

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra hospodářské úpravy lesa



**Využití laserového skenování z bezpilotních letadel
pro sběr dat v lesních ekosystémech**

Bakalářská práce

Autor: Martin Divišek

Vedoucí práce: Ing. Martin Slavík

© 2020 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Divišek

Lesnictví
Lesnictví

Název práce

Využití laserového skenování z bezpilotních letadel pro sběr dat v lesních ekosystémech

Název anglicky

Utilization of laser scanning from unmanned aerial vehicles for data acquisition in forest ecosystems

Cíle práce

Cílem práce je ověřit přesnost taxačních charakteristik odvozených z bodových mračen vzhledem k metodám používaným v současné praxi a zhodnotit potenciál využití metody laserového skenování v praktickém lesnictví.

Metodika

- 1) Provedení sběru referenčních dat na zkušných plochách pomocí metod používaných v praxi
- 2) Laserové skenování na zkušných plochách pomocí bezpilotního letadla v součinnosti s katedrou HÚL
- 3) Zpracování 3D bodových mračen a z nich odvození taxačních charakteristik
- 4) Statistické zhodnocení výsledků
- 5) Zhodnocení potenciálu využití metody laserového skenování v praxi

Doporučený rozsah práce

30-40 stran

Klíčová slova

UAV, laserové skenování, inventarizace

Doporučené zdroje informací

- BREDE, Benjamin, Alvaro LAU, Harm M. BARTHOLOMEUS a Lammert KOOISTRA, 2017. Comparing RIEGL RICOPTER UAV LiDAR Derived Canopy Height and DBH with Terrestrial LiDAR. *Sensors*. MDPI, 1-16. DOI:10.3390/s17102371.
- JAAKKOLA, AnttoniJaakkola, Juha HYYPPÄ, Antero KUKKO, Xiaowei YU, Harri KAARTINEN, Matti LEHTOMÄKI a Yi LIN, 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. ScienceDirect, 65(6), 514-522. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002.
- PULITI, Stefano, Hans OLERKA, Terje GOBAKKEN a Erik NÆSSET. Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing* [online]. 2015, 7(8), 9632- 9654. DOI:10.3390/rs70809632. ISSN 20724292.
- WALLACE, Luke, Arko LUCIEER, Christopher WATSON a Darren TURNER, 2012. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing*. mdpi, 4(6), 1519-1543. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs4061519>.
- WIESER, Martin, Gottfried MANDLBURGER, Markus HOLLAUS, Johannes OTEPKA, Philipp GLIRA a Norbert PFEIFER, 2017. A Case Study of UAS Borne Laser Scanning for Measurement of Tree Stem Diameter. *Remote sensing*. MDPI, 1-11. DOI: 10.3390/rs9111154.
-

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Martin Slavík

Garantující pracoviště

Katedra hospodářské úpravy lesů

Konzultant

Ing. Martin Slavík

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

Ing. Peter Surový, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 11. 06. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci "Využití laserového skenování z bezpilotních letadel pro sběr dat v lesních ekosystémech" vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Slavíka a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 15.6.2020

Martin Divišek

Poděkování

Touto cestou bych nejprve velmi rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Martinovi Slavíkovi za velmi vřelou spolupráci, obětavost při hodinách konzultací a ochotu vždy vyjít vstříc. Dále chci vyjádřit velký dík mé rodině za poskytnutou podporu při studiu i mimo něj. Nakonec bych chtěl poděkovat všem přátelům, kteří mi nejen vysokoškolské studium dokázali vždy zpříjemnit.

Využití laserového skenování z bezpilotních letadel pro sběr dat v lesních ekosystémech

Abstrakt

Tato práce reprezentuje způsob využití laserového skenování LiDAR (Light Detection and Ranging) z bezpilotních letadel (Unmanned Aerial Vehicles (UAV) v rámci dálkového průzkumu země (DPZ) pro sběr dat potřebných k inventarizaci lesních ekosystémů. Na zkušební ploše lokalizované blízko nádrže Fláje v Krušných horách s rozlohou 2,3 ha byly provedeny v měsících květen, červenec a listopad roku 2019 tři sběry surových dat pomocí laserového skenovacího systému VUX-SYS neseného na UAV-RiCOPTER, z nichž bylo vyexportováno pro každý výše zmíněný měsíc bodové mračno. Následným zpracováním bodových mračen v prostředí ArcGIS 10.5.1 byly odvozeny výšky a souřadnicové polohy stromů. Poté byla pro květen, červenec a listopad stanovena průměrná výška porostu a determinován přírůst za toto celé vegetační období, který byl statisticky potvrzen (dvou výběrovým t-testem, $p=0,04109$ a párovým t-testem, $p<2,2e^{-16}$). Bylo ověřeno, že metodou ULS (Unmanned Laser Scanning) lze provádět sběr komplexních dat s vysokým časovým a prostorovým rozlišením, jejichž následným zpracováním je možno získat velmi přesné informace potřebné pro inventarizaci lesů.

Klíčová slova: UAV, laserové skenování, inventarizace

Utilization of laser scanning from unmanned aerial vehicles for data acquisition in forest ecosystems

Abstract

This work represents the way of the usage of the Light Detection and Ranging (LiDAR) from unmanned aerial vehicles (UAV) within the Remote sensing (RS) for collecting data necessary for forest ecosystem inventory. Three collections of data took place on a trial site in the area of Fláje dam (total expanse of 2.3 ha) located in Krušné hory during May, July and September; for that purpose, the laser scanning system VUX – SYS attached to UAV-RiCOPTER was utilized. From the data collected, a point cloud was exported for each above-mentioned month; afterwards the processing of collected data in ArcGIS 10.5.1. application, heights and geographical coordinates of trees were deduced. Thereafter, an average height of stand height was set and total increase per growing season was determined. The total increase was statistically confirmed (using Student signed-rank t-test; $p=0,04109$ and paired t-test; $p=<2,2e^{-16}$). The method of ULS (Unmanned Laser Scanning) has proven to be suitable for collecting complex data with high-temporal and high-spatial resolutions, the subsequent processing of which enables to obtain extraordinarily precise data necessary for forest survey.

Keywords: UAV, laser scanning, forest inventory

Obsah

1 Úvod	13
2 Cíl práce	15
3 Literární rešerše	16
3.1 Smysl legislativy pro provoz UAV.....	16
3.2 Legislativa v ČR.....	16
3.2.1 Doplněk X.....	17
3.2.2 Prostory.....	21
3.2.3 Mapa pro předletovou přípravu UAV.....	21
3.3 Dálkový průzkum země.....	22
3.4 LiDAR v lesnické praxi.....	22
3.4.1 ALS.....	24
3.4.2 TLS.....	26
3.4.3 MLS.....	26
3.4.4 ULS.....	27
3.5 Konkrétní aplikace ULS v lesnictví.....	27
4 Metodika	30
4.1 Popis používaného UAV pro sběr dat v lesních ekosystémech.....	31
4.1.1 RIEGL VUX-SYS.....	33
4.2 Provedení sběru referenčních dat na zkusných plochách pomocí metod používaných v praxi.....	35
4.3 Laserové skenování na zkusných plochách pomocí bezpilotního letadla v součinnosti s katedrou HÚL.....	35
4.4 Zpracování 3D bodových mračen a z nich odvození taxačních charakteristik... 39	
4.4.1 Zpracování surových (Raw) dat.....	39
4.4.2 Zpracování dat v ArcGIS.....	45
5 Výsledky	60
5.1 Počet stromů na zkusné ploše v květnu, červenci a listopadu s jejich souřadnicovým umístěním.....	60
5.2 Výšky stromů.....	61
5.3 Přírůst stromů.....	62
5.4 Statistické zhodnocení výsledků.....	63
5.4.1 Normální rozdělení výšek.....	64
5.4.2 Statistické zhodnocení přírůstu.....	65
6 Diskuze	67
6.1 Zhodnocení potenciálu využití metody laserového skenování v praxi.....	67
7 Závěr	70

8 Literatura.....	71
--------------------------	-----------

Seznam obrázků, tabulek a grafů:

Obrázky:

Obrázek 1: Mapa pro předletovou přípravu UAV (DronView 3.7 ŘLP ČR s.p.)....	22
Obrázek 2: Odrazy laserových pulzů od různých částí zápoje (Akay et al. 2009) ...	23
Obrázek 3: 3D model lesního prostu zobrazený pomocí Quick Terrain Reader	24
Obrázek 4: 3D DTM vytvořený z LiDAR datového souboru (Akay et al. 2009).....	24
Obrázek 5: Mapa demonstrující lokalitu zkušné plochy (Seznam.cz 2020).....	30
Obrázek 6: Ortofoto mapa zkušné plochy.....	31
Obrázek 7: RiCOPTER před vzletem (Foto: Autor).....	32
Obrázek 8: Pozemní řídicí stanice (Foto Autor)	36
Obrázek 9: Startovací/přistávací plocha pro UAV (Foto Autor)	37
Obrázek 10: UAV připravené ke startu (Foto Autor)	38
Obrázek 11: Znázornění trajektorií letu UAV nad zkušnou plochou v software POSPac MMS	40
Obrázek 12: Detailní znázornění místa vzletu/přistání, virtuální pozemní stanice a leteckého manévru	41
Obrázek 13: Funkce Lever Arms and Mounting Angles	42
Obrázek 14: Znázornění surových dat a trajektorie letu v programu RiPROCESS .	43
Obrázek 15: Vyčlenění zemského povrchu a vegetace.....	44
Obrázek 16: Podrobné zobrazení zemského povrchu a vegetace	44
Obrázek 17: Tvorba LAS Dataset.....	46
Obrázek 18: Výstup z nástroje LAS Dataset.....	47
Obrázek 19: Funkce Las Height Metrics As Raster.....	48
Obrázek 20: Výstup z funkce Las Height Metrics As Raster	49
Obrázek 21: Nástroj Canopy Peaks.....	50
Obrázek 22: Výstup z nástroje Canopy Peaks, CHM	50
Obrázek 23: Properties pro Peaks_05	52
Obrázek 24: Pořadová čísla pro vrcholy stromů	52
Obrázek 25: Označené špatně zaregistrované vrcholy stromů před odstraněním.....	53
Obrázek 26: Výstup po odstranění špatně zaregistrovaných bodů	54
Obrázek 27: Nástroj Near.....	55
Obrázek 28: Sjednocená pořadová čísla vrcholů stromů	56

Obrázek 29: Funkce Join Data	57
Obrázek 30: Funkce Field Calculator	58
Obrázek 31: Výsledek dvou výběrového t – testu v RStudios	65
Obrázek 32: Výsledek párového t – testu v RStudios	66

Tabulky:

Tabulka 1: Tabulka 1 (viz ust.16) (PŘEDPIS L2 DOPLNĚK X, 2018).....	20
Tabulka 2: Objem dřeva a počet stromů podle terénních dat versus dat z LiDARu (Pitka et al. 2004)	26
Tabulka 3: Specifikace a Výkon. (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a)	32
Tabulka 4: Omezení. (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a).....	33
Tabulka 5: Teplotní podmínky. (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a).....	33
Tabulka 6: Field Calculator a Attribute Table s označeným sloupcem Id.....	51
Tabulka 7: Přiřazená pořadová čísla pro Id.....	51
Tabulka 8: Attribute table pro Peaks_05.....	57
Tabulka 9: Výšky stromů a jejich výškový rozdíl (květen, červen a listopad)	59
Tabulka 10: Souřadnice vybraných zmapovaných stromů	61
Tabulka 11: Výšky vybraných stromů v květnu , červenci a listopadu v metrech ...	61

Grafy:

Graf 1: Krabicové grafy porovnávající výšky stromů za květen h05, červenec h07 a listopad h11	62
Graf 2: Krabicový graf vykazující přírůst od května do listopadu.....	63
Graf 3: Histogram znázorňující rozdělení výšek – květen.....	64
Graf 4: Histogram znázorňující rozdělení výšek – listopad.....	64

Seznam použitých zkratek a symbolů:

ALS – Airborne Laser Scanning

ATZ – Aerodrome Traffic Zone

DBH – Diameter at Breast Height

DEM – Digital Elevation Model

DPZ – Dálkový průzkum Země

DSM – Digital Surface Model

DTM – Digital Terrain Model

FOV – Field Of View

GCPs – Ground Control Points

GLONASS – Globalnaja Navigacionalnaja Sputnikovaja Systéma

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

CHM – Canopy Height Model

ICAO – International Civil Aviation Organization

IMU – Inertial Measurement Unit

LiDAR – Light Detection And Ranging

MLS – Mobile Laser Scanning

RMZ – Radio Mandatory Zone

TLS – Terrestrial Laser Scanning

UAS – Unmanned Aerial System

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

ÚCL – Úřad pro civilní letectví

ULS – Unmanned Laser Scanning

1 Úvod

Termín bezpilotní letadlo se do odborného či akademického jazyka překládá jako Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Široká veřejnost pak v běžných sdělovacích prostředcích často používá dnes již velice známý a ustálený výraz „dron.“ Historicky byly první UAV operačním nástrojem armády, teprve až po jejich úspěšném vývoji a testování, se tento koncept ve druhé polovině osmdesátých let dvacátého století přenesl do civilní sféry (Fahlstrom a Thomas 2012). Od té doby začaly UAV nacházet celosvětové uplatnění v mnoha oborech, a především pak v dálkovém průzkumu Země (DPZ).

Uskutečnitelnost sběru dat z UAV v poslední době stoupá exponenciální rychlostí, a to v první řadě díky technologickému pokroku, miniaturizaci komponentů, snadnější přístupnosti dříve nedostupných či velmi drahých GPS přijímačů, výkonu počítačů a vývoji všech senzorů pro DPZ. Konečně pak i kvůli eliminování jejich různých nedostatků. Dnes se tak na trhu vyskytují již velmi pokročilé platformy UAV a předpokládá se, že jejich aplikace v moderním světě bude nadále stoupat.

Současné využití UAV v lesnictví se zaměřuje na inventarizaci lesů, klasifikaci druhů dřevin, nepřímé měření stromových veličin, monitoring průběhu lesních požárů a utváření porostních map. Velmi podstatnou roli zde hraje faktor krátko časového sběru dat. Konkrétně: „Údaje o lesním porostu s rozlohou v řádech jednotek hektarů je možno pomocí metody UAV zpracovat za jediný den.“ Tyto platformy mají mnoho výhod oproti zařízením koncipovaným pro DPZ jako jsou letadla či satelity, především pro možnost jednoduché proveditelnosti sběru dat ve vysokém časovém a prostorovém rozlišení¹⁾ (Torresan et al. 2017), což si v případě, pokud nevlastníme satelit nebo letadlo, nemůžeme dovolit.

Koncept LiDARu, tedy metody dálkového průzkumu země pomocí laserového skenování byl v zájmu lesnictví aplikován už na počátku roku 1970 (Carson et al. 2004). Laserové skenování z UAV v lesních ekosystémech je však záležitostí posledního desetiletí. Je nutno říct, že dosavadní aplikace a testy této metody probíhají hlavně při akademických výzkumech. Nicméně výsledky studií zaměřených na toto téma, spolu s technologickým vývojem predikují, že v blízké budoucnosti bude laserové skenování z UAV využíváno v moderním lesnictví jako standardní nástroj pro inventarizaci lesů (Jaakkola et al. 2010).

¹⁾ Prostorové rozlišení označuje rozměr plochy reprezentované jedním konkrétním pixelem. Například 10 metrů znamená, že jeden pixel na obrázku odpovídá čtverci 10 x 10 metrů na zemi. (Vysokým prostorovým rozlišením jsou pak myšleny centimetry). Časové rozlišení označuje, jak často senzor monitoruje a zaznamenává data. Je to možnost získávání opakovaných snímků, která je považovaná za důležitý faktor při studiu a zkoumání změn na zemi (Vysoudil 1993).

2 Cíl práce

Záměrem této práce je pomocí metody laserového skenování z bezpilotního letounu provést periodický sběr surových dat na zkusné ploše v lesním porostu, ze kterých se pomocí daného programu vyexportují bodová mračna, z nichž se jejich následnou úpravou v prostředí Arc Gis 10.5.1 odvodí taxační charakteristika všech jednotlivých stromů, kterou je výška, dle které se stanoví přírůsty za vegetační období květen až listopad. Současně s tím i detekovat ve vysokém prostorovém a časovém rozlišení jejich individuální pozice s přesným souřadnicovým určením a stanovením rozlohy porostu.

Tato práce je koncipována tak, aby čtenář získal povědomí o legislativních nařízeních, povolených vzdušných prostorech při používání bezpilotních letounů a následném pochopení, na jakém principu je laserové skenování, tedy metoda LIDAR založena. Dále, aby nabyl znalostí o průběhu laserového skenování v lesnické praxi s použitím různých prostředků, a to například letadel, či mobilních zařízení nebo totálních stanic. Konečně pak v hlavním duchu této práce, se čtenář dozví i o konkrétním průběhu laserového skenování z bezpilotních letounů a jeho praktickém využití v lesních ekosystémech. Na čtenáře zde čeká i detailní popis komponentů i celkových vlastností námi použitého bezpilotního letounu při sběru dat a mnoho dalšího, jako například základní definice DPZ.

Všechny tyto informace se opírají o veliké množství literárních zdrojů, ověřených webových článků, zákonů, nařízení vlády a primárně publikovaných článků od různých zahraničních autorů ze spousty, hlavně evropských zemí.

Konečným smyslem je vyhotovení takové práce, podle které bude možno znázorněný proces sběru a zpracování dat zopakovat studentem vysoké školy, či nějakým jiným zájemcem o toto téma, kdy po dočtení této práce získá i velmi detailní vhled do této problematiky a věřím, že se bude těšit z dalšího zájmu se tímto tématem detailněji dále v budoucnu zaobírat.

3 Literární rešerše

3.1 Smysl legislativy pro provoz UAV

Vzhledem k tomu, že UAV jsou uzpůsobeny především k letu a smysl počinání s nimi vychází z jejich schopnosti se vznést do vzduchu a právě létat, spadá jejich legislativní úprava pod sféru letectví. Letectví jako takové, je nesmírně komplexní obor kombinující mnoho technických, manažerských, legislativních, personálních a spoustu dalších odvětví. Bývá regulováno sofistikovaným systémem provozních postupů, předpisů a nadřazených zákonů. Každý předpis vychází z praktické a reálné zkušenosti, mnohdy zaplacené životem. To je jeden z mnoha důvodů celosvětové podpory těchto pravidel formulovaných úmluvou Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO – International Civil Aviation Organization). Kromě ostatních platných právních norem se musí každý uživatel vzdušného prostoru těmito pravidly řídit (Tichý a Karas 2016). Letectví tedy není všední a zatvrzelý obor. Neustále se mění s vývojem nových technologických možností a změnami ve společnosti. Po roce 1989 došlo k uvolnění společenských poměrů a rázem došlo k přístupu zejména k západním inovacím a technologiím. Právě v tomto období vzniká na území střední Evropy obor rekreačního létání, pro který bylo nezbytné určit zcela nové zákony a normy (Tichý a Karas 2016).

A současná situace v inovativní oblasti UAV je velice podobná. Technologický vývoj měl za následek, že dálkově ovládané bezpilotní letouny s dostatečným výkonem pro provádění složitých úkolů během letu a s vybavenými systémy signifikantně zjednodušujícími pilotáž, může dnes zakoupit a pilotovat téměř každý. Takto široká rozšířenost dálkově ovládaných letounů s sebou nese jistá rizika. Například ambice létání do nebezpečných míst jako intravilán, za hranici vizuálního kontaktu, do výšky. V těchto případech může hrozit potenciální případ pádu UAV do zastavěné oblasti, přímého střetu s civilistou, srážky s autem, letadlem. Z výše zmíněných případů vznikl v České republice předpis L2, upravující především jejich profesionální využití (Tichý a Karas 2016).

3.2 Legislativa v ČR

Dohled nad celkovým provozem ve vzdušném prostoru, nad letadlovou technikou a piloty provádí Ministerstvem dopravy zřízený Úřad pro civilní letectví ČR. (ÚCL).

Provoz letadel a civilní využívání vzdušného prostoru podléhá v ČR zákonu č.49/1997 Sb. o civilním letectví (Tichý a Karas 2016).

Dle (§ 2 - 49/1997 Sb.): „*Letadlem se rozumí zařízení schopné vyvozovat síly nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakcemi vůči zemskému povrchu. Pro účely tohoto zákona se nepovažuje za letadlo model letadla, jehož maximální vzletová hmotnost nepřesahuje 25 kg.*“

Pro tuto práci je pak dále potřebná legislativa vymezená pro oblast UAV. Jediným právním dokumentem stanovujícím obligatorní pravidla k provozu všech bezpilotních letounů a modelů letadel se zabývá Doplněk X předpisu L2.

3.2.1 Doplněk X

V platnost vyšel dne 1.3.2012 a pojednává tedy o celkovém předpisu ohledně používání bezpilotních letadel a stanovuje závazná pravidla pro jejich provoz. V současné době se jedná o nejdůležitější dokument, kterým se, pokud létáme s bezpilotními letadly, musíme řídit.

Poznámka: „*V mezinárodním kontextu se jedná o nadřazenou kategorii dálkově řízených letadel, autonomních letadel i modelů. Pro účely tohoto doplnku se bezpilotním letadlem rozumí všechna bezpilotní letadla kromě modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg.*“ (PŘEDPIS L2 DOPLNĚK X, 2018).

Tento předpis dále definuje:

Bezpečnost

Let bezpilotního letadla smí být prováděn jen takovým způsobem, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru, osob a majetku na zemi a životního prostředí.

