kubickým metrem, protože nezohledňuje kompaktnost dřeva, ale pouze prostor, který materiál zabírá. Tento rozdíl je důležitý při obchodním vyjednávání a plánování zásob.

V praktických podmínkách se prostorový metr využívá nejen pro měření skládek, ale také při transportu surového dřeva. Rocchini (2020) uvádí, že logistické plánování, kapacita dopravních prostředků a fakturace dodávek se často odvíjejí právě od objemu vyjádřeného v prostorových metrech, což podtrhuje význam této jednotky v praxi.

### **Přepočet hrubého objemu na čistý objem**

Hrubý objem skládky představuje součet objemu surového dřeva a vzduchových mezer mezi jednotlivými kusy. Franklin (2001) vysvětluje, že pro účely evidence a obchodu je často nutné hrubý objem přepočítat na čistý objem, který odráží pouze skutečný hmotný materiál. Tento přepočet umožňuje přesnější plánování výroby a spravedlivější obchodní podmínky.

Přepočet se obvykle provádí pomocí koeficientů, které vyjadřují podíl skutečného objemu dřeva na celkovém hrubém objemu. Rocchini (2020) konstatuje, že tyto koeficienty se liší podle druhu dřeviny, způsobu skládkování, vlhkosti dřeva a dalších podmínek. Správná volba koeficientu je zásadní pro dosažení přesného přepočtu.

V prostředí dřevařského průmyslu existují tabulky a normy, které stanovují doporučené hodnoty koeficientů pro různé typy skládek. Gómez et al. (2019) upozorňují, že tyto hodnoty vycházejí z rozsáhlých empirických měření a jsou běžně používány v obchodní praxi k úpravě objemových údajů.

Automatizace výpočtů a přepočtů v softwarových nástrojích přináší vyšší rychlost a přesnost. Mohd (2022) konstatuje, že propojení dat získaných z UAV snímkování s přepočtovými koeficienty v rámci GIS prostředí nebo pomocí Python skriptů umožňuje snadnou aktualizaci údajů o zásobách a optimalizaci výrobních a logistických procesů.

# PRAKTICKÁ ČÁST

## Sběr dat a příprava podkladů

Pro sběr dat byla využita kombinace bezpilotního letounu (UAV) a digitálních kamer s vysokým rozlišením, což odpovídá požadavkům na přesnost při tvorbě fotogrammetrických prostorových modelů. Snímkování probíhalo systematicky s vysokým překryvem snímků v manuálním režimu v letové hladině 20 m nad povrchem tak, aby bylo možné následně rekonstruovat trojrozměrné modely s vysokou přesností. Vzhledem k charakteru skladovacích ploch bylo nutné zajistit optimální světelné podmínky a minimalizovat rušení obrazu stíny a odlesky. Snímky zachycovaly jednotlivé části celé zájmové oblasti pod úhlem 90° (Obrázek 4) a následně bylo pořízeno několik dalších snímků pod ostřejšími úhly, což umožnilo podrobnou rekonstrukci bez výpadků dat v požadované oblasti.

Data byla doplněna o vektorové podklady definující oblasti zájmu (AOI), což se odrazilo v přípravě shapefile souborů, jejichž tvorba probíhala v prostředí ArcGIS. Tyto soubory sloužily k přesnému vymezení hranic jednotlivých skládek, a tím ke správné lokalizaci výpočtů objemu. V rámci přípravy podkladů bylo nutné také zajistit kompatibilitu datových formátů pro navazující zpracování v softwaru Agisoft Metashape a následnou analýzu v Pythonu. Nedílnou součástí přípravy byla kontrola metadat a ověření přesnosti geolokace, protože chyby v souřadnicích by mohly významně zkreslit výsledky analýzy objemu. Dále byly vytvořeny masky oblasti zájmu ve formátu rastrů TIFF, které omezily výpočetní operace pouze na relevantní části území. Významným krokem přípravy podkladů bylo rovněž rozdělení dat na menší celky podle lokality a data pořízení, což usnadnilo správu rozsáhlého množství obrazového materiálu a umožnilo optimalizovat kapacitní nároky při následném zpracování.

## Popis lokality

Sledovaná lokalita se nachází v areálu střediska dřevařské výroby poblíž obce Jevany. Sklárky dřeva jsou situovány na rozsáhlých venkovních plochách s upraveným podložím. Charakter terénu je převážně rovinný, což vytváří vhodné podmínky pro provoz skladovacích areálů a zároveň pro rekonstrukci povrchového modelu. Okolní prostředí je tvořeno směsí průmyslových a lesních prvků, což bylo potřeba zohlednit při plánování trasy UAV, aby nedocházelo k rušení modelu okolní vegetací nebo jinými objekty mimo oblast zájmu.

Sklárky dřeva v této lokalitě jsou organizovány do pravidelných hromad s různou výškou a délkou, což ovlivnilo potřebu použití vysokého rozlišení snímků a pečlivé nastavení

parametrů rekonstrukce. Některé části areálu vykazovaly znaky čerstvých manipulací se surovým dřevem, což znamenalo proměnlivý stav zásob i v krátkých časových obdobích. Tyto okolnosti byly vzaty v úvahu při časování snímkování tak, aby bylo zachyceno co nejrelevantnější aktuální rozložení materiálu.

**Obrázek 3:** Body odkud byly pořízeny jednotlivé snímky



*Zdroj: vlastní zpracování*

V lokalitě byly rovněž instalovány body přesného zaměření (GCP – Ground Control Points), jejichž přítomnost umožnila výrazné zvýšení přesnosti prostorové rekonstrukce modelů. Kombinace dobře přístupného terénu, vhodného rozmístění skládek a podpory přesných referenčních bodů vytvořila ideální podmínky pro využití UAV technologií a následné aplikace fotogrammetrických a GIS metod. Lokalita Jevany tak představovala vhodný testovací polygon pro ověření navrženého postupu automatizovaného výpočtu objemů skládek.

## Vybavení

Použitým bezpilotním letounem byla kvadrokoptéra DJI Mavic 2 Pro s integrovanou kamerou Hasselblad o vysokém rozlišení 20 MP, konkrétně 5472 x 3648 pixelů. Součástí vybavení letounu je také velmi přesný GNSS senzor, který obstaral geotagging snímků, tedy přiřazení přesné prostorové informace ke každému pořízenému snímku, díky které bylo následně možné spojením více snímků rekonstruovat 3D model snímaného prostoru.

Let a snímkování bylo prováděno v manuálním režimu ve výšce 20 metrů nad povrchem. Přesnost snímání byla podpořena gyroskopickou stabilizací kamery, což vedlo k minimálnímu rozmazání snímků i při mírném větru.

Pro přesné zaměření referenčních vřícovacích bodů (GCP) byl využit vysoce přesný modulární GNSS přijímač Trimble R10 s využitím RTK VRS Now.

Následující snímek zachycuje jednotlivé skládky surového dřeva na manipulačním skladu, pořízenou pomocí bezpilotního letounu během sběru dat pro fotogrammetrické zpracování. Snímek sloužil jako podklad pro tvorbu ortofotomapy a následnou analýzu objemu skládek.

**Obrázek 4:** Ukázka leteckého snímku skládek dříví pořízeného dronem



*Zdroj: vlastní zpracování*

Pro zpracování snímků a tvorbu digitálního modelu povrchu byl použit software Agisoft Metashape, který umožňuje generování hustých mračen bodů, digitálních modelů terénu a povrchu i ortofotomap s vysokou mírou přesnosti. Pro tvorbu shapefilů a předzpracování rastrových dat byl využit software ArcGIS Pro, jehož nástroje pro správu geografických dat umožnily přípravu vrstev nezbytných pro výpočty objemů. Pro skriptování a automatizaci výpočtů byly využity knihovny jazyka Python, zejména numpy, osgeo gdal a osgeo ogr.

