

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra hospodářské úpravy lesa



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Vyhodnocení vlivu trajektorie mobilního pozemního  
laserového skenování na kvalitu 3D rekonstrukce kmenů  
stromů**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Autor: Bc. Jakub Třepeš**

**Vedoucí práce: Ing. Karel Kuželka, Ph.D.**

**2024**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Trepeš

Lesní inženýrství

Název práce

**Vyhodnocení vlivu trajektorie mobilního pozemního laserového skenování na kvalitu 3D rekonstrukce kmenů stromů**

Název anglicky

**Evaluation of the effect of the trajectory on the quality of 3D reconstruction of forest tree stems using mobile terrestrial laser scanning**

---

### Cíle práce

Vyhodnotit vliv trajektorie mobilního pozemního laserového skenování na kvalitu rekonstrukce kmenů stromů v různých typech lesních porostů.

Formulovat doporučení pro volbu trajektorie mobilního pozemního laserového skenování.

### Metodika

#### LS 2023

V součinnosti s katedrou HÚL bude proveden sběr laserových dat v různých typech porostů na úrovni zkušné plochy a na úrovni porostů.

Budou nasbírána validační data umožňující vyhodnocení kvality rekonstrukce.

#### ZS 2023

Pomocí dostupného softwaru budou v laserových datech identifikovány jednotlivé stromy, změřeny jejich tloušťky a popsána kvalita rekonstrukce. Získané údaje budou porovnány s validačními daty.

#### LS 2024

Statistické vyhodnocení, formulace doporučení pro volbu trajektorie.

**Doporučený rozsah práce**

50 stran

**Klíčová slova**

LiDAR, 3D data, mobilní skenování, trajektorie

**Doporučené zdroje informací**

- Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyyppä, J., Seletković, A., & Kukko, A. (2020). Hand-held personal laser scanning – current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42(1), 165–183. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.858>
- Gollob, C., Ritter, T., & Nothdurft, A. (2020). Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/RS12091509>
- Gollob, C., Ritter, T., Wassermann, C., & Nothdurft, A. (2019). Influence of scanner position and plot size on the accuracy of tree detection and diameter estimation using terrestrial laser scanning on forest inventory plots. *Remote Sensing*, 11(13), 1–30. <https://doi.org/10.3390/rs11131602>
- Kuželka, K., Marušák, R., & Surový, P. (2022). Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115, 103104. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2022.103104>
- Perugia, B. Del, Giannetti, F., Chirici, G., & Travaglini, D. (2019). Influence of scan density on the estimation of single-tree attributes by hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 10(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/f10030277>
- SUROVÝ, Peter; KUŽELKA, Karel; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A ENVIRONMENTÁLNÍ FAKULTA. *Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-3008-5.
- Trochta, J., Král, K., Janík, D., & Adam, D. (2013). Arrangement of terrestrial laser scanner positions for area-wide stem mapping of natural forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(4), 355–363. <https://doi.org/10.1139/CJFR-2012-0347>

**Předběžný termín obhajoby**

2023/24 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Karel Kuželka, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra hospodářské úpravy lesů a DPZ

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2024

**doc. Ing. Peter Surový, PhD.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2024

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 10. 03. 2024

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vyhodnocení vlivu trajektorie mobilního pozemního laserového skenování na kvalitu 3D rekonstrukce kmenů stromů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Kuželky, Ph.D. a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

Praha 1. 4. 2024

---

## **Poděkování**

Chtěl bych vyjádřit upřímné poděkování všem, kteří mi pomohli při realizaci této diplomové práce. Nejprve bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Kuželkovi, Ph.D. za vedení práce, odborné konzultace, cenné rady a připomínky při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu, kterou mi poskytla během celého studia.

## **Abstrakt**

V této diplomové práci byl zkoumán vliv trajektorie mobilního laserového skenování na kvalitu 3D rekonstrukce kmenů stromů. Bylo porovnáváno celkem 7 trajektorií na 4 strukturně odlišných plochách s důrazem na porosty strukturně bohaté. Každá z těchto ploch měla rozlohu 1000 m<sup>2</sup>. Měření probíhalo pomocí laserového skeneru GeoSLAM Zeb Horizon. Validáčnı data byla zpracována manuálně v aplikaci CloudCompare. Porovnávacı data byla zpracována algoritmem mean-shift a RANSAC.

Trajektorie byly porovnávány na základě detekce počtu stromů, tedy kolik procent stromů nebylo detekováno (omission) a kolik procent stromů bylo detekováno chybně (commission). Stejným způsobem byla porovnávána i detekce kruhové základny, tedy kolik procent kruhové základny chybělo a kolik bylo detekováno nesprávně. Posledními zkoumanými aspekty byly průměrná chyba (ME) a průměrná kvadratická chyba (RMSE) v odhadu tloušťky stromu.

Průměrná detekce se u použitých trajektorií pohybovala mezi 87,06 % a 94,95 %, commission pak u počtu stromů bylo naměřeno od 5,11 % do 9,62 %. Co se týče kruhové základny, tak tam se omission pohybovalo mezi 3,8 % až 1,56 %, commission pak dosáhlo 1,37 % až 5,49 %. Průměrná chyba (ME) byla v rozmezí -0,01 cm až 0,59 cm. Průměrná kvadratická chyba (RMSE) se pohybovala mezi 2,85 cm a 4,22 cm.

Na základě statistického porovnání bylo zjištěno, že nestačí, když trajektorie vede pouze po obvodu měřené plochy, ale musí vést i jejím vnitřkem. Nejvíce efektivní se ukázala trajektorie, která plochu obkrouží a následně ji dvakrát kolmě protne, a trajektorie, která plochu obkrouží, následně ji protne v jejím středu a vlnovitě se vrátí zpět na začátek.

Klíčová slova: LiDAR, 3D data, mobilní laserové skenování, trajektorie

## **Abstract**

This diploma thesis investigated the effect of a mobile laser scanning trajectory on the quality of 3D tree trunk reconstruction. A total of 7 trajectories were compared across 4 structurally distinct plots, with an emphasis on stands rich in structure. Each plot covered an area of 1000 m<sup>2</sup>. The measurements were conducted using a GeoSLAM Zeb Horizon laser scanner. Validation data were manually processed in CloudCompare. Comparative data were processed using mean-shift and RANSAC algorithms.

The trajectories were compared on a tree count detection basis, assessing the percentage of undetected trees (omission) and incorrectly detected trees (commission). Similarly, circular base detection was compared, i.e., what percentage of the circular base was missed and what percentage was detected incorrectly. The last aspects examined were the mean error (ME) and root mean square error (RMSE) in tree thickness estimation.

The average detection ranged from 87.06 % to 94.95 % across the trajectories used, with commission rates ranging from 5.11 % to 9.62 % for the number of trees measured. For circular base detection, omission rates ranged from 3.8 % to 1.56 %, and the commission then reached 1.37 % to 5.49 %. The mean error (ME) ranged from -0.01 cm to 0.59 cm. The root mean squared error ranged (RMSE) between 2.85 cm and 4.22 cm.

Based on statistical comparison, it was determined that simply running the trajectory along the perimeter of the measured area is insufficient, it must also traverse through its interior. The most effective trajectory identified was one that encircles the surface and intersects it twice perpendicularly, as well as one that circles the surface, intersects it at its centre, and then returns back in waves to the starting point.

Keywords: LiDAR, 3D data, mobile laser scanning, trajectory

## **Obsah**

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce.....	2
3 Literární rešerše .....	3
3.1 Trojrozměrná data.....	3
3.2 Magnetický digitizér.....	4
3.3 Fotogrammetrie.....	5
3.4 Laserové skenování .....	6
3.4.1 Pozemní laserové skenování .....	8
3.4.1.1 Pozemní laserové skenování v lesnictví .....	8
3.4.2 Letecké laserové skenování .....	9
3.4.2.1 Letecké laserové skenování v lesnictví .....	10
3.4.3 Mobilní laserové skenování .....	11
3.4.3.1 Mobilní laserové skenování v lesnictví .....	12
3.5 Určování pozice měřicího zařízení .....	12
3.5.1 Globální navigační satelitní systémy.....	12
3.5.1.1 GPS-NAVSTAR .....	14
3.5.1.2 GLONASS.....	15
3.5.1.3 Galileo.....	16
3.5.2 IMU.....	17
3.5.3 SLAM .....	18
3.5.4 Trajektorie .....	19
4 Metodika.....	25
4.1 Sběr dat .....	25
4.1.1 Lokalita .....	25
4.1.2 Použitá technika .....	27
4.1.2.1 Vertex laser Geo .....	27
4.1.2.2 GeoSLAM Zeb Horizon .....	28
4.1.3 Použité trajektorie.....	29
4.2 Zpracování dat z mobilního laserového skenování.....	30
4.3 Zpracování bodových mračen .....	33
4.4 Vyhodnocení dat .....	34
5 Výsledky.....	37
5.1 Detekce počtu stromů .....	37
5.2 Detekce kruhové základny .....	44
5.3 Chyba určení výčetní tloušťky .....	49



6 Diskuse .....	54
7 Závěr .....	57
8 Seznam použité literatury .....	58
9 Seznam příloh .....	63
10 Přílohy .....	64

## **Seznam obrázků, tabulek a grafů**

### **Seznam obrázků**

Obrázek 1: Schéma výpočtu metody tranzitního času, Wehr, Lohr (1999).....	7
Obrázek 2: Schéma výpočtu metody fázového posunu, Wehr, Lohr (1999).....	7
Obrázek 3: Uspořádání satelitů GPS kolem Země dostupné z GPS.gov .....	15
Obrázek 4: Uspořádání satelitů navigačního systému GLONASS dostupné z: gssc.esa.int .....	16
Obrázek 5: Konstelace satelitů Galileo, dostupné z: esa.int.....	17
Obrázek 6: Trajektorie laserového skenování ZEB Horizon (b) iPad Pro (c) (Mokroš a kol., 2021) .....	20
Obrázek 7: Trajektorie Gollob a kol. (2020) .....	20
Obrázek 8: Trajektorie Del Perugia a kol. (2019): validační data vlevo, rozestup 10 m uprostřed, rozestup 15 m vpravo .....	21
Obrázek 9: Trajektorie Bauwens a kol. (2016) .....	21
Obrázek 10: Trajektorie Cabo a kol. (2018) .....	22
Obrázek 11: Trajektorie Kuželka a kol. (2022) .....	23
Obrázek 12: Trajektorie Kašpar (2022): smrkový porost (vlevo), bukový porost (vpravo) .....	23
Obrázek 13: Trajektorie Zamec (2022) .....	24
Obrázek 14: Plocha č. 1 (P1).....	25
Obrázek 15: Plocha č. 2 (P2).....	26
Obrázek 16: Plocha č. 3 (P3).....	26
Obrázek 17: Plocha č. 4 (P4).....	27
Obrázek 18: Vertex laser Geo .....	28
Obrázek 19: Ultrazvuk Vertex na ploše 1.....	28
Obrázek 20: GeoSLAM ZEB HORIZON .....	29
Obrázek 21: Použité trajektorie.....	30
Obrázek 22: Prostředí aplikace GeoSLAM Hub.....	30
Obrázek 23: Posuzování na základě vizualizace mračna a trajektorie .....	31
Obrázek 24: Manuální registrace.....	31
Obrázek 25: Automatická registrace plochy.....	32
Obrázek 26: Oříznutá plocha zbavená země.....	32
Obrázek 27: Ověření, zda se jedná o stromy pro validační data a jejich lokalizace..	34
Obrázek 28: Vzorec výpočtu ME a RMSE, Kuželka a kol. (2022) .....	36
Obrázek 29: ANOVA comission a trajektorie+plocha.....	42

Obrázek 30: ANOVA commission a trajektorie+plocha .....	43
Obrázek 31: ANOVA KZ_omission a trajektorie+plocha .....	47
Obrázek 32: ANOVA KZ_commission a trajektorie+plocha .....	48
Obrázek 33: ANOVA ME a trajektorie+plocha .....	52
Obrázek 34: ANOVA RMSE a trajektorie+plocha .....	53

### **Seznam tabulek**

Tabulka 1: Detekce stromů na P1.....	38
Tabulka 2: Detekce stromů na P2.....	39
Tabulka 3: Detekce stromů na P3.....	40
Tabulka 4: Detekce stromů na P4.....	41
Tabulka 5: Průměrné detekce stromů.....	41
Tabulka 6: Detekce kruhové základny na P1 .....	44
Tabulka 7: Detekce kruhové základny na P2 .....	44
Tabulka 8: Detekce kruhové základny na P3 .....	45
Tabulka 9: Detekce kruhové základny na P4 .....	46
Tabulka 10: Průměrné chyby kruhové základny .....	46
Tabulka 11: Detekce kruhové základny na P2.....	49
Tabulka 12: ME a RMSE na P2.....	50
Tabulka 13: ME a RMSE na P3.....	50
Tabulka 14: ME a RMSE na P4.....	51
Tabulka 15: Průměrné ME a RMSE.....	51

### **Seznam grafů**

Graf 1: Tloušťková struktura na P1 .....	37
Graf 2: Tloušťková struktura na P2 .....	38
Graf 3: Tloušťková struktura na P3 .....	39
Graf 4: Tloušťková struktura na P4 .....	40
Graf 5: Vliv trajektorie na omission .....	42
Graf 6: Vliv trajektorie na commission.....	42
Graf 7: Tukeyho post-hoc analýza D_omission a trajekotrie .....	43
Graf 8: Vliv trajektorie na omission KZ.....	47
Graf 9: Vliv trajektorie na commission KZ .....	47
Graf 10: Tukeyho post-hoc analýza KZ_omission a trajekotrie .....	48
Graf 11: Vliv trajektorie na ME .....	52
Graf 12: Vliv trajektorie na RMSE .....	52

## **Seznam použitých zkratek a symbolů**

3D – 3 dimenze

ABA – Area based approach

ALS – Airborne laser Scanning

CPU – Centrální procesorová jednotka

dbh – Diameter at breast height

DPZ – Dálkový průzkum Země

ESA – European space agency

EUSPA – Europina space programme agency

FOC – Final Operation Capability

GNSS – Globální navigační satelitní systémy

GPS – Globální polohový systém

HLS – Hand-held laser scanning

HPLS – Hand-held personal laser scanning

IMU – Inerciální měřicí jednotka

IOC – Initial Operation Capability

ITD – Individual tree based approach

KZ – Kruhová základna

LiDAR – Light Detection and Ranging

ME – Mean error

MEO – Medium Earth orbit

MLS – Mobilní laserové skenování

NIL – Národní inventarizace lesů

OCS – Operational control segment

PLS – Personal laser scanning

PPK – Post Processing Kinematics

QZSS – Quasi-Zenith Satellite System

RANSAC – Random sample consensus

RGB – Red green blue

RMSE – Root mean square error

RTK – Real Time Kinematics

SfM – Structure from Motion

SIFT – Scale Invariant Feature Transform

SLAM – Simultánní lokalizace a mapování

SURF – Speeded Up Robust Features

TOF – Time of flight

TLS – Terénní laserové skenování

UAV – Unmanned Aerial Vehicles

ULS – Unmannedborne laser scanning

ÚHÚL – Úřad pro hospodářskou úpravu lesů

## 1 Úvod

V dnešní době je pozoruhodné sledovat neustálý pokrok technologií, který ovlivňuje každou oblast lidské činnosti. Jedná se např. o informační technologie, medicínu, průmysl, zemědělství a lesnictví. Všechna tato odvětví jsou svědky rychlého rozvoje technologických inovací. Dokonce i tradiční lesnický sektor není výjimkou. V lesnictví dochází k technickému pokroku zejména v oblasti těžebních technologií. Lesní inventarizace však častokrát zůstává u starých a v současnosti již neefektivních metod.

Jedním ze způsobů, jakým by se dalo lesní hospodářství zefektivnit, jsou moderní metody sběru dat. Jak uvádí Iglhaut a kol. (2019), tak sběr terénních dat pro účely inventarizace je pracný, časově náročný a drahý a nelze jej použít na velkých plochách, což drasticky omezuje počet terénních inventarizací, které si lze dovolit. Ačkoliv postupem času byly do praxe implementovány nástroje, jakými jsou digitální průměrky, výškoměry či digitální lesní hospodářské knihy (LHP), stále je zde prostor pro zlepšení. Možností pro zlepšení by mohlo být nesbírat pouze hodnoty, jakými je například výška či výčetní tloušťka, ale sbírat komplexní informace v podobě trojrozměrných dat. Metodami zabývající se sběrem 3D dat se věnuje vědní obor Dálkový průzkum Země tzv. DPZ.

V rámci inventarizace lesů lze použít několik metod DPZ. Tím je například fotogrammetrie, která dokáže z fotografií vymodelovat 3D modely měřených objektů. Tyto modely pak mohou být použity pro měření dendrometrických veličin či pro lokalizaci jednotlivých stromů. Fotogrammetrie již byla aplikována i do Národní inventarizace lesů.

Další alternativou pro získávání trojrozměrných dat je laserové skenování. Využití této technologie pro modelování reliéfu Země a porostů na ní probíhá již několik desítek let. Laserové skenování se v základu dá rozdělit na laserové skenování letecké, pozemní a mobilní. S postupným technickým rozvojem se laserové skenování stává stále přesnějším a dostupnějším. Ačkoliv je tato technologie časově nenáročná, tak v praxi ještě nenašla plné uplatnění a její využití je zpravidla pouze pro vědecké účely.

Tato práce se bude konkrétně zabývat mobilním laserovým skenováním, které v posledních letech prošlo obrovským rozvojem, a to zejména díky zvýšení dosahu laserového skeneru, díky čemuž je možné skenovat větší plochy, a technologii SLAM, který umožňuje mapování i v oblastech s nedostatečným signálem GPS.

## **2 Cíl práce**

Cílem této diplomové práce je vyhodnotit vliv trajektorie mobilního pozemního laserového skenování na kvalitu rekonstrukce kmenů stromů v různých typech lesních porostů. Specificky se zaměří na zhodnocení, jak různé trajektorie skenování ovlivňují přesnost rekonstrukce kmenů stromů na plochách s různým typem lesních porostů. Na základě této analýzy budou formulována doporučení pro volbu optimální trajektorie mobilního pozemního laserového skenování.

### **3 Literární rešerše**

Tato diplomová práce bude zaměřena na získávání 3D dat, konkrétně se zaměří na možnosti jejich sběru. Dále se bude věnovat druhům laserového skenování, speciálně pak mobilnímu laserovému skenování, které spadá do metod Dálkový průzkum Země (DPZ). DPZ představuje nástroj pro získávání povrchových dat o lesních ekosystémech bez potřeby fyzické přítomnosti na místě. Tato metoda využívá senzorů umístěných na družicích, letadlech a dalších nosičích k získávání obrazových a spektrálních informací. Svatoňová, Leuermann (2010) pak definují DPZ takto: Dálkovým průzkumem Země se rozumí zkoumání, měření a zobrazování objektů a jevů v krajině sféře bez přímého fyzického kontaktu s nimi.

#### **3.1 Trojrozměrná data**

Trojrozměrná data též nazývaná 3D data, představují formu digitálních informací, které reprezentují objekty či scény ve třírozměrném prostoru. Na rozdíl od dvourozměrných dat, která jsou omezena pouze na výšku a šířku, 3D data zahrnují také hloubku, což umožňuje realističtější zobrazení fyzického světa. Využití těchto dat nemusí sloužit pouze k záznamu reálného světa, lze je například měřit, analyzovat, popřípadě pořizovat digitální kopie reálných objektů.

Kuželka a kol. (2014) uvádí: Základní úlohou jakéhokoliv měření živého světa je převést tento svět a objekty v něm do světa numerického, digitálního; jinými slovy do číselného formátu. Kuželka a kol. (2014) také trojrozměrná data popisuje jako data, která jsou popsána třemi dimenzemi. Tyto dimenze můžeme označovat matematickými veličinami (x, y, z), nebo názvy jako je výška, šířka, hloubka. Lim a kol. (2003) se o 3D datech vyjadřuje takto: Trojrozměrná (3D) data, která mohou popisovat výšku stromů nebo korun, mají velký potenciál pro inventarizaci lesů.

Dělení trojrozměrných dat lze provést několika způsoby. Jedním z nich je dělení podle typu sběru dat. 3D data lze sbírat dvěma způsoby, a to buď kontaktně, za použití magnetického digitizéru, nebo bezkontaktně, a to metodou fotogrammetrie či pomocí laserového skenování.

Dalším dělením je dělení na data strukturální a povrchová. Povrchová data tvoří bodová mračna kolem měřených objektů. Typickým příkladem jsou výsledky laserového skenování, fotogrammetrická bodová pole nebo tzv. roztroušená bodová pole vzniklá sběrem dat pomocí různých 3D měřicích přístrojů (Kuželka a kol., 2014).



Strukturální data pak představují taková data, která popisují strukturu měřeného organismu, kterým může být například rostlina či strom. Strukturu chápeme v 3D pojetí jako permanentní vztah několika entit. Z tyto entity (objekty) většinou považujeme známé geometrické tvary jako válec, koule, kvádr apod. (Kuželka kol., 2014). Strukturální data se pak dají získávat např. magnetickým digitizérem, kde větve, popřípadě kořenové systémy zobrazujeme za pomoci válců a komolých kuželů různých velikostí.

### **3.2 Magnetický digitizér**

Magnetický digitizér je přístroj, díky kterému je možné měřit a zpracovávat jak povrchová, tak i strukturní data. Princip měření spočívá ve vytvoření magnetického pole, ve kterém se nachází měřicí jednotka tzv. stylus, který po stisku tlačítka zaznamená svoji pozici a natočení. Šleglová a kol. (2024) uvádí, že magnetický digitizér je nejpřesnější metodou pro získání dat o architektuře stromu, a to zejména v případě, kdy se jeho některé části vzájemně překrývají.

Měřicí soustava se skládá z transformátoru napětí, CPU jednotky, zdroje magnetického pole a snímače. Zdroje magnetického pole se dělí podle rozsahu do čtyř skupin, a to TX1 (do 60 cm), TX2 (do 150 cm), TX4 (do 214 cm) a Long Ranger (do 4,5 m) (Kuželka a kol., 2014).

Při měření povrchových dat je zapotřebí za pomoci stylusu zaznamenat obvody kmene. Obvody kmene by měly být zaznamenávány při každé změně zakřivení nebo při signifikantní změně tloušťky kmene (Kuželka a kol., 2014). Následně se za použití automatických metod vymodeluje povrch měřeného kmene, což nám umožňuje určit jeho objem.

Při měření dat strukturálních se měří začátek a konec měřeného segmentu, následně se manuálně zapíše tloušťka měřeného segmentu a software vymodeluje měřený úsek jako válec. Kuželka a kol. (2014) uvádí: Digitalizaci začneme v bodě, ve kterém vychází ze země a sledujeme hlavní osu (stonek, kmen) až po její konec. Při každé změně tloušťky v bodě větvení zaznačíme bod a tloušťku předchozího segmentu.

Strukturální měření se používá především ve výzkumu za účelem měření kořenových systémů. Nicméně Šleglová a kol. (2024) jako nejznámější obor, ve kterém se magnetický digitizér využívá, uvádí medicínu. Zde tato technologie umožňuje přesnou navigaci hluboko v lidském těle tím, že v reálném čase poskytuje data o pozici a orientaci sledovaných nástrojů.

### **3.3 Fotogrammetrie**

Fotogrammetrie je vědní obor, který se zabývá zpracováním prostorových informací na fotografických snímcích a jehož hlavním úkolem je rekonstrukce tvarů, měření rozměrů a určování polohy objektů na snímcích (Surový, Kuželka, 2019).

Tato technologie se často využívá v geodézii, geografii, stavebnictví, lesnictví a mnoha dalších oborech, kde je potřeba získat detailní a přesné informace o objektech a jejich umístění v prostoru. Tento proces může být prováděn ručně, ale také se stále více automatizuje a využívá moderní technologie, jako jsou drony a sofistikovaný software pro zpracování obrazových dat.

Pro vytvoření trojrozměrných dat z dvourozměrných fotografií je v současné době využívána technologie Structure from Motion (SfM). Tato technologie funguje na principu, že pokud se pohybujeme, tak se nám okolní objekty pohybují zdánlivou rychlostí, ta závisí na vzdálenosti objektu od pozorovatele. Objekty, které jsou blíže, se zdánlivě pohybují rychleji než ty, které jsou vzdálenější. Tento jev se nazývá pohybová paralaxa. Na základě tohoto jevu je možné vypočítat hloubku jednotlivých objektů na fotografii a následně vytvořit trojrozměrný model scény z původních dvourozměrných dat.

Surový, Kuželka (2019) se k SfM vyjadřují, že princip rekonstrukce trojrozměrného prostoru s využitím pohybu je již staršího data, za jeho masovým rozšířením stojí automatizace celého procesu umožněného pokrokem v oboru počítačového vidění, konkrétně vznik algoritmů automatické detekce a porovnání charakteristických bodů v digitálním obraze.

Nejběžnější algoritmy pro porovnání charakteristických bodů jsou algoritmy SIFT (Scale Invariant Feature Transform) a SURF (Speeded Up Robust Features). Oba tyto algoritmy vyhledávají výrazné body (features) – vysoce kontrastní skupiny pixelů, které mohou být v obraze detekovány i v případě posunu, rotace či změny měřítka obrazu nebo změny osvětlení objektů. Tyto stabilní body nejčastěji představují hrany nebo rohy objektů (Surový, Kuželka, 2019). Algoritmus SURF je pak odolnější vůči posunu, rotaci či změně světelných podmínek a jak i název napovídá, je i rychlejší.

Všechny vypočítané pozice jsou pouze relativní. Rekonstruované objekty nemají měřítko ani orientaci v prostoru. (Surový, Kuželka, 2019). Abychom získaným datům dodali rozměr, je potřeba dodat údaje o pozicích. Ty se dají získat z GPS souřadnic pozice fotoaparátu při pořizování fotografie, nebo z tzv. lícovacích bodů (výrazné body

v prostoru jejichž souřadnice známe, na jejichž tvorbu se používají kontrastní štítky či reflexní objekty).