Zákaz ohrožení bezpečnosti létání ve vzdušném prostoru se neuplatňuje vzájemně mezi modely letadel za předpokladu předchozí dohody zúčastněných pilotů a osob a přijetí přiměřených opatření proti ohrožení bezpečnosti ostatního letového provozu a na ochranu osob a majetku na zemi.

Dohled pilota

S výjimkou, kdy ÚCL povolí jinak, musí být bezpilotní letadlo provozováno v přímém dohledu pilota, tj. takovým způsobem a do takové vzdálenosti, aby:

- a) pilot během poježdění a letu mohl udržovat trvalý vizuální kontakt s bezpilotním letadlem i bez vizuálních pomůcek jiných než brýle a kontaktní čočky na lékařský předpis; a
- b) pilot, nebo kromě pilota i poučená osoba, mohl sledovat a vyhodnocovat dohlednost, překážky a okolní letový provoz.

Odpovědnost

Za provedení bezpečného letu, včetně předletové přípravy a kontroly, je odpovědná osoba, která bezpilotní letadlo dálkově řídí (bez ohledu na úroveň automatizace systému řízení letu) nebo v případě modelu letadla s maximální vzletovou hmotností do 25 kg, který není dálkově říditelný, osoba, která jej vypustila do vzdušného prostoru (pro účely tohoto doplňku dále jen „pilot“).

Pilot odpovídá za to, že:

- a) bezpilotní systém bude používán pouze k účelu, ke kterému byl navržen a vyroben, případně, k němuž byl schválen ÚCL; a
- b) bude provozovat pouze bezpilotní systém, jehož způsob použití a technické parametry jsou v souladu s požadavky, které tento doplněk obsahuje, nestanoví-li ÚCL jinak.

Vlastník nebo provozovatel bezpilotního systému musí na žádost ÚCL umožnit provedení kontroly provozu a letové způsobilosti bezpilotního systému v rozsahu dle požadavku ÚCL.

Pilot musí zaznamenávat informace o letu do deníku letadla nebo rovnocenného dokumentu. Informace musí obsahovat datum letu, jméno pilota, označení letadla, místa vzletu a přistání, dobu letu a celkovou dobu letu, druh letové činnosti a potenciální události související s bezpečností letu.

Za zachování letové způsobilosti bezpilotního systému je odpovědný jeho vlastník.

Předpis rozděluje bezpilotní systémy jako:

Bezpilotní letadlo (UA)

Letoun, určený k provozu bez fyzické přítomnosti pilota na palubě.

Autonomní letadlo

Bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu.

Bezpilotní systém (UAS)

Propojení bezpilotního letadla s řídicí stanicí a kteréhokoliv prvku potřebného k provedení letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic či zařízení může být pro vypuštění a návrat v rámci bezpilotního systému více.

Model letadla

Letadlo, které není schopné nést člověka na palubě. Význam slova model nám naznačuje, že je letadlo využíváno, pro soutěžní, rekreační, sportovní nebo zájmové aktivity. Není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuálním dohledu.

V praktickém využití pro lesnickou praxi se uplatňují bezpilotní systémy.

Rozděluje bezpilotní letouny dle vzletové hmotnosti

Maximální vzletovou hmotností se dle (PŘEDPIS L2 DOPLNĚK X, 2018) rozumí: Hmotnost bezpilotního letadla včetně vybavení, provozních náplní, paliva a přidaného nákladu před zahájením vzletu nebo maximální vzletová hmotnost bezpilotního letadla schválená v rámci povolení k létání vydaného ÚCL, bylo-li toto povolení vydáno.

Tabulka č. 1 přehledně popisuje rozdělení bezpilotních letounů podle vzletové hmotnosti, účelu použití, požadavků a legislativních nařízení.

Tabulka 1: Tabulka 1 (viz ust.16) (PŘEDPIS L2 DOPLNĚK X, 2018)

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 ¹	ne / 1	dle nař. č. 785/2004 ¹	ne / 3 od 20 kg dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹	dle nař. č. 785/2004 ¹
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

Létání s letadlem bez pilota pak definuje zákon (§ 52–49/1997 Sb.) takto: „*Letadlo způsobilé létat bez pilota může létat nad územím České republiky jen na základě povolení vydaného Úřadem a za podmínek v tomto povolení stanovených. Úřad povolení vydá, nebudou-li ohroženy bezpečnost létání ve vzdušném prostoru, stavby a osoby na zemi a životní prostředí.*“

3.2.2 Prostory

Provoz bezpilotního letadla je povolen ve vzdušném prostoru třídy G. Tento prostor je limitován výškou 300 metrů od zemského povrchu. Nadále pak v letištní provozní zóně (ATZ) anebo v aktivované oblasti s povinným rádiovým spojením (RMZ). Provoz bezpilotního letadla nesmí být prováděn v národních parcích, zakázaných, nebezpečných a jiným uživatelem aktivovaných omezených, rezervovaných a vyhrazených prostorech s výjimkou, kdy tak povolí ÚCL (PŘEDPIS L2 DOPLNĚK X, 2018).

3.2.3 Mapa pro předletovou přípravu UAV

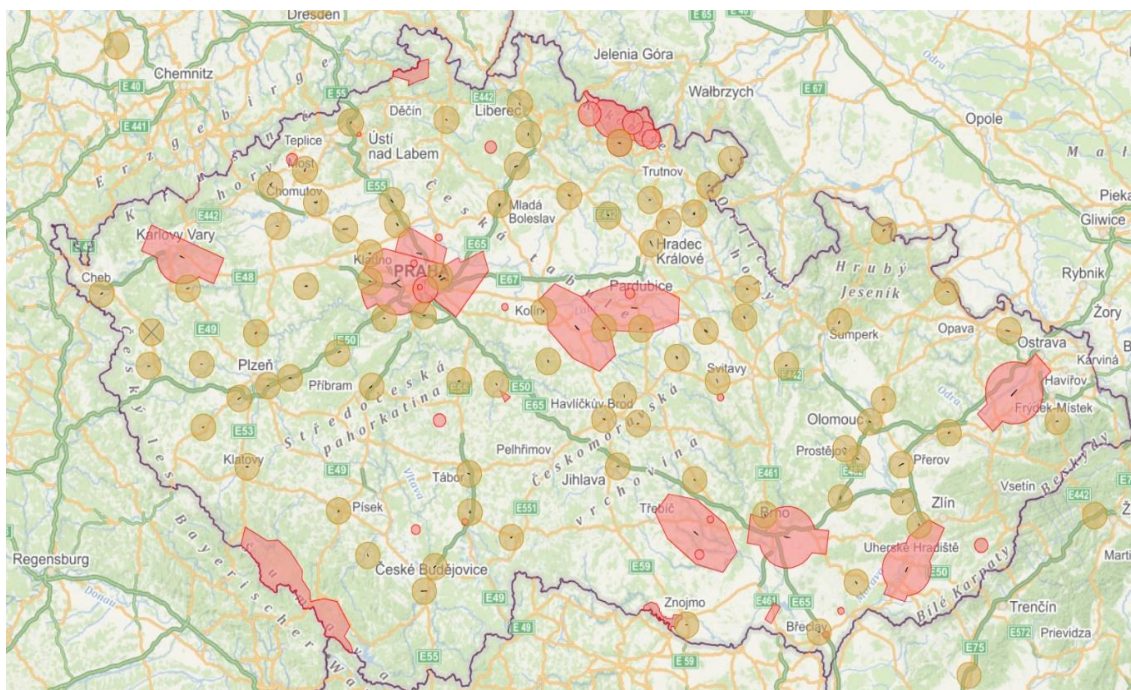
Obrázek č. 1 vyznačuje prostory pro let s UAV.

Černé linie uprostřed zabarvených oblastí značí letiště. Zabarvené oblasti kolem nich značí pak ochranná pásma letiště.

Neoznačený prostor na mapě symbolizuje prostor G. V tomto prostoru je možno létat bez omezení do maximální výšky 300 metrů nad zemí. Podmínkou však je nutnost vyhnout se nadzemním dopravním stavbám, trasám inženýrských a nadzemních telekomunikačních sítí, zvláště chráněným územím, vodním zdrojům a objektům pro obranu státu. V případě nutnosti letu do takových to prostorů, je třeba požádat ÚCL o povolení.

Červeně vyznačené jsou prostory, kde je let možný pouze pokud vlastníme příslušné povolení a dodržujeme striktně nařízené podmínky. Spadají sem i oblasti národních parků.

Žlutě vybarvené jsou prostory, kde musíme dbát zvláštní pozornosti. Let je nutné uskutečnit mimo ochranná pásma letiště. Uvnitř pouze se souhlasem provozovatele letiště.



Obrázek 1: Mapa pro předletovou přípravu UAV (DronView 3.7 ŘLP ČR s.p.,)

3.3 Dálkový průzkum země

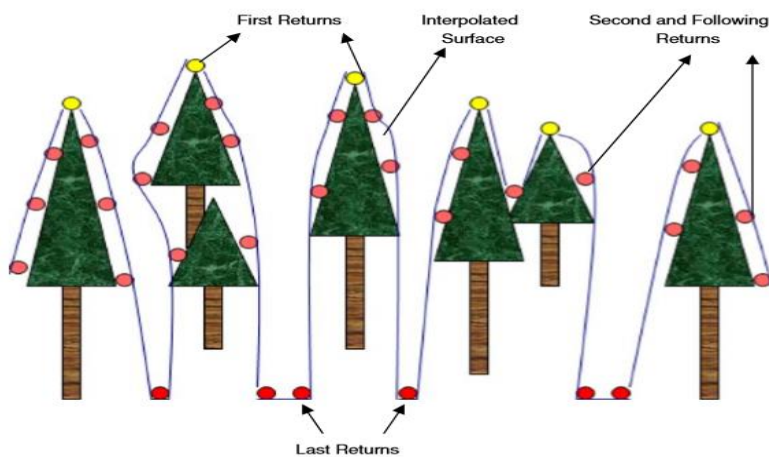
Proces laserového skenování spadá pod oblast DPZ. V širokém pojetí jde o získávání informací o vlastnostech objektů a probíhajících procesech na nich, které není ve fyzickém kontaktu se studovaným objektem. Při tomto postupu se tak využívají družice, satelity, letadla, lodě a v konečném případě i drony, k znázornění výstupů pro získání informací o prostředí. Tato technika využívá zařízení jako fotografické komory, přijímače radiových vln, sonary, seizmografy, gravimetry, magnetometry, radiometry a právě i lasery (Murdoch 1985).

LiDAR je metoda DPZ s využitím laseru.

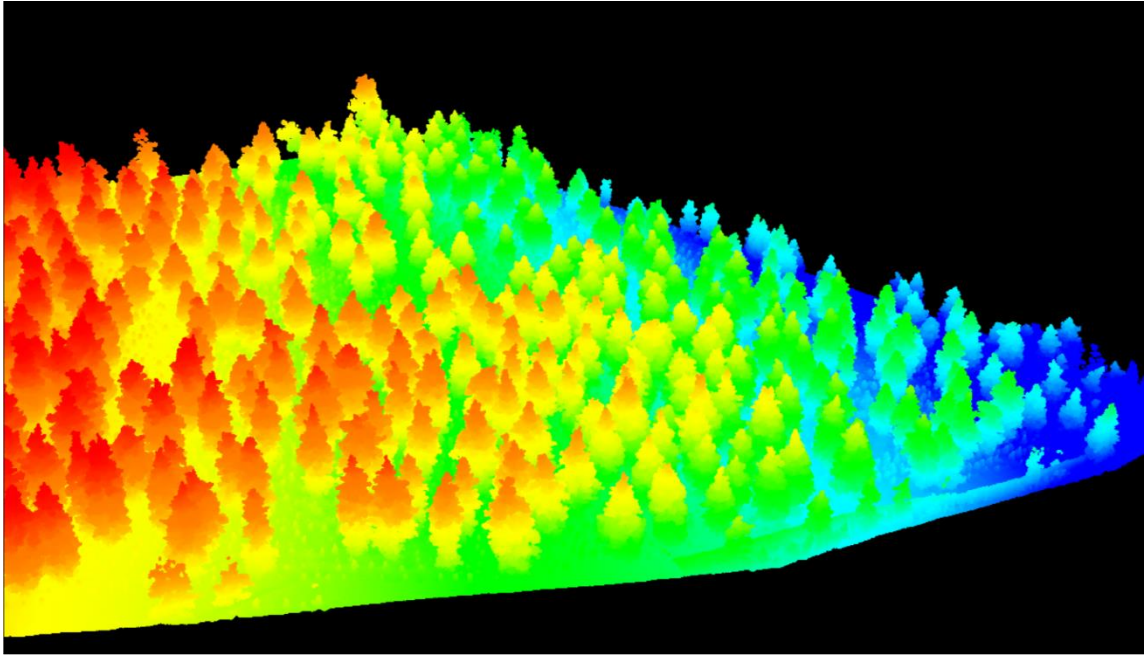
3.4 LiDAR v lesnické praxi

Správa lesů a jejich zásob v rozsáhlých oblastech bývá často velmi náročná. Je zapotřebí získat odpovídající množství dat v terénu a poté je zpracovat v kanceláři či příslušném podniku, aby bylo možné dosáhnout potřebných informací. Tento proces si klade vysoké nároky jak na čas, tak na lidské zdroje. A právě inovativní LiDAR technologie dálkového průzkumu se na počátku 21. století stala potenciálním nástrojem v lesnictví, jenž tento proces sběru a zpracování dat, může efektivně urychlit.

Principem fungování LiDARu při sběru dat v lesních ekosystémech, je vystřelování jednotlivých laserových pulzů a poté zaznamenání jejich zpětného odrazu. Z času, který potřebuje laserový pulz k návratu zpět do nástroje LiDARu se vypočítává vzdálenost od cíle, pomocí ní se určí poloha bodu. Například: První odrazy se zaznamenají a stanoví jako povrch korunné části stromu, další odrazy zpravidla reprezentují strukturu koruny, případně kmene, poslední návraty se zaznamenají jako zemský povrch viz obrázek č. 2. Dohromady pak zaregistrované body tvoří soubor nazývaný bodové mračno, ze kterého lze vytvořit trojrozměrný model cíleného objektu viz obrázek č. 3. Z vymodelované 3D struktury lze determinovat šířku koruny, výšku stromu, průměr kmene nebo určit počet a polohu stromů v porostu či zjistit rozlohu území. Z posledních návratů je pak nástroj LiDAR schopen poskytnout údaje o DTM – (Digital Terrain Model) viz obrázek č. 4, které mohou lesním inženýrům pomáhat při určování způsobu těžby či k navrhování lesních cest, lanovek a jiných lesnických staveb (Akay et al. 2009).



Obrázek 2: Odrazy laserových pulzů od různých částí zápoje (Akay et al. 2009)



Obrázek 3: 3D model lesního prostoru zobrazený pomocí Quick Terrain Reader



Obrázek 4: 3D DTM vytvořený z LiDAR datového souboru (Akay et al. 2009)

LiDARové měření je prováděno čtyřmi způsoby a to ALS, TLS, MLS a ULS.

3.4.1 ALS

ALS je metoda laserového skenování z letadel.

Mezi prvními autory, kteří provedli sběr dat pomocí ALS byl NÆSSET Erik. Výzkum publikoval ve své studii (Næsset 2002), která popisuje, jak probíhal získ průměrné výšky stromů, průměrů kmene a celkového objemu dřeva ze 144 georeferenčních ploch z nepřímého měření celkové výšky a hustoty zápoje pomocí dat získaných z letecky neseného laserového skeneru s využitím regresní analýzy. Následně byla tato data porovnána s daty, které ze stejných pozemků byly nasbírány pomocí standardních metod lesní inventarizace. Měřené zkusné plochy způsobem ALS byly systematicky rozděleny

podle kvality místa a věkové třídy na plochu čítající 1000 ha. Velikost každého pozemku byla 200 m². Výsledky vykazaly, že standardní odchylky rozdílů mezi laserovým měřením a klasickým dendrometrickým měřením byly pro průměrnou výšku 0,61 – 1,17 m, průměr kmene 1,37 – 1,61 cm a objem dřeva 18,3-31,9 m³ ha⁻¹ na hladině pravděpodobnosti $p > 0,05$. Dominantní zastoupení na měřených plochách měly *Picea abies* (L.) Karsten a *Pinus sylvestris* L. Dendrometrický sběr dat se odehrál v létě roku 1999. Laserový sběr dat byl proveden v červnu téhož roku, přičemž letadlo letělo přibližně 700 m nad zemí s rychlostí 71 m s⁻¹.

Studie (Akay et al. 2009) se zaobírá výzkumy různých autorů, zaměřenými na využití ALS v oblasti lesnictví. Jsou jimi především:

Brandtberg (Brandtberg et al. 2003) provedli studii, která se jako jedna z prvních kromě, vývoje a otestování relativně snadné metodiky pro detekci korun individuálně stojících stromů, posouzení přesnosti stanovení výšek stromů, zabývala výzkumem ohledně potenciálu hodnocení a rozpoznávání listnatých stromů jako *Quercus*, *Acer* a *Populus* v Severní Americe pomocí dat získaných z ALS. Cílem, bylo vyvinout jednoduchou metodu, která detekuje koruny stromů, ze kterých se klasifikují jednotlivé druhy dřevin. Pro vybrané oblasti na zkusné ploše o rozloze 6 ha byla rozmístěna 2D mřížka s rozlišením 25 cm na pixel. Výsledky dokázaly, že nejvyšší správnost určení druhů stromů za použití LiDARu byla dosažena při porovnání disturbance výšek mezi skupinami druhů. Determinace druhů dřeviny nebyla tak přímo spojena s rysem konkrétního druhu. Konkrétně touto metodou determinovaly správně 55/200 ks *Quercus*, 96/200 ks *Acer* a 150/200 ks *Populus*.

Ve studii (Pitka et al. 2004) byla použita data získaných z ALS k odhadu specifických parametrů inventarizace lesů zahrnující především objem a počet stromů. Zastoupení zde tvořily dřeviny jako *Picea abies* (L.) Karsten (50%), *Pinus sylvestris* L. (35%), *Betula pendula* Roth (15%). Výzkum se zaměřoval na vymezení a charakteristiku jednotlivých stromů pomocí dat sesbíraných z ALS, které byly následně porovnány s daty sesbíranými v terénu. Výsledky ukázaly, že objem dřeva určený pomocí laserového skenování byl na uspokojivé úrovni, počet stromů byl však podhodnocen z důvodu hustoty korunového zápoje a střední vegetační vrstvy pod zápojem. Výsledky studie demonstruje tabulka č. 2.

Tabulka 2: Objem dřeva a počet stromů podle terénních dat versus dat z LiDARu (Pitka et al. 2004)

Sample plots	Timber volume (m^3ha^{-1})		Number of stems	
	Field data	LiDAR data	Field data	LiDAR data
1	345.3	266.3	425	267
2	448.3	375.1	700	378
3	532.7	440.4	856	322
4	416.7	322.3	1656	289
5	297.0	196.5	656	233
6	316.8	211.6	672	240
7	287.4	197.8	622	244
8	126.6	77.3	478	233
9	375.6	286.1	678	333
10	217.1	172.3	833	300
Average	336.3	254.5	756	284

Autoři studií se pak shodují, že přesnost a účinnost této metody bývá z pravidla lepší při skenování primárně jehličnatých, či obecně všech porostů s řidším korunovým zápojem a menším zakmeněním, neboť laserové pulzy nemusí procházet složitou a spletitou strukturou lesní vegetace.

3.4.2 TLS

TLS je metoda pozemního laserového skenování.

O TLS tvrdí (Brede et al. 2017), že je náročné z hlediska potřebného času personálu pro sběr dat. Navíc nemusí laserový paprsek detekovat vždy vrchol zápoje. Na druhou stranu dle (Brede et al. 2017) TLS produkuje bodová mračna s hustotou až miliony bodů na skenovaný objekt. Geometrické modely těchto bodových mračen jsou schopny rekonstruovat velmi hustou 3D architekturu a lze na jejím základě určit přesný objem či tloušťku. Důraz při tomto způsobu je pak především kladen na skenování objektu z různých pozic v lese, což znamená časově náročný proces trvající 3 až 6 dní na hektar (Wilkes et al. 2017).

3.4.3 MLS

MLS je metoda mobilního laserového skenování, kdy je laserový skener umístěn na pohybu schopném zařízení, nejčastěji automobilu. Dle (Liang et al. 2014) spočívá největší výhoda této metody, ve srovnání s TLS, v podstatně rychlejším sběru dat, bez nutnosti manuálního přenášení těžkých zařízení a vybavení pro laserové skenování. Výsledná přesnost a struktura bodových mračen získaných z MLS v porovnání s TLS je velmi shodná.

Nicméně spousta studií zaměřená na lesnické využití byla převážně prováděna v městském prostředí, kde na rozdíl od lesního prostředí, které je charakteristické členitým terénem a častými překážkami, mezi něž patří například mrtvé dřevo, spadané stromy či keře nebo sazenice, je přístup do mapované lokality s mobilním zařízením a proces sběru dat podstatně snadnější.

Studie (Holopainen et al. 2011) vyhodnocuje přesnost měření MLS při inventarizaci stromů v urbanizovaném prostředí a uvádí, že touto metodou lze velmi rychle a snadno zmapovat stromy ve městech či parcích a získat tak přesné údaje potřebné pro jejich inventarizaci. Především kvůli velmi snadnému přístupu umožněnému díky husté silniční síti a bez překážkového terénu.