## **Výčet vstupních dat**

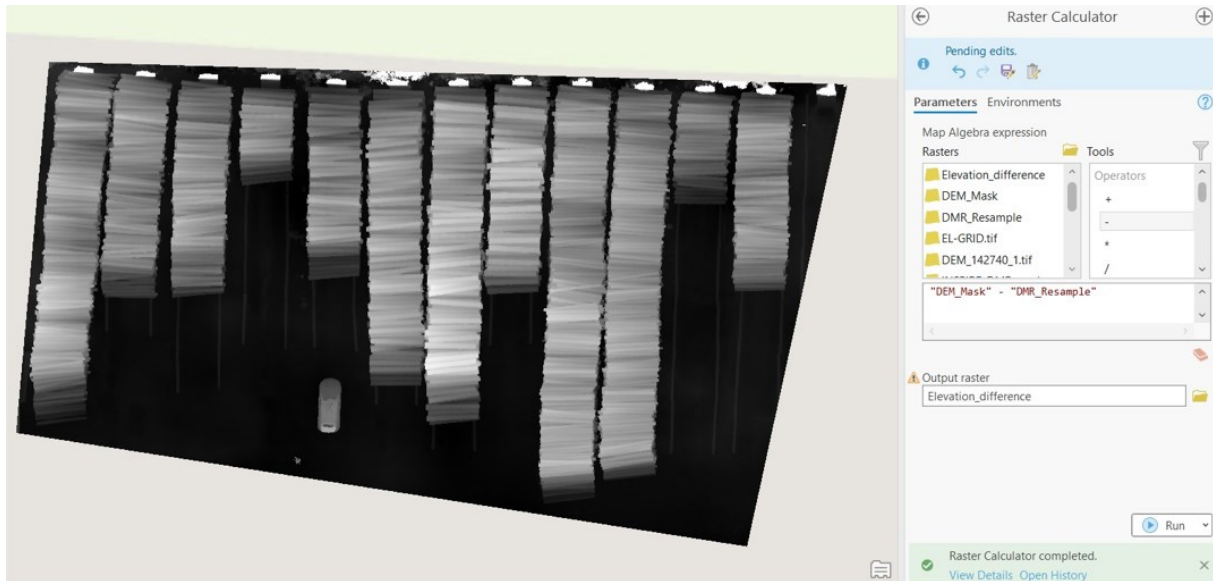
Základním vstupem pro software Agisoft Metashape byly soubory leteckých snímků ve formátu JPEG, obsahující fotografie skladovacích ploch. Výstupem ze softwaru Agisoft Metashape bylo rastrové ortofoto ve formátu TIFF. To následně posloužilo jako vstupní DMP pro analýzu v Pythonu. Dalším vstupem pro analýzu v Pythonu byla rastrová datová sada nadmořské výšky ČR INSPIRE ve formátu TIFF volně dostupná ze serverů ČUZK (ČUZK 2025). Dále byly k dispozici vektorizované soubory ve formátu shapefile (SHP), které vymezovaly hranice jednotlivých skládek a celkovou oblast která byla předmětem zájmu. Tyto shapefile byly manuálně vektorizovány na základě ortofotomap v softwaru ArcGIS.

Doplněním byly pomocné soubory XML a FTX obsahující metadata o rastrových vrstvách, což umožnilo správné načtení a interpretaci dat v použitých softwarových nástrojích. Pro Python analýzu byly připraveny podpůrné soubory AUX pro rychlejší práci se vstupními rastry.

## **Zpracování dat v Agisoft Metashape**

Proces zpracování dat v softwaru Agisoft Metashape byl zahájen importem všech pořízených snímků ve formátu JPEG a jejich kontrolou z hlediska kvality, ostrosti a úplnosti pokrytí zájmové oblasti. Zanedbatelné množství snímků muselo být vyřazeno z důvodu nedostačující kvality. Následovala fáze zarovnání snímků, při které byla využita funkce „Align Photos“ s nastavením vysoké přesnosti, protože cílem bylo zajistit maximální přesnost výsledných modelů. Tato funkce automaticky identifikovala shodné obrazové prvky mezi snímky a na základě jejich prostorového rozložení vypočítala přibližné pozice a orientace kamer. Výsledkem byl základní prostorový model ve formě řídkého bodového mračna.

**Obrázek 5:** Výpočet výškového rozdílu mezi DMP a DMT v ArcGIS pomocí nástroje Raster Calculator



**Zdroj:** vlastní zpracování

Následovala optimalizace kamerových parametrů prostřednictvím funkce „Optimize Cameras“. Tento krok zpřesnil výpočet jak vnějších, tak vnitřních parametrů kamer pomocí metody „bundle adjustment“. Optimalizace byla klíčová pro dosažení vyšší geometrické přesnosti pomocí geodeticky zaměřených kontrolních bodů (GCP), které umožnily ukotvení modelu v reálném souřadnicovém systému.

Po ukotvení snímků v prostoru byl vytvořen digitální model povrchu na základě generování hustého mračka bodů (Dense Cloud) s nastavením na „high“ úrovni, přičemž byl použit filtr „mild“ k zachování jemných detailů povrchu bez nadměrného vyhlazení. Tento krok byl zásadní pro zachycení členitosti skládek a správnou rekonstrukci jejich objemu. Před generováním rastrů byla celá rekonstrukce zkontrolována prostřednictvím vizuální validace a odstranění viditelných chyb způsobených nepřesnostmi v zarovnání.

Ze vzniklého mračka bodů byl vygenerován digitální model povrchu (DMP), prostřednictvím funkce „Build DEM“, který obsahoval výškové informace o povrchu snímané oblasti v rastrové podobě.

V závěrečné fázi byla pomocí funkce „Build Orthomosaic“ vytvořena ortofotomapa. Tento produkt vznikl ortorektifikací a mozaikováním jednotlivých snímků na základě předchozích výpočtů. Výsledná ortofotomapa představovala georeferencovaný obraz s jednotným měřítkem, vhodný pro mapování a analýzu.

Výsledná ortofotomapa a digitální model povrchu byly exportovány ve formátu TIFF pro následné využití v dalších softwarech.

## **Důvody volby parametrů zpracování**

Volba parametrů zpracování v Agisoft Metashape byla podřízena požadavku na dosažení maximální možné přesnosti výpočtu objemů při současném respektování dostupné výpočetní kapacity. Zarovnání snímků bylo nastaveno na přesnost „High“, protože nižší úroveň by vedla k viditelným deformacím modelu a snížení kvality výsledného ortofota i povrchového modelu. Při generování hustého mračka bodů byla zvolena rovněž vysoká úroveň detailu s mírným filtrováním šumu, což umožnilo zachytit jemné detaily povrchu skládek, důležité pro následné objemové analýzy.

Při generování DMP nabyla použita žádná filtrace nadzemních objektů, protože cílem bylo zachytit skutečný tvar skládek. Pro export bylo zvoleno bezztrátové komprimované GeoTIFF rozhraní, aby nedošlo ke ztrátě kvality během přenosu mezi různými softwarovými prostředími. Volba parametrů tak přímo ovlivnila vysokou kvalitu výsledků a umožnila efektivní pokračování v následných analytických krocích. Výsledné rozlišení ortofota i digitálního modelu povrchu (DMP), tedy velikost jednoho pixelu v rastru, dosáhlo na 0,0000883 m<sup>2</sup> na pixel, tedy čtverec o hraně zhruba 0,94 cm. Což je pro potřeby této práce více než dostatečné rozlišení

## **Export rastrů pro další analýzu**

Export výsledných rastrových dat probíhal s ohledem na zachování maximální kvality a kompatibility s nástroji GIS analýzy. Ortofotomapa i DMP byly exportovány ve formátu GeoTIFF, což umožnilo zachování prostorových souřadnic a metadat nezbytných pro správnou lokalizaci a propojení dat. Při exportu byla nastavena jednotná prostorová reference odpovídající místnímu souřadnicovému systému, konkrétně ETRS 1989 UTM Zone 33N, aby nedocházelo k chybám při následné kombinaci s dalšími podklady. Všechny exportované soubory byly zároveň doplněny o soubory s příponou \*.aux.xml obsahující detailní metadata. Při exportu bylo rovněž důsledně dbáno na optimalizaci velikosti souborů bez ztráty kvality, proto byly využity bezztrátové kompresní algoritmy (např. LZW).

