

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky



Lesnická a dřevařská fakulta

Využití pozemní fotogrammetrie pro inventarizaci lesních porostů

Diplomová práce

Rok odevzdání: 2017

Martin Řezba

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Využití pozemní fotogrammetrie pro inventarizaci lesních porostů, vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne 14. 4. 2017

Podpis studenta

Poděkování

Mé poděkování patří panu Ing. Tomáši Mikitovi, Ph.D., za odborné vedení a poskytnutí cenných rad při zpracování diplomové práce a dále také mé rodině a přátelům za obrovskou podporu.

Autor: Martin Řezba

Název diplomové práce: Využití pozemní fotogrammetrie pro inventarizaci lesních porostů

Title of the diploma thesis: Use of terrestrial photogrammetry for the inventory of forest stands

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím pozemní a zároveň letecké fotogrammetrie pro účely inventarizace lesních porostů. Práce popisuje a analyzuje postup sběru a zpracování dat v softwaru Agisoft PhotoScan a softwaru ArcGIS pro automatický výpočet stromových parametrů z fotogrammetrického mračna bodů, získaného snímkováním uvnitř listnatého porostu v předmýtním věku v kombinaci se snímkováním ze vzduchu pomocí bezpilotního letounu (UAV). Na základě automatického algoritmu byly identifikovány jednotlivé stromy, vytvořeny řezy fotogrammetrickým mračnem ve výčetní tloušťce, vypočtena výčetní tloušťka každého stromu a k poloze kmenů byla přiřazena výška stromů. Byla zjištěna odchylka odhadu výčetní tloušťky 3,3 cm úplnou střední chybou (RMSE), zjištěná chyba u výšky činila 1,3 m. Kromě zmíněné přesnosti metody je hlavní výhodou kratší časová náročnost měření v terénu; sběr dat v terénu na ploše 1 hektaru trval 2 hodiny.

Klíčová slova: letecká fotogrammetrie, pozemní fotogrammetrie, inventarizace lesa, bodové mračno

Abstract

The purpose of this thesis is to evaluate utilization of terrestrial and aerial photogrammetry in the forest inventory process. It describes and analyzes data collection and processing in Agisoft PhotoScan and ArcGIS software, with the use of automatically calculated tree parameters from a photogrammetric point cloud obtained by imaging the inside of the forest stand in combination with an imagery from air using unmanned aerial vehicle (UAV). Individual trees were identified and modelled using an algorithm, next cuts at the breast height were created from the photogrammetric cloud and finally diameter in breast (DBH) was calculated for each tree as well as the tree height was assigned to the position of each tree stem. The error of the diameter estimation was observed to be 3,3 cm root mean square error (RMSE) and the height estimation error was 1,3 m. Apart from the mentioned accuracy, the main advantage of the proposed work is shorter time demand for field measurement; we could complete both inventories of 1 hectare forest stand in less than 2 h of field work.

Key words: aerial photogrammetry, terrestrial photogrammetry, forest inventory, point cloud

Obsah

1. Úvod	9
2. Cíl práce.....	11
3. Literární přehled	12
3.1. Fotogrammetrie	12
3.1.1. Historie fotogrammetrie.....	12
3.1.2. Dělení fotogrammetrie	14
3.1.3. Principy fotogrammetrie	17
3.2. Bezpilotní prostředky (UAV).....	20
3.2.1. Definice bezpilotních prostředků.....	20
3.2.2. Historie bezpilotních prostředků.....	21
3.2.3. Klasifikace bezpilotních letounů	21
3.2.4. Typy bezpilotních letounů	22
3.2.5. Aplikace bezpilotních letounů v praxi	23
3.3. Agisoft PhotoScan.....	24
3.4. ArcGIS	26
3.5. Dosavadní výzkum využití fotogrammetrie pro inventarizaci lesa.....	27
3.6. Inventarizace lesa se zaměřením na speciální metody dendrometrie.....	28
3.6.1. Technologie Field-Map.....	28
3.6.2. Statistická inventarizace lesa	30
3.6.3. Národní inventarizace lesů.....	32
3.6.4. DendroScanner.....	32
4. Metodika.....	34
4.1. Popis porostu.....	34
4.2. Terénní práce.....	35
4.2.1. Zaměření stanovisek	35
4.2.2. Zaměření polohy jednotlivých stromů	35

4.2.3.	Měření porostních charakteristik	35
4.2.4.	Pozemní fotogrammetrie.....	37
4.2.5.	Letecká fotogrammetrie	40
4.3.	Kancelářské práce	42
4.3.1.	Agisoft PhotoScan	42
4.3.2.	LAStools	47
4.3.3.	ArcGIS	48
4.3.4.	Statistické vyhodnocení	54
5.	Výsledky.....	55
5.1.	Výsledky z terénního měření	55
5.2.	Vyhodnocení přesnosti fotogrammetrických mračen bodů	55
5.3.	Vyhodnocení přesnosti pozemní fotogrammetrie	56
5.3.1.	Detekce stromů	56
5.3.2.	Digitální model terénu	57
5.3.3.	Výčetní tloušťky a výšky stromů.....	58
6.	Diskuze.....	62
7.	Závěr	69
8.	Summary.....	71
9.	Seznam použitých zkratk	73
10.	Seznam literatury	74
11.	Seznam obrázků a tabulek	78
12.	Seznam příloh	80

1. Úvod

Od vzniku lesnictví patří neodmyslitelně k jeho základním potřebám i potřeba měřit přírůstky a objem dřeva jako nástroje pro plánování produkčních a těžebních možností porostů a lesních majetků. Významnou roli hraje i potřeba měření objemu dřeva pro účely obchodu. Dendrometrie je specifický a specializovaný lesnický obor, do něhož rovněž zasahuje hospodářský a technologický rozvoj celé společnosti. V rámci oboru se postupně přešlo od nejjednodušších pomůcek, reflektujících potřebu zjišťování objemu dřeva k důmyslným výškoměrům či k elektronickým registračním průměrkám a dalším technickým přístrojům, umožňujícím zlepšení kvality měření porostních charakteristik a úsporu času obsluhujícího personálu. Kromě všeobecného využívání počítačů pro zpracování dat a modelování je možno využít tuto techniku pro zpracování mračen bodů, k nimž jsou podkladová data v terénu získávána několika způsoby, a to například buď na základě leteckého a pozemního laserového skenování, či na základě letecké a pozemní fotogrammetrie, či kombinací těchto sběrů dat. Každá z metod sběru dat pro tvorbu mračen bodů v rámci 3D modelování má své výhody a nevýhody pro vybrané skupiny uživatelů. Přístroje pro účely sběru dat formou laserového skenování jsou ve vztahu k fotografickým přístrojům relativně nákladné a s vyšší hmotností, která se projeví hlavně při práci obsluhy přístrojů v terénu. Na druhou stranu pracují laserové skenery oproti fotografickým přístrojům i za zhoršených světelných podmínek. Fotografické přístroje pro získávání dat v rámci pozemní fotogrammetrie jsou oproti laserovým skenerům mnohem levnější a rovněž mají i nižší hmotnost. Nejčastějším využitím pozemní fotogrammetrie v dendrometrii je získání údajů o rozměrech, tvaru a objemu kmene, rovněž bývají fotografie využívány i k odhadu celkové biomasy stromu.

S rozvojem výpočetní techniky a specializovaného softwaru jakým je například Agisoft PhotoScan se metody pozemní fotogrammetrie a jejich následná aplikace pro účely inventarizace větších lesnických ploch začaly více prozkoumávat, a to hlavně díky iniciativě vědců ze severských zemí. Mezi první výzkumy, analyzující možnosti využití běžných digitálních fotoaparátů nebo jejich soustav se řadí výzkumy na zkusných plochách ve Finsku a ve Švédsku, spadající do nedávného období let 2014-2016.

V České republice byl první výzkum přesnosti měření pozemní fotogrammetrie proveden na území 1 hektaru lesní plochy v roce 2016, a to týmem vědců z Mendelovy univerzity v Brně. V rámci výzkumu byla na základě pozemní fotogrammetrie zkoumána možnost

stanovení výčetní tloušťky stromů a výšky stromů, a to díky unikátní metodě propojení dvou mračen bodů, získaných na základě leteckého snímkování z fotoaparátu, neseného UAV a ze snímků z fotoaparátu, neseného v terénu výzkumníkem na nosné konstrukci.

Tato diplomová práce navazuje na předchozí výzkum v ČR, pro zkvalitnění sběru snímků je rozšířen počet fotoaparátů, nesených na konstrukci, z jednoho kusu na dva. Rozšířen je rovněž subjekt zkoumání, a to listnatý porost v předmýtním věku.

V první části diplomové práce je na základě teoretických zdrojů popsána problematika inventarizace lesa se zaměřením na speciální metody dendrometrie, včetně charakteristiky a využití bezpilotních leteckých prostředků. Rovněž je charakterizován princip fotogrammetrie a stereofotogrammetrického zpracování snímků v softwaru Agisoft PhotoScan. Ve vlastní části práce je charakterizováno zájmové území, tj. území na ŠLP Křtiny, kde byla zaměřena poloha stromů pomocí totální stanice a kde došlo k zaměření výšek a tlouštěk stromů. Následně jsou v práci uvedeny postupy a výsledky zpracování dvou mračen bodů, získaných na základě pozemní a letecké fotogrammetrie, včetně získaných dendrometrických veličin stromů. Výsledky jsou statisticky vyhodnoceny a v závěru jsou uvedeny výhody a nevýhody metody při praktickém využití, včetně časové náročnosti na inventarizaci.

2. Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je ověření možnosti využití pozemní fotogrammetrie v kombinaci s leteckou fotogrammetrií pro inventarizaci lesních porostů a provedení analýzy výsledků, získaných v rámci sběru a zpracování dat pro automatický výpočet stromových parametrů z fotogrammetrického mračna bodů získaného pozemním snímkováním lesního porostu a snímkováním ze vzduchu pomocí UAV.

Díličními cíli jsou:

- popis aktuální problematiky inventarizace lesa se zaměřením na speciální metody dendrometrie včetně využití bezpilotních leteckých prostředků (UAV).
- sběr dat v terénu
- zpracování dat z pozemního snímkování a ze snímkování ve vzduchu pomocí softwaru Agisoft PhotoScan Profesional a softwaru ArcGIS 10.3.
- statistické porovnání hodnot dosažených pomocí automatického zpracování dat s hodnotami změřenými v terénu
- diskuze a stanovení časové náročnosti analyzované metody včetně vymezení výhod a nevýhod při jejím praktickém využití

3. Literární přehled

3.1. Fotogrammetrie

Samotný název „fotogrammetrie“ nachází svůj původ v řečtině (*Fotos*- světlo a *Graphos* – záznam, kresba).

Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z fotografického záznamu (Pavelka, 2003).

Fotogrammetrii můžeme řadit mezi vědní obor, který se zabývá zpracováním informací, získaných o objektech měření zpravidla na fotografických snímcích. Tato metoda má za účel snížit čas, který bychom jinak vynaložili pro sběr dat mapováním nebo průzkumem krajiny (Šmidrkal, 1986).

Záznam lze pořídit buď analogově světlocitlivou vrstvou, tedy běžnou fotografií, nebo digitální formou (digitální fotogrammetrie).

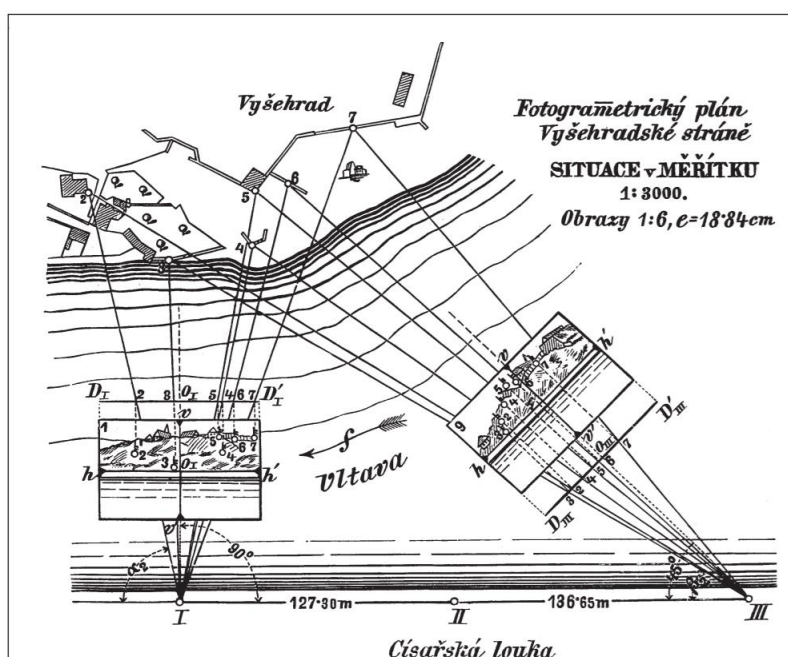
3.1.1. Historie fotogrammetrie

Počátky fotogrammetrie sahají ještě před vynález fotografie. Jestliže můžeme tvrdit, že se snímky dají považovat za středové průměty objektů měření a fotogrammetrie se jejími poměřováním zabývá, můžeme zmínit arabského učenice Al Hassan bin Al Haithm, který přibližně v roce 1032 byl jako první, kdo popsal „cameru obscuru“.

Prvním, kdo uvedl do praxe centrální promítání, které je využíváno jako jedna ze zobrazovacích metod ve fotogrammetrii, byl Leonardo Da Vinci (1452 - 1519). Popsal a vyrobil dírkovou komoru, která umožňuje pozorovaný předmět překreslit pomocí centrální projekce. Jan Kepler tuto komoru zlepšil tím, že přidal spojnou čočku, tímto vznikla camera clara (Voženílek, 2001).

V roce 1839, se o vyhotovení první fotografie zasloužili Niepce a Daquere. O zdokonalení fotografie se dále zasloužil H.F. Talbot, který do této technologie zavedl proces negativ – pozitiv a umožnil tak zhotovení většího počtu stejných fotografií z jednoho negativu. Dva roky po vynálezu fotografie, slovenský vědec prof. J. M. Petzval zavedl do geometrické optiky exaktní výpočetní metody, tím, že zkonstruoval moderní objektiv. Zavedení exaktních výpočetních metod přispělo k rozvoji fotogrammetrie (Voženílek, 2001).

Za zakladatele fotogrammetrie se považuje francouz Laussedat, který krátce po vynálezu fotografie začal fotografické snímky aplikovat do praxe pro měřické účely. V roce 1861 ve Francii byla poprvé využita fotografie při mapování. Toto pozemní mapování bylo provedeno průřezovou metodou. U nás se významnou osobností v tomto oboru stal Dr. K. Kořistka, který se na studijní cestě v roce 1862 seznámil s fotogrammetrií přímo od Laussedata. Po návratu zhotovil první fotogrammetrické měření u nás. Zvolil si dvě stanoviště, první na Hradčanech a druhé na Petříně, kde zhotovil snímky a pomocí průřezové metody určil polohy věží a jiných významných bodů na území Prahy (obr. 1). (Šmidrkal, 1985).



Obr. 1 Fotogrammetrický plán Vyšehradské stráně (Böhm, 2002)

Velmi využívanou se stala metoda průřezové fotogrammetrie, pomocí níž bylo zhotoveno v letech 1893 – 1897 mapování Tater v měřítku 1:25 000. Metody však měla velké nedostatky v obtížné identifikaci odpovídajících bodů na snímcích. K odstranění těchto nedostatků, přispěla technologie stereofotogrammetrie, díky ní došlo k usnadnění identifikace bodů na snímcích a ke zvýšení přesnosti u fotogrammetrie. Zakladatelem stereofotogrammetrie byl Dr. C. Pulfrich, který zavedl do fotogrammetrie stereoskopii a vyrobil první „stereokomparátor“, přístroj na stereoskopické měření snímkových souřadnic. Tento přístroj položil základy složitějším přístrojům pro analogové (opticko-mechanické) vyhodnocování (Šmidrkal, 1992).

Fotogrametrii velmi ovlivnil i fenomén létání a tak se začala rozvíjet letecká fotogrammetrie. Jako první kdo pořídil snímky ze vzduchu byl v roce 1858 francouz Nadar. Největší rozmach zaznamenala letecká fotogrammetrie v období první světové války, kde byla využívána pro účely sledovací a interpretační. Během této války byla více jak polovina letadel využívána pro letecké snímkování (Pavelka, 2009).

Šmidrkal (1985) uvádí, že první letecké stereofotogrametrické snímkování u nás se uskutečnilo v roce 1921 na území města Trutnova.

Obrovský význam letecké fotogrametrie pro mapování si můžeme uvědomit z následující skutečnosti: Vojenský zeměpisný ústav do r. 1938 zmapoval pozemní fotogrametrií cca 1600 km² a leteckou přes 67 000km² (Böhm, 2002).

V dnešní době drží prvenství analytická metoda vyhodnocování, která byla patentována již roku 1957, ale díky náročnosti se začala dostávat do popředí až v 80. letech, kdy nastala obrovská expanze výpočetní techniky. Vznikaly nové digitální systémy a taky digitální fotogrammetrie (Viktora, 2014).

V rámci studií, uvedených ve sborníku ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) je analyzován vývoj fotogrametrie, a to hlavně v období let 2004-2008. V článku s názvem „Scientific – technological developments in photogrammetry and remote sensing between 2004 and 2008“ je konstatováno, že dynamický vývoj oboru ve výše uvedeném časovém období vykazoval vysokou dynamiku, a to hlavně díky technologickému vývoji v oblasti snímacích zařízení, vývoji nových a aplikací, počítačových věd, umělé inteligence a metod vizualizace (Li, Chen, Baltsavias, 2008).

3.1.2. Dělení fotogrammetrie

ZÁKLADNÍ DĚLENÍ

- Podle polohy stanoviska
- Podle počtu a konfigurace snímků
- Podle technologického postupu zpracování
- Podle typu výstupu

Podle polohy stanoviska

Wolf (2014) vymezuje z hlediska fotogrammetrie dva druhy snímků, a to pozemní (terrestrial) a letecké (aerial). Pavelka (2004) toto rozdělení doplňuje ještě o snímky družicové.

POZEMNÍ (BLÍZKÁ) FOTOGRAMMETRIE

Snímkování probíhá většinou ze země. Kamera je pevně ustavena a tak lze pro geodetické účely přesně zaměřit její polohu. Mezi velkou nevýhodou patří překrývání objektů okolním prostředím (stromy, vozidla, jiné stavby), kde vznikají hluché – nevyhodnotitelné oblasti. Hlavně díky cenové dostupnosti digitálních fotoaparátů a vyhodnocovacího softwaru význam pozemní fotogrammetrie prudce vzrůstá. K pořizování pozemních snímků lze využít celou škálu fotoaparátů od běžně dostupných levných komerčních až po speciální.

V řešené práci byla použita pozemní fotogrammetrie, ale kamery nebyly pevně ustáleny na stanovisku a měřič se s nimi pohyboval, tímto byla docílena eliminace nevyhodnotitelných oblastí, ale vzrostla náročnost při zjišťování polohy záznamového média a tím i náročnost na čas a výpočetní techniku.

LETECKÁ FOTOGRAMMETRIE

Snímací přístroj je při této metodě umístěn na pohyblivý dopravní prostředek, v rámci této práce byl použit bezpilotní letoun – hexakoptéra DJI S800. Největší výhodou je rychlé snímkování veliké plochy. Nevýhodou je složité okamžité zjišťování polohy záznamového média, čímž se komplikují metody zpracování. Pro záznam polohy se využívají GPS systémy.

Jak uvádí Wolf (2014), skupina leteckých snímků bývá dále dělena na svislé (vertical) a šikmé (oblique). V případě svislých snímků by osa snímače měla směřovat kolmo ke snímanému povrchu. Zvláštním druhem svislých snímků jsou tzv. truly vertical. Jsou to snímky, které mají osu záběru naprosto kolmou.

DRUŽICOVÁ FOTOGRAMMETRIE

Družicová fotogrammetrie je realizována pomocí družic na oběžné dráze Země. Vznikla na základě špionážních a interpretačních snímků specializovaných družic již v šedesátých letech. V roce 1984, kdy byla vypuštěna první komerční družice Spot 1, která byla využívána pro civilní účely. Družicovou fotogrammetrii můžeme rozdělit podle rozlišení

na 3 úrovně rozlišení a to na nízké a střední rozlišení, vysoké rozlišení a velmi vysoké rozlišení. U velmi vysokého rozlišení dosahuje rozlišení jednoho obrazového bodu zhruba 1m^2 na zemském povrchu. Družice mohou poskytovat data v několika spektrech a rovněž poskytují radarové informace. Družicové snímkování se provádí ve výškách nad 200 km (Pavelka, 2009).

Podle počtu a konfigurace snímků

JEDNOSNÍMKOVÁ FOTOGRAMMETRIE

Zde je využíván jednotlivý snímek měřeného předmětu. Vztah využívaný v jednosnímkové fotogrammetrii se nazývá kolineace a je vyjádřen projektivní transformací. Vzhledem k tomu, že takto na snímku změříme pouze rovinné souřadnice, lze určit zase jen rovinné souřadnice (dvou dimenzionální měření). Používá se pouze na předměty rovinné či blízké rovinným. Třírozměrnou rekonstrukci lze použít jen tehdy, pokud jsou k dispozici další geometrické informace o předmětu, či se na snímku nachází objekt o známých rozměrech (Pavelka, 2009). Jednosnímková konfigurace se dá vhodně využít pro ortofotografie, fotoplány a mozaiky rovinatých území bez požadavků na vysokou přesnost.

STEREOFOTOGRAMMETRIE

Princip spočívá v nahrazení přirozeného lidského prostorového vidění pozorováním „stereoskopických dvojic“ neboli stereogramů, které při pozorování vytvářejí prostorový efekt. Stereoskopická dvojice jsou dva měřičské snímky pořízené z různých stanovišť o předem definované vzdálenosti a s předem daným sklonem směrů snímání. Pro vyhodnocování stereografických snímků se následně využívá stereoautografu či digitálního komparátoru (Svatý, 2012).