Studie (Wu et al. 2013) pak říká, že tato metoda bude do budoucna nacházet své uplatnění při lesním hospodářství právě v urbanizovaných lokalitách, kde bude schopna plně využít svého potenciálu.

3.4.4 ULS

Je metoda laserového skenování z bezpilotních letounů.

Dle studie (Wieser et al. 2017) se možnost rychlého datového sběru a pozorování země z ptáčích perspektivy pomocí ULS těší v poslední době z velké popularity. Výhodou je, že UAV mohou létat níže nad terénem než letadla s posádkou, takže lze získávat data s větším rozlišením. Redukují finanční i časové náklady, jelikož jsou schopna pracovat prakticky samostatně.

(Puliti et al. 2015) říká, že ve srovnání s tradičními platformami pro získání dálkově snímaných dat (např. satelity nebo letadla s posádkou), jsou UAV při provádění měření v lesních oblastech s rozsahem od 1 do 10 km² nejučinnější. Schopnost provádět vysoké prostorové a časové rozlišení představuje významný potenciál při sběru dat pomocí ULS. Společně s provozní flexibilitou, pracovní přizpůsobitelností, rychlým a nízkonákladovým datovým sběrem bude mít tato metoda pravděpodobně velice pozitivní dopad na budoucí výzkumné, ale i komerční studie lesů.

3.5 Konkrétní aplikace ULS v lesnictví.

Jako vůbec první klasifikace lesního porostu s využitím ULS metody byla provedena a popsána ve studii (Jaakkola et al. 2010). Použité UAV zde bylo vybaveno polohovacím systémem GPS/IMU, dvěma laserovými skenery Ibeo Lux a LMS151, CCD kamerou,

spektrometrem a termo kamerou. Současně tak bylo možné zaznamenávat bodová mračna a odvozovat z nich 3D modely stromů a zároveň sbírat obrazová data, ze kterých lze vytvořit ortofoto mapu. V této studii byly uskutečněny tři testovací lety ve dnech 2.10., 8.10., 15.10. roku 2009 ve Vanttille, na území jižní části Finska. Výšková hladina letu byla 10 až 40 metrů nad zemí a hustota bodového mračna se pohybovala v rozmezí od 100–1500 bodů na m². Ze získaných, zpracovaných dat z bodových mračen bylo možné určit tvar koruny, výšku a souřadnicové umístění jednotlivých stromů. Výsledky byly následně porovnány s pozemním polohovým určením jednotlivých stromů a ručním stanovením jejich výšky. Směrodatná odchylka pro výšky byla v průměru 30 cm a pro souřadnicové stanovení polohy stromu 14 cm.

Dále v tomto experimentu bylo testováno, zdali tímto způsobem lze detekovat změny stromové defoliace. Při tomto procesu byla postupně ručně defoliována *Pinus sylvestris* L. v sedmi fázích. Po každém odlisťení byl pak odebraný materiál zvážen. Laserovým skenováním z UAV byla pak každá fáze defoliace zaznamenána. Pro odhad změn biomasy byl spočten poměr mezi počtem zaznamenaných stromových a pozemních bodů. Výsledky vykazaly velmi vysokou korelaci mezi poměrem odebrané biomasy, stromovými a pozemními body. Determinační koeficient R² vykazoval hodnotu 0,92. To indikovalo, že ULS může poskytovat spolehlivé výsledky při měření změn stromové biomasy a defoliace. Celkově tak studie potvrzuje kvalitu a účinnost systému laserového skenování. A vzhledem k tomu, že před touto studií nebyla provedena žádná jiná práce na toto téma, autoři poukázali na značný potenciál této metody a otevřeli dveře dalším výzkumům.

Studie (Wallace et al. 2012) demonstruje jak LiDAR nesený na UAV shromažďuje prostorově přesná a hustá bodová mračna při cílení na individuálně stojící stromy. Z výsledných bodových mračen o hustotě 62 bodů na m² byly determinovány výšky stromů, jejich umístění a šířky korun s rozdílem, oproti standardním dendrometrickým způsobům měření o 0,05 metrů pro výšky, 0,44 metrů pro umístění a 0,25 metrů pro šířky korun. Výsledky, které tímto výzkumem získaly hodnoty jako pozitivní a potvrzují, že systém ULS je vhodným nástrojem pro hodnocení struktury lesa na úrovni jednotlivých stromů. V závěru studie poukazuje na potřebu dalších výzkumů se zaměřením na provádění lesních průzkumů ohledně zpřesňování modelů růstů lesů, monitoring zdraví a defoliace stromů.

Studie (Wieser et al. 2017) se zabývá stanovením DBH z nasnímaných bodových mračen metodou ULS, ze kterých byla vymodelována 3D struktura kmene pomocí

referenčních válců²⁾. Pro zodpovězení otázky, zda ULS může být vhodnou metodou k přesnému zjišťování DBH, byly výsledky měření porovnány s ručním měřením DBH a DBH odvozeným z TLS. Závěry uvádějí, že přesnost závisí na průměru kmene. Kmeny s DBH od 20 do 40 cm vykazují téměř 100 % korelaci od referenčních DBH s rozdíly od 9 % do 1,8 %. S růstem stromu se tedy přesnost odvozování jeho DBH pomocí ULS zvyšuje. Studie probíhala v oblasti nacházející se na dolním toku řeky Pielach v Dolním Rakousku. Konkrétní zaměření na lužní oblast bylo pro její pestrost druhů dřevin, složitou vegetační strukturu včetně mrtvého dřeva a hustého keřového i bylinného patra. Sběr dat byl proveden 26. února 2015 pomocí RiCOPTERu s VUX-SYS senzory. Letovou posádku tvořil pilot a operátor odpovědný za vedení letové mise. UAV letělo samostatně po předem naprogramované trase rychlostí 8 ms⁻¹ ve výšce 50 m nad zemí.

Brede ve své studii (Brede et al. 2017) představuje výsledky a prezentuje první zkušenosti s RIEGL RiCOPTER s VUX R -1UAV, které porovnává s RIEGL VZ-400 TLS. Studované lesní pozemky byly naskenované pomocí obou systému. Průzkum byl proveden na jaře roku 2017, když stromy nebyly ještě úplně olistěny, v Holandském národním parku Veluwe. Druhovou lesní skladbu mapované oblasti tvořily dřeviny *Fagus sylvatica* L., *Quercus robur* L.f. *slavonica* Gayer, *Quercus petraea* (Mattyscha) Liebl. a *Ilex aquifolium*. Z výsledných bodových mračen byly odvozeny digitální terénní modely (DTMs), Digitální povrchové modely (DSMs) a výšky zápoje (CHMs). CHMs zaznamenané pomocí ULS vykazovaly v průměru o 11,5 cm větší výšku oproti TLS metodě, což se dalo očekávat, díky neschopnosti metody TLS přesně detekovat vrcholy stromů. Dále pomocí obou metod byly naskenovány kmeny 58 stromů, z nichž 39 bylo použito pro odhad DBH. Výsledky DBH při porovnání vykazovali vysokou shodu s determinacním koeficientem $R^2 = 0,98$ a střední kvadratickou chybou 4,24 cm. Závěr studie pak tvrdí, že ULS má potenciál odvozovat spolehlivé výsledky ohledně CHM a DBH.

²⁾ Metoda referenčního válce znamená, že strom je rozdělen na jednotlivé segmenty, které se dále dělí na další pod segmenty, které jsou co nejrovnější a mají konstantní tloušťku. Každý tento pod segment se nahradí referenčním válcem, aby bylo možno hodnoty co nejlépe a nejpřesněji spočítat (Åkerblom et al. 2012).

4 Metodika

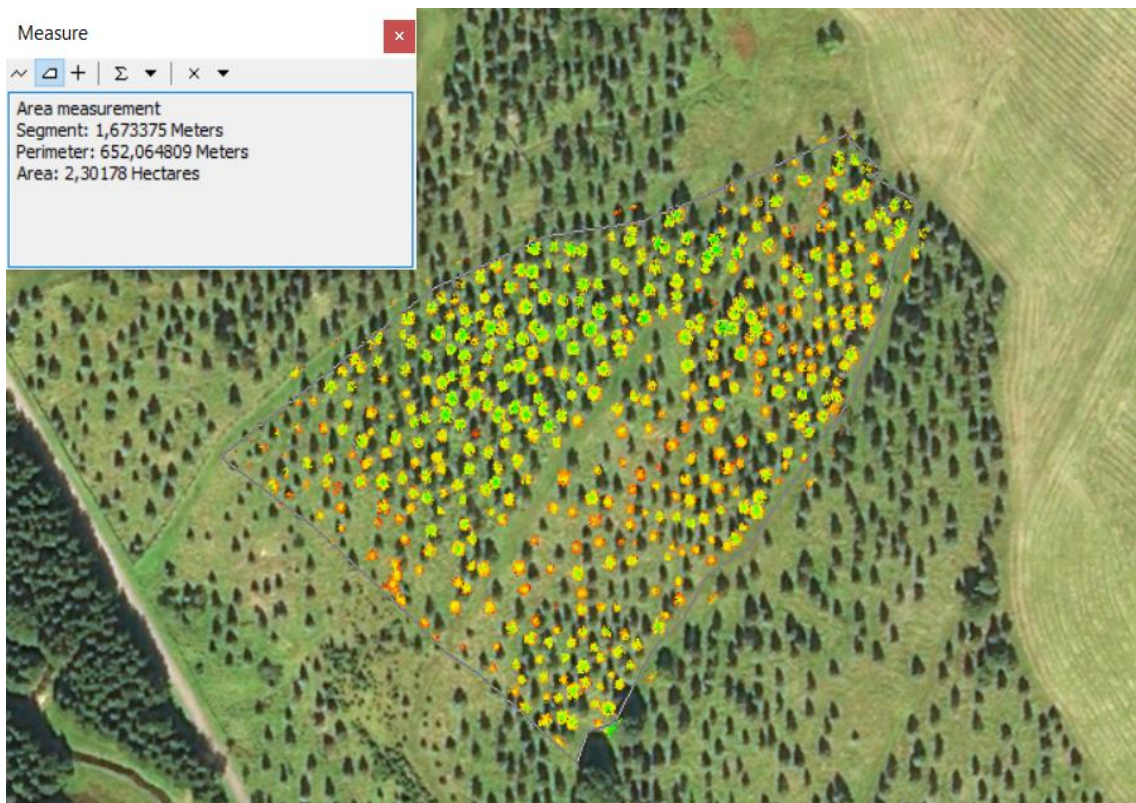
Realizace laserového skenování z bezpilotního letounu byla vždy jednodenní. Konala se ve třech měsících a to květen, červenec a listopad roku 2019 pod vedením katedry hospodářské úpravy lesa ČZU v Praze na zkusné ploše, která spadá pod okres Teplice v Ústeckém kraji. Lokalita zkusné plochy se nachází východně necelé 2 kilometry od nádrže Fláje v Krušných horách a necelé 4 kilometry západně od osady jménem Nové Město viz obrázek č. 5. Ortofoto zkusné plochy čítající 2,3 ha pak demonstruje obrázek č. 6.

Porost je zalesněn smrkem pichlavým *Picea pungens Englem.*, disponuje velmi redukováným zakmeněním a věkem 40 let. Jedná se o náhradní porost na imisních holinách. Smrk pichlavý byl takto v osmdesátých letech dvacátého století sázen, neboť v pokročilém věku nesnese hustý zápoj. Z tohoto důvodu tak byla zkusná plocha optimální pro náš výzkum, neboť laserové paprsky nemusely procházet skrze hustý zápoj a laserový skener byl tak schopen velmi přesně registrovat hodnoty jejich zpětných odrazů, jako jednotlivé body vegetační struktury, které následně ukládal do souboru bodového mračna, jenž obsahoval konkrétní údaje potřebné pro inventarizaci a náš výzkum.

Sběr referenčních dat probíhal pouze v listopadu.



Obrázek 5: Mapa demonstrující lokalitu zkusné plochy (Seznam.cz 2020)



Obrázek 6: Ortofoto mapa zkusné plochy

4.1 Popis používaného UAV pro sběr dat v lesních ekosystémech

Používaným UAV pro sběr dat v lesních ekosystémech s využitím laserového skenování byl RiCOPTER vyvinutý Rakouskou firmou RIGEL viz obrázek č. 7.

RiCOPTER

Je vysoce výkonná, spolehlivá, multirotorová platforma – koptr. Robustní plošina poskytuje plně elektronickou a mechanickou integraci senzorových systému do trupu letadla. Velmi lehký hlavní rám je tvořen z uhlíkových vláken, nosná ramena vrtulí jsou skládací pro praktickou přepravu. Nárazuvzdorný podvozek pak umožňuje stabilní vzlet, let a bezpečné přistání. Samotné letové vlastnosti jsou hladké a ustálené, a to i při náročných leteckých manévrech nebo za obtížných meteorologických podmínek (RIEGL Laser Measurement Systems 2020b).



Obrázek 7: RiCOPTER před vzletem (Foto: Autor)

Technická data RiCOPTER(U)

Tabulka 3: Specifikace a Výkon. (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a)

Hlavní rozměry (Délka, šířka, výška)	
Připraven k letu	1,920 mm x 1,820 mm x 470 mm
Připraven k přepravě	624 mm x 986 mm x 470 mm
Maximální vzletová hmotnost	25 kg
Samotná váha	11 kg
Maximální testovaná nadmořská výška	4000 m (13,100 ft) ^{1) 2) 3)}
Maximální doba letu	30 min ⁴⁾
Rychlost letu	6-8 m/s
Vzlet a přistání	Vertikální
Přepravní box pro RiCOPTER (Délka, šířka, výška)	1,220 mm x 810 mm x 540 mm

¹⁾ Záleží na nastavení vrtulí.

²⁾ Pro letovou nadmořskou výšku musí být dodrženy provozní limity pro civilní bezpilotní letouny podle vnitrostátních předpisů.

³⁾ Pro lety nad výšku 3000 metrů nad mořem piloti potřebují speciální výcvik.

⁴⁾ S 6.5 kg těžkým senzorem.

Tabulka 4: Omezení. (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a)

Maximální rychlost letu	14 m/s
Maximální tolerance nárazovosti větru	8 m/s
Maximální rychlost stoupání	5 m/s
Maximální rychlost klesání	2 m/s

Tabulka 5: Teplotní podmínky. (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a)

Minimální	-5 °C (Venkovní teploty)
Maximální	+40 °C (Venkovní teploty)

4.1.1 RIEGL VUX-SYS

RiCOPTER s VUX-SYS.

Pro získání vysoce přesných laserových skenů a obrazových dat ve vysokém rozlišení je RiCOPTER vybaven RIEGL VUX-SYS.

RIEGL VUX-SYS je kompletně miniaturizovaný laserový skenovací systém s nízkou hmotností, navržen pro flexibilní využití v oblasti UAV/UAS. Zařízení sestává z laserového LiDAR skeneru RIEGL VUX-1UAV, systému GNSS/IMU, řídicí jednotky, 2 volných kamer, precizního gyroskopu s optickými vlákny a přijímače GPS/GLONASS. Díky těmto komponentům je systém schopen velmi přesně měřit, zaznamenávat a determinovat data (RIEGL Laser Measurement Systems 2020a).

VUX-1UAV LiDAR: Je relativně lehký (3,75 kg) a kompaktní laserový skener se skromnou spotřebou energie vyžadující pouze jeden zdroj napájení. Všechna sesbíraná data jsou ukládána do interní paměti HDD s kapacitou 1TB. Poskytuje vysokorychlostní sběr dat pomocí infračervených laserových paprsků. Rychlost skenování může být až 200 skenů za sekundu s přesností 10 mm. Spolehlivé měření může být prováděno z výšky přes 300 metrů nad terénem, zorné pole - Field of View (FOV) dosahuje až 330 ° a přístroj je schopen dokonale dodržovat paralelní skenovací linie (RIEGL Laser Measurement Systems 2020b).

- LiDAR: (Light Detection And Ranging) je metodou DPZ za použití laserového systému, který počítá vzdálenosti pomocí odrazu laserových paprsků od právě zasažených objektů či zemského povrchu. Principem je tedy vystřelování světelných impulzů (laserových paprsků) do cíle a následné zaznamenání jejich

zpětného návratu. Vzdálenost se určuje jako doba, za kterou laserové paprsky letí tam a zpět do nástroje LiDARu. Výsledkem tohoto mapování je datový soubor bodového mračka, ze kterého lze po dalším zpracování vytvořit 3D prostorovou architekturu nasnímaného prostoru. (Akay et al. 2009).

GNSS: Global Navigation Satellite System. (Globální navigační satelitní systém). Je síť satelitů, která nepřetržitě přenáší kódované informace, díky kterým je možno skrze propojení přes radiové přijímače přesně vypočítat polohu na Zemi s přesností od desítek metrů až po jednotky centimetrů tím, že měří vzdálenosti současné pozice od satelitů. V současné době jsou známy čtyři konstelace GNSS – GPS (Global Positioning System), GLONASS (Globalnaja Navigacionalnaja Sputnikovaja Systéma), Galileo a Compass (Bhatta 2010). Technologie GNSS je hojně využívána v činnostech DPZ jako navigace leteckých zařízení během získávání dat (Lillesand et al. 2015).

IMU: Inertial Measurement Unit (Inerciální měřicí jednotka). Provádí měření, jejíž hodnoty slouží pro výpočet pohybu, zrychlení a polohy v čase. Je zcela soběstačná a nezávislá na okolním prostředí čili nepotřebuje propojení s vnějšími objekty jako satelity a družice. Navíc je odolná vůči vlivům jako počasí, elektronické rušení apod. Pokud se však sloučí i se systémem GNSS, dojde k velmi vysokému zpřesnění určení polohy a navigace. (Horák 2012). Váží 0,7 kg.

Přijímač GPS a GLONASS: Je zařízení, které přijímá signály z GPS a GLONASS za účelem stanovení aktuální polohy zařízení na Zemi. Tyto zařízení poskytují informace o zeměpisné šířce, délce a výšce. (Miller Jones 2011). Vzájemně se pak doplňují, a jsou tedy schopny rozpoznat se vzájemnou korelací systému GNSS a IMU polohové určení RiCOPTERu v době letu.

Gyroskop s optickými vlákny: Gyroskopy obecně jsou senzory používané k měření úhlové rotace kolem zadaného směru vzhledem k inerciálnímu vztažnému systému. Hlavním rysem vláknového optického gyroskopu je, že světlo je rozděleno na dva svazky a vedeno protiběžně po uzavřené dráze optického vlákna navinutého na kruhovou cívku. (Horák 2012). Díky této technologii je schopen RiCOPTER s VUX-SYS stabilizovat senzor, detekovat změny polohy a pohybu, měřit náklon a rozpoznat převrácení. Dále pak slouží ke korekci a zpřesnění polohy získané ze systému GNSS.

Řídící jednotka: Koordinuje a udržuje celý VUX-SYS v chodu. Je mozkiem celého systému. Váží 0,9 kg.

4.2 Provedení sběru referenčních dat na zkušných plochách pomocí metod používaných v praxi

Sběr referenčních nebo také pozemních dat probíhal 15. a 16. listopadu 2019. Data byla získávána a posuzována okulárně. Byl zhodnocen tvar korun stromů, a dále pak jejich zdravotní stav, a to tak, zdali stromy byly živé, mrtvé anebo zlomené. Všem stromům byla následně přiřazena pořadová čísla. Celkový počet smrků na zkušné ploše čítal 460 ks. Díky těmto datům tak bylo možné ověřit výsledky našeho výzkumu.

Pokud víme, že tato data byla sesbírána v listopadu a stromy byly zdravé, budou jistě vykazovat přírůst od doby prvního laserového skenování. Stejně tak pokud byly stromy mrtvé, žádný přírůst vykazovat nebudou a jestliže byly zlomené, budou vykazovat negativní přírůst. Přesné hodnoty všech těchto přírůstů byly získány zpracováním dat z laserového skenování.

4.3 Laserové skenování na zkušných plochách pomocí bezpilotního letadla v součinnosti s katedrou HÚL

Jak bylo zmíněno výše, sběr dat byl uskutečněn v květnu, červenci a listopadu. Postup při sběru dat byl u všech tří sběrů dat obdobný a probíhal následovně:

Po příjezdu na zkušnou plochu bylo nutné vytvořit optimální pracovní zázemí, přichystat všechny pracovní pomůcky, uzpůsobit pracovní plochu a připravit UAV k sběru dat.

Prvním krokem bylo postavení pozemní řídicí stanice (Ground Control Station). Ta sestávala z notebooku, ve kterém byl nainstalován software, který poskytoval záznam letové trasy UAV, díky signálům z radiového přijímače, jenž byl s UAV a notebookem propojen. Nakonec byl k notebooku připojen externí napájecí zdroj, jenž poskytoval energii pro radiový přijímač. Pozemní řídicí stanici lze vidět na obrázku č. 8.



Obrázek 8: Pozemní řídicí stanice (Foto Autor)

Dalším krokem bylo vytvoření startovací/přistávací plochy pro UAV. K tomuto účelu nám posloužila modrá plachta, jenž byla pomocí železných kolíků upevněna k zemi, aby byl pro UAV zajištěn bezpečný start a přistání. Tato plocha je znázorněna na obrázku č. 9.



