

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE

STUDIJNÍ OBOR GEOINFORMATIKA



Diplomová práce

**Možnosti použití RPAS v lesnictví**

Bc. Petr Dyrč

Vedoucí práce: Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Praha 2018



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Dyrč	Jméno: Petr	Osobní číslo: 410892
Zadávající katedra: katedra geomatiky		
Studijní program: geodézie a kartografie		
Studijní obor: geomatika		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Možnosti použití RPAS v lesnictví
Název diplomové práce anglicky: Possibilities of using RPAS in forestry

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši na klasické i neklasické metody získávání informací v lesnictví zejména pro výpočet dřevní hmoty a dále se zaměřte na existující možnosti využití RPAS (remotely piloted aircraft system). Pozemním měřením na malém vzorku lesa určete informace pro výpočet dřevní hmoty a pokuste se vypočítat obdobný údaj z dat RPAS, kdy využijete tvorbu digitálního modelu povrchu a výpočet výšky stromů. Pokuste se verifikovat či navrhněte jinou metodu pro ověření těchto údajů. Závěrem porovnejte výsledky a zhodnoťte postupy z hlediska ekonomiky a pracnosti.

Seznam doporučené literatury:

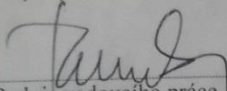
Pavelka, K.; Šedina, J.; Pacina, J.; Plánka, L.; Karas, J.; Šafář, V.  
RPAS - Remotely Piloted Aircraft System, Praha: katedra geomatiky, 2016. ISBN 978-80-01-05648-6.

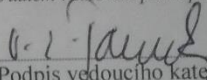
Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Datum zadání diplomové práce: 19.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

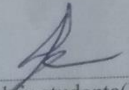
  
Podpis vedoucího práce

  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

26.2.2018  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

# Abstrakt

Dálkově pilotované letecké prostředky (RPAS - Remotely Piloted Aircraft System), často zvané drony, UAV či UAS, jsou v dnešní době jedním z často diskutovaných témat v oblasti vědy a techniky. Díky nim jsme schopni získávat velké množství informací a dat z oblasti fotogrammetrie a DPZ (dálkového průzkumu Země) a to v poměrně krátkém časovém úseku. Tato velmi perspektivní a rychle se rozvíjející technologie se rozmáhá v různých oblastech lidské činnosti. Jednou z oblastí, kde lze RPAS naprosto legálně využít je lesní hospodářství.

Tato práce se zabývá možnostmi využití dálkově pilotovaných leteckých prostředků v oblasti lesnictví, zejména pro zjištění informací potřebných k výpočtu dřevní hmoty stojícího lesa. V práci jsou teoreticky popsány klasické i neklasické metody odhadů dřevní hmoty lesních porostů. Prakticky bylo provedeno měření stojícího lesa na ploše o rozloze cca 30x35m a to klasickou metodou a pomocí tří typů RPAS. Dále jsou popsány a prakticky zpracovány další možnosti využití RPAS pro lesní hospodářství.

V závěru práce jsou porovnány výsledky měření v terénu a zhodnocena možnost nasazení dronů v lesním hospodářství vzhledem k přesnosti a časové náročnosti měření. Na základě výsledků bylo zjištěno, že RPAS má v oblasti lesnictví široké množství využití a vzhledem k ekonomické stránce také jistý potenciál pro určování porostních charakteristik.

## Klíčová slova

RPAS, lesnictví, DMP, dřevní hmota, objem dřeva, stojící les, výška stromu

# Abstract

RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), often called drones, UAVs or UASs, are nowadays one of the frequently discussed topics in science and technology. Thanks to them, we are able to obtain a great amount of information and data from the field of photogrammetry and remote sensing in a relatively short period of time. This very promising and rapidly evolving technology is expanding in various disciplines of human activity. One discipline where the RPAS can be absolutely legally used is forestry.

This thesis deals with the possibilities of using RPAS in forestry, especially for detection of the information necessary for calculation of the wood mass of the standing forest. The classical and non-classical methods of estimation of volume of forest stands are theoretically described. Practically, the measurement of the standing forest on an area of approximately 30x35m was carried out using the traditional method and three types of RPAS. Furthermore, other possibilities of using RPAS for forestry are described and practically processed.

At the end of the thesis the results of field measurements are compared and the possibility of deployment of the drones in the forest management has been evaluated in relation to the accuracy and economy of the measurements. Based on the results, it has been found that RPAS has a wide range of uses in the forestry sector and, in economic terms, a certain potential for determining the woods characteristics.

## Key words

RPAS, forestry, DSM, wood mass, volume of wood, standing forest, tree height

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem samostatně vypracoval bakalářskou práci na téma “Možnosti použití RPAS v lesnictví” pod vedením Prof. Dr. Ing. Karla Pavelky, za použití zdrojů uvedených v seznamu.

V Praze dne .....

.....

Petr Dyrč

# Poděkování

Během tvorby této práce jsem se mohl spolehnout na pomoc prof. Pavelky, ale také na podporu své rodiny a příbuzných. Proto, bych rád poděkoval všem, kteří mi poradili a pomohli mi k úspěšnému vypracování této diplomové práce.

# Seznam použitých zkratek

CHM	Canopy Height Model
RPAS	Remoted Piloted Aircraft Systems
RPA	Remoted Piloted Aircraft
ROA	Remotely Operated Aircraft
RPV	Remotely Piloted Vehicle
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UVS	Unmanned Vehicle Systems
DPZ	Dálkový průzkum Země
GIS	Geografický informační systém
LiDAR	Light Detection And Ranging
PLS	Pozemní laserové skenování
LLS	Letecké laserové skenování
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
DEM	Digital Elevation Model
DMP	Digitální model povrchu
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
DMR	Digitální model reliéfu
UA	Unmanned aircraft - Bezpilotní letadlo
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>2 Metody získávání informací v lesnictví .....</b>	<b>- 2 -</b>
2.1 DENDROMETRIE .....	- 2 -
2.1.1 Základní dendrometrické veličiny .....	- 3 -
2.1.2 Způsoby zjišťování dendrometrických veličin .....	- 3 -
2.2 STROMOVÉ CHARAKTERISTIKY .....	- 5 -
2.2.1 Tloušťka stromu .....	- 5 -
2.2.2 Výška stromu .....	- 6 -
2.2.3 Objem .....	- 7 -
2.3 METODA CELOPLOŠNÉHO PRŮMĚRKOVÁNÍ .....	- 8 -
2.4 MODERNÍ METODY .....	- 12 -
2.4.1 Pozemní fotogrammetrie .....	- 12 -
2.4.2 Laserové skenování .....	- 13 -
2.4.3 Dálkový průzkum Země .....	- 13 -
2.4.4 RPAS .....	- 14 -
<b>3 Cíle práce .....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>4 Praktická část .....</b>	<b>- 18 -</b>
4.1 POZEMNÍ MĚŘENÍ .....	- 20 -
4.1.1 Tloušťky .....	- 20 -
4.1.2 Výšky .....	- 21 -
4.2 MĚŘENÍ POMOCÍ RPAS .....	- 22 -
4.2.1 Phantom 3 SE .....	- 22 -
4.2.2 Phantom 4 Pro .....	- 24 -
4.2.3 eBee .....	- 24 -
4.3 ZPRACOVÁNÍ POZEMNÍHO MĚŘENÍ .....	- 27 -
4.3.1 Tloušťky .....	- 27 -
4.3.2 Výšky .....	- 28 -
4.3.3 Vlicovací body .....	- 29 -
4.4 ZPRACOVÁNÍ DAT Z RPAS .....	- 30 -
4.4.1 Agisoft PhotoScan .....	- 30 -
4.4.2 Pix4D .....	- 35 -
4.4.3 ArcGIS .....	- 36 -
<b>5 Výsledky .....</b>	<b>- 43 -</b>



5.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÉ PŘESNOSTI PŘI TVORBĚ DMP .....	- 43 -
5.2 VÝSLEDEK TVORBY DMP, DMT A ORTOFOTA .....	- 44 -
5.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A ZHODNOCENÍ PŘESNOSTI ZJIŠTĚNÝCH ÚDAJŮ .....	- 49 -
5.4 ZHODNOCENÍ METOD Z HLEDISKA EKONOMIKY A PRACNOSTI .....	- 56 -
<b>6 Další možnosti využití RPAS v lesnictví .....</b>	<b>- 58 -</b>
6.1 SLEDOVÁNÍ ZDRAVOTNÍHO STAVU LESNÍCH POROSTŮ .....	- 58 -
6.2 SLEDOVÁNÍ POSTUPU A ROZSAHU TĚŽBY, HOLINY .....	- 59 -
6.3 ANALÝZA RŮSTOVÉHO VÝVOJE POROSTU .....	- 61 -
6.4 MONITORING ZVĚŘE .....	- 62 -
<b>7 Závěr .....</b>	<b>- 63 -</b>



# 1 Úvod

Pojmy dron, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), UVS (*Unmanned Vehicle Systems*), RPA (*Remoted Piloted Aircraft*), ROA (*Remotely Operated Aircraft*), RPV (*Remotely Piloted Vehicle*) nebo RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) jsou v dnešní době moderních technologií velmi rozšířené. Široké veřejnosti je známo spíše označení dron a to zejména z médií. Řada odborných publikací zmiňuje zkratku UAV, nicméně s legislativním rámcem se nejvíce ztotožňuje právě zkratka RPAS, která jednoznačně definuje, že létající prostředek má pilota, je dálkově řízený a jedná se o systém, tedy leteckou část i pozemní-řídící.

Relativně nová a rychle se rozvíjející metoda RPAS je mimo jiné stále více začleňována a zkoumána v různých oborech lidské činnosti. Díky kvalitní fotografické technice, kterou jsou RPAS schopny nést, dokáže tato technologie částečně nahradit letecké snímkování z letadel a na rozdíl od pozemní fotogrammetrie nabízí nové možnosti a nový úhel pohledu na zkoumanou oblast.

Vzhledem k výrazně se zvyšující dostupnosti nejrůznějších typů RPAS a jejich potenciálu bylo rozhodnuto prozkoumat možnosti této technologie v lesnictví. Výzkum je zaměřen zejména na zjišťování informací pro výpočet dřevní hmoty stojícího lesa v dané lokalitě, ale zabývá se i dalšími možnostmi využití RPAS v lesním hospodářství.

Praktická část měření dřevní hmoty byla provedena na malém vzorku lesa na lokalitě Vršek u Jáchymova. Práce je zaměřena především na porovnání pozemního měření klasickými metodami s výsledky získanými z dat RPAS.

Automatizovanými postupy jsou zpracována data z RPAS v programech Agisoft PhotoScan a Pix4D. Pro výpočet výšek stromů a počtu stromů z leteckých dat je použit program ArcGIS, v němž jsou informace získány analýzou DMP (digitální model povrchu) a DMR (digitální model reliéfu).



## 2 Metody získávání informací v lesnictví

Lesní hospodářství je jedním z nejdůležitějších oborů lidské činnosti. Vyžaduje stále přesnější kvantitativní odhady současného a výhledového objemu lesních porostů. Dříve bylo měření založeno na jednoduchých měřických metodách a odhadech. Od poloviny minulého století metody měření charakteristik stromů zaznamenalo výrazný technologický posun vpřed. [4].

Lesnické obory se v dnešní době moderních technologií snaží pozvolna přizpůsobit novým trendům. Nejdůležitější roli v taxaci lesů hraje měření základních dendrometrických veličin. Ve velkém rozsahu se začleňují nové přístroje a zkoumají nové metody, které by mohly přinést zjednodušení a zefektivnění některých postupů práce [2].

Klasické metody pozemního měření jsou v praxi stále prioritou a zaváděním nových optických, digitálních a laserových přístrojů se jejich přesnost zvyšuje. Přesto se v posledních několika letech stále více experimentuje s novými technologiemi pro inovaci terénních měření. Dosud praktikované metody měření jsou přesné, ale velmi nákladné vzhledem k časové náročnosti či přístrojům [6]. Z hlediska časové úspory a minimalizace personálu jsou vyvíjeny a zkoumány metody na principu DPZ [5].

### 2.1 Dendrometrie

Dendrometrie se zabývá zjišťováním kvantitativních parametrů stojících stromů a lesních porostů, případně jejich částí, vzájemnými vztahy mezi těmito parametry a vývojem metod pro jejich zjišťování. Hlavním úkolem dendrometrie je kvantifikace objemů jednotlivých stromů a zásob celých porostů, měření zprostředkujících veličin a vývoje a využití postupů a metod určování objemů a zásob.

Měření lesa je jedna z nejzákladnějších disciplín v lesnictví. Zabývá se měřením stromů a porostů a analýzou získaných informací [1], [3], [19].



### 2.1.1 Základní dendrometrické veličiny

Hlavním předmětem měření lesa a dřeva jsou dendrometrické veličiny. Základní dendrometrické veličiny se vztahují buď na jednotlivé stromy, nebo na soubory stromů – lesní porosty. Mohou se dělit na:

- kvalitativní – neměřitelné veličiny, pouze slovně popsatelné (např. druh dřeviny),
- kvantitativní – měřitelné veličiny (např. tloušťka a výška stromu).

Nebo se mohou rozdělovat podle jiných vlastností na:

- stromové – týkají se pouze jednoho stromu (šířka kmene, výška stromu, objem stromu),
- porostní – týkají se většího souboru stromů, nacházejících se na příslušné jednotce prostorového rozdělení lesa (např. výměra porostu, počet stromů, zásoba dřeva, věk, bonita, zakmenění, střední tloušťka a střední výška [1]).

### 2.1.2 Způsoby zjišťování dendrometrických veličin

Údaje o dendrometrických veličinách je možno získávat několika možnými způsoby.

#### *2.1.2.1 Přímo (terestricky) – provádí se v bezprostředním kontaktu s předmětem zjišťování:*

- pozorováním – typické pro vizuální posouzení kvalitativních znaků. Výsledkem je slovní vyjádření (např. druh dřeviny),
- spočítáním – vhodné pro kvalitativní (stromy patřící do určitého stupně poškození) i pro kvantitativní (zjišťování počtů letokruhů při určování věku) veličiny,
- měřením a vážením – týká se kvantitativních veličin, které při měření lesa převládají (číselně vyjádřené dendrometrické veličiny).



## 2.1.2.2 *Nepřímo (bezkontaktně)*

Provádí se bez přímého kontaktu s předmětem zjišťování. Tímto způsobem je měřena například výška stromu, která se prakticky jiným způsobem změřit nedá. Nyní se již hojně využívají optické, elektronické, laserové a ultrazvukové technické přístroje, které pořizují obrazové záznamy (pozemní, letecké, kosmické), které se analyzují a vyhodnocují pomocí moderních metod DPZ a GIS (geografický informační systém). Příkladem jsou dendrometrické přístroje jako optické a elektronické průměrky, ultrazvukové dálkoměry a výškoměry.

## 2.1.2.3 *Výpočtem*

Výpočet je častý postup zjišťování údajů při měření lesa. Jedná se o odvození především takových dendrometrických veličin, u kterých by bylo přímé zjišťování velmi časově a finančně nevýhodné a v některých případech ani prakticky neproveditelné. Jedná se například o objem stojícího stromu, který se určuje vyčíslením objemové rovnice z odměřených hodnot tloušťky a výšky stromu nebo odečítáním výsledných hodnot objemu z tzv. objemových tabulek.

## 2.1.2.4 *Odhadem*

Někdy okulární odhad nahrazuje přímé i nepřímé způsoby zjišťování nebo výpočet, protože je rychlý a jednoduchý. Provádí ho zkušený pracovník, a to pouze v případech, kdy se toleruje nižší přesnost (např. stupeň zakmenění v mladších porostech) nebo jako předběžný způsob před následným zpřesněním pomocí přímého zjišťování. Při odhadu je důležité, aby taxátor stále zvyšoval svou kvalitu například porovnáním svého odhadu s odměřenou hodnotou stejné dendrometrické veličiny.

## 2.1.2.5 *Převzetím již existujících údajů*

Pro některé účely stačí údaje o lese převzít z dokumentů, jako jsou lesní hospodářské plány, lesní hospodářské osnovy, oblastní plány rozvoje lesů, inventarizace lesů a výsledky z monitoringu zdravotního stavu lesa. Získané údaje je vždy potřeba prověřit z hlediska obsahu a posoudit míru jejich vypovídací hodnoty a aktuálnosti.

Tyto způsoby mohou být realizovány celoplošně (na všech stromech porostu) nebo výběrově (pouze na vybraných stromech tak, aby co nejlépe reprezentovaly celý porost) [1].



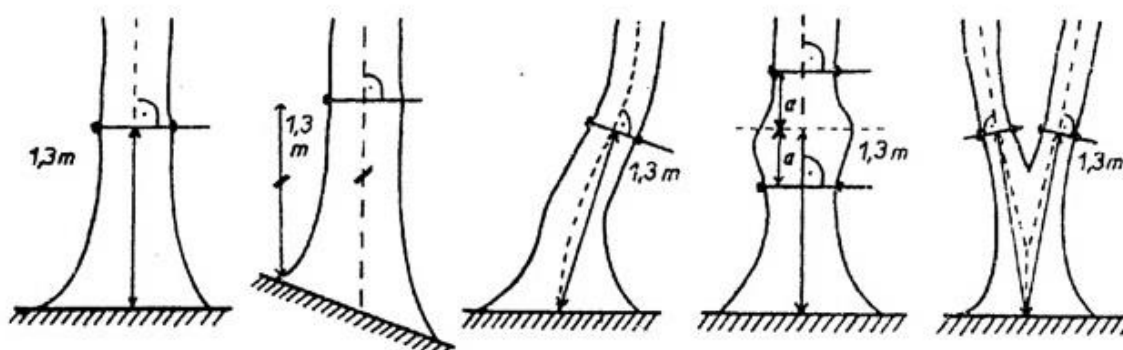
## 2.2 Stromové charakteristiky

Stromové veličiny se týkají vždy pouze jednoho stromu. Jeho základními rozměry jsou tloušťka  $d$  [cm], výška  $h$  [m] a objem  $V$  [m<sup>3</sup>]. Tloušťka a výška jsou základními vstupními veličinami pro odvození objemu stojících stromů.

### 2.2.1 Tloušťka stromu

Základní dendrometrickou veličinou je tloušťka příčného průřezu kmene. Je to vzdálenost dvou rovnoběžných tečen vedených protilehlými body na obvodu průřezu kmene. Tloušťka se standardně měří ve výčetní výšce 1,3 m nad patou kmene a je označována jako výčetní tloušťka. Měření zpravidla probíhá pomocí průměrek různých typů, ale tloušťky lze odvodit i z bezkontaktního měření pomocí optických dendrometrů [1], [3], [18], [21].

Alternativní možností měření tloušťky příčného průřezu stromu je určení obvodu. Obvod se určuje pomocí obvodového pásma. Těto metody se však téměř nevyužívá, protože tloušťka je vždy o 1 až 2 % větší než tloušťka měřená průměrkou [1], [3]. Tloušťky stojících stromů se měří vždy v kůře. Prahovou tloušťkou při průměrkování je u všech dřevin výčetní tloušťka 7 cm s kůrou [18].



Obr. č. 1: Způsoby určení místa pro měření výčetní tloušťky stromu v 1,3 m [1]

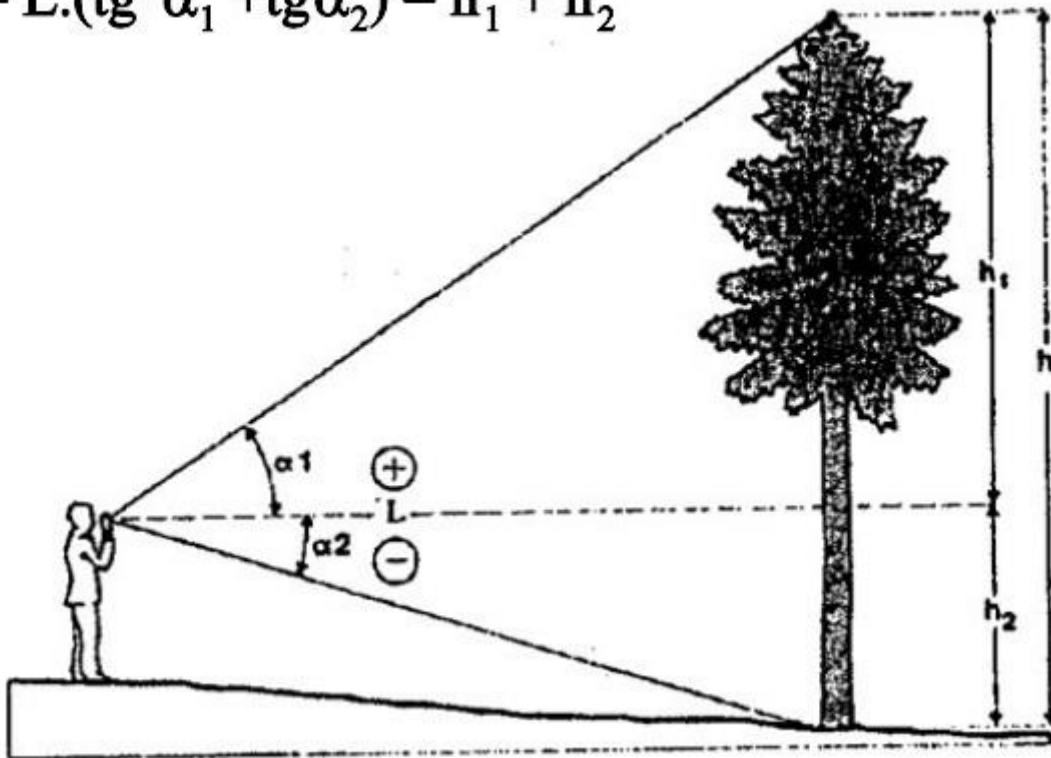


### 2.2.2 Výška stromu

Výška stromu je vzdálenost dvou rovnoběžných rovin vedených kolmo na osu kmene, z nichž jedna prochází patou kmene a druhá vrcholem stromu. Pro měření výšek je využíváno nepřímých metod měření, kdy se výšky odvozují z jiných přímo měřených veličin, kterými jsou délky a úhly. Pro měření těchto veličin jsou využívány výškoměry, které jsou založené na geometrickém nebo trigonometrickém principu. Jejich přesnost je podle daného typu od čtvrt metru až po 0,1 m [3], [18].