VÍCESNÍMKOVÁ FOTOGRAMMETRIE

V principu je předmět nasnímán neomezeným počtem snímků z takových poloh, které umožní dostatečné protínání úhlů paprskových trsů v prostoru. Její uplatnění je hlavně při 3D zpracování. Předmět je zobrazen na dvou snímcích pořízených z různých míst, ze známých bodů na snímku jsme schopni dopočítat jeho prostorovou polohu. Pro vyhodnocování snímků se využívají dvě metody – stereofotogrammetrická a průseková.

Podle technologického postupu zpracování

Rozlišují se metody analogové, analytické a digitální. U metody analogové se používají pro vyhodnocení opticko-mechanické zařízení, které jsou velmi složité a je u nich potřeba dlouhodobý zácvik pracovníků aby vyhodnocení bylo přesné.

Metoda analytická převádí snímkové souřadnice do geodetických pomocí prostorových transformací, které se řeší na počítači. Touto metodou se dají zpracovat jakékoliv snímky, nejvhodnější jsou však snímky s rovnoběžnými osami a dostatečným překrytím.

Metoda digitální využívá digitální obraz pořízený přímo digitálním fotoaparátem. Lze také využít postup digitalizace analogových snímků pomocí skenerů, ale tímto postupem vzniká ztráta obrazové informace oproti původnímu snímku.

Podle typu výstupu

Ze zpracování dat získáváme výstupy buď v podobě grafické, nebo numerické. Grafická podoba získaná z analogového zpracování je dnes již málo využívána protože se těžko dále zpracovává pomocí výpočetní techniky. Výsledkem je kartografický originál s polohopisnou a výškopisnou složkou mapy.

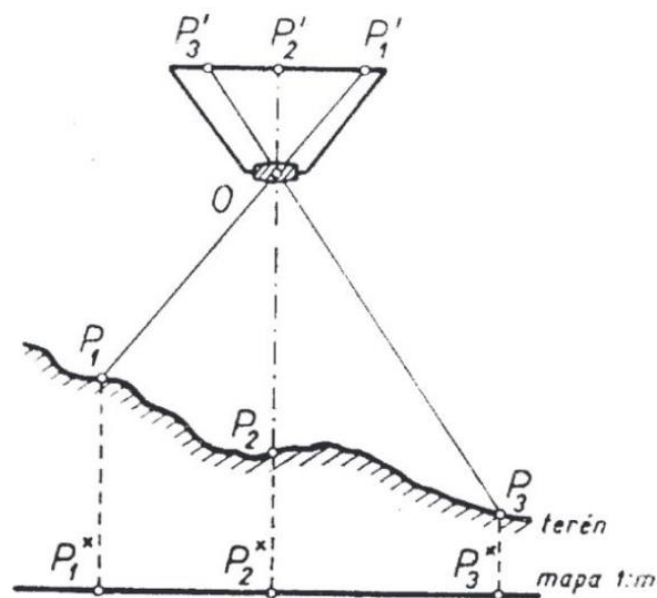
Numerické hodnoty vypočtené počítačem se snadno dále zpracovávají k nejrůznějším účelům. Výsledkem jsou v rastrové nebo vektorové formě a lze je libovolně editovat, ukládat a přenášet.

3.1.3. Principy fotogrammetrie

Základním principem vzniku fotogrammetrického snímku je centrální projekce. Vztah mezi předmětem a jeho interpretací je definován jako fotogrammetrický svazek paprsků v době záznamu procházející středem promítání. Tvar a velikost předmětu můžeme rekonstruovat, jestliže známe polohu a tvar fotogrammetrického svazku paprsků. Poloha předmětu je vyjádřena snímkovými souřadnicemi. Tvar svazku paprsků je určen vnitřní orientací a polohu určují prvky vnější orientace.

Centrální projekce

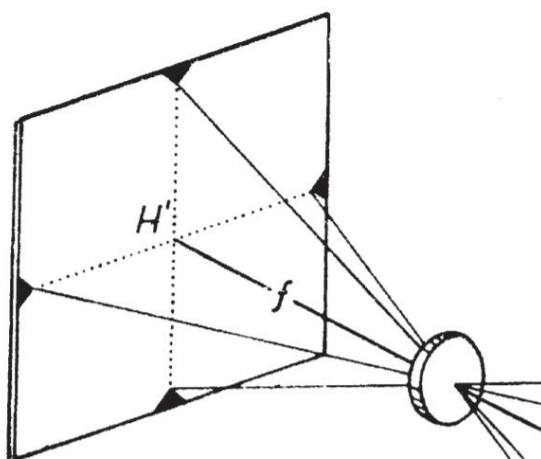
Böhm (2002) uvádí, že fotografický snímek předmětu je jeho centrální projekcí, přičemž středem promítání je střed objektivu a obrazovou rovinou je citlivá vrstva filmu nebo u digitálních fotoaparátů snímací senzor. Všechny paprsky od předmětových bodů P_1 , P_2 a P_3 prochází fotografickým objektivem (tedy středem promítání) a pokračují přímočaře dále a tvoří na fotografické vrstvě perspektivní obraz P_1' , P_2' , P_3' . Souhrn těchto paprsků označujeme jako fotogrammetrický svazek paprsků. Abychom mohli převést centrální projekci na paralelní rovinu mapy, musíme znát tvar a polohu fotogrammetrického svazku paprsků.



Obr. 2 Projekce mapy a snímku (Böhm, 2002)

Vnitřní orientace snímku

Tvar fotogrammetrického svazku paprsků je vyjádřen vnitřní orientací snímku, která vyjadřuje vztah projekčního centra (střed objektivu fotokomory) vůči obrazové rovině. Prvky vnitřní orientace je poloha paty kolmice na obrazové rovině, t.j. hlavní bod H' a obrazová vzdálenost, t.j. délka kolmice spuštěné z projekčního centra na obrazovou rovinu (Böhm, 2002).

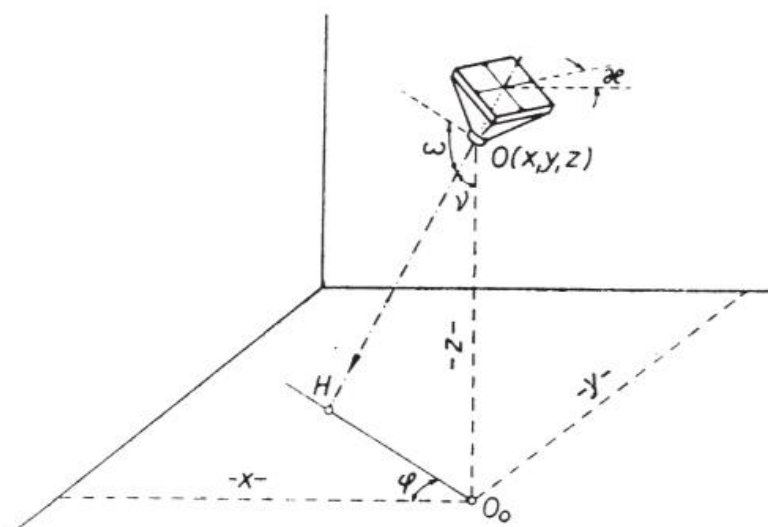


Obr. 3 Vnitřní orientace snímku (Böhm, 2002)

Vnější orientace snímku

Prvky vnitřní orientace snímku definují tvar fotogrammetrického svazku paprsků. Polohu fotogrammetrického svazku paprsků v prostoru určuje šest prvků vnitřní orientace (Obr.4)

- a) prostorové souřadnice x_0, y_0, z_0 stanoviště, tj. středu promítání
- b) směr osy záběru, resp. rotace, označován ω
- c) sklon osy záběru, měřený ve svislé rovině od horizontály, označován φ
- d) pootočení, tj. úhel, který vyjadřuje otočení snímku ve vlastní rovině kolem osy záběru, označován κ .



Obr. 4 Prvky vnější orientace snímku (Böhm, 2002)

3.2. Bezpilotní prostředky (UAV)

3.2.1. Definice bezpilotních prostředků

UAV je zkratkou anglického Unmanned Aerial Vehicle, v překladu tedy bezpilotní létající prostředek. Již z názvu je možno poznat hlavní rozdíl od klasických létajících strojů s posádkou a to ten, že se pilot fyzicky nenachází na palubě stroje. Názvem bezpilotní je zde míněno, že se pilot nenachází na palubě stroje, ale operuje na vzdáleném stanovišti nebo je stroj řízen částečně či plně automatizovaně pomocí dynamických autonomních systémů podle předem definované dráhy letu (www.theuav.com).

Úřad civilního letectví (ÚCL) definuje bezpilotní letadlo jako: „Letadlo určené pro provoz bez pilota na palubě“. Bezpilotní systém je definován jako „Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například datového spoje pro řízení a kontrolu a prvku pro vypuštění a návrat.“ (Doplněk X – Bezpilotní systémy. In: Hlava 3, ust. 3.1.12.2008).

Do bezpilotních prostředků lze zařadit několik typů létajících strojů. Patří sem klasické letadla a vrtulníky, ale také drak, horkovzdušný balón, vzducholodě a vícemotorové vrtulníky tzv. multikoptéry.

Podle ÚCL (2008) je za bezpilotní letadlo považován jakýkoliv typ létajícího prostředku (balón, vrtulník atd.), který přesáhne hmotnost 20 kg nebo pokud je i při hmotnosti nižší než 20 kg využíván k jiným než rekreačním a sportovním účelům, tzn. například k experimentálním a komerčním.

Provoz UAV je obecně umožněn ve vzdušném prostoru třídy G. Tento vzdušný prostor sahá od země do výšky 300 m nad zemí. Provoz bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla nesmí být prováděn v zakázaných, nebezpečných a jiným uživatelem aktivovaných omezených, rezervovaných a vyhrazených prostorech s výjimkou, kdy tak povolí ÚCL. Provoz bezpilotního letadla a/nebo modelu letadla nesmí být prováděn ve větší přímé vzdálenosti od pilota nebo pozorovatele, než která pilotovi nebo pozorovateli umožní trvalý nezprostředkovaný vizuální kontakt a plnou schopnost letadlo bezpečně řídit a vyhýbat se jinému provozu (Sborník RPAS, 2014)

3.2.2. Historie bezpilotních prostředků

Historii UAV můžeme datovat od druhé poloviny 19. století, ještě před prvním pilotovaným letem bratří Wrightů. Jednalo se horkovzdušný balón, kterým v roce 1858 Gaspard-Félix Tournachon pořídil snímek Paříže. V době první světové války, byly nasazováni draci a balóny ke špionážním účelům, hlavně ke sledování postupu nepřátelských vojsk. Během 30. let a období 2. světové války se objevují první rádiem řízená letadla, která jsou schopna opakovaného letu.

Velký pokrok pro dálkový průzkum země pomocí bezpilotních prostředků, bylo vynalezení bezpilotního letounu s rotačním křídlem. Zprvu tyto modely byly omezeny nosností, ale díky prudkému vývoji techniky a technologie, které přineslo zmenšování součástek a zvyšování výkonu, bylo možno na tyto modely umístit snímkovací zařízení. V dnešní době tato technologie zažívá obrovský rozmach, hlavně díky dostupnosti, přesnosti, ekonomické efektivitě a popularitě u veřejnosti.

3.2.3. Klasifikace bezpilotních letounů

Bezpilotní letouny je možno rozdělit do několika kategorií. Dají se rozdělit na stroje lehčí nebo těžší než vzduch, s pohonem nebo bez pohonu a podle velikosti. Dále je možno UAV klasifikovat podle typu křídel na letouny s pevným, nastavitelným nebo rotačním křídlem (Aber a kol. 2010).

Tab. 1 Klasifikace UAV dle typu pohonu a hmotnosti (upraveno podle Eisenbeiß, 2009)

Typ UAV	Lehčí než vzduch	Těžší než vzduch		
Bezmotorový		Padákové křídlo	Pevné křídlo	Rotační křídlo
		Rogalo	Kluzáky	
	Balon	Paraglide		
		Draci		
Motorový	Vzducholoď	Paraglide	Vrtulové letadlo	Jednorotorové
			Proudové letadlo	Koaxiální
				Čtyřrotorové
				Víceroťorové

3.2.4. Typy bezpilotních letounů

Drak

Velmi oblíbená platforma mezi amatérskými fotografy, hlavně díky své jednoduchosti a cenové dostupnosti. Využití lze nalézt i u odborníků zabývajících se dálkovým průzkumem Země. Pro využití draka je nutná přítomnost větru o síle alespoň 4m/s. Maximální nosnost může dosahovat až 3 kg (Aber, 2010).

Balón

Platforma vhodná pro maloplošné snímkování lokalit, své uplatnění může najít i při časoběrném snímkování z jednoho místa. Balóny se plňjí heliem, proto se řadí do kategorie lehčí než vzduch. Nevýhoda je špatná manévrovatelnost (Miřijovský, 2013).

Letadlo

Velmi využívaným typem UAV jsou modely letounů, které jsou oblíbená díky své výdrži a dlouhému doletu. Veliká výhoda pro snímkování je stabilní a hladký průběh letu. Model lze řídit i pomocí automatických řídicích a plánovacích systémů.

Vrtulník

Bezpilotní prostředek velmi vhodný pro práce malého rozsahu s velkými terénními složitostmi (horské oblasti, zástavba), hlavně díky schopnosti kolmého startu a přistání. Nevýhodou je náročná ovladatelnost, stroje s autopilotem bývají nákladné.

Více rotorové UAV

Nejmladší, ale v odborné praxi velmi využívaná platforma u které se zažil název multikopter. Multikopter má minimálně tři nosné rotory, ale nejčastější jsou quadkoptéry, hexakoptéry atp. Mezi veliké výhody patří snadné ovládání a manévrovatelnost stroj. Pohyb a navigace do určitého směru je docílena precizní regulací tahu jednotlivých rotorů, toto zajišťuje řídicí jednotka. Řídicí jednotka využívá data z gyroskopu a akcelerometru s kombinací GPS systémů, tímto je možné zajistit dokonalou stabilní polohu a plynulý let vhodný pro letecké snímkování.

3.2.5. Aplikace bezpilotních letounů v praxi

Bezpilotní prostředky zejména slouží jako nosná platforma pro různé snímací zařízení využívaná v dálkovém průzkumu Země a fotogrammetrii. Stroje jsou nejčastěji osazeny fotoaparáty, videokamerami, infra snímači a termálními kamerami. Typ bezpilotního prostředku je vždy volen dle konkrétní aplikace a úkolu, pro který má být využitý.

Z pohledu využití bezpilotních letounů v oblasti lesa a lesnické praxe, bylo publikováno několik významných výzkumů a závěrečných prací na toto téma.

Miřijovský (2013) ve své disertační práci prezentuje UAV jako vhodnou alternativu pro dálkový průzkum Země. Vytvořil koncept pro získání velmi přesných fotogrammetrických dat a poukazuje na vhodnost využívání bezpilotních prostředků ve fotogrammetrii.

Významným projektem bylo využití UAV pro monitoring úspěšnosti umělé obnovy na velkoplošných holinách vzniklých po orkánu Kyrill v roce 2007 v Horní Plané. Z analýzy ortofota pořízeného pomocí vírníku Autogyro Calidus 2 se podařilo vylíšit 960 sazenic z původních 1000 vysázených (Ulrich a kol. 2012).

Hyypa a kol. (2008) využili bezpilotní letouny k inventarizaci lesa na zkusných plochách ve Finsku. UAV využívají jako nosič digitálního fotoaparátu nebo laserového scanneru. Zabývají se extrakcí terénu a modelů výšek ze získaných dat nebo klasifikací dřevin.

Berni a kol. (2009) prokázali, že podobné, někdy i lepší výsledky může poskytovat i monitoring vegetace pomocí bezpilotních prostředků, oproti výsledkům získaných z letadla s posádkou. Velmi důležitým výstupem také bylo, že výzkum v oblasti lesa za pomoci UAV může velmi snížit náklady oproti klasickým metodám dálkového průzkumu Země.

Z těchto publikovaných prací je možno usoudit, že bezpilotní letouny v lesnictví nabízí velkou škálu využití a to nejen pro účely výzkumu, ale také se tyto systémy pomalu dostávají do provozní praxe. Aby byl plně využit potenciál bezpilotních letounů, bude nutné zabývat se těmito možnostmi dále a vytvořit tak postupy pro rychlé a snadné využití těchto technologií.

3.3. Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan je software, který umožňuje zpracování digitálních snímků a generování 3D prostorových dat pomocí fotogrammetrie. Jedná se o software, který přímo nespadá do kategorie geografických informačních systémů. Jeho výsledné produkty se nadále v GIS aplikacích dají s úspěchem využít. Hojně bývá tento software používán k modelování 3D objektů v oblasti archeologie, vytváření digitálních modelů povrchu a digitálního modelu terénu.

Software je nabízen ve dvou verzích, a to Agisoft PhotoScan Professional a Agisoft PhotoScan Standard. Verze se liší nástrojovým vybavením. Uživateli standartní verze softwaru je umožněno provádět pouze fotogrammetrickou triangulaci, generování mračna bodů a 3D modelování, ve verzi Professional jsou nabízeny navíc ještě nástroje pro tvorbu digitálního modelu povrchu (DMP) a digitálního modelu terénu (DTM), nástroje pro georeferencování snímků na základě metadat o snímku uložených ve formátu EXIF či na základě informací o poloze kontrolních bodů. Dále verze Professional nabízí možnost exportování georeferencované ortomozaiky ve formátech kompatibilních s GIS softwary, k dispozici jsou nástroje pro měření vzdáleností, ploch a objemů a rovněž nástroje pro zpracování multispektrálních snímků (Agisoft, 2016). Tento program patří do skupiny komerčních softwarů, ale na stránkách výrobce je možnost získat 30 denní zkušební verzi. Distributoři pro Českou republiku jsou firmy G4D s. r. o. a firma Topcon Positioning Group, licenci lze také získat přímo na stránkách výrobce Agisoft (www.agisoft.com).

Tvorba 3D modelu objektu v prostředí programu je založena na digitální metodě tzv. 3D pozemní fotogrammetrie. Na základě pořízených digitálních fotografií pomocí běžných digitálních fotoaparátů, je umožněna tvorba 3D modelů objektů metodou obrazové korelace. Modelované objekty jsou nejprve snímány digitálním fotoaparátem a následně zpracovány samotným softwarem. Software využívá speciální metodu zpracování dat zvanou Structure from Motion. Tato metoda kombinuje výhody metody průsekové fotogrammetrie a výhody stereofotogrammetrických. Algoritmus Structure from Motion tak velmi zjednodušuje proces snímání, protože dokáže zpracovat jak snímky s rovnoběžnými, tak s konvergentními osami záběru (Miřijovský, 2013).

Tento software byl zvolen, kvůli schopnosti zpracovávat data pořízená jakýmkoli digitálními fotoaparáty (měřickými i neměřickými). Aby výsledná podoba modelu byla co nejpřesnější, je nutné dodržovat pravidla a doporučení při pořizování snímků objektu, která uvádí výrobce ve formě uživatelského manuálu dostupného na webových stránkách softwaru (Agisoft, 2016).

Charakter fotografovaného objektu

Pro získání kvalitních snímků v uživatelském manuálu programu (Agisoft, 2016) můžeme najít různá doporučení. Doporučeno je vyhýbat se snímkování objektů s velkou odrazivostí, lesklým objektům či objektům bez výraznější textury a snímkový objekt se nesmí pohybovat. Uživatelský manuál dále upozorňuje, že snímky zpracovávané v tomto softwaru by neměli být nijak upravované, tímto se myslí jakákoliv geometrická transformace obrazu nebo ořezání.

Proces snímkování objektu

Pro dosažení dobré kvality výsledného modelu je nutno získat dostatečný počet snímku, protože vyšší počet snímků minimalizuje slepá místa, která zabraňují správnému vygenerování 3D modelu. Doporučený překryv snímků je minimálně 60%, vyšší překryv ale znamená větší objem dat a s tím spojenou vyšší časovou náročnost na zpracování. Nároky na snímkování jsou kladeny i na osvětlení, doporučeno je snímkování provádět při zatažené obloze, která zajišťuje rozptýlené měkké světlo a tím i omezuje tvorbu stínů.

Obecný postup práce v softwaru

Importují se fotografie získané při pozemním nebo leteckém snímkování, které by podle uživatelského manuálu neměly být upravované, myslí se tím jakákoliv geometrická transformace nebo ořezání obrazu. V následujícím kroku dochází k seřazení snímků (Align Photos) a k výpočtu polohy fotoaparátu. Jak uvádí Miřijovský (2013), výstupem kroku Align Photos jsou určené prvky vnitřní a vnější orientace a mračno spojovacích bodů (Miřijovský, 2013). Nabízí se zvolení z pěti úrovní přesnosti (Accuracy) a možnosti předvýběru párů (Pair preselection), která proces výpočtu polohy fotoaparátu urychluje.

Následujícím krokem je vygenerování hustého mračna bodů (Build Dense Cloud). Výsledná kvalita mračna je zvolena parametrem Quality, která nabízí pět možností Lowest, Low, Medium, High, Ultra high. Díky vlivu některých faktorů jako je šum ve

snímčích, neostrost snímků a nedostatečná textura, se mohou mezi body vyskytovat odlehle hodnoty pixelů. Proto program nabízí možnost filtrování (Depth filtering) těchto nepřesností, kde je na výběr ze čtyř algoritmů, a to Disabled, Mild, Moderate, Aggressive.

Podrobně je postup zpracování snímků v softwaru Agisoft PhotoScan professional popisován v kapitole 4. Metodika.