Obrázek 9: Startovací/přistávací plocha pro UAV (Foto Autor)

Dále bylo potřeba nachystat samotné UAV. Z důvodů bezpečnosti bylo však nutné před spuštěním UAV zapnout jako první rádio k dálkovému řízení letu UAV. V opačném případě by totiž mohly nastat situace, jako aktivace rotorů, popř. jiných části UAV v nesprávný okamžik, a tím pádem narušení celého průběhu sběru dat. Konkrétní typ ovládacího zařízení byl Remonte control Graupner MC32 HOTT. Poté následovalo vyndání UAV z přepravní bedny a postavení jej na startovací plošinu. Dále pokračovalo rozložení jeho jednotlivých ramen nesoucí vrtule, z vrtulí bylo nutné sundat ochranné obaly. Následně byla k UAV připojena první sada čtyř baterií. Pro všechny baterie se vyžaduje jejich plné nabití na stejnou hodnotu. V záloze byla připravena druhá sada čtyř baterií. Zde je nutné, aby byly vždy zapojeny baterie ze stejné sady.

Po zapojení baterií bylo zapnuto UAV a došlo k navázání spojení s dálkovým ovládním. GPS přijímač na UAV byl synchronizován s radiovým přijímačem, který byl propojen s notebookem. Ovšem GPS přijímač na našem UAV nedisponuje dokonalou přesností a výsledné zobrazení trajektorie letu by tak přesně neodpovídalo opravdové dráze letu. Proto bylo nutné přesnou trajektorii letu spočítat pomocí post-procesní kinematiky (PPK). Z tohoto důvodu bylo nutné si od společnosti Trimble Inc. zajistit virtuální referenční pozemní stanici (VRS Now), kterou jsme z důvodu akademického výzkumu měli možnost získat zadarmo, pouze však pro Českou republiku. Celý proces

provedení post-procesní kinematiky pro determinaci přesné dráhy letu bude rozebrán v kapitole “Zpracování surových (Raw) dat.“ Přípravené UAV pro sběr dat demonstruje obrázek č. 10.



Obrázek 10: UAV připravené ke startu (Foto Autor)

Když bylo naše UAV propojené s dálkovým ovládacím zařízením a pozemní řídicí stanicí, provedl se vzlet. Aby však mohl započít přelet nad zkusnou plochou a snímkový sběr dat, musela být provedena kalibrace magnetického kompasu umístěného v UAV. Ta byla provedena následujícím způsobem. Když bylo UAV ve vzduchu, pilot pilotoval UAV po dráze ve tvaru čísla osm to, aby bylo zajištěno, že se magnetický kompas přetočí opravdu o 360° . Pro jistotu byl tento letecký manévř zopakován ještě jednou, ve finále se tak provedl dvakrát. Pokud by se tato kalibrace neuskutečnila, s nasbíranými daty by nebylo možné dále pracovat. Znázornění tohoto manévřu je vidět na obrázku č.11 a č.12. Po tomto procesu bylo možné započnout přelet nad zkusnou plochou a začít provádět laserové skenování. Při samotném přeletu bylo přepnuto UAV do režimu autopilota, jenž se staral o dodržení trajektorie letu, která byla předdefinována a nahrána do paměťové karty dronu před samotným letem podle metody na sebe kolmých přeletů (Perpendicular a zig-zag pattern). Tato metoda určující dráhu letu je běžně využívána, neboť skenovací zařízení nesené na UAV je schopné sbírat data pouze pokud

letí přímo. Takto určená trajektorie letu tak minimalizuje počet otáček UAV ve vzduchu a zajišťuje vždy přímý let, při kterém je možno správně sbírat data. Tato metoda také prodlužuje dobu letu kvůli snížení spotřeby energie vynaložené pro let a umožňuje sbírat data z rozsáhlejších oblastí díky zvýšené aerodynamické účinnosti, kdy UAV nemusí provádět složité letecké manévry při přeletu nad mapovaným územím, a tím tak redukuje i délku letové trajektorie (LEE 2004). Takto provedená dráha letu je vidět na obrázku č.11.

Když bylo uskutečnění letu u konce, tak se UAV vrátilo zpět. Před přistáním bylo nutné přepnout UAV z režie autopilota zpět pod kontrolu pilota, který opět provedl a zopakoval dvakrát kalibraci magnetického kompasu stejně jako před startem. Obrázek č. 11 a 12.

Po přistání byla nasbíraná data přesunuta na externí paměťové zařízení. UAV bylo vyřazeno z provozu, byla složena jeho čtyři ramena nesoucí vrtule, na vrtule byly nasazeny ochranné obaly, následně došlo k vyjmutí baterií a uložení UAV zpět do přepravní bedny.

4.4 Zpracování 3D bodových mračen a z nich odvození taxačních charakteristik

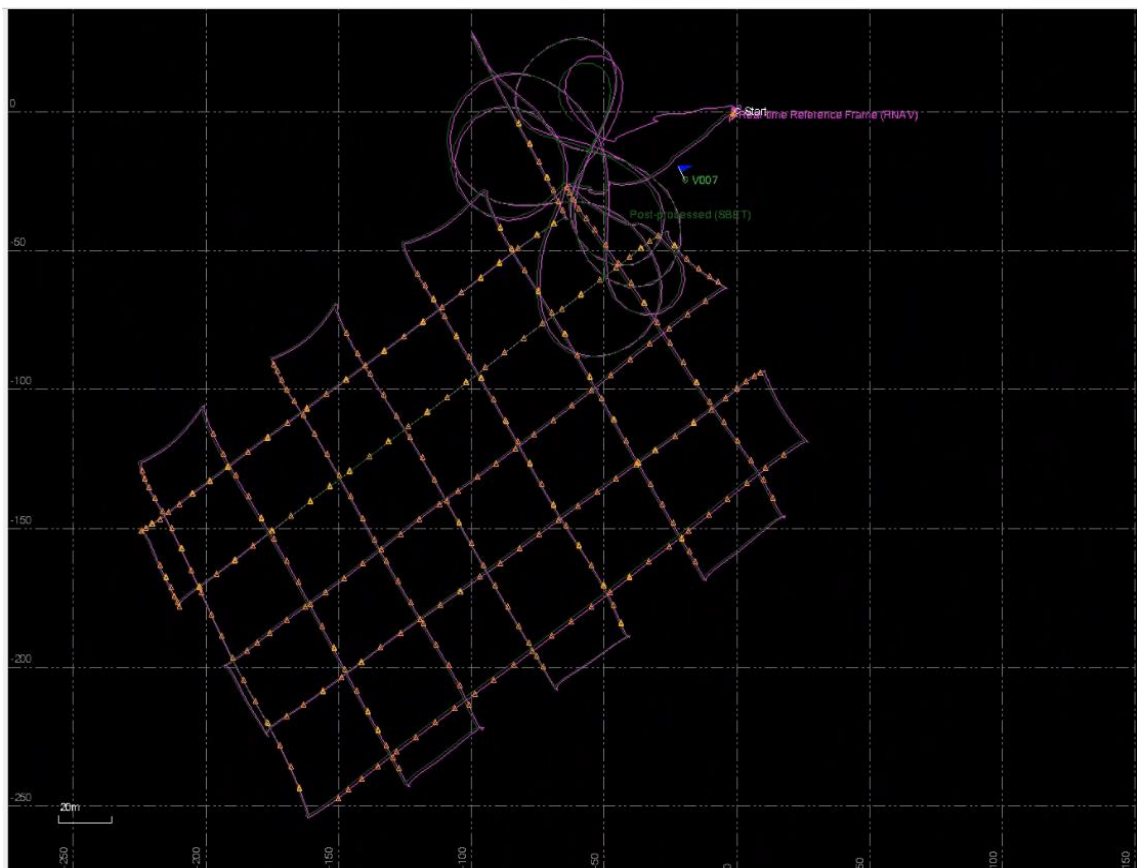
Zpracování 3D bodových mračen nejprve předcházela práce s daty v jejich prvotní formě. Těmto datům se jinak říká “surová“ (Raw data). Údaje v této podobě byla průběžně při letu zaznamenávána a ukládána na HDD v UAV. Surová data byla nahrána do počítače, v programu POSpac MMS byl proveden přepočítání trajektorie a v programu RiPROCESS proběhl výpočet konkrétních přesných bodových mračen, teprve poté byla vyexportována trojrozměrná bodová mračna, která po několika dalších úpravách v prostředí ArcGIS 10.5.1 (Environmental Systems Research Institute 2020) mohla být použita pro odvození porostních charakteristik např. sloužících k potřebám inventarizace lesa.

4.4.1 Zpracování surových (Raw) dat

Informace, kterými disponují naše surová data, obsahují údaje pouze o přesném času vyslání i zpětném odrazu laserového paprsku a znají úhel, pod kterým byl vyslán ze skeneru. V neposlední řadě i o GPS-času, který pojednává o tom, kdy bylo UAV aktivní při sběru dat.

Skener nesený na UAV tedy vysílá laserové paprsky, registruje jejich údaje o jednotlivých místech nárazů a následných odrazů od objektů. Následně determinuje pro každý zpětný odraz jednotlivé body. Skener tyto data sám zpracuje, vyhodnotí a vytvoří z nich soubor surových dat, tak zvaný “project.”

Nejprve však byla nahrána do softwaru POSPac MMS informace o trajektorii letu. Tuto trajektorii lze vidět na obrázku č. 11.



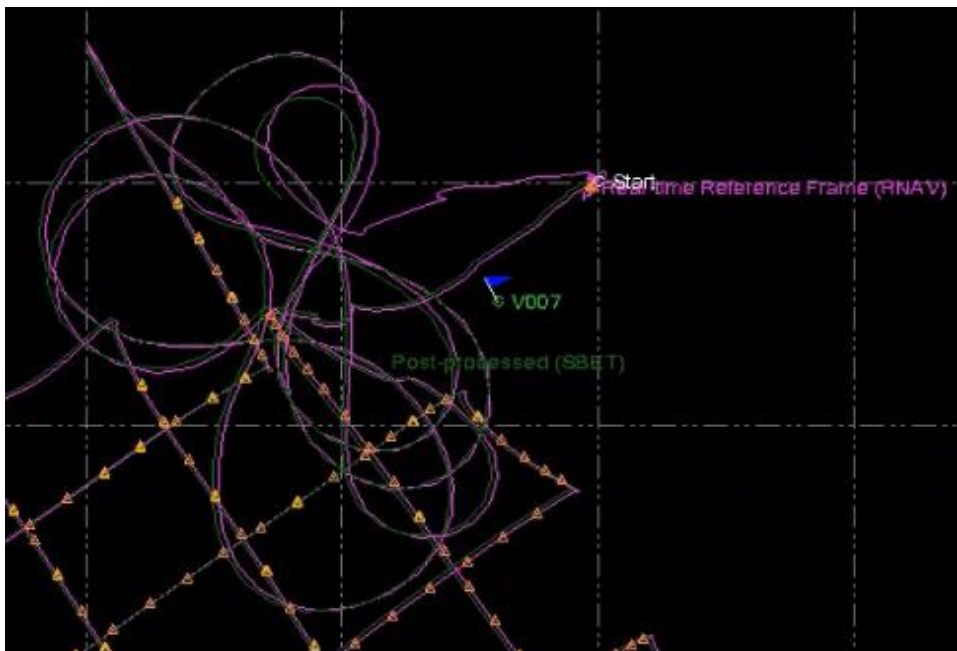
Obrázek 11: Znázornění trajektorií letu UAV nad zkusnou plochou v softwaru POSPac MMS

Na obrázcích č. 11 a 12 se vyskytují dvě trajektorie, jedna znázorněná fialovou a druhá zelenou barvou. Fialová představuje záznam letu UAV pořízený pouze z integrovaného GPS přijímače v UAV a jak bylo zmíněno výše, GPS přijímač na UAV není zcela dokonalý a přesný, a proto vyžaduje tato trajektorie přepočítání pomocí post-procesní kinematiky. Přesné souřadnicové hodnoty potřebné pro přepočítání nám poskytuje naše již výše zmíněná virtuální referenční pozemní stanice, kterou lze vidět na obrázcích č. 11 a 12 jako modrou vlaječku s názvem V007. Tato virtuální stanice komunikuje s družicemi na oběžné dráze i s pozemními geodetickými stanicemi a je nám schopna poskytnout údaje potřebné k přesnému spočítání trajektorie letu. Tento přepočítání byl proveden v programu POSPac MMS

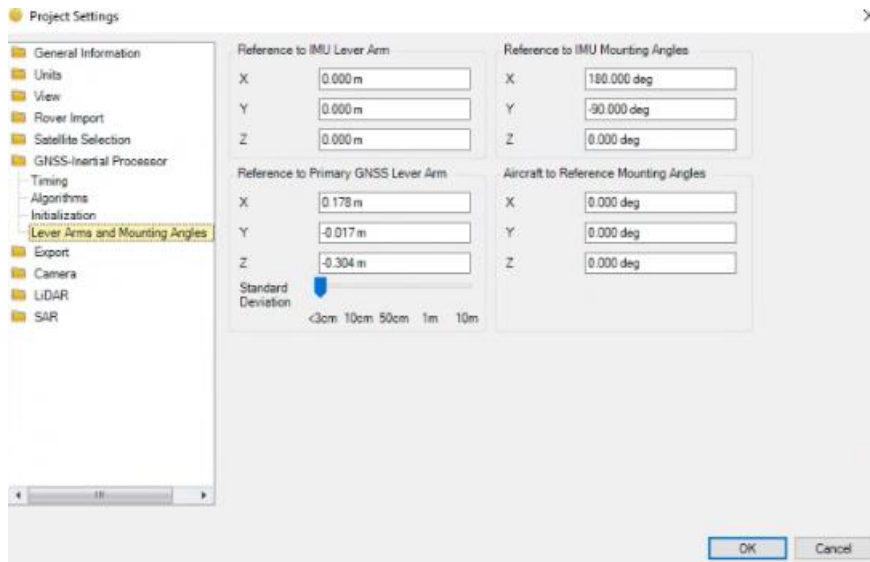
Zpřesnění souřadnic trajektorie letu pro naše precizní výsledky však nestačí. Je třeba neopomenout fakt, že fialová trajektorie je vztažena k GPS přijímači, nikoliv však k laserovému skeneru, který pořizuje data. Tento rozdíl, tedy vzdálenost skeneru od přijímače, bylo důležité spočítat a zaznamenat ho do výsledné trajektorie letu pomocí funkce **Lever Arm and Mounting Angles**, kterou disponuje program POSPac MMS. Obrázek č. 13.

Po provedení těchto úkonů v programu POSPac MMS byla výsledná vypočítaná trajektorie uložena a vyexportována do softwaru RiPROCES. Výsledek demonstruje trajektorie znázorněná zelenou barvou.

Na obrázku č.12 je vidět detailněji místo startu/přistání, letecký manévr ve tvaru čísla osm, sloužící pro kalibraci magnetického kompasu a rozdíl správné, vypočítané trajektorie letu vyobrazené zelenou barvou od té prvotní, fialové.



Obrázek 12: Detailní znázornění místa vzletu/přistání, virtuální pozemní stanice a leteckého manévru



Obrázek 13: Funkce Lever Arms and Mounting Angles

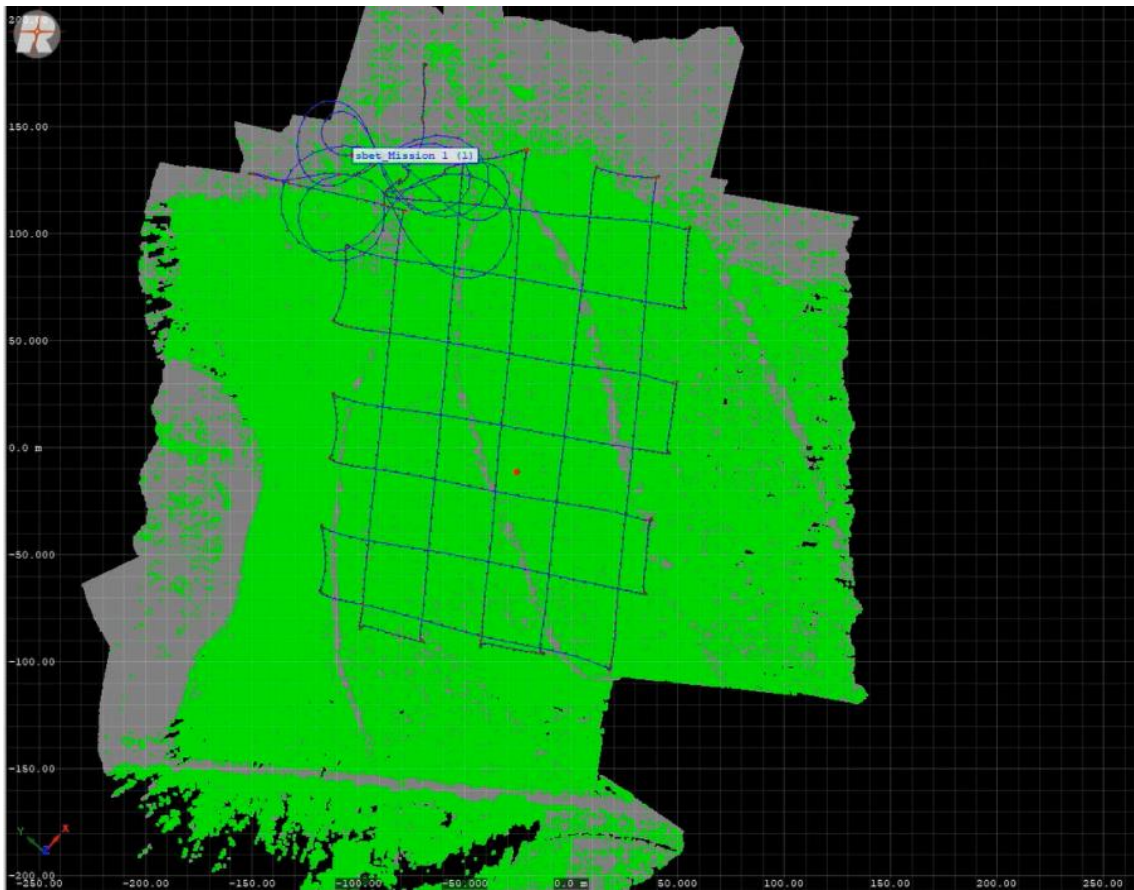
Do softwaru RiPROCESS společně s výslednou trajektorií byla nahrána surová data neboli výše zmíněný “project“. Zobrazení těchto dat lze vidět na obrázku č. 14. Tato surová data byla následně vyfiltrována. To znamená, že bylo provedeno odstranění nadbytečných záznamů z mapovaného území a zmapované pole bylo redukováno pouze na oblast naší zájmové oblasti. Následně byly eliminovány špatně nasnímané body, jinak zvané “noise.“ A to tak, že okolo každého jednoho samostatného bodu byla vytvořena koule o průměru jednoho metru a nastaveno, že pokud se uvnitř této koule nebudou vyskytovat minimálně tři body, filtr je bude považovat za noise a odstraní je ze záznamu.



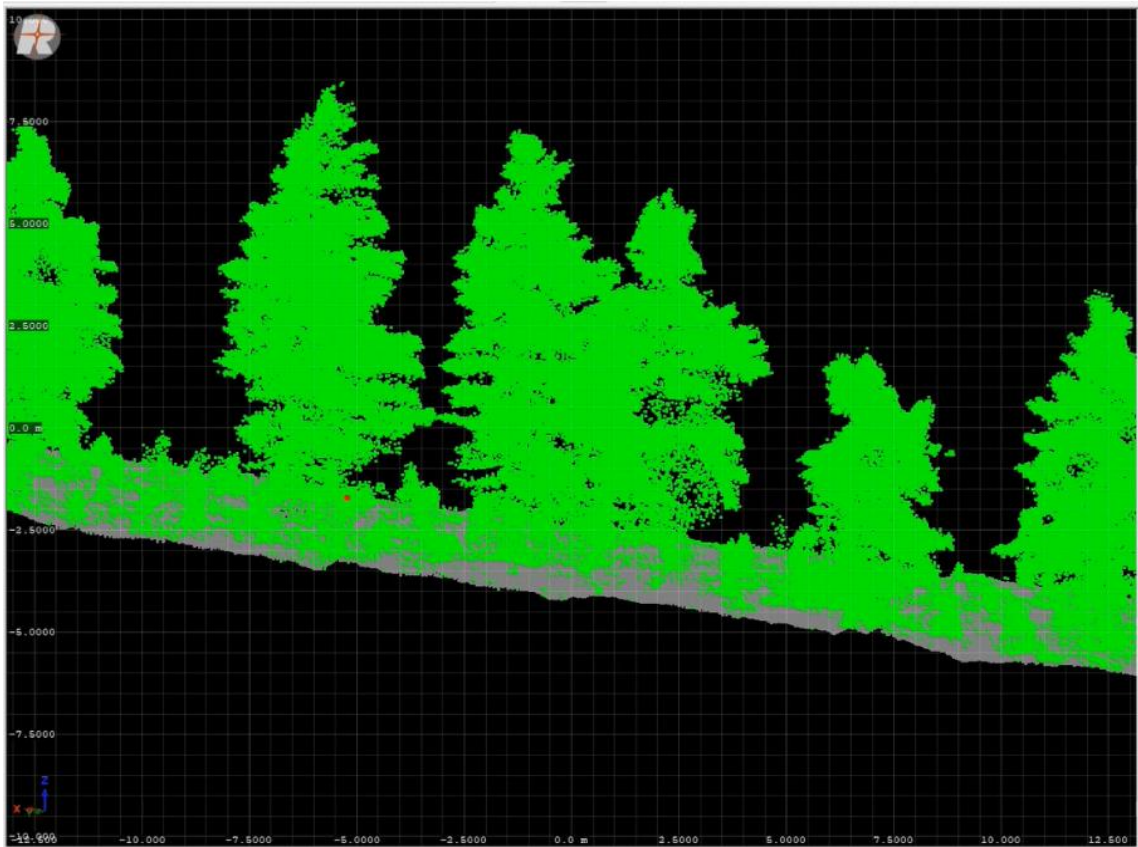
Obrázek 14: Znáornění surových dat a trajektorie letu v programu RiPROCESS

Nakonec byl nadefinován z bodů zaznamenaných jako poslední odraz laserového paprsku zemský povrch, a z ostatních bodů byla vytvořena struktura vegetace. Zemský povrch je na obrázcích č. 15 a č.16 znázorněn šedivou barvou a vegetace zelenou.