Výšky stromu se měří z vhodné vzdálenosti od měřeného stromu, tak aby z místa měření bylo co nejlépe vidět na vrchol i na patu stromu. Vzdálenost měření výšky by se měla minimálně rovnat odhadnuté výšce stromu [18].

$$h = L \cdot (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) = h_1 + h_2$$



Obr. č. 2: Trigonometrický princip měření výšky stromu [4]



### 2.2.3 Objem

Dřevní objem, je objem, kterého strom dosáhl jako výsledek svého růstového procesu. V lesnické praxi se pojmem objem rozumí objem hroubí. Hroubí je nadzemní část dřevní hmoty měřená s kůrou, která má tloušťku větší než 7 cm. Hroubí stromu je součet hroubí kmene a hroubí větví. Cílem měření stromových charakteristik je většinou zjištění objemu kmene nebo všech stromů tvořících porost – zásoby porostu. Při určování objemu stojících stromů je využíváno nepřímé měření základních veličin – tloušťky a výšky stromů.

Podle způsobu využití měřených údajů nás mohou zajímat různé druhy objemu.

- Stromový objem
- Kmenový objem (od pařezu po vrchol)
- Objem větví (primárních i vedlejších)
- Objem hroubí (stromový objem s tloušťkou větší nebo rovnou 7 cm)
- Objem nehroubí (ostatní část stromového objemu s tloušťkou tenčí 7 cm)
- Objem biomasy (stromový objem včetně listů nebo jehličí)

Všechny objemy se vyjadřují buď s kůrou (sk) nebo bez kůry (bk). V současném lesním hospodářství se tloušťky stojících stromů měří s kůrou, ale jejich objem se udává bez kůry [1].

Ne vždy lze stromy efektivně měřit a někdy je měření dokonce prakticky neproveditelné. Potom na řadu přichází dendrometrický výpočet nebo okulární odhad, jehož výsledek je rychlý, ale na úkor podstatně nižší přesnosti. Přesnost záleží zejména na kvalifikaci a zkušenostech pracovníka.





## 2.3 Metoda celoplošného průměrkování

Metodou celoplošného průměrkování se získávají informace o porostu pro následné určení jeho dřevní zásoby. Je to nejpřesnější a nejpodrobnější metoda sběru informací o porostu, která je však zároveň časově i finančně náročná. Proto se využívá spíše na hospodářsky významnější, starší a menší porosty s výměrou do 3 ha. Hlavním pracovním postupem pro stanovení zásoby pomocí této metody je změření tlouštěk a výšek a následně výpočet zásoby porostu [19].

Lesní porost je definovaný jako skupina stromů v dané oblasti, které jsou věkově, druhově i stavem podobné a jednoznačně odlišitelné od sousedních lesních ploch [4]. Zásoba porostu je objem všech stojících stromů tvořících porost. Klasických metod a postupů měření stojícího lesa a následného určení jeho objemu je několik. Každá metoda je specifická v použitých pomůckách a přístrojích, ale hlavně v přesnosti a pracnosti [17], [19]. Dle [17] při výběru metody určení zásoby porostu záleží především na účelu a požadované přesnosti. [17] zároveň uvádí, že nejpřesnější metoda je průměrkování naplno s přesností  $\pm 5\%$ .

Při měření objemu porostu platí zásada, že čím je porost starší a čím vyšší má hodnotu, tím by mělo být měření přesnější. U metod s podobnou přesností se upřednostňuje ta, která je ekonomicky nejvýhodnější [19]. Ovšem výsledné objemy všech metod se mohou lišit a co je „správná“ hodnota může být spekulativní, protože nikdo ji nedokáže stanovit přesně.

V praxi běžně používané metody vhodné pro zjištění dřevní zásoby porostu jsou celoplošné průměrkování, zkusné plochy, taxační a objemové tabulky a odhady

Měření tlouštěk probíhá celoplošným průměrkováním naplno pomocí průměrky. Spočtením počtu stromů v jednotlivých tloušťkových stupních je získán přehled o celkové tloušťkové struktuře porostu [19]. Dle [17] je přesnost průměrkování naplno  $\pm 5\%$ .

Výšky jsou měřeny na menším souboru vybraných stromů, a nakonec je celková porostní zásoba určena pomocí objemových tabulek, metodou jednotných objemových křivek (JOK) nebo vzorníkovými metodami.



2.3.1.1 Objemové tabulky

Metoda objemových tabulek se aplikuje, pokud máme k dispozici údaje o četnosti a výškách stromů ve všech tloušťkových stupních. V objemových tabulkách je objem jednotlivých stromů funkcí dvou vstupních veličin – tloušťky a výšky.

Postup je následující:

- průměrováním naplno jsou určeny tloušťkové stupně  $d_j$  a jejich četnosti  $n_j$ ,
- z naměřených výšek  $h_j$  v jednotlivých tloušťkových stupních  $d_j$  je sestrojena výšková stadiální křivka vyrovnaná např. Michajlovou funkcí. Pro středové hodnoty tloušťkových stupňů  $d_j$  jsou z grafu odečítané vyrovnané výšky  $h_j^{vyr}$  zaokrouhlené na celé metry,
- v objemových tabulkách pro danou dřevinu se pro kombinaci hodnot  $d_j$  a  $h_j^{vyr}$  vyhledají odpovídající hodnoty objemů pro jeden strom ( $v_j$ ),
- součinem  $n_j \cdot v_j$  se získají objemy všech stromů v tloušťkových stupních a jejich součtem  $\sum_i^k n_j \cdot v_j$  celková zásoba porostu.

Výhodou metody objemových tabulek je použití pro stejnověké i nestejnověké porosty, ale je potřeba měřit velké množství výšek, což je časově velmi náročné. V praxi se u nás i v zahraničí používá a umožňuje relativně přesně určit zásobu porostů. Jelikož skutečný údaj je nahrazován tabulkovou hodnotou dochází zde k chybě  $\pm 1\%$  při 68 % pravděpodobnosti [17], [19], [1].

**vyrovnané výšky**

průměr 1,3	8	9	10	11	12	13	14	15
10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
12	,04	,04	,05	,05	,06	,07	,07	,08
14	,05	,06	,07	,08	,08	,09	,10	,11
16	,08	,09	,10	,10	,11	,12	,13	,14
18	,10	,11	,12	,13	,14	,16	,17	,18
20	.	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,21	0,22
22	.	.	,19	,20	,22	,23	,25	,27
24	.	.	,22	,24	,26	,28	,30	,32

**výčetní tloušťka** (20)      **objem 1 stromu** (0,22)

Obr. č. 3: Zjištění objemu 1 stromu v objemových tabulkách [20]



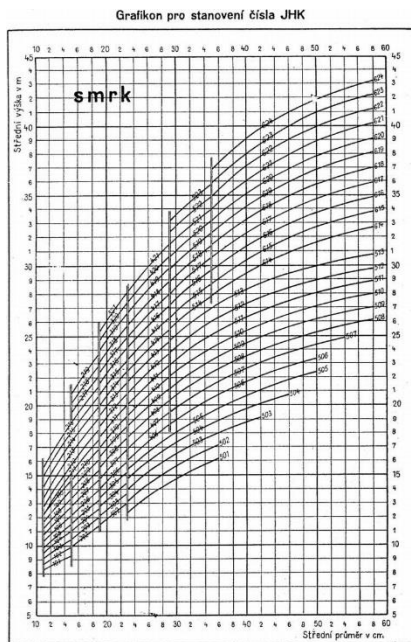
## 2.3.1.2 Jednotné objemové křivky (JOK)

Tato metoda je také založena na tabulkových hodnotách. Jedná se o tabulky jednotných výškových křivek (JVK) a jednotných objemových křivek (JOK). Je to soustava schematizovaných křivek, které modelují očekávaný průběh výškových křivek dřevin a systém, který udává objemy jednotlivých stromů jako funkci všech tloušťek a jim odpovídajících výšek. Jde o výsledek snahy zekonomičtit a zefektivnit metody objemových tabulek, protože tato metoda nevyžaduje měření velkého počtu výšek ani jejich vrovnaní výškovým grafikonem a přináší zjednodušení výpočtových prací. Podle [1] tato metoda šetří až 15 % terénních a kancelářských prací oproti metodě objemových tabulek.

Postup je následující:

- průměrkováním naplno nebo na zkusných plochách se stanoví tloušťkové stupně  $d_j$  a jejich četnosti  $n_j$ ,
- určí se střední porostní tloušťka dřevin z rozdělení četností  $n_j$  podle tloušťkových stupňů a následně se stanoví buď přibližná tloušťka  $d^{\text{přibl}}$  pomocí Weiseho procenta nebo přesná tloušťka  $d^{\text{přes}}$  výpočtem,
- určení střední výšky dřevin se provede zaměřením výšek menšího počtu stromů v okolí střední tloušťky. Z naměřených údajů tloušťky  $d_j$  a  $h_j$  se vypočte aritmetický průměr nebo se vytvoří zkrácený výškový grafikon,
- v zařid'ovacím grafikonu pro příslušnou dřevinu se určí číslo JOK tak, že se vybere JVK, která leží nejbliže k bodu o souřadnicích  $d^{\text{přes}}$  a  $h^{\text{přes}}$ ,
- z tabulek JOK se pro určené číslo v JVK převezmou objemy  $v_j$  pro příslušné tloušťkové stupně,
- ze vzorce  $\sum_i^k n_j \cdot v_j$  získáme celkovou zásobu porostu.

Nevýhodou této metody je nízká přesnost, způsobená nahrazením skutečné výškové křivky modelovou z JVK. I přesto se používá v praxi při stanovení zásoby a její přesnost je postačující. Menší přesnost vůči objemovým tabulkám kompenzuje její jednoduchost a menší nákladnost. Využití však nalézá pouze u stejnověkových průměrkovaných porostů, jejichž střední tloušťka a střední výška nepřesahují rozsah systému JVK [17].



Výška v m	Číslo třídy																												
	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.45	1.48	1.51	1.54	1.57	1.60	1.63	1.66	1.69	1.72	1.75	1.78	1.81	1.84	1.87
10	0.05	0.55	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
15	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18
20		0.11	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24	0.25	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32
25		0.17	0.20	0.23	0.25	0.26	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.34	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.41	0.43	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47	0.48	0.48	0.49	0.50
30			0.25	0.28	0.31	0.33	0.35	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.45	0.47	0.48	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63
35				0.33	0.37	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56	0.57	0.59	0.60	0.62	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75
40					0.41	0.46	0.49	0.52	0.54	0.56	0.59	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.88	0.89	0.91	0.92
45						0.50	0.55	0.59	0.62	0.65	0.68	0.71	0.74	0.76	0.78	0.81	0.84	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19
							0.58	0.63	0.67	0.71	0.75	0.79	0.82	0.85	0.89	0.93	0.97	1.01	1.05	1.09	1.13	1.17	1.21	1.25	1.29	1.33	1.37	1.41	1.45
								0.66	0.71	0.75	0.79	0.83	0.87	0.91	0.95	0.99	1.04	1.09	1.13	1.18	1.22	1.26	1.31	1.35	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56
									0.75	0.79	0.83	0.87	0.91	0.95	0.99	1.04	1.09	1.13	1.18	1.22	1.26	1.31	1.35	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56	1.61
										0.84	0.88	0.92	0.96	1.00	1.04	1.09	1.13	1.18	1.22	1.26	1.31	1.35	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56	1.61	1.65
											0.93	0.97	1.01	1.05	1.09	1.13	1.18	1.22	1.26	1.31	1.35	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56	1.61	1.65	1.70
												1.02	1.06	1.10	1.14	1.18	1.22	1.26	1.31	1.35	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56	1.61	1.65	1.70	1.74
													1.11	1.15	1.19	1.23	1.27	1.31	1.35	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56	1.61	1.65	1.70	1.74	1.78
														1.20	1.24	1.28	1.32	1.36	1.40	1.44	1.48	1.52	1.56	1.61	1.65	1.70	1.74	1.78	1.82
															1.29	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57	1.61	1.65	1.70	1.74	1.78	1.82	1.86
																1.38	1.42	1.46	1.50	1.54	1.58	1.62	1.66	1.70	1.74	1.78	1.82	1.86	1.90
																	1.47	1.51	1.55	1.59	1.63	1.67	1.71	1.75	1.79	1.83	1.87	1.91	1.95
																		1.56	1.60	1.64	1.68	1.72	1.76	1.80	1.84	1.88	1.92	1.96	2.00
																			1.65	1.69	1.73	1.77	1.81	1.85	1.89	1.93	1.97	2.01	2.05
																				1.74	1.78	1.82	1.86	1.90	1.94	1.98	2.02	2.06	2.10
																					1.83	1.87	1.91	1.95	1.99	2.03	2.07	2.11	2.15
																						1.92	1.96	2.00	2.04	2.08	2.12	2.16	2.20
																							2.01	2.05	2.09	2.13	2.17	2.21	2.25
																								2.10	2.14	2.18	2.22	2.26	2.30
																									2.19	2.23	2.27	2.31	2.35
																										2.28	2.32	2.36	2.40
																											2.37	2.41	2.45
																												2.46	2.50
																													2.55
																													2.64
																													2.73
																													2.82
																													2.91
																													3.00
																													3.09
																													3.18
																													3.27
																													3.36
																													3.45
																													3.54
																													3.63
																													3.72
																													3.81
																													3.90
																													3.99
																													4.08

Obr. č. 4.: Grafikon pro stanovení čísla JVK a tabulka objemů JOK [20]

### 2.3.1.3 Vzorníkové metody

Princip této metody je nalézt v porostu jeden nebo několik dalších stromů (vzorníků), které mají průměrné vlastnosti celého porostu (průměrnou výšku, tloušťku, objem). Vypočte se jejich objem a vynásobí se počtem stromů v porostu.

Dalšími metodami pro zjišťování dřevní hmoty porostu jsou tzv. zkušné plochy nebo metoda odhadu. Metodou zkušných ploch se zásoba porostu určuje měřením pouze menší skupiny stromů, nacházejících se na zkušných plochách rozmístěných po porostu tak, aby reprezentovali celý porost všemi svými charakteristikami [1].

Metoda odhadů spočívá ve vizuálním odhadnutí dřevní hmoty porostu díky dosaženým zkušenostem v této praxi. Tato metoda je, v závislosti na zkušenostech pracovníka, nejméně přesná, ale také zároveň ze všech metod nejméně nákladná.



## 2.4 Moderní metody

S rozvíjející se technologií jsou stále zkoumány možnosti jejího využití i v oblasti lesnictví. Jelikož se i další odvětví související s lesními pracemi stále zdokonalují a snaží se využít a zkoumat nové metody a způsoby v praxi, tak by ani lesní hospodářství nemělo zůstat pozadu [2]. V lesnictví jsou hojně zkoumány metody pozemní a letecké fotogrammetrie, ale ani výzkumy v oblasti DPZ a laserového skenování nezůstávají pozadu.

### 2.4.1 Pozemní fotogrammetrie

Ještě na počátku druhé poloviny 20. století bylo využívání fotografií pro měření v lesnictví velmi zpochybňováno, jak uvádí [9] a to především kvůli pomalosti a nákladnosti metod při zpracování snímků. Skeptičnost použití této metody trvala až do devadesátých let 20. století do příchodu digitálních fotoaparátů. Analýzou digitálních fotografií se výrazně zjednodušily postupy získávání a vyhodnocování digitálních dat [10].

Dnes je z hlediska dostupnosti hardwarového a softwarového vybavení pozemní fotogrammetrie velmi výhodnou alternativou pro získávání dendrometrických veličin. Současná výpočetní technika dokáže pracovat s velkým objemem fotografií a generovat z nich mračna bodů. Nejčastěji se metoda pozemní fotogrammetrie využívá pro zjišťování tloušťky, tvaru nebo objemu kmene stromu. Zjištěním tloušťky kmene stromu pomocí zpracování fotografií se zabývá práce [11], kdy RMSE vypočtené tloušťky kmene oproti tloušťce měřené byla rovna 2,39 cm.

Dle [2] je používání analýz fotografií za účelem získávání dendrometrických veličin užitečné obzvláště tehdy, kdy je potřeba získat více údajů o porostu než pouze tloušťku a výšku stromu a kdy by zjišťování dalších parametrů bylo klasickými metodami složitější a nákladnější nebo by vyžadovalo použití destruktivních metod měření.



## 2.4.2 Laserové skenování

Jedním z prostředků pro zjišťování porostních veličin a dalších informací o stromech je laserové skenování. Je založeno na metodě LiDAR (Light Detection And Ranging), která se používá v pozemním laserovém skenování (PLS) i v leteckém laserovém skenování (LLS). Data jsou zaznamenávána ve formě mračen bodů a dále zpracovávána ve speciálním softwaru. Všechny doposud provedené výzkumy se zaměřují na zjišťování tloušťky kmene ve výčetní výšce 1,3 m, zjišťování výšky stromu, počtu stromů a jejich pozic.

V současnosti je laserové skenování pro potřeby lesnictví stále ve fázi experimentů než běžného využití v praxi. Zavedení do praxe je zatíženo faktem, že výsledky měření stejné zájmové oblasti jsou velmi odlišné. Záleží to především na typu použitého skeneru, jeho rozmístění a nastavení, na typu použitého algoritmu, na druhu a hustotě porostu atd. [12]. Volbu pro pořízení laserového skeneru s příslušným softwarovým a výpočetním vybavením ztěžuje důležitý faktor, kterým je poměrně vysoká cena zařízení a pracnost výstupů

## 2.4.3 Dálkový průzkum Země

DPZ je bezkontaktní způsob získávání informací o zemském povrchu z dat získaných díky vysílanému a odraženému elektromagnetickým zářením. [16]. Dálkové metody získávání údajů o různých veličinách v lesnictví se využívají již několik desítek let. Jednou z důležitých součástí DPZ je letecká nebo družicová fotogrammetrie. Časová a ekonomická efektivita těchto metod zvyšuje jejich oblibu a zájem o prohloubení znalostí v tomto oboru. Prudký rozvoj technologie v posledních letech znamená i přísun nových možností v oblasti fotogrammetrie pro lesní hospodářství. Ať už pozemní, letecká nebo družicová forma bezkontaktního zjišťování informací o zemském povrchu, všechny pomalu nacházejí své uplatnění v oblasti lesního hospodářství.

Výsledky zkoumání družicových dat jako zdrojů informací pro inventarizaci a monitorování lesa hodnotí ve své práci [23]. Tento výzkum dokazuje, že družicové snímky neobsahují dostatečné množství informací pro rozhodovací procesy v lesním hospodářství. Ačkoli na regionální úrovni může být aplikace družicových snímků užitečná, pro účely lesního plánování existují efektivnější způsoby sběru požadovaných informací.



#### 2.4.4 RPAS

Podle [4] bylo prvním pokusem o leteckou fotogrammetrii v lesnictví použití horkovzdušného balonu nad Berlínem v roce 1887. Cílem tohoto pokusu bylo prozkoumat možnosti pro vytvoření mapy lesa ze snímků a pokusit se les z této perspektivy klasifikovat a analyzovat. Podmínky pro provoz balónů bez pilota na palubě u nás reguluje Doplněk R [13].

Obecně RPAS bylo využíváno pro vojenské účely již od první světové války. Trvalo poměrně dlouho než se RPAS (drony) dostaly do civilní sféry [7]. Dostupnost této převratné technologie je čím dál snazší a možnosti jejího využití v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti jsou čím dál více zkoumány i přes všechna legislativní omezení, která se snaží tento rychlý rozvoj právně i z bezpečnostních důvodů regulovat.