## Vysvětlení práce s body snímkování

Body snímkování (tzv. Camera Stations nebo Tie Points) představovaly důležitou část kontroly kvality fotogrammetrické rekonstrukce. V prostředí Agisoft Metashape byly body snímkování automaticky generovány při zarovnání fotografií a následně vizualizovány jako síť vzájemně propojených bodů. Jejich rovnoměrné rozmístění a správné propojení mezi snímky sloužilo jako indikátor kvality vstupního datového setu a ovlivňovalo přesnost výsledných modelů.

V ArcGIS byly body snímkování využity pro vizuální analýzu hustoty pokrytí snímky v různých částech analyzovaného území. Na základě importu souboru s pozicemi kamer bylo možné vytvořit vektorovou vrstvu bodů, která zobrazovala jednotlivé pozice UAV během snímkovací mise (*Obrázek 3*). Vizualizace těchto bodů umožnila identifikovat oblasti s vyšším či nižším překryvem snímků, což mělo přímý dopad na přesnost následné fotogrammetrické rekonstrukce.

Práce s body snímkování sloužila i k ověření správnosti georeferencování modelů. Pokud byly body snímkování pravidelně rozmístěny, bylo možné předpokládat vysokou přesnost ortofotomap i DMP. V případě nalezení větších mezer v pokrytí by bylo možné zpětně upravit parametry rekonstrukce nebo doplnit snímkování, čímž by byla zajištěna robustnost výsledků.

## Předzpracování dat v ArcGIS

Předzpracování dat v prostředí ArcGIS představovalo hlavní fázi přípravy pro následnou analýzu objemů skládek. Nejprve byla do projektu načtena ortofotomapa a digitální model povrchu (DMP) exportované z Agisoft Metashape a datová sada nadmořské výšky ČR INSPIRE sloužící jako digitální model terénu (DMT), vše ve formátu GeoTIFF. Tyto rastry byly opatřeny správnou prostorovou referencí a vizuálně překontrolovány, aby se ověřila jejich správná poloha a návaznost jednotlivých snímků. V rámci kontroly byly provedeny operace reprojekce do jednotného souřadnicového systému ETRS 1989 UTM Zone 33N, aby bylo zajištěno bezproblémové spojování dat a kompatibilita s vektorovými vrstvami připravovanými pro výpočty.

Následně byla provedena úprava rozsahů rastrů pomocí funkce „Clip Raster by Mask“, kde jako ořezová maska sloužila hrubě vytvořená vrstva oblasti zájmu. Tento krok umožnil odstranit nežádoucí části okolí, které by zatěžovaly výpočty a snižovaly přehlednost datové struktury projektu. Rastery byly poté optimalizovány vytvořením tzv. pyramids a statistik,

čímž se výrazně zrychlilo jejich načítání a práce s nimi v rámci mapových kompozic i analytických operací.

## **Vytvoření shapefilů jednotlivých skládek**

Každá jednotlivá skládka byla v ArcGIS vymezena pomocí tvorby nové polygonové vrstvy typu shapefile. Postup začínal ručním digitálním zakreslením obrysů skládek na základě vizuální interpretace ortofota a DMP, přičemž byla věnována pozornost přesnému vedení hranic podél skutečných okrajů materiálu. Výhodou této metody byla schopnost přesně rozlišit jednotlivé hromady surového dřeva i v případě jejich vzájemného těsného kontaktu. Nevýhodou byl nejistý předěl mezi skládkami a betonovými totemy s označením skládek, které ve výsledném rastru často splývaly a komplikovaly tak správnou segmentaci. Každému polygonu bylo přiřazeno unikátní ID shodné s daty z inventury poskytnuté podnikem.

Proces tvorby shapefilů probíhal ve vrstvách oddělených podle jednotlivých skládek, s čísly 50 až 61 pod kterými jsou zájmové skládky vedeny v systému podniku, což zvyšovalo přehlednost a umožnilo pozdější spojování nebo oddělování analýz podle potřeby. Kontrola překryvu polygonů a jejich topologické správnosti byla provedena nástrojem „Check Geometry“, čímž se eliminovalo riziko chyb v budoucích prostorových analýzách. Žádný z vytvořených shapefilů se tedy nepřekrývá s jiným a zároveň mezi nimi nejsou mezery. Plynule na sebe navazují a všechny dohromady odpovídají shapefilu „extent\_area.shp“ který slouží jako vymezení oblasti zájmu.

Po dokončení tvorby shapefilů byly jednotlivé vrstvy uloženy a exportovány ve formátu ESRI shapefile (.shp) s příslušnými doprovodnými soubory (.dbf, .shx, .prj). Zároveň byla provedena archivace projektových souborů, aby bylo možné kdykoli rekonstruovat vývoj tvorby shapefilů. Takto vytvořené vektorové vrstvy představovaly základní podklad pro přesné výpočty objemů skládek při jejich kombinaci s digitálními modely povrchu a terénu.

## Vytvoření vrstvy oblasti zájmu

Vrstva oblasti zájmu „extent\_area.shp“ byla vytvořena jako samostatný polygonový shapefile, jehož účelem bylo jednoznačně ohraničit území, na kterém se prováděla následná analýza. Pro vytvoření vrstvy byla použita funkce „Merge“ a následně „Dissolve“ s využitím vektorizovaných polygonů jednotlivých skládek, tak aby byla zajištěna absolutní shoda mezi jednotlivými polygony.

Vrstva „extent\_area.shp“ plnila důležitou funkci při ořezávání rastrových dat a při prostorových výběrech během analýzy. Pomocí nástroje „Extract by Mask“ byla tato vrstva využita k odříznutí částí rastrů mimo vymezené území, čímž se minimalizovalo zatížení paměti a zkrátily se doby výpočtů. Díky přesné definici zájmové oblasti bylo možné zajistit, že všechny prostorové operace probíhaly konzistentně pouze v rámci analyzovaného prostoru a nevznikaly artefakty z okolního prostředí.

Vrstva oblasti zájmu byla uložena samostatně a zálohována spolu s hlavními daty projektu. Vrstva „extent\_area.shp“ se tak stala nepostradatelnou součástí celého datového modelu projektu.

## Automatizace výpočtu objemu – Python skriptování

Pro efektivní výpočet objemu dřevních skládek byla využita metoda automatizovaného zpracování v prostředí Python. Automatizace umožnila rychlé, systematické a opakovatelné výpočty na základě vstupních rastrových dat (DMP a DMT) a polygonových shapefilů jednotlivých skládek. Python byl zvolen jako nástroj díky dostupnosti robustních knihoven pro geoinformační zpracování (numpy, scipy, osgeo gdal a ogr) a schopnosti pracovat s velkoobjemovými daty bez nutnosti manuálních zásahů. Celý proces byl rozdělen do jednotlivých kroků, což umožnilo lepší kontrolu nad průběhem a úpravou každé fáze výpočtu.

Automatizace začala načtením dat, pokračovala výpočtem rozdílů nad skládky, segmentací pixelů s eliminací šumu, a končila souhrnným výpočtem objemu pro každou skládku. Tento postup odstranil chyby spojené s ručními operacemi a zajistil konzistenci napříč všemi analyzovanými lokalitami. Skripty byly optimalizovány tak, aby umožnily zpracování i většího množství rastrových a vektorových souborů bez přetížení paměti.

Výhodou zvoleného přístupu byla také možnost flexibilně měnit parametry segmentace a limitů objemu, což bylo důležité při kalibraci výsledků a testování různých scénářů přesnosti.

Skriptování tak zásadně přispělo ke zvýšení rychlosti zpracování a spolehlivosti výsledků v rámci celého projektu.