Poznámka: Fialová trajektorie dráhy letu na obrázku č.15 je ta přepočítaná a správná, pouze jí byla přidělena fialová barva.



Obrázek 15: Vyčlenění zemského povrchu a vegetace



Obrázek 16: Podrobné zobrazení zemského povrchu a vegetace

Tomuto souboru pak byl nastaven koordinační souřadnicový systém WGS-UTM 33 North. Nakonec byl uložen ve formátu .las.

Nyní bylo možno s tímto souborem dále pokračovat ve zpracování v prostředí ArcGIS 10.5.1.

4.4.2 Zpracování dat v ArcGIS

Pro zpracování bodových mračen byl použit geografický informační systém ArcGIS 10.5.1 od společnosti ESRI (Environmental Systems Research Institute 2020).

Postup určení výšek mapovaných stromů pomocí ArcGIS 10.5.1

K stanovení výšek pro jednotlivé zaznamenané stromy byl využit program ArcGIS. V tomto programu bylo uskutečněno několik operací, ve kterých bylo provedeno zpracování bodového mračen vyexportovaného z programu RiPROCESS, ze kterého byl získán rastrový model všech mapovaných stromů. Pro každý jeden konkrétní strom byla v prostředí ArcGIS determinována výška a určen jejich celkový počet pomocí různých funkcí, kterých tento sofistikovaný program nabízí.

Prvním krokem bylo vytvoření datového souboru "LAS dataset", tento datový soubor umožňuje rychle a snadno pracovat s daty ve formátu .las. LAS (LASer) je formát souboru určený pro zpracování a archivaci lidarových bodových mračen získaných z DPZ. Podstatnou schopností této funkce je transformace 3D bodových mračen získaných z LiDARu na 2D, přičemž pro každý jednotlivý bod zůstanou zachovány 3D údaje, které je možné dále upravovat dle naší potřeby (Environmental Systems Research Institute 2020).

Jako první tedy v programu ArcGIS bylo kliknuto na **Arc Toolbox**, poté na **3D Analyst Tools > Data Management Tools > LAS Dataset > Create LAS Dataset**. Byla otevřena tabulka, do **Input Files** byly postupně nahrány soubory bodových mračen pro dané lety ve formátu .las. Následně byla určena složka, použitím **Output LAS Dataset**, do které byl výstup uložen. **Coordinate System** (Souřadnicový systém) v našem případě nemusel být nastaven, jelikož tyto data už měla souřadnicový systém nadefinovaný. V neposlední řadě bylo zaškrtnuto **Compute Statistics**, to určuje, zda bude pro LAS soubor vypočítána statistická hodnota a bude vygenerován prostorový index. Bylo zaškrtnuto i **Store Relative Paths**, to může být výhodné pro případy, kdy by se datový soubor LAS a jeho přidružená data přemístila do systému souborů pomocí stejného relativního umístění k sobě navzájem (Environmental Systems Research Institute 2020). Tento postup reprezentuje obrázek č. 17.

Create LAS Dataset

Input Files

Browse for: Files

C:\Users\ufota\Desktop\BP_Data\070519_UTM34N_otocene.las

Include Subfolders (optional)

Output LAS Dataset

C:\Users\ufota\Documents\ArcGIS\BP_Kveten.lasd

Surface Constraints (optional)

Input Features	Height Field	Type

Coordinate System (optional)

Create PRJ For LAS Files (optional)

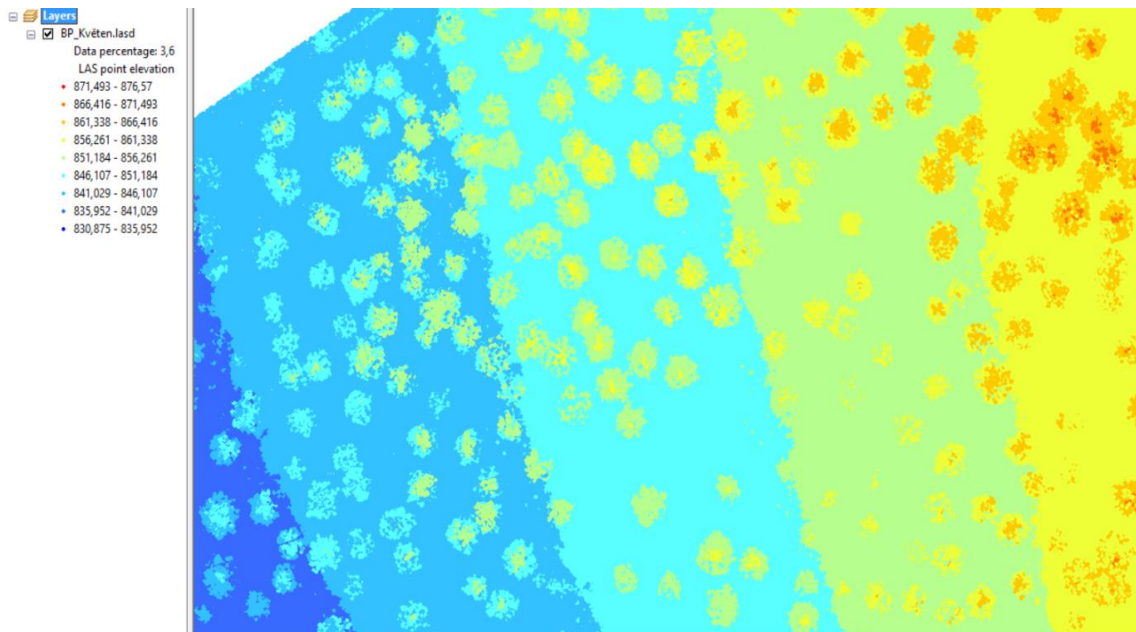
NO_FILES

Compute Statistics (optional)

Store Relative Paths (optional)

Obrázek 17: Tvorba LAS Dataset

Výstup z nástroje **Create LAS Dataset** reprezentuje obrázek č. 18. Na levé straně obrázku lze vidět spektrum barev dle nadmořské výšky bodů. Přičemž tmavě modré body reprezentují nejnižší polohy, sytě červené reprezentují naopak nejvyšší polohy.



Obrázek 18: Výstup z nástroje LAS Dataset

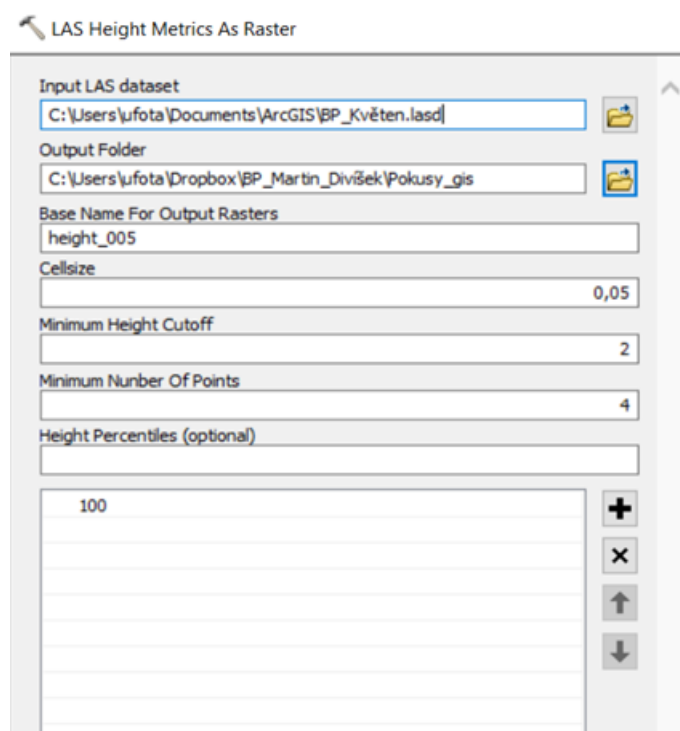
Tento výstup bylo třeba dále upravit pomocí nástroje **LAS Height Metrics As Raster**. Tato funkce zachová původní 3D metriky výšek jednotlivých stromů změřených lidarem a převede je na 2D rastrovou vrstvu.

Pro přístup k této a dalším potřebným funkcím pro úpravu bodových mračen bylo nutno stáhnout balíček s názvem “3D Sample Tools“, který klasifikuje, optimalizuje a analyzuje lidarová data, pomocí pestré škály nástrojů. Po stáhnutí tohoto souboru byl nainstalován a přidán do programu ArcGIS. Nejprve bylo kliknuto na **ArcToolbox**, vybrána možnost **Add> Toolbox**, a v instalační složce **3D Samples** byla vybrána **3D Sample Tools.tbx**. Poté se soubor “3D Sample Tools“ v našem adresáři objevil pod jménem “My Toolboxes“ (Environmental Systems Research Institute et al. 2020).

Pro úpravu námi vytvořeného LAS dataset(u) byl otevřen již nainstalovaný **3D Sample Tools.tbx**, bylo kliknuto na **Vegetation Analysis**, zvoleno **LAS Height Metrics As Raster**, následně bylo otevřeno pracovní okno této funkce. Do **Input LAS dataset** byl nahrán vytvořený LAS Dataset, do **Output Folder** bylo zvoleno místo uložení výstupu. V řádku **Base Name For Output Raster** bylo nastaveno, pod jakým jménem má být výstup uložen. Velmi důležité bylo nastavit optimálně **Cellsize**, tím byla určena velikost mřížky pracovního rastru, tedy rozlišení. V podstatě velikost pixelů daného rastru. Metriky byly následně vypočítány dle tohoto rozlišení. Pro náš postup byla do vstupu pro **Cellsize** přidána hodnota 0,05, neboli 5 cm. To znamená, že jeden pixel

v našem rastru odpovídá 5x5 centimetrům ve skutečnosti. Následně byla pro **Minimum Height Cutoff** nastavena číselná hodnota 2.

Tato funkce určuje limitní výšku ve dvou metrech nad zemí, pod kterou vyloučí všechny body z metrického výpočtu. Poté byla přidána číselná hodnota 4 pro **Minimum Number Of Points**. Zmíněná funkce zahrnuje do procesu minimální počet bodů potřebné pro výpočet metrik nad minimální mezní výškou dva metry, které se vyskytovaly v dané buňce budoucí rastrové vrstvy. Na konec byla pro **Height Percentiles** zadána hodnota 100, která pro každý jeden zadaný percentil vytvořila rastr, jehož hodnoty jsou hodnoty výšek buněk viz obrázek č. 19. Poté byl spuštěn automatický výpočet, z něhož byla utvořena rastrová vrstva s metrikou o výškách stromů, tedy CHM viz obrázek č. 20.



Obrázek 19: Funkce Las Height Metrics As Raster



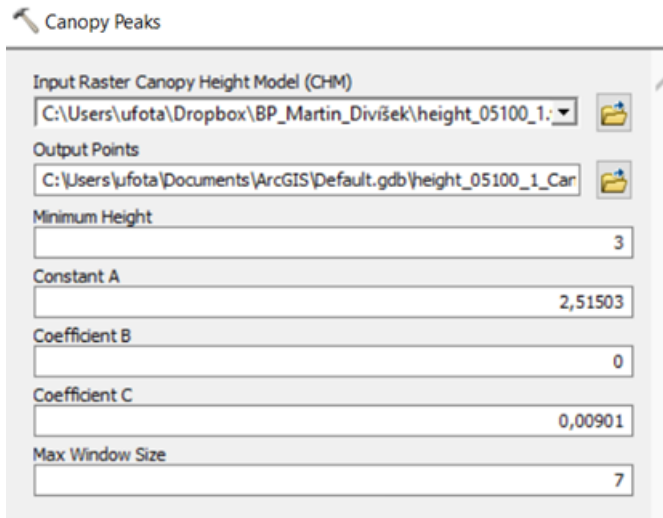
Obrázek 20: Výstup z funkce Las Height Metrics As Raster

Poté bylo provedeno určení vrcholu všech jednotlivých stromů, stanovení jejich výšek a následné očíslování.

Pro tento účel byl využit nástroj **Canopy peaks**, pomocí něhož byly identifikovány nejvyšší výškové body – vrcholy, pro všechny stromy v CHM.

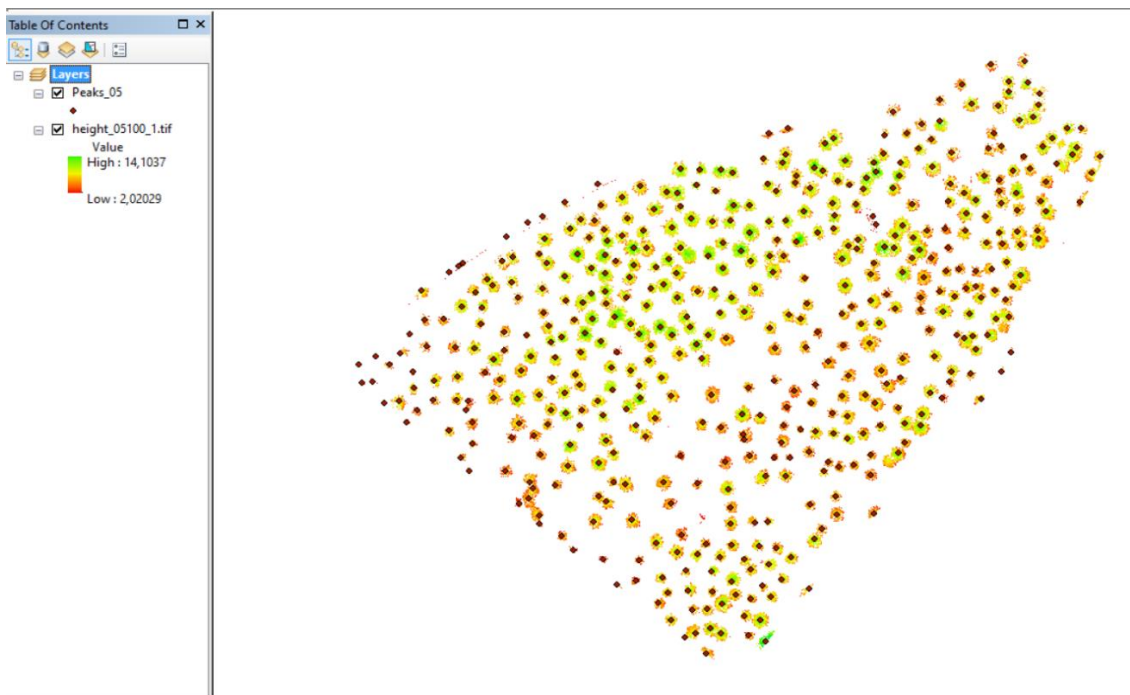
Nejprve byl zapnut samotný nástroj s názvem **Canopy peaks**, umístěný v **3D Sample Tools.tbx**, ve složce **Vegetation Analysis**. Na začátku byl do první funkce **Input Raster Canopy Height Model (CHM)**, přidán výstup z předcházejícího nástroje. Do **OutPut points**, bylo nastaveno místo, kam bude výstup uložen. Pro nástroj **Minimum Height** byla přidána automaticky číselná hodnota 3 proto, aby byly brány v úvahu pouze body, které jsou vyšší než 3 metry, které budou zahrnuty při výpočtu výšek. Do nástroje **Constant A** a **Coefficient B, C**, byly zadány hodnoty, které byly použity pro stanovení výšek. Když bylo provedeno přidání výstupu do Input Raster Canopy Height Model, všechny tyto údaje byly přidány automaticky. Nicméně konstanta A a koeficienty B, C jsou dosazeny do rovnice $A + B \cdot ht + C \cdot ht^2$, kdy konstanta A má hodnotu 2,51503 metrů, koeficient B má hodnotu 0 metrů a koeficient C má hodnotu 0,00901 metrů. “ht“

je výška. **Max Window Size** byla vyplněna číselnou hodnotou 7 a znamená maximální velikost okna. Nástroj je zobrazen na obrázku č. 21.



Obrázek 21: Nástroj Canopy Peaks

Výstupní hodnoty z tohoto nástroje lze spatřit na obrázku č. 22.



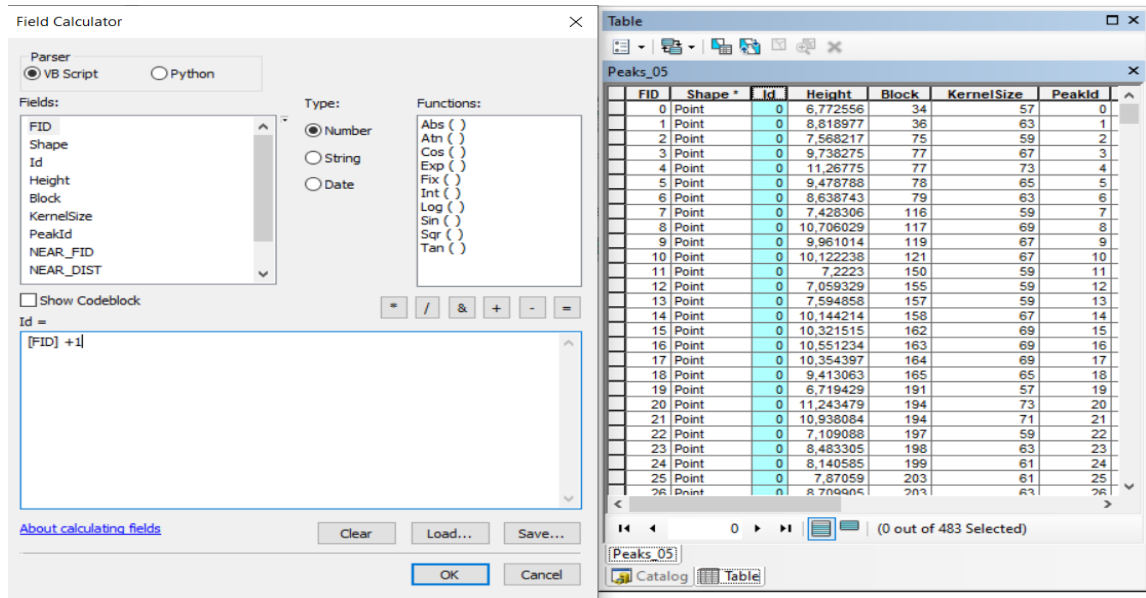
Obrázek 22: Výstup z nástroje Canopy Peaks, CHM

Nyní bylo zapotřebí očíslovat jednotlivé vrcholy stromů.

K tomuto úkonu bylo potřeba otevřít atributovou tabulku > **Open Attribute Table** pro Peaks_05. Následně byla pro sloupec Id zapnuta funkce **Field Calculator**. Do této

funkce byl zadán příkaz [FID] +1. Viz. tabulka č. 6. Na základě tohoto příkazu proběhlo přidělení pořadových čísel pro jednotlivé výškové body viz tabulka č. 7.

Tabulka 6: Field Calculator a Attribute Table s označeným sloupcem Id



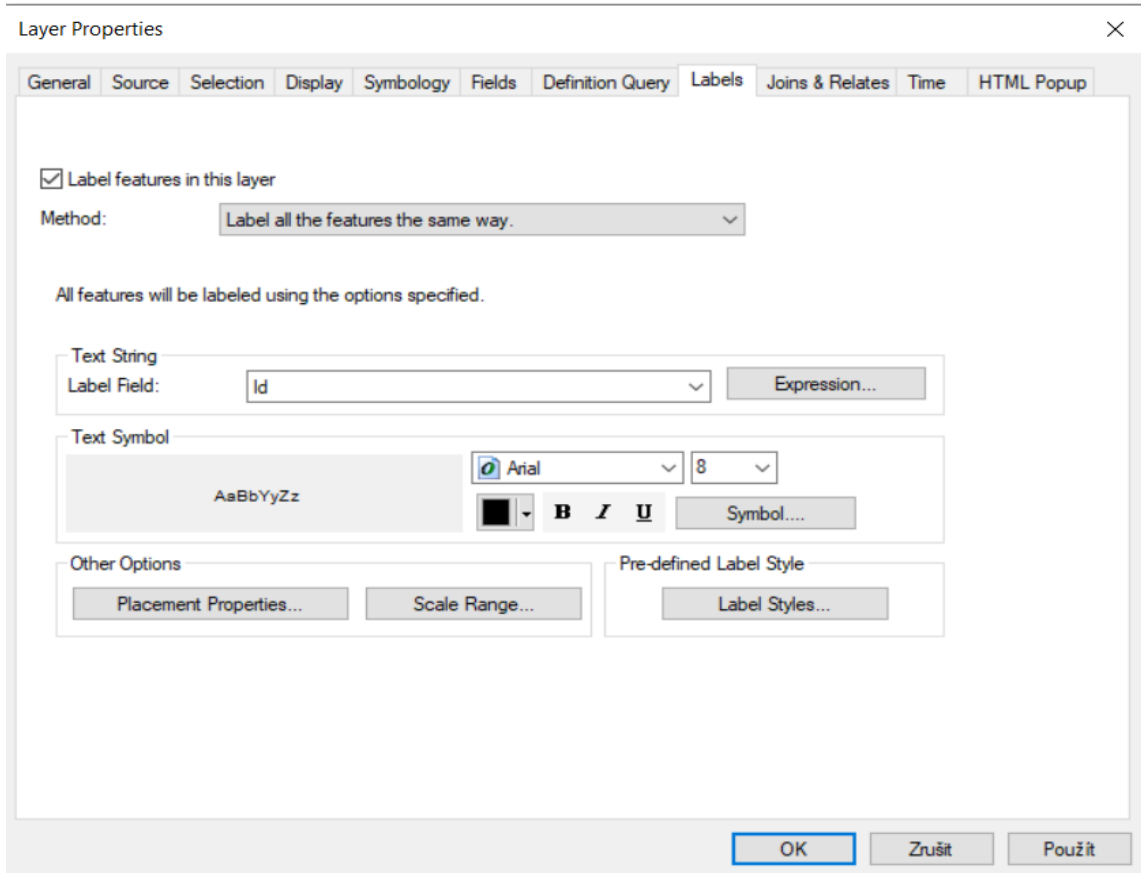
Tabulka 7: Přiřazená pořadová čísla pro Id

The image shows a close-up of the 'Table' window for 'Peaks_05'. The 'Id' column is highlighted in cyan, showing sequential values from 1 to 11. The 'FID' column is labeled 'FID 05' and the 'Height' column is labeled 'Height 05'. The table shows the first 11 rows of data.