3.4. ArcGIS

ArcGIS Desktop (dále jen ArcGIS) je software vyvinutý americkou firmou ESRI, Inc. Tento produkt obsahuje sadu nástrojů pro vytváření, správu, analýzu a vizualizaci geodat; která umožňuje budování geografického informačního systému. U tohoto softwaru je možnost rozšíření o extenze, které jsou placené nebo také o uživatelské nadstavby vyvinuté ve standardních programovacích prostředích.

ArcGIS Desktop je licencován ve třech úrovních – Basic, Standard a Advanced, které se liší svojí funkcionalitou.

ArcMap je nejpoužívanější aplikací z balíku ArcGIS Desktop. Poskytuje nástroje pro tvorbu, zpracování, analýzu a následnou vizualizaci prostorových dat. Rovněž nabízí mnoho funkcí pro mapově orientované úlohy a umožňuje tak tvorbu mapových kompozic připravených pro tisk a publikaci (ESRI, 2012).

Sada obsahuje také Arccatalog, což je aplikace vhodná pro organizaci, vyhledávání a využití geografických dat. Umožňuje zaznamenávání, prohlížení a správu metadat a na jejich základě vytvářet dokumentace geografických dat. Poskytuje nástroj pro administrátory GIS datáází pro tvorbu, návrhy a správu geodatabází. Integrovan je také ArcToolbox, který obsahuje kompletní sadu funkcí pro zpracování geodat, obsahuje nástroje pro analýzy prostorových dat, kartografii, geokódování, správu a editování dat (ESRI, 2012).

Pro zpracování dat v této diplomové práci byla využita nadstavba LAStools pro ArcGIS od německé firmy Rapidlasso GmbH. Tato nadstavba obsahuje nástroje pro práci s daty ve formě bodového mračna, je tedy vhodná pro výstupy získané z laserového skenování (LiDAR) nebo pro zpracování bodového mračna získaného pomocí fotogrammetrie.

3.5. Dosavadní výzkum využití fotogrammetrie pro inventarizaci lesa

Kolektiv autorů z Finska, pod vedením X. Lianga zkoumal možnost využití běžně dostupného komerčního fotoaparátu pro sběr dat v lesním terénu a možnosti využití výsledků měření pro lesnické inventarizace. Na zkusné ploše o rozměru 30 x 30 metrů bylo vytvořeno pět fotografických datových sad ze souborů fotografií z terénu, což reprezentovalo rozdílné fotografické podmínky. (Liang, Wang, Jaakkola, Kukko, Kaartinen, Hyyppä, Honkavaara and Liu, 2015).

Problematika odhadu atributů kmenů stromů s využitím pozemní fotogrammetrie a na základě snímkování ze souboru věžovitě uspořádaných fotoaparátů (Canon 7D a Canon 40D) byla řešena ve Švédsku, konkrétně na Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, a to kolektivem autorů Forsman, Börnin a Holmgren (2016). Cílem autorů bylo navrhnout uživatelsky příjemnější a jednodušší metodu pro hodnocení zásob dřeva. V rámci prováděného výzkumu bylo následně možno vyhodnocovat výčetní tloušťku stromů (DBH) a pozice stromů na zkusných plochách. Výzkumný tým navrhl novou metodu pozemní fotogrammetrie, kdy snímacím zařízením bylo 3-5 věžovitě (trojuhelníkovitě) uspořádaných fotoaparátů na nosném rámu. Metoda byla aplikována na zkusných plochách o poloměru 10 metrů.

Kolektiv autorů z České republiky z České zemědělské univerzity v Praze a z Japonska, z Institutu statistické matematiky se zabýval problematikou pozemní fotogrammetrie a přesností odhadů (rekonstrukce) povrchu kmene stromů. Pro účely výzkumu bylo vybráno 20 stromů *Cryptomeria japonica*. V rámci výzkumu využili metodu MVS (Multi-view stereopsis), která kombinuje a spojuje analýzu digitálních snímků z běžných komerčních digitálních fotoaparátů s technikou počítačového vidění. Díky technice MVS dochází k rekonstrukci trojrozměrného (3D) objektu do reálného tvaru a vzhledu. Autoři konstatují, že pozemní fotogrammetrie může být slibnou metodou při inventarizaci lesů, neboť může poskytnout spolehlivé odhady průměrů kmene nejen ve výčetní výšce, ale i dalších průměrů v různých výškách (Surový, Yoshimoto, Panagiotidis, 2016).

Ve výzkumu španělských vědců (Rodríguez-García, Montes, Ruiz, Canellas, Pita, 2014) bylo využito měřicí zařízení MU2005-01738, které bylo vyvinuto a patentováno Centrem pro lesnický výzkum (Center for Forest Research, INIA-CIFOR). Měřicí zařízení MU2005-01738 poskytuje možnost vytvářet stereoskopické hemisférické snímky, které umožnily 3D rekonstrukci (obnovu) lesního porostu okolo místa sběru dat. Cílem studie

byla tvorba metodiky pro mapování lesních porostů a možnosti odvození průměru stromů, výšky stromů a odhadu objemu stromů. Měření provedli na vzorku 30 stromů *Eucalyptus globulus Labill.* na třech plantážích pro výrobu celulózy v jihozápadním Španělsku.

Kolektiv vědců z Nového Zélandu, z University of Canterbury se zabýval problematikou 3D modelování individuálních stromů s využitím běžného fotoaparátu. Využívali principu SfM (structure-from-motion) a multi-view stereofotogrammetrii (MVS). Pomocí metod SfM – MVS byly odhadnuty výšky stromů, výčetní tloušťka a rozsah a objem koruny stromu. Vědci zkoumali možnost tvorby 3D modelů pomocí tzv. počítačového vidění za pomoci tvorby mračen bodů. Následně bylo možno z 3D modelů odhadnout 2D charakteristiky (výška stromu, výčetní tloušťka, hloubka koruny, šířka koruny) a odhadnout i 3D charakteristiku (objem stromu). Bylo zkoumáno 30 malých stromů, zasazených v nádobách. Výsledky autorů Miller, Morgenroth, Gomez (2015) ukázaly, že metoda SfM-MVS je schopna vytvářet odhady 2D a 3D charakteristik s přesností srovnatelnou s laserovým skenováním (LiDAR).

V České republice byl první výzkum přesnosti měření pozemní fotogrammetrie proveden na území 1 hektaru lesní plochy v roce 2016, a to týmem vědců z Mendelovy univerzity v Brně (Mikita et al., 2016). V rámci výzkumu byla na základě pozemní fotogrammetrie zkoumána možnost stanovení výčetní tloušťky stromů a výšky stromů, a to díky metodě propojení dvou mračen bodů, získaných na základě leteckého snímkování z fotoaparátu, neseného UAV a získaných z fotoaparátu, neseného v terénu výzkumníkem na nosné konstrukci. Výzkum byl proveden v čisté smrkové monokultuře v mýtním věku. Tato diplomová práce na tento výzkum navazuje a zkoumá použití této metodiky v listnatém porostu v předmýtním věku.

3.6. Inventarizace lesa se zaměřením na speciální metody dendrometrie

Dílním cílem této práce je představení problematiky inventarizace lesa se zaměřením na speciální metody dendrometrie. Tato podkapitola představuje některé používané metody.

3.6.1. Technologie Field-Map

Technologie Field-Map je systém pro počítačem podporovaný terénní sběr dat s primárním zaměřením na lesnictví. Tento flexibilní systém je vyvíjen a dodáván společností IFER – Monitoring and mapping solutions, s.r.o. (Institute of Forest

Ecosystem Research, Ústav pro výzkum lesních ekosystémů). Počátky vývoje systému sahají až do roku 1999, přičemž již v roce 2008 měl systém své uživatele ve 27 zemích světa a byl k dispozici v pěti jazykových variantách a v roce 2015 měl systém uživatele ve 38 zemích světa (Výroční zpráva IFER, 2015).

Systém Field-Map byl původně vyvinut pro potřeby národních inventarizací. Vzhledem k rozdílným metodikám národních inventarizací různých zemí se jedná o vysokou flexibilitu systému a proto je systém Field-Map využíván i v dalších projektech, zahrnujících terénní sběr dat v lesních ekosystémech. Jedná se o projekty lesnického mapování, popis porostů pro účely lesnického plánování, monitoring pohybu uhlíku, inventarizace krajiny, zaměřování zkusných ploch, mapování chráněných území (Kuželka, Urbánek, 2014).

Mezi nejvýznamnější projekty, které byly řešeny za pomoci technologie IFER (Field-Map), patří v České republice například metodika sortimentace porostů nastojato pro Lesy České republiky, s. p., provozní inventarizace lesů v NP a CHKO Šumava či v NP Krkonoše, opakované celorepublikové inventarizace škod zvěří, národní inventarizace lesů ČR. Mezi projekty v zahraničí se řadí monitoring zásob uhlíku pro nadaci FACE (Uganda, Malajsie, Ekvádor), výzkumy přírodních rezervací v Rumunsku, a především řada národních inventarizací lesů – v Rusku, Irsku, Slovensku, Maďarsku, Ukrajině, na Kapverdských ostrovech.

Jedním z projektů společnosti IFER je i projekt CzechTerra. CzechTerra je statistická výběrová multi-zdrojová inventarizace prováděná ve znáhodněné síti 7 x 7 km a zahrnující 1 599 lokalit statisticky reprezentujících Českou republiku. V každém bodě této sítě je z dat leteckého snímkování metodami rastrové analýzy šetřena čtvercová lokalita o rozloze 22,5 ha. Pokud se ve středu lokality vyskytuje stromová vegetace, zakládá se v něm kruhová inventarizační plocha o rozloze 500 m². Na ní je metodami pozemního měření a hodnocení získáván soubor více než sta charakteristik ekosystému (Černý a kol., 2015).

3.6.2. Statistická inventarizace lesa

Základním principem statistické provozní inventarizace je statistické výběrové šetření, prováděné v síti trvalých inventarizačních ploch. Základním cílem statistické provozní inventarizace je poskytnout spolehlivé, objektivní a reprodukovatelné údaje o vybraných složkách lesního ekosystému s důrazem na stromový inventář. Teprve na základě vzájemného porovnávání dvou po sobě jdoucích inventarizačních šetření na trvalých inventarizačních plochách může statistická provozní inventarizace poskytnout zásadní informace o vývoji lesa a o změnách jednotlivých sledovaných charakteristik včetně informace o běžném přírůstu zásob. Hodnota údajů získaných v rámci provozní inventarizace se zvyšuje se vzrůstajícím počtem opakovaných šetření. Šetření, které probíhá v síti inventarizačních ploch je zaměřeno na získání informací statistického charakteru, reprezentujících daný lesní hospodářský celek i dílčí vyhodnocovací jednotky (strata). Základními komplexními informacemi jsou data o lesním hospodářském celku, typu vývoje lesa, typu porostů a jejich segmentů (Černý, 2014).

Zjišťování zásob v rámci statistické provozní inventarizace probíhá v ČR v síti inventarizačních ploch, které mají kruhový tvar a plochu 500 m² a jsou v nich umístěné tři soustředné kruhy. Podstatou metody je statistické výběrové šetření, takže u zásob je známá přesnost (zhruba 5% na LHC) a interval spolehlivosti. Metoda statistické provozní inventarizace poskytuje statisticky podložená data o stavu lesa (přírůstu, výše zásob, zdravotní stav), souběžně jsou známy údaje o těžebních možnostech.

VYHODNOCENÍ INVENTARIZAČNÍHO ŠETŘENÍ

Údaje, získané ze statistické inventarizace se vyhodnocují s využitím běžných metod, vázaných na použitou výběrovou metodu. Základní statistickou veličinou je celkové množství (například zásoba, počet stromů, rozloha za celek nebo příslušnou vyhodnocovací jednotku), průměrná hodnota (například průměrná hektarová zásoba) a interval spolehlivosti stanovený pro hladinu $\alpha=0.05$.

Při výpočtu průměrných hodnot jsou kromě standardního aritmetického průměru používány dva postupy pro výpočet průměru, vázaného na jednotku rozlohy. Průměrné hektarové veličiny převádějí aritmetický průměr vyhodnocované veličiny, vypočtený pro soubor inventarizačních ploch na jeden hektar: hodnota aritmetického průměru je vydělena rozlohou inventarizační plochy v hektarech. Dalším použitým postupem v rámci statistické inventarizace je tzv. normalizovaný průměr. Ten je vypočten tak, že

hodnota vyhodnocované veličiny za inventarizační plochu je vztažena ne k rozloze celé inventarizační plochy, ale pouze k části, jejíž velikost je dána zastoupením vyhodnocované kategorie. Tímto postupem jsou zpracovány například údaje hektarových zásob jednotlivých dřevin apod.; tyto údaje korespondují s dosud používanými hektarovými zásobami na redukované ploše. Pro další zpracování dat statistické inventarizace je nutno doplnit soubor měřených údajů o ty údaje a veličiny, které nebyly přímým měřením v terénu zjišťovány. Pro stromy, jejichž výška nebyla přímo měřena, je údaj o jejich výšce vypočten pomocí modelu. Objem hroubí kmene s kůrou a bez kůry se pro jednotlivé stromy inventarizačních ploch vypočte podle standardně používaných objemových rovnic různých autorů (smrk, borovice – Korsuň, jedle - Hubač, Šebík, habr, dub, modřín – Čermák, jasan, buk- Hubač, bříza – Košut). Údaje zjištěné v rámci statistické inventarizace jsou vždy doplněny údaji o chybě, se kterou byl daný údaj zjištěn.

Celková chyba každé zjišťované veličiny se skládá ze tří komponent:

- i) ze statistické výběrové chyby,
- ii) z chyby měření,
- iii) z chyby modelu (například z chyby objemových rovnic).

Hlavní pozornost je zpravidla věnována statistické výběrové chybě, protože tato chyba úzce souvisí se způsobem výběru a jeho parametry (intenzita vzorkování, velikost inventarizačních ploch apod.). Pro chybu měření je důležitý předpoklad její náhodnosti. Chyba měření je navíc minimalizována díky použití pokročilých měřících přístrojů. U chyb, souvisejících s použitými matematickými modely je situace složitější, protože zpravidla není k dispozici dostatek údajů, které by umožnily posoudit, zda pro konkrétní empirický materiál reprezentuje použitý model nezkreslený odhad. Většina veličin, zjišťovaných v terénu, je při statistickém zpracování použita jako klasifikátory. Klasifikátorem je nespojitá diskrétní hodnota, pro níž jsou známy údaje vyhodnocované veličiny (Černý, Cienciala, Beranová, 2009).

3.6.3. Národní inventarizace lesů

Národní inventarizace lesů v ČR probíhá na základě výše uvedených principů statistické inventarizace. V rámci sítě NIL2 byly inventarizační plochy rozmístěny ve čtvercové síti s náhodně umístěným počátkem, stranou o velikosti 500 m a orientací sever-jih, východ-západ. Uvnitř každého inventarizačního čtverce (500×500 m) byl zcela náhodně umístěn jeden inventarizační bod. Z inventarizační sítě 500×500m, byly náhodnými podvýběry postupně odvozeny podsítě s neklesajícím (typicky vzrůstajícím) detailem šetření. V každé odvozené podsíti jsou zjišťovány informace přinejmenším ve stejném rozsahu jako v mateřské podsíti (každý bod podsítě s vyšším detailem šetření je zároveň bodem všech podsítí s nižším detailem šetření). V rámci sítě NIL2 byly rozlišeny následující druhy podsítí: a) 500x500 metrů (315 249 ploch), jednalo se o nejhustší síť, kde bylo provedeno pouze fotogrammetrické hodnocení kategorií pozemků a základních atributů (růstová fáze, hustota zápoje, dřevinná skladba) v kategorii pozemků Les, b) 1x1 km (78 856 ploch), v této podsíti byl oproti síti 500x500 m zařazen navíc fotogrammetrický transekt, který slouží k odvození charakteristik několika typů výskytu dřevin mimo kategorii Les, k popisu krajinného rázu, k odhadu délky a vlastností okrajů kategorie Les atd., c) 2x2 km (19 727 ploch), na této podsíti byl navíc prováděn sběr dat pozemním způsobem na kategoriích pozemku Les a Other Wooded Land (OWL), c) 4x4 km (4 920 ploch), na podsíti neboli na ploše rozšířeného šetření bylo navíc prováděno dendrometrické šetření, zaměřené na sběr dat pro dendrometrické modely, jež mají být využity především pro účely vyhodnocení NIL2. Byly sbírány detailní informace o fytoocenózách a stanovišti, včetně pedologických šetření a odběrů vzorků na hluboké půdní sondě, dále byl popisován zdravotní stav jedinců vybraných dřevin. Na transektech mrtvého dřeva bylo prováděno rozšířené šetření, navržené pro odhad množství ležícího mrtvého dřeva ve formě nehroubí (od 2 cm tloušťky). V této podsíti byly pozemně šetřeny plochy kategorie pozemku LES a OWL (Kučera, 2016).

3.6.4. DendroScanner

DendroScanner je konkrétní nástroj, který využívá fotogrammetrické principy pro odvození dendrometrických veličin z digitální fotografie. Autorem aplikace pro tvorbu modelu kmene je Ing. René Tauber. Aplikace je určena především k odvození modelu středního tvaru kmene skupiny stromů jehličnatých či listnatých dřevin s průběžným kmenem. Výsledkem je údaj o množství dřevní hmoty konkrétního kmene a lesního

porostu a odhad potenciálu dřevní hmoty porostu pro rozřazení do jakostních tříd – tyto údaje slouží jako podklad pro výpočet výnosu z lesního porostu. Jedná se o komplexní technologii, sloužící jak k získání primárních dat měření, tak k odvození a aplikaci modelů za účelem získání finálních fotografií (Kuželka, Tauber, Brožková, 2014).

Vstupem pro odvození typické morfologické křivky skupiny stromů jsou digitální fotografie stojících vzorníků, mohou to ale také být kmenové profily, zjištěné dalšími způsoby – přímým měřením profilů pokácených vzorníků nebo měřením profilů stojících stromů pomocí optických či elektronických dendrometrů. Ekonomický přínos využití metodiky spočívá ve zvýšení efektivnosti zjišťování zásoby porostu a úspoře finančních nákladů ve srovnání s celoplošným zjišťováním o 30-70 % v závislosti od rozlohy a terénních podmínek. Tento postup stanovení zásoby porostů je využíván v ČR uživateli FORESTA SG, a. s. v projektu „Prodej dříví na pni“. V zahraničí je DendroScanner využit při měření zásob na Slovensku, rovněž je využíván při stanovení zásoby plantáží v Chile a Nikaragui. Dále byla metoda v ČR využita při tvorbě lokálních objemových tabulek pro Loketské městské lesy s. r. o., při zpracování zjišťování porostní tvarové funkce při inventarizaci NP Šumava (Lesoprojekt východní Čechy, s. r. o.). (Marušák, Tauber, Stolariková, 2013).

4. Metodika

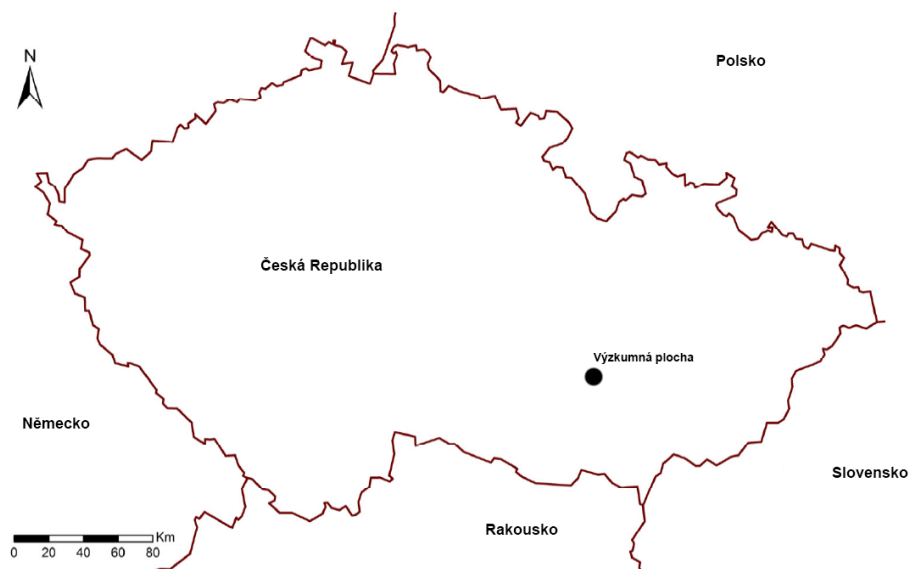
Tato kapitola popisuje přírodní charakteristiky zvoleného porostu, použité postupy při sběru dat terenním měřením a jejich zpracování pomocí softwaru Agisoft PhotoScan a softwaru ArcGIS.

4.1. Popis porostu

Zájmový porost o velikosti 1,15 ha se nachází na Školním lesním podniku Masarykův les Křtiny, polesí Vranov. Porostní skupina 22 B 8, hospodářský soubor 446 tedy bukové hospodářství živných stanovišť lesů zvláštního určení středních poloh. Soubor lesních typů (SLT) na tomto stanovišti je 3B2 tedy bohatá dubová bučina mařinková. Věk porostní skupiny je 78 let.

Tab. 2 Procentické zastoupení dřevin zjištěné z terénního měření

Dřevina	Zastoupení (%)
Buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	50
Habr obecný (<i>Carpinus betulus</i>)	35
Dub (<i>Quercus sp.</i>)	13
Modřín opadavý (<i>Larix decidua</i>)	2



Obr.5 Poloha výzkumné plochy v rámci ČR

Podrobné územní vztahy jsou uvedeny v příloze této práce (příloha 1).