## Popis skriptů `extent_area.py` a `segmentace.py`

Skript `extent_area.py` je hlavním nástrojem pro kompletní automatizované zpracování vstupních dat a výpočet objemu skládek. Tento skript obsahuje sekvence pro načtení rastrů (DMP a DMT), aplikaci shapefilů vymezujících jednotlivé skládky, výpočet rozdílové vrstvy a následně výpočty samotných objemů. Knihovny `gdal` a `ogr` umožnily efektivní čtení prostorových dat a `numpy` zajistilo rychlé aritmetické operace na maticích hodnot. Výstupem skriptu byly tabulky s výslednými objemy a vizualizace ve formě rastrových masek.

Skript `extent_area.py` slouží k automatizovanému výpočtu objemu materiálu nad digitálním modelem terénu pomocí rozdílu mezi digitálním modelem povrchu (DMP) a referenčním modelem (DMT). Celý proces je rozdělen do několika hlavních kroků:

1. **Ořez dat na zájmovou oblast:** –Funkce `clip_raster_with_shapefile` využívá knihovnu `GDAL` k ořezu DMP rastru podle zadaného shapefilu oblasti zájmu („`extent_area.shp`“). Tím je zajištěno, že další analýzy probíhají pouze na relevantním území.
2. **Získání parametrů rastru:** Funkce `get_pixel_area` načítá rastr a vypočítává plochu jednoho pixelu. Tyto údaje jsou důležité pro přepočtení jednotlivých pixelů na objem.
3. **Přizpůsobení referenčního rastru:** Funkce `resize_raster` zajistí, aby referenční model DMT měl stejnou velikost, rozlišení a souřadnicový systém jako ořezaný DMP, čímž umožňuje přímé výpočty rozdílů.
4. **Filtrace extrémních hodnot:** Funkce `apply_height_limit` slouží k odstranění nereálných výškových hodnot tím, že nahradí hodnoty přesahující definovaný limit průměrem sousedních platných hodnot.
5. **Blokové zpracování rastrů:** Funkce `process_raster_blocks` provádí hlavní výpočet rozdílů postupně nad jednotlivými bloky rastru o velikosti 512x512 pixelů, aby se zamezilo přehlcení operační paměti při vložení většího rastru. Také aplikuje filtraci na základě výšky podkladu podle nastavitelné proměnné „`base_height`“, která je v kódu zahrnuta pro případ, že je skládka postavena na podkladovém materiálu, a tudíž je potřeba od celkového objemu odečíst prázdný prostor mezi spodkem skládky a povrchem. Na základě těchto parametrů pak funkce vypočítá objem součtu všech skládek v zájmové oblasti.

6. **Výstupy:** Po dokončení výpočtů skript vypíše do konzole celkovou plochu jednoho pixelu, počet pixelů překračujících základní výšku a vypočítaný celkový objem v metrech krychlových.
7. **Vizualizace výsledků:** Výsledná data jsou zobrazena pomocí knihovny Matplotlib ve formě barevné mapy výškových rozdílů, doplněné o hillshade efekt pro lepší prostorové vnímání.

**Obrázek 6:** Část skriptu pro výpočet výškového rozdílu mezi DMP a DMT

```
import numpy as np
from osgeo import gdal, ogr
from scipy.ndimage import generic_filter
from tqdm import tqdm

# Ořez rastru podle shapefile zájmového území
def clip_raster_with_shapefile(raster_path, shapefile_path, output_path):
    raster = gdal.Open(raster_path)
    shapefile = ogr.Open(shapefile_path)
    layer = shapefile.GetLayer()

    gdal.Warp(output_path, raster, cutlineDSName=shapefile_path, cropToCutline=True)
    return gdal.Open(output_path)

# Načtení rastru a získání velikosti pixelu
def get_pixel_area(file_path):
    dataset = gdal.Open(file_path)
    if dataset is None:
        raise ValueError("Soubor se nepodařilo načíst.")

    geotransform = dataset.GetGeoTransform()
    dx = abs(geotransform[1]) # Velikost pixelu v X
    dy = abs(geotransform[5]) # Velikost pixelu v Y

    return dx * dy, dataset

# Úprava referenčního rastru podle hlavního rastru
def resize_raster(reference_dataset, target_dataset):
    reference_band = reference_dataset.GetRasterBand(1)
    x_size, y_size = target_dataset.RasterXSize, target_dataset.RasterYSize

    reference_resampled = gdal.GetDriverByName("MEM").Create("", x_size, y_size, 1, reference_band.DataType)
    reference_resampled.SetGeoTransform(target_dataset.GetGeoTransform())
    reference_resampled.SetProjection(target_dataset.GetProjection())

    gdal.ReprojectImage(reference_dataset, reference_resampled,
                        reference_dataset.GetProjection(), target_dataset.GetProjection(),
                        gdal.GRA_Bilinear)

    return reference_resampled
```

**Zdroj:** vlastní zpracování

Skript **segmentace.py** automatizuje výpočet objemů jednotlivých skládek v rámci více zájmových území vymezených shapefiley. Je navržen tak, aby každou skládku zpracoval samostatně, provedl ořez příslušného území, výpočet rozdílu mezi digitálním modelem povrchu (DMP) a digitálním modelem terénu (DMT) a aplikoval filtrování na základě definovaných

výškových limitů. Výstupem skriptu je objem materiálu pro každou skládku zvlášť a souhrnný objem za celý areál.

1. **Ořez a příprava dat:** Skript začíná funkcí `clip_raster_with_shapefile`, která provádí ořez vstupního DMP rastru podle jednotlivých shapefilů zájmových oblastí (`extent_50` až `extent_61`). Pro každý shapefile se vytvoří samostatný ořezaný raster, což zajišťuje, že se výpočty budou provádět pouze nad relevantní oblastí.
2. **Přizpůsobení rastrů a načtení parametrů:** Funkce `get_pixel_area` načítá velikost pixelu každého rastru, což je nezbytné pro správný přepočítání na objem. Funkce `resize_raster` přizpůsobí referenční rastr (DMT) rozměrům právě ořezaného DMP, aby bylo možné provést výpočet rozdílu na pixelové úrovni.
3. **Výpočet rozdílů a filtr extrémních hodnot:** Funkce `process_raster_blocks` provádí hlavní blokové zpracování. Rastr je rozdělen na bloky o velikosti  $512 \times 512$  pixelů pro efektivní zpracování. V každém bloku se spočítá výškový rozdíl mezi povrchem a terénem, odstraní se negativní hodnoty a aplikuje se filtr `apply_height_limit`, který eliminuje nerealisticky vysoké hodnoty způsobené artefakty.
4. **Výstupy a souhrn:** Po výpočtu je objem každé skládky vypsán do csv tabulky, přičemž se jednotlivé hodnoty sčítají pro získání celkového objemu všech analyzovaných skládek. Výsledky jsou tak k dispozici jak jednotlivě, tak agregovaně, což poskytuje ucelený pohled na stav zásob surového dřeva.