V lesnictví se fotogrammetrie využívá především k inventarizaci lesů. Na našem území byla fotogrammetrie zařazena již do druhého cyklu Národní inventarizace lesů (NIL2). Kromě fotografií pořízených v kanálech viditelného spektra byly pořízeny i snímky v pásmu infračerveného záření. Hájek a kol. (2016) za hlavní přínosy zařazení fotogrammetrie do NIL2 uvádí: Snížení venkovních prací o zhruba 60 %, zpřesnění informací poskytovaných NIL, nákladově efektivní odhad krajinných charakteristik a trénovací data pro řízenou klasifikaci. Kuželka a kol. (2014) uvádí, že nejžádanějším výstupem z RGB kamery je finální ortorektifikovaný a georeferencovaný snímek. Nicméně dalším produktem může být model terénu, resp. model povrchu a také georeferencované mračno bodů, které je vytvářeno při vyhledávání jednotlivých prvků ve fotografiích a rekonstrukci pozic kamer (Iglhaut a kol., 2019).

### **3.4 Laserové skenování**

Laserové skenování je distanční metoda sběru dat pro přesnou 3D rekonstrukci povrchů různých objektů pomocí laserových paprsků (Surový, Kuželka, 2019). Surový, Kuželka (2019) dále uvádí, že základem laserového skenování je měření vzdáleností pomocí laseru (LiDAR-Light Detection and Ranging). Horák (2014) o LiDAR říká: LiDAR označuje techniku DPZ, kdy se objekty ozáří laserem a zkoumá se od nich odražené záření. Laserové skenování patří k nejmodernějším metodám pořizování prostorových dat. Poskytuje data v takové kvalitě, že v některých směrech neexistuje srovnání se stávajícími metodami geodetického měření (Mansfeld a kol., 2007).

Laserové skenování lze rozdělit několika způsoby. První způsob dělení je možné provést na základě technologie měření času, za kterou se laserový paprsek odrazí od objektu a vrátí zpět. První metoda se nazývá Měření tranzitního času (TOF, time-of-flight) a druhá pak Měření fázového posunu (phase-based).

Metoda měření tranzitního času je druh skenování, při kterém je vyslán krátký puls světla. Měřicí přístroj pak určí vzdálenost pomocí času, za který se paprsek světla vrátil zpět. Vzdálenost se vypočítá jako dráha, kterou urazí světlo ve vzduchu ( $3 \times 10^8$  m/s) během změřeného časového intervalu (Surový, Kuželka, 2019). Wehr, Lohr (1999) o této metodě říkají: Nejpřímějším měřením vzdálenosti je určení doby letu světelného impulsu, jinými slovy měřením doby dráhy mezi vyslaným a přijatým impulsem. Princip výpočtu vzdálenosti lze provést podle schématu (viz obrázek 1).

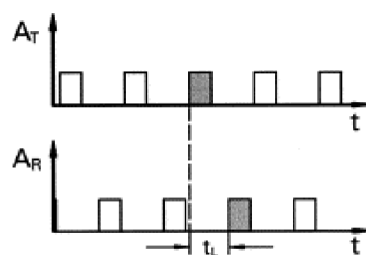
**Pulse:**

Range:  $R = \frac{1}{2} c \cdot t_L$

Range Resolution:  $\Delta R = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t_L$

Max. Range:  $R_{\max} = \frac{1}{2} c \cdot t_{L, \max}$

Range Accuracy:  $\sigma_R = \frac{c}{2} t_{\text{rise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}}$



Obrázek 1: Schéma výpočtu metody tranzitního času, Wehr, Lohr (1999)

Kde R je měřená vzdálenost (m) mezi objektem a laserem, c je konstanta rychlosti světla (m/s),  $t_L$  čas (s), za který se paprsek světla odrazil od objektu,  $A_T$  (Transmitter) je amplituda laserového vysílače v čase t,  $A_R$  (Receiver) je amplituda laserového přijímače v čase t.

Při metodě fázového posunu je konstantě vysíláno světlo. Senzor, který zachytává odraz světelného paprsku, zaznamenává, v jaké fázi byl přijatý signál zachycen. Při známé délce vlny je na základě fázového rozdílu mezi referenčním a přijatým signálem možné vypočítat, o jakou délku měřená vzdálenost přesahuje celočíselný násobek vlnové délky vysílaného světla (Surový, Kuželka 2019). Princip a způsob výpočtu lze vidět níže (viz obrázek 2).

**Sinusoidal CW-Modulation:**

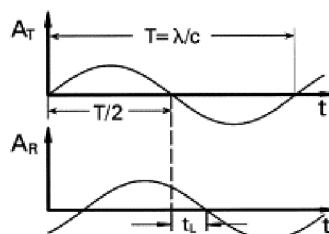
Travelling Time by Phase Difference:  $\left. \begin{matrix} T \triangleq 2\pi \\ t_L \triangleq \Phi \end{matrix} \right\} \Rightarrow t_L = \frac{\Phi}{2\pi} \cdot T$

Range:  $R = \frac{1}{2} c \cdot \frac{\Phi}{2\pi} \cdot T = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Phi$

Max. Unamb. Range:  $R_{\max} = \frac{\lambda_{\text{long}}}{2}$

Range Resolution:  $\Delta R = \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \cdot \Delta\Phi$

Range Accuracy:  $\sigma_R = \frac{\lambda_{\text{short}}}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{S/N}}$



Obrázek 2: Schéma výpočtu metody fázového posunu, Wehr, Lohr (1999)

Kde R je měřená vzdálenost (m) mezi objektem a laserem, c je konstanta rychlosti světla (m/s), T je perioda (s),  $\lambda$  je vlnová délka (m),  $\phi$  je fázový posun,  $A_T$  (Transmitter) je amplituda laserového vysílače v čase t,  $A_R$  (Receiver) je amplituda laserového přijímače v čase t.

Dalším způsobem kategorizace laserového skenování je na základě nosiče skeneru. Rozlišujeme tedy pozemní laserové skenování (TLS, Terrestrial Laser Scanning), letecké laserové skenování (ALS, Airborne Laser Scanning) a mobilní laserové

skenování (MLS, Mobile Laser Scanning). Wang a kol. (2023) ještě uvádí, že pro studium lesních ekosystémů se používá i satelitní laserové skenování a bezpilotní laserové skenování (ULS, unmannedborne laser scanning). Každý z těchto způsobů poskytuje data určitých charakteristik, které mohou sloužit pro specifické potřeby inventarizace lesů na úrovni porostů, stromů, zemí či na úrovni globální (Balenović a kol., 2020).

Laserové skenování v lesnictví se používá zejména pro účely inventarizace lesů, nicméně v současné době na našem území laserové skenování není zařazeno do metodiky Národní inventarizace lesů (NIL). Využití této technologie tak zatím zůstává především pro vědecké účely. Nicméně Balenović a kol. (2020) uvádí: Existují dva hlavní přístupy odvození údajů pro účely inventarizace lesů: plošný přístup (ABA, Area-based approach) a přístup založený na individuálních stromech (ITD, individual-tree-based approach). V současné době je v řadě zemí v inventarizaci lesů implementováno pouze letecké laserové skenování založené na plošném přístupu (ABA).

### **3.4.1 Pozemní laserové skenování**

Pozemní laserové skenování (TLS, Terrain laser scanning) se provádí za pomoci laserového skeneru. Ten většinou bývá upevněn na otáčivý stativ, tento přístroj se pak nazývá totální stanice. Stativ pak skener otáčí kolem vertikální osy a zaznamenává okolí v úhlu 360°. Pretzsch a kol. (2009) pak pozemní laserový skener popisuje jako přístroj, který skenuje nejbližší okolí laserovým paprskem. 3D naskenovaný obraz ukládá do datového souboru a výsledek je možné popsat jako mračno bodů s charakteristickými vlastnostmi.

Vzhledem k tomu, že se jedná o statické měření, tak pro další sken je zapotřebí stanici přesunout. Pro dosažení přesného skenu je zapotřebí pořídít více skenů, aby zaznamenaná plocha byla naskenována z více úhlů. Přístroj si při měření zaznamenává svoji polohu pomocí technologie GPS. Pro zkvalitnění následného spojování bodových mračen do výsledného mračna je možné použít reflexní body.

#### **3.4.1.1 Pozemní laserové skenování v lesnictví**

Využití pozemního laserového skeneru za účelem inventarizace lesů probíhá již řadu let. Balenović a kol. (2020) zmiňuje, že první studie o možnostech použití pozemního laserového skenování (TLS) při inventarizaci lesů začaly kolem roku 2000. Jedny z prvních zmínek o využití této technologie v lesnictví na našem území byl článek v

Lesnické práci z roku 2007, kdy ÚHÚL ve spolupráci s Technickou univerzitou Mnichov zkoumal využití této laserové technologie pro účely optimalizace venkovního sběru dat. Jako hlavní nedostatky tehdy Mansfeld a kol. (2007) uvádí: Princip 3D laserového skenování je založen na optických zákonech průniku světelných paprsků prostorem a neprůchodností přes neprůsvitné překážky v něm. Z toho vyplývá, že tato metoda je omezeně použitelná či téměř nepoužitelná v hustých a hluboce zavětvených porostech s výraznými korunovými překryvy či v porostech s výrazným podrostem.

Hlavní výhodou systému TLS je rychlá, automatická a podrobná registrace struktury lesa (Gollob a kol., 2019). Použitím TLS při inventarizaci lesů lze jednotlivé stromy a lesní plochy podrobně digitalizovat na milimetrové úrovni, což dále umožňuje přesný odhad hlavních atributů stromů, jako je poloha, průměr v prsní výšce (dbh), výška stromu, zakřivení, objem, nadzemní biomasa atd. (Bauwens a kol., 2016).

Podle Golloba a kol. (2018) se v posledních letech stále více využívají technologie z různých platforem, jako jsou bodová mračna z pozemních laserových systémů, které se používají k získávání informací. TLS představilo proveditelné možnosti pro použití automatizovaných měření atributů lesa, které mají schopnost poskytnout trojrozměrné (3D) údaje o struktuře lesa přesně a automaticky. Nicméně Balenović a kol. (2020) uvádí, že hlavní omezení TLS, které brání jeho operativnímu využití při inventarizaci lesů, je rychlost získávání dat. Konkrétně se jedná o snížení efektu okluze způsobeného okolními stromy, dále musí být každá plocha skenována z více pozic, což je časově a finančně náročné.

### **3.4.2 Letecké laserové skenování**

Další druh skenování je skenování letecké (ALS, Airborne laser scanning), při kterém se nosič pohybuje několik desítek metrů nad zemí v závislosti na dosahu laserového paprsku. Coomes a kol. (2018) ALS popisuje takto: Princip ALS spočívá v tom, že vysokofrekvenční laserové pulzy jsou vysílány z letadla směrem dolů a senzor zaznamenává dobu, za kterou se jednotlivé paprsky odrážejí od povrchů (např. listí, větví nebo země) a vracejí se zpět do senzoru, čímž se měří vzdálenost mezi objektem a letadlem s přesností pod metr.

Nespornou výhodou této metody sběru dat je naskenování velkých ploch za krátkou časovou jednotku. Dolanský (2004) se pak o této metodě vyjadřuje: Letecké laserové skenování je velmi mladou technologií umožňující sběr bodů pro tvorbu digitálního modelu reliéfu modelu terénu, a to i v zalesněných oblastech. Ačkoliv je tato

technologie velmi mladá, již našla své uplatnění v mnoha praktických aplikacích, jako je např. tvorba 3D modelu města, analýza vegetačního pokryvu, sledování nadzemních vedení apod.

Pro účely leteckého skenování lze místo letadel či vrtulníků, jejichž provoz je finančně náročný, použít bezpilotní prostředky tzv. UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Bepilotní prostředky jsou zpravidla zmenšené modely vrtulníků a letadel, které jsou řízeny vysílačkou ze země, případně jsou schopny autonomního letu po naplánované trase (Kuželka a kol., 2014). Z hlediska konstrukce lze bezpilotní prostředky rozdělit na prostředky typu křídlo a vícerotorové bezpilotní prostředky tzv. multirotory (Kuželka a kol., 2014).

Křídla se vyznačují vyšší rychlostí, díky které dokážou naskenovat větší území. Jsou ovšem náročnější na obsluhu, potřebují dostatečnou vzletovou dráhu, ze které lze bezpečně odstartovat a přistát. Výdrž baterie se pohybuje kolem 40 minut. Kuželka a kol. (2014) uvádí, že za uvedenou dobu dokáže naskenovat oblast o rozloze několika kilometrů čtverečních.

Multirotory, lidově drony, disponují lepší manévrovatelností a umožňují vertikální vzlet, což umožňuje použití i v terénně náročných podmínkách. Dále je možné multirotory ve vzduchu zastavit a nechat nad určitou oblastí. Nevýhodou je však nízká výdrž baterie. Kuželka a kol. (2014) uvádí výdrž přibližně 10-15 minut, což stačí na naskenování jednotek hektarů.

### **3.4.2.1 Letecké laserové skenování v lesnictví**

Letecké laserové skenování (ALS, Airborn laser scanning) začalo za účelem skenování zemního reliéfu, a to již v 90. letech. Kraus, Pfeifer (1998) o ALS uvádí: Velkoplošné měření terénu v zalesněných oblastech bylo dosud nevyřešeným problémem. Laserové skenování tento problém do značné míry řeší. Gollob a kol. (2018) k tomuto tématu uvádí, že letecké laserové skenování (ALS), laserové skenování bezpilotních letadel (ULS) a snímky z bezpilotních letadel, se vyznačují schopností pokrýt rozsáhlé oblasti (až na regionální úrovni) a proniknout do mezer mezi vegetací listím.

Využití bezpilotních prostředků v lesnictví je zatím pouze experimentální, ale prudký vývoj hardwaru i softwaru v této oblasti naznačuje, že jejich zapojení do praxe na sebe nenechá dlouho čekat (Kuželka a kol., 2014). Díky metodám ALS je možné zjišťovat pozice stromů, jejich výšku, celkovou zásobu biomasy či zapojit tyto metody do ochrany lesa. Využití UAV se například osvědčilo při požáru v Českém Švýcarsku, kdy drony vybavené termokamerou sloužily k monitorování skrytých ložisek požáru i v

oblastech, kde to jinými metodami nebylo možné. Podle Gordíkové (2022) bylo v Českém Švýcarsku použito pět dronů. Těmi bylo provedeno celkem 1478 vzletů, které dohromady trvaly 538,6 hodin a drony při tom nalétaly 9 808 km.

V současné době je limitující zejména legislativa, která omezuje komerční využití prostředků a do určité míry také nedostatek metod pro zpracování dat a jejich začlenění do hospodářské úpravy lesů (Kuželka, 2014). Nicméně Coomes a kol. (2018) o ALS v lesnictví říká, že skenování může rozlišit pouze stromy v horní části koruny, což vede k podhodnocení biomasy, a nadměrná nebo nedostatečná segmentace velkých stromů může vést ke zkreslení. Pokud se podaří tyto problémy vyřešit, mohlo by modelování založené na přístupu individuálních stromů znamenat zásadní posun ve způsobu dálkového sledování lesů. Gollob a kol. (2018) se vyjadřuje, že systémy ALS (a částečně i UAV) jsou však obecně nevhodné pro odvození přesných dat a detailních informací o jednotlivých stromech, jako je poloha stromu v prsní výšce a dbh, protože jejich trojrozměrná bodová mračna reprezentují kmeny stromů příliš řídké a odvozené informace jsou příliš nízké a do značné míry závisí na kvalitě a množství terénních referenčních dat.

### **3.4.3 Mobilní laserové skenování**

Poslední druh je skenování mobilní (MLS, mobile laser scanning), při tomto druhu skenování se měřicí zařízení pohybuje stejně jako u leteckého skenování. Narozdíl od leteckého měření se měřicí zařízení pohybuje po zemi. Jako nosič skeneru může být použit např. automobil, nicméně ten je limitovaný dopravní dostupností. Pro použití v terénu se proto začal používat lidský operátor. Člověk může skener nést v ruce nebo na přídatném adaptéru, který umožňuje přichytit skener k batohu, měřič tak má během sběru dat volné ruce. V literatuře se lze setkat i s více označeními jako například PLS (personal laser scanning) pro skenování, kdy nosičem je člověk, HPLS (hand-held personal laser scanning) nebo HLS (hand-held laser scanning) pro skenování, kdy je skener držen v ruce.

Nespornou výhodou této metody jsou malé rozměry a váha oproti TLS. Ačkoliv Kukko a kol. (2012) uvádí, že první PLS systémy měly velké rozměry a vážily i přes 30 kg. To se postupem času změnilo, jak říká Balenović a kol. (2020): V posledních letech došlo k rychlému pokroku v miniaturizaci snímačů, to vedlo k vývoji lehkých a vysoce mobilních ručních systémů.

Balenović a kol. (2020) uvádí: Mobilní laserové skenovací (MLS) představuje časově efektivní alternativu k TLS, protože mohou snížit problém se zastíněním a dobu



získání dat. Kromě platformy (vozidlo nebo člověk) se systémy MLS obvykle skládají ze tří hlavních součástí: laserový skener, inerciální měřicí jednotka (IMU) a přijímač globálního navigačního satelitního systému (GNSS). Bauwens a kol. (2016) o MLS říká, že přesnost údajů ze skenování závisí na přesnosti a správnosti všech tří složek a jejich synchronizaci.

### **3.4.3.1 Mobilní laserové skenování v lesnictví**

Implementace mobilních skenerů do lesnictví byla zapříčena především jejich malými rozměry, nezávislostí na terénu a snadné obsluze. Problém se špatným signálem GNSS byl také vyřešen, a to nahrazením za algoritmus na lokalizaci a mapování tzv. SLAM. Ryding a kol. (2015) říká, že HMLS poskytuje efektivní, cenově přijatelnou, univerzální techniku lesního průzkumu, která může být provedena stejně snadno jako procházka lesním pozemkem.

Gollob a kol. (2020) uvádí při porovnání MLS a TLS, že MLS je výkonný nástroj pro řešení problémů okluze stromů a nemožnosti pohybu TLS, tím se snižuje časová náročnost a s tím spojené náklady. Liang (2014) říká, že v rámci stejného časového rámce plocha, zkoumaná pomocí MLS, je výrazně větší než plocha zkoumaná pomocí TLS. Získaná data MLS jsou však často méně přesná než data mračna bodů TLS, a to v důsledku šíření chyb při určování polohy.

Co se týče přesnosti detekce stromů, tak Bauwens a kol. (2016) uvádí přesnost 80-100 %, Gollob a kol. (2020) 96 % a Balenović a kol. (2020) říká, že se detekce stromů pohybuje mezi 57-100 %. Tyto výsledky jsou vyšší než u detekce stromů při použití TLS, což je způsobeno naskenováním stromů z více úhlů, tudíž dochází k nižšímu zastínění.

## **3.5 Určování pozice měřicího zařízení**

V této kapitole budou představeny zařízení a technologie, díky kterým je možné zaznamenávat polohu měřicího zařízení. Kapitola se zaměří na 3 nejznámější globální navigační systémy, jednotku zaznamenávající náklon zařízení a algoritmus SLAM, který je klíčový pro určení pozice a měření trajektorie při pozemním laserovém skenování.

### **3.5.1 Globální navigační satelitní systémy**

Pro přesné naskenování prostoru nepotřebujeme nejen znát vzdálenost a úhel bodů od skeneru, ale také přesnou polohu a náklon skenovacího zařízení. Pro určení pozice

se obvykle používají globální navigační satelitní systémy (GNSS) jako GPS, GLONASS, Galileo, které při použití kinematických diferenčních metod RTK (Real Time Kinematics) nebo PPK (Post Processing Kinematics) umožňují zaznamenat v reálném čase nebo zpětně pozici skeneru s centimetrovou přesností (Surový, Kuželka, 2019). Každý z těchto navigačních systémů se skládá ze tří segmentů: vesmírného segmentu, řídicího segmentu a uživatelského segmentu.

Optimální fungování navigačních systémů je podmíněno dostatečným signálem. Přijímače satelitních signálů jsou necitlivější při zapínání a zjištění polohy. Proto je důležité při aplikaci například v lesních porostech mít alespoň částečný výhled na oblohu, popřípadě zařízení zapnout ještě před vstupem do lesa nebo na otevřeném prostranství.

### **Vesmírný segment**

Vesmírný segment globálního navigačního satelitního systému (GNSS) tvoří síť umělých družic obíhajících kolem Země. Tyto družice jsou strategicky umístěny do orbitálních drah tak, aby pokrývaly celou planetu a poskytovaly rovnoměrné pokrytí signály pro uživatele na Zemi. Každý GNSS systém má svůj vlastní vesmírný segment, který se skládá z několika aktivních družic, rezervních družic a pozemních stanic pro řízení a monitorování.

### **Řídicí segment**

Řídicí segment globálního navigačního satelitního systému (GNSS) představuje stěžejní infrastrukturu zajišťující správu a řízení družic umístěných ve vesmíru. Jeho hlavním úkolem je monitorování stavu družic, správa signálů a řízení provozu, což zahrnuje synchronizaci času a aktualizaci navigačních dat. Tento segment se skládá z pozemních stanic, které komunikují s družicemi a zajišťují jejich správnou funkci. Pozemní stanice monitorují polohu, rychlost a stav každé družice a provádějí nezbytné údržbové operace. Šebesta (2012) říká, že hlavním úkolem řídicího segmentu je přesné sledování drah družic a stavu jejich atomových hodin monitorovacími stanicemi.

### **Uživatelský segment**

Uživatelský segment globálního navigačního satelitního systému (GNSS) zahrnuje veškerá zařízení a aplikace, které využívají signály vysílané družicemi pro určení polohy, rychlosti a času. Tento segment tvoří široká škála uživatelských zařízení,

včetně mobilních telefonů, navigačních systémů v automobilech, letadel a lodí, přenosných navigačních přístrojů a mnoha dalších.

Hlavním účelem uživatelského segmentu GNSS je získávat a zpracovávat signály z družic a využívat je k určení přesné polohy a navigace. Tyto signály jsou zachyceny přijímači, které jsou integrovány do uživatelských zařízení, a následně jsou využity k výpočtu polohy a dalších navigačních informací.

### **3.5.1.1 GPS-NAVSTAR**

Světově nejpoužívanějším navigačním systémem je Globální polohový systém (Global Positioning System – GPS). Systém GPS – NAVSTAR byl prvotně vyvinut americkou vládou jako vojenský navigační systém (Šebesta, 2012). Na webových stránkách GPS (2023) je uvedeno: Globální polohový systém (GPS) je služba vlastněná Spojenými státy americkými, která poskytuje uživatelům služby polohování, navigace a časování.

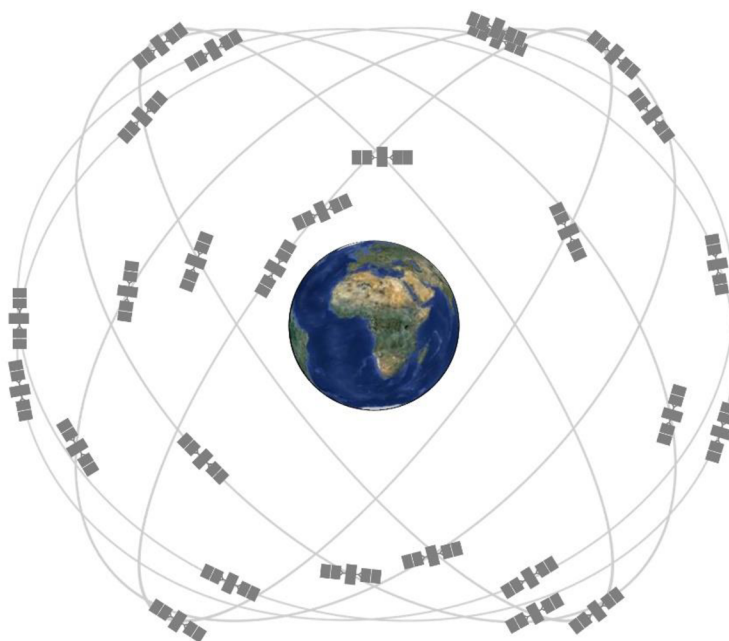
Vývoj tohoto systému začal v roce 1973 po sloučení projektu Timation a programu Systém 621B. Od roku 1978 začaly být vypouštěny satelity na oběžnou dráhu. Původně mělo Zemi obíhat pouze 18 družic, to však bylo v roce 1978 změněno a systém byl rozšířen na 24 družic. Po tragédii, při které došlo k sestřelení dopravního letadla sovětským stíhačem, bylo přislíbeno zpřístupnění systému pro civilní účely. Šebesta (2012) uvádí: Počáteční operační stav IOC (Initial Operation Capability) systému byl stanoven na konec roku 1993. Plné operační schopnosti FOC (Final Operation Capability) bylo dosaženo na konci roku 1994. V současné době spadá do vlastnictví Spojených států amerických a jeho provoz zařizují Vesmírné síly Spojených států amerických.

Vesmírný segment je tvořen 24 družicemi obíhajícími Zemi. Webové stránky GPS (2023) uvádí, že satelity GPS létají ve střední oběžné dráze Země (MEO) na výšce přibližně 20 200 km a každý satelit oběhne Zemi dvakrát za den. Kolem Země se nachází celkem 6 orbitálních drah a na každé z nich se nachází 4 sloty. Každý slot je určen pro jednu družici. Díky tomuto schématu (viz obrázek 3) mohou uživatelé vidět alespoň čtyři satelity z každého místa na světě.

Web GPS (2023) uvádí, že současný operační řídicí segment (OCS) zahrnuje hlavní řídicí středisko, alternativní hlavní řídicí středisko, 11 řídicích a ovládacích antén a 16 monitorovacích stanic.

Uživatelský segment umožňuje spojení mezi GPS satelity a přijímači. Díky tomu je možné využívat přesné polohové informace, jakými jsou souřadnice a nadmořská výška, informace časové (datum a čas) poskytované tímto satelitním systémem.

V dnešní době se GPS využívá ve všech ekonomických odvětvích. GPS (2023) sama uvádí využití v zemědělství, stavebnictví, armádě, logistice či například bankovníctví (měření času).