4.2. Terénní práce

4.2.1. Zaměření stanovisek

Na ploše bylo určeno a stabilizováno 6 výchozích polygonových bodů pomocí geodetických mezníků. Tyto body byly zaměřeny pomocí metody RTK (Real Time Kinematic – korekce v reálném čase) GNSS stanicí Topcon Hiper Pro. Tímto bylo zajištěno připojení do státního souřadnicového systému jednotné trigonometrické sítě katastrální (JTSK).

4.2.2. Zaměření polohy jednotlivých stromů

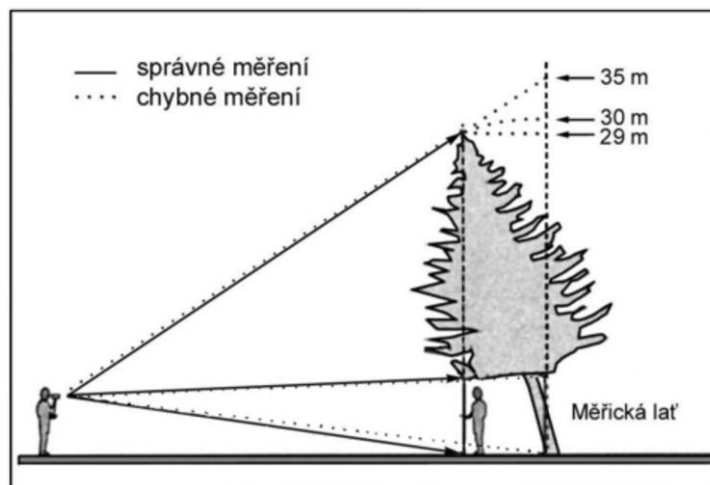
Pro měření polohy jednotlivých stromů byla použita totální stanice Topcon GPT-9003M, s kterou byly zaměřeny na lesní ploše polohy 582 stromů. Výrobce udává, že úhlová přesnost tohoto elektronického tachymetru je 1 mgon, délková přesnost měření je $\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Obě hodnoty spolehlivě splňují požadovanou přesnost podrobného měření. Přístroj umožňuje i bezhranolové měření, které však nebylo využito, protože nebyly zaměřovány přímo paty kmenů, ale svislice vrcholů korun stromů. Přechodné stabilizování jednotlivých tachymetrických stanovisek dřevěným kolíkem nebylo nutno provádět, protože všechna stanoviště byla stabilizována pomocí geodetických mezníků. Orientace na prvním stanovisku byla nejprve zaměřena na známý geodetický bod a dále se provedlo zaměření maximálního možného počtu podrobných bodů (polohy stromů). Na dalších stanoviscích se postupuje obdobně s tím rozdílem, že předchozí stanovisko se využije jako známý geodetický bod.

4.2.3. Měření porostních charakteristik

Pro statistické porovnání přesnosti metody zjišťování stromových charakteristik pomocí pozemní a letecké fotogrammetrie, bylo nutno u každého stromu nejen zaměřit jeho polohu, ale také jeho výšku a výčetní tloušťku (tloušťka kmene ve výšce 1,30 m).

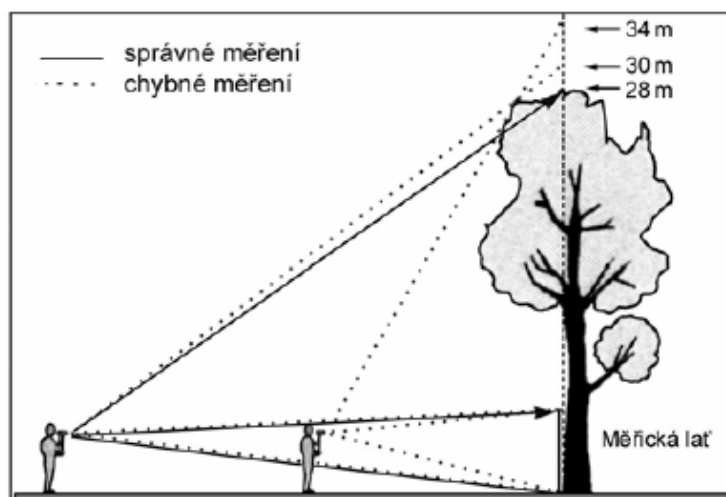
Výška stromu je definována jako svislá vzdálenost mezi horizontální rovinou protínající nejvyšší vegetační orgán stromu a horizontální rovinou protínající patu kmene. Sequens (2005) rozlišuje výšku pravou a výšku svislou. Výška pravá je vzdálenost dvou rovin kolmých k ose stromu vedených vrškem a patou stromu. Výšku svislou Sequens definuje jako vzdálenost dvou rovnoběžných rovin vedených vrcholem a patou stromu. Na stromě, který je většinou od svislice nakloněn, proto měříme zpravidla výšku svislou. Proto se

tedy nezjišťuje poloha paty kmene, ale poloha svislice vrcholu koruny stromu. Při tachymetrickém měření se tudíž odrazný hranol neumísťuje k patě kmene, ale na místo kde svislice vrcholu stromu protíná terén.



Obr. 6 Postup pro měření nakloněných stromů. (ÚHÚL, 2003)

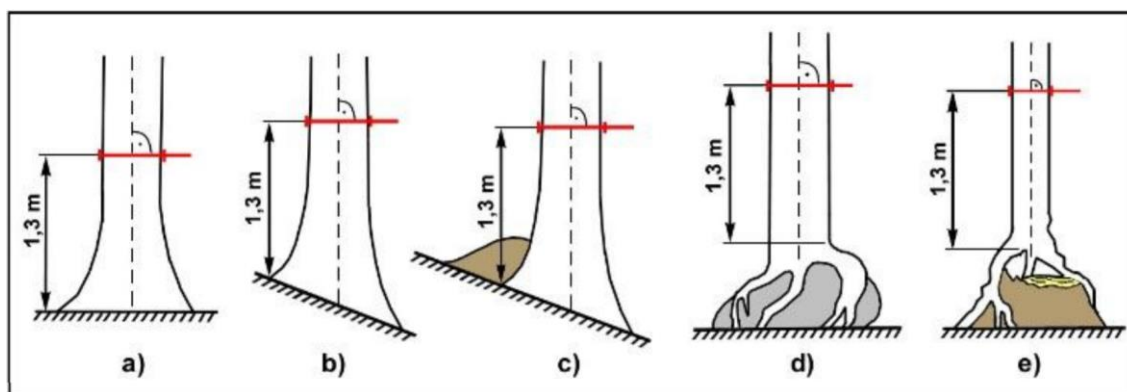
Vlastní měření výšky probíhalo výškoměrem založeným na trigonometrickém principu tj. principu stejnohlosti pravoúhlých trojúhelníků (Sequens, 2005). Jednalo se o elektronický výškoměr TruPulse 360B firmy Laser Technology, Inc. Tento výškoměr změří pomocí laserového dálkoměru vzdálenost ke stromu, poté pomocí sklonoměru určí úhel na patu stromu a úhel na vrchol stromu a následně na základě trigonometrických funkcí provede výpočet výšky stromu.



Obr. 7 Měření výšek listnatých dřevin (dodržování přiměřené odstupové vzdálenosti)(ÚHÚL, 2003)

Výšky stromů byly měřeny z vhodně zvolených stanovisek, ze kterých bylo dobře vidět na vrcholek stromu i na jeho patu. Jedno ze základních pravidel je, že minimální vzdálenost pro měření se musí přibližně rovnat nebo být větší než odhadnutá výška stromu. Další pravidlo, které bylo třeba dodržet, je měření výšky po vrstevnici při zachování minimální odstupové vzdálenosti. Zejména u listnatých dřevin je nutno měřit výšky ze vzdálenosti od měřeného stromu přibližně shodné s výškou stromu nebo větší, protože čím je vzdálenost měřiče od paty měřeného stromu menší, tím bude větší chyba změřené výšky. U listnatých dřevin je při měření výšek nutno vyhledat bod, případně místo, ve kterém se dotýká horizontální rovina obrysově křivky koruny. Veškeré zmíněné zásady a pravidla vycházejí z metodiky venkovního sběru dat pro Národní inventarizaci lesů v letech 2001 – 2004 (ÚHÚL, 2003). Pro zajištění větší přesnosti byly u každého stromu měřeny 2 výšky ze dvou rozdílných míst a tyto hodnoty následně zprůměrovány.

Měření výčetních tloušťek bylo provedeno pomocí lesnické průměrky ve výčetní výšce 1,3 m. Výčetní tloušťky byly zjištěny dvěma měřeními, které byly umístěny kolmo na sebe, změřené hodnoty byly následně zprůměrovány. Měření proběhlo za dodržení všech dendrometrických podmínek z metodiky venkovního sběru dat dle Ústavu pro hospodářskou úpravu lesa (ÚHÚL, 2003).



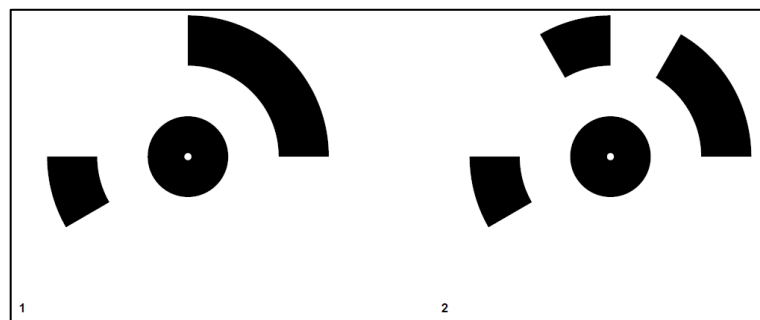
Obr. 8 Určení výšky 1,3 m pro správné měření výčetní tloušťky. (ÚHÚL, 2003)

4.2.4. Pozemní fotogrammetrie

Snímkování porostu metodou pozemní fotogrammetrie, bylo provedeno dne 23. března 2017, toto datum bylo zvoleno hlavně kvůli již dostatečným světelným podmínkám uvnitř porostu.

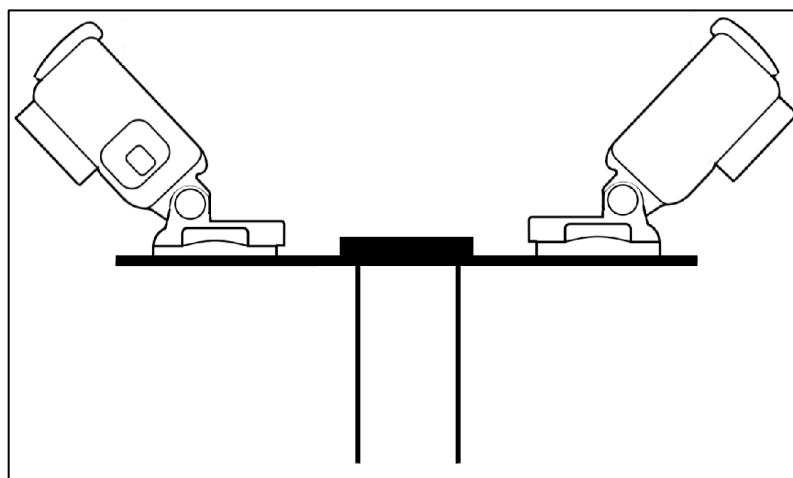
Zprvu bylo nutné do porostu vložit a stabilizovat vlíčovací body. Byly použity vlíčovací body které nabízí software Agisoft PhotScan, tento software dokáže tyto body při

ideálních podmínkách automaticky detekovat. Varianta bodů byla zvolena jako 12 bitová a průměr středního bodu činil 25 mm. Jednotlivé body byly vytištěny na kancelářský papír formátu A4, dále byly umístěny v porostu přibližně do čtvercové sítě a upevněny k zemi pomocí hřebíků. Pro zjištění souřadnic vlčcovacích bodů byly použity dvě metody. První metoda byla pomocí GNSS stanice Topcon Hiper pro, tento postup se ale neosvědčil, jelikož vliv lesního porostu snižuje přesnost měření. Využívá se proto průměrování souřadnic, které je ale více náročné na čas. Bylo proto zvoleno zaměření bodů tachymetricky pomocí totální stanice a odrazového hranolu. Tato metoda poskytuje větší přesnost a rychlost.



Obr. 9 Vlčcovací bod 1. a 2. ze softwaru Agisoft PhotoScan

Měření bylo provedeno pomocí dvou kamer GoPro HERO 5 Black, které byly upevněny na podložku směrem od sebe, úhel sklonění kamer byl zvolen přibližně 45° směřující k zemi (obr. 10). Podložka byla umístěna na výtyčku o výšce 2 metry a připevněna pomocí závitů a matice.



Obr. 10 Umístění kamer na výtyčce

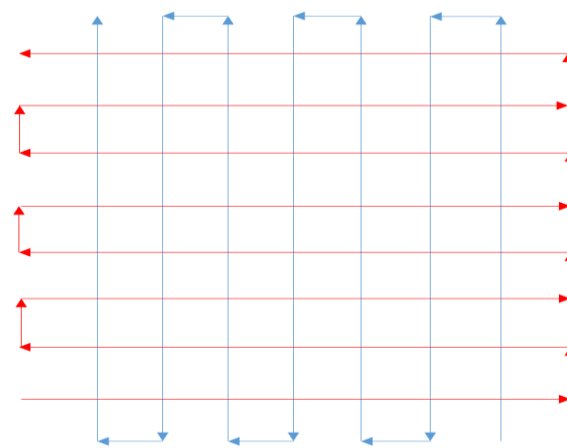
Kamery byly nastaveny na režim sekvenčního snímání, nebo-li Time lapse photo umožňující kontinuální snímání fotek v určitém časovém intervalu. Tento model kamery umožňuje snímání po 0,5 vteřině, pro naše potřeby stačilo snímání po vteřině. Parametr Field of view (FOV) tedy velikost zorného pole byl nastaven na WIDE.

Následující tabulka (tab. 3) popisuje zvolené parametry snímání. Kamery též umožňují takzvaný geotagging, což není nic jiného než snímání polohy pořízených snímků pomocí GPS, funkce byla zapnuta, ale v následném postprocesingu byly souřadnice odstraněny, jelikož vykazovaly velmi vysokou nepřesnost.

Tab. 3 Parametry snímání

Datum pořízení	23. 3. 2017
Závěrka clony	F/2.8
Délka expozice	1/120 s
ISO	150
Ohnisková vzdálenost	15 mm
Formát snímku	JPG
Šířka	4000 pixelů
Výška	3000 pixelů

Výtyčka byla nesena měřičem tak aby kamery byly v přibližné výšce 3 – 4 metrů nad úrovní terénu, orientace kamer byla zvolena vpřed a vzad ve směru postupu. Měřič porostem postupoval nejprve v jednom směru v liniích od sebe vzdálených přibližně 5 metrů. Další postup měřiče byl veden kolmo na předchozí snímání (obr. 11). Tímto bylo zajištěno vysoké překrytí snímků.



Obr. 11 Schéma trasy měřiče porostem

Ke zlepšení orientace v porostu byl k výtyčce připevněn přístroj GPS Trimble Juno, který každou vteřinu zaznamenával a zobrazoval aktuální polohu měřiče. Data z tohoto přístroje nebyla dále ve zpracování využita, sloužila pouze pro měřiče, který se díky tomuto mohl lépe v porostu zorientovat a mohl přesněji dodržet schéma trasy. Při průchodu porostem bylo rovněž důležité věnovat pozornost vlíčovacím bodům, které velmi pomáhají v pozdějším zpracování pro určení polohy kamer, velkou výhodou je když jsou body na snímcích dobře identifikovatelné, poté lze body v programu automaticky detekovat a odpadá jejich manuální zadávání, které je velmi časově náročné.

Pozemní fotogrammetrické snímkování trvalo přibližně 2 hodiny, z toho 30 minut trvalo umístění a zaměření vlíčovacích bodů. Bylo získáno 6240 fotografií.

4.2.5. Letecká fotogrammetrie

Letecké snímkování proběhlo 30. září 2016 v poledních hodinách, hlavní požadavek byl na kolmé dopadající světlo a aby stromy na snímkovaném území měly asimilační orgány.

Pro georeferencování výstupu z této letecké mise bylo nejprve nutno najít vhodná místa pro rozmístění vlíčovacích bodů. Hlavním požadavkem bylo, aby vlíčovací body nebyly kryté stromy či podrostem a bylo je možno lehce ze snímku identifikovat. Pro správné a přesné zařazení do souřadnicového systému je nutno zvolit minimálně 4 body, v našem případě bylo bodů zvoleno šest. Oproti pozemnímu snímkování, kde byly souřadnice bodů zaměřovány pomocí totální stanice, zde bylo zvoleno zaměření pomocí GNSS přijímače Trimble GeoExplorer 6000 GeoXH.



Obr. 12 Vlíčovací bod použitý pro leteckou fotogrammetrii (Mikita et al., 2016)

Plošný nálet byl proveden pomocí hexakoptéry DJI S800 Spreading Wings s neseným fotoaparátem Sony NEX 5R s objektivem SIGMA s ohniskovou vzdáleností 19 mm. Fotoaparát byl nastaven na kontinuální snímání po 1 vteřině. Letová hladina byla zvolena na 150 m nad zemí a byl zvolen překryv 90 % v podélném a 80 % v příčném směru letu. Tímto bylo přibližně dosaženo rozlišení 3 cm na pixel.

Tab. 4 Parametry leteckých snímků

Datum pořízení	30. 9. 2016
Závěrka clony	F/2.8
Délka expozice	1/1000 s
ISO	800
Ohnisková vzdálenost	19 mm
Formát snímku	JPG
Šířka	4912 pixelů
Výška	3264 pixelů

Pro přesné řízení letové mise byl použit software přímo od výrobce hexakoptéry DJI PC Ground Station, který umožňuje nastavit parametry letové mise, jako rychlost a výšku letu a let danou trasou. Pilot na notebooku vybaveným vysílací anténou, v tomto softwaru vytyčí trasu, kterou má hexakoptéra následovat, jako podklad mu slouží ortofotomapa google (maps.google.com) a pilot zadá další parametry letu jako rychlost a výšku letu. Start multikoptéry provádí pilot manuálně pomocí dálkového ovládání (rádia). Po vylétnutí do určité výšky, kde nehrozí kolize s okolním prostředím, pilot přepne na dálkovém ovládání do autonomního módu, kdy multikoptéra automaticky plní letovou misi dle zadaných parametrů. Přistání je prováděno opět manuálně.



Obr. 13 Hexakoptéra DJI S800 SpreadWings

4.3. Kancelářské práce

4.3.1. Agisoft PhotoScan

V této podkapitole je zmíněn postup pro zpracování dat z pozemního fotogrammetrického snímkování, postup pro data z leteckého snímkování se liší pouze v několika drobnostech, zejména v počtu zpracovávaných snímků a v rozdílném nastavení parametrů při automatickém zpracování, princip zůstává stejný.

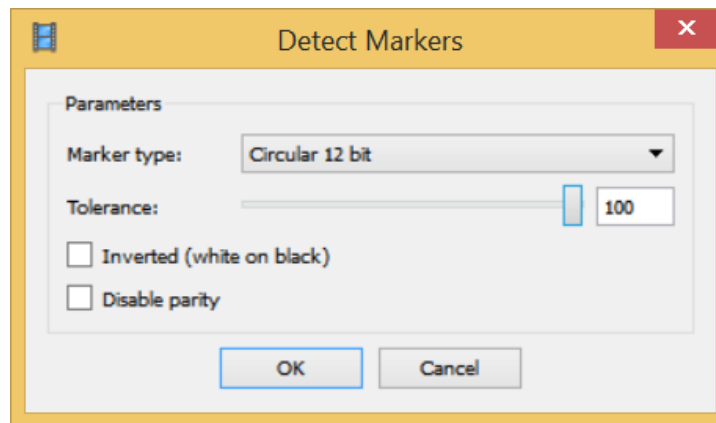
Nutné je zmínit, že při pozemním fotogrammetrickém snímkování bylo získáno 6240 snímků z celé zkoumané plochy. Při zpracování následující metodikou, časy dokončení výpočetních operací při takto obrovském objemu dat dosahovaly někdy i stovek hodin (operace Align Photos při parametru Low – čas dokončení přibližně 360 hodin). Na základě konzultace s vedoucím práce bylo usouzeno, že počítač poskytnutý na zpracování těchto dat nemá dostatečný výpočetní výkon. Pro další postup byla vybrána část porostu, která byla nasnímkována 1260 fotografiemi. Tato problematika je řešena v kapitole 6. Diskuze.

Jako vstupní data nám posloužily snímky a polohy vlíčovacích bodů z pozemního měření. Polohy bodů z totální stanice bylo nutno upravit do určitého formátu v textovém souboru (tab. 5). Byl zvolen souřadnicový systém S-JTSK_Krovak_East_North, tedy systém jednotné trigonometrické sítě katastrální. Je nutno věnovat zvýšenou pozornost při zadávání, protože u tohoto souřadnicového systému jsou souřadnice X a Y převrácené oproti souřadnicím, získaných z totální stanice.

Tab. 5 Formát souřadnic pro Agisoft PhotoScan

FID;	OBJNAME;	POINT_X;	POINT_Y;	POINT_Z;
0;	Target 1;	-595946.467281;	-1149406.231020;	481.057312059
1;	Target 2;	-595968.322722;	-1149411.568880;	479.392553060
2;	Target 3;

Dalším postupem byla automatická detekce vlíčovacích bodů (marker), které program na základě zadaných parametrů hledá na každém snímku. Parametry nastavení Detect Markers jsou prezentovány na následujícím obrázku (Obr. 14).



Obr. 14 Nastavení Detect Markers

Automatická detekce byla spuštěna na 1260 snímcích, podařilo se identifikovat 78 bodů na 78 snímcích, v uživatelském manuálu je uvedeno, že ideální počet vlčivacích bodů na fotografii pro následné kvalitní seřazení (Align Photos) jsou 4 na snímek, z toho plyne, že nebyl identifikovaný dostatečný počet markerů. Možné důvody a návrhy pro zlepšení automatické detekce jsou popisovány v kapitole 6. Diskuze.