#### **Shrnutí hlavních funkcí:**

- **`clip_raster_with_shapefile`:** ořez rastru dle zájmové oblasti
- **`get_pixel_area`:** zjištění velikosti pixelu
- **`resize_raster`:** přizpůsobení DMT rastru rozměrům DMP
- **`apply_height_limit`:** odstranění nerealistických výškových hodnot
- **`process_raster_blocks`:** výpočet výškových rozdílů a objemů po blocích

**Obrázek 7:** Ukázka funkce blokového zpracování rastru a aplikace výškového limitu

```
# Eliminace chybných hodnot nad výškovým limitem
def apply_height_limit(raster, height_limit):
    def focal_mean(values):
        center = values[4]
        if center > height_limit:
            valid_neighbors = values[(values <= height_limit) & (values != center)]
            return np.mean(valid_neighbors) if valid_neighbors.size > 0 else center
        return center

    return generic_filter(raster, focal_mean, size=(3, 3))

# Zpracování rastrů po blocích
def process_raster_blocks(dataset, ground_dataset, base_height, height_limit, pixel_area):
    band = dataset.GetRasterBand(1)
    ground_band = ground_dataset.GetRasterBand(1)

    x_size, y_size = band.XSize, band.YSize
    block_size = 512 # Velikost bloku
    total_sum = 0
    result_array = np.zeros((y_size, x_size), dtype=np.float32)

    for y in range(0, y_size, block_size):
        for x in range(0, x_size, block_size):
            x_block_size = min(block_size, x_size - x)
            y_block_size = min(block_size, y_size - y)

            raster_block = band.ReadAsArray(x, y, x_block_size, y_block_size).astype(np.float32)
            ground_block = ground_band.ReadAsArray(x, y, x_block_size, y_block_size).astype(np.float32)

            # Maskování oblastí bez dat
            valid_mask = ~np.isnan(raster_block) & (raster_block > 0)
            raster_block[~valid_mask] = 0
            ground_block[~valid_mask] = 0

            height_difference = raster_block - ground_block
            height_difference[height_difference < 0] = 0

            # Aplikace výškového limitu
            height_difference = apply_height_limit(height_difference, height_limit)

            mask = height_difference > base_height
            valid_pixels = height_difference[mask]

            modified_values = (valid_pixels - base_height) * pixel_area
            total_sum += np.sum(modified_values)

            result_array[y:y + y_block_size, x:x + x_block_size] = height_difference

    return total_sum, result_array

# -----
# Parametry

file_path = "data/Pila_Jevany_DEM.tif"
ground_file_path = "data/INSPIRE_5x5_mask.tif"
shapefiles = [f"data/extent_50_61/extent_{i}.shp" for i in range(50, 62)] # Seznam zájmových území
output_folder = "data/clipped_outputs"
base_height = 0.2 # Výška podkladu
height_limit = 3.0 # Maximální výšková hodnota
```

**Zdroj:** vlastní zpracování

Kombinace obou skriptů tvoří funkční řetězec od načtení dat po interpretaci výsledků. Struktura kódu je modulární a umožňovala jednoduché změny parametrů vstupů, prahů segmentace i způsobu ošetření chyb. Tento přístup vede k maximální variabilitě a adaptabilitě v případě budoucího rozšíření analýzy.

## **Krok 1: Načtení rastrů a shapefilů**

První krok automatizovaného procesu začíná načtením všech potřebných rastrových a vektorových dat. Pro čtení GeoTIFF souborů je využita knihovna gdal s pomocí rozhraní osgeo, která umožňuje efektivní práci s prostorovými rastrovými soubory. DMP a DMT se načítají jako oddělené vrstvy, přičemž se ověřuje jejich prostorová shoda pomocí kontroly souřadnicového systému a rozměrů rastrů. Jakákoli nesrovnalost je ošetřena reprojekcí během načítání, čímž se minimalizuje riziko chyb v následujících výpočtech.

Shapefilly vymezující jednotlivé skládky se načítají s využitím knihovny ogr s pomocí rozhraní osgeo, což umožňuje práci s jednotlivými polygony samostatně. Pomocí každého jednotlivého polygonu se odmaskovala příslušná část rastru, nad kterou byly následně prováděny výpočty.

Díky modulárnímu načítání je možné snadno rozšířit nebo upravit rozsah analýzy bez nutnosti zásadních úprav v kódu. Stačí přidat nebo odebrat příslušné shapefilly. Tento krok vytvořil pevný základ pro další fáze výpočtů.

## **Krok 2: Výpočet rozdílu mezi DMP a DMT**

Po načtení dat následoval výpočet rozdílové vrstvy mezi DMP a DMT. Vzhledem k tomu, že hodnoty v obou rastroch odpovídají nadmořským výškám vztaženým ke stejnému referenčnímu elipsoidu, může být tento krok realizován jednoduchou aritmetickou operací, kdy je hodnota každého pixelu v DMT odečtena od hodnoty odpovídajícího pixelu v DMP. Výsledná vrstva představuje výšku objektu nad terénem, tedy výšku příslušných skládek v jednotlivých bodech. Výpočty byly provedeny v prostředí numpy, které umožňuje velmi rychlé operace i nad rozsáhlými poli dat.

Výsledný rozdílový rastr se ukládá do mezipaměti jako nový GeoTIFF soubor. Výpočet rozdílové vrstvy tak tvořil hlavní vstup pro všechny další operace, včetně segmentace a výpočtu objemů. Bez přesné a správné vrstvy by nebylo možné dosáhnout validních výsledků analýzy.

### **Krok 3: Vertikální segmentace a eliminace šumu**

Po vytvoření vrstvy rozdílu následovalo zaměření na výšku skládek s důrazem na to, aby skládky byly zespoda i shora hodnotově správně ohraničené. I zde je možné zadat proměnnou hodnotu „base\_height“ v případě, že je skládka postavena na podkladovém materiálu, a tudíž je potřeba od celkového objemu odečíst prázdný prostor mezi spodkem skládky a povrchem.

Další část kódu se zaměřuje na eliminaci drobného šumu. V DMP vytvořeném v softwaru Agisoft Metashape bylo pár pixelů odskočených v některých případech i o více než 10 metrů. Eliminace byla prováděna z části jednoduchým prahováním, kde byly vybrány všechny pixely větší než předem definovaná maximální reálná výška skládky pomocí proměnné „height\_limit“. Vybrané pixely nad nastaveným prahem se následně přepočítaly tak aby odrážely průměrné hodnoty svých okolních pixelů a co nejvíce tak omezily ovlivnění výsledku uměle vzniklými odlehlými hodnotami. Tím se zabránilo zahrnutí malých chyb nebo artefaktů do analýzy.

Je tedy možné nastavit minimální i maximální reálnou výšku skládky, což zajistí maximalizaci přesnosti požadovaných výsledků.

V rámci ošetření extrémních hodnot byla aplikována dvoustupňová filtrace. Nejprve byly odstraněny hodnoty výšek nad stanovený limit (například 5 metrů při reálné maximální výšce cca 3 m), které by mohly indikovat chybu v rekonstrukci nebo nesprávně interpretované objekty (např. stromy, nebo kondenzace ve vzduchu). Druhým krokem bylo odstranění záporných hodnot a hodnot menších než minimální práh, aby se z výsledků vyloučily drobné nerovnosti povrchu a šum.

Při ošetření bylo využito numpy operací, které umožnily efektivní filtrování rozsáhlých datových polí. Výsledné očištěné vrstvy byly použity pro finální výpočet objemů, čímž se minimalizovalo riziko zkreslení analýzy. Ošetřování extrémů probíhalo nejen v rámci jednotlivých skládky, ale také globálně nad celým datasetem, což zajistilo konzistenci napříč všemi analyzovanými lokalitami.

Výstupem tohoto kroku je tak zpřesněný rastr zájmového území očištěný od šumu a drobných chyb, obsahující reálné výškové hodnoty jednotlivých skládek připravené pro přesné výpočty objemů. Vertikální segmentace tak sehrála zásadní roli v eliminaci nesprávných hodnot

a přípravě dat na závěrečné výpočty. Použití filtrů bylo kritické pro zvýšení přesnosti výsledných objemových výpočtů.

#### **Krok 4: Výpočet objemu jednotlivých skládek**

Samotný výpočet objemu jednotlivých skládek byl realizován na základě rozdílu hodnot mezi rastry DMP a DMT v rámci příslušných polygonů shapefilů. Každý pixel byl přepočítán na reálnou plochu na základě známé velikosti pixelu (0,94 cm × 0,94 cm), a následně byla výška násobena touto plochou pro získání příspěvku daného pixelu k celkovému objemu. Pro každou skládku byly takto spočítány součty všech přidělených pixelů.

Pro každý polygon byly vypočítán celkový objem. Výsledky byly automaticky exportovány do tabulky CSV a zároveň vizualizovány pomocí jednoduchých barevných map ukazujících výškovou diferenciaci mezi skládkami. Tyto výstupy sloužily jako podklady pro další analýzu a interpretaci výsledků.