Tato stále poměrně nová technologie s sebou nese řadu nejasností ohledně správné terminologie. Zatímco široká veřejnost používá slovo dron, Úřad pro civilní letectví definuje letadlo určené k provozu bez pilota na palubě jako Bezpilotní letadlo (UA), dle Doplněku X [14]. Toto označení může být zavádějící a navozovat dojem, že letadlo nikdo neřídí, proto dle [15] je přesnější používat nejnovější zkratku RPAS, která jasně definuje, že prostředek je dálkově řízený a existuje osoba zodpovědná za jeho provoz. Často se užívá i starší zkratka UAV (unmanned aerial vehicle) nebo UAS (unmanned aerial system).



### 2.4.4.1 Základní rozdělení RPAS

RPAS mohou být klasifikované dle účelu využití nebo podle typu. V současné době je mnoho možností využití od rekreace po vojenskou sféru, ale v řadě dalších oborech se RPAS nacházejí ve fázi výzkumu. Podle účelu použití a maximální vzletové hmotnosti platí pro RPAS v ČR dle Doplňku X zvláštní předpisy a ustanovení [14].

Tabulka 1 (viz ust. 16)										
ř.	maximální vzletová hmotnost	≤ 0,91 kg		> 0,91 kg a < 7 kg		7 – 25 kg		> 25 kg		bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota
-	účel použití ----- požadavek	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	rekreačně sportovní	výdělečné, experimentální, výzkumné	
1	evidence letadla	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
2	evidence pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
3	praktický a teoretický test pilota	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
4	povolení k létání	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano
5	povolení k provádění LP a LČPVP	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze	ano	nelze
6	označení UA: ID štítek / ID štítek + pozn. značka	ne / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ne	ano / ano	ano / ano
7	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání / osoby, stavby / osídlený prostor	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	bezpečná, ale minimálně 50/100/150
8	pojištění: běžný provoz / LVV (mil. Kč)	ne / 0,25	dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>	ne / 1	dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>	ne / 3 od 20 kg dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>	dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>	dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>	dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>	dle nař. č. 785/2004 <sup>1</sup>
9	dozor	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ne
10	„failsafe“ systém	ne	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
11	provozní příručka UAS	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ne
12	hlášení událostí	ne	ano	ne	ano	ne	ano	ano	ano	ano

Obr. č. 5: Podmínky při provozu bezpilotního letadla [14]





Dále můžeme RPAS rozdělit podle typu. Od historických balonů a draků se vývoj velmi rychle posunul k okřídleným dálkově řízeným letadlům a vrtulovým multikoptérám [22]. V současné době se tyto typy dronů pohybují v nejrůznějších cenových kategoriích. Lze je pořídit dokonce jako hračky za několik stovek korun. Veřejnosti se tak dostávají stále více do povědomí, a proto je třeba na tento vývoj rychle reagovat z hlediska legislativy.

	<b>Lehčí než vzduch</b>	<b>Těžší než vzduch</b>		
		<b>Stavitelné křídlo</b>	<b>Pevné křídlo</b>	<b>Rotační křídlo</b>
<b>Bez motoru</b>	Balón	Rogalo	Větroň	
		Paraglide	Kluzák	
		Drak		
<b>S motorem</b>	Vzducholoď	Paraglide s motorem	Letadlo s vrtulí	Vrtulník
		Rogalo s motorem	Proudové letadlo	Koaxiální vrtulník
				Kvadroptéra
				Multikoptéra
				Vírník

Tabulka č. 1: Dělení RPAS dle typu [22]



### 3 Cíle práce

Tato práce je založena na prozkoumání využitelnosti dálkově pilotovaných prostředků v oboru lesnictví. Zaměřuje se na zjišťování stromových a porostních charakteristik pomocí RPAS, a dále na výpočet objemu dřevní hmoty lesních porostů. Předmětem výzkumu je především to, jestli je vůbec možné získat údaje o dendrometrických veličinách pouze z leteckých fotografií a jestli jsou výsledky na tolik kvalitní, že by se mohli klasickým pozemním metodám vyrovnat nebo je dokonce nahradit. Zaváděním nových technologií pro klasické metody se měření může do jisté míry zefektivňovat a zpřesňovat, ale základní a tradiční postupy zůstávají zachovány [2]. Proto je tato práce zaměřena na netradiční způsob sběru informací o porostu a je zde popsán způsob, jakým by dálkově řízené prostředky a moderní softwarové vybavení mohlo v lesním hospodářství usnadnit časovou i fyzickou náročnost práce a snížit náklady pro její provedení.

Na malém vzorku monokulturního smrkového porostu bylo provedeno pořízení dat, resp. fotografií pomocí RPAS. Tato data byla zpracována v programu Pix4D a v programu Agisoft Photoscan pro vytvoření DMP. Evaluace dat v daných softwarech probíhala automatizovaně. V zájmové oblasti bylo vhodně rozmístěno 6 vlíčovacích bodů. Geodetickými metodami byly určeny souřadnice vlíčovacích bodů pro připojení modelu do souřadnicového systému. U výsledného modelu bylo testováno, zdali z něho lze pomocí vhodného softwaru odhadnout výšku porostu a následně odhadnout výpočet objemu dřevní hmoty testovaného vzorku lesa.

Pro porovnání výsledných hodnot bylo zájmové územní měřeno pozemními metodami. Výška stromů byla zaměřena totální stanicí a průměry určené analogovou průměrkou. Průměry stromů byly určeny průměrkováním naplno, vždy ve dvou na sebe kolmých směrech. Zároveň byl při této metodě proveden zákres pozic stromů a jejich součet. Výsledky obou metod byly porovnány a vyhodnoceny z hlediska přesnosti a ekonomičnosti.

V poslední části se práce zabývá dalšími možnostmi využití RPAS v lesním hospodářství. K RPAS mohou být připojeny nejrůznější senzory. Například termokamery, které jsou vhodné pro monitoring lesní zvěře nebo různé infračervené kamery pro sledování zdravotního stavu lesních porostů nebo postupného úklidu klestu po těžbě dřeva.



## 4 Praktická část

Lokalitou pro měření byla lokalita Vršek u Jáchymova. Zájmovou oblastí byl malý vzorek smrkového monokulturního lesa o rozměrech cca 30x35 m. Nejprve byly připraveny vlíčovací body a vhodně rozmístěny vně porostu na louku, celkem 5 signálů. Jeden signál byl umístěn do řídkší části porostů tak, aby byl identifikovatelný na fotografiích. Všechny vlíčovací body (celkem 6) byly geodeticky zaměřené totální stanicí Trimble 5000 Series z volného stanoviště s přesností měřených úhlů  $1''/0.3$  mgon a s přesností měřených délek  $\pm 2$  mm + 2ppm s hranolem i bez hranolu. Měření bylo připojeno na dva stabilizované body na louce. Tyto body byly záměrně lokalizované v dostatečné vzdálenosti od lesa tak, aby je bylo možné zaměřit GNSS stanicí Topcon. GNSS stanice totiž nepřijímá dostatečně kvalitní signál z družic GNSS, pokud je umístěna přímo pod stromy. Vhodný stav je na kontroleru GNSS přijímače zobrazen jako „Fixed“. V takovém případě bylo možné dané body zaměřit s přesností na cm.



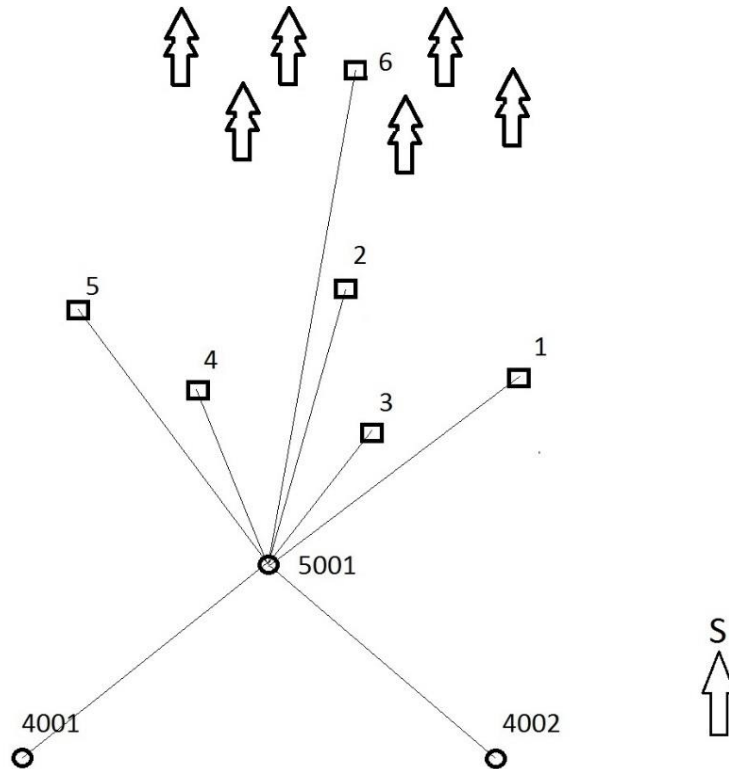
Obr. č. 6: Totální stanice Trimble 5000 Series; GNSS stanice Topcon



Před odjezdem na danou lokalitu byla provedena kontrola funkčnosti všech přístrojů. Byly nabity všechny potřebné baterie a provedena kontrola celého příslušenství měřicích aparatur. Byly sestaveny signály – vlíčovací body o vhodné velikosti.

### Náčrt situace

- 5001 stanoviško
- 4001 orientace
- vlíčovací bod



Obr. č. 7: Náčrt rozmístění vlíčovacích bodů v terénu



Obr. č. 8: Vlíčovací bod v terénu



## 4.1 Pozemní měření

### 4.1.1 Tloušťky

V této práci bylo provedeno dvojí měření tlouštěk kmenů. První měření spočívalo v klasické metodě celoplošného průměrkování a bylo využito pro výpočet dřevní hmoty porostu s výškami, měřenými pozemní metodou.

Zájmová oblast byla ohraničena bílou páskou a v tomto území byly změřeny tloušťky všech zkoumaných stromů porostu metodou průměrkování naplno. Průměry všech stromů byly měřeny analogovou průměrkou ve výčetní výšce 1,3 m, a to ve dvou na sebe kolmých směrech s přesností na celé centimetry. Měřené hodnoty byly průběžně zaznamenány do polního zápisníku. Ohraničená oblast byla více méně obdélníkového tvaru a postup měření tlouštěk jednotlivých stromů byl systematický – od jihu na sever a zpět.



Obr. č. 9: Ohraničení zájmové oblasti



Druhé měření spočívalo ve vyhledání vzorových stromů v porostu a změřením tloušťek pouze těchto vzorníků. Průměrem všech tloušťek byla zjištěna průměrná tloušťka zájmové oblasti a použita ve výpočtu dřevní hmoty porostu s výškami, určenými analýzou dat z RPAS.

Pozice jednotlivých stromů byly zakreslovány do náčrtu. Pro lepší orientaci a přehled byly stromy označovány křídou, aby nedošlo ke dvojímu měření téhož stromu.



Obr. č. 10: Označení stromu

## 4.1.2 Výšky

Klasickými metodami byla zjištěna výška středních stromů – vzorníků. Totální stanicí bylo měřeno na několik vzorových stromů porostu, a to jak na vrchol, tak i na patu každého z nich. Vrchol stromu byl zaměřen cílením na poslední rozvětvení vrcholku stromu. Měřené délky a úhly byly registrované do paměti přístroje s přesností na milimetry a miligony. Měření bylo orientováno na dva dočasně stabilizované body na louce, zhruba 50 m od lesa. Souřadnice Y, X, Z těchto orientací byly zaměřené GNSS stanicí Topcon, která se skládá z přijímače Topcon HiPer Plus a z kontroleru Topcon FC-100. Pro připojení do sítě CZEPOS byla využita stanice v Karlových Varech.



## 4.2 Měření pomocí RPAS

Sběr leteckých dat byl proveden ve třech fázích, a to třemi různými typy RPAS. Jednalo se o okřídlené eBee a dvě kvadrokoptéry Phantom 3 SE, 4 Pro a Mavic Air. Předpokladem pro všechny vzlety bylo důkladné naplánování trasy letu a kontrola stavu celého stroje včetně příslušenství a stavu baterie. Plánování letu se pro jednotlivé typy RPAS liší. Některé typy pracují poloautomatizovaně a některé je třeba ovládat manuálně. Od typu stroje se samozřejmě odvíjí i jeho nároky a cena.

Důležitým faktorem před samotným vzletem je počasí. Především povětrnostní podmínky hrají velkou roli a dle typu stroje lze létat za různé rychlosti nárazového větru. Silný vítr však může vést nejen k havárii, ale také ke znehodnocení výsledků, a to platí při měření stojících stromů především. Samozřejmě, pokud prší, je mlhavo nebo se teplota nachází pod nulou, není takovýto stav pro měření pomocí RPAS vhodný a snímky nebudou kvalitní.

Vzlet všech bezpilotních prostředků byl proveden na louce v blízkosti zájmového porostu. Pro okřídlené eBee bylo potřeba větší prostranství než pro kvadrokoptéry, které vzlétají kolmo k zemskému povrchu a lze s nimi tedy vzlétnout v bezprostřední blízkosti lesa. Snímkování probíhalo za letu s co největším překrytem fotografií.

### 4.2.1 Phantom 3 SE

Kvadrokoptéra Phantom od společnosti DJI se vyskytuje v několika alternativách. V případě tohoto výzkumu byl použit Phantom 3 SE, který disponuje 4K kamerou a 12Mpx rozlišením snímače fotografií. Tento stroj se zabudovanou GNSS vydrží ve vzduchu až 25minut. Jeho vzletová hmotnost je 1,2 kg a maximální rychlost 57 km/h. Ve spodní části je umístěn tříosý gimbal (nosič) a v něm stabilizována kamera RGB (snímá ve viditelném spektru). Na ramenech má umístěné diody, které za letu blikají, a lze podle nich poznat směr letu. Dostupný je za 15-20 tisíc Kč (2017-2018).

Maximální vzletová hmotnost	1236 g
Maximální doba letu	25 min
Baterie RPAS	4480 mAh, Lithium-Polymer 4S
Baterie ovladače	2600 mAh, Lithium-Polymer 2S
Rozlišení snímků	12 Mpx (4000x3000)
Rozlišení videa	4K (3840x2160)

Tabulka č. 2: Technické parametry Phantom 3 SE [25]



Součástí kvadrokoptéry je rádiový ovladač. Nastavení a sledování živého obrazu při letu včetně pořizování záznamu probíhá přes aplikaci DJI GO nainstalovanou v „chytrém“ zařízení (mobil nebo tablet). Nutností je připojení chytrého zařízení na wifi kvadrokoptéry. V aplikaci DJI GO nalezneme řadu funkcí. Jednou z nich je např. funkce „Waypoints“ neboli „body na trase“. Díky této funkci lze poloautomatizovaně naplánovat průběh trasy letu. Nejprve se trasa proletí manuálně, přičemž jsou zaznamenány „Waypoints“ na trase. V další fázi RPAS proletí námi zadanou trasu automaticky a poté je možné věnovat se pouze tvorbě fotografií.

Jelikož proces snímkování není automatizovaný, nelze dopředu nastavit překryt snímků. Velikost překrytu určuje pilot, což vyžaduje určitou míru zkušeností a pro co největší překryt snímků (alespoň 70%) je potřeba častý interval snímkování. V případě této práce bylo nad zájmovou oblastí 30x35m pořizováno zhruba 130 snímků s překrytem 60-80 % v podélném i příčném směru. Výška letu Phantomu 3 SE byla kolem 55 m nad terénem. Měření Phantomem 3 SE proběhlo za silného a nárazového větru, což se odrazilo na kvalitě výsledného DMP.



Obr. č. 11: Phantom 3 SE s ovladačem na vlícovacím bodě





## 4.2.2 Phantom 4 Pro

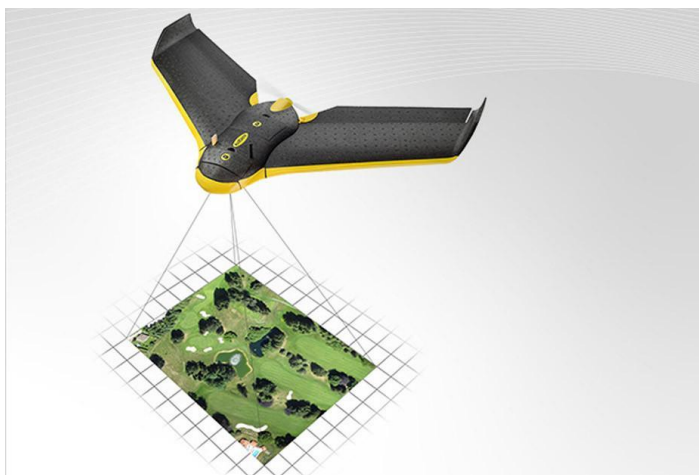
Phantom 4 Pro je kvadrokoptéra, která je svými technickými parametry téměř totožná s Phantomem 3 SE. Má o něco větší výdrž baterie, ale téměř stejně kvalitní kameru. Jeho hmotnost je o trochu větší. Snímkování a sledování letu probíhá stejným způsobem jako u Phantoma 3 SE, také přes aplikaci v „chytřém“ zařízení (DJI GO 4). Tímto typem dronu bylo dané území manuálně nasnímковано třikrát, a to ve výšce 30 m, 55 m a 90 m nad povrchem. Překryt snímků byl vždy 60-80 %. Následně byly všechny nálety zpracovány a porovnány. Pořizovací cena RPAS Phantom řady 4 je kolem 40 tisíc korun.

Maximální vzletová hmotnost	1388 g
Maximální doba letu	30 min
Baterie RPAS	5870 mAh, Lithium-Polymer 4S
Baterie ovladače	6000 mAh, Lithium-Polymer 2S
Rozlišení snímků	12 Mpx (4000x3000)
Rozlišení videa	4K Ultra HD (3840x2160)

Tabulka č. 3: Technické parametry Phantom 4 [25]

## 4.2.3 eBee

Další měření bylo provedeno ve výšce 170 m nad terénem, a to okřídleným leteckým prostředkem eBee. RPAS eBee je rozložitelný a skládá se z těla, vrtule a dvou připínacích křídel. Letadlo je z polystyrenu, a v jeho těle je obsažena anténa, kameru a elektronika (INS, radiomodem, čidla a další). Jeho cena se pohybuje v řádu statisíců [24].