Jako další krok byla provedena ruční identifikace a ruční zadávání vlčivacích bodů na každém snímku. Tento proces byl časově náročný, jelikož bylo nutno na každém snímku nalézt co nejvíce markerů, vyhledat jejich střed a označit je správným bodem se souřadnicemi. K urychlení práce a ke zlepšení identifikace a orientace bylo použito několik postupů. Použit byl vzor vlčivacích bodů, pro lepší identifikaci na fotografiích. Díky tomuto vzoru bylo snažší tyto body správně zařadit. Dále byl použit ortofotosnímek, který sloužil jako podklad v programu ArcGIS pro vynesení souřadnic markerů, tímto bylo možno lépe zjišťovat prostorové vztahy mezi body. Velmi také pomohla znalost porostu získaná z doby tohoto pozemního fotogrammetrického snímkování. Tento proces ruční identifikace a zadávání bodů trval přibližně 4 hodiny.

Dalším postupem je takzvané seřazení snímků (Align Photos), kdy software na jednotlivých snímcích hledá totožné pixely za účelem spojení snímků. Výstupem kroku Align Photos jsou určené prvky vnitřní a vnější orientace a mračno spojovacích bodů. Proces je možné nastavit v pěti možnostech přesnosti (accuracy) a to: Lowest, low, medium, high, highest. Dále je zde možnost preselektce párů, která urychluje tento výpočetní proces.

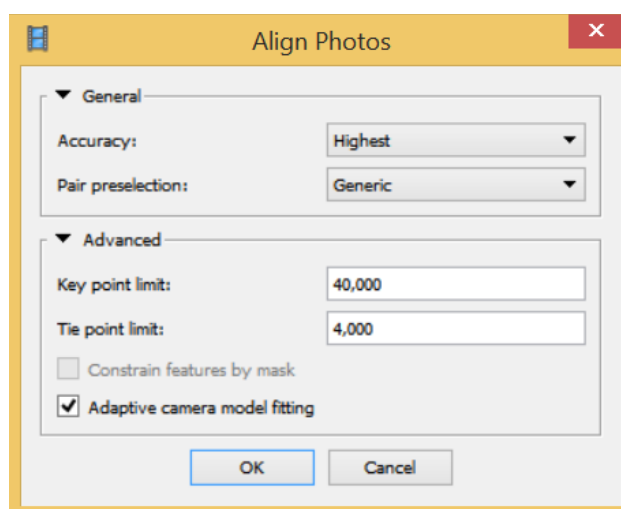
U prvního seřazení snímků byl zvolen parametr přesnosti na Low. Doba výpočtu byla 26 hodin, s tím že výstup byl velmi neuspokojivý a prvky vnitřní a vnější orientace snímků

hrubě neodpovídaly skutečnosti. Seřazeno bylo 378 snímků z 1260 zpracovávaných. Použit byl i příkaz „Optimize Camera Alignment“, který optimalizuje prvky vnější a vnitřní orientace snímků na základě koeficientů radiálního a tangenciálního zkreslení a ohniskové vzdálenosti (Agisoft, 2016). Ani použití tohoto nástroje neposkytlo požadované výsledky.

Pro lepší výsledky byl tedy následně použit parametr přesnosti Medium. Doba tohoto výpočtu byla vyšší a to 37 hodin. Řádně seřazeno bylo 846 snímků. Prvky orientace snímků se blížily požadovanému výsledku. Pro dosažení ještě vyšší přesnosti a seřazení všech snímků, bylo nutno upravit vlíčovací body.

Agisoft PhotoScan při procesu seřazení (Align Photos) dopočítává polohu vlíčovacích bodů, které se na jednotlivých snímcích polohově objevují a nebyly automaticky nebo ručně zadány, to mohou být body zakryty kmenem stromu nebo body které jsou v dáli a jejich rozlišení na fotografii je jen několik pixelů. Pomocí této funkce programu byly přidány vlíčovací body i na body s takto malým rozlišením, kde se střed volil jako průmět výšek nejkratších a nejdelších stran.

Po úpravě vlíčovacích bodů, bylo spuštěno seřazení snímků s parametrem přesnosti High. Tento úkon trval 51 hodin a bylo seřazeno 1247 snímků z 1260 zpracovávaných. Bylo vygenerováno mračno o 137 390 spojovacích bodech. Pro optimalizaci vnitřní a vnější orientace snímků byl použit opět nástroj „Optimize Camera Alignment“. Tento výstup se projevil jako velmi vhodný. Agisoft PhotoScan vyhodnocuje odchylky od souřadnic vlíčovacích bodů pomocí RMSE. Nejmenší dosažená odchylka byla 3,6 cm na bodě 10 a největší byla 10,7 cm na bodě 1. Průměrná RMSE byla 0,064 m a 1,612 pixelu.



Obr. 15 Nastavené parametry Align photos

Po úspěšném seřazení snímků následoval proces generování hustého mračna bodů v programu pod názvem „Build Dense Cloud“ kdy PhotoScan generuje husté fotogrammetrické mračno bodů na základě orientací snímků a vypočítává informaci o hloubce každého snímku. PhotoScan dokáže dle zadaných parametrů generovat bodová mračna, která se blíží a někdy i přesahují hustotu mračna bodů získaných z LiDARu. (Agisoft, 2016). Volit lze z pěti stupňů kvality a to: Lowest, low, medium, high, ultra high. Kvalitou je myšlena hustota bodů vygenerovaného mračna. Další parametrem který lze zadat je filtrování hloubky (Depth filtering), jsou zde čtyři možnosti a to *Aggressive*, které se hodí ke zpracování projektu, u kterého není kladen velký nárok na vygenerování malých detailů. Další možností je *Mild*, která se hodí ke zpracování ploch u kterých klademe důraz na zobrazení všech důležitých detailů. Volba *Moderate* přináší výsledky, které jsou mezi předchozími dvěmi volbami. Poslední možnost je *Disabled*, kdy je filtrace vypnuta.

Generování hustého mračna bodů bylo provázeno hned několika problémy, následující text popisuje použitý postup, vyskytnuté problémy a jejich řešení.

Pokus 1.

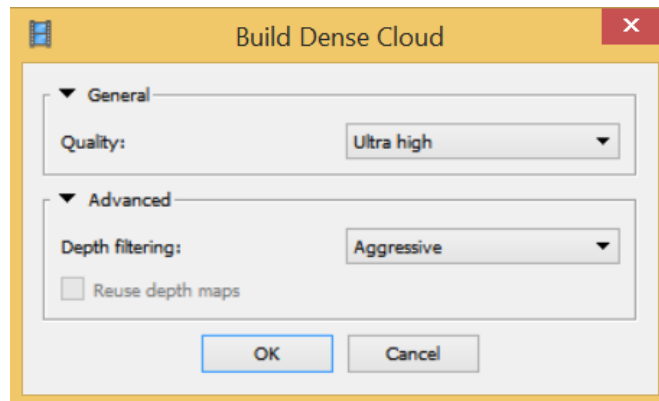
Pro zpracování bylo vloženo všech 1247 seřazených snímků o 137 390 spojovacích bodech. Parametr kvality byl zvolen na Low a filtrace byla nastavena na Aggressive. Tento proces trval 42 hodin. Výsledné bodové mračno bylo tvořeno 6 632 427 body. Velmi dobře byl vytvořen povrch terénu, kmeny stromů se nepodařilo vygenerovat vůbec. Nad povrchem terénu bylo vygenerováno velmi náhodné mračno bodů, které nemělo žádnou vypovídající hodnotu. Tento výsledek byl posouzen jako nevhodný z hlediska zvolené nízké kvality.

Pokus 2.

Pro druhý pokus byly použity opět všechny seřazené snímky. Parametr kvality byl nastaven na High a filtrace byla ponechána na Aggressive. Ve výsledku se toto bodové mračno nepodařilo zpracovat, protože v průběhu generování, program zobrazil chybovou hlášku o nedostatku operační paměti, bylo tedy konstatováno, že zpracování tohoto objemu dat na kvalitu High, není možné z hlediska nedostatečné výpočetní kapacity použitého počítače.

Pokus 3.

Pro pokus číslo 3 byl zvolen postup zpracování fotogrammetrického mračna bodů po částech. Porost byl rozdělen na 3 části, tak aby byl vytvořen překryv pro následné spojení bodových mračen pomocí nástrojů LAStools. Zvolen byl parametr kvality High a filtrace Aggressive.



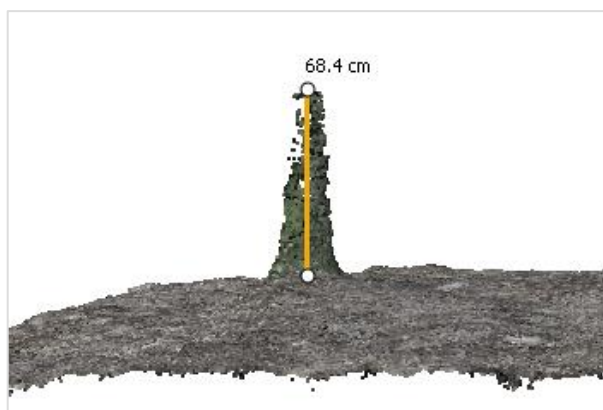
Obr. 16 Nastavené parametry Build dense cloud

V první části bylo použito 442 snímků o 38 035 spojovacích bodech, výpočet trval 46 hodin a vygenerováno bylo 24 039 578 bodů. Ve výsledném mračnu bylo vygenerováno 12 kmenů stromů.

V druhé části bylo použito 554 snímků o 42 390 spojovacích bodech, délka výpočtu byla 51 hodin a vytvořeno bylo 32 487 491 bodů mračna. Vygenerováno bylo 20 kmenů stromů s tím že 2 stromy se nacházely v překryvu s první částí.

Ve třetí části bylo využito 553 snímků o 36 131 spojovacích bodech, tato plocha byla umístěna jako překryv ploch předchozích, vytvoření mračna bodů trvalo 62 hodin, bylo vygenerováno 28 475 776 bodů a vizuálně zjištěno 15 kmenů, které byly v překryvu s kmeny z předchozích ploch.

U stromů, které se nacházely u okraje zpracovávaných částí nebylo mračno bodů vytvořené v celém obvodu kmene. Vznikly tak nepřesné shluky bodů, důvodem je absence snímků z opačného směru. V některých případech, i přes použití vysoké kvality se programu nepodařilo vygenerovat kmeny u slabých stromů, v obrazovém mračnu byla vygenerována pouze spodní část kmene, přibližně do výšky 30 - 70 cm od země. Tato problematika je popisována v kapitole 6. Diskuze.

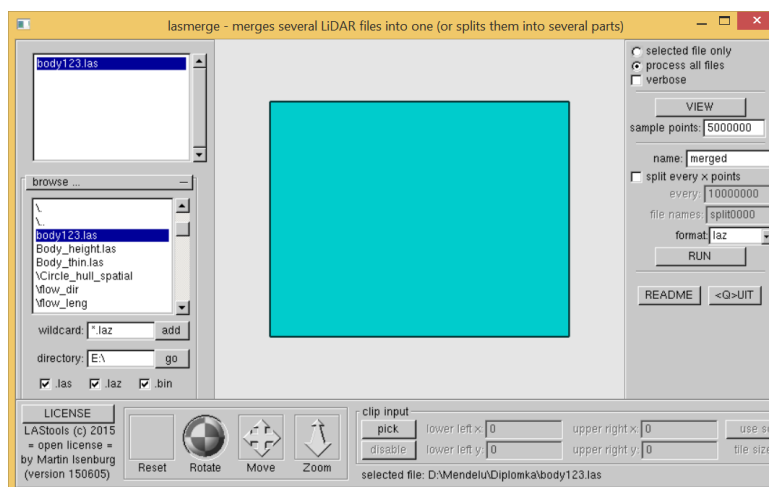


Obr. 17 Vygenerovaná spodní část kmenu

Po vygenerování fotogrammetrického mračka bodů všech částí, byly body v softwaru Agisoft PhotoScan vyexportovány pomocí příkazu „Export points“ do formátu LAS 1.3 (LAsER File Format for Exchange of ASPRS), formát LAS 1.3 umožňuje následné zpracování dat v softwaru ArcGIS 10.3 (ESRI, USA), v rámci nástavby Spatial Analyst a LAStools. Při exportu byl zvolen souřadnicový systém S-JTSK / Krovak East North (EPSG:5514). Cílem veškerého zpracování dat je automatická identifikace rozmístění stromů a automatická detekce výčetní tloušťky a výšky stromu.

4.3.2. LAStools

Tato nadstavba pro ArcGIS obsahuje nástroje pro práci s daty ve formě bodového mračka, je tedy vhodná pro výstupy získané z laserového skenování (LiDAR) nebo pro zpracování bodového mračka získaného pomocí fotogrammetrie. Tato nadstavba obsahuje vlastní uživatelské rozhraní pro každý nástroj, nebo lze tyto nástroje používat přímo v uživatelském rozhraní ArcGIS pomocí Arctoolbox.



Obr. 18 Uživatelské prostředí nástrojů LAStools

LASmerge

Pomocí nástroje LASmerge byly spojeny exportované bodové mračna získané ze softwaru Agisoft PhotoScan. Výstupem bylo spojené bodové mračno uložené do formátu LAS.

LASthin

Nástroj LASthin byl použit k výběru nejnižše položených bodů z bodového mračna, které byly poté použity pro tvorbu referenčního digitálního modelu terénu (DMT). Nástroj dle zadaných parametrů (v tomto případě nastaven parametr „Keep Lowest“) nejnižší bod v buňkách rozmístěných v mřížce. Velikost buněk (Grid Size) byla zvolena 1 metr. Výstupem je mračno bodů uložené ve formátu LAS.

LASheight

Tento nástroj byl využit pro vytvoření horizontálního řezu ve výčetní výšce. Jako vstupní data bylo použito spojené bodové mračno. Pro parametr „výpočtu výšky nad...“ (Compute Height Above...) byla zvolena možnost externí terén/geoid (External Ground/Geoid), kde jako vstup posloužily body vytvořené pomocí předchozího nástroje LASthin, které se automaticky interpolují do referenčního DMT. V záložce Drop Points bylo zvoleny tyto hodnoty „Drop Points with height below: 1,25 metru“ a „Drop Points with height above: 1,30 metru“. Výstupem byl slabý řez o velikosti 10 mm, kde byly vybrány všechny body v intervalu 1,25 metru až 1,30 metru nad terénem, uložený ve formátu LAS.

4.3.3. ArcGIS

Create LAS dataset

Získaný řez v LAS formátu byl převeden do tzv. LAS Datasetu softwaru ArcGIS 10.3. nástrojem Create LAS Dataset.

LAS to Multipoint

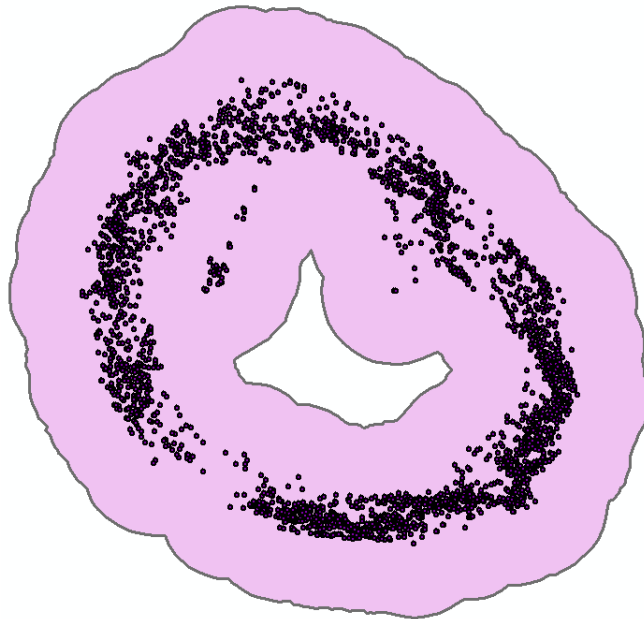
Data ve formátu LAS se importovala do formátu shapefile nástrojem LAS to Multipoint. Body byly ve formátu shapefile uloženy jako multipointy, tzn. jako shluky bodů, které v geodatabázi vypadají jako jeden bod.

Multipart to singlepart

Tyto body byly převedeny na singlepointy pomocí nástroje Multipart to Singlepart.

Buffer

Pomocí tohoto nástroje byly vytvořené obalové vrstvy kolem jednotlivých bodů, nastaven byl parametr „Dissolve Type: ALL“, který slučuje všechny obalové vrstvy, které se dotýkají nebo překrývají. Výstupem byl shapefile s polygony sloučených obalových vrstev.



Obr. 19 Příklad vytvořené obalové vrstvy

Multipart to singlepart

Použitím tohoto nástroje byly jednotlivé polygony obalových vrstev separovány a každému polygonu bylo přiděleno unikátní ID.

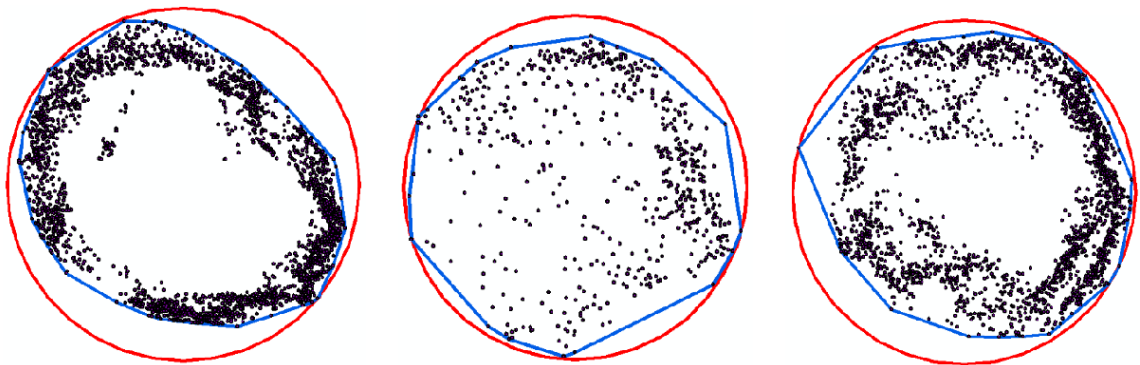
Spatial join

Tento nástroj umožňuje přidávání atributů prvků připojované vrstvy do atributové tabulky cílové vrstvy na základě zvoleného prostorového vztahu mezi prvky v obou vrstvách. Pomocí tohoto nástroje byly singlepointy vrstvy řezu klasifikovány unikátním ID polygonů, ve kterých se nacházely. Tímto postupem bylo docíleno klasifikace jednotlivých bodů řezu pro každý kmen stromu.

Minimum Bounding Geometry

Tímto nástrojem bylo vytvořeno ohraničení bodových řezů jednotlivých stromů, došlo tedy ke stanovení obvodů jednotlivých stromů. Byly testovány dvě metody „Circle fitting“ a „Convex hull method“.

- Metodou „Circle fitting“ byly vytvořeny řezy prostřednictvím pravidelného kruhu. Tato metoda umožňuje zpracování mračna bodů i v případě, že celý kmen není nasnímán ze všech stran. Výsledná přesnost metody může být negativně ovlivněna nerovnostmi kmene.
- Druhá metoda pro stanovení výčetního průměru je metoda „Convex hull method“. Tato metoda vytváří nejmenší možný konvexní obal. V případě velké podrobnosti dat, tato metoda může stanovit tvar řezu kmene s velmi malou odchylkou.



Obr. 20 Příklady řezů kmenů (convex hull – modře, circle fitting – červeně)

Feature to point

Použitím nástroje „Feature to point“ bylo přeneseno těžiště průřezů kmenů a tím byly získány vodorovné středy stromů jako nová bodová vrstva.

Inverse watershed segmentation - IWS

Následující část prezentuje postup a použití nástrojů programu ArcGIS pro zjištění stromových výšek pomocí metody inverzních povodí (IWS - Inverse Watershed Segmentation).

Jako vstupní data byly použity snímky z leteckého fotogrammetrického snímkování zpracované v program Agisoft PhotoScan do fotogrammetrického mračna bodů, které byly následně exportovány do formátu LAS.

LAS to Multipoint

Data ve formátu LAS se importovala do formátu shapefile nástrojem LAS to Multipoint. Nástroj umožňuje importovat nejen všechny body, ale i jejich část a to pomocí výběru třídy nebo pořadí odrazu. Body byly uloženy ve formátu shapefile jako multipointy. Tyto body se následně převedly na singlepointy pomocí nástroje Multipoint to Singlepart.

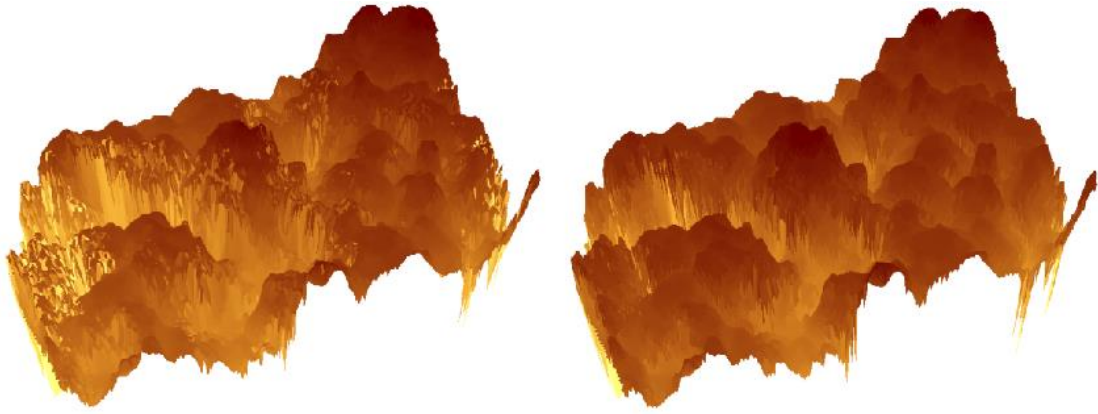
Natural neighbor

Pro vytvoření výškového modelu korun (CHM – Canopy Height Model) bylo použita interpolace dat pomocí metody Natural neighbor, která vytváří z vektorových bodových dat Thiessenovy polygony (Klimánek, 2006). Byla vytvořena rasterová vrstva s velikostí buněk 0,20 x 0,20 metrů.