Obrázek 3: Uspořádání satelitů GPS kolem Země dostupné z GPS.gov

### 3.5.1.2 GLONASS

GLONASS je družicový navigační systém provozovaný původně Sovětským svazem, nyní Ruskem. GLONASS je obdobou amerického GPS a je provozován ruskou vládou prostřednictvím Úřadu ruských vojenských vesmírných sil (Šebesta, 2012). Svoji první družici vypustili v roce 1982, systém začal soustavněji pracovat v roce 1987. Šebesta (2012) uvádí: V roce 1991 již bylo na oběžných drahách ve dvou rovinách 12 družic. Plně provozuschopný byl systém GLONASS od prosince roku 1995. Oficiální web GLONASS (2024) říká: Snížení finančních prostředků pro kosmický průmysl v roce 1990 vedlo k degradaci satelitové konstelace GLONASS. V roce 2002 se konstelace GLONASS skládala ze 7 družic, což bylo pro navigační podporu ruského území i při omezené dostupnosti nedostatečné. To bylo zapříčiněno zejména nízkou životností družic první generace (1982-2005), jejichž životnost byla odhadována na 3,5 roku.

GLONASS (2024) uvádí: Na základě všestranného výzkumu bylo rozhodnuto zvolit orbitální konstelaci sestávající z 24 družic rovnoměrně rozmístěných ve třech orbitálních rovinách skloněných pod úhlem  $64,8^\circ$  k rovníku. Družice GLONASS jsou umístěny na přibližně kruhových oběžných drahách s nominální výškou dráhy 19 100 km a oběžnou dobou 11 hodin, 15 minut a 44 sekund. Schéma vesmírného segmentu je možné vidět níže (viz obrázek 4).

Řídicí segment tohoto navigačního systému se nachází na území bývalých států SSSR. Šebesta (2012) o řídicím segmentu říká: Velkou nevýhodou je tak fakt, že monitoring družic je časově omezený. Hlavní řídicí centrum SCC se nachází v KrasnoznamenSKU poblíž Moskvy. Dále se segment skládá z 11 telemetrických a monitorovacích stanic.



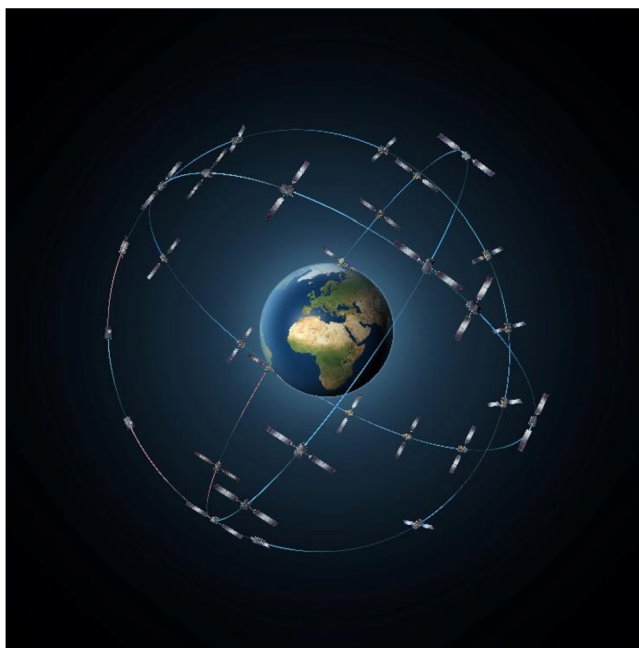
Obrázek 4: Uspořádání satelitů navigačního systému GLONASS dostupné z: [gssc.esa.int](http://gssc.esa.int)

### 3.5.1.3 Galileo

Systém Galileo je evropský program pojmenovaný podle italského vědce Galilea a jeho výstavbu zajišťují státy Evropské unie prostřednictvím Evropské kosmické agentury ESA a dalších institucí (Šebesta, 2012). Později se ESA rozšířila na Agenturu Evropské unie pro Kosmický program (EUSPA). Na rozdíl od satelitních systémů GPS a GLONASS se nejedná o vojensky spravovaný program, ale o program civilní. První testovací satelity byly vypuštěny v letech 2005 a 2008 s tím, že od roku 2011 začalo vypouštění operačních satelitů. Systém začal být funkční až od roku 2016.

ESA (2024) uvádí: Současný systém Galileo se skládá z celkem 28 družic. Všechny kromě dvou jsou umístěny ve třech kruhových rovinách střední oběžné dráhy Země (MEO) ve výšce 23 222 km nad Zemí a se sklonem rovin oběžné dráhy 56 stupňů k rovníku (viz obrázek 5). Oběžná doba jednoho satelitu je 14 hodin. Z většiny míst je vždy viditelných šest až osm satelitů, což umožňuje velmi přesné určení polohy a času s přesností na několik centimetrů. Interoperabilita s americkým systémem satelitů GPS jen zvýší spolehlivost služeb Galileo (EUSPA, 2024).

Řídicí část systému Galileo se podobně jako u systémů GPS – NAVSTAR a GLONASS bude starat o řízení družic, kontrolu pohybu družic na orbitách, synchronizaci palubních hodin, sledování funkčnosti a integrity celého systému a vysílání pohotovostních a varovných signálů (Šebesta, 2012). Řídicí segment se skládá z 2 řídicích středisek v Oberpfaffenhofen (Německu) a Fucino (Itálie). Ředitelství EUSPA se pak nachází v Praze (Česká republika). Pozemní systém pak dále tvoří 18 stanic rozmístěných po celém světě.



Obrázek 5: Konstelace satelitů Galileo, dostupné z: [esa.int](http://esa.int)

### **3.5.2 IMU**

Pro přesné měření skeneru musí mít nejen přesně změřenou polohu, vzdálenost a úhel, pod kterým bylo světlo laseru vysláno, ale také naklonění samotného skeneru. Pro záznam náklonů musí být skener vybavený velmi přesnou inerciální měřicí jednotkou (IMU-Inercial Measurement Unit), která trvale zaznamenává zrychlení ve

třech osách. Toto měření je pak přepočítáváno na náklon skeneru v jednotlivých osách a tím je určena orientace skeneru v prostoru (Surový, Kuželka, 2019).

Ahmad a kol. (2013) rozděluje IMU na dva druhy podle počtu senzorů. První typ je vybaven akcelerometrem a gyroskopem, druhý typ pak kromě akcelerometru a gyroskopu obsahuje také magnetometr. Fungování IMU spočívá ve shromažďování dat z těchto senzorů a jejich zpracování pomocí algoritmů a matematických modelů, aby bylo možné určit přesnou polohu, orientaci a pohyb zařízení. Tyto informace jsou často důležité pro různé aplikace, jako je navigace, stabilizace, sledování a ovládání zařízení.

Dolanský (2004) uvádí: Přestože současné gyroskopy a akcelerometry měří velmi přesně extrémně malé hodnoty, vlivem působení systematických chyb se bude vypočtená trajektorie letu od skutečné stále více odchylovat a po určitém čase odchylka překročí povolené meze. Proto je nutné tato měření doplnit měřením GPS. Ahmed (2013) pak uvádí, že se v posledních letech ukázalo IMU jako lepší technické řešení než GPS. Hlavním důvodem byla možnost použití v lokalitách, kde byl signál GPS slabý, a také to, že samotné IMU zařízení je lehčí a levnější. Pro dosažení větší přesnosti pak doporučuje kombinaci těchto dvou technologií. Nicméně Surový, Kuželka (2019) uvádí, že ani špičkové IMU a GNSS snímače nedisponují dostatečnou přesností pro přesné skenování. Umístění a náklon skeneru v prostoru se proto upřesňuje výpočtem pomocí koregistrace naměřených laserových dat.

### **3.5.3 SLAM**

SLAM je zkratka pro simultánní lokalizaci a mapování, což je technika pro odhad pohybu senzorů a rekonstrukci struktury v neznámém prostředí (Taketomi a kol., 2017). Belnović (2020) uvádí, že algoritmus SLAM zpracovává IMU a laserová data k lokalizaci skeneru v neznámém prostředí a k registraci celého bodového mračka bodů, díky čemuž je mobilní laserové skenování vhodné pro použití v lese, kde je signál GNSS často degradován. Pierzchała a kol. (2018) k tomuto problému uvádí, že přesná lokalizace pod lesním porostem je složitý problém, ale pokud se jej podaří vyřešit, může tato metoda otevřít řadu možností. Například znalost polohy lesního harvestoru může umožnit přesnou geolokaci vytěžených stromů.

Mokroš a kol. (2021) se pak o SLAM vyjadřuje takto: SLAM určuje „pozici“ zařízení (polohu a orientaci v místním souřadnicovém systému) v určitém okamžiku pomocí rozpoznávaných prvků a současně generuje mapu okolí.

Chen a kol. (2019) uvádí, že MLS založený na SLAM má potenciál zvýšit efektivitu mapování ve srovnání s jinými systémy. V porovnání s TLS nedisponuje nutností přepravy skeneru a souvisejícího vybavení z místa na místo, kde se skenuje, což je jedna z hlavních nevýhod TLS. Podle Hyypä a kol. (2018) s rozvojem algoritmu SLAM a zlepšením výpočetního výkonu čipů lze dokonce systém SLAM nasadit na chytrý telefon s jednoduchými senzory, jako jsou kamery a IMU. Čímž by se výrazně snížily náklady.

Lze tedy říci, že algoritmus SLAM představuje užitečný nástroj pro lokalizaci a mapování prostředí. Nejvýhodnější je jeho aplikace v místech, kde je signál z navigačních systémů nedostupný, proto se dá využít v husté zástavbě, lese nebo pro mapování podzemních prostorů.

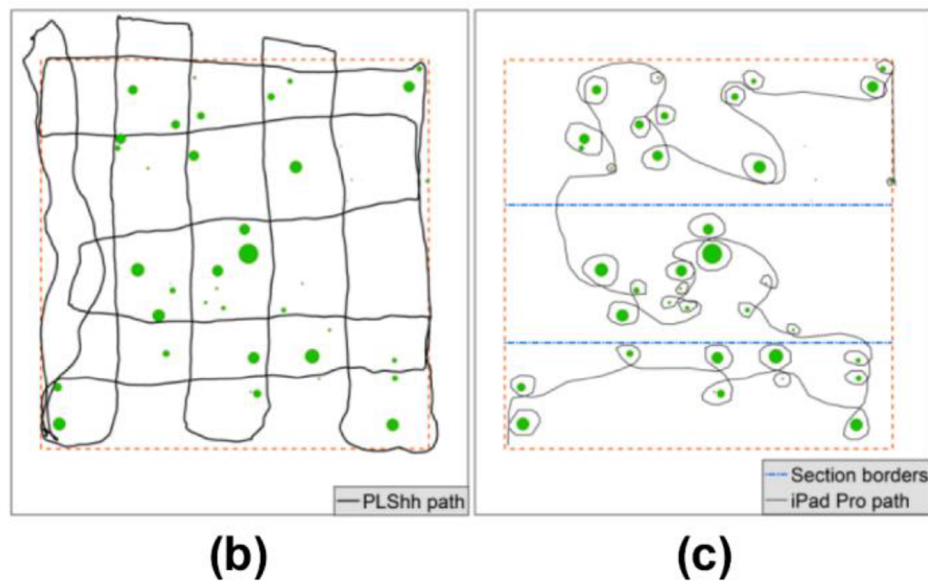
### **3.5.4 Trajektorie**

V této kapitole budou představeny trajektorie využití v různých studiích. U každé trajektorie bude představen účel studie, ve které byla použita, zkoumaná plocha a skener. U studií, které porovnávaly přesnost více trajektorií, budou výsledky interpretovány v kapitole Diskuse.

Trasa skenování musí být pečlivě naplánována, protože přímo ovlivňuje výkonnost algoritmu SLAM, a tedy i kvalitu shromážděných dat (hustota a kvalita bodového mračna) a přesnost jednotlivých stromových atributů (Balenić a kol., 2020). Volba trajektorie při mobilním laserovém skenování závisí především na velikosti skenované plochy a technických parametrech samotného laserového skeneru. Cílem při navrhování trajektorie by mělo být vždy naskenování všech stromů ve zkoumané ploše ze všech stran.

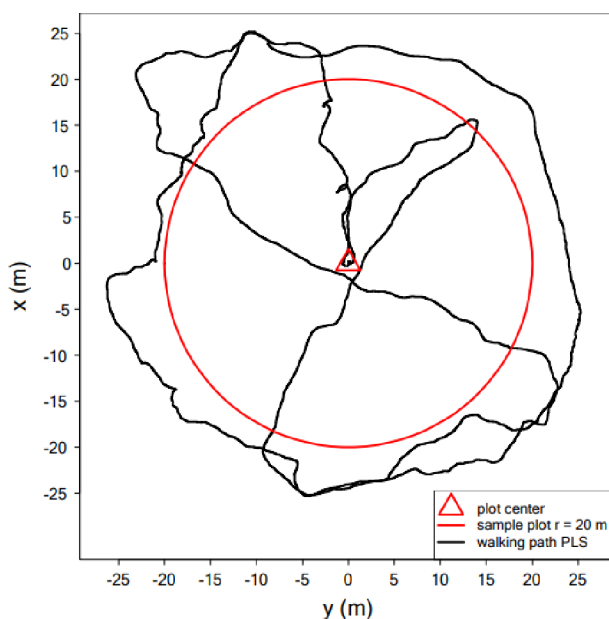
Mokroš a kol. (2021) ve svém článku zaměřeném na nízkonákladové mobilní mapovací systémy pro inventarizaci lesů testoval na čtvercových testovaných plochách (25 x 25 m) různá zařízení. V rámci této diplomové práce stojí za zmínku skenování pomocí iPad Pro 2020, který je vybaven senzorem Apple LiDAR, ten je podle výrobce schopen skenovat do vzdálenosti 5 m. Tomu bylo nutné přizpůsobit trajektorii skenování a každý strom musel být skenován individuálně. To bylo docíleno tím, že trajektorie vedla kolem každého stromu na ploše. Ve stejném článku byla testována PLS za pomoci skeneru GeoSLAM ZEB Horizon s dosahem až 100 m. Jeho trajektorie začínala vždy v pravém horním rohu a pokračovala podél pozemku v intervalech přibližně 5 m s následným křížovým průchodem s diagonálním návratem do výchozího bodu.





Obrázek 6: Trajektorie laserového skenování ZEB Horizon (b) iPad Pro (c) (Mokroš a kol., 2021)

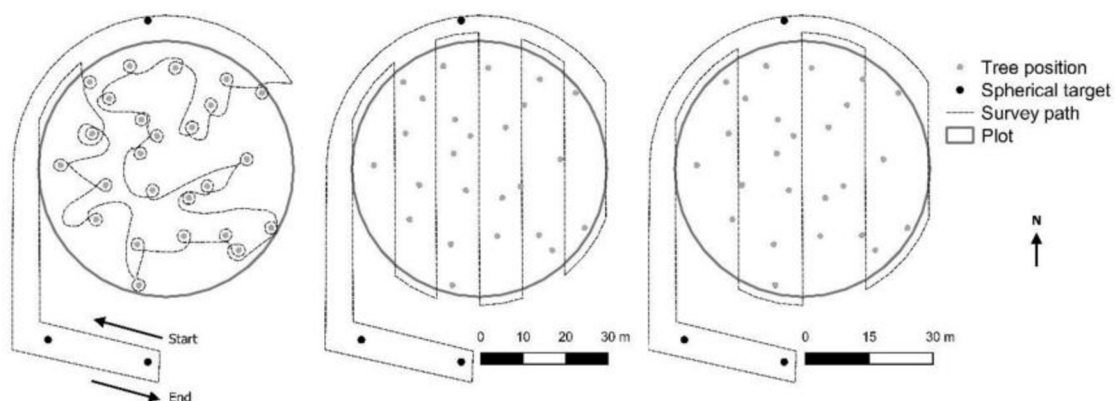
Gollob a kol. (2020) ve své práci zaměřené na inventarizaci lesů za pomoci PLS zkoumal kruhové plochy o poloměru 20 m za použití GeoSLAM ZEB Horizon s dosahem 100 m. Trajektorie začínala a končila ve středu plochy směrem na sever, poté byla jednou obkroužena a dvakrát překročena.



Obrázek 7: Trajektorie Gollob a kol. (2020)

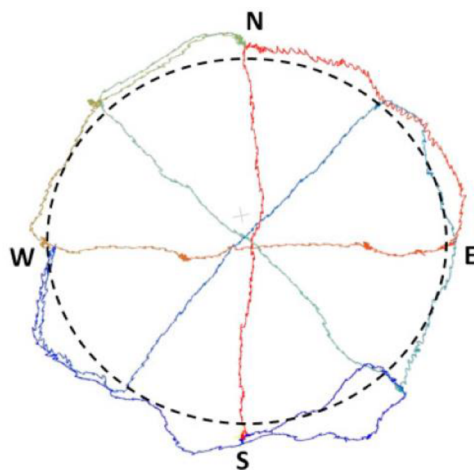
Del Perugia a kol. (2019) v publikaci zkoumající vliv hustoty skenování na odhad hodnoty atributů jednoho stromu pomocí ručního mobilního HPLS použil 3 rozdílné trajektorie pro sběr dat (viz obrázek 8). Výzkum probíhal na kruhové ploše o poloměru 30 m za použití GeoSLAM ZEB1 s dosahem 30 m, pro venkovní prostory však výrobce

uvádí dosah pouze 15 m. Pro začátek a konec trajektorie byl zvolen bod ležící mimo zkoumanou plochu. Pro validační data byla zvolena chůze s přístrojem kolem dokola každého stromu (obrázek 8, vlevo) a chůze tam a zpět podél přímků nakreslených ve vzdálenosti 10 m (obrázek 8, uprostřed) a 15 m (obrázek 8, vpravo) od sebe.



Obrázek 8: Trajektorie Del Perugia a kol. (2019): validační data vlevo, rozestup 10 m uprostřed, rozestup 15 m vpravo

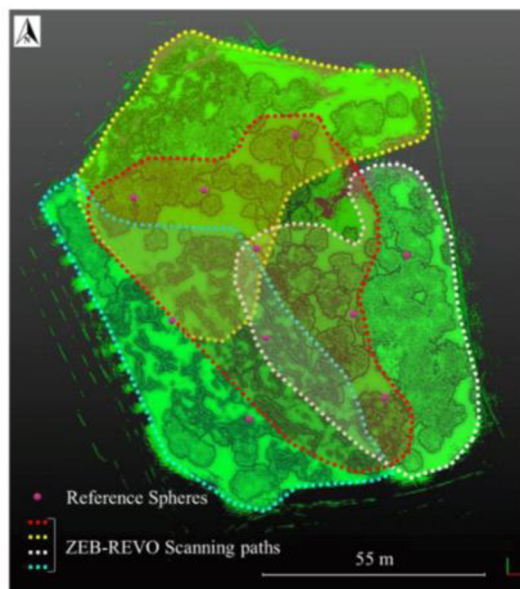
Bauwens a kol. (2016) ve své práci při porovnávání TLS a HMLS pro účely inventarizace lesů použil již zmiňovaný GeoSLAM ZEB1. Výzkumné plochy byly o poloměru 15 m. Trajektorie začínala a končila ve stejném bodě na lokalitě S (viz obrázek 9) a pokračovala směrem N, dále trajektorie pokračovala tak, aby plocha byla čtyřikrát překročena a celá hranice plochy byla zaznamenána.



Obrázek 9: Trajektorie Bauwens a kol. (2016)

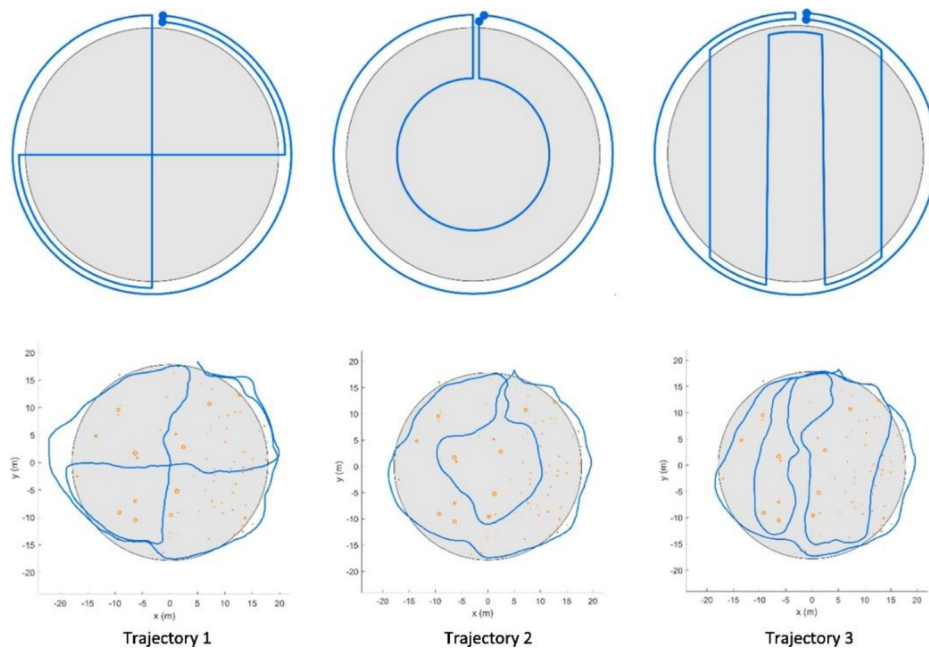
Cabo kol. (2018) ve své práci zaměřené na porovnání TLS a HPLS pro modelování jednotlivých stromů na úrovni porostu skenoval plochu v San Antonio Park. Zkoumaná plocha měla rozlohu 1 ha. Jednalo se o plně zalesněný dvouetážový porost Pinus pinea a Platanus hispanica. Jako skener byl použit GeoSLAM ZEB-REVO s dosahem až 30 m. Pro venkovní měření výrobce uvádí dosah pouze 15 m. Celá plocha byla

naskenována pomocí 4 měření a 10 reflexních bodů, kdy každá měla začátek a konec ve stejném bodě a trajektorie se navzájem prolínaly. 3 trajektorie kopírovaly část obvodu zkoumané plochy, dále vedly do porostu kolem referenčních bodů. Čtvrtá trajektorie vedla vnitřkem porostu kolem referenčních bodů.



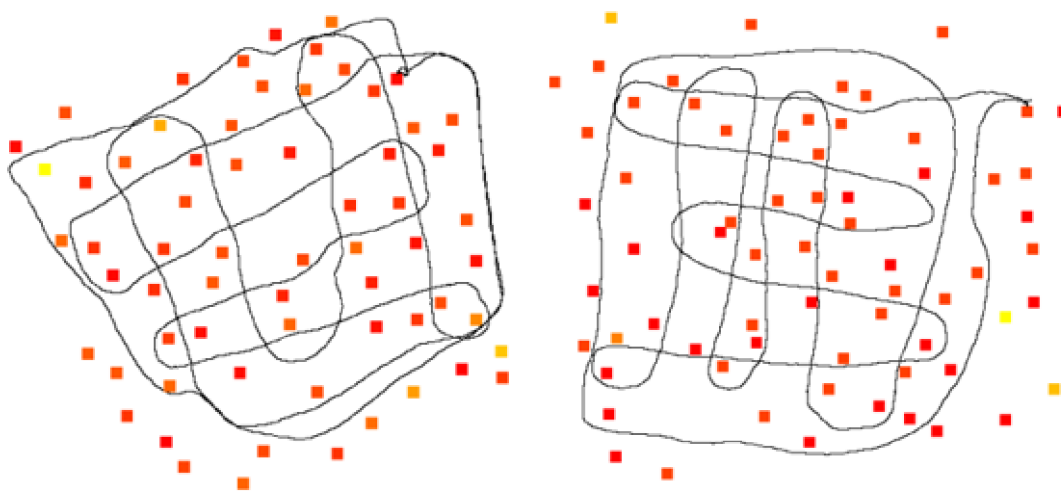
Obrázek 10: Trajektorie Cabo a kol. (2018)

Kuželka a kol. (2022) ve své práci Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning použil GeoSLAM ZEB Horizon pro skenování ploch o rozloze 1000 m<sup>2</sup>, tedy o poloměru 17,85 m. Všechny použité trajektorie začínají a končí ve stejném bodě a začátek každého skenování začíná po obvodu zkoumané plochy. U trajektorie 1 byly k obvodovému kruhu přidány dvě čáry protínající plochu v jejím středu ve dvou na sebe kolmých směrech. Trajektorie 2 se skládala ze dvou soustředných kružnic, obvodové kružnice a menší vnitřní kružnice, spojených úsečkou. Trajektorie 3 obsahovala čtyři rovnoběžné linie protínající plochu ve stejných vzdálenostech, tato trajektorie byla použita i u Mokroše a kol. (2021) (viz obrázek 6), zde však byla použita pro čtvercové plochy.



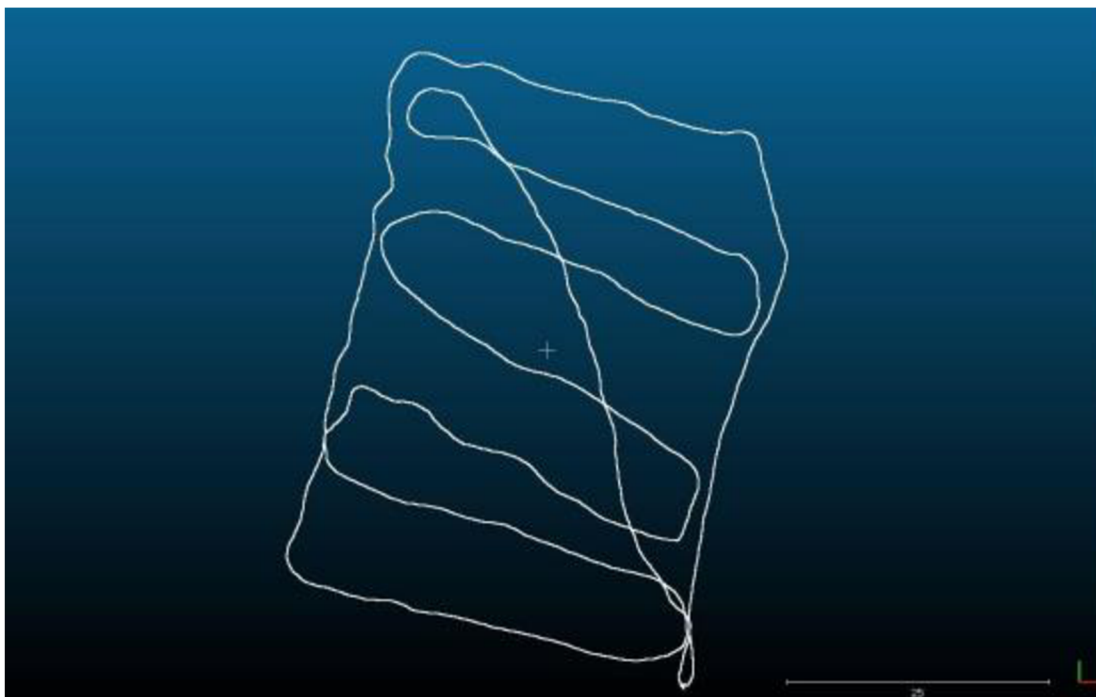
Obrázek 11: Trajektorie Kuželka a kol. (2022)

Podobnou trajektorii jako Mokroš a kol. (2021) zvolil Kašpar (2022) ve své diplomové práci zaměřené detekci a zjišťování parametrů individuálních stromů. V laserových bodových mračnecích použil trajektorie (viz obrázek 12). V této práci byly skenovány dvě plochy, jedna se 100% zastoupením smrku a druhá se 100% zastoupením buku. Pro skenování byl použit skener GeoSLAM ZEB Horizon. Každá z těchto ploch měla rozměry 50 m × 50 m.