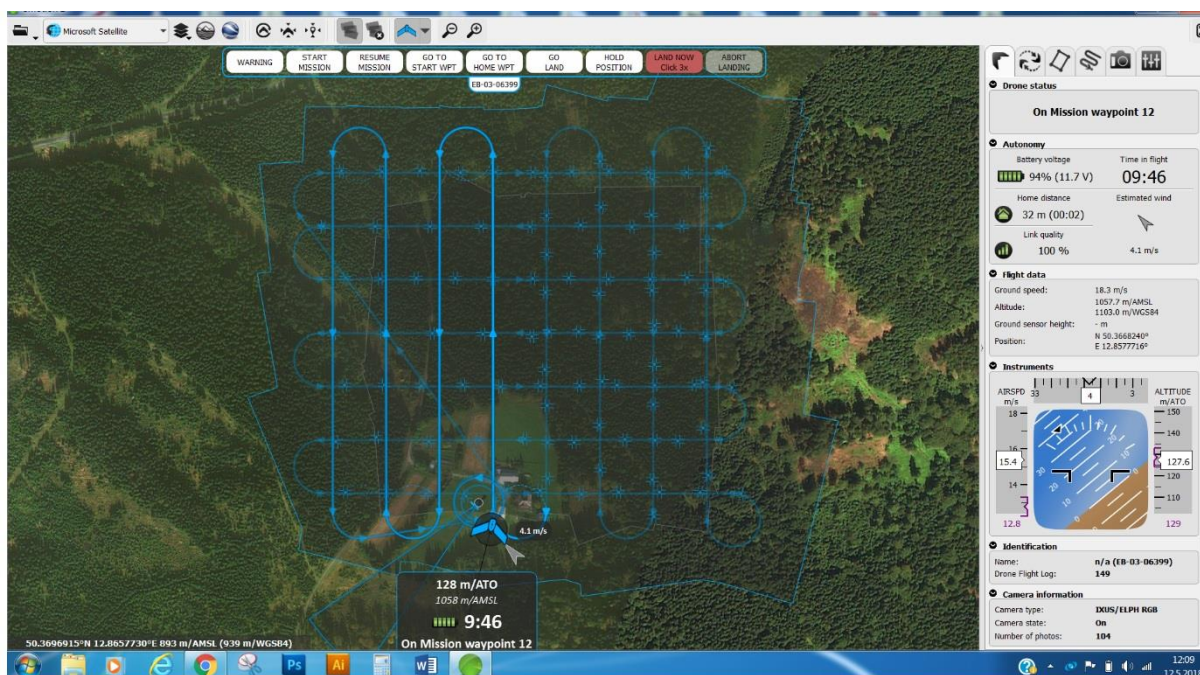
Obr. č. 12: RPAS s pevným křídlem – eBee



Maximální vzletová hmotnost	950 g
Rozpětí křídel	0,96 m
Maximální doba letu	45 min
Rychlost	36 - 72 km/h
Baterie	1800 či 2150 mAh, Lithium-Polymer

Tabulka č. 4: Technické parametry eBee [24]

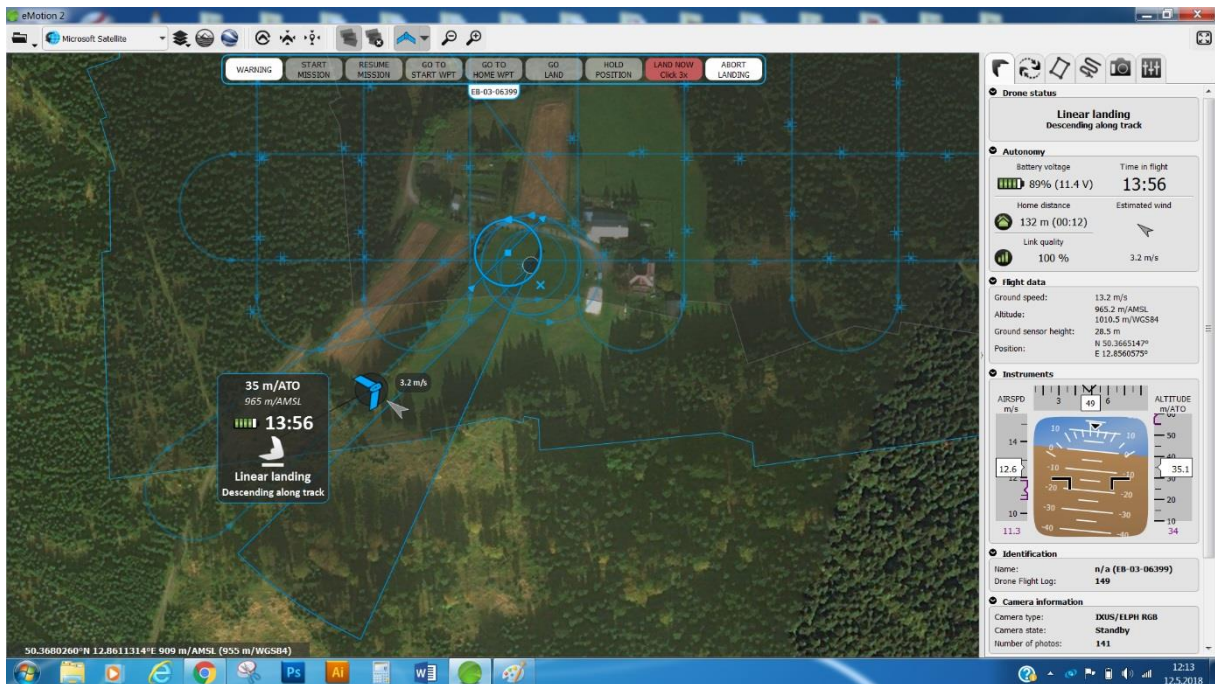
Plánování trasy letu probíhá v software eMotion. Je zde možno nastavit vlastnosti letu včetně oblasti a překrytu snímků na podkladě Google map. Díky programu eMotion lze sledovat stav přístroje za letu, ale také je zde možnost přepnout na manuální ovládání RPAS i během letu. Po aktivaci díky zelenému, respektive modrému zabarvení diody poznáme, jestli eBee komunikuje s počítačem či nikoliv. Zásadní je překryt snímků a rozlišení snímků pro použití fotoaparát. Od celého nastavení se poté odvíjí doba letu zařízení [24].



Obr. č. 13: Plánování letu v programu eMotion



Přistávání eBee probíhá pozvolna, krouživými manévry nad terénem s možností lineárního přistání. V případě této práce let trval zhruba 15 minut a byl proveden ve výšce 170 m nad terénem s překrytem snímků 75 % v podélném směru a 65 % v příčném směru.



Obr. č. 14: Přistání letounu v programu eMotion

EBeec využívá jen přesně definované fotografické kamery typu compact. Ke snímání lokality Vršek u Jáchymova byla použita digitální kamera Canon 110 NIR a dále kamera Canon IXUS (RGB).

Rozlišení	16.1 MPix
Hmotnost	135 g
Použité rozlišení snímku 3 cm/px ve výšce letu	kolem 100 m
Výstupní formát snímku	JPEG
Baterie	Battery Pack NB-1 1L

Tabulka č. 5: Technické parametry kamery Canon IXUS 110 NIR [26]



## 4.3 Zpracování pozemního měření

### 4.3.1 Tloušťky

V zájmové lokalitě o rozměrech 35x30 m bylo metodou celoplošného průměrkování vyprůměrkováno 76 stromů, celkem bylo tedy zjištěno 152 tlouštěk. Z těchto tlouštěk byla aritmetickým průměrem určena střední tloušťka celé oblasti. Měřené tloušťky byly zpracované v programu Excel. Celkový průměr všech měřených tlouštěk byl **29,4 cm**.

Druhým měřením byla metoda vyhledání vzorníků. Bylo zaměřeno 16 tlouštěk (d) vzorových stromů. Vzorníky byly vybrané vždy z jiné části porostu a byly to stromy, které vizuálním odhadem charakterizovaly celý porost průměrnou tloušťkou. Z těchto tlouštěk byla určena střední tloušťka porostu. Bylo zaměřeno pouze 8 vzorových stromů (oproti 76 stromům z průměrkování naplno). Tímto způsobem bylo testováno, zdali jsou výsledky této metody postačující pro celkový výpočet dřevní hmoty porostu. Vypočtená střední tloušťka byla porovnána se střední tloušťkou z celoplošného průměrkování a následně použita pro výpočet dřevní hmoty společně se střední výškou určenou z DMP.

číslo vzorníku	$d_1$ [cm]	$d_2$ [cm]	$d_{avg}$ [cm]
1	30	29	29,5
2	34	32	33
3	31	32	31,5
4	37	35	36
5	28	25	26,5
6	30	30	30
7	29	30	29,5
8	29	26	27,5
průměrná tloušťka porostu [cm]		<b>30,4</b>	

Tabulka č. 6: tloušťky vzorníků v zájmovém území



### 4.3.2 Výšky

Naměřené souřadnice z GNSS stanice byly v souřadnicovém systému WGS84. Byly proto v programu Leica Geo Office transformované do S-JTSK. V programu Groma byly pomocí funkce „Vlné stanovisko“ vypočtené souřadnice stanoviska (5001) totální stanice.

Obr. č. 15: Výpočet stanoviska v programu Groma

Z již známých souřadnic vlného stanoviska bylo možno vypočítat souřadnice Y, X, Z vrcholu a paty všech zaměřených stromů. V programu Groma funkcí „Polární metoda dávkou“. Odečtením výšky na vrcholu stromu od výšky paty stromu byla zjištěna celková výška stromu. Průměrem všech výšek byla určena střední výška porostu. Všechny hodnoty byly zpracované v programu Excel.

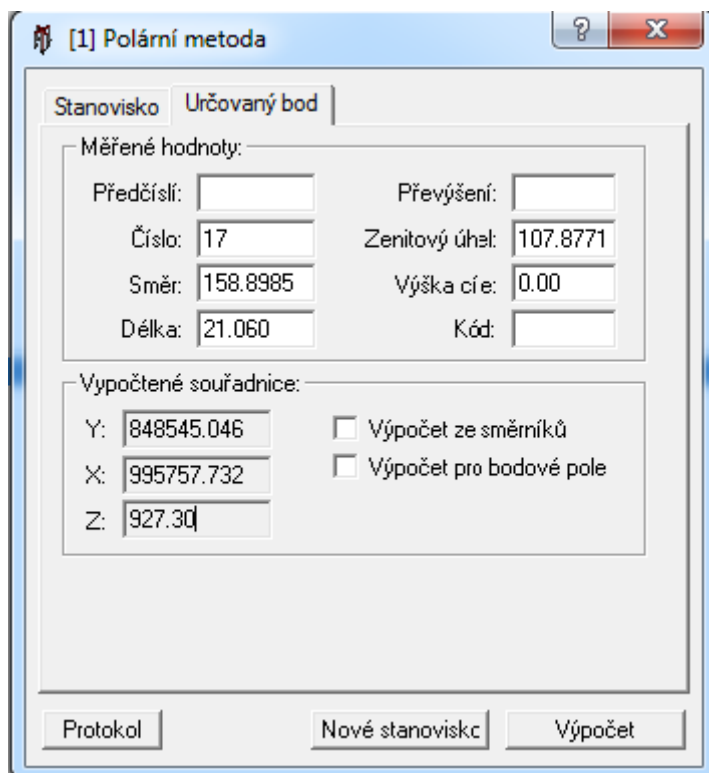
ČB	Y[m]	X[m]	Z[m]
5001 - stanovisko	<b>848551,961</b>	<b>995777,624</b>	<b>928,31</b>
4001	<b>848573,3940</b>	<b>995794,9020</b>	<b>929,59</b>
4002	<b>848545,9449</b>	<b>995797,8910</b>	<b>927,97</b>

Tabulka č. 7: souřadnice stanoviska a orientací



### 4.3.3 Vlčovací body

Z již známých souřadnic volného stanoviška bylo také možno vypočítat souřadnice všech zaměřených vlčovacích bodů. V programu Groma funkcí „Polární metoda dávkou“. Souřadnice signálů byly využity při zpracování v příslušném softwaru pro zařazení digitálního modelu do souřadnicového systému.



Obr. č. 16: Výpočet souřadnic vlčovacích bodů v programu Groma

číslo bodu	Y[m]	X[m]	Z[m]
1	848534.853	995773.408	926.46
2	848539.923	995767.225	926.84
3	848545.461	995772.917	927.64
4	848552.565	995768.427	928.08
5	848556.567	995761.522	928.42
6	848535.653	995743.880	926.12

Tabulka č. 8: Souřadnice vlčovacích bodů v S-JTSK



## 4.4 Zpracování dat z RPAS

Hlavním cílem při zpracování dat z RPAS bylo zjistit, jestli je možno získat výšky stromů z digitálního modelu povrchu (DMP) vytvořeného v programu Agisoft PhotoScan a s jakou přesností. Dalším cílem bylo odhadnout celkovou dřevní hmotu zájmového území díky zjištěným výškám a zaměřeným tloušťkám stromů v terénu metodou vzorových stromů. Pro určení celkové kubatury byla použita metoda Jednotných objemových křivek (JOK).

DMP byl generován v programu Agisoft PhotoScan díky datům pořízeným z RPAS. Byly vypočteny digitální modely povrchu ze snímků pro všechny nálety včetně snímků ze všech náletů dohromady. Bylo tedy vytvořeno 5 DMP – z náletů ve výškách 30 m, 55 m, 90 m, 170 m (eBee) a ze všech snímků dohromady. Následně byly všechny modely povrchu a terénu analyzovány v programu ArgGIS a zjištěny výšky a počet všech stromů v porostu. Analýzy v ArcGIS byly z části provedeny podle [27].

Digitální modely byly vygenerované také v programu Pix4D. Kvalita výsledků z Pix4D byla porovnána s výsledky programu Agisoft PhotoScan. Pro následnou analýzu v programu ArcGIS byla použita data z Agisoftu.

### 4.4.1 Agisoft PhotoScan

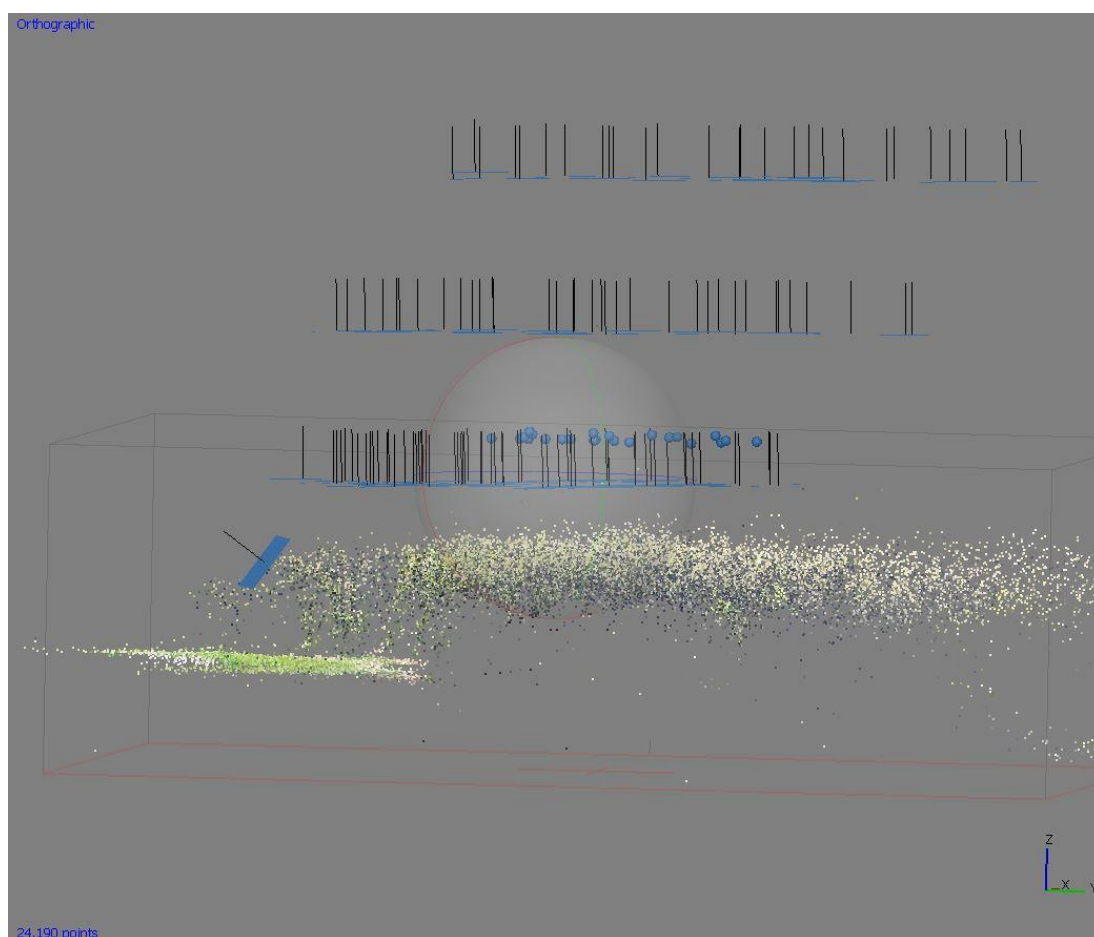
Data z kvadrokoptér byla zpracována v programu Agisoft Photoscan. Tento software umožňuje provádět fotogrammetrické zpracování digitálních snímků a generovat 3D prostorová data [28]. Většina procesů v tomto programu probíhá automatizovaně.

Pro zpracování dat byl potřeba školní hardware a licencovaný software, a to především z toho důvodu, že objem dat z RPAS byl poměrně velký. Tvorba DMP proběhla podle manuálů [28] a [29]. Všechny kroky byly provedeny s maximálním rozlišením snímků a u jednotlivých modelů bylo použito rozlišení 5 cm na pixel pro eBee a 3 cm na pixel pro Phantom 4 Pro.

Před samotným zpracováním bylo potřeba vytvořit textový dokument se souřadnicemi vlíčovacích bodů v požadovaném formátu. Byly vytvořeny dva textové dokumenty – jeden se souřadnicemi ve WGS84 a druhý se souřadnicemi v systému S-JTSK. Tyto souřadnice vlíčovacích bodů sloužily pro připojení digitálního modelu do souřadnicového systému.



Prvním krokem je orientování snímků (Align Photos), při kterém software automatizovaně určí prvky vnitřní a vnější orientace, se kterými dále počítá. Ne vždy proběhnou všechny procesy hladce a bez problémů, což dokazuje obrázek číslo 17. Na něm jsou zobrazeny snímky ze tří letů v různých výškách, kdy v nejnižším náletu software nedokázal orientovat více než polovinu snímků. Jednalo se o snímky v letové výšce 30 m nad terénem. Detail snímků v této výšce je natolik enormní, že si s ním software neporadil. DMP a ortofoto v této letové výšce byly vytvořeny alespoň zčásti pro následnou analýzu výšek a jejich porovnání s výškami měřenými pozemní metodou. Z nejnižšího náletu se podařilo orientovat a vytvořit model jen z oblasti kraje lesa.



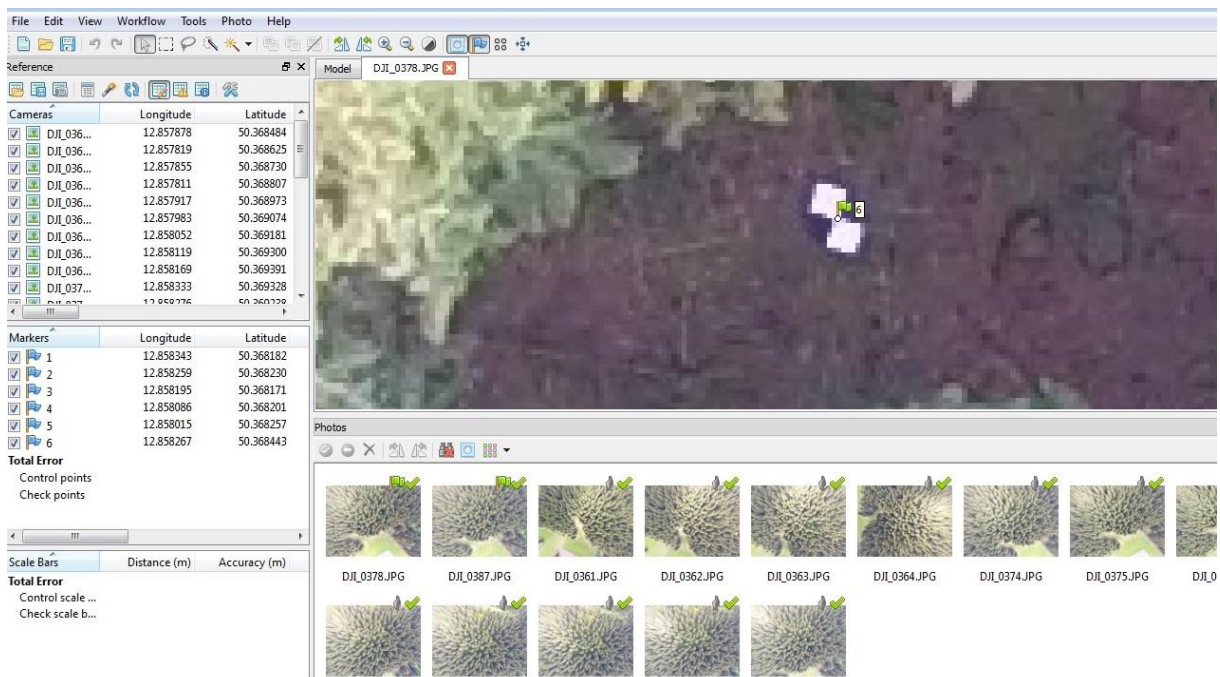
Obr. č. 17: Orientování snímků





Zpracována byla data měřená pomocí RPAS Phantom 4 Pro ve výškách letu 30 m, 55 m a 90 m, data z RPAS Phantom 3 SE ve výšce letu 45 m a data z eBee ve výšce letu 170 m. Dále byla zpracována data ze všech letů Phantom 4 Pro a eBee dohromady (ALL). Měření z Phantom 3 SE nebylo dále uvažováno, kvůli nekvalitním výsledkům, způsobených větrným počasím (koruny stromů se v době náletu značně pohybovaly a měnila se tak textura povrchu na snímcích, což bylo pro software nezpracovatelné).

Další kroky byly provedeny dle manuálů. Jedním z nich bylo označení vlíčovacích bodů na snímcích (Place marker). Tento proces byl poloautomatizovaný, kdy byly na všech snímcích ručně označené vlíčovací body a tím jim byly dány souřadnice z předem naimportovaného textového souboru. Přesnost označení vlíčovacího bodu na snímcích byla ovlivněna kvalitou snímků.