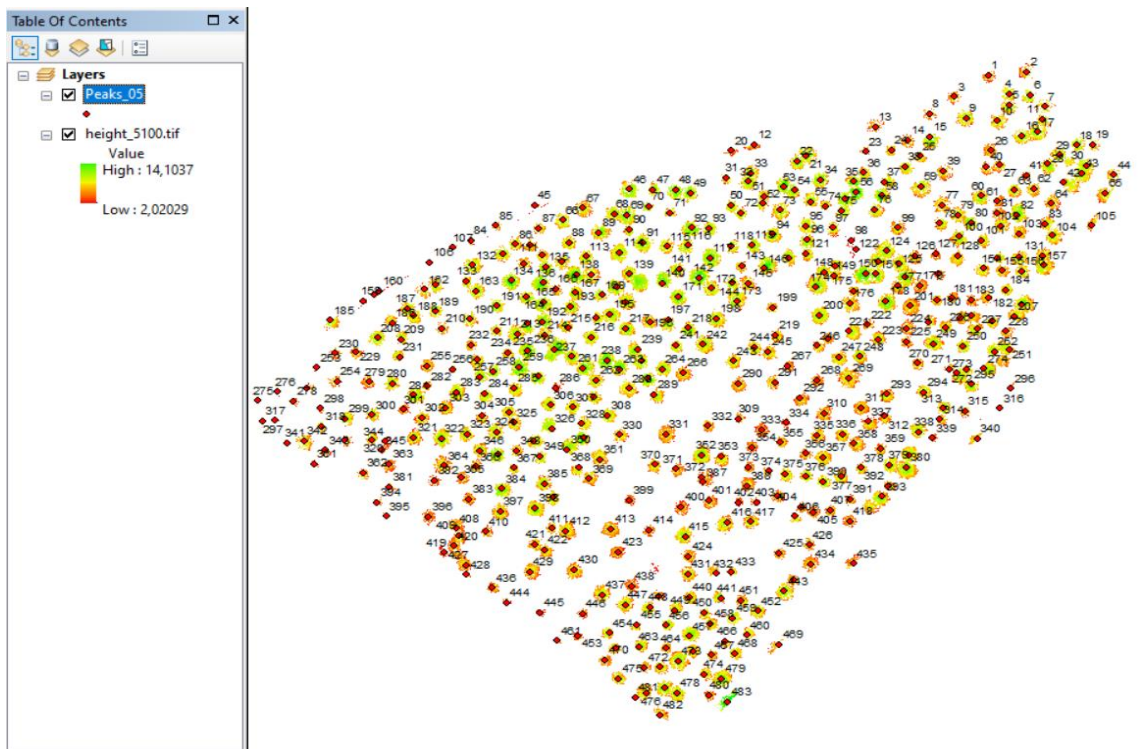
FID 05	Shape *	Id	Height 05
0	Point	1	6,772556
1	Point	2	8,818977
2	Point	3	7,568217
3	Point	4	9,738275
4	Point	5	11,26775
5	Point	6	9,478788
6	Point	7	8,638743
7	Point	8	7,428306
8	Point	9	10,706029
9	Point	10	9,961014
10	Point	11	10,122238

Po úspěšném očíslování vrcholů stromů bylo nyní možné zobrazit jejich hodnoty. K tomu bylo nutné otevřít vlastnosti (**Properties**). Následně bylo stisknuto **Labels** a zaškrtnuto **Label features in this layer**. Pro **Label Field** bylo zvoleno Id viz. obrázek č. 23.

Nyní bylo možné zobrazit pořadová čísla vrcholů stromů viz obrázek 24.



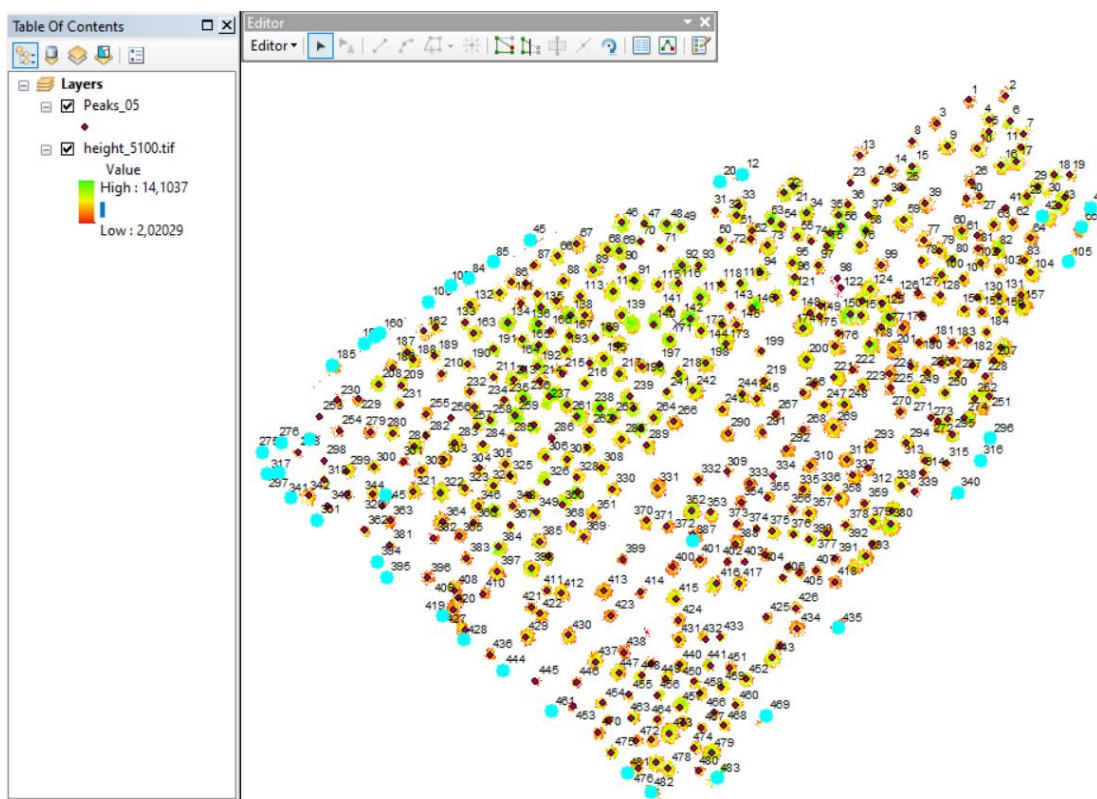
Obrázek 23: Properties pro Peaks_05



Obrázek 24: Pořadová čísla pro vrcholy stromů

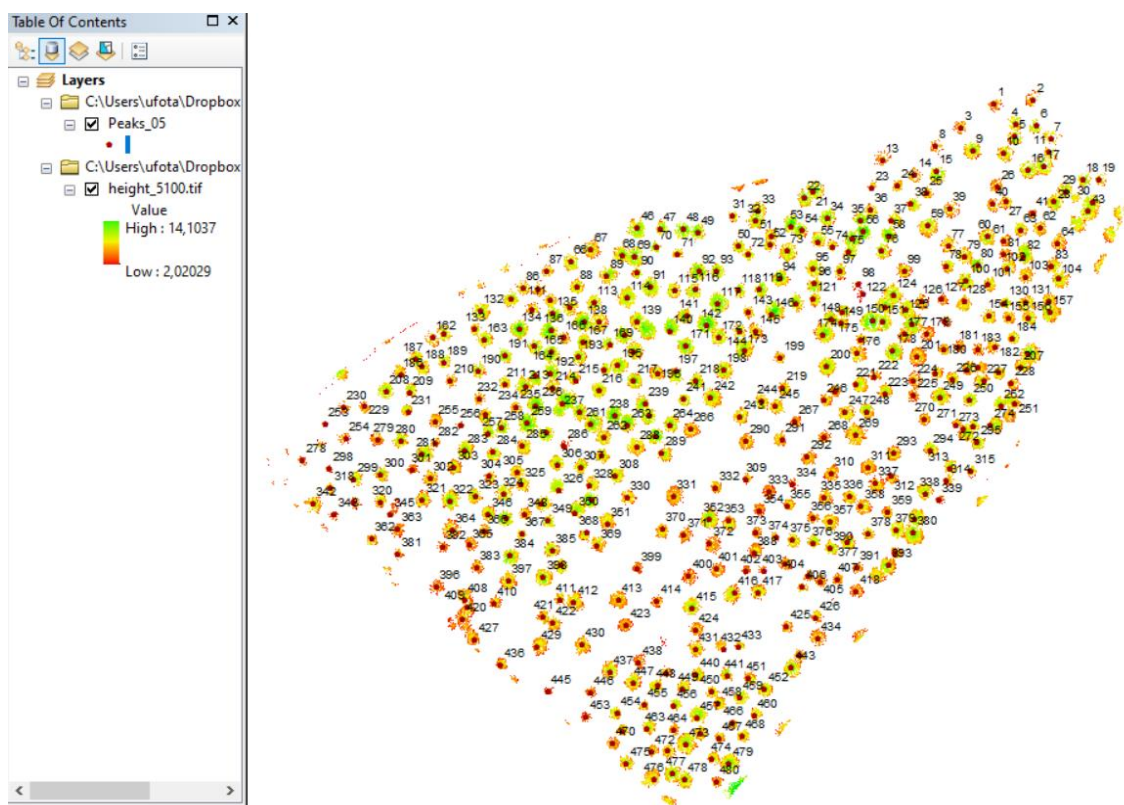
Ukázaný proces postupu zpracování dat byl totožný pro data z období července i listopadu. Z tohoto důvodu pro ně nebyl předchozí postup znázorněn. Nicméně bylo ho nutné zopakovat pro zbývající data, jelikož nyní bylo nutné provést zjištění výškových přírůstů, k čemuž byla tato data zapotřebí.

Aby bylo možné porovnat výsledky a stanovit výškový přírůst, bylo nutné odmazat špatně zaregistrované, hraniční, nebo nadbytečné vrcholy stromů. K tomuto účelu byl využit nástroj **Editor Toolbar**, pomocí něhož byly tyto vrcholy označeny a následně odstraněny. Viz obrázek č. 25. (Tento postup bylo opět nutné zopakovat pro zbývající data).



Obrázek 25: Označené špatně zaregistrované vrcholy stromů před odstraněním

Na obrázku č. 26 lze vidět výstup, kde jsou označené vrcholy již odstraněné.



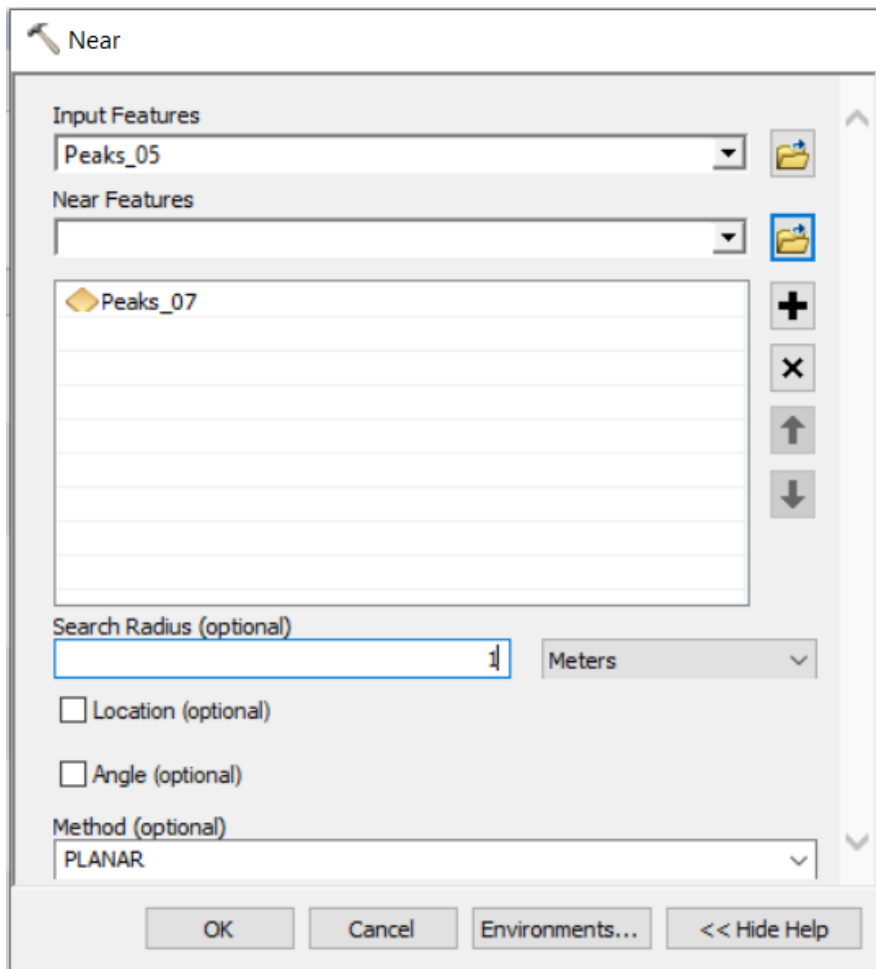
Obrázek 26: Výstup po odstranění špatně zaregistrovaných bodů

Když byly špatně zaregistrované vrcholy takto odstraněny ze všech dílčích vrstev, bylo dále třeba za účelem stanovení výškových přírůstků, z důvodu nejednotnosti pořadových čísel vrcholů stromů v jednotlivých rastrových vrstvách, sjednotit vrcholy ze všech vrstev tak, aby jejich pořadová čísla byla stejná a mohlo být provedeno odvození taxačních charakteristik.

K tomuto záměru byl využit nástroj **Near (Analysis)**. Tento nástroj počítá vzdálenosti mezi vstupními prvky z jedné vrstvy a nejbližšími prvky z jiné vrstvy. Je tedy schopen sjednotit vrcholy stromů na základě jejich nejkratšího rozestupu bez ohledu na to, jaká jsou jejich pořadová čísla. Čili sjednocuje právě ty prvky, které jsou k sobě vzdáleností nejbližší.

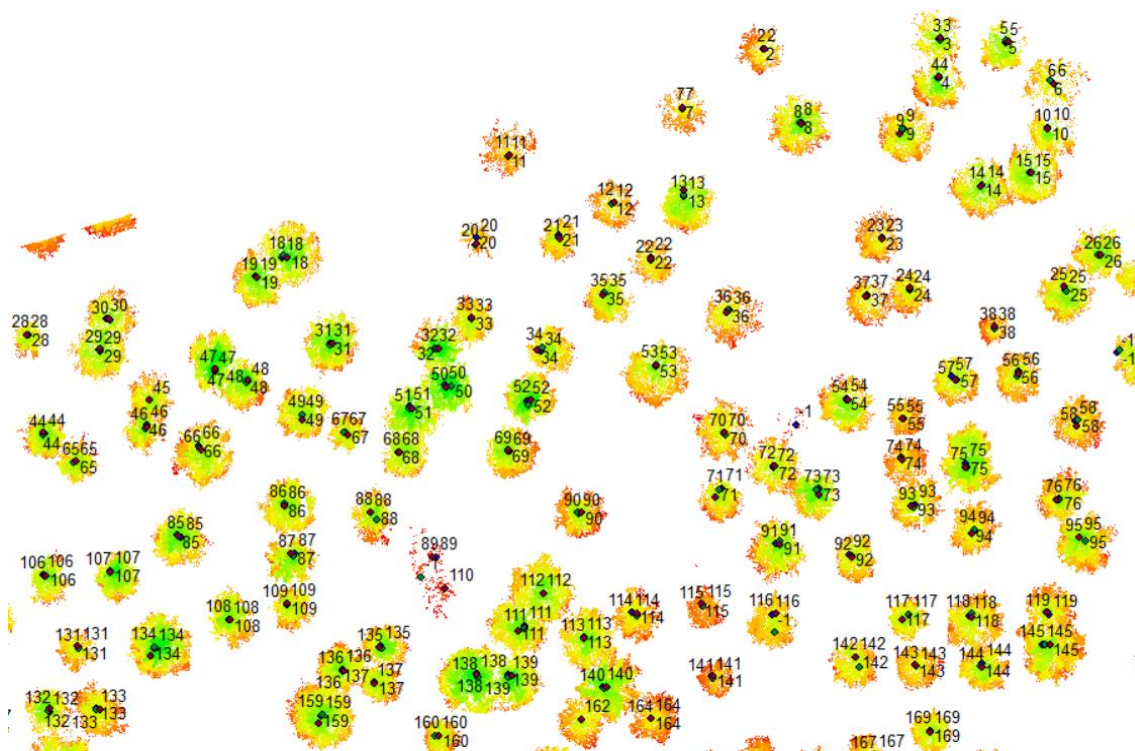
Po spuštění nástroje **Near** byl do **Input Features** přidán výstup z výše použitého nástroje "Canopy Peaks" s názvem "Peaks_05" za květen, a do **Near Features** byl přidán výstup z téhož nástroje za červen s názvem "Peaks_07". Do **Search Radius (optional)** byl nastaven jeden metr. Tato funkce vytvoří kolem jednoho bodu kruh o zadaném poloměru, v našem případě právě jeden metr a v tomto vytvořeném kruhu sdružuje nejbližší prvky. Funkce **Method (optional)** určuje, jakou metodou budou nejkratší délky mezi vrcholy změřeny. Pro tyto účely byla zvolena metoda "PLANAR", která používá planární – rovinné měření vzdálenosti, a vzhledem k tomu, že naše body

nejsou od sebe vzdáleny více jak jeden metr, není potřeba používat druhou metodu, kterou tato funkce nabízí a to je "GEODESIC", která uvažuje i zakřivení země. Tento nástroj lze spatřit na obrázku č. 27.



Obrázek 27: Nástroj Near

Dále bylo třeba do **Input Features** přidat Peaks_05 a do **Near Features** Peaks_11, obdobně pak Peaks_7 a Peaks_5, Peaks_11 a Peaks_5. Takto sjednocená pořadová čísla vrcholů stromů lze vidět na obrázku č.28.



Obrázek 28: Sjednocená pořadová čísla vrcholů stromů

Když byla pořadová čísla vrcholů stromů takto sjednocena, bylo třeba udělat už jen pár kroků ke zjištění výškových přírůstků stromů.

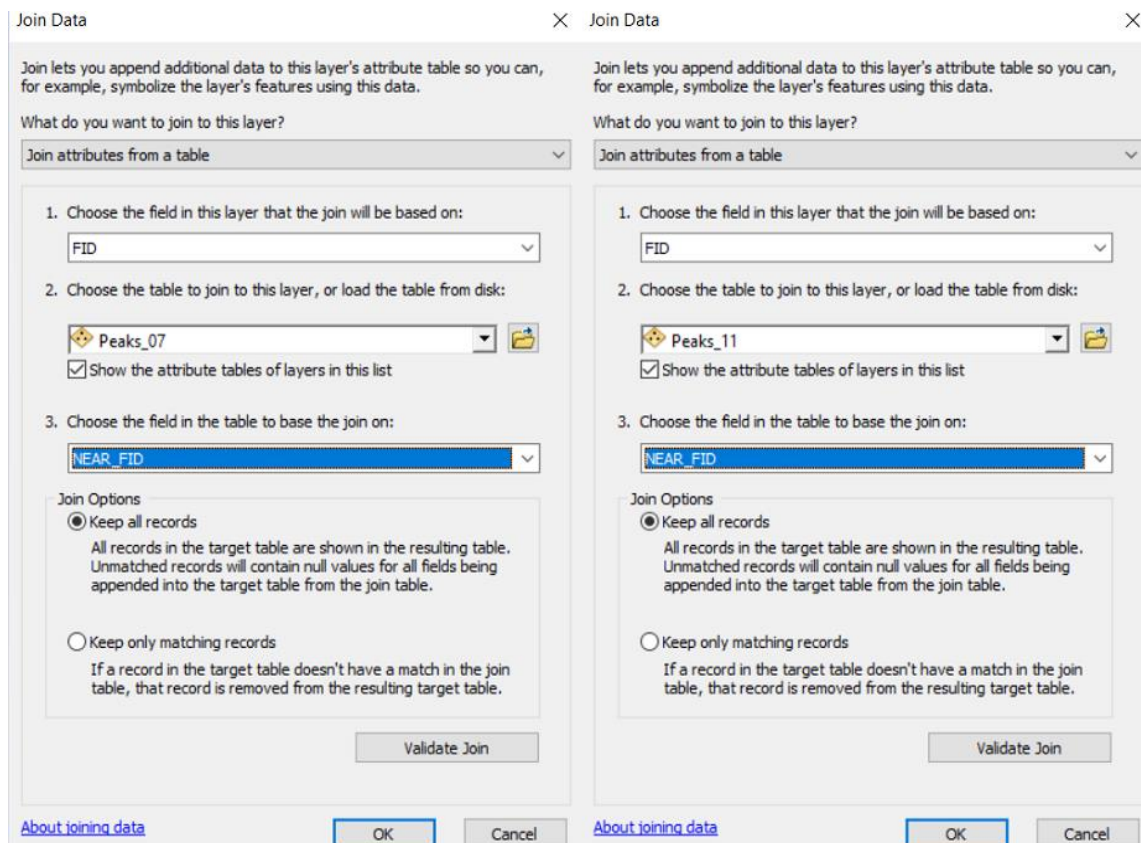
První krokem bylo propojení atributových tabulek pro vrstvy Peaks_05, Peaks_07, Peaks_11. Nejprve tedy byla otevřena atributová tabulka > **Open Attribute Table** pro Peaks_05.