Výškový model korun byl vytvořen pomocí nástroje Minus, který jednoduchým způsobem odečítá hodnoty druhého použitého rastru od hodnot prvního vstupního rastru. Výsledný model je definován rovnicí $CHM = DMP - DMT$. Kde DMP je vygenerovaný digitální model povrchu korun z leteckého snímkování a DMT je digitální model terénu vygenerovaný z dat pozemního snímkování, vytvořený pomocí nástroje LAsThin a interpolovaný metodou Natural neighbor.

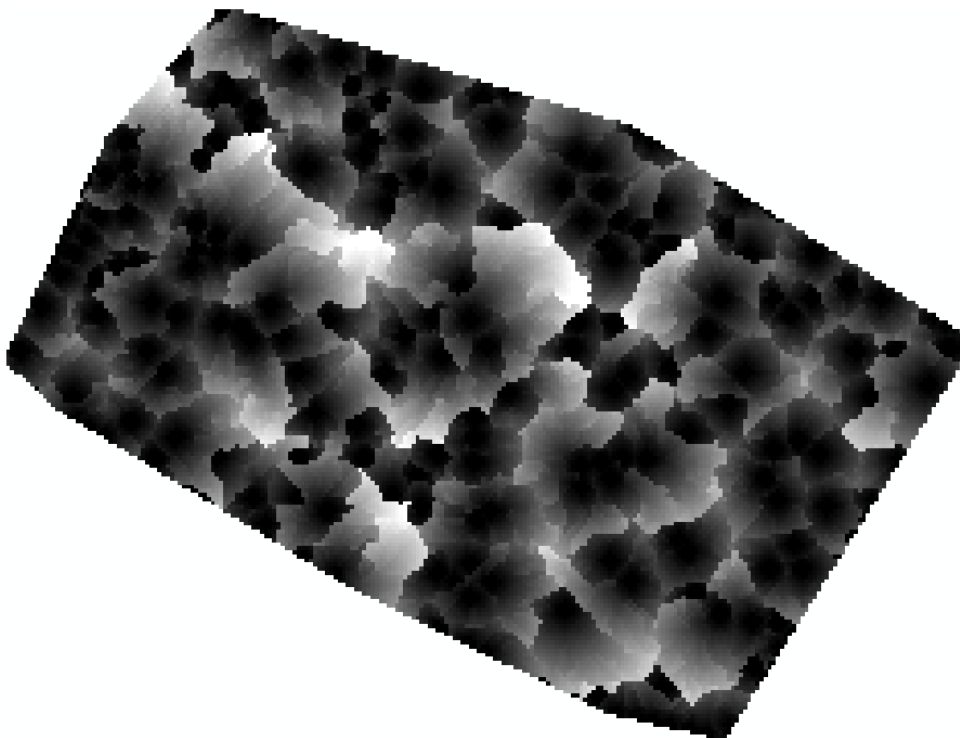
Focal Statistics

Při vytvoření CHM dochází ke tvorbě bezodtoké deprese ve vrcholku koruny stromu, z hlediska vysoké přesnosti tohoto modelu dochází i ke tvorbě tzv. falešných bezodtokých depresí, které nerepresentují samotný vrcholek stromu. Pro jejich odstranění bylo nutné tento model generalizovat, laicky řečeno model zaoblit a vyhladit. Pro tento účel byl použit nástroj Focal statistics, který provádí generalizaci rastru na základě statistického výpočtu pro okolí daného bodu.



Obr. 21 3D výškový model korun (napravo použitý nástroj focal statistics)

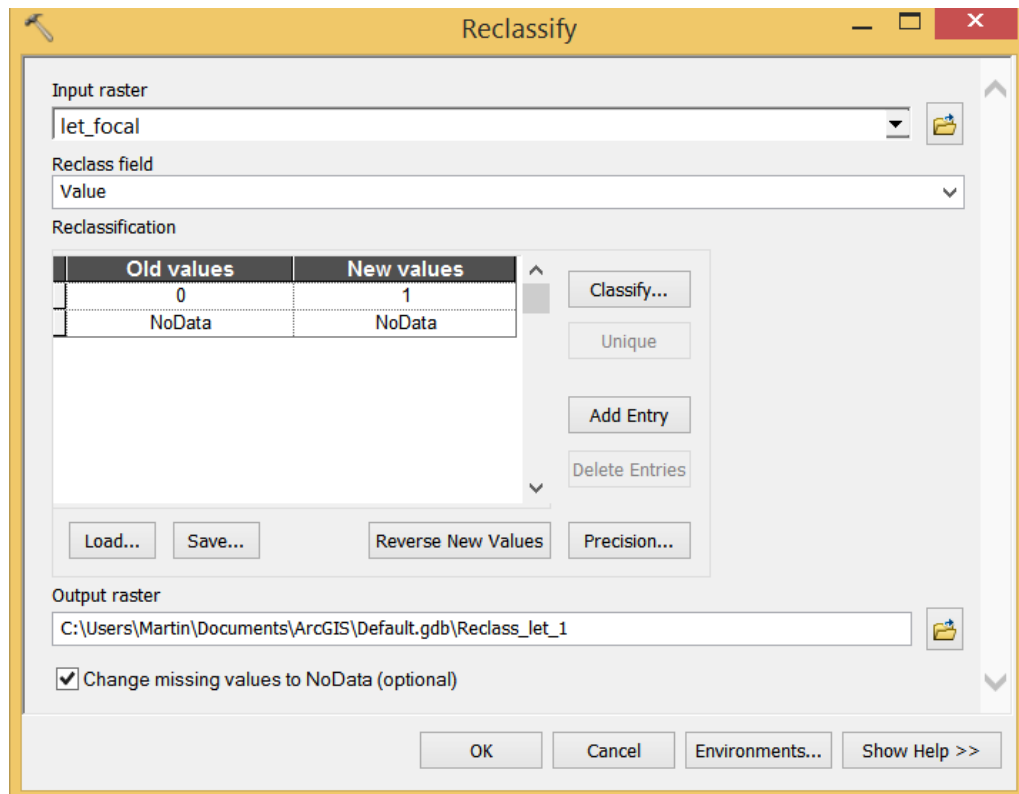
Následně byla u modelu provedena inverze pomocí nástroje Negate, tento nástroj vynásobí hodnoty rastru konstantou -1. Tímto převrácením modelu vzniklo ve vrcholcích korun lokální minimum, které je reprezentováno bezodtokou depresí. V takto převráceném modelu byl vypočítán směr odtoku nástrojem Flow direction, který vytváří rastr směru toku každé buňky k sousední buňce s největším spádem. Tento výstup byl dále použit pro výpočet délky toku pomocí nástroje Flow length.



Obr. 22 Mikropovodí vypočtené z převráceného výškového modelu korun

Reclassify

V dalším kroku byla provedena klasifikace bezodtokých depresí použitím nástroje Reclassify. Tento nástroj umožňuje předefinování původních hodnot na nové. Hodnota nuly byla klasifikována na jedna, tedy na hodnotu platnou. Ostatní hodnoty byly definovány jako NoData, tedy jako neplatné. Tímto postupem byly detekovány vrcholky stromů a jejich poloha.



Obr. 23 Zjišťování vrcholů stromů z depresí nástrojem Reclassify

Dalším krokem bylo převedení rasteru do vektorové vrstvy pomocí nástroje Raster to polygon a následné převedení polygonů do bodů nástrojem Feature to point. Výstupem vznikla bodová vrstva identifikovaných poloh a výšek jednotlivých stromů.

Spatial join

K vyhodnocení přesnosti získaných výšek stromů byl použit nástroj Spatial Join, který připojuje atributy z jednoho souboru bodů (výšky získané metodou IWS) do druhého (body vrcholů stromů změřených pozemně) na základě jejich prostorového vztahu. Zprvu bylo provedeno sloučení souřadnic poloh stromů z pozemního měření a vodorovných středů stromů získaných z těžiště průřezů kmenů při nastavení parametru Intersect.

Následně bylo provedeno sloučení středů stromů s výškami získanými metodou inverzních povodí.

Celkovým výstupem je soubor v jehož atributové tabulce jsou uvedeny výšky měřené a detekované, polohy středů stromu a polohy z pozemního měření, výčetní tloušťky měřené a výčetní tloušťky zjištěné pomocí metod „Circle fitting“ a „Convex hull“.

4.3.4. Statistické vyhodnocení

Pro vyhodnocování dat, bylo kromě popisné statistiky využito statistické vyhodnocení pomocí RMSE.

RMSE neboli *root mean square error* slouží k zevrubnému srovnání úspěšnosti jednotlivých interpolačních technik. Jedná se o často používanou metodu pro určení střední kvadratické chyby. RMSE počítá rozptyl rozdělení četností odchylek mezi daty z fotogrammetrického měření a daty měřenými v terénu. Hodnota je vyjádřena matematickým vztahem:

$$m_H = \sqrt{\sigma_H^2 + c_H^2}$$

Na výpočet této chyby potřebujeme znát směrodatnou odchylku (σ_H) a systematickou chybu (c_H), což je aritmetický průměr hodnot všech odchylek se znaménkami.

5. Výsledky

5.1. Výsledky z terénního měření

Na zvolené ploše o rozloze 0,1 ha byly zaměřeny polohy 61 stromů a změřeny jejich dendrometrické veličiny.

Tab. 6 Charakteristika měřených stromů

	Počet	Min	Max	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Výčetní tloušťka (cm)	61	9,25	42,75	18,45	7,06
Výška (m)	61	10,6	26,25	19,01	3,88

Průměr výčetní tloušťky 61 změřených stromů je 18,45 cm (min = 9,25 cm, max = 42,75 cm), střední výška stromů je 19 metrů (min = 10,6 m, max = 26,25 m). Polohy stromů odpovídají nejbližšímu bodu u báze stromu.

5.2. Vyhodnocení přesnosti fotogrammetrických mračen bodů

Program Agisoft PhotoScan sám vyhodnocuje přesnosti generovaných fotogrammetrický mračen na souřadnicích vlíčovacích bodů. Výsledky z tohoto vyhodnocení jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 7)

Tab. 7 Vlastnosti bodových mračen z pozemní a letecké fotogrammetrie

	Hustota bodů (body/m ²)	Počet vlíčovacích bodů	Odchylka (m)	Odchylka (pix)
Letecká fotogrammetrie	1196	6	0,042	0,141
Pozemní fotogrammetrie	68762	20	0,064	1,612

V případě letecké fotogrammetrie bylo dosaženo průměrné odchylky 0,042 metru a 0,141 pixelu. U pozemní fotogrammetrie činí odchylka 0,064 m a 1,612 pixelu.

5.3. Vyhodnocení přesnosti pozemní fotogrammetrie

5.3.1. Detekce stromů

Následně byla hodnocena odchylka geodeticky zaměřených pozic stromů vůči pozici středu kmene získané z řezu fotogrammetrickým mračnem ve výčetní výšce pomocí metod „Circle fitting“ a „Convex hull“.

V rámci detekce bylo na zkoumané ploše z 61 stromů na řezu fotogrammetrickým mračnem identifikováno 30 jedinců. Důvodem jsou neúplná nebo chybějící data, kdy program Agisoft PhotoScan nedokázal při procesu budování hustého mračna vygenerovat body kmene ve výšce řezu. Jedná se hlavně o stromy, které mají výčetní tloušťku menší než 16 cm.

Tab. 8 Počet identifikovaných stromů v tloušťkovém stupni

Tloušťkový stupeň (cm)	Počet stromů v tloušťkovém stupni	Počet identifikovaných stromů
8	3	0
12	19	3
16	13	6
20	11	10
24	9	7
28	3	2
32	2	1
36	0	0
40	0	0
44	1	1
SUMA	61	30

Z tabulky 8 vyplývá, že v tloušťkovém stupni 12 cm (10,01 – 14 cm) byly z 19 stromů identifikovány pouze 3, v tloušťkovém stupni 16 cm se podařilo identifikovat 6 stromů ze 13 stromů. Od tloušťkového stupně 20 cm až po tloušťkový stupeň 44 cm (18,01 – 46 cm) bylo identifikováno 21 stromů ze 26 stromů. Neúspěch identifikace ve vyšších tloušťkových stupních může být způsoben tím, že se stromy nacházejí na okraji zkoumané plochy, kde při pozemním snímkování nebyly zachyceny z protilehlé strany. Toton se projevilo při generování mračna, kdy program Agisoft PhotoScan nebyl u těchto stromů schopen vytvořit bodové mračno.

Tab. 9 Porovnání přesnosti detekce polohy stromů

	Min	Max	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	RMSE
Detekovaná vzdálenost detekovaných stromů oproti měřeným polohám (m)	0,010	0,268	0,081	0,062	0,102

Dle tabulky 9 je přesnost zjištění pozice stromů dle úplné střední chyby (RMSE) do 0,1 metru. Tato odchylka může být způsobena geodetickým šetřením, protože všechny pozice stromů odpovídají nejbližšímu bodu na bázi kmene, kdežto pozice zjištěné pomocí automatických metod se nacházejí přímo ve středu kmenu. Z hlediska posuzování počtu stromů v porostu, vztažených na jeden hektar nebo na celý les jsou tyto odchylky zanedbatelné.

5.3.2. Digitální model terénu

Dalším krokem bylo ověření přesnosti vygenerovaného digitálního modelu terénu (DMT) získaného z pozemního fotogrammetrického snímkování oproti geodetickému zaměření. Porovnáno bylo celkem 62 pozic geodeticky zaměřených terénních bodů (zaměřené pozice stromů) s digitálním modelem terénu vytvořeného z mračna bodů pomocí nástroje LASthin.

Tab. 10 Porovnání digitálního modelu terénu vytvořeného z geodeticky zaměřených poloh stromů a z pozemního fotogrammetrického snímkování

	Min	Max	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	RMSE
Zodchylka (m)	-0,235	0,312	0,077	0,095	0,122

Prezentované výsledky v tabulce (10) ukazují na dostatečnou přesnost pro vytváření digitálních modelů terénu, střední chyba dosahuje hodnoty 0,077 m, směrodatná odchylka je 0,095m a RMSE je 0,122 metru. Tyto odchylky poukazují na to, že DMT vygenerované z dat pozemní fotogrammetrie leží nad skutečným terénem. Lze tvrdit, že přesnost vygenerovaného DMT je kvalitní.

5.3.3. Výčetní tloušťky a výšky stromů

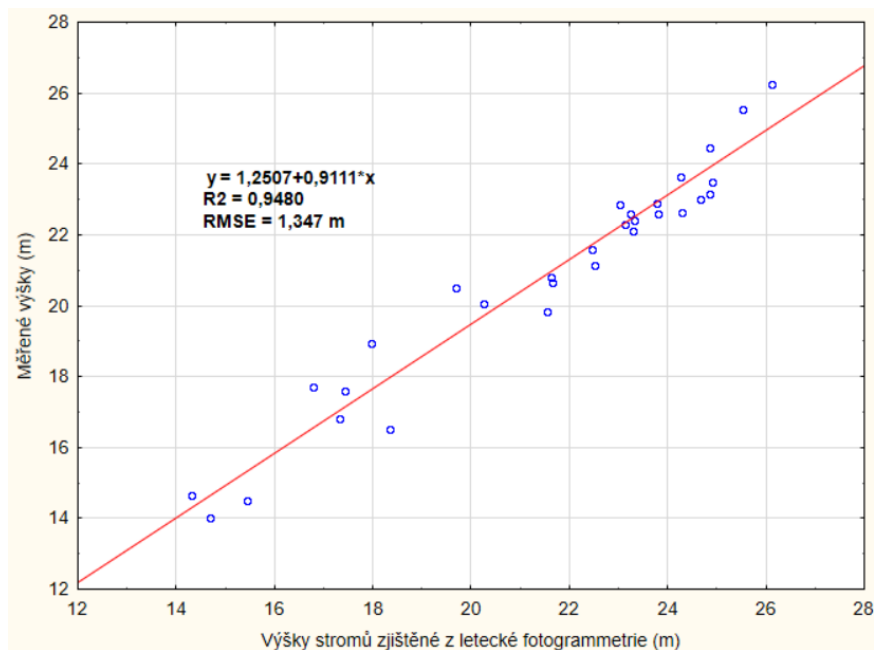
Následující statistické analýzy pro výšky a tloušťky jsou provedeny na souboru 30 stromů, které se z řezu fotogrammetrickým mračnem podařilo identifikovat.

Výsledky z automatického zpracování fotogrammetrických mračen bodů vykazují poměrně dobrou přesnost pro určování výčetních tlouštěk stromů. U obou metod pro modelování obvodu kmene bylo dosaženo stejných hodnot. Metoda konvexního obalu (Convex Hull Method) dosahuje stejné přesnosti jako metoda „Circle fitting“. Odchylka, která u obou metod činí 3,3 cm přesahuje tolerovanou chybu při měření kmenů lesnickou průměrkou.

Tab. 11 Porovnání terénního měření s vypočtenými veličinami

	Min	Max	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	RMSE
Výška (m)	-4,691	3,241	-0,894	1,008	1,347
Výčetní tloušťka - Convex hull (cm)	-4,85	5,65	1,657	2,822	3,272
Výčetní tloušťka - Circle fitting (cm)	-7,3	6,95	0,6	3,257	3,312

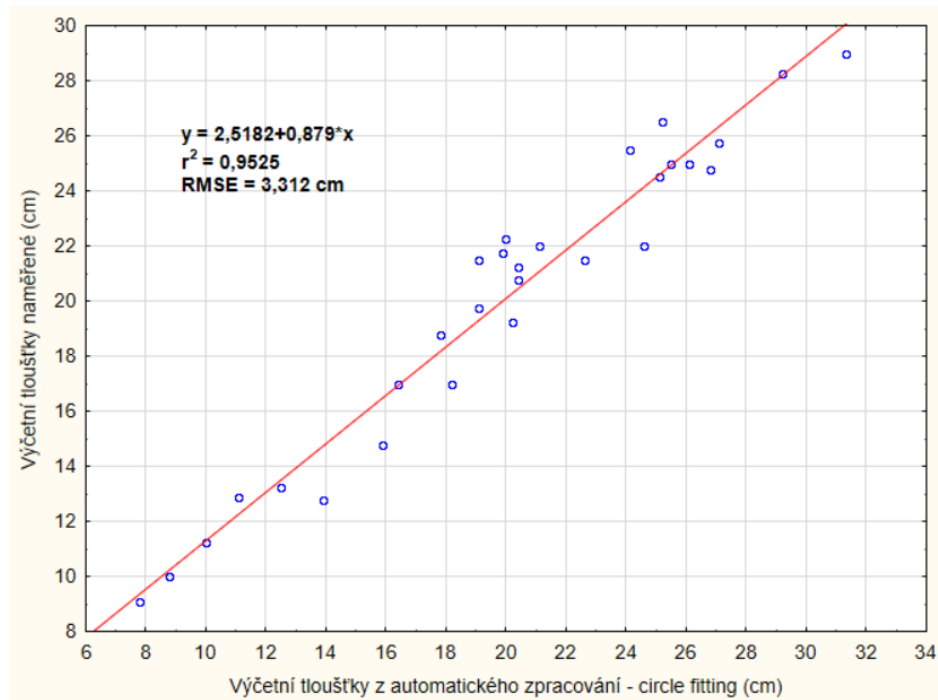
V případě stromových výšek získaných z leteckého snímkování bylo dosaženo hodnoty RMSE 1,347 m a střední hodnoty -0,894 m, která vykazuje mírnou neshodu s výškami naměřenými v porostu. I přes velkou důraznost na přesnost při měření výšek výškoměrem, chyba těchto hodnot může být srovnatelná, ne-li vyšší než průměrná hodnota dosažená z dat leteckého snímkování.



Obr. 24 Porovnání výšek změřených v porostu a výšek získaných z leteckého fotogrammetrického snímkování

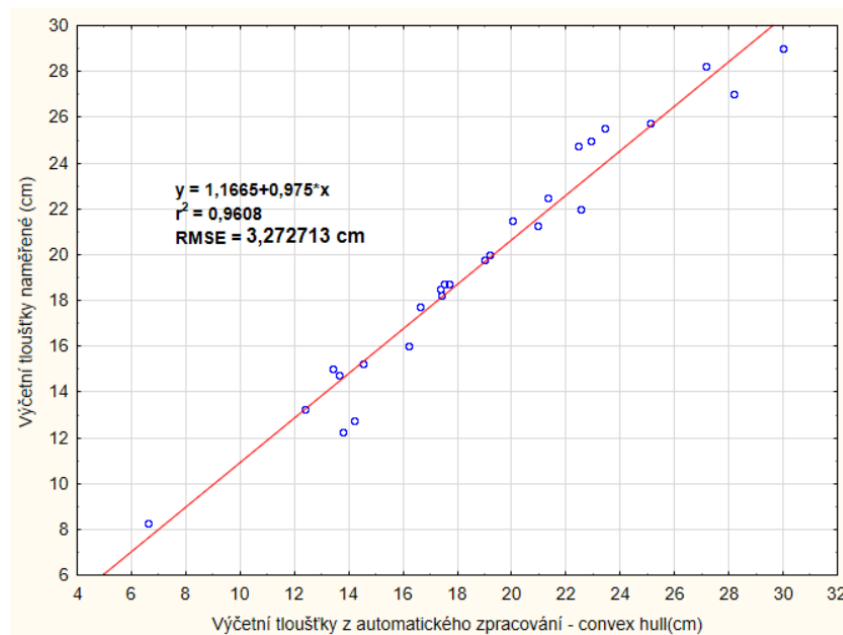
Graf (Obr. 24) znázorňuje vztah mezi daty získanými fotogrammetrickými metodami v porovnání s daty naměřenými v terénu. Je možné vyčíst, že hodnoty měřených výšek jsou o něco málo nižší než výšky z fotogrammetrie, nicméně úplná střední kvadratická chyba je relativně malá (1,308 m). Tato chyba v rámci inventarizace lesů má poměrně malý význam, na druhou stranu odchylka při měření výšek terénu má srovnatelnou hodnotu. V obrázku 24 vykazují hodnoty fluktuaci, lze tedy věřit, že se může jednat o systematickou chybu z dat letecké a pozemní fotogrammetrie, chyba může být i kombinací odchylek jak z měření v terénu, tak i z fotogrammetrie.