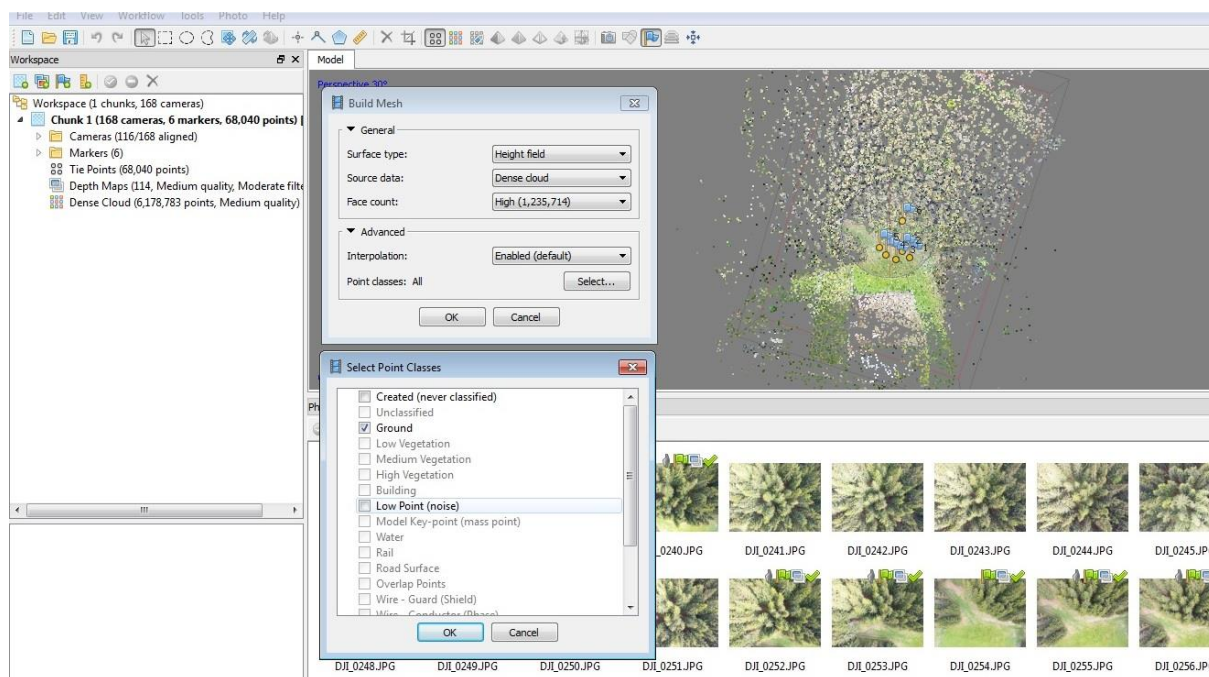


Obr. č. 18: Označení vlíčovacího bodu na snímku

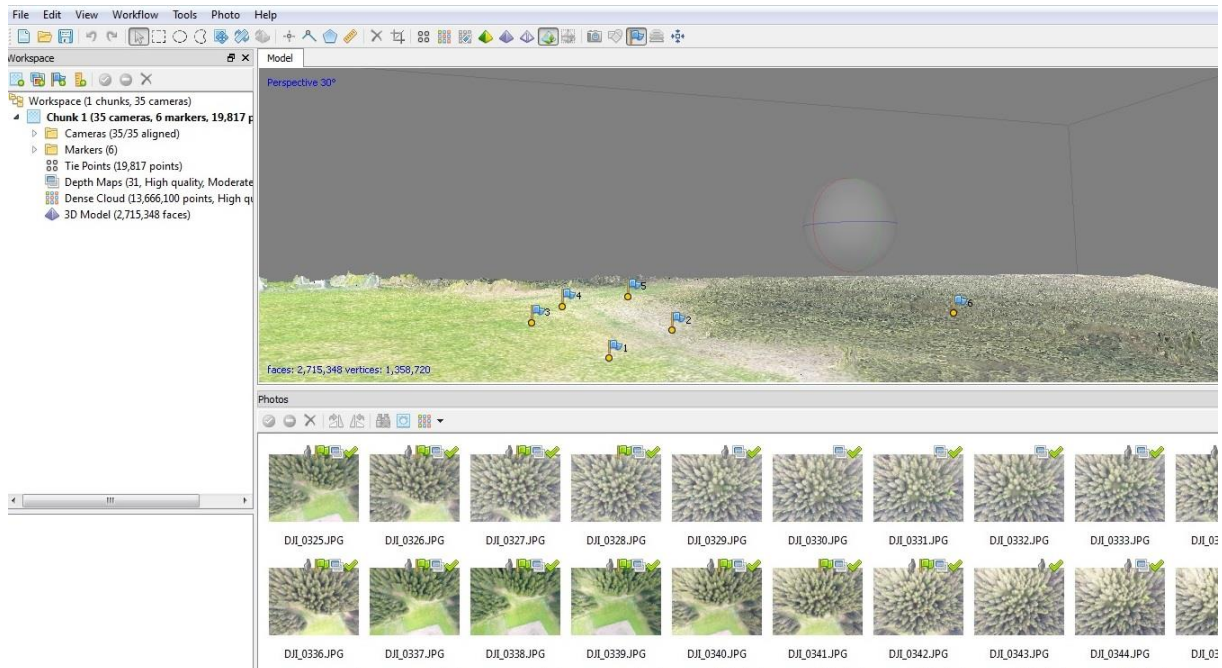


Jelikož Agisoft generuje pouze DMP byly vytvořeny dva projekty. Pro tvorbu DMR bylo třeba provést klasifikaci pozemních bodů (Classify Ground Points). Tento krok byl proveden po vytvoření hustého mračna bodů (Build Dense Cloud). Klasifikace pozemních bodů byla provedena automatizovaně. Program detekoval pouze viditelné body na terénu buňku po buňce dle předem zadaných parametrů a následně je uvažoval při generaci polygonové sítě (Build Mesh).

Při klasifikaci bylo nutné vhodně nastavit správné vstupní parametry – maximální úhel a maximální vzdálenost vyhledávání následujícího pozemního bodu a velikost buňky pro výběr nejmenší hodnoty. Tento krok bylo tedy nutné provést několikrát.



Obr. č. 19: Generování polygonové sítě s klasifikovanými pozemními body



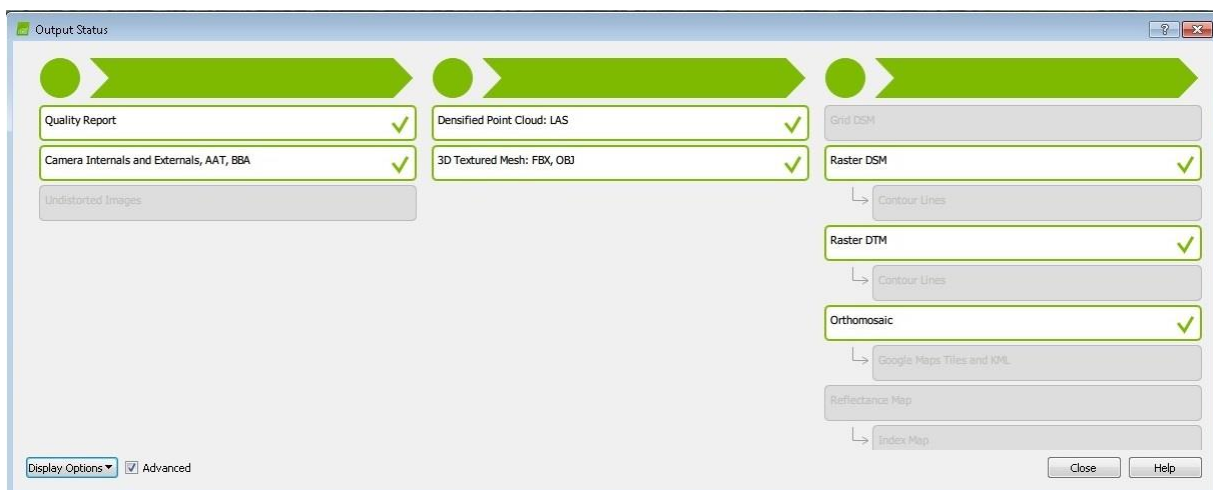
Obr. č. 20: Výsledná polygonová síť pro tvorbu DMT

Dále probíhala tvorba obou modelů stejným způsobem dle manuálu. Tvorba DMP tento krok nevyžadovala a při generování polygonové sítě (Build Mesh) program uvažoval všechny body z hustého mračna. Na závěr bylo kromě DMP a DMT vygenerované ortofoto (Build Orthomosaic) a vyexportované ve formátu TIFF (Export Orthomosaic). Všechny výstupy byly v souřadnicovém systému S-JTSK.



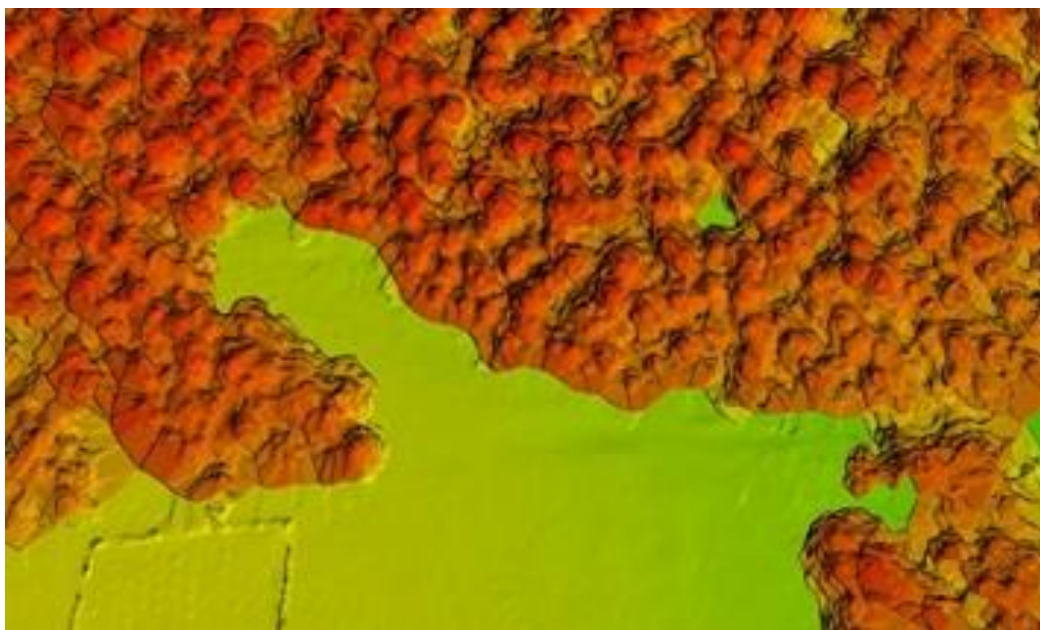
#### 4.4.2 Pix4D

Dalším softwarem použitým v této práci byl Pix4D. Stejně jako Agisoft umožňuje provádět fotogrammetrické zpracování digitálních snímků a generovat 3D prostorová data. Od zadání snímků do tohoto programu a zvolení souřadnicového systému probíhají všechny procesy zcela automatizovaně.



Obr. č. 21: Proces tvorby DMP, DMT a ortofota probíhá zcela automatizovaně

Výsledné modely jsou kvalitativně velmi obstojné a srovnatelné s výstupy z programu Agisoft PhotoScan. Pro hlavní účel této práce bylo využito modelů z programu Agisoft. V této práci bylo využito pouze ortofoto z Pix4D pro analýzu růstového vývoje porostu.



Obr. č. 22: Výsledný DMP z programu Pix4D



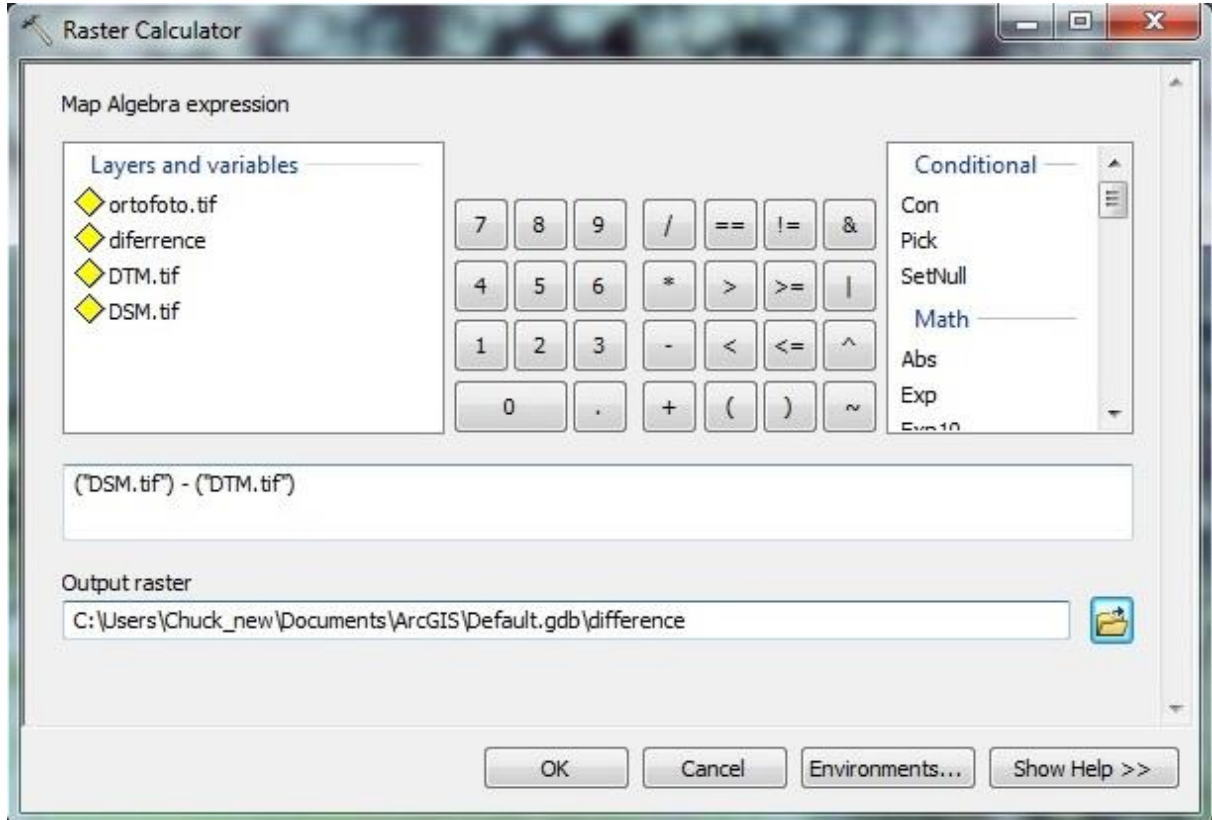
### 4.4.3 ArcGIS

ArcGIS Desktop je geografický informační systém pro práci s prostorovými daty od firmy Esri. V této práci byl použit software ArcGIS 10.1 respektive aplikace ArcMap 10.1. Všechny analýzy a výpočty byly prováděny v souřadnicovém systému S-JTSK.

Dle [27] je základem pro zjištění výšek stromů z dat letecké fotogrammetrie tzv. *canopy height model* (CHM) neboli model výšky porostu. Dále uvádí, že CHM je rozdíl digitálního modelu terénu od digitálního modelu povrchu (DMP - DMT).

Zjišťování výšek stromů v zájmové oblasti je založeno na analýze CHM v programu ArcGIS určením lokálních maxim jednotlivých stromů. Dalším cílem je zjistit počet a polohu jednotlivých stromů. Všechny procesy a výpočty byly prováděny nad ortofotem, které bylo kontrolou výsledků jednotlivých výstupů. Pro zpřístupnění použitých nástrojů a funkcí bylo potřeba v Customize → Extensions zaškrtnout možnost „Spatial Analyst“.

V první fázi byl vypočten CHM jako rozdíl DMT od DMP v nástroji Raster Calculator.



Obr. č. 23: Tvorba CHM v Raster Calculator



Dalším krokem bylo vytvoření nové polygonové vrstvy. Byl nastaven souřadnicový systém dané vrstvy S-JTSK. Na podkladě ortofota byl vytvořen polygon zkoumaného území. Oblast byla vybrána s maximální možnou přesností tak, aby obsahovala všechny stromy, totožné s pozemním měřením. Zvolená oblast měla relativně obdélníkový tvar, proto nebylo zcela těžké ji odhadnout.

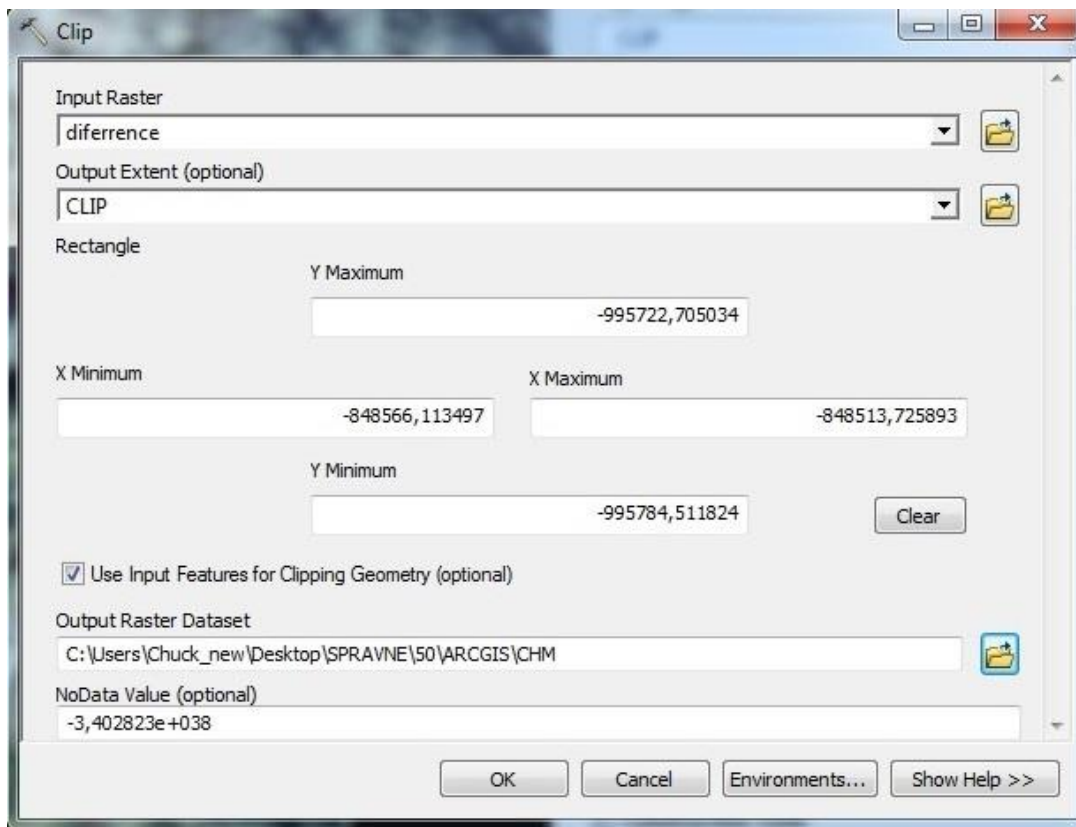


Obr. č. 24: Tvorba polygonu nad ortofotem

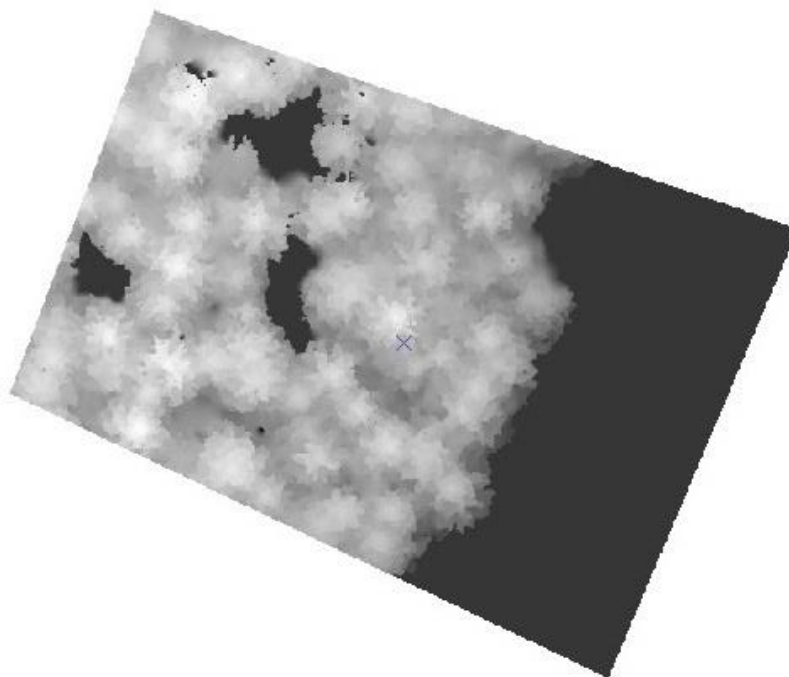
Pro ukázkou výškové analýzy byly použity digitální modely a ortofoto vygenerované ze snímků náletu v 55 m nad terénem.



Podle vytvořeného polygonu dané oblasti – v tomto případě s názvem „CLIP“ bylo potřeba ořezat rastr CHM. To proběhlo díky nástroji Clip. Výstupem byl CHM zájmové oblasti.