V tabulce nástroj **Near** vytvořil dva sloupce s názvy NEAR FID a NEAR DIST. Sloupec FID obsahuje stejná čísla vrcholů stromů jako sloupec NEAR FID v atributové tabulce Peaks_07 a Peaks_11 a slouží jako klíč pro jejich propojení. Sloupec NEAR DIST obsahuje vzdálenosti v metrech mezi zaměřenými vrcholy stromů. Viz tabulka č. 8.

Poté bylo zvoleno v atributové tabulce Peaks_05 **Join and Relates** > **Join**. Do prvního řádku **Choose the field in this layer that the join will be based on** byl vybrán sloupec FID. Do druhého řádku **Choose the table to join to this layer, or load the table from disk** byla vybrána vrstva Peaks_07 a do třetího řádku **Choose the field in the table to base the join on** bylo zvoleno NEAR FID. V **Join Options** bylo nastaveno **Keep all records** pro zachování všech hodnot. Úplně stejně došlo ke spárování i s atributovou tabulkou Peaks_11. Viz obrázek č. 29.

Tabulka 8: Attribute table pro Peaks_05

	FID	Shape	Id	Height	NEAR FID	NEAR DIST
	0	Point	1	6,772556	0	0,47695
	1	Point	2	8,818977	1	0,127402
	2	Point	3	7,568217	2	0,118242
	3	Point	4	9,738275	3	0,132217
	4	Point	5	11,26775	6	0,085037
	5	Point	6	9,478788	4	0,291944
	6	Point	7	8,638743	7	0,380107
	7	Point	8	7,428306	5	0,085037
	8	Point	9	10,706029	9	0,123415
	9	Point	10	9,961014	10	0,440433
	10	Point	11	10,122238	12	0,068784



Obrázek 29: Funkce Join Data

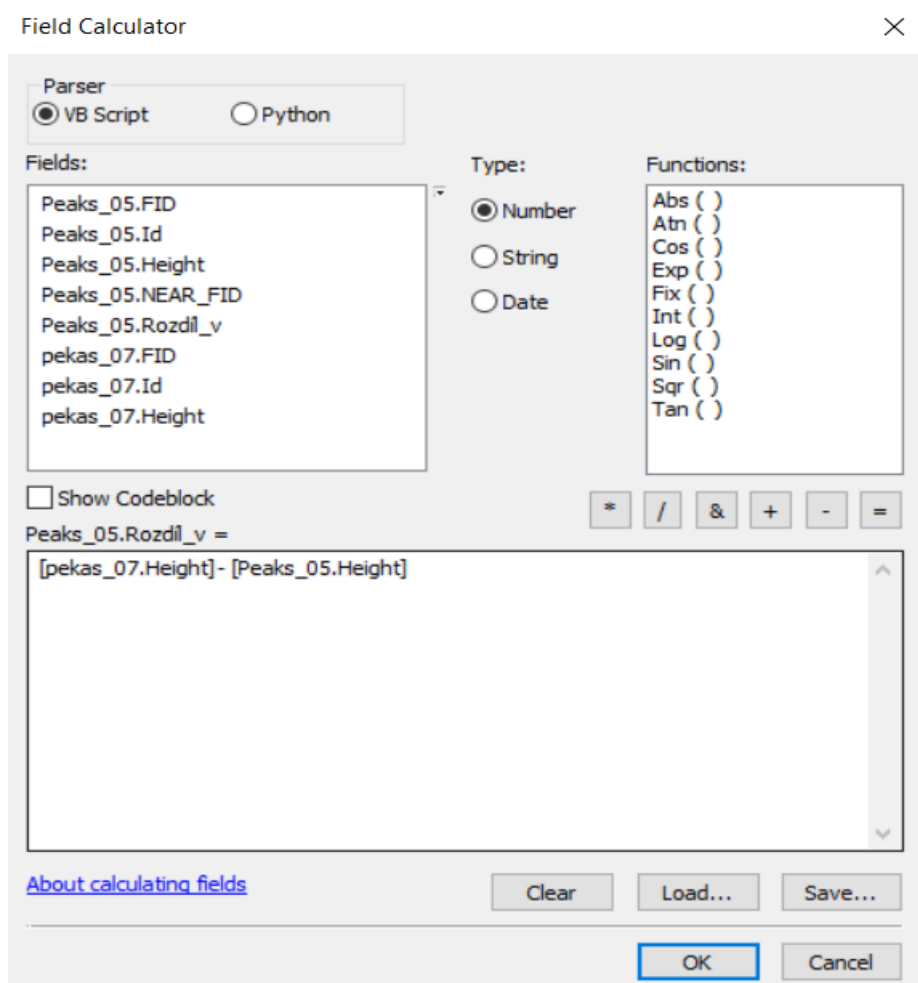
Po tomto úkonu byly tabulky propojeny viz tabulka č. 9. Na tomto obrázku lze vidět, že pořadová čísla vrcholů stromů ve sloupci FID_05 z vrstvy Peaks_05 jsou stejná jako ve sloupcích NEAR FID_05 a NEAR FID_07.

Dále lze spatřit i sloupce s názvy Height_05,07,11 jejichž hodnoty obsahují údaje o výškách jednotlivých stromů v metrech pro květen, červenec a listopad.

Druhým krokem k zjištění výškových přírůstů bylo vypočítání rozdílů výšek stromů právě z číselných údajů v těchto sloupcích s názvy Height. Jako první byl vytvořen nový sloupec **Add Field** a pojmenován jako Rozdíl výšek 7-5. Následně byla pro tento sloupec spuštěna funkce **Field Calculator** a zadán příkaz [Pekas_07.Height] - [Peaks_05.Height]. Viz obrázek č.30.

Potvrzením tohoto příkazu byl proveden výpočet výškového rozdílu vrcholů stromů a byl zjištěn jejich přírůst od května do července. Obdobně byl zjištěn i přírůst od května do listopadu.

Výsledná tabulka s taxačními charakteristikami a výškovými přírůsty je zobrazena v tabulce č. 9.



Obrázek 30: Funkce Field Calculator

Tabulka 9: Výšky stromů a jejich výškový rozdíl (květen, červen a listopad)

FID_05	Height_05	NEAR_FID_07	Height_07	NEAR_FID_11	Height_11	Rozdíl výšek 7-5	Rozdíl výšek 11-5
0	6,772556	0	6,783928	0	6,833161	0,011372	0,060605
1	8,818977	1	8,889658	1	9,029023	0,070681	0,210046
2	7,568217	2	7,58316	2	7,619582	0,014943	0,051365
3	9,738275	3	9,70225	3	9,768886	-0,036025	0,030611
4	11,26775	4	11,259618	4	11,348787	-0,008132	0,081038
5	9,478788	5	9,737825	5	9,748904	0,259037	0,270116
6	8,638743	6	8,55827	6	8,723458	-0,080473	0,084715
7	7,428398	7	7,365084	7	7,551296	-0,063302	0,12298
8	10,706029	8	10,782483	8	10,915518	0,078454	0,209499
9	9,961014	9	10,032683	9	10,177489	0,07185	0,216475
10	10,12238	10	10,122453	10	10,232364	0,000215	0,110126
11	7,059329	11	7,140774	11	7,268094	0,081445	0,208766
12	7,594858	12	7,666165	12	7,775065	0,071308	0,180207
13	10,144214	13	10,073754	13	10,153866	-0,070459	0,009652
14	10,321515	14	10,451616	14	10,619164	0,130101	0,297649
15	10,551234	15	10,642769	15	10,837796	0,091535	0,286562
16	10,354397	16	10,466922	16	10,523294	0,112525	0,168898
17	9,413063	17	9,626345	17	9,661906	0,213282	0,248843
18	11,243479	18	11,57107	18	11,518524	0,327591	0,275045
19	10,938084	19	11,25119	19	11,216969	0,313107	0,278886
20	7,109088	20	6,99771	20	7,26191	-0,111378	0,152822

0 (0 out of 445 Selected)

5 Výsledky

Výsledky této práce dokázaly, že zmapované stromy na zkusné ploše vykazují přírůst za období od května do listopadu, který byl následně i statisticky potvrzen. Dále byla odvozena pro každý strom přesná výška a spočítána průměrná výška celého porostu v každém měsíci prováděného měření. Mimo jiné byl zjištěn i celkový počet stromů na zkusné ploše s přesným souřadnicovým umístěním v každém měsíci. Bylo ale i zjištěno, jaké stromy byly v průběhu měsíců odstraněny, zlomeny či pokáceny.

Statistická analýza dat proběhla v softwaru RStudio (Certified B Corporation 2020).

5.1 Počet stromů na zkusné ploše v květnu, červenci a listopadu s jejich souřadnicovým umístěním

Celkový počet stromů zaznamenaných při pozemním měření byl 460 ks.

Souhrnný počet zjištěných stromů pomocí ULS, pro které byly odvozeny taxační veličiny, byl, po zpracování dat v květnu 443 ks, v červenci 423 ks a v listopadu 414 ks.

Důvody proč se počet stromů liší jsou takové, že .las soubor v software RiPROCESS se po vyříznutí drobně lišil. Druhým důvodem je to, že v listopadu bylo 12 stromů odtěžených, a třetím důvodem bylo to, že při spuštění automatického algoritmu zpracování dat v prostředí ArcGIS 10.5.1 došlo k minimálně chybnému vyhodnocení dat. Tyto důvody budou podrobněji rozebrány v diskuzi.

Tabulka č. 10 pak zobrazuje souřadnice x a y pro některé zmapované stromy. Ve sloupci FID_05 jsou pořadová čísla stromů.

Tabulka 10: Souřadnice vybraných zmapovaných stromů

FID_05	x	y
51	-19415,6975	5640677,3225
52	-19418,9975	5640674,5225
53	-19397,3975	5640688,2225
54	-19402,8975	5640684,6225
55	-19409,3975	5640682,1225
56	-19401,1975	5640677,8225
57	-19411,6975	5640677,1225
58	-19408,3975	5640674,1225
59	-19379,7975	5640688,7225
60	-19388,8975	5640686,4225
61	-19385,5975	5640686,0225
62	-19384,7975	5640681,8225
63	-19393,0975	5640680,8225
64	-19381,2975	5640677,7225

5.2 Výšky stromů

Pro každý strom byla zjištěna výška s přesností na centimetry viz tabulka č. 11. Ve sloupci FID_05 jsou pořadová čísla stromů, sloupec Height_05 obsahuje výšky v květnu, obdobně sloupec Height_07 obsahuje výšky v červenci, sloupec Height_11 pak obsahuje výšky v listopadu.

Tabulka 11: Výšky vybraných stromů v květnu , červenci a listopadu v metrech

FID 05	Height 05	Height 07	Height 11
371	7,513746	7,744008	7,828112
372	5,186525	5,390685	5,425425
373	5,544935	5,406724	5,64874
374	6,769453	6,936083	7,055957
375	7,356903	7,590204	7,703125
376	8,924549	8,673746	8,947925
377	8,412796	8,563513	8,851473
378	7,813374	7,988949	8,413117
379	7,920027	7,983011	8,110528
380	7,362747	7,235772	7,575493
381	8,601205	8,532351	8,740423
382	8,750352	8,851477	9,069169

Statistické hodnoty lze spatřit na krabicovém grafu (Box plot) č. 1, kde h05 značí výšky v květnu - 443 stromů, h07 v červenci – 423 stromů a h11 v listopadu – 414 stromů.

Výšky stromů na zkusné ploše v květnu se dle grafu č. 1 nacházely v intervalu od 5,186 m do 12,611 m. Průměrná výška byla 9,135 m. Nejmenší strom měl výšku 3,574 m.

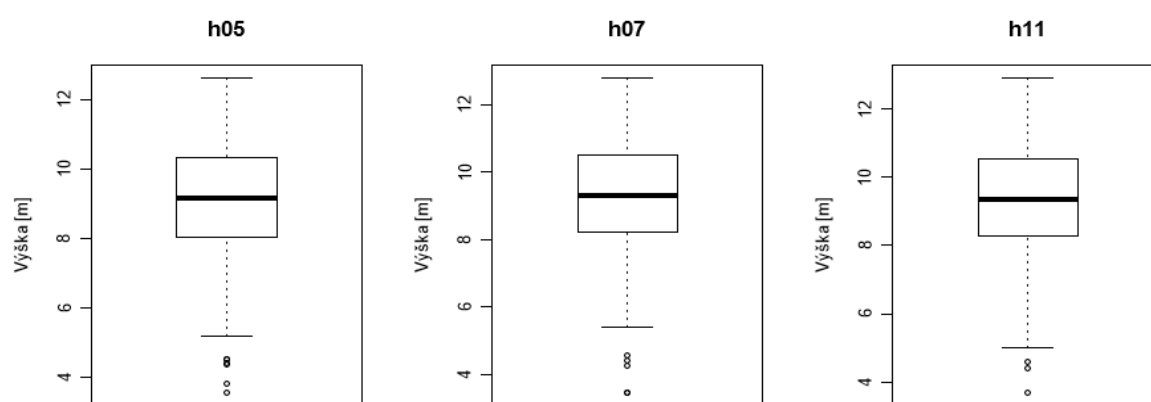
Výšky stromů na zkusné ploše v červenci se dle grafu č. 1 nacházely v intervalu od 5,390 m do 12,787 m. Průměrná výška byla 9,2971 m. Nejmenší strom měl výšku 3,463 m.

Výšky stromů na zkusné ploše v listopadu se dle grafu č. 1 nacházely v intervalu od 5,001 m do 12,897 m. Průměrná výška byla 9,3590 m. Nejmenší strom měl výšku 3,693 m.

Průměrná výška porostů byla spočítána dle aritmetického průměru.

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Tučná linie v krabicovém grafu č. 1 značí medián, což je hodnota, která rozděluje datový soubor tak, že polovina hodnot je menších nebo rovných než medián a polovina hodnot větších nebo rovných (Litschmannová 2011). Pro květen byl 9,156 m, červenec 9,287 m a pro listopad 9,326 m.



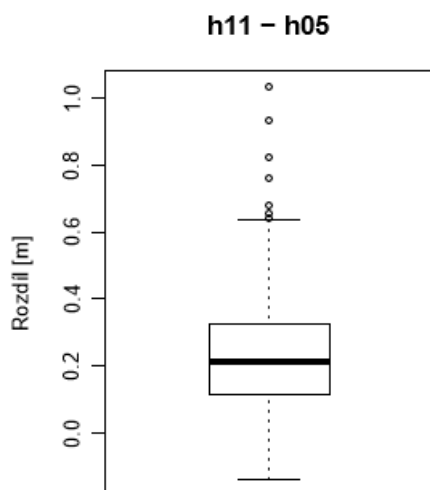
Graf 1: Krabicové grafy porovnávající výšky stromů za květen h05, červenec h07 a listopad h11

5.3 Přírůst stromů

Byl stanoven vypočítáním rozdílu výškových hodnot z jednotlivých měření. Rozdíl bylo nutné stanovovat odečtením předcházejícího měsíce od zvoleného. Přírůst stromů byl vyhodnocen z dat získaných v květnu a listopadu. Počet stromů, pro které byl odvozen přírůst, byl 414 ks.

Statistické hodnoty přírůstů za květen až listopad lze vidět na krabicovém grafu č. 2.

Přírůsty stromů se dle grafu č. 2 nacházely v intervalu od -0,1404 m do 0,635 m. Průměrný přírůst byl 0,2272 m. Medián byl 0,207 m. Nejvyšší přírůst dosahoval 1,033 m.



Graf 2: Krabicový graf vykazující přírůst od května do listopadu

5.4 Statistické zhodnocení výsledků

K tomu, abychom mohli potvrdit, že lze pomocí této metody změřit a potvrdit přírůst stromů, byla provedena statistická charakteristika.

Výběrovou statistickou charakteristikou bylo zvoleno Studentovo rozdělení (t- rozdělení).

Použití Studentova t-rozdělení nachází uplatnění zejména při modelování založeném na analýze malých výběrů. Některé možnosti použití mohou být například dle (Litschmannová 2011) následující:

- Testování hypotéz o střední hodnotě, pokud je rozptyl základního souboru neznámý a výběr pochází z normálního rozdělení.
- Testování hypotéz o shodě středních hodnot, za předpokladu, že máme k dispozici dva nezávislé výběry z normálních rozdělení, jejichž rozptyly jsou neznámé, ale shodné.
- Rozdělení je vhodným prostředkem pro analýzu výsledků regresní analýzy.

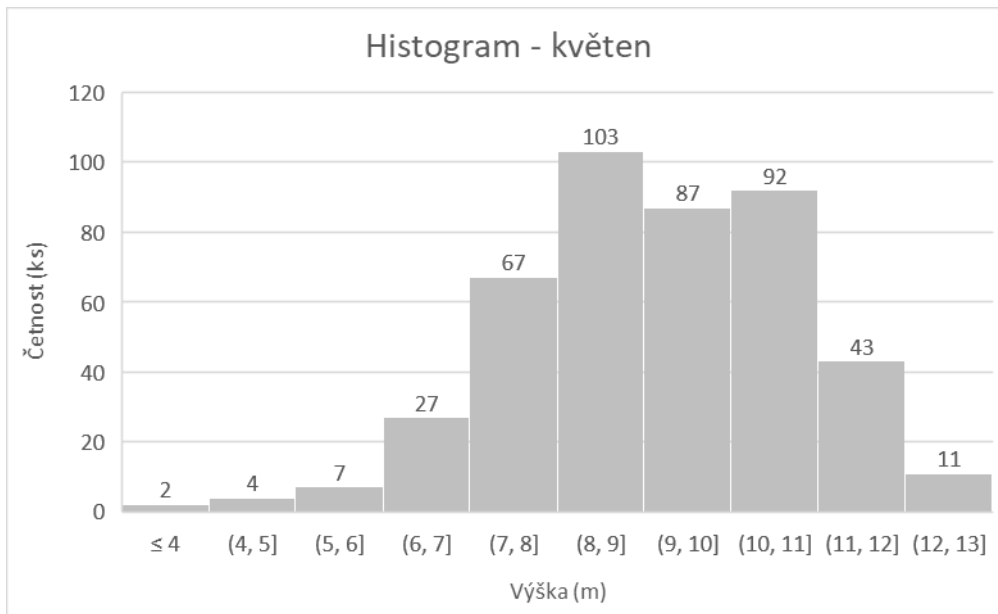
Studentův t-test se v závislosti na situaci, kdy se používá, rozlišuje dle (Lepš a Šmilauer 2014) na:

- Jedno výběrový t-test a Párový t-test
- Dvou výběrový t-test

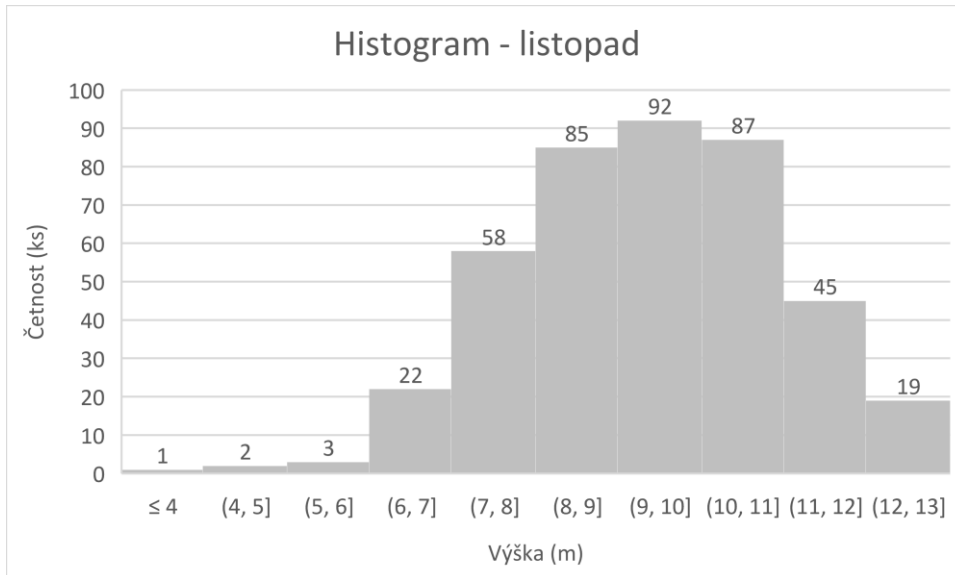
K použití Studentova t-testu, bylo nutné nejprve zjistit, zdali naše změřené hodnoty vykazují normální rozdělení.