Následující grafy (Obr. 25 a Obr. 26) znázorňují vztahy výsledků získaných z fotogrammetrie a porovnává je s daty z terénního měření pro metody „Convex hull“ a „Circle fitting“. Obě metody vykazují stejnou přesnost s malým rozdílem (RMSE 3,3 cm). Podobně jako při determinaci výšek, při zjišťování výčetních tloušťek může být odchylka způsobena systematickou chybou z fotogrammetrického mračna. V rámci porovnání obou metod, metoda Convex hull vykazuje menší RMSE (3,272 cm), tedy tato metoda poskytuje o něco vyšší přesnost.



Obr. 25 Porovnání tloušťek změřených v porostu a tloušťek získaných metodou „Circle fitting“

Na grafu (Obr. 25) je možné vidět, že výčetní tloušťky z automatického zpracování jsou v rozmezí 7 až 16 cm velmi podhodnoceny, v intervalu 17 – 25 cm jsou tloušťky nadhodnoceny oproti naměřeným hodnotám.



Obr. 26 Porovnání tloušťek změřených v porostu a tloušťek získaných metodou „convex hull“

Na grafu (Obr. 26) je možné vidět, že výčetní tloušťky z automatického zpracování metodou „Convex hull“ jsou ve středních intervalech nadhodnocovány oproti naměřeným tloušťkám.

Kombinace obou způsobů zjišťování a zpracování dat, tj. fotogrammetrie (letecké a pozemní) vykázala v rámci 78 let starého listnatého porostu, na 0,1 ha plochy s 61 stromy velmi dobrou lokalizaci středů jednotlivých stromů s výčetní tloušťkou nad 16 cm v jejich pozicích (RMSE 0,102 m). U zjišťování výšky stromů z dat leteckého fotogrammetrického snímkování RMSE dosáhlo hodnoty 1,347 metrů. Výčetní tloušťky DBH vykázaly RMSE 3,272 cm u konvexního obalu a 3,312 cm u metody opsané kružnice. Velmi dobrou přesnost vykázalo pozemní fotogrammetrické snímkování pro tvorbu digitálního modelu terénu, kdy RMSE činila 0,122 metru.

6. Diskuze

Pro sběr dat byl na začátku zvolen zájmový porost o velikosti 1,15 ha, který se nachází na ŠLP Masarykův les Křtiny, polesí Vranov, porostní skupina 22 B 8. Zájmový porost je charakterizován jako listnatý les v předmýtním věku (78 let). Při terenním šetření byly tachymetricky zaměřeny polohy 581 stromů a změřeny jejich výčetní tloušťky a výšky. V rámci pozemního fotogrammetrického snímkování bylo pomocí dvou protilehlých kamer GoPro Hero 5 Black získáno 7042 snímků (kontinuální snímání po 0,5 vteřině) z celého zájmového porostu, délka samostatného průchodu byla jedna hodina. Při následném zpracování v softwaru Agisoft PhotoScan bylo zjištěno, že fotografie kvalitativně nevyhovují i přes úpravu v grafickém programu zaostřením a také bylo usouzeno, že průchod porostem nezajistil dostatečný počet snímků, které tvoří kolmý překryv.

Na základě konzultace s vedoucím práce byla pro opravné pozemní fotogrammetrické snímkování vybrána část porostu o velikosti 0,43 ha, která byla nasnímána 6240 fotografiemi (kontinuální snímání po 1 vteřině). Bylo také nutné umístit a tachymetricky zaměřit 20 nových vlíčovacích bodů. Vlícovací body byly umístěny přibližně ve čtvercové síti 10 x 10 metrů, zaměřeny byly pomocí totální stanice. Celkově všechny tyto úkony trvaly dvě hodiny.

Pro zpracování dat byl poskytnut počítač na ústavu hospodářské úpravy lesa a aplikované geoinformatiky, s licencí programu Agisoft PhotoScan. Soubor 6240 fotografií se ukázal jako příliš velký z hlediska nedostatečného výpočetního výkonu počítače, kdy se časy dokončení výpočtu pohybovaly přes 300 hodin. Tento problém popisuje Šedina (2012), ve své diplomové práci zabývající se porovnáním 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii, kde uvádí, že po 10 hodinách generování bodů byl průběh výpočtu stále na 0%. Pro urychlení zpracování takto velkého objemu dat by bylo nutno využít výkonnější počítač nebo počítačový klastr. Jelikož k dispozici nebyla ani jedna možnost, byla na základě konzultace s vedoucím práce zvolena plocha o velikosti 0,1 ha, která byla nasnímána 1260 fotografiemi.

Jako další krok byla provedena ruční identifikace a ruční zadávání vlíčovacích bodů na každém snímku. Tento proces trval přibližně 4 hodiny. Jako návrh pro urychlení tohoto kroku, by bylo použití většího počtu vlíčovacích bodů v terénu, tímto by bylo možno identifikovat více markerů pomocí automatické detekce a zlepšila by se i přesnost procesu

srovnání fotografií, nevýhoda tohoto kroku je nutnost zaměření více poloh vlíčovacích bodů, která se odrazí na době strávené v terénu.

Program Agisoft PhotoScan vyhodnocuje přesnost vzniklého fotogrammetrického mračna RMSE polohy vlíčovacích bodů, po procesu zarovnání snímků (Align Photos) hodnota RMSE dosáhla 0,064 m. Mikita et al., (2016) uvádějí, že v jejich studii v jehličnatém lese dosáhli RMSE 0,028 m. Možnými důvody větší odchylky v listnatém porostu je vzniklá chyba při manuálním zadávání vlíčovacích bodů, kdy polohově vzdálené body byly na fotografii vyjádřeny jako shluk několika pixelů a nebylo u nich možné určit přesný střed. Dalším možným důvodem je použití kamery GoPro s nastavením nejvyššího úhlu záběru (FOV), dle uživatelského manuálu (Agisoft, 2016) v programu dochází ke špatnému modelování ze snímků pořízených z širokoúhlých a fish-eye objektivů, na základě použití běžného distorzního modelu, který není ideální pro tyto objektivy.

Nedostatečný výkon počítače se projevil i v následující operaci generování hustého mračna, kde při zpracování všech 1260 snímků, program zobrazil v průběhu výpočtu chybovou hlášku o nedostatečné operační paměti a proces byl přerušen. Byl tedy zvolen postup rozdělení zkoumané plochy na 3 části se vzájemným překryvem.

Tab. 12 Parametry vygenerovaných fotogrammetrických mračen bodů

	Počet snímků	Počet spojovacích bodů	Počet bodů hustého mračna	Doba počítačového výpočtu (hod.)
část 1	442	38 035	24 039 578	46
část 2	554	42 390	32 487 491	51
část 3	553	36 131	28 475 776	62
SUMA	1 549	116 556	85 002 845	159

Z okulárního posouzení vytvořeného mračna bodů bylo zjištěno, že program nedokázal vygenerovat kmen u slabých stromů do výčetní tloušťky 16 cm, vygenerována byla pouze oddénková část kmene do výšky 30 - 70 cm. Tento jev se objevil u 31 z 60 stromů na zkoumané ploše u kterých následně nebylo možné vytvořit řez ve výčetní výšce. U stromů které se nacházely u okraje snímkové plochy nebylo vygenerováno bodové mračno po celém obvodu kmene, důvodem je absence snímků z protilehlé strany. Možné řešení těchto jevů je pořízení vyššího počtu snímků a zvolení průchodu porostem tak, aby

kmeny stromů byly snímkovány i z vnější strany hranice zkoumané plochy směrem do jejího středu.

Následné zpracování získaných bodových mračen proběhlo v uživatelském prostředí nástrojové sady LAStools, které se ukázalo jako velmi příjemné a přehledné. Spojení bodových mračen a vytvoření následných řezů trvalo necelých 10 minut. Získání výšek a výčetních tloušťek stromů z fotogrammetrického mračna bylo provedeno v programu ArcGIS. Čistá doba zpracování dat a jejich vyhodnocení uživatelem byla přibližně jedna hodina, také je nutno brát v potaz zkušenosti uživatele s tímto programem.

Tab. 13 časové vyhodnocení použité metodiky

		čas zpracovatele	strojový čas	
Terenní šetření	zaměření vlíčovacích bodů	30 minut	-	
	pozemní snímkování	1 hodina	-	
	letecké snímkování	30 minut	-	
Kancelářské práce	Agisoft PhotoScan	Ruční identifikace vlíčovacích bodů	4 hodiny	
		Align photos	-	51 hodin
		Build dense cloud	-	159 hodin
	LAStools	10 minut	-	
	ArcGIS	1 hodina	-	
Celkově		7 hodin 10 minut	210 hodin	

V tabulce 13 je zhodnocen čas pro získání výstupu z použité metodiky, terenní šetření zabralo dvě hodiny. Z kancelářských prací je časově nejnáročnější ruční zadávání vlíčovacích bodů. Sloupec prezentuje potřebu strojového času, tedy čas výpočetních úkonů prováděných počítačem bez zásahu uživatele. Čas výpočetních operací u LAStools a programu ArcGIS není uveden, jelikož výpočty byly provedeny okamžitě.

Tato diplomová práce navazuje na výzkum, který provedli Mikita et al. (2016) v ČR. Pro sběr snímků z pozemní fotogrammetrie je rozšířen počet fotoaparátů, nesených na konstrukci, z jednoho kusu na dva, zvolen je i jiný subjekt zkoumání, a to listnatý les v předmýtním věku. Následující část diskuze prezentuje rozdíly v metodice a porovnává výsledky z tohoto výzkumu s výsledky této práce.

V České republice byl první výzkum přesnosti měření pozemní fotogrammetrie proveden na území 1 hektaru lesní plochy v roce 2016, a to týmem vědců z Mendelovy univerzity v Brně (Mikita et al., 2016). V rámci výzkumu byla na základě pozemní fotogrammetrie zkoumána možnost stanovení výčetní tloušťky stromů a výšky stromů, a to díky metodě propojení dvou mračen bodů, získaných na základě leteckého snímkování z fotoaparátu, neseného UAV a získaných z fotoaparátu, neseného v terénu výzkumníkem na nosné konstrukci.

Mikita et al., (2016) provedli studii využití kombinované letecké a pozemní fotogrammetrie pro inventarizaci lesa na výzkumné ploše o velikosti 0,8 ha, která je čistá smrková monokultura v mýtním věku 124 let. Zaměřili polohy a stromové veličiny u 118 stromů s průměrnou výškou 31 m a průměrnou výčetní tloušťkou 38 cm. Pro letecké snímkování použili hexakoptéru DJI S800 s neseným fotoaparátem Sony NEX 5R, letecké snímkování provedli v poledních hodinách ve výšce 120 metrů. Na pozemní snímkování opět využili kameru Sony NEX 5R nesenou na výtyčce ve výšce 4 metrů, bylo pořízeno 1774 snímků.

Ve výsledcích studie Mikita et al., (2016) vyhodnocují výčetní tloušťku, výšku, objem kmenu a přesnost vygenerovaného digitálního modelu terénu, vše získané ze zpracování fotogrammetrických dat. Výsledky porovnávají s naměřenými hodnotami metodou úplné střední kvadratické chyby (RMSE). U výšek získaných z leteckého snímkování dosáhli hodnoty RMSE 1,016 m, v případě této práce bylo dosaženo RMSE 1,347 m, pravděpodobným důvodem je horší identifikace stromových vrcholů u listnatých dřevin, kdy při vytváření výškového modelu korun pro stanovování výšky pomocí metody inverzních povodí mohou v koruně vznikat deprese, které při převrácení modelu vytváří více vrcholů. K eliminaci tohoto fenoménu má sloužit nástroj Focal Statistics, který výškový model korun vyhlazuje a eliminuje tak deprese. Dalším důvodem může být přesnost vygenerovaného fotogrammetrického mračna z leteckého snímkování a následně použité interpolační metody pro vytvoření modelu výšek korun.

Další vyhodnocovanou veličinou je výčetní tloušťka získaná z dat pozemního fotogrammetrického snímkování. Mikita et al.(2016) používají dvě metody pro tvorbu obvodového polygonu kolem bodů v řezu kmene. První je metoda opsaných kružnic (Circle fitting), kde dosáhli hodnoty RMSE 1,797 cm, u druhé metody konvexního obalu (Convex hull) dosáhli poloviční RMSE 0,911 cm. V rámci této práce bylo dosaženo hodnoty RMSE u opsané kružnice 3,312 cm a u konvexního obalu 3,272 cm, tedy stejných hodnot. Hlavní příčinou rozdílných hodnot mezi smrkovým a listnatým porostem jsou již zmiňované problémy při zpracování dat v softwaru Agisoft PhotoScan. Nutné je také zmínit, že velkou roli zde hraje struktura a věk porostu, kde v případě této práce se podařilo dle řezů fotogrammetrickým mračnem identifikovat 30 z 61 stromů na zkoumané ploše. Převážná většina identifikovaných stromů měla měřenou výčetní tloušťku větší než 16 cm. V případě studie ve smrkovém mýtním porostu naměřili Mikita et al.(2016) minimální výčetní tloušťku u stromů 18,5 cm, lze tedy tvrdit, že podle řezu mračnem identifikovali všech 118 stromů a s tímto problémem se nemuseli potýkat.

Jako další krok bylo ověření přesnosti vygenerovaného digitálního modelu terénu (DMT) získaného z pozemního fotogrammetrického snímkování oproti geodetickému zaměření. Porovnáno bylo celkem 62 pozic geodeticky zaměřených terénních bodů (zaměřené pozice stromů) s digitálním modelem terénu vytvořeného z mračna bodů. Střední chyba dosáhla hodnoty 0,077 m, směrodatná odchylka je 0,095 m a RMSE je 0,122 metru. V případě studie Mikity et al.(2016) střední chyba dosáhla hodnoty 0,002 m, směrodatná odchylka je 0,065 m a RMSE byla 0,065 metru. V obou případech jsou odchylky velmi malé a například v porovnání s digitálním modelem reliéfu páté generace (DMR 5G), u kterého ČÚZK (2011) uvádí úplnou střední chybu v zalesněném terénu 0,3 m, se generování DMT z pozemní fotogrammetrie jeví jako velmi přesné.

Mikita et al., (2016) se ve své studii také věnují výpočtu objemu jednotlivých stromů pomocí slovenského modelu objemových rovnic dle Petráše a Pajtíka (1991). Tato problematika v této práci není řešena.

V zahraničí bylo publikováno několik výzkumů, které souvisejí s využitím pozemní fotogrammetrie pro určování stromových charakteristik.

Kolektiv autorů z Finska, pod vedením X. Lianga zkoumal možnost využití běžného komerčního fotoaparátu pro sběr dat v lesním terénu a analyzoval možnosti využití výsledků měření pro lesnické účely (inventarizace). Na zkusné ploše o rozměru 30 x 30 metrů bylo vytvořeno pět fotografických datových sad ze souborů fotografií z terénu, což reprezentovalo rozdílné fotografické podmínky. Dosaženo bylo hodnoty RMSE výčetní tloušťky v intervalu mezi 2,98 cm a 6,79 cm. RMSE 2,98 cm bylo dosaženo při pořizování snímků na šířku, vně zkoumaného porostu. Nejvyšší RMSE 6,79 cm bylo získáno při snímkování uvnitř porostu v kombinaci focení na výšku a šířku (Liang, Wang, Jaakkola, Kukko, Kaartinen, Hyyppä, Honkavaara and Liu, 2015).

Problematika odhadu atributů kmenů stromů s využitím pozemní fotogrammetrie a na základě snímkování ze souboru věžovitě uspořádaných fotoaparátů (Canon 7D a Canon 40D) byla řešena ve Švédsku, konkrétně na Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, a to kolektivem autorů Forsman, Börlin a Holmgren (2016). Cílem autorů bylo navrhnout uživatelsky příjemnější a jednodušší metodu pro hodnocení zásob dřeva. V rámci prováděného výzkumu bylo následně možno vyhodnocovat výčetní tloušťku stromů (DBH) a pozice stromů na parcelách. Výzkumný tým navrhl novou metodu pozemní fotogrammetrie, kdy snímacím zařízením bylo 3-5 věžovitě (trojúhelníkovitě) uspořádaných fotoaparátů na nosném rámu. Metoda byla aplikována na zkusných plochách o poloměru 10 metrů. Výčetní tloušťka byla odhadnuta u 40 % stromů, přičemž se hodnota RMSE pohybovala v rámci šesti výzkumných ploch v intervalu od 2,8 cm do 9,5 cm (průměr RMSE byl 7,2 cm).

Autoři Surový, Yoshimoto, Panagiotidis (2016) se zabývali použitím pozemní fotogrammetrie pro zjišťování a rekonstrukci povrchu kmene u 20 stromů kryptomerie japonské (*Cryptomeria japonica*) a dosáhli RMSE výčetní tloušťky 0,59 cm. Na základě tohoto výsledku autoři konstatují, že pozemní fotogrammetrie může být slibnou metodou při inventarizaci lesů, neboť může poskytnout spolehlivé odhady průměrů kmene nejen ve výčetní výšce, ale i dalších průměrů v různých výškách.

Z výsledků těchto zahraničních studií lze konstatovat, že dosažené odchylky při zjišťování výčetní tloušťky v této diplomové práci se jeví jako velmi dobré a jsou srovnatelné s odchylkami Lianga et al. (2016), který snímky získával rovněž průchodem porostem.

Výhody využívání pozemní fotogrammetrie v lesnictví:

- Nízké náklady na měřicí zařízení, typický komerčně dostupný fotoaparát pro ruční snímkování stojí méně jak 1 000 EUR (27 000 Kč), profesionální pozemní laserové skenery jsou až 40 x dražší (cca 1 mil. Kč) a osobní pozemní laser, vyvinutý ve Finsku je až 100 x dražší (2,7. mil. Kč).
- Snadný a rychlý sběr dat v terénu. Od obsluhy je vyžadována pouze základní znalost včetně poučení o nastavení fotoaparátu. Je dobré, ale ne nezbytné, aby obsluha pochopila principy tvorby mračna bodů, bude tímto možno napomoci optimalizaci získaného bodového mračna.
- Zpracování dat do mračna bodů je plně automatizované a po zaškolení obsluhy vyžaduje pouze rutinní kroky.
- Přesnost odhadovaných parametrů stromů se přibližuje přijatelné úrovni, akceptovatelné pro praktické inventarizace lesů.

Návrhy témat pro další výzkum

Stanovení optimálního počtu fotografií, potřebných pro mapování pozemků.

Kritéria velikosti stromů, od které metoda pozemní fotogrammetrie přesná stejně tak, jako je metodika laserového skenování (tj. stanovení hraniční výčetní tloušťky).

Využití pozemní fotogrammetrie pro determinaci dřeviny z fotogrammetrického mračna

Modelování a charakteristika lesních porostů různé struktury, věku a smíšení pomocí letecké a pozemní fotogrammetrie

7. Závěr

Hlavním cílem této předkládané diplomové práce bylo ověření možnosti využití pozemní fotogrammetrie v kombinaci s leteckou fotogrammetrií pro inventarizaci lesních porostů a porovnání dendrometrických veličin stromů, získaných pomocí automatických metod zpracování dat s daty naměřenými v rámci terénního výzkumu. Ověřování metody proběhlo na vybraném zájmovém porostu na území Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny, jednalo se o bukové hospodářství, SLT bohatá dubová bučina mařinková s věkem porostní skupiny 78 let. Podkladová data pro vytvoření dvou fotogrammetrických mračen bodů byla získána na základě dvou metod - jednalo se o metodu snímkování porostu ze vzduchu pomocí UAV, hexakoptéry DJI S800 Spreading Wings s neseným fotoaparátem Sony NEX 5R a dále se jednalo pořízení fotografií při průchodu porostem pomocí dvou kamer GoPro HERO 5 Black, upevněných na nosném zařízení, neseném měřičem. Ze dvou mračen bodů, která byla výstupem pozemní fotogrammetrie a letecké fotogrammetrie byl vytvořen digitální model terénu (DMT) a digitální model povrchu (DMP). Při pozemním fotogrammetrickém snímkování bylo získáno 6 240 snímků z celé zkoumané plochy. Při zadání požadavku pro zpracování těchto snímků v programu Agisoft PhotoScan do mračna bodů dosahovaly časy dokončení výpočetních operací někdy i stovky hodin, při nastavení parametru Low v rámci operace Align Photos se jednalo o přibližně 360 hodin. Proto došlo po konzultaci s vedoucím práce ke snížení výměry zkusné plochy na 1 000 m², která byla nasnímkována 1260 fotografiemi. Mračno bodů, získané na základě pozemní fotogrammetrie bylo exportováno do programu LAStools, nadstavby programu ArcGIS. Z mračna bodů byl v první fázi modelován referenční digitální model terénu (DMT). Rovněž došlo k vytvoření horizontálního řezu ve výčetní výšce 1,3 metru a tímto bylo možno stanovit významnou dendrometrickou veličinu-obvody stromů ve výčetní výšce, které je možno převést na výčetní tloušťku. Ze 61 stromů s různou tloušťkou kmene bylo pomocí metody pozemní fotogrammetrie a modelování identifikováno programem 30 stromů, u kterých šlo tloušťku vypočítat. Důvodem nenalezení ostatních stromů byla jejich malá tloušťka, případně málo bodů ve výčetní výšce, odvozených z fotografií.