Obr. č. 25: Ořezání rastru CHM v nástroji Clip

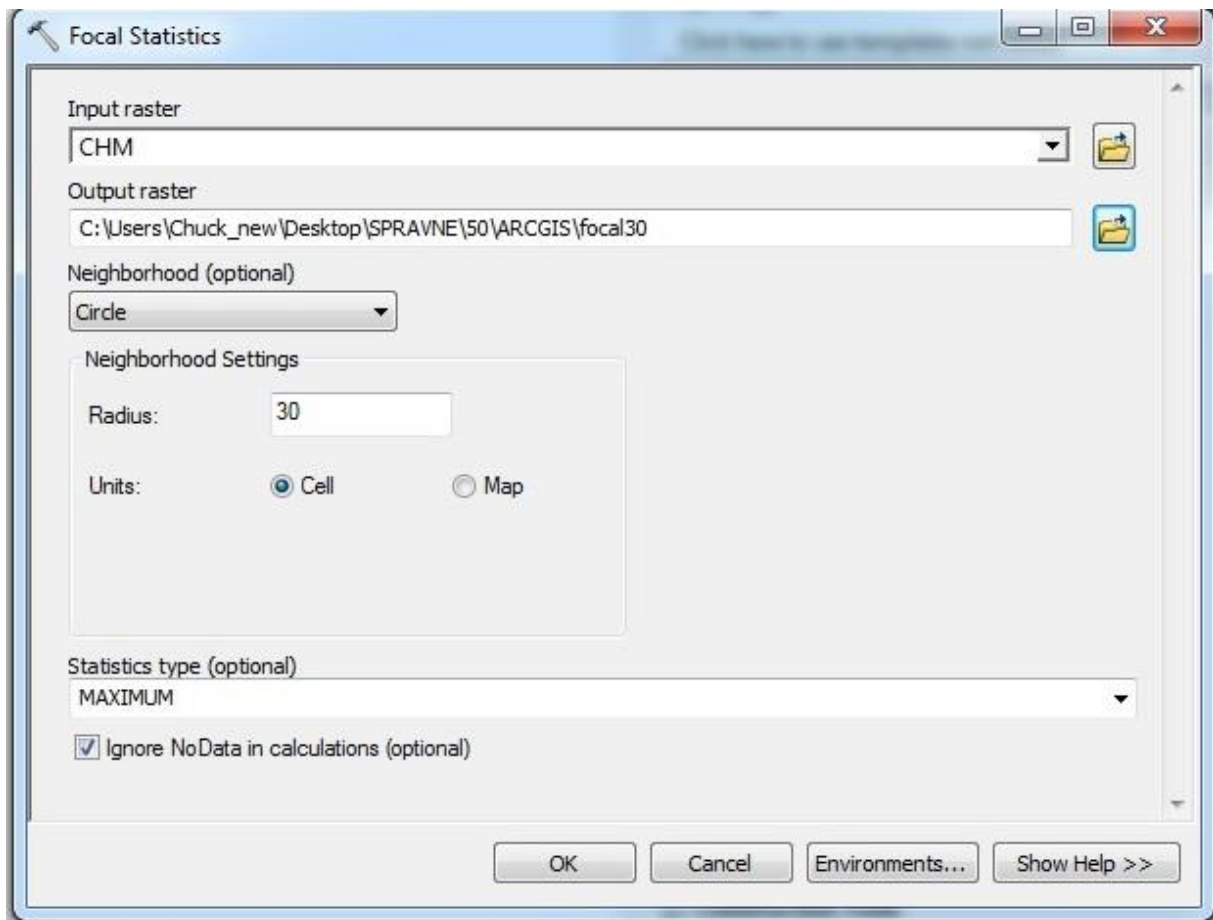


Obr. č. 26: CHM zájmového území



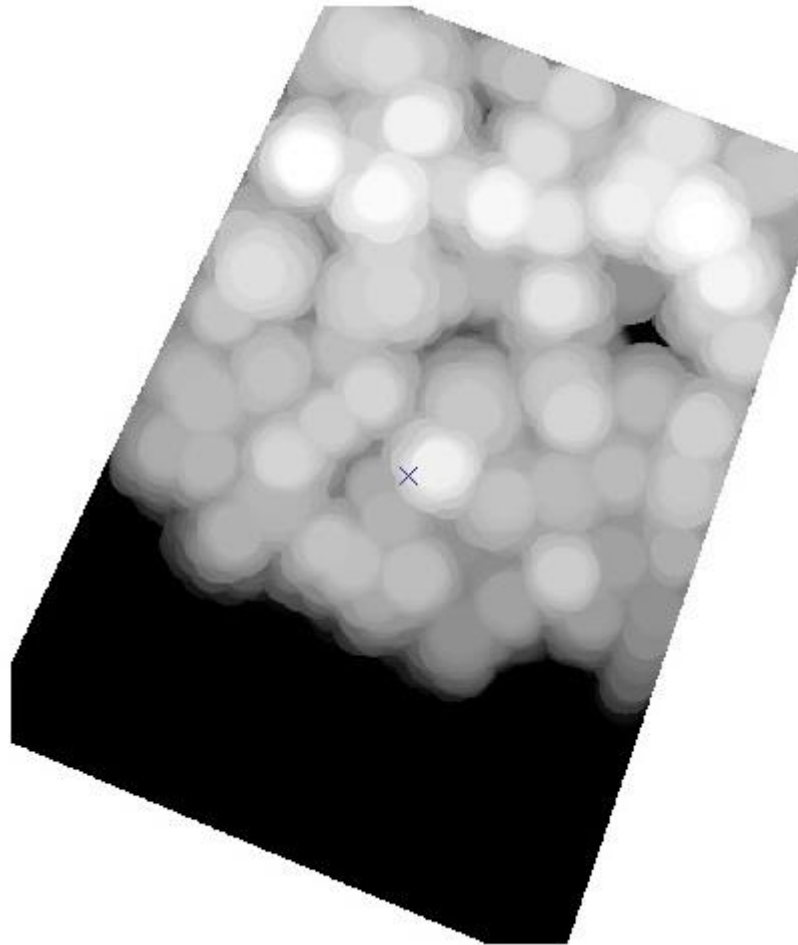
Základem pro zjištění lokálních maxim jednotlivých stromů bylo použití nástroje Focal Statistics. Vstupním rastrem byl CHM. Pomocí tohoto nástroje byly vytvořeny kružnice kolem lokálních maxim celého rastru. Díky tomuto nástroji dojde k aproximaci dat, a proto se nestane, že by se v rámci jedné kružnice nacházelo více lokálních maxim než jedno. Poloměr kružnic lze v tomto nástroji určit.

Jedním z problémů je, že pokud vytvoříme kružnice kolem lokálního maxima jednoho stromu, blízko něhož se bude nacházet menší strom, pak se bude ve výstupu uvažovat lokální maximum pouze vyššího stromu. Z toho důvodu bylo potřeba poloměr (Radius) různě upravovat tak, abychom našli optimální řešení [30].



Obr. č. 27: Použití nástroje Focal Statistics

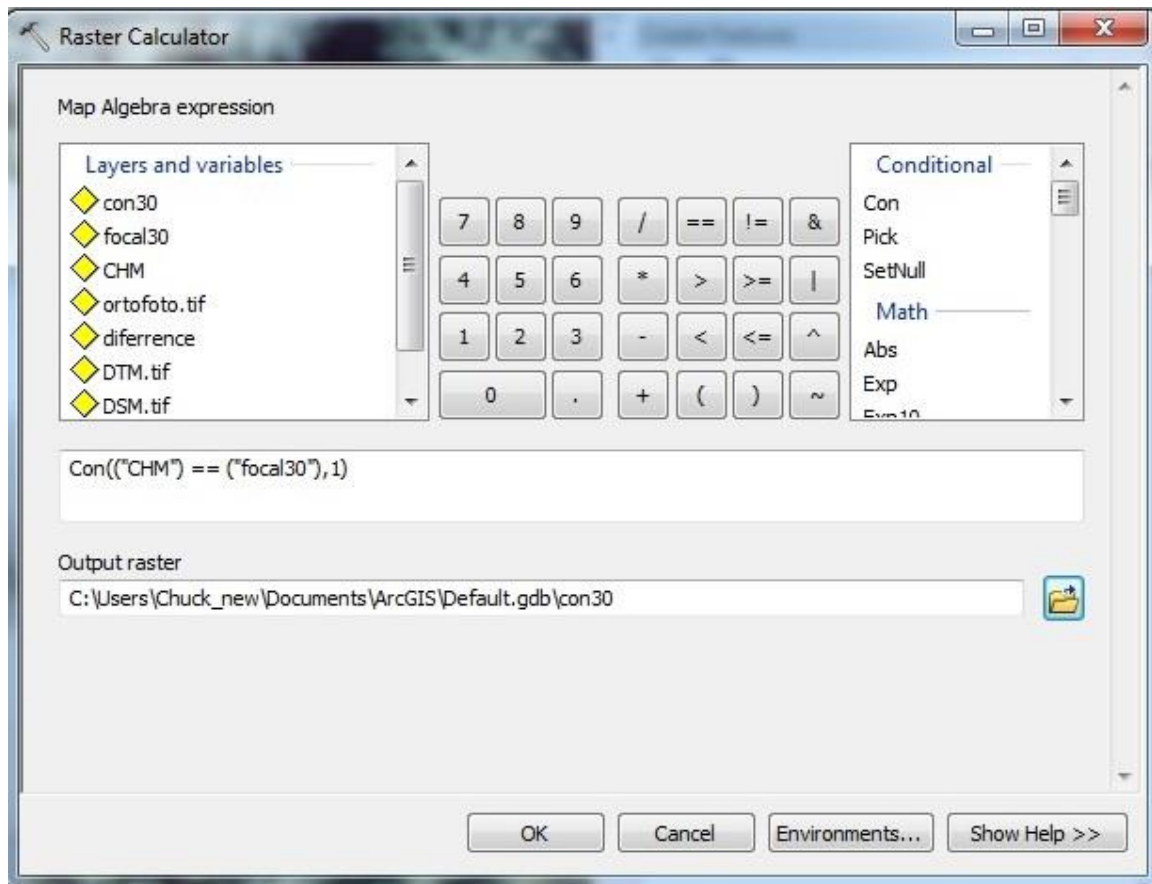




Obr. č. 28: Vytvoření kružnic kolem lokálních maxim rastru CHM

V dalším kroku byla lokální maxima vyhodnocena použitím funkce Conditional z nástroje Raster Calculator. Funkce každou buňku vyhodnotila buďto číslem 0 – žádný výstup nebo číslem 1 – lokální maximum. Výstupem byl rastr, jehož hodnoty byly přímo hodnotami lokálních maxim jednotlivých stromů. Tyto hodnoty bylo možno vizualizovat pomocí nástroje Raster to Point.

Za použití nástroje Raster to Point bylo možné vizualizovat umístění lokálních maxim v celé zájmové oblasti. Jak je vidět na obrázku číslo 30, lokální maxima jsou povětšinou umístěna na vrcholech stromů, ale některé body se nacházejí také na louce, mimo lesní oblast.



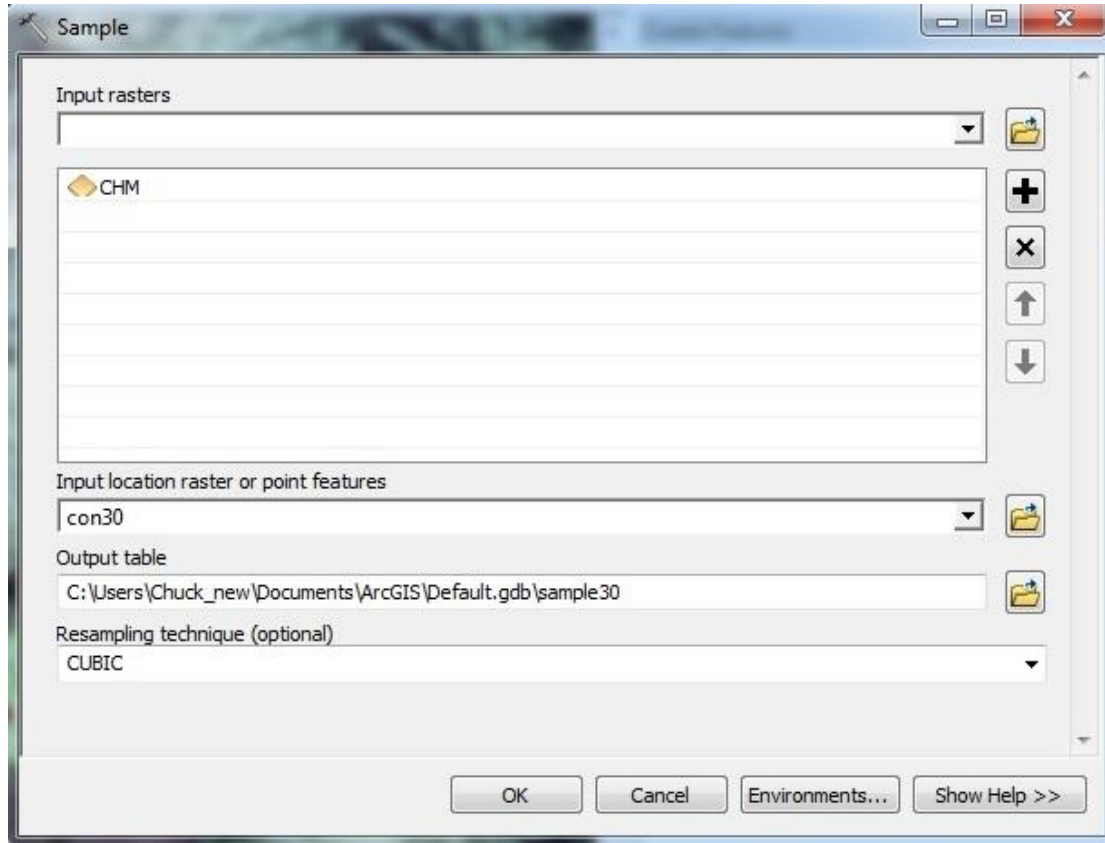
Obr. č. 29: Použití funkce Conditional v Raster Calculator



Obr. č. 30: Výstupem po použití nástroje Raster to Point byla bodová vrstva



Řešením je nástroj Sample. Vstupními hodnotami jsou dva rastry. Výstupem tohoto nástroje je atributová tabulka s konkrétními hodnotami a souřadnicemi všech bodů.



Obr. č. 31: Použití nástroje Sample

V atributové tabulce lze jednoduše pomocí funkce Select by Attributes vybrat podle atributu CHM všechny výšky všech konkrétních stromů v oblasti.

Rowid	CON30	X	Y	CHM
9	1	-848546,59486	-995732,914641	29,150879
19	1	-848520,44486	-995737,214641	28,909302
15	1	-848541,64486	-995735,064641	28,370544
16	1	-848533,99486	-995735,864641	28,053955
25	1	-848518,89486	-995740,714641	27,749146
4	1	-848539,44486	-995730,564641	27,66748
44	1	-848537,89486	-995752,914641	27,401001
17	1	-848525,39486	-995735,864641	27,245667
13	1	-848523,99486	-995734,314641	26,775391
18	1	-848530,39486	-995736,864641	26,288086
7	1	-848522,09486	-995731,514641	26,180786

Obr. č. 32: Atributová tabulka všech bodů



## 5 Výsledky

### 5.1 Zhodnocení dosažené přesnosti při tvorbě DMP

Software Agisoft PhotoScan počítá s prvky vnitřní i vnější orientace kamery. Během procesu tvorby DMP bylo prováděno svazkové vyrovnání prvků vnitřní orientace. Svazkové vyrovnání bylo prováděno po importu souřadnic vlíčovacích bodů (VB) a následném označení vlíčovacích bodů na snímcích. Svazkovým vyrovnáním byl model připojen do souřadnicového systému. Došlo k úpravě prvků vnější a vnitřní orientace.

Přesnost dosaženou na vlíčovacích bodech udávají souřadnicové rozdíly vypočteného vlíčovacího bodu s jeho GPS měřením. Pro každý z pěti vytvořených DMP byly souřadnicové rozdíly uloženy do textového souboru.

Zde jsou uvedeny souřadnicové rozdíly na VB pouze pro výšku letu 55 m a nepřesahují hodnotu 4 cm. V ostatních případech byly odchylky na VB numericky srovnatelné, ale nejvyšších hodnot dosahovaly rozdíly při zpracování dat z výšky letu 90 m Phantomem 4 Pro.

číslo VB	dX	dY	dZ
1	-0.016012	0.011320	0.001177
2	-0.011117	-0.009136	0.016219
3	-0.030435	-0.032495	-0.011719
4	0.027760	-0.000159	0.015720
5	0.032126	0.000912	-0.012712
6	-0.003249	0.030639	0.000528

Tabulka č. 9: Odchylky na vlíčovací body při tvorbě DMP ve výšce 55 m, DJI 4



## 5.2 Výsledek tvorby DMP, DMT a ortofota

První měření provedené pomocí kvadrokoptérou Phantom 3 SE bylo za velmi větrných podmínek, a to se odrazilo na kvalitě výsledného modelu. Jak lze vidět na obrázku číslo 33, tak na konci procesu tvorby DMP v Agisoftu nebylo v detailu vůbec možno rozeznat jednotlivé stromy. Stromy se slévají do sebe a z modelu nejsou jasně poznat pozice stromů, natož vrcholy jednotlivých stromů. Během silného větru, v nárazech kolem 15 m/s se Phantom 3 SE sice udržel ve vzduchu, a dokonce s ním bylo možné dále snímkovat, ale výsledný model není tak kvalitní, aby z něho bylo možné získat další informace týkající se porostních veličin. Navíc je při takovémto měření ve 45 m nad zemí velké riziko poškození RPAS. Měření ve 45 m pomocí Phantom 3 SE nebylo tedy dále uvažováno v získávání informací o porostu.



Obr. č. 33: Z výsledného modelu z Phantom 3 SE nebyly stromy rozeznatelné



**Porovnání částí ortofot z různých letových výšek**



Obr. č. 34: Ortofoto z výšky 30 m nad terénem



Obr. č. 35: Ortofoto z výšky 55 m nad terénem



Obr. č. 36: Ortofoto z výšky 90 m nad terénem

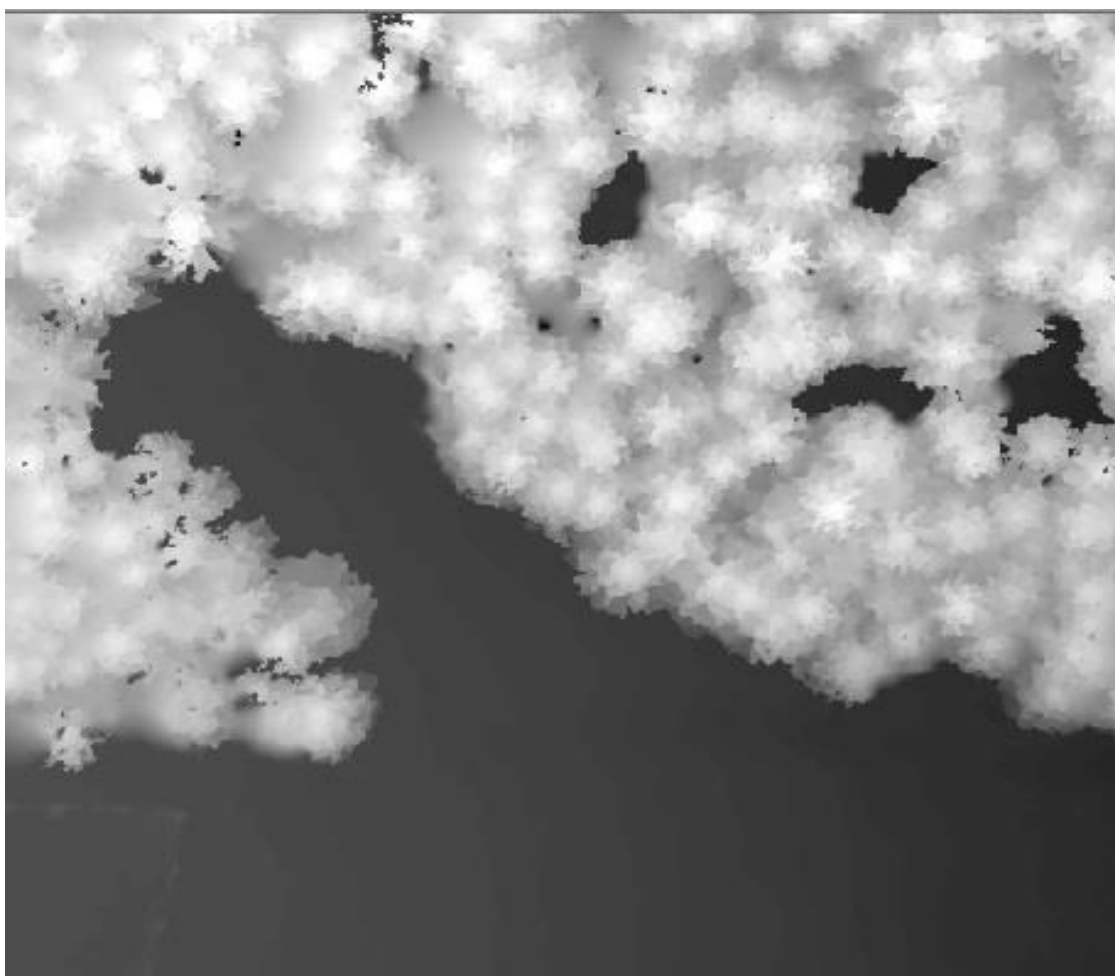


Obr. č. 37: Ortofoto z výšky 170 m nad terénem (eBee)



Z porovnání ortofot je vidět, že kvalita klesá s přibývajícím výškou letu RPAS. Na ortofotu 90 m nad terénem DJI Phantom 4 Pro kvalita ortofota klesla rozeznatelně, zejména na krajních stromech porostu, oproti výsledkům ze 30 m a 55 m.