Obrázek 12: Trajektorie Kašpar (2022): smrkový porost (vlevo), bukový porost (vpravo)

Zamec (2022) ve své diplomové práci *Ověření dendrometrických veličin trvalých zkusných ploch pomocí dat laserového skenování* zvolil trajektorii (viz obrázek 13). Skenování proběhlo na trvalé zkusné ploše o rozloze 52 m x 38 m, kde se nacházela směs smrku a borovice. Věk porostu byl 105 let a tloušťka středního kmene 32,3 cm. Stejně jako u Kašpara (2022) byl použit skener GeoSLAM ZEB Horizon.



*Obrázek 13: Trajektorie Zamec (2022)*

## **4 Metodika**

### **4.1 Sběr dat**

#### **4.1.1 Lokalita**

Ve spolupráci s katedrou Hospodářské úpravy lesů a DPZ proběhlo měření v Národní přírodní rezervaci Voděradské bučiny, které se nachází na pozemku Lesů ČZU. Pro skenování byly vybrány 4 kruhové zkusné plochy ve strukturálně bohatých a typově odlišných porostech. Poloměr jedné kruhové zkusné plochy činil 17,85 m, celková výměra jedné plochy tedy byla 1000 m<sup>2</sup>. Fotografie byly pořízeny autorem při skenování v září 2023.

První zkusná plocha (P1) (viz obrázek 14) byla z části tvořena smrkovým porostem po výchovném zásahu a z části dubovým porostem, jehož spodní etáž byla tvořena smrkovým nárostem. Kromě smrku a dubu se v porostu také nacházel buk a habr. Zvláště v čistě smrkové části byl pohyb při skenování obtížný z důvodu ponechání stromů po těžbě na lokalitě. Další část první plochy je možné vidět níže (viz obrázek 19).



*Obrázek 14: Plocha č. 1 (P1)*

Druhá zkusná plocha (P2) (viz obrázek 15) se nacházela v okolí vodního toku, horní etáž tvořil smrk, dub a buk. Spodní etáž tvořil buk s habrem a v okolí vodního toku se nacházely také olše. Pohyb po této ploše znepříjemňovalo pouze přecházení již zmíněného potoka.



*Obrázek 15: Plocha č. 2 (P2)*

Třetí zkusná plocha (P3) (viz obrázek 16) se nacházela v plně zapojeném převážně bukovém porostu s příměsí habru. V porostu se nacházela i příměs několika starších stromů tvořena smrkem, borovicí a modřínem. Na zemi se nenacházely žádné překážky a pohyb zde byl bezproblémový.



*Obrázek 16: Plocha č. 3 (P3)*

Čtvrtá zkusná plocha (P4) (viz obrázek 17) se nacházela v rozvolněném třietážovém porostu, kde horní etáž tvořil smrk s borovicí, střední etáž buk a spodní etáž tvořila směs smrku s jedlí.



Obrázek 17: Plocha č. 4 (P4)

## **4.1.2 Použitá technika**

### **4.1.2.1 Vertex laser Geo**

Pro vytyčení kruhové zkusné plochy byl použit Vertex laser Geo. Za použití teleskopické tyče, na které se nacházelo ultrazvukové zařízení, byl přesně změřen poloměr 17,85 m (viz obrázek 19). Dále byly vyznačeny okrajové stromy. Ty, které spadaly do zkusné plochy, byly vyznačeny pruhem po celém obvodu, stromy, které se nacházely za zkusnou plochou, byly vyznačeny křížkem ve směru do středu zkusné plochy.

Podle výrobce Haglöf SWEDEN (2024) tento přístroj umožňuje měření přímé vzdáleností buď ultrazvukovou, nebo laserovou technologií. Dále disponuje úhloměrem, pomocí kterého lze měřit výšku objektů, popřípadě sklon terénu nebo převýšení. Vertex dále disponuje určením pozice pomocí GNSS, kromě GPS vertex podporuje Galileo, GLONASS nebo japonský QZSS, a také kompasem, díky kterým může být použit i pro mapování. Dosah ultrazvuku je 30 m. Dosah laseru je od 46 cm do 700 m. Hmotnost zařízení činí 243 g. Měření horizontálních úhlů zvládá v rozsahu 0-360°, u úhlů vertikálních se možnost rozsahu měření pohybuje -90° až +90°.





Obrázek 18: Vertex laser Geo



Obrázek 19: Ultrazvuk Vertex na ploše 1

#### 4.1.2.2 GeoSLAM Zeb Horizon

Laserové skenování bylo provedeno pomocí laserového skeneru Zeb Horizon od firmy GeoSLAM, který je na trhu od roku 2018. Jedná se o mobilní zařízení určené pro vnitřní, venkovní i podzemní skenování. Skener je možné připnout na batoh, dron, konstrukci, která umožňuje skener připevnit na střechu automobilu, teleskopickou tyč nebo lze měření také provést ručně. Pro pořizování vizuálního záznamu je možné k zařízení připnout kameru ZEB Vision, která pořizuje záznam ve 4K kvalitě.

Výrobce GeoSLAM (2024) uvádí, že oproti starším modelům tento model disponuje výrazně větším dosahem, a to dosahem 100 m. Díky většímu dosahu se zvýšil i počet bodů zaznamenaných za sekundu, a to na 300 000. Hmotnost samotného skeneru činí 1,45 kg, datové úložiště s baterií pak váží 1,4 kg. Zorné pole má dosah 360° x 270°. Pro technologii SLAM skener disponuje celkem 16 senzory.

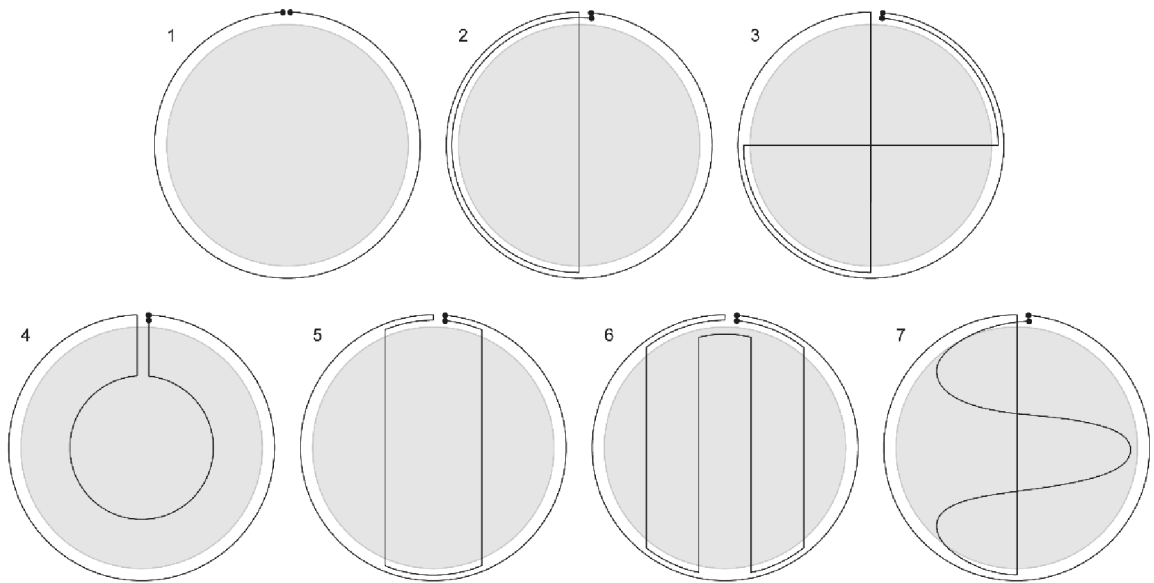


Obrázek 20: GeoSLAM ZEB HORIZON

### **4.1.3 Použité trajektorie**

Při laserovém skenování bylo použito celkem 7 rozdílných trajektorií pro pozemní měření (viz obrázek 21). Trajektorie byly zvoleny tak, aby naskenovaly porost z více úhlů, docházelo k protínání trajektorie, neskenovaly stejný úsek vícekrát a minimalizovaly celkovou délku trajektorie. Každé měření začínalo skenováním po obvodu zkusné plochy tak, aby všechny stromy byly vidět zvenčí, výchozí a konečný bod skenování byl totožný. Jako validační data byla použita bodová mračna z měření podle trajektorie 6, která měla nejdelsí trasu, nejdelsí dobu měření, a její skeny tedy obsahovaly i největší počet bodů.

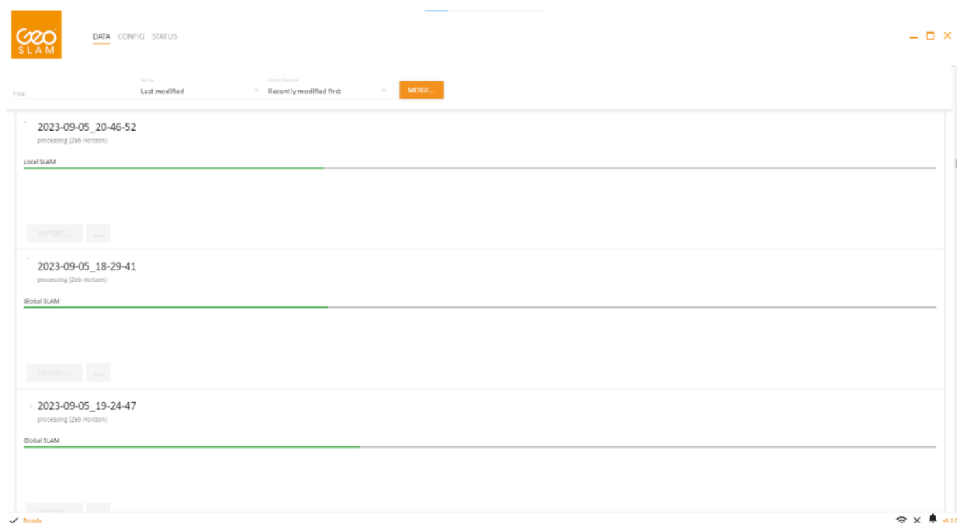
Trajektorie 1 (T1) vedla po obvodu zkusné plochy. Trajektorie 2 (T2): k obvodovému kruhu byla přidána příčná čára vedoucí středem zkusné plochy, dále pokračovala po straně zpět k výchozímu bodu. Trajektorie 3 (T3): k obvodovému kruhu byly přidány dvě kolmé čáry protínající plochu ve středu. Trajektorie 4 (T4) se skládala ze dvou kružnic (obvodová a vnitřní) spojené úsečkou. Trajektorie 5 (T5) se skládala z obvodové kružnice a dvou příček rozdělující kruh na třetiny. Trajektorie 6 (T6) se skládala z obvodového kruhu a čtyř příček rozdělující plochu na pětiny. Trajektorie 7 (T7) se skládala z obvodové kružnice, příčky protínající plochu v jejím středu a následně se trajektorie vracela vlnovitě zpátky a dvakrát protnula příčku. Trajektorie je možné vidět níže (viz obrázek 21).



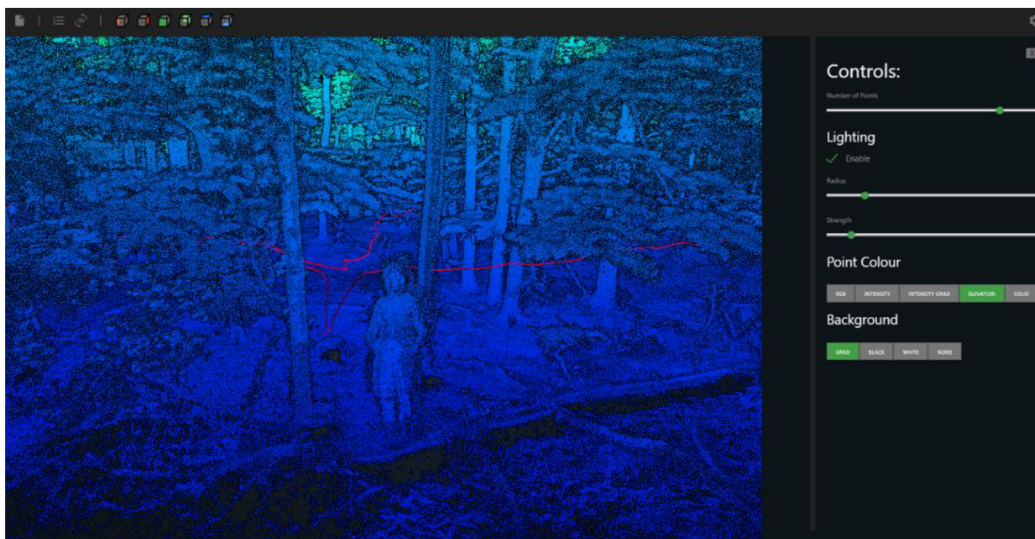
Obrázek 21: Použité trajektorie

## **4.2 Zpracování dat z mobilního laserového skenování**

Bodová mračna získaná z pozemního laserového skenování byla zpracována v aplikaci výrobce laserového skeneru, konkrétně v aplikaci Zeb Horizon Hub (viz obrázek 22). Prvním krokem bylo rozpoznání skenů prostřednictvím vizualizace bodového mračna a analýzy použité trajektorie (viz obrázek 23). Jednotlivé skeny byly identifikovány a označeny na základě jejich trajektorií a plochy, na které byly pořízeny (např. P1T1, P1T2,...). Tyto identifikované skeny byly poté exportovány do formátu LAZ, který umožňuje pozdější zpracování a analýzy bodových mračen. Trajektorie byly vyexportovány do textového souboru.

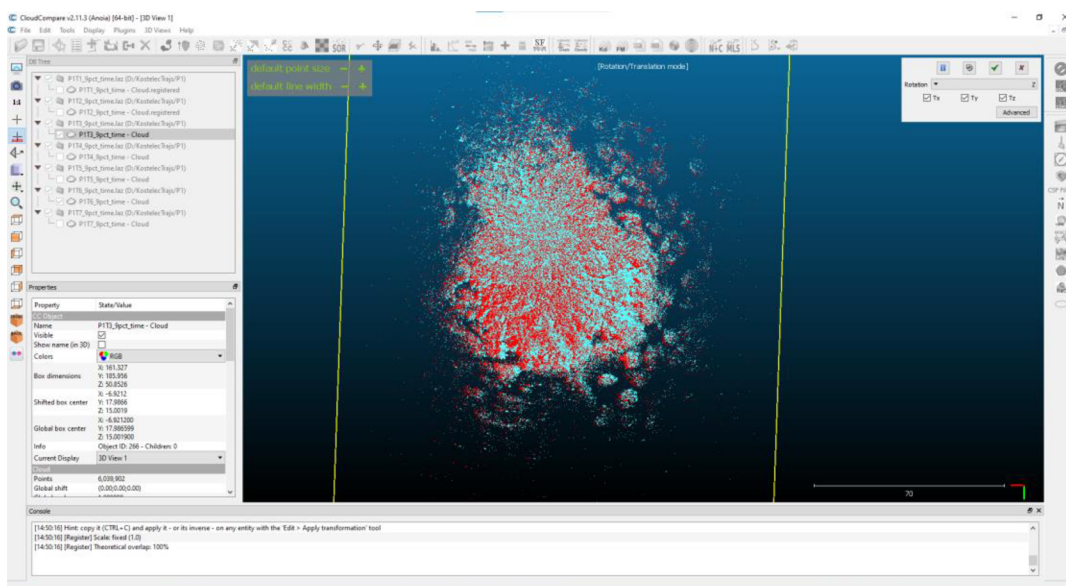


Obrázek 22: Prostředí aplikace GeoSLAM Hub

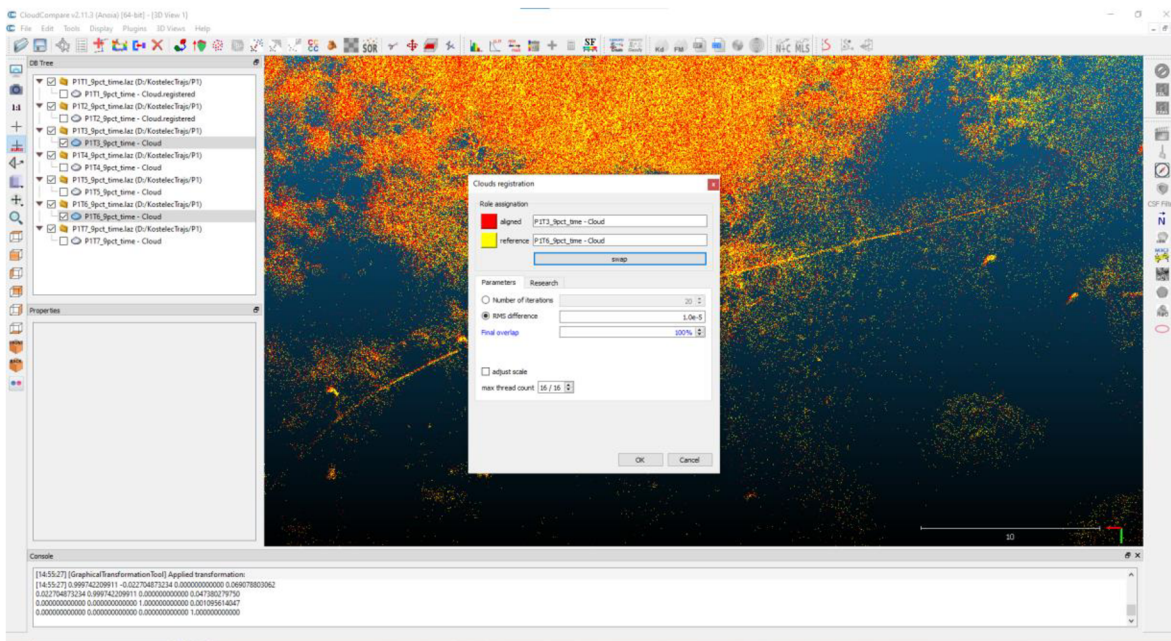


Obrázek 23: Posuzování na základě vizualizace mračna a trajektorie

Pro následné zpracování bodových mračen byla zvolena aplikace CloudCompare. Pro dosažení totožné orientace bodových mračen bylo nezbytné převést mračna tak, aby jejich orientace odpovídala validačním datům, konkrétně mračnům s trajektorií číslo 6. Tento proces umožnila funkce Translate/rotate, která umožňuje pohyb a rotaci mračen v prostoru. Po výběru možnosti otáčení kolem osy Z bylo možné provést příslušné úpravy. Poté bylo manuálně provedeno překrytí bodových mračen (viz obrázek 24). Pro dosažení úplného překrytí byla využita funkce Cloud Registration, kde byla jako validační data zvolena mračna s trajektorií 6 (viz obrázek 25). Tímto způsobem byla dosaženo překrytí ostatních mračen s mračnem validačním. Tento postup byl proveden u skenů ze všech ploch.

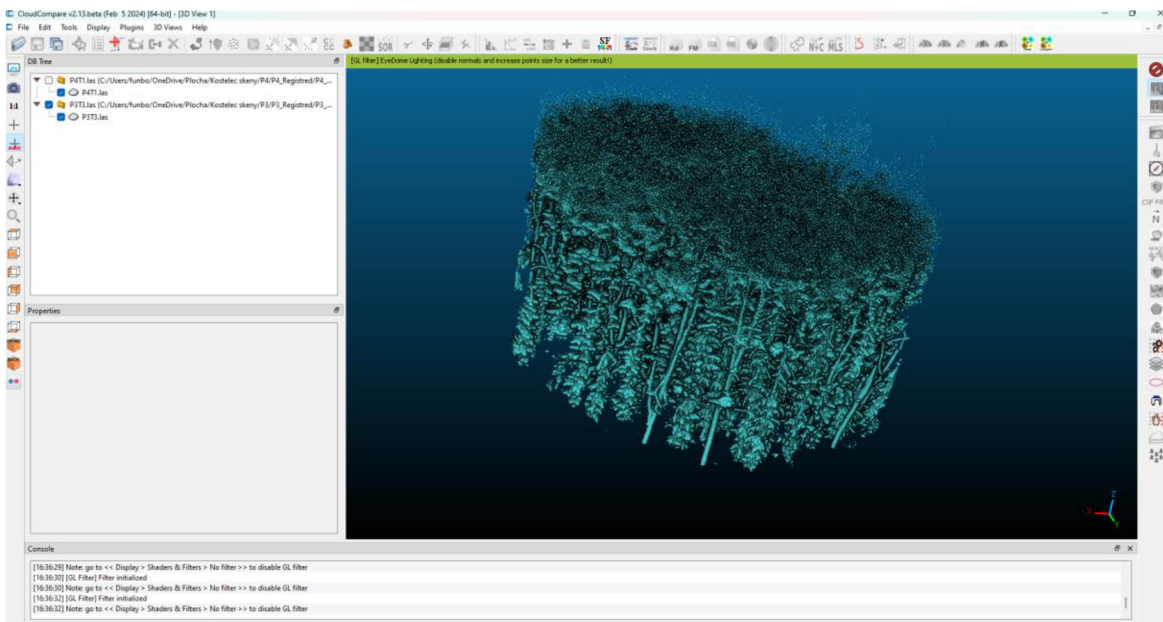


Obrázek 24: Manuální registrace



Obrázek 25: Automatická registrace plochy

Po registraci všech skenů byl skeny oříznuty po obvodu trajektorie T6, aby se na skenu nacházely pouze stromy, které se nachází na zkušné kruhové ploše. Tento proces byl proveden pomocí funkce segment. Plocha byla oříznuta podle trasy trajektorie T6. Takto oříznutá mračna pak byla automaticky zbavena země pomocí pluginu CSF filter. Takto zpracované mračno je možné vidět níže (viz obrázek 26).



Obrázek 26: Oříznutá plocha zbavená země

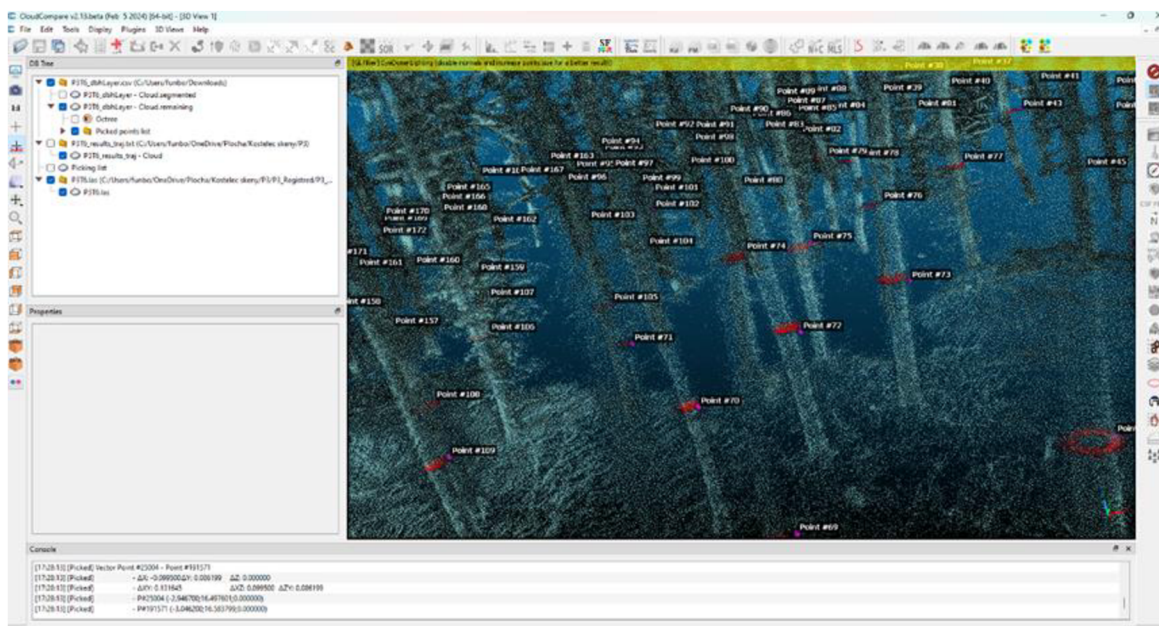
### **4.3 Zpracování bodových mračen**

Následně bylo třeba provést segmentaci jednotlivých stromů. Pro tento proces byl nejdříve vybrán plugin Treeiso (Tree isolation). Tento model funguje na principu postupného shlukování blízkých bodů do malých hloučků, velkých segmentů až konečných stromů. Xi (2022) ve své studii uvádí, že velmi malé stromy pravděpodobně způsobují vysokou chybovost. To se nakonec ukázalo jako zásadní nedostatek pro použití v této diplomové práci, kde skeny proběhly ve strukturálně bohatých porostech. Model Treeiso pak označoval hloučky stromů, které se navzájem dotýkaly, za samostatné stromy. Největší problémy dělaly hloučky, kde listnaté stromy prorůstaly svými větvemi skrz smrky. Dalším problémem bylo vysegmentování celého smrkového porostu na ploše P1 jako jednoho stromu, to bylo způsobeno pravděpodobně hustým zvětvením prakticky po celých délkách stromů. Po úpravě parametrů tak, aby segmentoval body na menší části, pak docházelo k označování pouhých větví za samostatné stromy.

Proto byl pro zjištění tloušťek jednotlivých stromů zvolen plně automatický proces, který využívá algoritmus mean-shift, který postupně shlukuje body. Dále pak algoritmus RANSAC v mračnu vyhledal ideální kruh. Ten pak zlokalizuje a změří jeho tloušťku. Výsledkem je pak textový soubor obsahující id, souřadnice x, y, z, layer, r, sections, h, select, correct a dbh.