5.4.1 Normální rozdělení výšek

Pro tento účel byl z údajů výšek za květen – graf č. 3 a listopad – graf č. 4 vytvořen histogram.



Graf 3: Histogram znázorňující rozdělení výšek – květen



Graf 4: Histogram znázorňující rozdělení výšek – listopad

Z grafu č. 3 a č. 4 je patrné, že oba histogramy vykazují normální rozdělení výšek. Díky této vlastnosti, bylo možné k statistickému potvrzení přírůstu využít Studentův t-test.

5.4.2 Statistické zhodnocení přírůstu

1) Dvou výběrový t-test.

Vzhledem k tomu, že naše data obsahovala rozdílný počet stromů za květen i za listopad, byl způsobem provedení Studentova t-testu zvolen dvou výběrový t-test. Ten byl proveden ve výše zmíněném RStudiosu.

Celkový počet hodnocených stromů byl tedy pro květen 443 a pro listopad 414.

Nulová hypotéza H_0 zněla: Na 95 % hladině významnosti předpokládáme, že variabilita výšek v květnu a listopadu je stejná.

Výstup ze softwaru RStudio lze spatřit na obrázku č. 31.

V tomto případě je p-value (p-hodnota) rovna 0,04109, což je méně než 0,05 a H_0 o stejnosti středních hodnot výšek stromů z květnu a listopadu zamítáme. Čili potvrzujeme, že mezi výškami je uplatněn statistický rozdíl s pravděpodobností 95,891 %. Testová statistika je rovna 2,0457 při 855 stupních volnosti. Konfidenční interval (interval spolehlivosti) rozdílu středních výšek stromů v květnu a listopadu je 0,009 m až 0,437 m. Poslední řádek výstupu obsahuje aritmetické průměry výšek stromů z obou měsíců mean of x – květen a mean of y – listopad udávaných v metrech.

```
> t.test(data$h11, data$h05, paired = F, var.equal = T)

      Two Sample t-test

data:  data$h11 and data$h05
t = 2.0457, df = 855, p-value = 0.04109
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.00904877 0.43712232
sample estimates:
mean of x mean of y
 9.359068  9.135983
```

Obrázek 31: Výsledek dvou výběrového t – testu v RStudiosu

2) Párový t-test

Aby bylo možné použít tento typ Studentova t-testu, bylo nutné stanovit stejný počet výšek stromů pro květen a listopad.

To znamená, že stromy odstraněné, či nezaznamenané nebudou do této analýzy zahrnuty. Celkový počet hodnocených stromů byl 414 pro oba měsíce. Provedení párového t-testu bylo provedeno v RStudiosu.

Nulová hypotéza H_0 zněla: Na 95 % hladině významnosti předpokládáme, že variabilita výšek v květnu a listopadu je stejná.

Výstup ze softwaru RStudio lze spatřit na obrázku č. 32.

V tomto případě je p-value (p-hodnota) $< 2,2e^{-16}$, což je méně než 0,05 a H_0 o stejnosti středních hodnot výšek stromů z května a listopadu zamítáme. Čili potvrzujeme, že mezi výškami je potvrzen statistický rozdíl s pravděpodobností téměř 100%. Testová statistika je rovna 27,089 při 855 stupních volnosti. Konfidenční interval (interval spolehlivosti) rozdílu středních výšek stromů v květnu a listopadu je 0,210 m až 0,243 m. Poslední řádek výstupu obsahuje aritmetický průměr rozdílu výšek stromů (přírůstu) od května do listopadu udávaný v metrech.

```
> t.test(data$h11, data$h05, paired = T, var.equal = T)

      Paired t-test

data:  data$h11 and data$h05
t = 27.089, df = 413, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.2107348 0.2437117
sample estimates:
mean of the differences
      0.2272233
```

Obrázek 32: Výsledek párového t – testu v RStudiu

Těmito testy bylo tak statisticky potvrzeno, že je možné pomocí této metody detekovat přírůst stromů.

6 Diskuze

Při využití satelitů a letadel v aplikaci DPZ v zájmu lesnictví může metoda ULS prorazit zlatou střední cestu, kdy bude možné přímo ovládat UAV, mapovat lesní porosty dle našeho zájmu, získávat konkrétní taxační veličiny, a to s možností kdykoliv provést a zopakovat proces sběru dat.

Kontakt s lesem samotným je nyní při aplikování této metody stále nenahraditelný, a věřím, že tomu bude v budoucnu stejně tak. A přeci jen, proč bychom se o ten krásný pocit být v přírodě ochuzovali? Nebyl to snad už od dávných dob sen člověka mít pohled na svět z ptačí perspektivy? Tato metoda nám to umožňuje. Díky ní je možno spatřit věci, které při standardním průzkumu ze země nemůžeme prozkoumat.

6.1 Zhodnocení potenciálu využití metody laserového skenování v praxi

Smrk na naší zkusné ploše disponoval velmi redukováným zakmeněním. Dle (Young 2000) je zakmenění relativní míra hustoty porostu. Udává stupeň využití produkčního prostoru stromy. Z tohoto důvodu byla tak naše zkusná plocha ideální pro výzkum laserového skenování z UAV, jelikož stromy byly rozmístěny ve značném rozestupu a tím, že věk porostu byl 40 let, nezabíraly velký výše zmíněný produkční prostor, a tak laserové paprsky mohly přímo cílit na individuálně stojící stromy. Proto bylo možno velice přesně nepřímou změřit jejich taxační charakteristiky. Další kladnou vlastností naší zkusné plochy pro výzkum bylo to, že se na ní vyskytovaly jen jehličnaté stromy. To znamená, že laserové paprsky při skenování prorážely mnohem méně hustší zápoj, než by tomu bylo například u listnatých stromů. (Wallace et al. 2012) potvrzuje, že tato metoda dosahuje svého maximálního potenciálu a velmi přesných výsledků při cílení na individuálně stojící stromy.

Lety nad zkusnými plochami byly vždy prováděny při slunném počasí bez oblačnosti a srážek. Nedoporučuje se provádět let, kdy je například deštivo nebo dokonce v mlze z důvodu, že laserové paprsky mohou být těmito přírodními podmínkami negativně ovlivněny. Stejně tak se nedoporučuje provádět let při nízkých teplotách spadajících pod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, jelikož to signifikantně redukuje životnost baterií v UAV. Limitní vysoká teplota,

je + 40 °C. Obdobně se nedoporučuje létat ve větrném počasí při rychlosti větru 8 m/s, neboť hrozí ztráta kontroly na UAV, či jeho nekontrolovatelný pád k zemi.

Jak bylo popsáno ve výsledcích, některé stromy nebyly do analýzy zahrnuty. Důvody proč tomu tak bylo jsou následující. Při zpracování dat v prostředí ArcGIS 10.5.1, byla použita funkce **Near**, kde byl nastaven rádius sjednocení vrcholů stromu 1 m. Tyto vrcholy tak ve své podstatě zaznamenány byly, ale dle mého uvážení, rozdíl vrcholu ve větší vzdálenosti než 1 metr se nedá považovat za správný. Proto tyto stromy byly z analýzy vyřazeny. V červenci to byly 4 stromy a v listopadu to bylo 12 stromů. Dále protože došlo k tomu, že při spuštění automatického algoritmu zpracování dat v prostředí ArcGIS 10.5.1 nebyl určen vrchol stromu, přičemž samotný strom zaznamenán byl. V červenci to byly 4 vrcholy a v listopadu 5 vrcholů. Dalším důvodem bylo to, že Stromy nebyly v prostředí ArcGIS 10.5.1 zobrazeny. Tento problém byl zapříčiněn tím, že ač trajektorie letu byla vždy stejná, získaná surová data neboli “project“ se po vyřízení v software RiPROCESS drobně lišila. Ovšem tento problém se objevil pouze při zobrazení dat získaných v červenci, kdy nebylo možno z tohoto důvodu determinovat 12 stromů. Toto bylo možné eliminovat tím, že by se v prostředí ArcGIS 10.5.1 tyto stromy odstranily i z vrstev v květnu a listopadu. Popřípadě, by bylo možné tyto nezaznamenané stromy odstranit i z výsledného seznamu stromů. Posledním důvodem bylo to, že v době mezi květnem a listopadem došlo k odstranění 12 stromů z porostu.

Nadefinovaný souřadnicový systém byl WGS-UTM 33 North. Ve studii (Jaakkola et al. 2010) bylo souřadnicové určení vrcholů stromů získaných pomocí ULS porovnáno s referenčním pozemním měřením. Autoři studie (Puliti et al. 2015) například použili pro určení souřadnic pozemní kontrolní body – Ground Control Points (GCPs). Tyto GCPs byly tvořeny černobílými terči s rozměry 50x50 cm. Souřadnice jejich středu byly stanoveny pomocí GPS a GLONASS. Tyto terče tak využili ke georeferenci výstupního 3D modelu fotogrammetrického snímku pořízeného pomocí UAV. V naší studii však nebylo provedeno porovnání získaných souřadnic s referenčním měřením z důvodu, že naše výsledné souřadnice byly získané s využitím integrovaného GPS přijímače, kdy současně pomocí IMU a gyroskopu s optickými vlákny v UAV, konkrétně RiCOPTERu bylo dosaženo přesného stanovení souřadnic. K dosažení extrémní přesnosti pak byl proveden přepočít podle post-procesní kinematiky. Přesné souřadnicové hodnoty potřebné pro přepočít nám poskytla virtuální referenční pozemní stanice. Konečná korektura souřadnicových hodnot proběhla pak zjištěním rozdílu vzdálenosti GPS přijímače od laserového skeneru v programu POSPac MMS. Z tohoto důvodu, tak nebylo

třeba získávat jiná referenční data pro stanovení souřadnic vrcholů. Naše získané souřadnice jsou tedy velice přesné a opravdu správné.

K potvrzení správnosti výšek stromů, nebylo třeba získávat referenční data výšek, protože oproti pozemnímu stanovování výšek, založeném na trigonometrickém principu, ať už pomocí dálkoměrů či totálních stanic, kdy bylo ve studii (Brede et al. 2017) dokázáno, že tato zařízení nejsou vždy schopna přesně detekovat vrchol stromu, je ULS metoda založena na principu LiDAR schopna vždy detekovat vrchol stromu (za dodržení správné metodiky) a to s přesností na centimetry. Obecně autoři studií jako (Brede et al. 2017), (Wallace et al. 2012) došli k závěrům, že po porovnání s běžnými metodami k stanovení výšek je pomocí ULS docíleno vysoké spolehlivosti.

Přírůsty stromů se nacházely v intervalu od -0,1404 m do 0,635 m. Negativní přírůst v našem případě znamená, že stromu mohla být odlomena špička, nebo byl mrtvý a došlo tak k opadu jehlic, čímž se zmenšila jeho velikost. Nejvyšší přírůst byl 1,033 m což je opravdu vysoká hodnota, a spíše než kvůli přirozenému růstu, zde došlo k nepřesnosti měření, kdy mohl být předchozí vrchol zaznamenán v jiné pozici.

Po provedení statistické analýzy bylo potvrzeno na hladině významnosti vyšší než 95 %, že přírůsty stromů byly opravdu detekovány. Primární výhoda spíše, než v extrémní přesnosti spočívá v extrémní rychlosti sběru dat na úrovni téměř všech stromů na cílové zkušné ploše. Bylo tak prokázáno, že v současné době díky této technologii, lze získat potřebné údaje s využitím automatických algoritmů v řádu jednotek hodin na úrovni hektarových porostů, což je velice stěžejní, né krok, ale skok vpřed

7 Závěr

Zásadním objevem je fakt, že s využitím technologie laserového skenování z UAV, je možno provést sběr dat s velkým prostorovým a časovým rozlišením, jejichž následnou úpravou, která není zdaleka tak složitá, se dají odvodit věrohodné a přesné taxační charakteristiky hektarových porostů. V této práci byly stanoveny přesné výšky a souřadnice stromů.

Stěžejním faktorem práce pak bylo, skrze provedení laserového skenování z UAV, následného pár hodinového procesu zpracování získaných dat, potvrzení a stanovení přírůstu stromů za vegetační období květen až listopad s pravděpodobností přesahující hladinu významnosti 95%.

Využití této technologie se v dnešní době a zejména při inventarizaci lesů, provádí pouze při experimentální úrovni, kdy probíhají výzkumy primárně na akademických půdách. Nicméně například společnost (FLASH FOREST INC. 2020) už dnes využívá technologie UAV k zalesňování, kdy jejich UAV doslova střílí semena stromů do země a zakládají nové porosty s ohromnou efektivitou v plné automatizaci.

Problém může nastat, kdy bude probíhat zpracování dat získaných z velkých porostů, neboť jejich objem bývá takřka enormní, a proto je při jejich následném zpracování velmi důležité disponovat moderní a výkonnou počítačovou technologií (Torresan et al. 2017). Na druhou stranu je možno, díky těmto objemným datům, ve vymodelované 3D architektuře bodového mračka zjistit komplexní údaje o tvaru stromu od kmene, větve po korunu stromu.

Tato metoda je velmi výhodná z hlediska nenáročnosti obslužného personálu na práci a čas. Z hlediska ekonomického je obrovskou překážkou počáteční investice do samotného UAV a techniky pro zpracování získaných dat, kdy celková výše počátečních nákladů dosahuje milionů korun.

8 Literatura

AKAY, Abdullah Emin, Hakan OĞUZ, Ismail Rakip KARAS a Kazuhiro ARUGA, 2009. Using LiDAR technology in forestry activities. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. **151**(1–4), 117–125. ISSN 01676369. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-008-0254-1

ÅKERBLOM, M, P RAUMONEN a M KAASALAINEN, 2012. Comprehensive quantitative tree models from TLS data. **38**(5), 33101.

BHATTA, Basudeb, 2010. Global navigation satellite systems: insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and others. In: . B.m.: BS Publications, s. 438. ISBN 9780415665605.

BRANDTBERG, Tomas, Timothy A WARNER, Rick E LANDENBERGER a James B MCGRAW, 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint , high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America [online]. **85**, 290–303. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(03)00008-7

BREDE, Benjamin, Alvaro LAU, Harm M. BARTHOLOMEUS a Lammert KOOISTRA, 2017. Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR derived canopy height and DBH with terrestrial LiDAR. *Sensors (Switzerland)* [online]. **17**(10), 1–16. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s17102371

CARSON, W W, H-E. ANDERSEN, S E REUTEBUCH a R J MCGAUGHEY, 2004. LiDAR applications in forestry: An overview. *ASPRS Annual Conference Proceedings* [online].(May2004),9.Dostupné z: http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/publications/Carson%7B_%7Det%7B_%7Dal%7B_%7D2004.PDF

CERTIFIED B CORPORATION, 2020. *RStudio | Open source & professional software for data science teams - RStudio* [online] [vid. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://rstudio.com/>

ČESKÁ REPUBLIKA, 1997. *49/1997 Sb. Zákon o civilním letectví*. 1997.

ČESKÁ REPUBLIKA, 2018. *PŘEDPIS L2 DOPLNĚK X* [online]. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz>.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, Inc., 2020. *ArcMap / Documentation* [online]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, Inc., Clayton CRAWFORD, Khalid DURI a Jie CHANG, 2020. *3D Sample Tools* [online] [vid. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fe221371b77940749ff96e90f2de3d10>

FAHLSTROM, Paul a Gleason THOMAS, 2012. Introduction to UAV Systems. In: . USA: John Wiley & Sons, s. 312. ISBN 1118396812.

FLASH FOREST INC., 2020. *Flash Forest* [online] [vid. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://flashforest.ca/>

HOLOPAINEN, Markus, Mikko VASTARANTA, Ville KANKARE, Tuula KANTOLA, Harri KAARTINEN, Antero KUKKO, Matti VAAJA, Juha HYYPPÄ a Hannu HYYPPÄ, 2011. Mobile terrestrial laser scanning in urban tree inventory [online]. 1–7. Dostupné z: [https://tuhat.helsinki.fi/portal/en/publications/mobile-terrestrial-laser-scanning-in-urban-tree-inventory\(00587c70-ec9a-40b4-b3d5-2215028eab02\).html](https://tuhat.helsinki.fi/portal/en/publications/mobile-terrestrial-laser-scanning-in-urban-tree-inventory(00587c70-ec9a-40b4-b3d5-2215028eab02).html)

HORÁK, Richard, 2012. Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů. In: . Olomouc: chlup.net, s. 143. ISBN 978-80-903958-6-2.

JAAKKOLA, Anttoni, Juha HYYPPÄ, Antero KUKKO, Xiaowei YU, Harri KAARTINEN, Matti LEHTOMÄKI a Yi LIN, 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. B.m.: Elsevier B.V., **65**(6), 514–522. ISSN 09242716. Dostupné z: [doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002)

LEE, KYUHO, 2004. Development of unmanned aerial vehicle (UAV) for wildlife surveillance [online]. 55. Dostupné z: <http://eprints.uanl.mx/5481/1/1020149995.PDF>

LEPŠ, Jan Šuspa a Petr ŠMILAUER, 2014. *Biostatistika*. České Budějovice: Přírodovědecká fakulta Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích.

LIANG, Xinlian, Juha HYYPPA, Antero KUKKO, Harri KAARTINEN, Anttoni JAAKKOLA a Xiaowei YU, 2014. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* [online]. B.m.: IEEE, **11**(9), 1504–1508. ISSN 1545598X. Dostupné z: [doi:10.1109/LGRS.2013.2297418](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2297418)

LILLESAND, Thomas M., Ralph W. KIEFER a Jonathan W. CHIPMAN, 2015. Remote sensing and image interpretation. In: . B.m.: John Wiley & Sons, s. 736. ISBN 111834328X.

LITSCHMANNOVÁ, Martina, 2011. *Úvod Do Statistiky*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.

MILLER JONES, Edward R., 2011. Global Navigation Satellite Systems. In: . B.m.: FastBook Publishing, s. 144. ISBN 978-613-0-11348-3.

MURDYCH, Zdeněk, 1985. DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ. In: ACADEMIA, ed. Praha: Československá akademie věd, s. 142. ISBN 21-062-85.

NÆSSET, Erik, 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* [online]. **80**(1), 88–99. ISSN 00344257. Dostupné z: [doi:10.1016/S0034-4257\(01\)00290-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5)

PITKA, J, J HYYPPA a M VEHMAS, 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions [online]. **90**, 319–330. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rse.2004.01.006](https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.006)

PULITI, Stefano, Hans Ole ØRKA, Terje GOBAKKEN a Erik NÆSSET, 2015. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing* [online]. **7**(8), 9632–9654. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs70809632

RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS, 2020a. *RiCOPTER VUX-SYS* [online]. 2020. Dostupné z: <http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/ricopter-with-vux-sys/>

RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS, 2020b. *RIEGL* [online]. Dostupné z: <http://www.riegl.com/>

ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU ČESKÉ REPUBLIKY, 2020. *DronView 3.7* [online]. Dostupné z: <https://dronview.rlp.cz/>

TICHÝ, Tomáš a Jakub KARAS, 2016. DRONY. In: . Brno, CZ: Computer Press, Albatros Media a.s., 2016, s. 266. ISBN 978-80-251-4680-4.

TORRESAN, Chiara, Andrea BERTON, Federico CAROTENUTO, Salvatore Filippo DI GENNARO, Beniamino GIOLI, Alessandro MATESE, Franco MIGLIETTA, Carolina VAGNOLI, Alessandro ZALDEI a Luke WALLACE, 2017. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing* [online]. B.m.: Taylor & Francis, **38**(8–10), 2427–2447. ISSN 13665901. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2016.1252477

VYSOUDIL, M., 1993. DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ III. In: . 3. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, s. 57. ISBN 80-7067-217-X.

WALLACE, Luke, Arko LUCIEER, Christopher WATSON a Darren TURNER, 2012. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing* [online]. **4**(6), 1519–1543. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs4061519

WIESER, Martin, Gottfried MANDLBURGER, Markus HOLLAUS, Johannes OTEPKA, Philipp GLIRA a Norbert PFEIFER, 2017. A case study of UAS borne laser scanning for measurement of tree stem diameter. *Remote Sensing* [online]. **9**(11), 1–11. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs9111154

WILKES, Phil, Alvaro LAU, Mathias DISNEY, Kim CALDERS, Andrew BURT, Jose GONZALEZ DE TANAGO, Harm BARTHOLOMEUS, Benjamin BREDE a Martin HEROLD, 2017. Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment* [online]. B.m.: The Authors, **196**, 140–153. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2017.04.030

WU, Bin, Bailang YU, Wenhui YUE, Song SHU, Wenqi TAN, Chunling HU, Yan HUANG, Jianping WU a Hongxing LIU, 2013. A voxel-based method for automated identification and morphological parameters estimation of individual street trees from mobile laser scanning data. *Remote Sensing* [online]. **5**(2), 584–611. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs5020584

YOUNG, Harold, 2000. Dendrometrie. *Forest Science* [online]. **11**(1), 152. ISSN 1938-3738. Dostupné z: doi:10.1093/forestscience/11.1.41