Vzorovým ortofotem a DMP byly výstupy ze zpracování snímků z náletu ve výšce 55 m nad terénem pomocí RPAS Phantom 4 Pro. Při maximálním nárazovém větru kolem 5 m/s (za letu cca 2-3 m/s) již bylo možné provést sběr dostatečně kvalitních dat nad zájmovým porostem. Data z letové výšky 55 m vykazují ze všech náletů nejlepší kvalitu a největší potenciál pro jejich další zpracování v programu ArcGIS.



Obr. č. 38: DMP z dat měřených Phantomem 4 Pro ve výšce 55 m nad terénem





**Axonometrický pohled na lesní porost**



Obr. č. 39: Pohled na porost z výšky 55 m



Obr. č. 40: Pohled na porost z výšky 170 m

Z axonometrických pohledů na modely v programu Agisoft PhotoScan lze poznat výrazný rozdíl v kvalitě z nižší a vyšší letové výšky nad terénem. Z modelu v letové výšce 55 m lze jednotlivé stromy a oblast pozemního měření rozeznat bezesporu lépe než ve výšce 170 m. Na obrázcích č. 39 a 40 je viditelné také rozmístění vlíčovacích bodů v terénu.



### 5.3 Porovnání výsledků a zhodnocení přesnosti zjištěných údajů

Zhodnocení přesnosti výsledků bylo provedeno porovnáním zjištěných údajů pomocí pozemního měření s výstupy dat z RPAS. Pozemním měřením byla zjištěna střední výška porostu a dvě hodnoty střední tloušťky porostu, měřené nezávisle na sobě. Střední výška porostu byla určena ze tří zaměřených vzorových stromů.

Pro ověření správnosti výsledků byly porovnány výšky pro vybrané vzorové stromy spočtené z pozemního měření v programu Excel s výstupy jednotlivých letů z dat RPAS.



Obr. č. 41: Vybrané vzorníky pro srovnání výšek

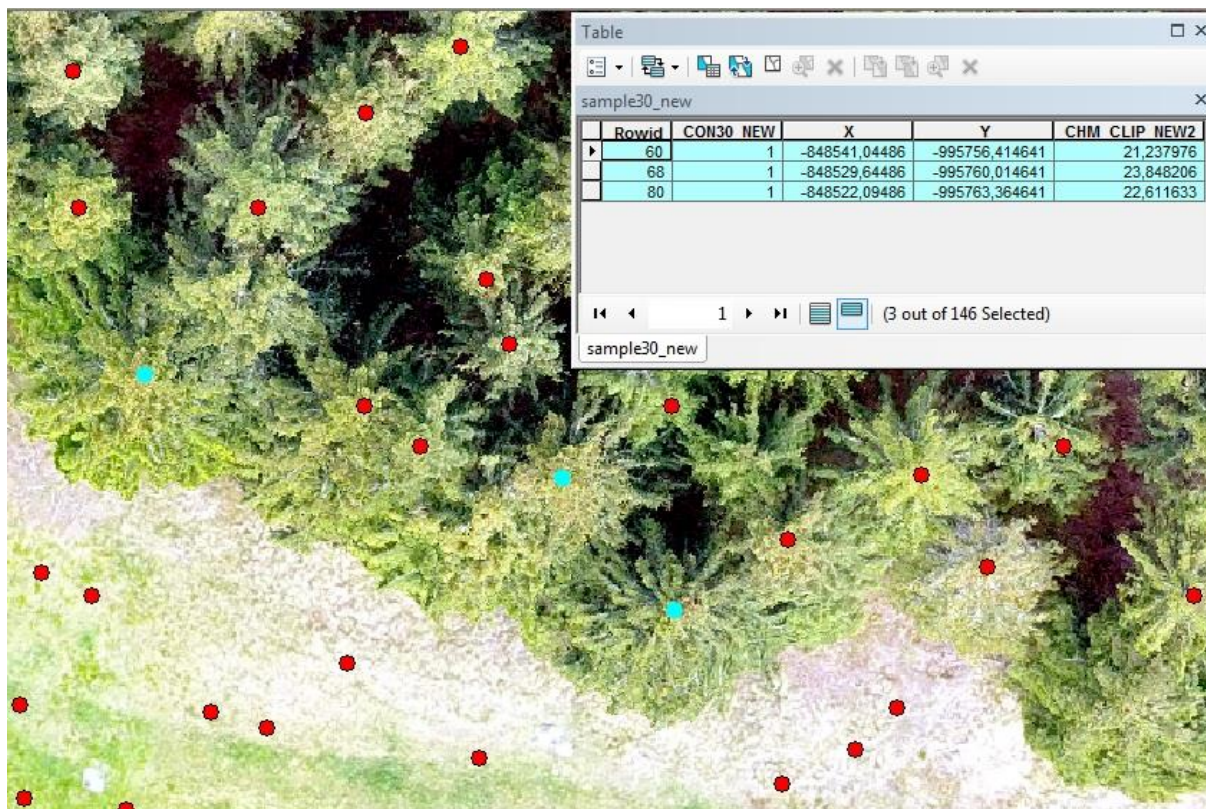
Výšky stromu 1, 2 a 3 na obrázku číslo 41 měřené pozemním měřením byly vypočteny v programu Excel jako rozdíl měřených výšek na vrchol a patu daných stromů.

číslo stromu	výška – pata[m]	výška – vrchol[m]	výška stromu[m]
1	927,9	949,4	21,5
2	927,3	950,6	23,3
3	927,2	950,2	23,1
střední výška zájmového území [m]			<b>22,6</b>

Tabulka č. 10: Výšky měřených vzorových stromů



Všechny výšky jednotlivých stromů byly v programu ArcGIS v jedné atributové tabulce. Zároveň byly v atributové tabulce všechny body (červené) z vrstvy Points. Výběrem z atributové tabulky díky funkci Select by Attributes byly podle ID (Rowid) vybrány pouze výšky pro dané stromy 1 a 2. Všechny výšky stromů v konkrétních výškách letu ( $H_{30m}$ ,  $H_{55m}$ ,  $H_{170m}$ ,  $H_{ALL}$ ) a výšky z pozemního měření ( $H_p$ ) byly přehledně zapsány do tabulky a porovnány.



Obr. č. 42: Výběr výšek vzorových stromů v ArcGIS

Výšky vzorových stromů bylo možné určit také z letu ve výšce 35 m nad terémem na základě částečně vytvořeného DMP a ortofota. Nicméně pro výpočet objemu dřeva v porostu nebylo možné tato data použít, protože nebyly vytvořeny DMP a ortofoto celého zájmového území z důvodu z popsaného v kapitole 4.4.1 (obr.17).

číslo stromu	$H_{30m}$ [m]	$H_{55m}$ [m]	$H_{90m}$ [m]	$H_{170m}$ [m]	$H_{ALL}$ [m]	$H_p$ [m]
1	21,0	21,2	-----	21,5	20,5	21,5
2	22,7	22,6	-----	21,8	20,8	23,3
3	23,8	23,8	-----	22,2	21,7	23,1

Tabulka č. 11: Porovnání výšek pro všechny vzorové stromy



V tabulce číslo 11 jsou porovnané výsledné výšky pro tři vzorové stromy shodné s měřením pozemní metodou. Lokální maximum stromu č. 2 nebylo vypočteno, a to ani důkladným a opakovaným použitím nástroje Focal. Žádné výšky ze všech náletů nejsou extrémně odchýlené od výšek měřených klasicky, nicméně nejsou úplně přesné a liší se od sebe v rámci metrů.

Z výpočtů musela být bohužel vyřazena data z náletu ve výšce 90 m. Již podle ortofota vykazovaly krajní stromy porostu velmi nízkou kvalitu rozlišení. Dále po nahrání vytvořeného DMP a DMT do programu ArcGIS byla zjištěna velká podobnost maximálních výšek těchto dvou modelů než u modelů ostatních výškových letů a maximální výška vytvořeného CHM zdaleka nedosahoval ani průměrné výšky porostu učené z ostatních metod. Výšky stromů se výslednou analýzou pohybovaly kolem 15 m, což je o cca 8 m méně než střední výška porostu určená pozemní metodou. Problém tedy musel nastat již při tvorbě modelů v Agisoftu, nicméně všechny modely ve všech letových výškách byly tvořené stejným způsobem.



Obr. č. 43: Slabší kvalita částí ortofota z dat RPAS ve výšce 90 m nad terénem



Analýza CHM v programu ArcGIS občas vykazovala několik chyb a nebyla úplně stoprocentní. Chyby jsou zobrazeny na obrázku číslo 44. V detailu je možné zaznamenat, že ani po důkladné analýze a testování vstupních hodnot do nástroje Focal Statistics nebylo v některých případech docíleno úplně perfektního výsledku a některá lokální maxima nebyla v nástroji spočtena, některá se nevygenerovala přesně na vrcholu stromu. Ve výsledku nikdy nebyl spočten stejný počet stromů z jednotlivých DMP. Rozdíly v počtech stromů se však zásadně nelišily a jednalo se vždy o jednotky stromů nikoliv desítky. Problém s maximy vypočtenými na louce vyřešila funkce Select by attributes.



Obr. č. 44: Chyby ve výpočtu lokálních maxim



Zhodnocení výsledných hodnot bylo provedeno výpočtem průměrné absolutní chyby MAE (Mean Absolute Error) porovnáním předpokládaných ( $\bar{y}_j$ ) a odhadovaných ( $y_j$ ) hodnot. Jako předpokládané hodnoty byly brány hodnoty z vypočtených pozemních výšek a jako odhadované hodnoty byly brány hodnoty z vypočtených výšek z dat RPAS. MAE udává, jak jsou odhadované hodnoty blízko k předpokládaným. Všechny výpočty byly provedeny v programu Excel podle následujícího vzorce, kde  $n$  je počet jednotlivých stromů.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \bar{y}_j|$$

Obr. č. 45: Rovnice pro výpočet MAE

Přesnost obou měření byla dále vypočtena ještě úplnou střední kvadratickou chybou RMSE (Root Mean Square Error) podle následujícího vzorce. Výpočet byl proveden v programu Excel.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_j)^2}$$

Obr. č. 46: Rovnice pro výpočet RMSE

Pro vyjádření nepřesnosti dané chyby při daných podmínkách v procentech sloužil výpočet RMSE% podle následujícího vzorce. Výpočet proběhl v programu Excel.

$$\text{RMSE\%} = 100\% \times \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_j)^2}}{\bar{y}}$$

Obr. č. 47: Rovnice pro výpočet RMSE%



Jako odhadované hodnoty ( $y_j$ ) pro výpočet obou chyb byly brány všechny hodnoty v rámci jednoho daného náletu ( $LET_x$ ) v dané výšce nad terénem (X). Vstupní předpokládané výšky byly tedy pro všechny výpočty stejné a měnily se pouze hodnoty odhadované.

Výšky	MAE [m]	RMSE [m]	RMSE%
LET <sub>30</sub>	0,60	0,61	2,69
LET <sub>55</sub>	0,57	0,60	2,65
LET <sub>170</sub>	0,80	1,01	4,63
LET <sub>ALL</sub>	1,63	1,75	8,34

Tabulka č. 12: Hodnoty pro všechny vypočtené chyby

Z tabulky číslo 12 je patrné, že výšky jsou z DMP odhadnuté s relativně velkou přesností ve srovnání s výškami měřenými pozemní metodou. Nejvyšší hodnoty chyby dosahují výšky měřené v náletu LET<sub>ALL</sub>. Mezi jednotlivými měřeními výšek však nejsou žádné extrémní rozdíly a všechna měření vykazují pouze malou chybu. Nejmenší chybu vykazují výšky z LET<sub>55</sub> a LET<sub>30</sub>, které jsou vůči pozemní metodě nejpřesnější.

Z hodnot středních průměrů a středních výšek porostu byla vypočtena celková dřevní hmota porostu. Výpočet byl proveden metodou JOK z naměřených dat pozemní metodou a z dat RPAS pro všechny letové výšky, kromě výšek ve 30 m a 90 m nad terénem. Tedy pro výšky Phantom 4 v 55 m a eBee ve 170 m nad terénem včetně snímků ze všech letů dohromady (ALL).

Základem zjištění objemu porostu u pozemní metody bylo rozdělení měřených tloušťek do tloušťkových stupňů a vyhledání v tabulkách JOK příslušný objem daného tloušťkového stupně v závislosti na čísle v JVK. Pro výpočet byly použity tabulky JOK pro příslušnou dřevinu a to smrk.

Jelikož u metody RPAS nejsou měřeny jednotlivé tloušťkové stupně, ale pouze vzorové tloušťky, pak je v metodě JOK použit průměr všech vzorových tloušťek s číslem JVK a vynásoben celkovým počtem stromů. Číslo JOK dostaneme z JVK díky střední výšce a střední tloušťce porostu. Všechny informace o zjištěných informacích z tabulek JOK a o vypočtených hodnotách výšek, tloušťek a objemů zájmového porostu jsou uvedeny v tabulce číslo 14.



	pozemní metoda	LET <sub>55</sub>	LET <sub>170</sub>	LET <sub>ALL</sub>
střední výška porostu [m]	22,60	23,32	20,97	22,53
střední tloušťka porostu [cm]	29,40	30,40	30,40	30,40
počet stromů [ks]	76	79	80	71
číslo z JVK	411	411	408	410
objem z JOK [m <sup>3</sup> ]	*	0,79	0,71	0,76
objem dřeva v porostu [m <sup>3</sup> ]	<b>61,28</b>	<b>62,41</b>	<b>56,80</b>	<b>53,96</b>

Tabulka č. 13: Měřené a vypočtené hodnoty pro zjištění objemu porostu

\*objemy z JOK se lišily pro různé tloušťkové stupně, viz tabulka č. 14

tl. stupeň	14	18	22	26	30	34	38	42	46
počet stromů	1	4	12	15	16	16	8	2	2

Tabulka č. 14: Počet stromů v jednotlivých tloušťkových stupních

Nejbližše celkové zásobě zájmového území měřené pozemní metodou je LET<sub>55</sub> a rozdíl těchto dvou objemů je pouze 1,8 %. Navzdory tomu, že z LET<sub>ALL</sub> byla zjištěna střední výška porostu pouze o 0,3 % odlišná od střední výšky porostu z pozemní metody, tak celkový objem je nejvíce vzdálen od pozemní metody a to o 11,9 %. Hlavní roli zde hraje zjištěný počet stromů.

V této práci bylo zjištěno, že náletová výška RPAS hraje velkou roli při následném zpracování a vyhodnocení dat, týkajících se výšky a počtu stromů. Z hlediska výsledků je vhodnější menší náletová výška, avšak v minimální výšce 15 m nad nejvyšším bodem porostu.

Dalším zajímavým porovnáním může být porovnání vrtulového a okřídleného RPAS. Pomocí kvadrokoptéry DJI ve vyšších náletových výškách (v tomto případě Phantom 4 Pro ve výšce 90 m nad terénem) se získávají méně kvalitní data a výstupy než pomocí okřídleného RPAS, který pořídil kvalitní data i ve vyšších letových výškách (v tomto případě eBee ve výšce 170 m).





## 5.4 Zhodnocení metod z hlediska ekonomiky a pracnosti

Pozemní metoda měření informací o porostu byla uvažována jako správná. V této práci byl proveden pokus o navržení alternativního způsobu zjištění informací o porostu, který by mohl být ekonomičtější a méně pracný.

Vyhodnocení výsledků v programu ArcGIS ukázalo, že není nutné létat v několika výškách nad terénem, ale stačí najít takovou výšku, ve které dostaneme nejkvalitnější data. Při vyhodnocení všech dat ze všech letů dohromady (tedy více dat z různých výšek) nebylo dosaženo srovnatelných hodnot s pozemním měřením. Lze tedy říci, že pro teoretické použití v praxi stačí pouze jeden kvalitní let ve vhodné výšce nad porostem.

V rámci pracnosti a úspory času a nákladů musí být do celého měření zahrnuta také příprava před měřením v terénu. Pro většinu RPAS je předletová příprava obdobná. Základem je nabití celého příslušenství včetně stroje a příprava vlíčovacích bodů. Kontrola baterií se týká také digitálních zařízení pro pozemní měření. V obou případech měření je potřeba seznámit se s šetřenou oblastí a vymezit si oblast měření.

V obou případech bylo třeba stabilizovat a zaměřit body v terénu pomocí GNSS stanice a provést měření výšek stromů a vlíčovacích bodů pomocí totální stanice. Měření výšek stromů bylo určitě náročnější a pomalejší než měření vlíčovacích bodů na hranol. Zejména vítr hraje v této části svou roli a není lehké zaměřit vrchol stromu. Tento krok se velmi těžko ekonomicky hodnotí, jelikož použití výškoměru by mohlo být rychlejší. Nicméně hlavní roli v obou metodách hrálo samotné měření.

Plánování letu na notebooku při použití eBee zabralo o něco více času než při použití kvadrokoptéry, se kterou bylo ihned vzlétáno bez plánování trasy letu. Samotné měření pomocí RPAS trvalo okolo 15 min.

Pozemní měření tloušťek pouze výběrových stromů pro výpočet objemu porostu z dat RPAS trvalo zhruba 10 min. Zároveň se při zpracování výsledků ukázalo, že střední tloušťka vypočtená tímto způsobem měření se od metody celoplošného průměrkování lišila pouze o 1 cm. Metoda průměrkování celého porostu byla bezesporu nejvíce náročná a se samotným ohraničením oblasti a náčrtem pozic stromů trvala 180 min.



Zpracování dat z terénu bylo v případě pozemní metody časově náročné především ve výpočtech a prepisech dat do digitální podoby. Data z RPAS byla v kvalitním softwaru a při správně dodržené metodice vyhodnocena o poznání rychleji. Výpočty v softwaru ArcGIS také nebyly nijak zdlouhavé, při známé metodice. Nejdéle trvala analýza dat nástrojem Focal Statistics.

Dalším z mnoha faktorů z hlediska ekonomičnosti může být nákladnost jednotlivých měřických zařízení. Pořizovací cena GNSS stanice v kombinaci s totální stanicí a vrtulovým či okřídleným RPAS včetně příslušenství je samozřejmě v hodnotách statisíců. Na druhou stranu cena digitální průměrky s digitálním výškoměrem se pohybuje v řádech desetitisíců.

Metodu RPAS lze hodnotit jako ekonomičtější a určitě příjemnější z hlediska pracnosti než klasickou metodu pozemního měření, avšak pouze za podmínek relativního bezvětří, nedeštivého počasí. Klimatickými podmínkami jsou data z RPAS velmi znehodnocena. Velkou roli hraje druhová skladba lesa (experiment byl prováděn u smrkového monokulturního lesa), listnaté porosty budou značně komplikovanější. Také členitost terénu bude zanášet do měření problémy (provedení letu aj.)

Metoda využití RPAS je však stále zcela hypotetická a spíše ve fázi zkoumání než praktického využití. Jelikož se tato metoda stále vyvíjí, tak jen dalšími výzkumy je možno ji posouvat dále.

Investice do samotného vrtulového RPAS není tak vysoká a jeho možností využití v rámci lesního hospodářství může být více, jak je uvedeno v následující kapitole.



## 6 Další možnosti využití RPAS v lesnictví

### 6.1 Sledování zdravotního stavu lesních porostů

Pohled na zalesněnou oblast z ptačí perspektivy přináší bezesporu výhody ve sledování jejího zdravotního stavu. Použitím infračervené kamery lze ze snímků snadno a rychle určit suché, odumřelé či napadané stromy. Pohled shora je velmi výhodný také například po polomech, kdy jsou poškozené velké zalesněné plochy a zejména polámané vršky stromů, které nejsou v jiném případě vidět, zvláště pokud je porostem houština.



Obr. č. 48: Sledování zdravotního stavu porostu



## 6.2 Sledování postupu a rozsahu těžby, holiny

Záběry z výšky pomocí RPAS jsou velmi výhodné také při dokumentaci postupu těžebních prací. Dávají nám přehledné informace o průběhu a rozsahu těžby dřeva a lze z nich rychle určit nejlepší možnou přístupnou trasu terénem do dané oblasti pro harvestory. Dále lze snadno odhadnout následnou rozlohu holin po mýtné těžbě nebo živelné pohromě.

Následný průběh zalesňování holin lze výhodně a přehledně monitorovat pomocí dálkově řízeného bezpilotního prostředku. Etapovými nálety je možné sledovat postupný růst lesní školky a míru jejího poničení.

Díky snímkům v blízkém infračerveném spektru lze také zaznamenat množství zbytkového klestu po těžbě dřeva a sledovat jeho postupný úklid.