Výsledkem tohoto segmentování bylo mračno obsahující body pouze v určité výšce. Vybraná bodová mračna je možné vidět v přílohách 1 až 8, kde byla vybrána nejhustší mračna (T6) a nejřidší (T1). Z těchto mračen byl poté automaticky vygenerován textový soubor, obsahující X a Y souřadnice a také výčetní tloušťku jednotlivých stromů. Tento postup byl použit pro všechny trajektorie na všech plochách.

Validační data byla manuálně zpracována z mračna z trajektorií T6. Z těchto mračen byly manuálně vysegmentovány stromy. Toto vysegmentování bylo porovnáno s kompletními mračny, a to pro ověření, zda se opravdu jedná o kmeny stromů (viz obrázek 27). Následně za pomoci funkce Point list picking byly všechny zjištěné stromy označeny. Z těchto bodů bylo vytvořeno bodové mračno obsahující polohy stromů. Po vyexportování do textového souboru byly zjištěny souřadnice stromů. Výčetní tloušťka pak byla zjištěna z vysegmentovaných stromů manuálně, pomocí funkce Point picking. Pro další práci s daty byl vybrán program MS Excel. Údaje o tloušťce pak byly doplněny k polohovým datům do excelovské tabulky. Výsledná tabulka byla exportována do textového souboru.



Obrázek 27: Ověření, zda se jedná o stromy pro validační data a jejich lokalizace

#### **4.4 Vyhodnocení dat**

K vyhodnocení dostupných dat bylo použito Rstudio. Zde bylo za pomoci příkazů viz příloha 9 vysegmentováno id, x souřadnice, y souřadnice a dbh. Validační data byla pojmenována Vdata a data porovnávací Pdata. Tyto údaje pak byly vloženy do společné tabulky (merged\_table). Následně došlo k automatickému porovnání souřadnic x a y, kdy skript našel podobné hodnoty x a y v obou datových souborech s maximální odchylkou 1. Pokud byla taková shoda nalezena, skript zapsal tyto hodnoty do shodného řádku. Pokud žádné vhodné hodnoty nebyly nalezeny, pole nebyla vyplněna. Id z každého datovaného souboru se mohlo vyskytovat pouze jednou. Výsledná tabulka tedy obsahovala id, souřadnice a dbh validačních a porovnávacích dat seřazených vedle. Rskript je možné nalézt v příloze 10.

Dále byla spočítána správnost detekce stromů. Nejdříve byly převzaty celkové počty stromů z původních datových souborů. Následně bylo pomocí skriptu (viz příloha 11) spočítáno, pro kolik stromů byla shoda na základě maximální odchylky, to bylo detekováno na základě údajů od id na jednom řádku, který se nacházel pouze u shodných stromů. Z těchto údajů byla vypočítána detekce, nedetekované stromy (omission) a chybně detekované stromy (commission). Výpočty proběhly podle vzorců:

$$D = \frac{nR}{n_V}$$

$$O = 1 - D$$

$$C = 1 - \left(\frac{nR}{n}\right)$$

Kde D je detekce, O je omission, C je commission, nR je počet správně detekovaných stromů, nV je počet stromů ve validačních datech, n celkový počet stromů. Zjištěné údaje byly zapsány do excelovské tabulky.

Jako další parametr pro porovnání trajektorií byla zvolena kruhová základna (KZ). Počet chybějících stromů nemusí být vždy odpovídající, zvláště pak v porostech s bohatou strukturou. Kruhová základna je proto lepším ukazatelem chyby omission, kdy, v případě, že nedojde ke změření tlustšího stromu, tak je chyba větší, než pokud by se nezapočítal strom s výčetní tloušťkou 3 cm. Stejně jako při detekci se u kruhové základny zjišťovala nedetekovaná KZ a nesprávně detekovaná KZ. Pro výpočet nedetekované KZ (KZ\_omission) bylo zapotřebí zjistit velikost kruhové základny pro Vdata u detekovaných stromů, tato operace byla provedena pomocí skriptu (viz příloha 12). Pro zjištění nesprávně detekované kruhové základny (KZ\_commission) bylo zapotřebí zjistit kruhovou základnu při použití jednotlivých trajektorií na daných plochách (skript viz příloha 13), dále pak bylo potřeba zjistit kruhovou základnu pouze správně detekovaných stromů (skript viz příloha 15). Výsledné údaje byly zapsány a porovnány v Excelu. Výpočty proběhly podle vzorců:

$$D_{KZ} = \left(\frac{KZ_{Vsh}}{KZ_{Vd}}\right)$$

$$O_{KZ} = 1 - D_{KZ}$$

$$C_{KZ} = 1 - \left(\frac{KZ_{Psh}}{KZ_P}\right)$$

Kde  $D_{KZ}$  je detekce kruhové základny,  $O_{KZ}$  je omission kruhové základny,  $KZ_{Vsh}$  je kruhová základna validačních dat u shodných stromů,  $KZ_{Vd}$  je kruhová základna validačních dat,  $C_{KZ}$  je commission kruhové základny,  $KZ_P$  je kruhová základna porovnávacích dat,  $KZ_{Psh}$  je kruhová základna správně detekovaných stromů v porovnávacích datech.

Pro porovnání tlouštěk mezi validačními a porovnávacími daty byla použita metoda chyby určení dbh u detekovaných stromů. Konkrétně se jednalo o aritmetický průměr



chyb (ME, mean error) a kvadratická chyba (RMSE, root mean square error). Vzorec výpočtu chyb je možné vidět níže (viz obrázek 28).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (dbh_i - \hat{dbh}_i)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (dbh_i - \hat{dbh}_i)^2}$$

Obrázek 28: Vzorec výpočtu ME a RMSE, Kuželka a kol. (2022)

Kde  $dbh_i$  vyjadřuje spočítané hodnoty tloušťky (Pdata) a  $\hat{dbh}_i$  správné hodnoty tloušťky (Vdata). Výpočty proběhly v programu Rstudio podle skriptu viz příloha 14. Výsledky byly zapsány do excelovské tabulky.

## **5 Výsledky**

### **5.1 Detekce počtu stromů**

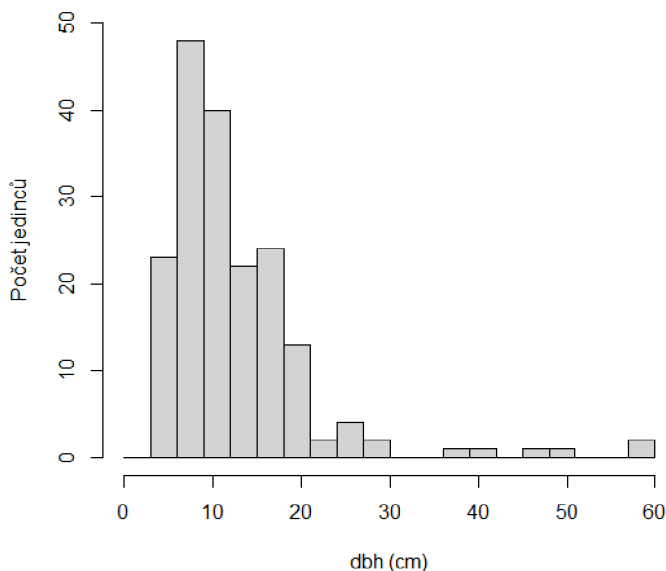
V této kapitole bude vyhodnocena úspěšnost detekce stromů. Tloušťkovou strukturu jednotlivých ploch je možné vidět níže (viz graf 1 až graf 4), kde rozstup tloušťkových tříd pro všechny grafy je 3 cm.

#### **Detekce stromů na P1**

Na první ploše se nacházelo celkem 184 stromů. Počty stromů z porovnávacích dat se pohybovaly mezi 151 (T1) až 193 (T4). 100% detekci na této ploše nedosáhla žádná z použitých trajektorií. Průměrná detekce na P1 byla 90,42 %. Nejvyšší chyby (omission) dosáhla T1, a to 17,93 % nedetekovaných stromů. Nejnižší chybu měla T4, a to 8,7 %. Chybu pod 10 % dosáhly také trajektorie T5, T6 a T7. Průměrná chyba činila 9,58 %.

Co se týče nesprávné identifikace (commission), tak hodnoty se pohybovaly mezi 4 % až 13 %. Průměrná chyba byla 9,71 %. Data s nejnižším počtem stromů, které se nevyskytovaly v datech validačních, byla získána pomocí T1 (4,35 %). Nejvíce falešně označenými stromy pak disponovala data změřená T7, a to 13,02 %.

**Tloušťková struktura P1**



*Graf 1: Tloušťková struktura na P1*

Tabulka 1: Detekce stromů na P1

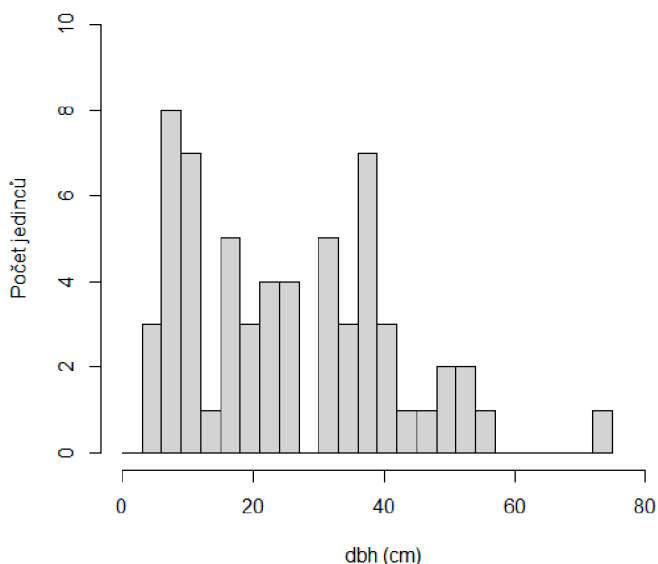
id	n	nR	detekce	D_omission	D_commission
P1Vdata	184	184	100.00%	0.00%	0.00%
P1T1	161	151	82.07%	17.93%	6.21%
P1T2	182	165	89.67%	10.33%	9.34%
P1T3	185	164	89.13%	10.87%	11.35%
P1T4	193	168	91.30%	8.70%	12.95%
P1T5	189	166	90.22%	9.78%	12.17%
P1T6	190	166	90.22%	9.78%	12.63%
P1T7	192	167	90.76%	9.24%	13.02%

### Detekce stromů na P2

Na ploše P2 se vyskytovalo celkem 61 stromů. Detekce stromů se pohybovala mezi 88,52 % (T1) až 98,36 %. Průměrná detekce byla 94,88 %. Trajektorie T3 a T4 dosáhly obě detekce 98,36 %, tedy nebyl detekován pouze jeden strom, omission tedy bylo pouze 1,64 %. Nejnižší detekci, a tedy i nejvyšší chybu 11,48 %, měla trajektorie T1.

Počty stromů vypočítaných se pohybovaly od 57 (T1) do 67 (T4) kusů. Hodnoty commission se pohybovaly v rozmezí 3,39 % při použití T1 až 10,45 % při použití T4. Průměrná chyba (commission) byla 5,81 %.

Tloušťková struktura P2



Graf 2: Tloušťková struktura na P2

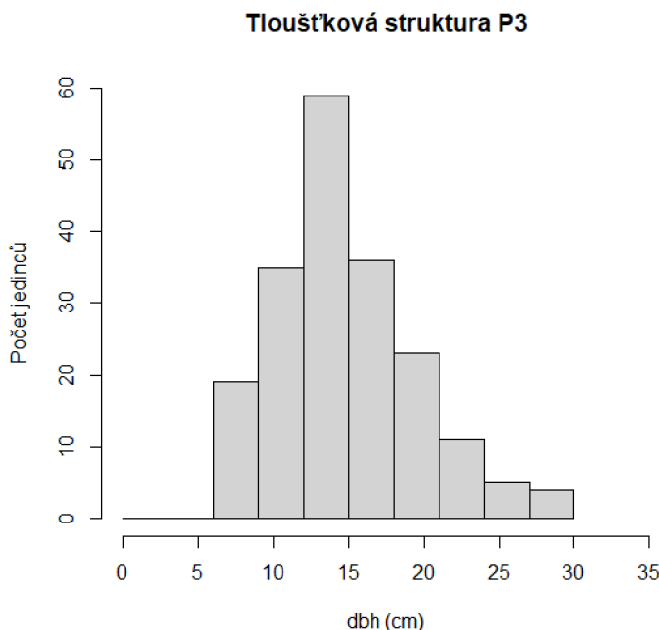
Tabulka 2: Detekce stromů na P2

id	n	nR	detekce	D_omission	D_commission
P2Vdata	61	61	100.00%	0.00%	0.00%
P2T1	57	54	88.52%	11.48%	5.26%
P2T2	60	56	91.80%	8.20%	6.67%
P2T3	63	60	98.36%	1.64%	4.76%
P2T4	67	60	98.36%	1.64%	10.45%
P2T5	61	57	93.44%	6.56%	6.56%
P2T6	64	58	95.08%	4.92%	9.38%
P2T7	59	57	93.44%	6.56%	3.39%

### Detekce stromů P3

Plocha P3 vykazovala vysokou míru homogenity s celkovým výskytem 192 stromů. Na této ploše nebylo pozorováno spodní stromové patro, což vedlo k vysoké úspěšnosti detekce stromů, která nepoklesla pod 95 %. Průměrná úspěšnost detekce stromů na této ploše dosáhla hodnoty 98,11 %. Nejnižší úspěšnost detekce byla zaznamenána u varianty T1, kde dosáhla hodnoty 95,83 %. Nejmenší míra chybovosti, pouze 1,56 %, byla dosažena trajektoriemi T3, T6 a T7.

Falešná identifikace zaznamenaná během analýzy se držela na nízké úrovni, nepřesahovala 4 %. Celkový počet identifikovaných stromů nepřesáhl 196. Nejnižší míra falešné identifikace byla zaznamenána u varianty T1, dosáhla hodnoty 1,6 %. Naopak nejvyšší míra falešné identifikace byla zjištěna u varianty T2, kde dosáhla hodnoty 3,59 %.



Graf 3: Tloušťková struktura na P3

Tabulka 3: Detekce stromů na P3

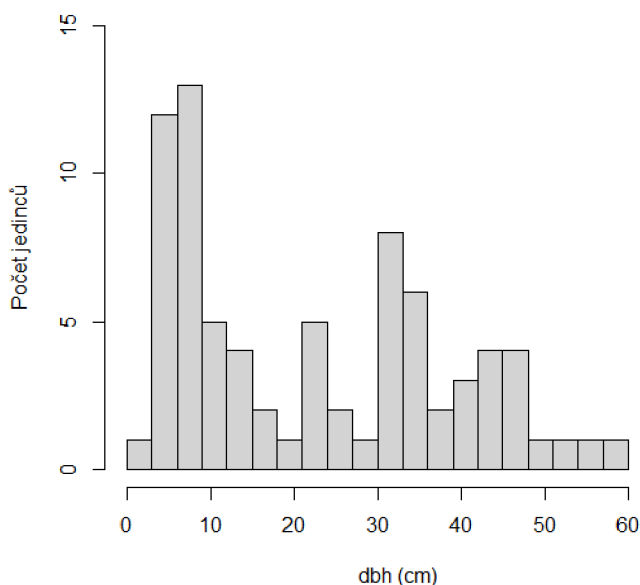
id	n	nR	detekce	D_omission	D_commission
P3Vdata	192	192	100.00%	0.00%	0.00%
P3T1	187	184	95.83%	4.17%	1.60%
P3T2	195	188	97.92%	2.08%	3.59%
P3T3	195	189	98.44%	1.56%	3.08%
P3T4	193	188	97.92%	2.08%	2.59%
P3T5	194	188	97.92%	2.08%	3.09%
P3T6	195	189	98.44%	1.56%	3.08%
P3T7	196	189	98.44%	1.56%	3.57%

### Detekce stromů P4

Na ploše P4 bylo celkem 77 stromů. Průměrná úspěšnost detekce stromů na této ploše dosáhla 91,4 %. Nejnižší úspěšnost detekce zaznamenala varianta T1 s hodnotou 81,82 %. Naopak nejvyšší úspěšnost detekce dosáhly varianty T3, T4, T5, T6 a T7, které dosáhly hodnoty 92,21 %.

Shrnutí výsledků analýzy ukazuje, že průměrná míra úspěšnosti detekce (commission) na testované ploše dosáhla hodnoty 9,48 %. Nejvyšší falešnou detekci zaznamenaly varianty T5 a T6 s hodnotou 13,41 %, zatímco nejnižší falešnou detekci dosáhla varianta T2 s 6,85 %. Počet detekovaných stromů se pohyboval od 68 (v případě varianty T1) do 82 (v případě variant T5 a T6).

Tloušťková struktura P4



Graf 4: Tloušťková struktura na P4

Tabulka 4: Detekce stromů na P4

id	n	nR	detekce	D_omission	D_commission
P4Vdata	77	77	100.00%	0.00%	0.00%
P4T1	68	63	81.82%	18.18%	7.35%
P4T2	73	68	88.31%	11.69%	6.85%
P4T3	81	71	92.21%	7.79%	12.35%
P4T4	79	71	92.21%	7.79%	10.13%
P4T5	82	71	92.21%	7.79%	13.41%
P4T6	82	71	92.21%	7.79%	13.41%
P4T7	81	71	92.21%	7.79%	12.35%

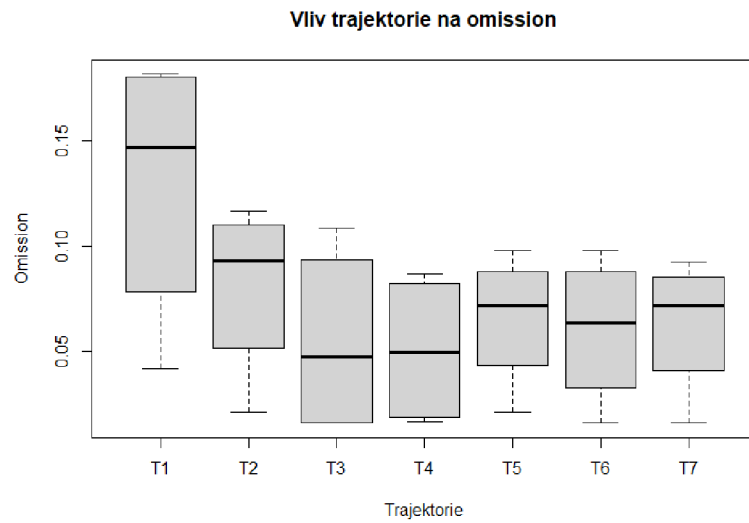
### Shrnutí detekce počtu stromů

Nejvyšší průměrné detekce, a tedy i nejnižší průměrné omission, dosáhla trajektorie T4. Naopak nejnižší průměrnou detekci a nejvyšší průměrné omission dosáhla trajektorie T1. Co se týče průměrné chybné detekce, tak té dosáhla trajektorie T6. Průměrná detekce byla 92,8 %.

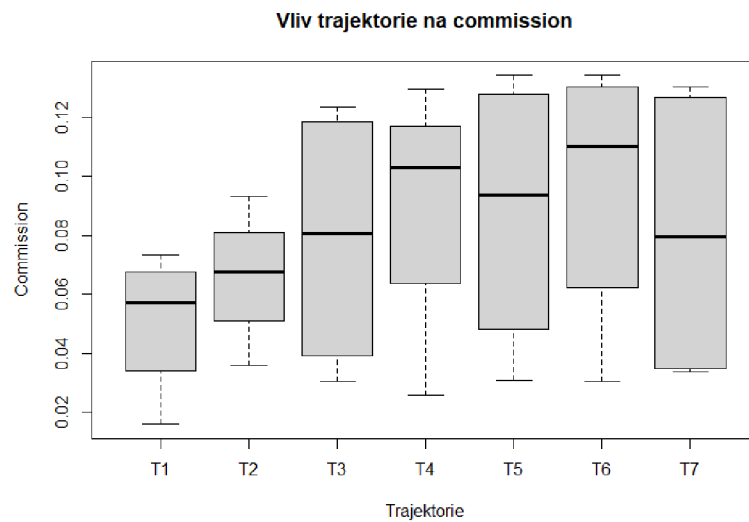
Pro porovnání trajektorií a zjištění jejich vlivu byla zvolena vícenásobné ANOVA s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . P-hodnota pro vliv trajektorie (id) na omission vyšla 0,000112 (viz obrázek 29). Statistický vliv na základě významnosti p-hodnoty pro vliv plochy na omission vyšel 9,72e-08 (viz obrázek 29). Na základě hladiny významnosti  $\alpha = 0,05$  můžeme vliv jak trajektorie, tak plochy na omission potvrdit. Na základě Tukeyho testu (viz graf 7) se nejvíce odlišovala trajektorie T1, která dosahuje největší chyby oproti trajektoriím ostatním. P-hodnota pro vliv trajektorie (id) na commission vyšla 0,0524 (viz obrázek 30). P-hodnota pro vliv plochy na commission vyšla 4,85e-07 (viz obrázek 30). Vliv na commission se prokázal u plochy, nikoli však u trajektorie.

Tabulka 5: Průměrné detekce stromů

průměr			
T	detekce	D_omission	D_commission
T1	87.06%	12.94%	5.11%
T2	91.93%	8.07%	6.61%
T3	94.53%	5.47%	7.88%
T4	94.95%	5.05%	9.03%
T5	93.45%	6.55%	8.81%
T6	93.99%	6.01%	9.62%
T7	93.71%	6.29%	8.08%



Graf 5: Vliv trajektorie na omission



Graf 6: Vliv trajektorie na commission

```
> ANO=aov(D_omission~id+plocha,data)
> summary(ANO)
            Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
id           6  0.01759  0.002932    9.17 0.000112 ***
plocha       3  0.03375  0.011249   35.18 9.72e-08 ***
Residuals   18  0.00576  0.000320
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Obrázek 29: ANOVA comission a trajektorie+plocha

```

> ANO=aov(D_commission~id+plocha,data)
> summary(ANO)

```

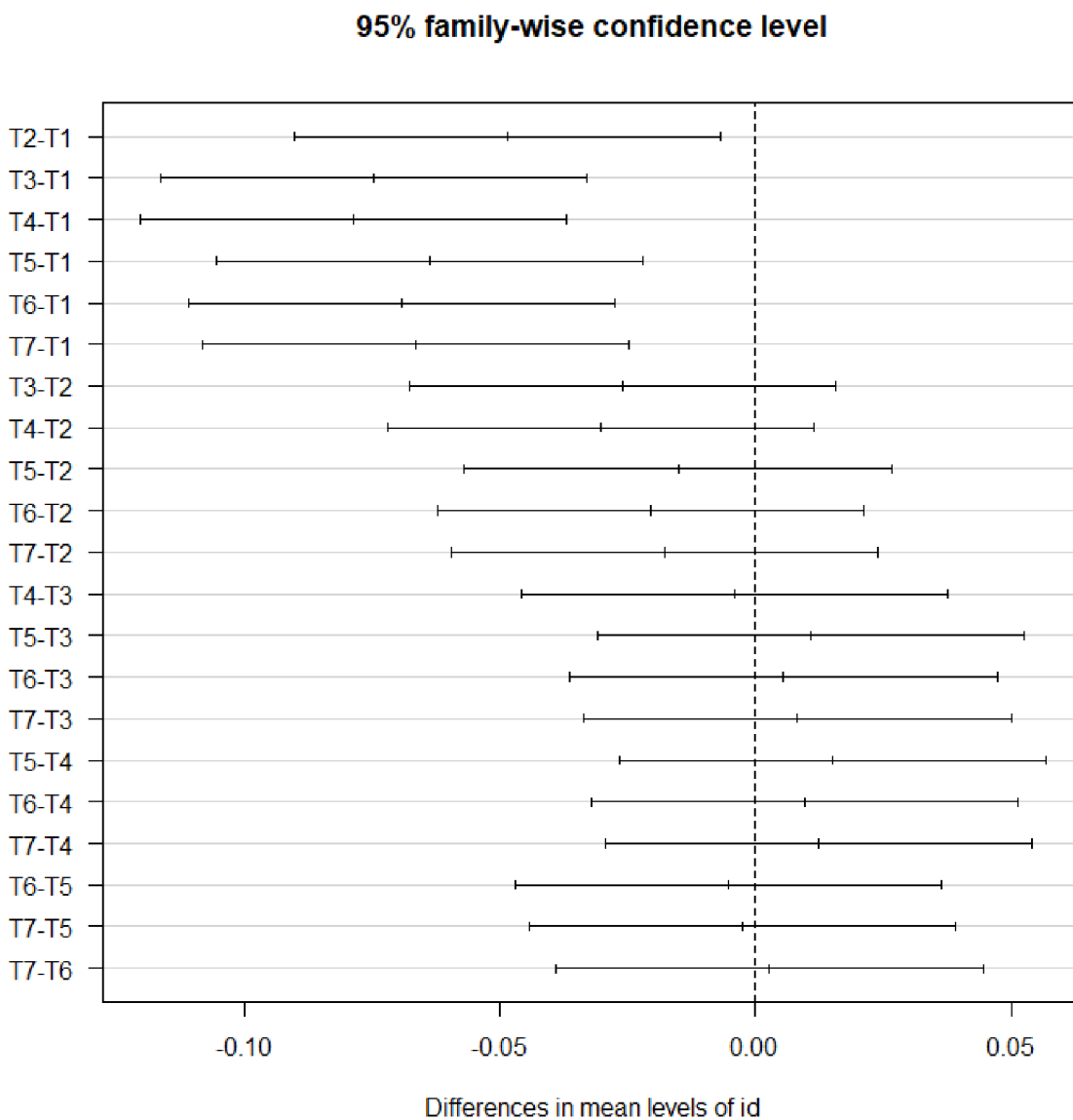
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
id	6	0.005825	0.000971	2.625	0.0524 .
plocha	3	0.031500	0.010500	28.389	4.85e-07 ***
Residuals	18	0.006657	0.000370		

```

---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Obrázek 30: ANOVA commission a trajektorie+plocha



Graf 7: Tukeyho post-hoc analýza D\_omission a trajektorie



## **5.2 Detekce kruhové základny**

### **Detekce kruhové základny na P1**

Na ploše P1 se detekce pohybovala mezi 93,52 % s trajektorií T1 až 98,32 % s trajektorií T6. Průměrná detekce kruhové základny je 96,26 %.