Výška stromů byla vypočtena pomocí propojení dvou mračen bodů, na základě digitálního modelu korun (Canopy Height Model, CHM) a převrácený rastr CHM byl využit pro detekci vrcholků stromu metodou tzv. segmentace inverzního povodí (Inversed

Watershed Segmentation), vrcholky stromů byly určeny jako lokální minima. Vypočtené výšky z lesních porostů byly porovnány s daty naměřenými při terénním výzkumu.

Druhová skladba má výrazný vliv na přesnost měření a využití metod kombinace pozemní a letecké fotogrammetrie. Zatímco ve studii, která přecházela této diplomové práci a která ověřovala stejnou metodu na homogenním 124 -letém smrkovém porostu činila chyba odhadu u výčetní výšky méně jak 1 cm a u výšky se jednalo o chybu odhadu 1 metr, tak u listnatého porostu ve věku 78 let, analyzovaného v této diplomové práci došlo k větší chybě odhadu.

Spotřeba výpočetního času pro vytvoření mračna bodů v programu Agisoft PhotoScan se zkrátí, pokud budou fotografie z pozemního sběru dat zadávána z menších zkusných ploch, návrhem je plocha o rozměrech 50 x 20 metrů nebo 40 x 25 metrů, plochy budou měřeny po obvodu a následně v 5 m řadách, resp. odstupech. Teprve po vytvoření dílčích mračen bodů bude vytvořeno sumární mračno bodů.

Pozemní fotogrammetrie se ukázala jako dobrý a operativní nástroj pro tvorbu digitálního modelu terénu. V současné době je ověřování využití kombinací pozemní a letecké fotogrammetrie pro potřeby praxe v začátcích výzkumu, kvalita výstupů je dána nejen kvalitou zkoumaného prostředí (druhová skladba, zápoj porostu, věk porostu, tloušťka stromů, čas snímkování, světelné podmínky), kvalita je podmíněna i technickou vyspělostí přístrojů (fotografických zařízení), kapacitou hardwaru a kvalitou softwaru. Lze očekávat, že k pozitivům, která již pozemní fotogrammetrie jednoznačně má, což je levná cena přístrojů na sběr dat, jejich nízká váha a dobrá mobilita v terénu se pro tvorbu mračen bodů přidá i krátká doba zpracování, resp. tvorby mračna bodů z fotografií. Při zpracování této diplomové práce se spotřeba strojového času ukázala jako základní limitující faktor. Zatímco terénní fotogrammetrické měření na celém pozemku o výměře 1,15 s počtem 6 240 fotografií trvalo přibližně 2 hodiny, z toho 30 minut trvalo umístění a zaměření vlíčovacích bodů, tak následné počítačové zpracování dat zabralo dle odhadu autora této diplomové práce minimálně 7 hodin plné soustředěné práce a 210 hodin výpočetního času.

Pozemní fotogrammetrie v kombinaci s fotogrammetrií leteckou má velmi vysoký potenciál v odvětví lesního hospodářství. Zjišťování základních dendrometrických veličin, tj. výčetní tloušťky a výšky může být doplněno o zkoumání objemu kmenů.

8. Summary

The main aim of the thesis was to verify the possibility of using terrestrial photogrammetry in combination with aerial photogrammetry for forest inventory process and for comparison of dendrometric values obtained using automatic data processing methods with data measured in field research. Method authentication took place on the territory of the Training Forest Enterprise Masaryk Forest Křtiny, in a beech stand with an age group of 78 years. The underlying data for the creation of two photogrammetric point clouds were obtained based on two methods - photographing vegetation from the air using an UAV, hexacopter DJI S800 Spreading Wings with Sony NEX 5R camera mounted and taking photos while passing through vegetation using two GoPro HERO 5 Black cameras mounted on a carrying device. Of the two point clouds, which were output of terrestrial photogrammetry and aerial photogrammetry, the digital terrain model (DTM) and the digital surface model (DSM) were created. 6240 photography frames were obtained during terrestrial photogrammetric surveys from the whole projection surface. When submitting a request for the processing of images in Agisoft PhotoScan to create point clouds, some of the completion times of computing operations reached hundreds of hours, when set to Low the Align Photos Operation would take approximately 360 hours. Therefore, after consultation with the thesis supervisor, the acreage of the plot has been reduced to 1000 m², which was documented in 1260 photographs. The point cloud obtained on the basis of terrestrial photogrammetry was exported to the ArcGIS's LAStools program extension. In the first phase the referential Digital terrain model (DTM) was modeled from the point cloud. Next a horizontal cut at 1.3 m of height was made to determine the tree circumference, which can be converted to DBH. Of the 61 trees with different perimeter included in the research, there were 30 trees identified using terrestrial photogrammetry method, which thickness was calculated. The reason for not identifying the other trees was lack of their thickness, or a few points at the breast height, derived from photos.

The tree height was calculated by linking two point clouds based on the Digital Terrain Model as well as Canopy Height Model (CHM). CHM and the inverted CHM raster were used to detect the treetops by method called Inversed Watershed Segmentation, the tops of trees have been identified as the local lows.

The heights of the forest calculated were compared with data measured during the field measurements. It was found that species composition has a significant influence on the measurement accuracy, using the combination of terrestrial and aerial photogrammetry methods. While the study which predated this thesis and which tried to verify the same method on a sample of 124 years old homogeneous spruce stand had root mean square error (RMSE) of DBH less than 1cm and RMSE of the tree height 1 meter, in the forest sample used in this thesis, a mixed deciduous stand in the age of 78 years, the RMSE was greater.

Consumption of computational time to create a point cloud in the program Agisoft PhotoScan contracts, if the photos collected in the field are sourced from small plots, the proposal is an area measuring 50 x 20 meters or 40 x 25 meters, the area will be measured on the perimeter and then in 5 m row intervals respectively. Only after creating a partial point clouds will be the summary point cloud created.

Terrestrial photogrammetry proved to be a good and operational tool for creating digital terrain model. Currently, authentication of use of a combination of ground and aerial photogrammetry for the needs of the practice is still in the early stages of research, the output quality is determined not only by the quality of the research context (species composition, canopy cover, stand age, tree thickness, time of imaging, lighting conditions), the quality is also conditioned by technical maturity of instruments (photographic equipment), capacity of hardware and software quality. It can be expected that the positives terrestrial photogrammetry already shares as are: a cheap price of instruments for data collection, their low weight and good mobility in the field, will be furthermore augmented after the improvement of software for creating point clouds, which would shorten processing times needed. During developing this thesis, the consumption of CPU time proved essential limiting factor. While photogrammetric measurement in the field throughout the land area of 1.15 hectares with 6240 photos took about two hours, of which 30 minutes took positioning of control points, subsequential data processing of a lower surface area of 1,000 m² with 1260 photos taken took at least 7 hours of manual data processing and 210 hours of computing time.

Terrestrial photogrammetry in combination with aerial photogrammetry has a very high potential in the forestry sector. Identification of the basic dendrometric variables, i.e. DBH and height can be complemented by stem volume examination.

9. Seznam použitých zkratk

2D	Two-dimensional	Dvoudimenzionální
3D	Three-dimensional	Třidimenzionální
AP	Aerial photogrammetry	Letecká fotogrammetrie
DBH	Diameter at breast height	Výčetní tloušťka
DMP		Digitální model povrchu
DMR		Digitální model reliéfu
DMT		Digitální model terénu
FOV	Field of view	Úhel zorného pole
GIS	Geographic information system	Geografický informační systém
GNSS	Global navigation satellite system	Globální družicový navigační systém
GPS	Global positioning system	Globální polohový systém
CHKO		Chráněná krajinná oblast
CHM	Canopy height model	Výškový model korun
IWS	Inverse watershed segmentation	Metoda inverzních povodí
JTSK		Jednotná trigonometrická síť katastrální
LAS		Formát dat
LHC		Lesní hospodářský celek
LiDAR	Light detecting and ranging	Detekování a měření světla
MVS	Multi-view stereophotogrammetry	
NIL		Národní inventarizace lesů
NP	National park	Národní park
RMSE	Root mean square error	Úplná střední kvadratická chyba
RTK	Real time kinematic	Diferenciální korekce gnss ze sítě pozemních stanic probíhající v reálném čase
SfM	Structure from motion	
ŠLP	Training forest enterprise	Školní lesní podnik
TP	Terrestrial photogrammetry	Pozemní fotogrammetrie
UAV	Unmanned aerial vehicle	Bezpilotní letadlo
ÚCL	Civil aviation authority	Úřad civilního letectví
ÚHUL		Ústav pro hospodářskou úpravu lesa

10. Seznam literatury

1. **ABER, JAMES S., MARZOLFF, I., RIES, JOHN B.,** 2010. Small-Format Aerial Photography Principles, techniques and geoscience applications. Amsterdam, Elsevier Science, 268 s.
2. **AGISOFT PHOTOSCAN PROFESSIONAL,** 2016. Agisoft [online]. © 2006-2016 Dostupné z: <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>
3. **BERNI, J., ZARCO-TEJADA, P., SUAREZ, L., GONZÁLEZ-DUGO, V., FERERES E.,** 2009. Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 6 s.
4. **BÖHM, J.,** 2002. Fotogrammetrie učební texty. Ostrava: VŠB. Dostupné na internetu: <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>
5. **ČERNÝ, M. a kol.,** 2015. Inventarizace krajiny CzechTerra. Co ukazuje opakované šetření z let 2008/2009 a 2014/2015? Lesnická práce 10: 33-35. IFER Katalog, 2016, Field-Map
6. **ČERNÝ, M.,** 2004. Metodika tvorby lesního hospodářského plánu na podkladu provozní inventarizace. Praha, Ministerstvo životního prostředí, 215 s.
7. **ČERNÝ, M., CIENCIALA, E., BERANOVÁ, J.,** 2009. Metodika inventarizace krajiny CzechTerra, 19 s., dostupné z: http://www.czechterra.cz/documents/CzechTerra_Koncepce.pdf
8. **ČESKÁ REPUBLIKA,** 2008, DOPLNĚK X – BEZPILOTNÍ SYSTÉMY. In: Hlava 3, ust. 3.1.12. 2008. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
9. **ČÚZK,** 2011. Český úřad zeměměřický a katastrální. [online] Citováno 27.4.2014. Dostupné na WWW: <<http://www.cuzk.cz/>>
10. **EISENBEIß, H.,** 2009. UAV Photogrammetry. Disertační práce. Curych: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. 203 s. Dostupné na: http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf
11. **ESRI,** 2012. ArcGIS 10 Desktop Help [online] citováno dne 12. 4. 2017. Esri Support. Dostupné na <http://support.esri.com/>.
12. **FORSMAN, M., BÖRLIN, N., HOLMGREN, J.,** 2016. Estimation of Tree Stem Attributes Using Terrestrial Photogrammetry with a Camera Rig, Forests, 7, (3), 61;, ISSN 1999-4907

13. **HAGLÖF**, 2009. Vertex Laser VL402 User's Manual. Haglöf Sweden AB, Längsele, Sweden, 44 s.
14. **HYYPPIA, J., HYYPPIA, H., LECKIE, D., GIOUGEON, F., YU, X., MALTAMO, M.**, 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*. 29 (5). 1339–1366.
15. **IFER Katalog**, 2016. Field-map katalog, software, hardware, on-line, dostupné z: http://www.fieldmap.cz/download/FM_catalogue_cz.pdf
16. **KLIMÁNEK, M.**, 2006. Digitální modely terénu. Brno. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 85 s. ISBN 80-7157-982-3.
17. **KUČERA, M.**, 2016. Národní inventarizace lesů České republiky (NIL), [on-line], 14.1.2017, dostupné z: [https://www.mezistromy.cz/les/narodni-inventarizace-lesu-ceske-republiky-\(nil\)/odborny](https://www.mezistromy.cz/les/narodni-inventarizace-lesu-ceske-republiky-(nil)/odborny)
18. **KUŽELKA, K., URBÁNEK, V.**, Mapování pozic stromů, s. 25-37, in: **KUŽELKA, K., BROŽKOVÁ, H., MARUŠÁK, R., SUROVÝ, P., TAUBER, R., URBÁNEK, V., VOPĚNKA, P.**, 2014. MĚŘENÍ LESA, Moderní metody sběru a zpracování dat. Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze, 164 s. ISBN 978-80- 213- 2498-5
19. **LASER TECHNOLOGY.**, 2009. Trupulse 360/360B User's Manual 2nd Edition, Laser Technology, Inc., 43 s.
20. **LI, Z., CHEN, J., BALTSAVIAS, E.**, 2008. Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information, ISPRS Congress Book, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 527 s., ISBN 978-0- 415-47805- 2
21. **LIANG, I., WANG, Y., JAAKKOLA, A., KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPIA, J., HONKAVAARA, E., LIU, J.**, 2015. Forest Data Collection Using Terrestrial Image-Based Point Clouds From a Handheld Camera Compared to Terrestrial and Personal Laser Scanning, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 9, p. 5117–5132.
22. **LILLESAND, T., KIEFER, R.W., CHIPMAN.**, 2015. Remote Sensing and Image Interpretation, 7th Edition, John Willey & Sons, 736 s., ISBN: 978-1- 118-34328- 9
23. **MARUŠÁK, R., TAUBER, R., STOLARIKOVÁ, R.**, 2013. Metodika odvození lokálních objemových tabulek, Výsledek projektu QI102A079 „Výzkum biomasy listnatých dřevin“, Česká zemědělská univerzita v Praze

24. **MIKITA, T., JANATA, T., SUROVÝ, P.**, 2016, Forest Stand Inventory on Combined Aerial and Terrestrial Close-Range and Photogrammetry, *Forests*, 7, (8), 165; ISSN 1999-4907
25. **MILLER, J., MORGENROTH, J., GOMEZ, CH.**, 2015. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 14, Issue 4, p. 932-940, <http://doi.org.ezproxy.techlib.cz/10.1016/j.ufug.2015.09.001>
26. **MIŘIJOVSKÝ, J.**, 2013. Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta
27. **PAVELKA, K.**, 2003. Fotogrammetrie 10. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, ISBN 80-01-02649-3.
28. **PAVELKA, K.**, 2009. Fotogrammetrie 1. Praha: ČVUT, ISBN 978-80-01-04249- 6.
29. **PETRÁŠ, R., PAJTÍK, J.**, 1991. Sústava česko-slovenských objemových tabuliek dřevín. *Lesnícky časopis*, 37, (1), s. 49-56. ISSN 0232-1046.
30. **RODRÍGUEZ-GARCÍA, C., MONTES, F., RUIZ, F., CANELLAS, I., PITA, P.**, 2014. Stem mapping and estimating standing volume from stereoscopic hemispherical images, *Eur. J. For. Res.* 2014, 133, 895–904., doi: 10.1007/s10342-014- 0806-6
31. **SBORNÍK WORKSHOPU RPAS A SVK TELČ**, 2014. Aktuální problémy fotogrammetrie a DPZ, laserového skenování a GIS: Představení UAV (RPAS) a jejich aplikace v lesnictví), Praha, ČVUT, ISBN978-80- 01-05647- 9
32. **SEQUENS, J.**, 2005. Dendrometrie, Studijní podklady [online] citováno dne 16. 3. 2012. ČZU Praha, 55 s. Dostupné na WWW: <<http://drevvari.humlak.cz>>
33. **SUROVÝ, P., YOSHIMOTO, A., PANAGIOTIDIS, D.**, 2016. Accuracy of Reconstruction of the Tree Stem Surface Using Terrestrial Close-Range Photogrammetry, *Remote Sensing*, 8 (2), p.123
34. **SVATÝ, Z.**, 2012. Využití fotogrammetrie ve znalecké praxi. Bakalářská práce. ČVUT Praha. 58 s.
35. **ŠEDINA, Z.**, 2012. Porovnání 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii, Diplomová práce. s. 72., ČVUT
36. **ŠMIDRKAL, J.**, 1985. Fotogrammetrie I- Teoretické základy. Praha: ČVUT
37. **ŠMIDRKAL, J.**, 1986. Fotogrammetrie pro 3. ročník studijního oboru geodzie. Praha: ČVUT
38. **ŠMIDRKAL, J.**, 1992. Fotogrammetrie a DPZ II. Praha: ČVUT

39. ŠMIDRKAL, J., 1985. Fotogrammetrie II- Přístroje a metody. Praha: ČVUT
40. ŠMIDRKAL, J., 1986. Fotogrammetrie. Geodetický a kartografický podnik v Praze, Praha, 229 s.
41. ULRICH, R., JANATA, P., MAZAL, P., RYGL, L., 2012. Úspěšnost obnovy lesa na kalamitních holinách na základě vyhodnocení leteckých snímků. In Stav lesních ekosystémů po kalamitě Kyrill. Praha: Lesnická práce, s.r.o. Kostelec nad Černými lesy, s. 32 – 42.
42. ÚSTAV PRO HOSPODÁŘSKOU ÚPRAVU LESŮ BRANDÝS NAD LABEM. 2003. Inventarizace lesů, Metodika venkovního sběru dat. Brandýs nad Labem. 136 s. Dostupné na: http://www.uhul.cz/images/nil/metodika_sberu/kap_3_6_0.pdf
43. VIKTORA, J., 2014. Využití fotogrammetrie pro realitní praxi. Diplomová práce. VUT Brno. 93 s.
44. VOŽENÍLEK, V., 2001. Aplikovaná kartografie I. Tématické mapy. Olomouc: VUP, 2001. ISBN 80-244-0270-X.
45. VÝROČNÍ ZPRÁVA IFER, 2015. on-line, dostupná z: http://www.ifer.cz/download/VZ_IFER_2015_cz.pdf
46. WOLF, P., DEWITT, B., WILKINSON, B., 2014. Elements of Photogrammetry with Application in GIS. 4th ed. McGraw-Hill Education, New York, 676 s.

11. Seznam obrázků a tabulek

- Obr. 1 Fotogrammetrický plán Vyšehradské stráně (Böhm, 2002)
- Obr. 2 Projekce mapy a snímku (Böhm, 2002)
- Obr. 3 Vnitřní orientace snímku (Böhm, 2002)
- Obr. 4 Prvky vnější orientace snímku (Böhm, 2002)
- Obr.5 Poloha výzkumné plochy v rámci ČR
- Obr. 6 Postup pro měření nakloněných stromů. (ÚHÚL, 2003)
- Obr. 7 Měření výšek listnatých dřevin (dodržování přiměřené odstupové vzdálenosti)(ÚHÚL, 2003)
- Obr. 8 Určení výšky 1,3 m pro správné měření výčetní tloušťky. (ÚHÚL, 2003)
- Obr. 9 Vlícovací bod 1. a 2. ze softwaru Agisoft PhotoScan
- Obr. 10 Umístění kamer na výtyčce
- Obr. 11 Schéma trasy měřiče porostem
- Obr. 12 Vlícovací bod použitý pro leteckou fotogrammetrii (Mikita et al., 2016)
- Obr. 13 Hexakoptéra DJI S800 SpreadWings
- Obr. 14 Nastavení Detect Markers
- Obr. 15 Nastavené parametry Align photos
- Obr. 16 Nastavené parametry Build dense cloud
- Obr. 17 Vygenerovaná spodní část kmenu
- Obr. 18 Uživatelské prostředí nástrojů LAStools
- Obr. 19 Příklad vytvořené obalové vrstvy
- Obr. 20 Příklady řezů kmenů (convex hull – modře, circle fitting – červeně)
- Obr. 21 3D výškový model korun (napravo použitý nástroj focal statistics)

Obr. 22	Mikropovodí vypočtené z převráceného výškového modelu korun
Obr. 23	Zjišťování vrcholů stromů z depresí nástrojem Reclassify
Obr. 24	Porovnání výšek změřených v porostu a výšek získaných z leteckého fotogrammetrického snímkování
Obr. 25	Porovnání tloušťek změřených v porostu a tloušťek získaných metodou „Circle fitting“
Obr. 26	Porovnání tloušťek změřených v porostu a tloušťek získaných metodou „convex hull“
Tab. 1	Klasifikace UAV dle typu pohonu a hmotnosti (upraveno podle Eisenbeiß, 2009)
Tab. 2	Procentické zastoupení dřevin zjištěné z terénního měření
Tab. 3	Parametry snímkování
Tab. 4	Parametry leteckých snímků
Tab. 5	Formát souřadnic pro Agisoft PhotoScan
Tab. 6	Charakteristika měřených stromů
Tab. 7	Vlastnosti bodových mračen z pozemní a letecké fotogrammetrie
Tab. 8	Počet identifikovaných stromů v tloušťkovém stupni
Tab. 9	Porovnání přesnosti detekce polohy stromů
Tab. 10	Porovnání digitálního modelu terénu vytvořeného z geodeticky zaměřených poloh stromů a z pozemního fotogrammetrického snímkování
Tab. 11	Porovnání terénního měření s vypočtenými veličinami
Tab. 12	Parametry vygenerovaných fotogrammetrických mračen bodů
Tab. 13	časové vyhodnocení použité metodiky

12. Seznam příloh

- | | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Poloha zájmového území |
| Příloha 2 | 3D pohled na bodové mračno z pozemní a letecké fotogrammetrie |
| Příloha 3 | Špatně vygenerované bodové mračno - Agisoft Photoscan - build dense cloud - low quality |
| Příloha 4 | Vygenerované fotogrammetrické mračno se znázorněnými prvky vnitřní a vnější orientace snímků |
| Příloha 5 | Charakteristiky 30 identifikovaných stromů z řezu fotogrammetrickým mračnem, měřené a zjištěné výčetní tloušťky a výšky |