## Vyhodnocení a interpretace výsledků

Vyhodnocení výsledků bylo založeno na systematickém zpracování všech výstupních dat, především tabulek objemů získaných automatizovaným výpočtem. Nejprve byla provedena kontrola úplnosti výsledků, kde se ověřovalo, zda ke každé vymezené skládce existuje přiřazený výstup s hodnotou objemu a základními statistickými charakteristikami. Dále byly výsledky vizuálně zkontrolovány pomocí prostorových map, kde barevná škála indikovala rozložení výšek a případné anomálie. Tato kombinace tabulkové a grafické validace umožnila rychlé odhalení nesrovnalostí a přípravu dat na interpretaci.

Interpretace výsledků probíhala se zaměřením na vztah mezi velikostí plochy skládek a jejich celkovým objemem. Skládky s větší plochou vykazovaly dle očekávání vyšší objemy, zatímco pro menší skládky vycházely nižší hodnoty. Výsledky tak byly interpretovány s ohledem na prostorovou logiku a průběžně porovnávány s daty z poskytnutého měření prováděného zaměstnanci podniku.

### Výsledné objemy skládek

Výsledné objemy jednotlivých skládek byly získány výpočtem výškových rozdílů v rámci vymezených polygonů a následnou konverzí plochových jednotek na objemové metry krychlové. Objem každé skládky byl vypočten jako součet objemových příspěvků jednotlivých pixelů, přičemž každý pixel představoval definovanou plochu v závislosti na rozlišení ortofota (konkrétně  $0,0000883 \text{ m}^2$  na pixel). Tento výpočetní postup umožnil velmi přesné stanovení celkového objemu surového dřeva uskladněné na každé skládce.

Největší zjištěné objemy se pohybovaly v nižších stovkách metrů krychlových, zatímco menší skládky dosahovaly objemů v nižších desítkách metrů krychlových. Tento rozptyl byl plně v souladu s očekáváním na základě vizuální inspekce ortofotomap a terénních fotografií.

Výsledné objemy byly dále agregovány podle jednotlivých areálů (rozčleněných pomocí extent\_50 až extent\_61), což umožnilo vytvoření celkové bilance zásob surového dřeva pro každý dílčí prostor. Současně byly vypočítány i souhrnné hodnoty za celý analyzovaný prostor, které byly následně využity pro porovnání s inventarizačními daty poskytnutými podnikem. Výsledné soubory dat tak tvořily komplexní podklad pro navazující přepočty a analýzy.

## **Přepočet na prostorové metry**

Pro potřeby porovnání s podnikovou evidencí bylo nutné provést přepočet z hrubého objemu na čistý objem surového dřeva. V dřevařském průmyslu se běžně užívá přepočítávacího koeficientu, tzv. prostorového metru PRMR, který reflektuje skutečné podmínky skladování surového dřeva (typ dřeva, způsob skládkování, vzdušnost). Standardně byl použit koeficient 0,7, který odpovídá průměrné hodnotě pro smíšené skládky jehličnatého dřeva na volné ploše. Každý vypočítaný hrubý objem v metrech krychlových byl vynásoben tímto koeficientem, čímž vznikla hodnota odpovídající objemu surového dřeva. odpovídající evidenčním standardům podniku. Přepočet byl proveden automatizovaně přímo v Python skriptech při exportu výsledků do CSV tabulek, což minimalizovalo riziko chyb a umožnilo snadnou tvorbu výstupních souhrnů. Použití správného přepočítávacího koeficientu bylo zásadní pro dosažení srovnatelnosti s inventarizačními daty. Proto byla při volbě hodnoty brána v úvahu specifika konkrétního typu skladovaného materiálu a podmínky jeho uskladnění, což bylo konzultováno s odpovědnými osobami v podniku.

## **Porovnání s inventarizačními daty podniku**

Porovnání výsledků získaných metodou fotogrammetrie s oficiálními inventarizačními daty podniku představovalo důležitou fázi validace projektu. Inventarizační data obsahovala hodnoty evidovaných objemů jednotlivých skládek v metrech krychlových, přičemž tyto hodnoty byly založeny na tradičních metodách měření objemu založeném na aproximaci objemu kulatiny zjednodušením na objem válce a následně pronásobením počtem kusů v hromadě. Data byla poskytnuta v členění podle jednotlivých skládek, což umožnilo přímé porovnání výsledků.

V rámci porovnání byly vypočítány rozdíly mezi výsledky získanými fotogrammetrickým zpracováním a hodnotami uvedenými v inventarizaci. U většiny skládek se rozdíl pohyboval v rozmezí  $\pm 10\%$ , což bylo vzhledem k charakteru materiálu, způsobu skladování a metodice měření považováno za vyhovující. U některých skládek byly zjištěny lehce větší odchylky, ne však větší než  $17\%$ .

Celkové souhrnné hodnoty ukázaly velmi dobrou shodu s inventarizačními daty na úrovni celého zkoumaného území, což potvrzuje vhodnost použití fotogrammetrických metod pro evidenci zásob surového dřeva.

## **Diskuse: Odchylky, důvody nepřesností, návrhy na zlepšení**

Odchylky mezi vypočtenými a inventarizačními objemy měly různé příčiny, které bylo možné rozdělit do několika hlavních kategorií. První skupinu tvořily odchylky zapříčiněné způsobem skladování, kdy byly hromady nestandardně tvarované. Problematické bylo především když část skládky ležela na podkladu a část přímo na zemi. Dalším zdrojem nepřesností byl nejistý předěl mezi skládkami a betonovými totemy s označením skládek, které ve výsledném rastru často splývaly a komplikovaly tak správnou segmentaci. Nepřesnosti také mohly vzniknout při přepočtu pomocí prostorových metrů. Použitý koeficient je z podstaty značně zobecněný a nemusí přesně odpovídat vlastnostem konkrétních skládek. Výsledky byly také z části ovlivněny časovým odstupem mezi prováděnými měřeními.

Návrhy na zlepšení zahrnovaly zejména zpřesnění přepočtových koeficientů na základě přímého terénního ověření. Nabízí se také aplikace pokročilejších metod segmentace např. založená na strojovém učení. Vhodný by také byl kratší interval mezi snímkováním a kontrolním měřením.

### ***Odpovědi na výzkumné otázky***

**VO1:** „*Jaká je míra shody mezi objemem skládek stanoveným metodou letecké fotogrammetrie a objemem zjištěným podnikovou inventurou?*“

**Odpověď:** Porovnání objemů zjištěných pomocí letecké fotogrammetrie s údaji podnikové inventury prokázalo vysokou míru shody. U většiny analyzovaných skládek se rozdíl mezi oběma metodami pohyboval v rozmezí  $\pm 10\%$ , což odpovídá obvyklé toleranci stanovené pro evidenci zásob v praxi. Pouze v několika případech byly zaznamenány vyšší odchylky do  $\pm 17\%$ , které bylo možné vysvětlit specifickými podmínkami, jako jsou způsob uskladnění, špatná viditelnost hranic skládek, nebo časový rozdíl mezi provedením inventury a pořízením snímků. Výsledky potvrzují, že metoda zjišťování objemu pomocí letecké fotogrammetrie je dostatečně přesná pro praktické použití a může být plnohodnotnou alternativou k tradičním inventarizačním postupům.

**VO2:** „*Jaký vliv má použitá metodika filtrace hodnotových odskoků v DMP na přesnost stanovení objemu skládek?*“

**Odpověď:** Aplikace metodiky filtrace extrémních hodnot v DMP měla vliv na přesnost výsledků. Bez použití filtrace docházelo ke vzniku lokálních anomálií, které zkreslovaly vypočítané objemy. Implementace filtrační funkce `apply_height_limit` vedla ke snížení těchto odchylek a ke stabilizaci výsledků, čímž se zvýšila korelace s inventarizačními daty. Metodika filtrace se tedy ukázala jako důležitá součást výpočetního postupu, protože odstranění odlehklých hodnot přispívá k dosažení přesnějších a konzistentnějších výsledků při stanovení objemů.