Nejvyšší commission měla trajektorie T7 (11,97 %), naopak nejnižší měla trajektorie T1 (3,23 %). Průměrné commission na ploše P1 bylo 9,93 %.

*Tabulka 6: Detekce kruhové základny na P1*

id	detekce	KZ_omission	KZ_commission
P1Vdata	100.00%	0.00%	0.00%
P1T1	93.52%	6.48%	3.23%
P1T2	97.52%	2.48%	7.45%
P1T3	96.09%	3.91%	8.62%
P1T4	96.09%	3.91%	9.27%
P1T5	96.45%	3.55%	10.90%
P1T6	98.32%	1.68%	11.09%
P1T7	95.84%	4.16%	11.97%

### **Detekce kruhové základny na P2**

Detekce na této ploše P2 byla vysoká a neklesla pod 96,75 %, a to konkrétně s trajektorií T1. Všechny chyby (omission) se pohybovaly mezi 2,52 % (u trajektorií T3 a T4) až 3,25 % (T1). Průměrná detekce na ploše P2 byla 97,15 %.

Chybné označení stromů zde také bylo malé, nejvyšší commission měla trajektorie T4 (2,85 %) a minimálně T7 s pouhými 0,14 %. Průměrné commission na této ploše bylo 1,64 %, což bylo nejmenší ze všech ploch.

*Tabulka 7: Detekce kruhové základny na P2*

id	detekce	KZ_omission	KZ_commission
P2Vdata	100.00%	0.00%	0.00%
P2T1	96.75%	3.25%	0.25%
P2T2	97.09%	2.91%	2.51%
P2T3	97.48%	2.52%	0.96%
P2T4	97.48%	2.52%	2.85%
P2T5	96.56%	3.44%	2.36%
P2T6	97.27%	2.73%	2.40%
P2T7	97.45%	2.55%	0.14%

### Detekce kruhové základy na P3

Na ploše P3 detekce neklesla pod 96,59 % (T1). Omission se tedy pohybovalo mezi 1,58 % (u trajektorií T6 a T7) a 3,41 (trajektorie T1). Průměrná detekce zde byla 97,98 %.

Commission se pohybovalo mezi 0,36 % (T1) až 3,94 % (T5). Pod commission 1 % se dostala i trajektorie T3. Průměrné commission zde bylo 1,65 %.

Tabulka 8: Detekce kruhové základny na P3

id	detekce	KZ_omission	KZ_commission
P3Vdata	100.00%	0.00%	0.00%
P3T1	96.59%	3.41%	0.36%
P3T2	98.00%	2.00%	1.41%
P3T3	98.42%	1.58%	0.78%
P3T4	98.00%	2.00%	1.06%
P3T5	98.00%	2.00%	3.94%
P3T6	98.42%	1.58%	2.26%
P3T7	98.42%	1.58%	1.73%

### Detekce kruhové základy na P4

Na ploše P4 bylo celkově nejmenší omission ze všech ploch. Detekce neklesla pod 97,97 % u trajektorie T1. Naopak všechny ostatní trajektorie měly detekci přes 99 %. Nejvyšší detekci měly trajektorie T4, T5 a T7. Průměrná detekce je 99,46 %.

Průměrné commission na ploše P4 bylo vypočteno na 3,63 %. Nejnižší měla opět trajektorie T1 (1,63 %). Naopak nejvyšší trajektorie T5 (4,75 %).

Tabulka 9: Detekce kruhové základny na P4

id	detekce	KZ_omission	KZ_commission
P4Vdata	100.00%	0.00%	0.00%
P4T1	97.97%	2.03%	1.63%
P4T2	99.57%	0.43%	3.36%
P4T3	99.74%	0.26%	3.62%
P4T4	99.75%	0.25%	3.18%
P4T5	99.75%	0.25%	4.75%
P4T6	99.74%	0.26%	4.52%
P4T7	99.75%	0.25%	4.32%

### Shrnutí detekce kruhové základny

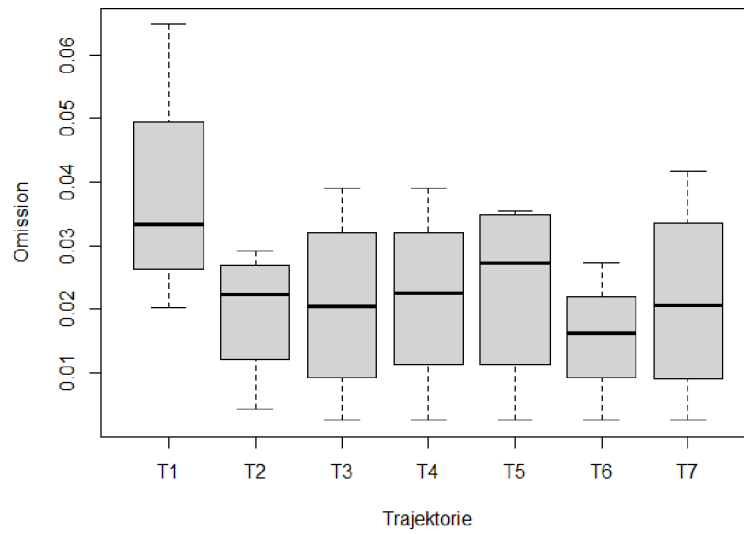
Celková detekce kruhových základen byla nižší než u detekce na základě počtu stromů. Průměrná detekce napříč trajektoriemi byla 97, 71 %. Nejvyšší detekci měla trajektorie T6 (98,44 %), nejnižší naopak T1 (96,2 %). T1 pak naopak měla nejnižší commission (1,37 %), nejvyšší měla T4 (5,49 %). Průměrné commison bylo 3,96 %.

Pro porovnání byla použita vícenásobná ANOVA s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Při porovnání vlivu trajektorie a plochy na omission vyšla p-hodnota pro trajektorii 0,00485 (viz obrázek 31) a p-hodnota pro plochu 2,89e-07 (viz obrázek 31). Statistický vliv se prokázal jak u trajektorie, tak u plochy. Podobně jako u omission detekce, tak i u omission kruhové základny se nejvíce lišila trajektorie T1 (viz graf 10). Při porovnání vlivu trajektorie a plochy na commission vyšla p-hodnota pro trajektorii 0,00936 (viz obrázek 32) a p-hodnota pro plochu 1,12e-08 (viz obrázek 32). Statistický vliv na commission se prokázal jak u trajektorie, tak u plochy.

Tabulka 10: Průměrné chyby kruhové základny

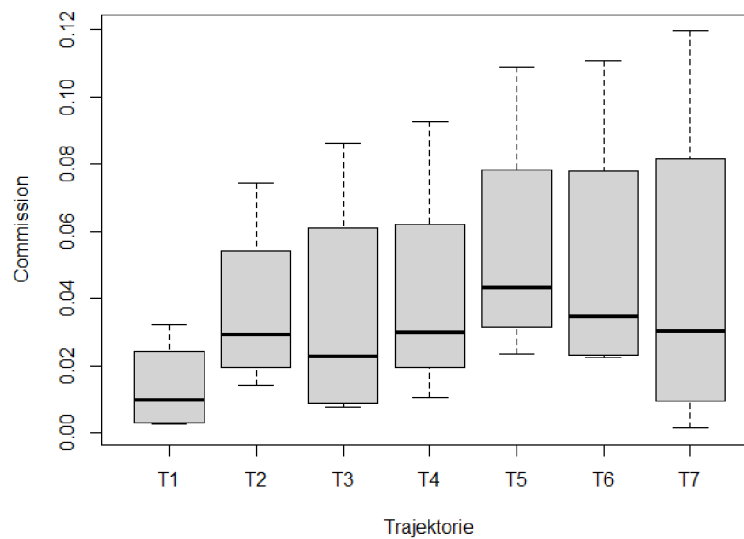
průměr			
T	detekce	KZ_omission	KZ_commission
T1	96.20%	3.80%	1.37%
T2	98.04%	1.96%	3.68%
T3	97.93%	2.07%	3.50%
T4	97.83%	2.17%	4.09%
T5	97.69%	2.31%	5.49%
T6	98.44%	1.56%	5.07%
T7	97.86%	2.14%	4.54%

Vliv trajektorie na omission



Graf 8: Vliv trajektorie na omission KZ

Vliv trajektorie na commission



Graf 9: Vliv trajektorie na commission KZ

```
> ANO=aov(KZ_omission~id+plocha,data)
> summary(ANO)
            Df    Sum Sq   Mean Sq F value    Pr(>F)
id             6  0.001198  0.0001997    4.692  0.00485 **
plocha         3  0.003887  0.0012955   30.444  2.89e-07 ***
Residuals    18  0.000766  0.0000426
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

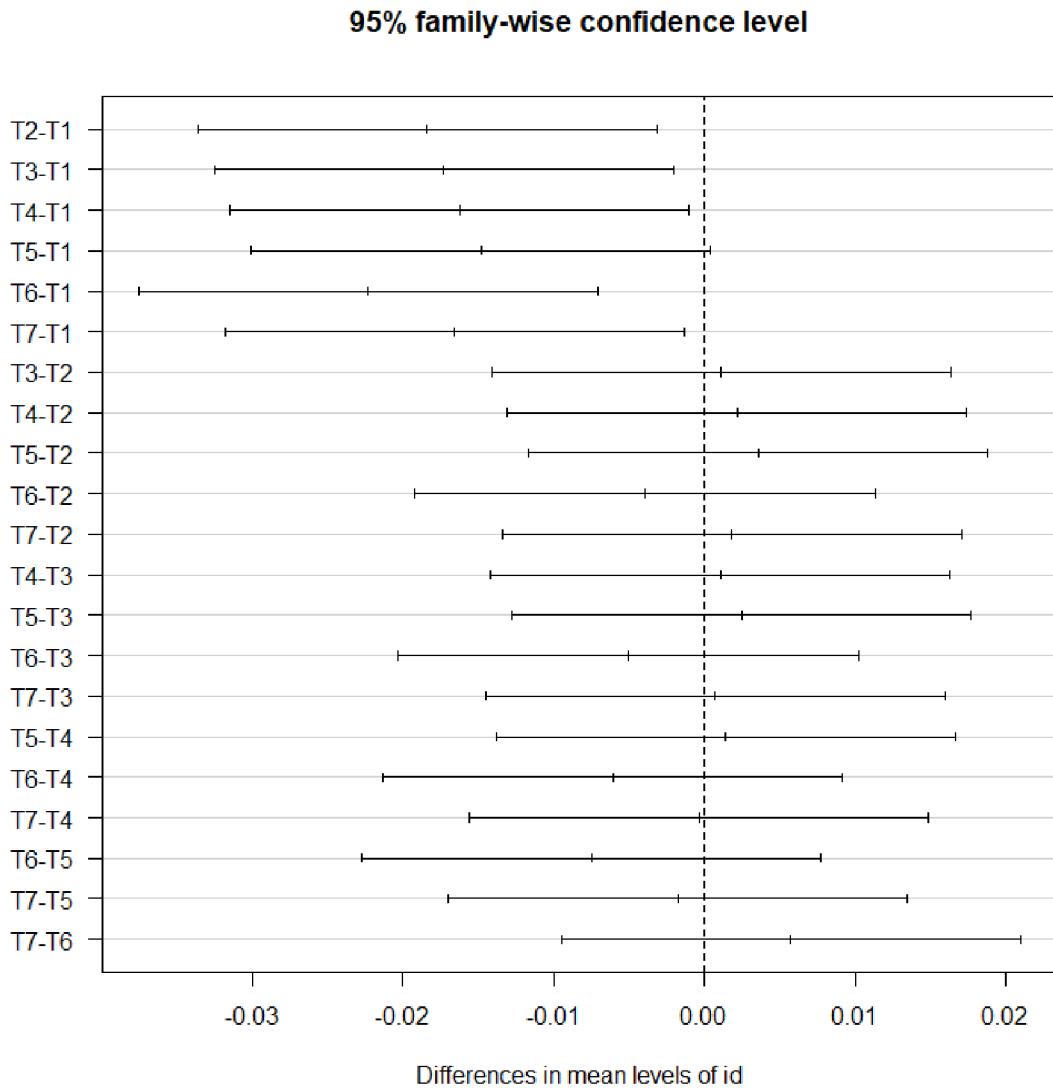
Obrázek 31: ANOVA KZ\_omission a trajektorie+plocha

```

> ANO=aov(KZ_commission~id+plocha,data)
> summary(ANO)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
id      6  0.004365  0.000728   4.075  0.00936 **
plocha  3  0.024889  0.008296  46.466 1.12e-08 ***
Residuals 18  0.003214  0.000179
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Obrázek 32: ANOVA KZ\_commission a trajektorie+plocha



Graf 10: Tukeyho post-hoc analýza KZ\_omission a trajektorie

### **5.3 Chyba určení výčetní tloušťky**

#### **Chyba určení dbh na P1**

Nejnižší průměrnou chybu měla trajektorie T2, kdy odchylka byla prakticky nulová (0,004 cm). Trajektorie T1 byl pak jediná, která tloušťku podměřovala, ostatní trajektorie tloušťku nadměřovaly. Nejvyšší průměrnou chybu měla trajektorie T7 (0,76 cm). Průměrná chyba na této ploše byla 0,28 cm.

Průměrnou nejnižší kvadratickou chybu měla také trajektorie T2 (1,91 cm). Nejvyšší naopak T6 (3,56 cm). Průměrná kvadratická chyba na této ploše byla 2,89 cm.

*Tabulka 11: Detekce kruhové základny na P2*

id	ME	RMSE
P1Vdata	0	0
P1T1	-0.14	2.59
P1T2	0.00	1.91
P1T3	0.25	2.86
P1T4	0.22	3.08
P1T5	0.36	2.75
P1T6	0.54	3.56
P1T7	0.76	3.48

#### **Chyba určení dbh na P2**

Maximální chyba zde byla 1,74 cm u trajektorií T4 a T6. Nejnižší průměrnou odchylku měla T2 (-3,35 cm), trajektorie T2 také byla jediná trajektorie, která tloušťku podměřovala. Většina trajektorií neměla chybu větší než 1 cm. Průměrná chyba byla 0,97 cm.

Nejvyšší průměrnou kvadratickou chybu měla T2 (9,33 cm), kdy pravděpodobně došlo ke špatnému změření nějakého tlustšího stromu. Naopak nejnižší měla trajektorie T7 (2,75 cm). Průměrná chyba zde byla 4,52 cm.

Tabulka 12: ME a RMSE na P2

id	ME	RMSE
P2Vdata	0	0
P2T1	0.83	3.89
P2T2	-0.35	9.33
P2T3	0.99	3.27
P2T4	1.74	5.47
P2T5	1.27	3.28
P2T6	1.74	3.69
P2T7	0.53	2.75

### Chyba určení dbh na P3

Na ploše P3 došlo k poměřování při aplikaci u všech trajektorií. Nejnížší chybu měla trajektorie T6 (-0,85 cm), nejvyšší naopak T3 (-1,40 cm). Průměrná chyba zde byla - 1,1 cm.

Průměrná kvadratická chyba na ploše P3 byla 3,1 cm. Nejvyšší kvadratickou chybu měla trajektorie T1 (3,26 cm). Nejnižší kvadratickou chybu měla trajektorie T6 (2,84 cm).

Tabulka 13: ME a RMSE na P3

id	ME	RMSE
P3Vdata	0	0
P3T1	-1.34	3.26
P3T2	-1.24	3.25
P3T3	-1.40	3.24
P3T4	-0.93	3.02
P3T5	-1.08	3.22
P3T6	-0.85	2.84
P3T7	-0.90	2.90

### Chyba určení dbh na P4

Na ploše P4 všechny trajektorie nadměřovaly. Nejnižší měla trajektorie T2 (0,55 cm). Největší měla trajektorie T4 (1,17 cm). Průměrná chyba byla 0,81 cm.

Co se týče průměrné kvadratické chyby, tak ta byla na ploše P4 nejnižší a napříč trajektoriemi činila 2,65 cm. Nejnižší kvadratickou chybu měla trajektorie T7 (2,26 cm), nejvyšší naopak trajektorie T3 (3,09 cm).

Tabulka 14: ME a RMSE na P4

id	ME	RMSE
P4Vdata	0	0
P4T1	0.62	2.69
P4T2	0.55	2.41
P4T3	0.92	3.09
P4T4	1.17	2.65
P4T5	0.69	2.64
P4T6	0.94	2.80
P4T7	0.80	2.26

### Shrnutí chyby určení dbh

Všechny průměrné chyby se vešly pod 1 cm. Nejnižší průměrnou chybu měla trajektorie T1 (-0,01 cm). Nejvyšší naopak T6 (0,59 cm). Všechny trajektorie, kromě trajektorie T1, tloušťku stromu nadměřovaly. Co se týče kvadratické chyby, tak tu měla nejmenší trajektorie T7 (2,85 cm), nejvyšší naopak trajektorie T2 (4,22 cm). Celková průměrná chyba napříč trajektoriami byla 0,24 cm a průměrná kvadratická chyba napříč trajektoriami 3,29 cm.

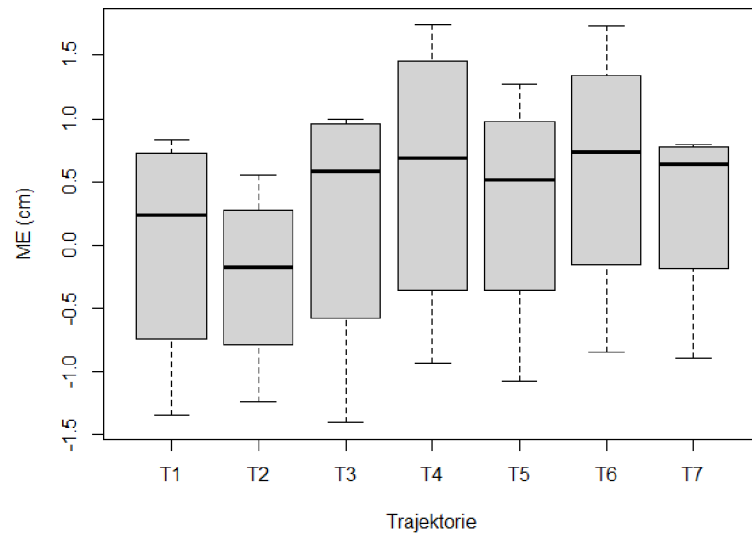
Pro porovnání byla použita vícenásobná ANOVA s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Při porovnání trajektorií a průměrné chyby (ME) vyšla p-hodnota 0,0351 (viz obrázek 33), můžeme tedy vliv trajektorie průměrnou chybu na základě hladiny významnosti 0,05 potvrdit. Pro vliv plochy na ME vyšla p-hodnota 5,37e-09, vliv tedy také můžeme potvrdit. U vlivu trajektorie a plochy na průměrnou kvadratickou chybu (RMSE) vyšla p-hodnota 0,7642 (viz obrázek 34) pro trajektorii a 0,0516 pro plochu, můžeme tedy zamítnout vliv trajektorie na průměrnou kvadratickou chybu na základě hladiny významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Tabulka 15: Průměrné ME a RMSE

průměr		
T	ME	RMSE
T1	-0.01	3.11
T2	-0.26	4.22
T3	0.19	3.12
T4	0.55	3.56
T5	0.31	2.97
T6	0.59	3.22
T7	0.30	2.85

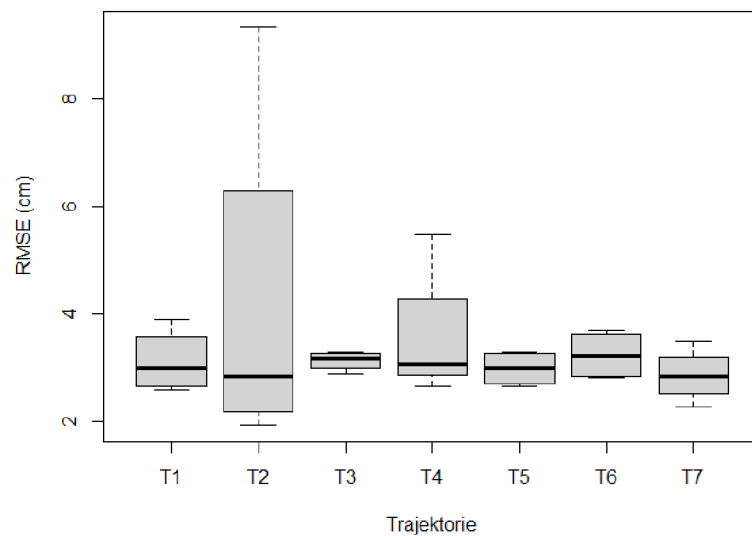


Vliv trajektorie na střední chybu



Graf 11: Vliv trajektorie na ME

Vliv trajektorie na střední kvadratickou chybu



Graf 12: Vliv trajektorie na RMSE

```
> ANO=aov(ME ~id+plocha,data)
> summary(ANO)
            Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
id           6  2.154   0.359   2.942  0.0351 *
plocha       3 18.651   6.217  50.942 5.37e-09 ***
Residuals   18  2.197   0.122
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Obrázek 33: ANOVA ME a trajektorie+plocha

```

> ANO=aov(RMSE ~id+plocha,data)
> summary(ANO)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
id      6   5.24   0.873   0.549 0.7642
plocha  3  14.91   4.969   3.125 0.0516 .
Residuals 18  28.62   1.590
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Obrázek 34: ANOVA RMSE a trajektorie+plocha

## **6 Diskuse**

Na základě vícenásobné ANOVY se vliv trajektorie na kvalitu rekonstrukce kmenů stromů prokázal u omission detekce stromů, omission kruhové základny, commission kruhové základny a průměrnou chybu (ME). Neprokázala se u kvadratické chyby (RMSE) a commission detekce počtu stromů. Vliv plochy se prokázal všude, kromě kvadratické chyby (RMSE). Na základě Tukeyho post-hoc testu (viz graf 7 a graf 10) byl zjištěn největší rozdíl mezi T1 a ostatními trajektoriemi. Z toho vyplývá, že je potřeba plochu nejen obejít, ale i nějakým způsobem projít skrz. Mezi trajektoriemi T2 až T7 nebyl nalezen signifikantní rozdíl. Podobného výsledku bylo dosaženo i ve studii Kuželka a kol. (2022), kde také nebyl nalezen žádný signifikantní rozdíl na kvalitu skenu mezi použitými trajektoriemi.

Nejvyšší průměrná detekce se na jednotlivých plochách vyskytovala na P3 (97,84 %), která byla nejvíce homogenní a neobsahovala žádné podrostní patro. Nejnižší průměrnou detekci měla naopak P1 (89,05 %), na které se naopak nacházela spodní smrková etáž a část plochy tvořila hustě zavětřena smrková monokultura. Z toho vyplývá, že nejvyšší přesnosti dostaneme na homogenních plochách, které nejsou strukturově bohaté.

V této práci bylo dosaženo průměrné detekce 87,94 % až 94,95 % u jednotlivých trajektorií. Mokroš a kol. (2021) při použití stejného laserového skeneru (GeSLAM Zeb Horizon) zaznamenal úspěšnost 55,6 %-74,3 % detekci stromů o tloušťce 7 cm a více. Celková detekce na všech plochách byla 67,91 %. Při použití iPad Pro, kdy trajektorie vedla kolem každého stromu (viz obrázek 6), se detekce stromů pohybovala mezi 64,5 %-87,5 %. Celková detekce na všech plochách byla 77,25 %. Kašpar (2022) ve své diplomové práci dosáhl detekce 95,5 % až 100 %. Podobných výsledků dosáhl Gollob a kol. (2020), který při použití stejného skeneru a trajektorie (viz obrázek 7) dosáhl detekce 96 %.

Co se týče kruhové základny, tak nejvíce chybějící KZ měla trajektorie T1, což není příliš překvapující vzhledem k nejnižší detekci a nejmenšího počtu změřených dat. Celkově však KZ\_omission nepřesáhlo 4 % (T1) a oproti detekci, která závisí čistě na počtu stromů, výrazně poklesla (D\_omission 12,94 %), což nasvědčuje tomu, že nedetekované stromy byly spíše menších tlouštěk. Kuželka (2022) pro trajektorie (viz obrázek 11) (v této práci T3, T4 a T6) naměřil KZ\_omission 3,6 %, 0,2 % a 0,3 %. Zatímco T3 byla v této práci změřena podobně (2,07 %), tak T4 a T6 byly výrazně vyšší (T4 2,17 % a T6 1,56 %). Naopak KZ\_commission bylo v této práci nižší T3

(3,5 %) a T6 (5,07 %), Kuželka a kol. (2022) naměřil 8 % a 7 %. T4 bylo naměřeno totožně, a to 4 %.

Průměrná chyba se pohybovala v rozmezí mezi -0,26 cm (T2) až 0,59 cm (T6). Nejnižší průměrnou chybu měla T1 (-0,01 cm), podobné hodnoty dosáhl i Kuželka a kol. (2022), a to 0,03 cm. Vyšší hodnoty zaznamenal Zamec (2022), kdy průměrná chyba byla -1,19 cm. Nicméně nevýhodou průměrné chyby (ME) je, že výsledky se blíží k nule, pokud hodnoty dosahují rovnoměrně jak kladných, tak i záporných čísel. S tímto problémem však počítá kvadratická chyba (RMSE). Jak je možné vidět (viz tabulka 15) při porovnání T1 a T6 (tedy nejmenší a největší průměrné chyby), tak hodnoty RMSE mají podobné, a to 3,11 (T1) a 3,22 (T6). Proto je kvadratická chyba celkově lepším ukazatelem chybovosti při měření dbh.

Kvadratická chyba tloušťky se u jednotlivých trajektorií pohybovala od 2,85 cm do 4,22 cm. Nejnižší kvadratickou chybu měla trajektorie T7, a to 2,85 cm. Podobnou kvadratickou chybu změřil Gollob a kol. (2020), a to 2,32 cm, kdy se jeho trajektorie (viz obrázek 7) nejvíce podobá T3, u které bylo v této práci RSME vypočteno 3,12 cm. Kuželka a kol. (2022) pro stejné trajektorie, jaké byly použity v této práci (T3, T4 a T6), dosáhl hodnot RMSE 1,02 cm, 0,84 cm a 1,01 cm. Podobnou hodnotu naměřil i Zamec (2022) ve své diplomové práci, kdy RMSE bylo 1,58 cm. V této práci bylo naměřeno RMSE větší, konkrétně 3,12 cm, 3,56 cm a 3,22 cm. Na rozdíl od Kuželky (2022), kdy pro T4 naměřil RMSE 0,84, měla trajektorie T4 RMSE téměř největší (3,56 cm). To může být způsobeno tím, že v této práci nebyla stanovena minimální tloušťka měřených stromů. Výrazně vyšší RMSE naměřil Del Perugia a kol. (2019) se skenerem ZEB1, konkrétně 9,1 cm pro trajektorii s rozestupem 10 m a 13,9 cm pro trajektorii s rozestupem 15 m (viz obrázek 8).