Obr. č. 49: Rozsah a postup těžby dřeva, jaro [15]



Obr. č. 50: Postupné zalesňování holin po těžbě dřeva



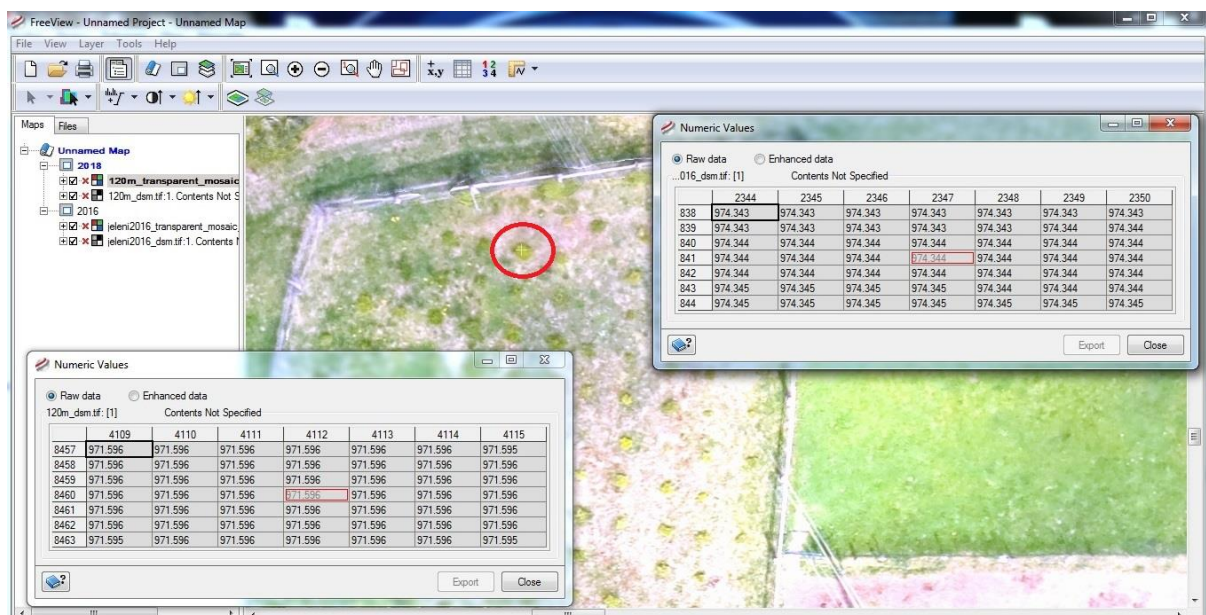
Obr. č. 51: Postupný úklid klestu po těžbě dřeva [15]



### 6.3 Analýza růstového vývoje porostu

Na základě digitálního modelu povrchu, vytvořeného z leteckých snímků, lze snadno monitorovat vývoj v růstu například lesní školky. Pro odhad růstového přírůstku postačí volný software Geomatica FreeView. V tomto programu lze vizualizovat DMP a ortofoto a následně na ortofotu označit zájmový vrchol stromku. Na podkladě DMP z různých období lze zobrazit numerické hodnoty ze všech DMP. Podmínkou je, aby všechny zkoumané DMP byly správně souřadnicově připojené. Důležitou roli hraje také kvalita zaměření vličovacích bodů v jiném období a dodržení stejné metodiky při měření a zpracování dat.

V programu Pix4D byly vytvořené DMP a ortofoto na základě dat z let 2016 a 2018 pro stejnou lesní školku. Následně byla data nahrána do softwaru Geomatica FreeView a vizualizovány obě tabulky pro DMP z jednotlivých let. V obou tabulkách byla červeně vyznačena výška téhož označeného stromku na ortofotu. V příkladu na obrázku číslo 50 jsou informace v tabulkách pouze ilustrativní, jelikož DMP z roku 2016 nemohl být připojen do souřadnicového systému.



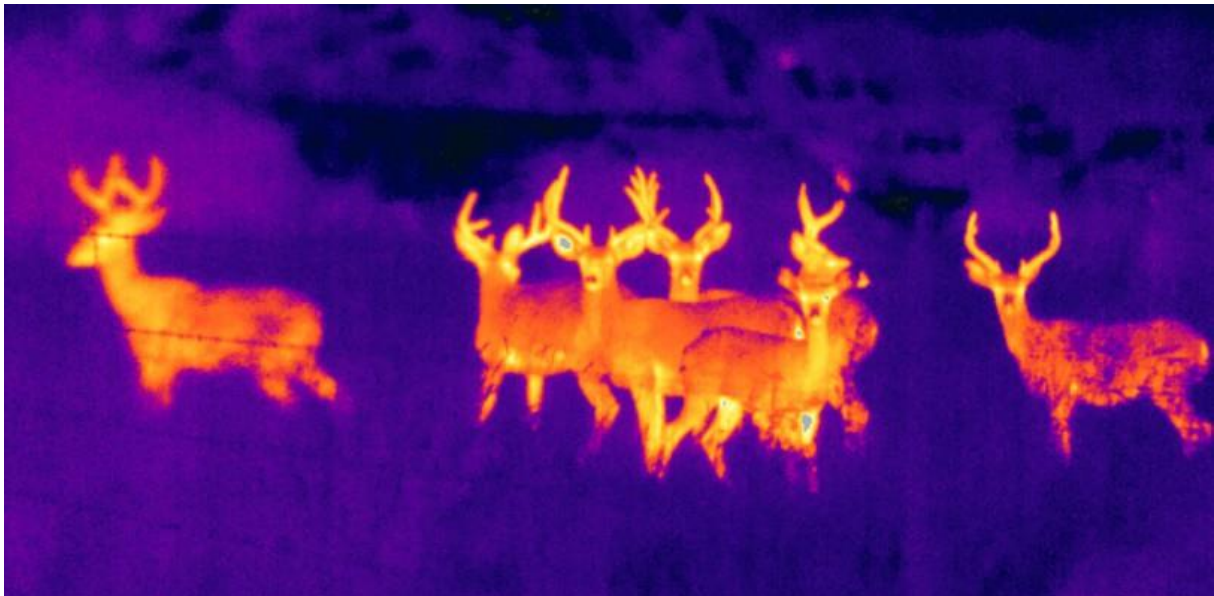
Obr. č. 52: Vizualizace hodnot růstového vývoje lesní školky



## 6.4 Monitoring zvířete

V lesním hospodářství mohou RPAS najít své uplatnění také při monitoringu zvířete. Ve většině případů však spíše pouze pro zábavu pomocí kamery viditelného spektra. Z vlastní zkušenosti je zjištěno, že zvíře v některých případech reaguje na přítomnost dronu překvapivě klidně, a to i při jeho těsné blízkosti. Naopak lze pomocí dronu také nezvanou zvířet plašit.

Díky novým technologickým zařízením z oblasti dálkového průzkumu Země, jako jsou například termální kamery, je možno zvířata sledovat z dronu online videopřenosem. Velmi dobře je možno díky termokameře rozeznat zvíře částečně skrytou za vegetací. Monitorováním zvířete pomocí termokamer je pojednáno např. ve [31].



Obr. č. 53: Sledování zvířete pomocí termokamery



## 7 Závěr

Byla zkoumána a popsána metoda RPAS pro získávání informací v lesnictví. Pro zjišťování dendrometrických veličin bylo využito tří typů RPAS v různých letových výškách nad terénem. Bylo zjištěno, že tato metoda je při správném provedení méně pracná než metoda pozemního měření. Při porovnání výsledných hodnot obou metod byla zjištěna rozrůzněnost výsledků RPAS v různých letových výškách. Nejvhodnější letovou výškou pro získání nej přesnějších výsledků vzhledem k pozemní metodě byla zjištěna výška cca 55 m nad povrchem, při střední výšce porostu cca 23 m. V porovnání s pozemní metodou jsou výsledné hodnoty z dat RPAS typu Phantom 4 Pro velmi přesné. Překvapivým zjištěním bylo, že při zpracování dat ze všech náletů (Phantom 4 – 30 m, 55 m, 90 m, eBee – 170 m) dohromady bylo dosaženo nejméně přesných výsledků.

Technologie RPAS má v oblasti lesnictví velký potenciál, ale pozemní metoda je bezesporu méně závislá na klimatických podmínkách a druhové skladbě porostu. Metoda RPAS byla zkoumána na vzorku monokulturního smrkového lesa a lze využít pouze za příznivých větrných podmínek (tj. max. 5 m/s v nárazech). Velkou roli při zpracování dat z RPAS hraje kvalitní hardwarové a softwarové vybavení. Bylo zjištěno, že technologie RPAS by mohla najít další uplatnění v oblasti lesního hospodářství, zejména vzhledem k vzrůstajícímu technologickému vývoji.





## Seznam použité literatury

1. Šmelko, Štefan a kol. *Meranie lesa a dreva*. Zvolen : Ústav pre výchovu a vzdelávanie pracovníkov LVH SR, 2003. ISBN 80-89100-14-7.

2. Kuželka, Karel a kol. *Měření lesa, moderní metody sběru a zpracování dat*. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014. ISBN 978-80-213-2498-5.

3. Kuželka, Karel, Marušák, Robert a Urbánek, Vilém. *Dendrometrie*. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016. ISBN 978-80-213-2673-6.

4. Van Laar, Anthonie a Akca, Alparslan. *Forest mensuration*. Dodrecht : Springer, 2007. ISBN 978-1-4020-5990-2.

5. Andersen, Hans-Erik, Reutebuch, Stephen a McGaughey, Robert. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*. [Online] 2014. [Citace: 10. 5. 2018.]. DOI: 10.5589/m06-030. ISSN 07038992.

6. Kant, Shashi a Alavalapati, J. *Handbook of Forest Resource Economics*. Canada : Faculty of Forestry, University of Toronto, 2014. ISBN 9781136253294.

7. Puliti, Stefano, a další. Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*. [Online] 2015. [Citace: 10. 5. 2018.]  
Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/8/9632>. 20724292.

9. Grosenbaugh, Lewis Randolph. Some suggestions for better sample-tree measurement. Society of American Foresters Meetin. 1963. 36-42 s.

10. Clark, Neil, a další. *Use of a Non-Metric Digital Camera for Tree Stem Evaluation*. [Online] 1998. [Citace: 10. 5. 2018.]  
Dostupné z: [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja\\_clark012.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_clark012.pdf).



11. **Liang, Xinlian, a další.** *The Use of a Hand-Held Camera for Individual Tree 3D*. Turku : Department of Geography and Geology, University of Turku, 2014. ISBN 2072-4292.

12. **Pueschel, Pyare, a další.** *The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans*. Trier : Department of Environmental Remote Sensing and Geoinformatics, University of Trier, 2013, 44-56 s, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.12.001.

13. **Česká, republika.** Doplněk R - Bezpilotní systémy. *In: Hlava 3, ust. 3.1.12.* [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] Dostupné z: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplR.pdf>.

14. **Česká, republika.** Doplněk X - Bezpilotní systémy. *In: Hlava 3, ust. 3.1.12.* [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] Dostupné z: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplR.pdf>.

15. **Pavelka, Karel, a další.** *RPAS - Remotely Piloted Aircraft System*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05648-6.

16. **Campbell, James B. a Wynne, Randolph H.** *Introduction to Remote Sensing*. Basel : The Guilford Press, 2011. ISBN 978-1-60918-176-5.

17. **Šmelko, Štefan.** *Dendrometria*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2000. ISBN 80-228-0962-4.

18. **Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem.** Invertizace lesů, Metodika venkovního sběru dat. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] 2003. Dostupné z: [http://www.uhul.cz/images/nil/metodika\\_sberu/kap\\_3\\_6\\_0.pdf](http://www.uhul.cz/images/nil/metodika_sberu/kap_3_6_0.pdf).

19. **Sequens, Josef.** *Dendrometrie 2007*. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] 2007. Dostupné z: [https://katedry.czu.cz/storage/3844\\_Souhrn\\_Dendrometrie.pdf](https://katedry.czu.cz/storage/3844_Souhrn_Dendrometrie.pdf).



20. **Drápela, Karel.** Mendelova univerzita v Brně. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.]  
Fakulta lesnická a dřevařská. Dostupné z: <http://user.mendelu.cz/drapela/>.

21. **Korf, V. a kol.** *Dendrometrie*. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] 1972. Dostupné z:  
[user.mendelu.cz/drapela/Dendrometrie/Prezentace/Uvod%20do%20predmetu.ppt](http://user.mendelu.cz/drapela/Dendrometrie/Prezentace/Uvod%20do%20predmetu.ppt).

22. **Eisenbeis, Henri.** *UAV Photogrammetry*. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] 2009.  
Dostupné z: [http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue\\_Berichte\\_PDF/105.pdf](http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf).

23. **Holmgren, Peter a Thuresson, Thomas.** *Satellite remote sensing for forestry planning—A review*. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.] 1998.  
Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02827589809382966>.

24. **SenseFly.** Extended User Manual, 168 s. *eBee/eMotion*. [Online] [Citace: 10. 5. 2018.]  
[https://www.sensefly.com/fileadmin/user\\_upload/documents/brochures/eBee\\_en.pdf](https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/documents/brochures/eBee_en.pdf).

25. **DJI.** *Phantom 3 SE*. [Online] [Citace: 10. 5 2018.]  
Dostupné z: <https://www.dji.com/phantom-3-se/info?lang=cn#specs>.

26. **Canon.** *Camera User Guide*. [Online] [Citace: 10. 5 2018.] 2012. Dostupné z:  
[http://95.110.228.56/documentUAV/camera%20manual/%5BENG%5D\\_2014\\_user\\_manual\\_s110\\_v3.pdf](http://95.110.228.56/documentUAV/camera%20manual/%5BENG%5D_2014_user_manual_s110_v3.pdf).

27. **Panagiotidis, Dimitrios, a další.** Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*. [Online] [Citace: 10. 5 2018.] 2016. Dostupné z: <http://www.frameadapt.cz/coajdfadlf/uploads/2017/05/5-1-Determining-tree-height-and-crown-diameter-from-high-resolution-UAV-imagery1.pdf>.

28. **Agisoft.** Agisoft PhotoScan User Manual. *Dense Cloud Classification and DTM Generation*. [Online] [Citace: 10. 5 2018.] 2013. Dostupné z: <http://www.agisoft.com/support>



29. **Šedina, Jaroslav.** *Agisoft PhotoScan – RPAS manuál.* [Online] [Citace: 10. 5 2018.]  
Dostupné z: [http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm20/dokumenty/Agisoft\\_PhotoScan\\_manual.pdf](http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm20/dokumenty/Agisoft_PhotoScan_manual.pdf).

30. **Pitkanen, Juho, a další.** *Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model.* [Online] [Citace: 10. 5 2018.].  
Dostupné z: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/PITKAENEN.pdf>.

31. **Chaloupková, Veronika.** *Vliv zemědělské mechanizace na zvěř a možnosti jeho snížení.* [Online] [Citace: 10. 5 2018.].  
Dostupné z: [https://theses.cz/id/68fa9y/zaverecna\\_prace.pdf](https://theses.cz/id/68fa9y/zaverecna_prace.pdf).

## Seznam obrázků

Obr. č. 1: Způsoby určení místa pro měření výčetní tloušťky stromu v 1,3 m [1]....	- 5 -
Obr. č. 2: Trigonometrický princip měření výšky stromu [4] .....	- 6 -
Obr. č. 3: Zjištění objemu 1 stromu v objemových tabulkách [20].....	- 9 -
Obr. č. 4.: Grafikon pro stanovení čísla JVK a tabulka objemů JOK [20].....	- 11 -
Obr. č. 5: Podmínky při provozu bezpilotního letadla [14].....	- 15 -
Obr. č. 6: Totální stanice Trimble 5000 Series; GNNS stanice Topcon .....	- 18 -
Obr. č. 7: Náčrt rozmístění vlíčovacích bodů v terénu.....	- 19 -
Obr. č. 8: Vlícovací bod v terénu .....	- 19 -
Obr. č. 9: Ohraničení zájmové oblasti .....	- 20 -
Obr. č. 10: Označení stromu.....	- 21 -
Obr. č. 11: Phantom 3 SE s ovladačem na vlícovacím bodě.....	- 23 -
Obr. č. 12: RPAS s pevným křídlem – eBee .....	- 24 -
Obr. č. 13: Plánování letu v programu eMotion.....	- 25 -
Obr. č. 15: Výpočet stanoviska v programu Groma.....	- 28 -
Obr. č. 16: Výpočet souřadnic vlíčovacích bodů v programu Groma.....	- 29 -
Obr. č. 18: Označení vlíčovacího bodu na snímku.....	- 32 -
Obr. č. 19: Generování polygonové sítě s klasifikovanými pozemními body .....	- 33 -
Obr. č. 20: Výsledná polygonová síť pro tvorbu DMT .....	- 34 -
Obr. č. 21: Proces tvorby DMP, DMT a ortofota probíhá zcela automatizovaně ...	- 35 -



Obr. č. 22: Výsledný DMP z programu Pix4D .....	- 35 -
Obr. č. 23: Tvorba CHM v Raster Calculator .....	- 36 -
Obr. č. 24: Tvorba polygonu nad ortofotem.....	- 37 -
Obr. č. 26: CHM zájmového území.....	- 38 -
Obr. č. 27: Použití nástroje Focal Statistics.....	- 39 -
Obr. č. 28: Vytvoření kružnic kolem lokálních maxim rastru CHM.....	- 40 -
Obr. č. 29: Použití funkce Conditional v Raster Calculator .....	- 41 -
Obr. č. 30: Výstupem po použití nástroje Raster to Point byla bodová vrstva.....	- 41 -
Obr. č. 31: Použití nástroje Sample .....	- 42 -
Obr. č. 32: Atributová tabulka všech bodů.....	- 42 -
Obr. č. 33: Z výsledného modelu z Phantom 3 SE nebyly stromy rozeznatelné ....	- 44 -
Obr. č. 34: Ortofoto z výšky 30 m nad terénem .....	- 45 -
Obr. č. 35: Ortofoto z výšky 55 m nad terénem .....	- 45 -
Obr. č. 36: Ortofoto z výšky 90 m nad terénem .....	- 46 -
Obr. č. 37: Ortofoto z výšky 170 m nad terénem (eBee) .....	- 46 -
Obr. č. 38: DMP z dat měřených Phantomem 4 Pro ve výšce 55 m nad terénem... - 47 -	- 47 -
Obr. č. 39: Pohled na porost z výšky 55 m.....	- 48 -
Obr. č. 40: Pohled na porost z výšky 170 m.....	- 48 -
Obr. č. 41: Vybrané vzorníky pro srovnání výšek.....	- 49 -
Obr. č. 42: Výběr výšek vzorových stromů v ArcGIS .....	- 50 -
Obr. č. 43: Slabší kvalita částí ortofota z dat RPAS ve výšce 90 m nad terénem ... - 51 -	- 51 -
Obr. č. 44: Chyby ve výpočtu lokálních maxim.....	- 52 -
Obr. č. 45: Rovnice pro výpočet MAE.....	- 53 -
Obr. č. 46: Rovnice pro výpočet RMSE.....	- 53 -
Obr. č. 47: Rovnice pro výpočet RMSE% .....	- 53 -
Obr. č. 48: Sledování zdravotního stavu porostu .....	- 58 -
Obr. č. 49: Rozsah a postup těžby dřeva, jaro [15] .....	- 59 -
Obr. č. 50: Postupné zalesňování holin po těžbě dřeva .....	- 60 -
Obr. č. 51: Postupný úklid klestu po těžbě dřeva [15] .....	- 60 -
Obr. č. 52: Vizualizace hodnot růstového vývoje lesní školky .....	- 61 -
Obr. č. 53: Sledování zvěře pomocí termokamery .....	- 62 -



## Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Dělení RPAS dle typu [22].....	- 16 -
Tabulka č. 2: Technické parametry Phantom 3 SE [25].....	- 22 -
Tabulka č. 3: Technické parametry Phantom 4 [25] .....	- 24 -
Tabulka č. 4: Technické parametry eBee [24].....	- 25 -
Tabulka č. 5: Technické parametry kamery Canon IXUS 110 NIR [26].....	- 26 -
Tabulka č. 6: tloušťky vzorníků v zájmovém území .....	- 27 -
Tabulka č. 7: souřadnice stanoviska a orientací .....	- 28 -
Tabulka č. 8: Souřadnice vřícovacích bodů v S-JTSK.....	- 29 -
Tabulka č. 9: Odchylky na vřícovací body při tvorbě DMP ve výšce 55 m, DJI 4. -	43 -
Tabulka č. 10: Výšky měřených vzorových stromů .....	- 49 -
Tabulka č. 11: Porovnání výšek pro všechny vzorové stromy .....	- 50 -
Tabulka č. 12: Hodnoty pro všechny vypočtené chyby .....	- 54 -
Tabulka č. 13: Měřené a vypočtené hodnoty pro zjištění objemu porostu.....	- 55 -
Tabulka č. 14: Počet stromů v jednotlivých tloušťkových stupních .....	- 55 -

## Seznam příloh

1. Digitální modely povrchu
2. Digitální modely terénu
3. Digitální ortofota
4. Měřené hodnoty v terénu + výpočty výšek + výpočty objemů dřeva
5. Výpočty chyb

Všechny přílohy dostupné na DVD umístěném na konci práce.