**VO3:** „*Je možné efektivně využít kombinaci dat pořízených běžným UAV snímkováním a následné analýzy v Pythonu pro automatizované stanovení objemu skládek bez nutnosti ručního zásahu?*“

**Odpověď:** Výsledky práce prokázaly, že kombinace dat získaných běžným UAV snímkováním, vytvoření DMP v Agisoft Metashape a následného automatizovaného zpracování v Pythonu umožňuje efektivní stanovení objemu skládek bez nutnosti většího manuálního zásahu. Použití předpřipravených skriptů umožňuje plně automatizované načtení rastrů, provedení výpočtu rozdílů, aplikaci filtrů a export výsledků ve formě tabulkových souborů. Stále je však nutné prostor nasnímkovat a vytvořit DMP rastr pomocí Agisoft Metashape. Automatizace by dávala smysl zejména pro podniky s rozsáhlejšími skladovacími plochami, kde by manuální přístup byl časově i finančně neefektivní.

Kombinace UAV snímkování a Python analýzy se tak minimálně pro větší podniky ukazuje jako vhodné řešení pro pravidelnou evidenci objemů dřevních skládek v praxi.

### **Závěrečné shrnutí a aplikační možnosti výsledků**

Celý metodický postup byl navržen tak, aby umožnil maximálně přesné a opakovatelné vyhodnocení objemu dřevních skládek pomocí fotogrammetrické dokumentace a automatizovaného zpracování dat. Vstupní fází bylo získání leteckých snímků dronem za podmínek zajišťujících dostatečný překryv, následované vytvořením ortofota a digitálního modelu povrchu v prostředí Agisoft Metashape. Předzpracování dat v ArcGIS zajistilo jejich správnou georeferenci, ořez na oblast zájmu a přípravu polygonálních shapefilů jednotlivých skládek, čímž byl vytvořen kvalitní podklad pro další analýzu.

Hlavním krokem metodiky bylo sestavení a aplikace Python skriptů, které provedly automatizovaný výpočet rozdílů mezi DMP a DMT, segmentaci ploch, filtraci šumu a finální výpočet objemů jednotlivých skládek. Výstupy byly validovány statistickým a grafickým hodnocením a dále porovnávány s inventarizačními daty podniku. Celý postup byl navržen tak, aby byl přenositelný na jiné lokality s minimálními úpravami a umožňoval snadnou aktualizaci v případě opakovaného měření.

### ***Praktické využití výsledků***

Výsledky získané touto metodikou nabízejí pro podnik několik praktických možností využití. Především umožňují velmi rychlou a přesnou evidenci objemu skládkovaného materiálu bez nutnosti fyzického měření, což šetří čas a snižuje náklady spojené s inventarizací. Díky podrobným ortofotomapám a digitálním modelům lze rovněž analyzovat rozmístění skládek, optimalizovat využití skladovacích ploch a plánovat manipulaci s materiálem efektivněji než při tradičních metodách.

Další praktickou výhodou je možnost pravidelného monitoringu skládek bez nutnosti fyzické přítomnosti zadavatele na místě. Vzhledem k tomu, že celý proces od sběru dat po zpracování výsledků je plně digitalizovaný, je možné realizovat periodické aktualizace a sledovat změny v objemu skladovaného materiálu v čase pomocí pravidelného pořizování leteckých snímků. To přispívá ke zvýšení přesnosti hospodářských plánů a přesnější kontrole zásob.

Výsledky lze rovněž využít jako podklad pro pojišťovací účely nebo pro potřeby externích auditů, kdy je nutné doložit aktuální stav zásob nezávislým způsobem. V neposlední řadě slouží

tato data jako důležitý vstup pro případné modelování kapacity areálů a návrh jejich budoucího rozvoje, včetně případného rozšíření či optimalizace vnitřního uspořádání.

### ***Doporučení pro budoucí aplikace***

Pro budoucí aplikace obdobných postupů se doporučuje věnovat zvýšenou pozornost standardizaci sběru dat, zejména zajištění konstantního překryvu snímků a minimalizaci stínových efektů během leteckého snímání. Vyšší hustota snímání a nasazení pokročilejších kamerových systémů mohou vést ke zvýšení přesnosti modelů a tím i výpočtů objemů.

Vhodné je rovněž zvážit integraci automatizované segmentace dat na jednotlivé skládky. Vzhledem k tomu že však prostorové rozložení skládek většinou zůstává neměnné, lze ručně vektorizované polygony použít opakovaně. U automatizované segmentace navíc může dojít k nevyžádanému zkreslení a manuální vektorizace je tak oproti automatizované segmentaci robustnější.

V oblasti datového managementu by bylo přínosné zavést databázový systém, který by umožňoval dlouhodobou archivaci, verzování a snadné vyhledávání historických datových sad pro potřeby trendových analýz.

Nabízí se také rozšířit školení personálu podniku v oblasti UAV snímání, práce s GIS daty a základních analytických metod. Tento krok by přispěl ke zvýšení samostatnosti při využívání technologie v praxi a umožnil by podniku efektivněji reagovat na změny v objemech skladovaného materiálu, plánovat kapacitní potřeby a optimalizovat interní procesy na základě aktuálních a přesných dat. Větší smysl by však pravděpodobně dávalo nabízet produkt jako službu včetně zajištění pravidelného snímání.

# ZÁVĚR

Teoretická část práce se zaměřila na vysvětlení principů využití bezpilotních letounů a fotogrammetrických metod pro účely monitoringu skladovacích areálů. Byly popsány hlavní technologické postupy sběru dat, včetně požadavků na hustotu snímkování, způsoby zpracování fotografií do ortofotomapy a tvorby digitálních modelů povrchu. Dále byla podrobně rozebrána problematika práce s geografickými informačními systémy (GIS) při přípravě a analýze dat, zejména význam prostorových referencí, vytváření vektorových vrstev a optimalizace datového managementu. Teoretická část rovněž ukázala možnosti využití automatizace prostřednictvím Python skriptů v oblasti geografického modelování, čímž vytvořila solidní základ pro praktickou aplikaci metod.

V teoretickém přehledu bylo dále diskutováno využití výpočtu objemů pomocí rozdílu mezi digitálním modelem povrchu a digitálním modelem terénu, a to v kontextu praktického nasazení ve výrobních a logistických procesech. Vysvětleny byly výhody této metody oproti tradičním přístupům založeným na odhadech a geometrickém měření, zejména v oblasti rychlosti, přesnosti a možnosti pravidelné aktualizace. Byly rovněž zohledněny potenciální zdroje chyb a doporučené postupy pro jejich minimalizaci. Teoretická část proto poskytla komplexní popis metod a nástrojů, které byly v praktické části práce použity.

Praktická část byla zahájena sběrem dat v reálném prostředí skladovacího areálu ve Středisku Dřevařské výroby Lesů ČZU v Jevanech, kde byly využity dronové snímky a terénní fotografie pro tvorbu podkladových vrstev. Následovalo zpracování dat v Agisoft Metashape, kde byly vytvořeny ortofotomapy a digitální modely povrchu. V rámci předzpracování v ArcGIS byly tyto podklady připraveny pro analýzu – proběhlo ořezání na oblast zájmu, vytvoření polygonálních shapefilů jednotlivých skládek a sestavení masek pro analýzu rozdílů výšky nad terénem. Tyto kroky vytvořily datový základ umožňující zahájit samotné výpočty objemů. Výpočet objemů skládek byl realizován automatizovanými Python skripty, které načítaly vstupní data, prováděly výpočet rozdílu mezi DMP a DMT, segmentovaly relevantní oblasti a eliminovaly šum. Součástí skriptů byl mechanismus pro ošetření extrémních hodnot a automatický export výsledků do přehledných tabulek. Tento přístup umožnil efektivní zpracování i rozsáhlých datových sad a minimalizoval riziko lidské chyby. Výsledky byly dále interpretovány jak z hlediska celkového objemu jednotlivých skládek, tak z hlediska prostorového rozložení a výškových charakteristik.