Co se týče doporučení pro volbu trajektorie. Z dostupných výsledků (viz graf 7 a graf 10) by se dalo říct, že optimální trajektorie by měla vést kolem obvodu zkoumané plochy. Dále by bylo vhodné trajektorii vést přes danou plochu, avšak způsob vedení trajektorie vnitřkem plochy není podstatný. Z trajektorií, které byly použity v této diplomové práci, bych doporučil T3 a T7. Obě tyto trajektorie dosahovaly dobrých výsledků a v zároven byla snadná jejich aplikace v porostu. Například použití trajektorií T5 a T6 bylo v částech s hustým zvětvěním, nebo pokud trajektorie vedla skrz smrkovým podrostem, obtížné.

Trajektorie, která určitě také stojí za zmínku, je T4. Ta byla použita i ve studii Kuželka a kol. (2022), kde s ní bylo dosaženo nejkonzistentnějších výsledků. Dále se o této

trajektorii Kuželka a kol. (2022) vyjadřoval, že je nejefektivnější z hlediska celkové délky, rovnoměrnosti pokrytí plochy a skenování. Tato trajektorie měla také nejnižší RMSE oproti ostatním testovaným trajektoriím (0,84 cm). Na rozdíl od Kuželky a kol. (2022) měla T4 v této práci druhou největší kvadratickou chybu, a to 3,56 cm. Tato trajektorie by se dala optimalizovat tím způsobem, že by vnitřní kružnice vedla opačným směrem než kružnice obvodová. Tím by bylo dosaženo rovnoměrného naskenování stromů na ploše, to by pravděpodobně způsobilo větší přesnost modelace obvodu kmene.

## **7 Závěr**

Tato diplomová práce se zabývala vlivem trajektorie pozemního laserového skenování na kvalitu 3D rekonstrukce kmenů stromů. Porovnávalo bylo celkem 7 trajektorií na 4 plochách. Každá z těchto ploch měla kruhový tvar s poloměrem 17,85 m, tedy jejich rozloha byla 1000 m<sup>2</sup>. Měření probíhalo pomocí laserového skeneru GeoSLAM Zeb Horizon.

Zkoumanými aspekty byla chyba v detekci počtů stromů, konkrétně nedetekované stromy (ommission) a chybně detekované stromy (commission). Dále pak chyba v detekci kruhové základny, kdy se stejně jako u počtu měřila nedetekovaná kruhová základna (KZ\_omission) a chybně detekovaná kruhová základna (KZ\_commission). V poslední řadě se porovnávala průměrná a kvadratická chyba ve výčetní tloušťce mezi odhadnutými a manuálně změřenými daty.

Průměrná detekce se u použitých trajektorií pohybovala mezi 87,06 % a 94,95 %, commission pak u počtu stromů bylo naměřeno od 5,11 % do 9,62 %. Nejvyšší detekci měla trajektorie T4, nejnižší pak T1. Co se týče kruhové základny, tak tam se KZ\_omission pohybovalo mezi 3,8 % u trajektorie T1 až 1,56 %, u trajektorie T6 KZ\_commission pak dosáhlo 1,37 % (T1) až 5,49 % (T5). Průměrná chyba (ME) byla v rozmezí od -0,01 cm (u trajektorie T1) do 0,59 cm (u trajektorie T6). Trajektorie T1 a T2 v průměru tloušťku podměřovaly. Trajektorie T3, T4, T5, T6 a T7 v průměru tloušťku nadměřovaly. Nejnižší průměrnou kvadratickou chybu měla trajektorie T7 (2,85 cm), naopak nejnižší měla trajektorie T2, a to 4,22 cm.

V této práci byl prokázán vliv trajektorie na omission detekce stromů, omission kruhové základny, commission kruhové základny a průměrnou chybu (ME). Vliv nebyl prokázán u střední kvadratické chyby (RMSE) a commission detekce počtu stromů. Kromě trajektorie T1, která vedla pouze po obvodu ploch, si byly všechny trajektorie podobné. Z toho vyplývá, že je potřeba zkoumanou plochu nejen obkroužit, ale nějakým způsobem ji i protnout. Nejvíce efektivní se ukázala trajektorie T3, která plochu obkrouží a následně ji dvakrát kolmě protne, a trajektorie T7, která plochu obkrouží, následně protne příčkou, kterou pak vlnitě dvakrát protne.

Mobilní laserové skenování je jistě perspektivní metoda sběru dat v lesním prostředí. Nicméně na základě výsledků jak této, tak i jiných prací se výzkumem trajektorií nemá cenu již příliš zabývat. Potenciál pro inovace je ale rozhodně v automatizaci vyhodnocení bodových mračen. Tato inovace a snížení pořizovacích nákladů by jistě vedla k postupné implementaci do praxe.

## **8 Seznam použité literatury**

AHMAD, Norhafizan. GHAZILLA, Raja. KHAIRI, Nazirah. KASI, Vijayabaskar. *Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications*. International Journal of Signal Processing Systems [online] 2013, 1(2):256-262 [cit. 2024-02-24] Dostupné z: 10.12720/ijsp.1.2.256-262.

BALENOVIĆ, Ivan, LIANG, Xinlian. JURJEVIĆ, Luka. HYYPPÄ, Juha. SELETKOVIĆ Ante. KUKKO, Antero. 2020. *Hand-held personal laser scanning – current status and perspectives for forest inventory application*. Croatian Journal of Forest Engineering [online]. 42(1), 165–183. ISSN 18455719. [cit. 2024-03-20] Dostupné z: doi:10.5552/crojfe.2021.858.

BAUWENS, Sébastien. BARTHOLOMEUS, Harm. CALDERS, Kim.; LEJEUNE, Philippe. *Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning*. Forests [online] 2016, 7, 127. ISSN 1999-4907. [cit. 2024-03-21] Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f7060127>.

CABO, Carlos. DEL POZO, Susana. RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, Pablo. ORDÓÑEZ, Celestino. GONZÁLEZ-AGUILERA, Diego. *Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level*. Remote Sensing [online] 2018. 10, no. 4: 540. [cit. 2024-03-21] Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs10040540>.

COOMES, David. ŠAFKA, Daniel. SHEPHERD, James. DALPONTE, Michele. HOLDAWAY, Robert. *Airborne laser scanning of natural forests in New Zealand reveals the influences of wind on forest carbon*. Ecosyst. 5, 10 [online]. 2018. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0119-6>.

DEL PERUGIA, Barbara. GIANNETTI, Francesca. CHIRICI, Gherardo. TRAVAGLINI, Davide. *Influence of Scan Density on the Estimation of Single-Tree Attributes by Hand-Held Mobile Laser Scanning*. Forests [online] 2019, roč. 10, č. 3. ISSN 1999-4907. [cit. 2024-03-21] Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f10030277>.

DOLANSKÝ, Tomáš. *Lidary a letecké laserové skenování*. Ústí nad Labem: MINO, 2004. 100 s. ISBN 80-7044-575-0.

ESA. What is Galileo [online]. ESA.int, 2024. [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.

EUSPA: *Programme* [online]. Euspa.europa.eu, 2024 [cit. 2023-10-17]. Dostupné z: <https://www.euspa.europa.eu>.

GeoSLAM, *ZEB Horizon. The Ultimate Mobile Mapping Solution* [online]. GeoSLAM, 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupný z: <https://geoslam.com>.

GLONASS. *About GLONASS* [online]. GLONASS, 2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://glonass-iac.ru>.

GOLLOB, Christoph. RITTER, Clemens. NOTHDURFT, Arne, A. *Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology*. *Remote Sens.* [online] 2020, 12. ISSN 2072-4292. [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs12091509>.

GOLLOB, Christoph. RITTER, Tim. VOSPERNIK, Sonja. WASSERMANN, Clemens. NOTHDURFT, Arne. *A Flexible Height–Diameter Model for Tree Height Imputation on Forest Inventory Sample Plots Using Repeated Measures from the Past*. *Forests* 9 [online] 2018, no. 6: 368. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: <https://doi.org/10.3390/f9060368>.

GOLLOB, Christoph. RITTER, Tim. WASSERMANN, Clemens. NOTHDURFT, Arne. *Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots*. *Remote Sens* [online] 2019, 11, 1602. [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>.

GORDÍKOVÁ, Monika. VIDEO: Drony nalétaly při požáru v Českém Švýcarsku skoro 10 tisíc kilometrů. *IDNES.cz* [online]. [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/usti/zpravy/ceske-svycarsko-narodni-park-pozar-drony-monitoring.A220923\\_134349\\_usti-zpravy\\_grr](https://www.idnes.cz/usti/zpravy/ceske-svycarsko-narodni-park-pozar-drony-monitoring.A220923_134349_usti-zpravy_grr).

GPS. *The Global Positioning System* [online]. GPS, 2024 [cit. 2023-10-31]. Dostupné z: <https://www.gps.gov>.

Haglöf SWEDEN. *Vertex Laser Geo*. [Haglofsweden.com](https://haglofsweden.com) [online]. 2024 [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://haglofsweden.com/project/laser-geo/>.

HÁJEK, Filip. ADOLT, Radim. TOMANČÁK, Ondřej. Kantorová, Markéta. KUČERA, Miloš. ČECH, Zbyněk: *Metodika a pracovní postupy fotogrammetrického šetření NIL2*. Brandýs nad Labem: 2016. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem (ÚHÚL), 161 s., ISBN 978-80-905995-8-1.



HORÁK, Jiří; *Dálkový průzkum Země*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava 2014 [online]. [cit. 2024-02-31]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~hor10/Vyuka/DPZ/DPZ%202014.pdf>.

HYYPPÄ, Juha. VIRTANEN, Juho-Pekka. JAAKKOLA, Anttoni. YU, Xiaowei. HYYPPÄ, Hannu. LIANG, Xinlian. *Feasibility of Google Tango and Kinect for Crowdsourcing Forestry Information*. *Forests* [online]. 2018, 9, 6. [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f9010006>.

CHEN, Shilin. LIU, Haiyang. FENG, Zhongke. SHEN, Chaoyong. CHEN, Panpan. *Applicability of personal laser scanning in forestry inventory*. *PLoS One* [online]. 2019 Feb 27;14(2): e0211392. PMID: 30811414. PMCID: PMC6392439. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: [10.1371/journal.pone.0211392](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211392).

IGLHAUT, Jakob. CABO, Carlos. PULITI, Stefano. a kol. *Structure from Motion Photogrammetry in Forestry*. *Review. Curr Forestry* [online]. (2019), Rep 5, 155–168 Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>.

KAŠPAR, Dominik. *Ověření dendrometrických veličin trvalých zkusných ploch pomocí dat laserového skenování*. Praha, 2022. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita. Fakulta hospodářské úpravy lesů. Vedoucí práce Karel Kuželka.

KRAUS, K. PFEIFER, N. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online] 1998. Volume 53. Issue 4. Pages 193-203. ISSN 0924-2716. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(98\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00009-4).

KUKKO, Antero. KAARTINEN, Harri. HYYPPÄ, Juha. CHEN, Yuwei. *Multiplatform Mobile Laser Scanning*. *Sensors* [online]. 2012, 12, 11712-11733. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: <https://doi.org/10.3390/s120911712>.

KUŽELKA, Karel a kol.; *MĚŘENÍ LESA Moderní metody sběru a zpracování dat*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2014. ISBN 978-80-213-2498-5.

KUŽELKA, Karel. MARUŠÁK, Róbert Marušák. SUROVÝ, Peter. *Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online] 2022. , Volume 115, ISSN 1569-8432, [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103104>.

LIANG, Xinlian. KUKKO, Antero. KAARTINEN, Harri. HYYPPÄ, Juha. YU, Xiaowei. JAAKKOLA, Anttoni. WANG, Yunsheng. *Possibilities of a Personal Laser Scanning*

*System for Forest Mapping and Ecosystem Services*. Sensors [online]. 2014, 14, 1228-1248. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: <https://doi.org/10.3390/s140101228>.

LIM, Kevin., TREITZ, Paul., WULDER, Michael., a kol.. *LiDAR remote sensing of forest structure*. Progress in Physical Geography: Earth and Environment [online] 2003, 27(1), 88-106. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1191/0309133303pp360ra>.

MANSFELD, Vratislav. BALÍN, Daniel. MACHÁČEK, Petr. *3D laserové skenování lesních porostů*. Lesnická práce. 2007, 86(8), 28-29.

MOKROŠ, Martin. MIKITA, Tomáš. SINGH, Arunima. TOMAŠTÍK, Julián. CHUDÁ, Juliána. WEŻYK, Piotr. KUŽELKA, Karel. SUROVÝ, Peter. KLIMÁNEK, Martin. ZIĘBA-KULAWIK, Karolina. BOBROWSKI, Rogerio. LIANG, Xinlian. *Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation [online]. 2021, č. 104. ISSN 1569-8432. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102512>.

PIERZCHAŁA, Marek. ASTRUP, Rasmus. GIGUÈRE, Philippe. *Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM*. Computers and Electronics in Agriculture [online]. 2018, v. 145, p 217-225. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.034>.

PRETZSCH, Hans. JOACHIM Hans, TAUBER, René. MACHÁČEK, Petr. STARÝ, Martin. *3D a 2D technologie pro snímání inventarizačních parametrů*. Lesnická práce. 2009, 88(3), 22-24.

RYDING, Joseph; WILLIAMS, Emily; SMITH, Martin J.; EICHHORN, Marcus P. *Assessing Handheld Mobile Laser Scanners for Forest Surveys*. Remote Sens [online] 2015, 7, 1095-1111. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs70101095>.

SUROVÝ, Peter; KUŽELKA, Karel; *Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-3008-5.

SVATOŇOVÁ, Hana. LAUERMANN, Lubomír. *Dálkový průzkum Země – aktuální zdroj geografických informací*. 1. vydání. Brno: Masarykova univerzita, 2010. 96 s. ISBN 978-80-210-5162-1.

ŠEBESTA, Jiří; *Globální navigační systémy*; Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2012, ISBN 978-80-214-4500-0.

ŠLEGLOVÁ, Kristýna. BRICHTA, Jakub. BÍLEK, Lukáš. SUROVÝ, Petr. *Measuring the Canopy Architecture of Young Vegetation Using the Fastrak Polhemus 3D Digitizer*. *Sensors* [online] 2024; 24(1):109. [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s24010109>.

TAKEOTMI, Takafumi. UCHIYAMA, Hideaki. IKEDA, Sei. *Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016*. *IPSJ T Comput Vis Appl* [online] 2017. 9, 16. [cit. 2024-03-21]. Dostupný z: <https://doi.org/10.1186/s41074-017-0027-2>.

WANG, Xiaochen. YAO Haiyun., MA Yangyang, LIANG Xinlian. (2023). *A comparison study of low-cost personal laser scanning systems for forest plot-level inventories*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. [cit. 2024-03-21] XLVIII-1/W2-2023. 1809-1815. 10.5194. Dostupné z: [10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-1809-2023](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-1809-2023).

WEHR, Aloysius. LOHR, Uwe. *Airborne laser scanning—an introduction and overview*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 1999. 54(2-3), 68-82 [cit. 2024-03-21]. ISSN 09242716. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8).

Xi, Zhouxin. Hopkinson, Chris. *3D Graph-Based Individual-Tree Isolation (Treeiso) from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds*. *Remote Sens.* [online] 2022, 14, 6116. [cit. 2024-02-24] Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs14236116>.

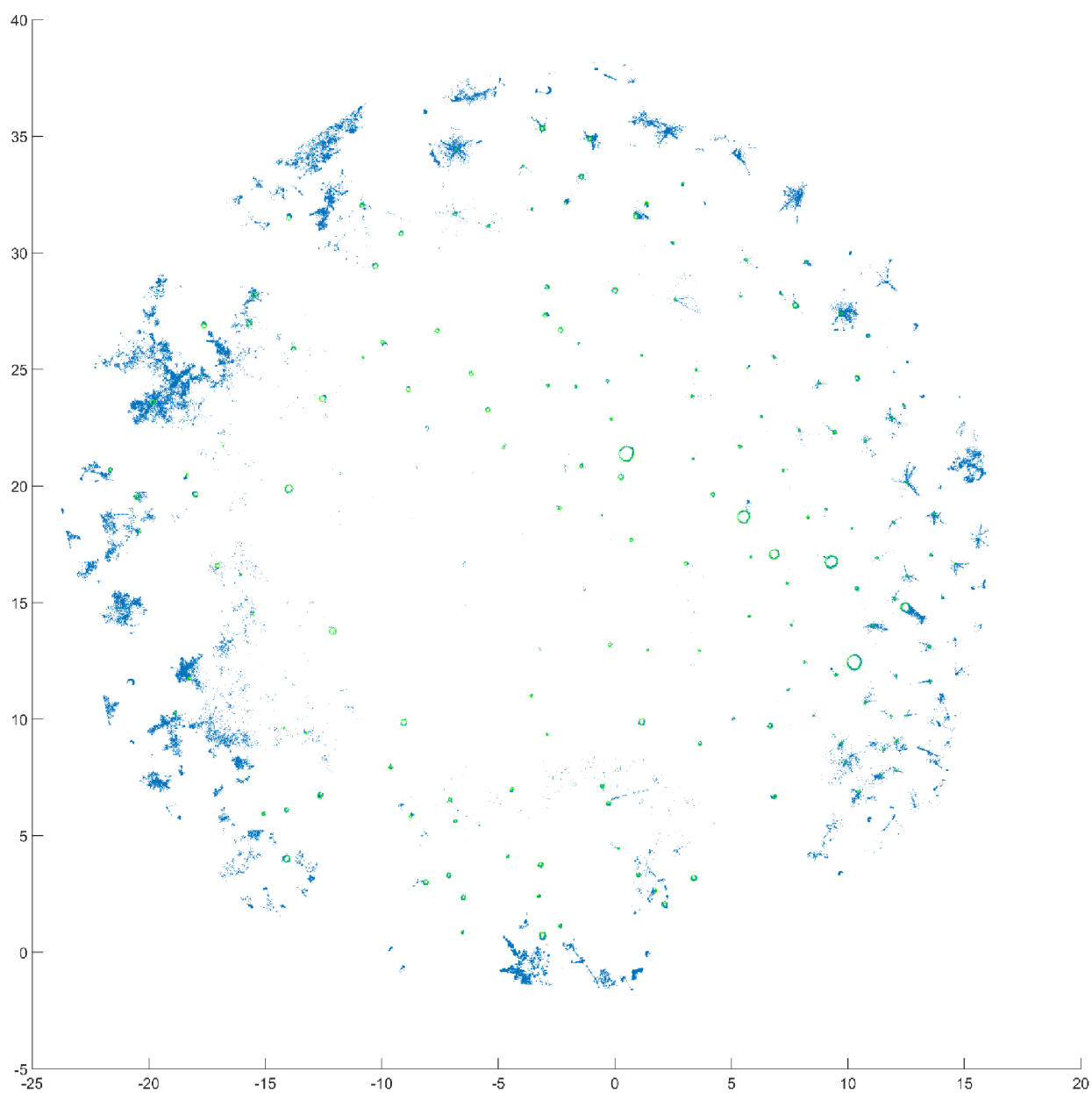
ZAMEC, Tomáš. *Detekce a zjišťování parametrů individuálních stromů v laserových bodových mračnecích*. Praha, 2022. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita. Fakulta hospodářské úpravy lesů. Vedoucí práce Karel Kuželka.

## **9 Seznam příloh**

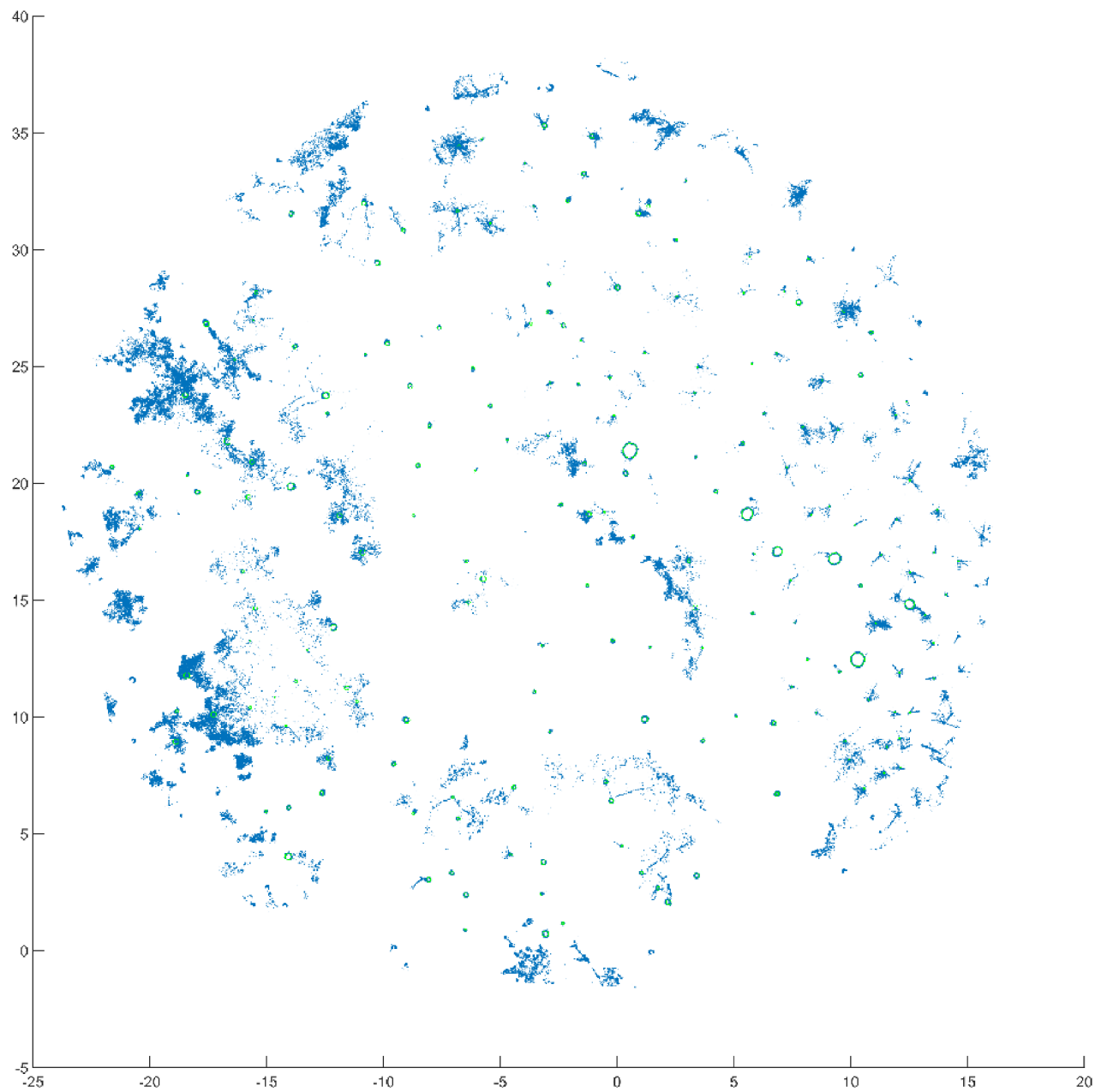
Příloha 1: Automatická detekce stromů P1T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	64
Příloha 2: Automatická detekce stromů P1T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	65
Příloha 3: Automatická detekce stromů P2T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	66
Příloha 4: Automatická detekce stromů P2T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	67
Příloha 5: Automatická detekce stromů P3T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	68
Příloha 6: Automatická detekce stromů P3T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	69
Příloha 7: Automatická detekce stromů P4T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	70
Příloha 8: Automatická detekce stromů P4T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom .....	71
Příloha 9: Rskript na úpravu tabulek a označení validačních a porovnávacích dat .....	72
Příloha 10: Rskript porovnání dat ze dvou datových souborů na základě souřadnic .....	72
Příloha 11: Rskript detekce stromů.....	72
Příloha 12: Rskript zjištění kruhové základny detekovaných stromů .....	73
Příloha 13: Rskript zjištění kruhové základny všech stromů na ploše.....	73
Příloha 14: Rskript výpočtu aritmetického průměru (ME) a kvadratické chyby (RMSE) .....	73
Příloha 15: Rskript výpočtu KZ pro Vdata pro shodné stromy s Pdaty .....	73