Výsledné objemy byly přepočítány na prostorové metry a porovnány s inventarizačními daty podniku. Byla zaznamenána velmi dobrá shoda s oficiálními hodnotami v rámci očekávané

tolerance, přičemž v případech větších odchylek byla provedena analýza možných příčin, jako jsou nehomogenita materiálu, rozdílné metody měření či časový rozdíl mezi provedením inventury a pořízením snímků. Diskuse se zaměřila na identifikaci faktorů ovlivňujících přesnost výpočtů a na návrhy, jak dále zlepšit metodiku do budoucna. Byla potvrzena vhodnost fotogrammetrické metody pro evidenci dřevních skládek a její vysoká efektivita v srovnatelná s tradičními metodami.

Závěrem lze konstatovat, že práce potvrdila praktičnost kombinace UAV snímkování, fotogrammetrického zpracování a GIS analýzy pro přesné a rychlé vyhodnocení objemů skladovaného materiálu. Byla prokázána vysoká variabilita a adaptabilita celého postupu, který umožňuje snadné přenesení na jiné lokality a rozšíření o nové analytické možnosti. Automatizace procesů pomocí Python skriptů představuje výrazný přínos pro zrychlení výpočtů, zvýšení spolehlivosti výsledků a snížení nákladů spojených s inventarizací.

Cíle práce byly splněny v plném rozsahu. Podařilo se navrhnout, implementovat a ověřit kompletní metodický postup pro sběr, zpracování a analýzu dat o objemech dřevních skládek. Bylo prokázáno, že zvolený přístup poskytuje výsledky s přesností použitelnou v praxi. Práce současně nabídla konkrétní doporučení pro optimalizaci budoucích aplikací, které je možné ještě do budoucna rozvíjet.

## SEZNAM ZDROJŮ

AVERY, T. E., & BURKHART, H. E. (2002). *Forest Measurements* (5th ed.). McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-366176-0.

BERENDT, F., WOLFGRAMM, F., & CREMER, T. (2021). Reliability of photo-optical measurements of log stack gross volume. *Silva Fennica*, 55(3), Article ID 10555. <https://doi.org/10.14214/sf.10555>. (ISSN 2242-4075)

BOLSTAD, P. (2019). *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems* (6th ed.). Eider Press. ISBN 978-1-50669-805-6.

BURROUGH, P. A., & MCDONNELL, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. ISBN 978-0-19-823365-7.

CAMPBELL, J. B., & WYNNE, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). Guilford Press. ISBN 978-1-60918-176-5.

ČUZK (2025). INSPIRE téma Nadmořská výška (EL) – GRID [cit. 2025-04-26]. Dostupné online z [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(tg0es2mnaoysv3w3lhmeyakw\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-EL&mapid=8&menu=304](https://geoportal.cuzk.cz/(S(tg0es2mnaoysv3w3lhmeyakw))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-EL&mapid=8&menu=304)

FRANKLIN, S. E. (2001). *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. CRC Press. ISBN 978-1-4200-3285-7.

GÓMEZ, C., GOODBODY, T. R. H., COOPS, N. C., ÁLVAREZ-TABOADA, F., & SANZ-ABLANEDO, E. (2019). Forest Ecosystem Monitoring Using Unmanned Aerial Systems. In *Unmanned Aerial Remote Sensing* (pp. 219–240). CRC Press. ISBN 978-0-429-17241-0.

HILDEBRANDT, G. (1996). *Fernerkundung und Luftbildmessung: Für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Wichmann Verlag. ISBN 3-87907-238-8.

JARRON, L. R., COOPS, N. C., & ROESER, D. (2022). Measuring industrial lumber production using nighttime lights: A focus study on lumber mills in British Columbia, Canada.

*PLOS ONE*, 17(9), e0273740. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273740>. (ISSN 1932-6203)

JENSEN, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall. ISBN 978-0-13-188950-7.

KRAUS, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans* (2nd ed.). De Gruyter. ISBN 978-3-11-019007-6.

LI, Z., ZHU, Q., & GOLD, C. (2005). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press. ISBN 978-0-415-32462-5.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., & CHIPMAN, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley. ISBN 978-1-118-34328-9.

LOCKS, C. J., FERREIRA, M. E., & ALVES JÚNIOR, L. (2017). Estimating wood volume in sawmill yards of Brazilian Amazon by Remotely Piloted Aircraft Systems. *Conference Paper*. <https://www.researchgate.net/publication/317780617>.

LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J., & RHIND, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th ed.). Wiley. ISBN 978-1-118-67695-9.

METTE, T., KRZYSZEK, P., & WURM, M. (2017). Comparing the potential of stereo aerial photographs, stereo very high-resolution satellite images, and TanDEM-X for estimating forest height. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.004>. (ISSN 0924-2716)

MOHD, W. M. N. W., & MOHD, W. M. N. W. (Eds.). (2022). *Concepts and Applications of Remote Sensing in Forestry*. Springer. ISBN 978-981-19420-0-6.

PISANO, S. (2022). *Digital surface model (DMP) and digital terrain model (DMT)*. [online].[cit. 2025-04-26]. Dostupné online z <https://www.researchgate.net/profile/Stefano-Pisano/publication/363625419/figure/fig3/AS:1201917350055936@1663760245521/A-Digital-surface-model-DMP-1G-LOD-3-maps-B-digital-terrain-model-DMR-5G-LOD-2.png>

ROCCHINI, D. (2013). *Remote Sensing of Natural Resources*. CRC Press. ISBN 978-1-4398-8061-7.

ROCCHINI, D. (2020). *An Introduction to Spatial Data Analysis: Remote Sensing and GIS with Open Source Software*. Pelagic Publishing. ISBN 978-1-78427-229-2.

STOKES, M., MATHER, A. E., & HARVEY, A. M. (2018). Quantitative analysis of earth surface processes and landforms: An introduction to GIS and remote sensing applications. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(1), 4–9. <https://doi.org/10.1002/esp.4226>. (ISSN 0197-9337)

UI DRONE LAB. (2024, July 1). *Introduction to Agisoft Metashape*. UI Drone Lab. [online].[cit. 2025-04-26]. Dostupné online z [https://uidronelab.org/2024/07/01/introduction-to-agisoft-metashape/Uidrone Lab](https://uidronelab.org/2024/07/01/introduction-to-agisoft-metashape/Uidrone%20Lab)

WOLF, P. R., & DEWITT, B. A. (2000). *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS* (3rd ed.). McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-292454-5.

WULDER, M. A., & FRANKLIN, S. E. (Eds.). (2020). *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern: Remote Sensing and GIS Approaches*. Routledge. ISBN 978-0-367-57783-4.

YAKAR, M. (2022). *Step By Step Agisoft – Metashape*. Atlas Akademi. ISBN 978-625-8101-02-7.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<u>Obrázek 1 Digitální modely terénu a povrchu .....</u>	13
<u>Obrázek 2 Rozdíly mezi DMT a DMP.....</u>	15
<u>Obrázek 3 Body odkud byly pořízeny jednotlivé snímky.....</u>	25
<u>Obrázek 4 Ukázka leteckého snímku skládek dříví pořízeného dronem .....</u>	26
<u>Obrázek 5 Výpočet výškového rozdílu mezi DMP a DMT v ArcGIS pomocí nástroje Raster Calculator .....</u>	28
<u>Obrázek 6 Část skriptu pro výpočet výškového rozdílu mezi DMP a DMT .....</u>	34
<u>Obrázek 7 Ukázka funkce blokového zpracování rastru a aplikace výškového limitu.....</u>	36

## SEZNAM PŘÍLOH

extent\_area.py

segmentace.py

extent\_area.shp

extent\_50.shp – extent\_61.shp (12 souborů)

INSPIRE\_5X5\_mask.tif

Pila\_Jevany\_DEM.tif