## 10 Přílohy

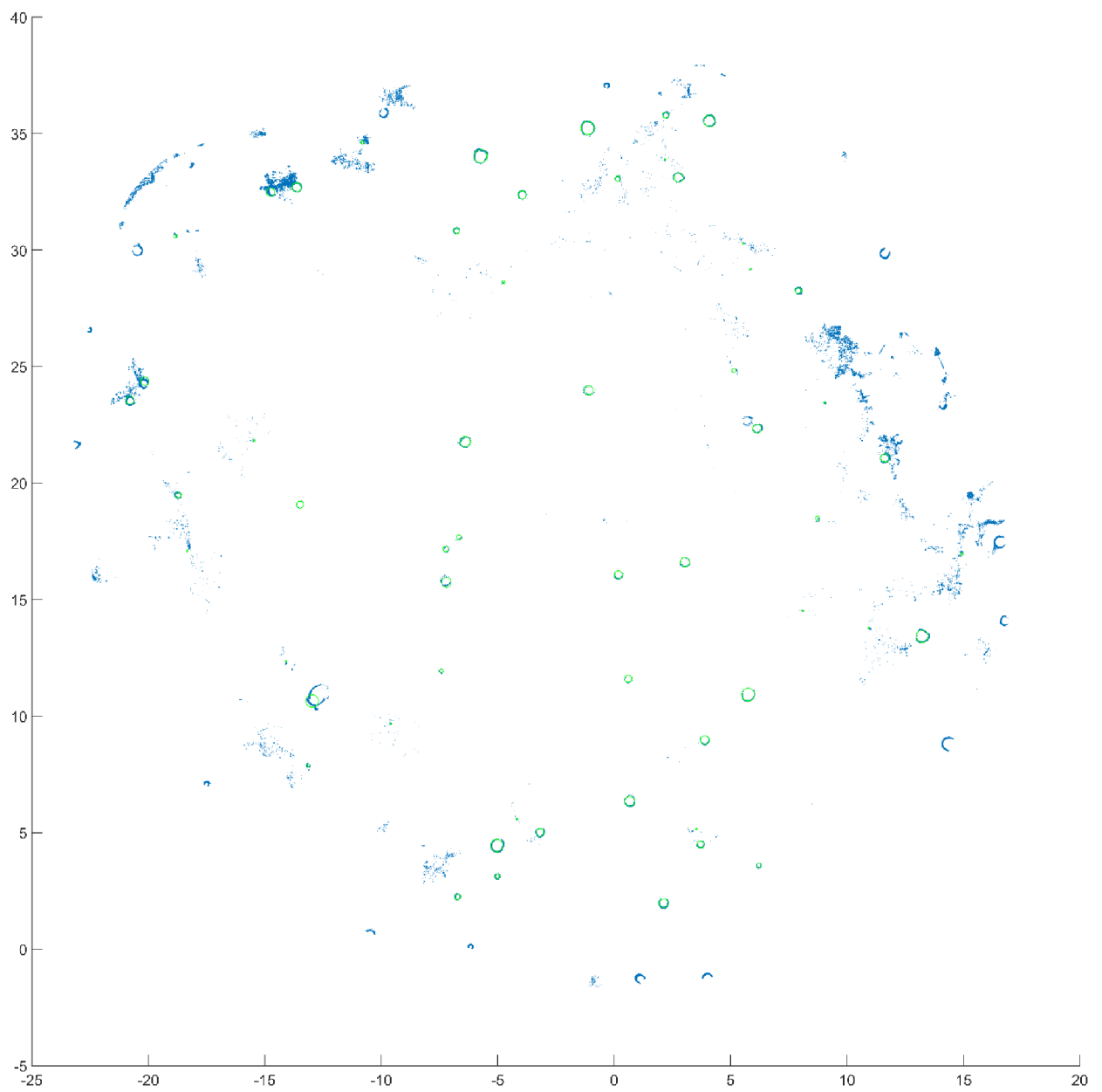
Příloha 1: Automatická detekce stromů P1T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom



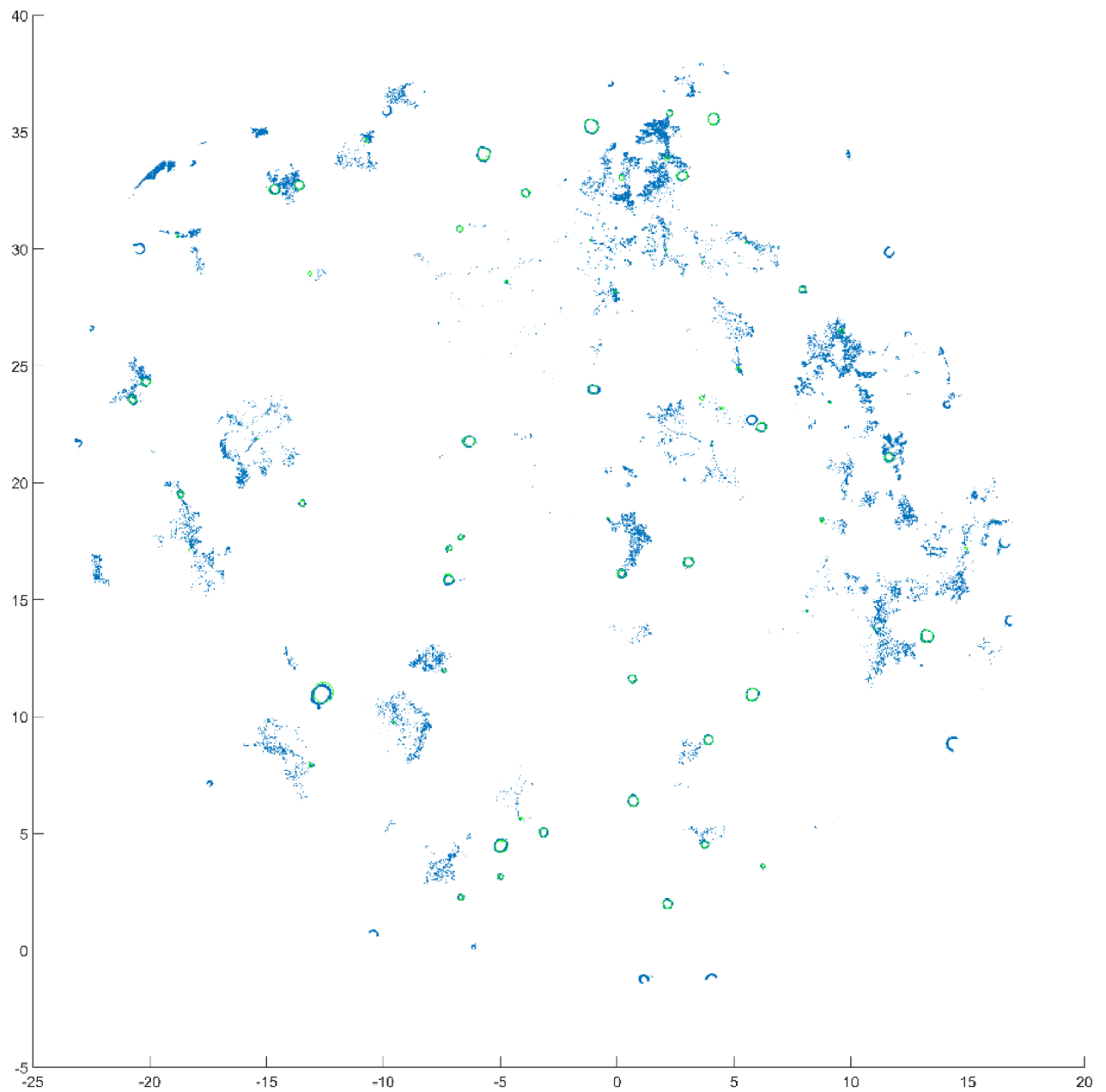
Příloha 2: Automatická detekce stromů P1T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom



Příloha 3: Automatická detekce stromů P2T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom

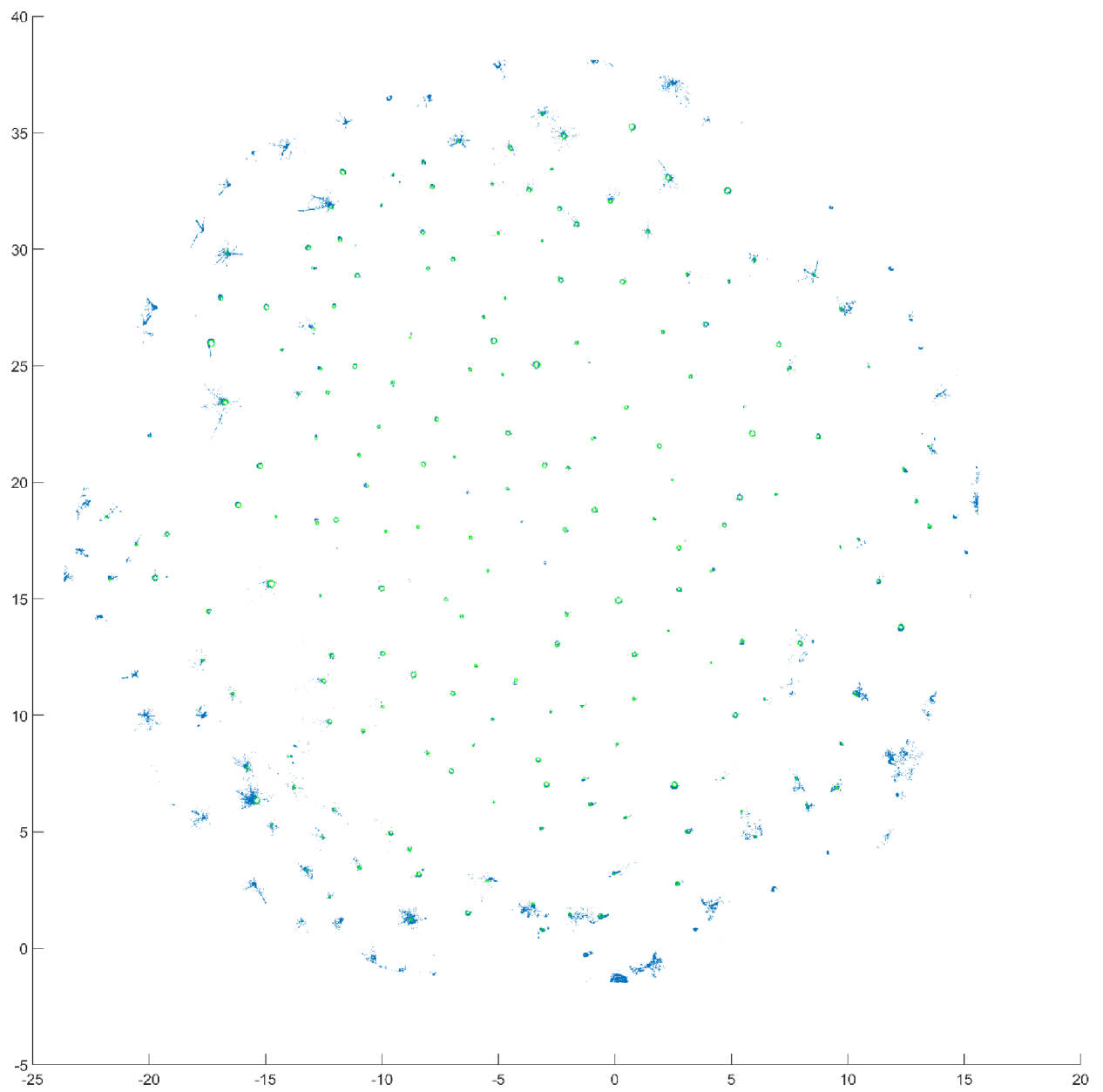


Příloha 4: Automatická detekce stromů P2T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom

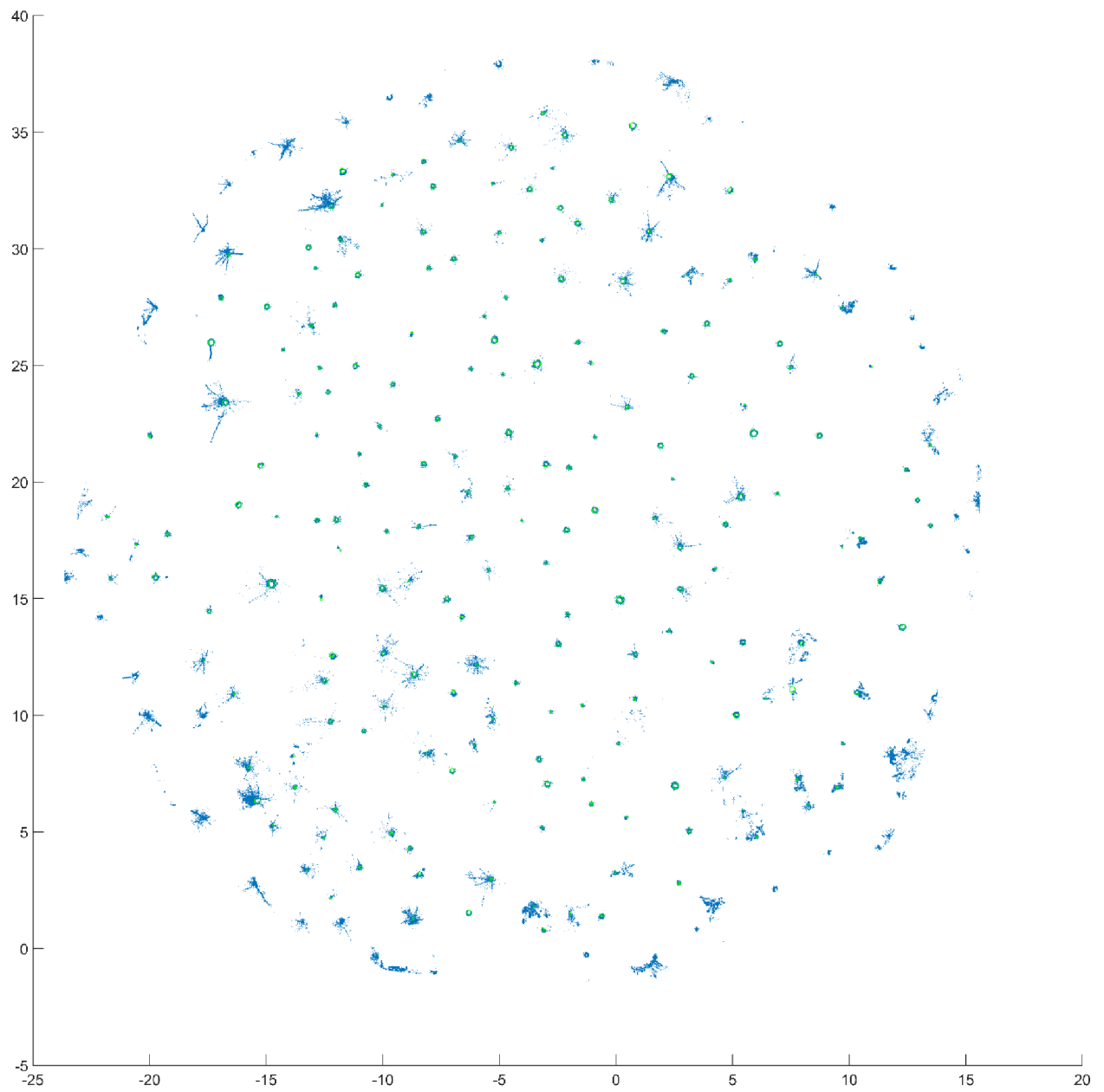




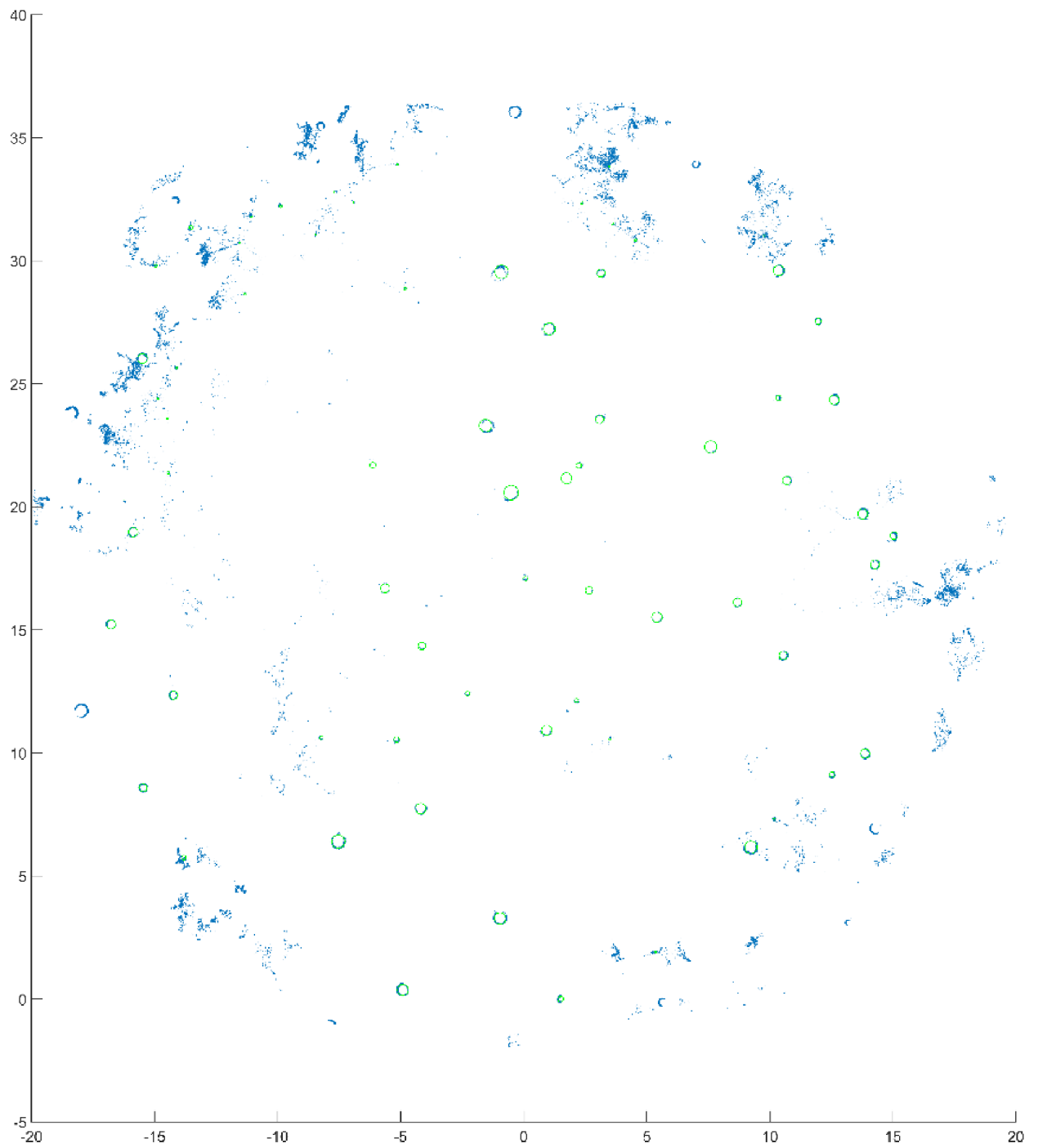
Příloha 5: Automatická detekce stromů P3T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom



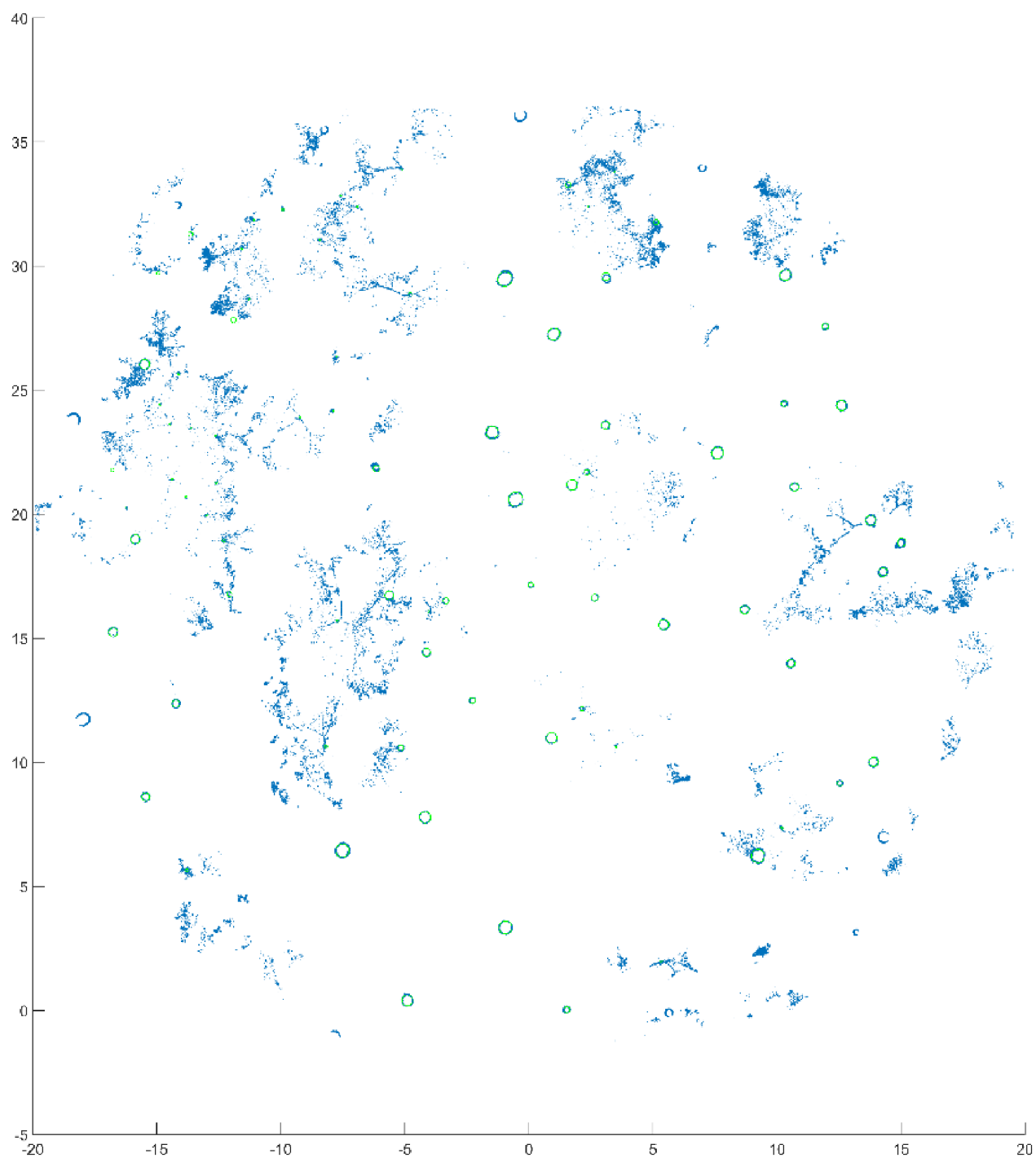
Příloha 6: Automatická detekce stromů P3T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom



Příloha 7: Automatická detekce stromů P4T1, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom



Příloha 8: Automatická detekce stromů P4T6, modře bodové mračno, zeleně detekovaný strom



## Příloha 9: Rskript na úpravu tabulek a označení validačních a porovnávacích dat

```
> vdata=P1vdata [,c("id","x", "y", "dbh")]
> Pdata=P1T1_dbh [,c("id","x", "y", "dbh")]
```

## Příloha 10: Rskript porovnání dat ze dvou datových souborů na základě souřadnic

```
> # spočítání maximálního rozdílu
> max_diff <- 1
>
> # vytvoření prázdné tabulky pro výsledky
> merged_table <- data.frame(id_vdata = numeric(),
+                             x_vdata = numeric(), y_vdata = numeric(), dbh_vdata = numeric(),
+                             id_pdata = numeric(), x_pdata = numeric(), y_pdata = numeric(), dbh_pdata = numeric())
>
> # Projdi datový soubor vdata
> for (i in 1:nrow(vdata)) {
+
+   # najde nejbližší podle euklidovské vzdálenosti
+   min_index = which.min(sqrt((pdata$x - vdata$x[i])^2 + (pdata$y - vdata$y[i])^2))
+
+   # Pokud byl nalezen nejbližší bod, přidej ho do výsledné tabulky
+   #if (min_index > 0) {
+   merged_table <- rbind(merged_table, c(vdata[j, "id"],
+                                         vdata[i, "x"], vdata[i, "y"], vdata[i, "dbh"],
+                                         Pdata[min_index, "id"], Pdata[min_index, "x"], Pdata[min_index, "y"], Pdata[min_index, "dbh"]))
+   }
+ }
>
> # Nastav správné názvy sloupců
> colnames(merged_table) <- c("id_vdata", "x_vdata", "y_vdata", "dbh_vdata", "id_pdata", "x_pdata", "y_pdata", "dbh_pdata")
>
>
> # vypočet vzdálenosti
> merged_table$distance = sqrt((merged_table$x_vdata-merged_table$x_pdata)^2+(merged_table$y_vdata-merged_table$y_pdata)^2)
>
> merged_table = merged_table %>%
+   group_by(id_pdata) %>%
+   # mutate(rank = row_number(distance)) %>%
+   #filter(rank == 1 | duplicated(id_pdata)) %>%
+   #select(-rank) %>%
+   mutate(id_pdata = ifelse(distance == min(distance), id_pdata, NA)) %>%
+   mutate(x_pdata = ifelse(distance == min(distance), x_pdata, NA)) %>%
+   mutate(y_pdata = ifelse(distance == min(distance), y_pdata, NA)) %>%
+   ungroup()
>
>
> Pdata$distance = NA
>
> # Projdi záznamy v Pdata, které ještě nebyly zpracovány
> for (j in 1:nrow(Pdata)) {
+   if (!(Pdata[j, "id"] %in% merged_table$id_pdata)) {
+     merged_table <- rbind(merged_table, c(NA, NA, NA, NA,
+                                           Pdata[j, "id"], Pdata[j, "x"], Pdata[j, "y"], Pdata[j, "dbh"]))
+   }
+ }
1
```

## Příloha 11: Rskript detekce stromů

```
> #detekce počet
>
>
> # Spočítá počet vyplněných polí ve sloupci id_vdata
> count_id_vdata <- sum(!is.na(merged_table$id_vdata))
>
> # vybere pouze řádky, kde je sloupec id_vdata vyplněn
> filtered_merged_table <- merged_table[!is.na(merged_table$id_vdata), ]
>
>
> # spočítá počet vyplněných polí ve sloupci id_pdata pouze v řádcích, kde se vyskytuje hodnota v sloupci id_vdata
> count_id_pdata <- sum(!is.na(filtered_merged_table$id_pdata))
>
> # výpis výsledků
> print(paste("Počet vyplněných polí ve sloupci id_vdata:", count_id_vdata))
[1] "Počet vyplněných polí ve sloupci id_vdata: 184"
> print(paste("Počet vyplněných polí ve sloupci id_pdata v řádcích s vyplněným id_vdata:", count_id_pdata))
[1] "Počet vyplněných polí ve sloupci id_pdata v řádcích s vyplněným id_vdata: 151"
>
> detekce <- count_id_pdata / count_id_vdata
> detekce
[1] 0.8206522
```

## Příloha 12: Rskript zjištění kruhové základny detekovaných stromů

```
> #detekce kruhová základna
>
> # vypočítá kruhovou základnu pro sloupec dbh_vdata pouze pro řádky, kde se ve sloupci id_vdata vyskytují hodnoty
> circular_base_vdata <- vdata %>%
+   filter(!is.na(id)) %>%
+   mutate(circular_base_vdata = (dbh/2/100)^2 * pi) %>%
+   summarize(total_circular_base_vdata = sum(circular_base_vdata)) %>%
+   pull()
>
> # vypočítá kruhovou základnu pro sloupec dbh_pdata pouze pro řádky, kde se ve sloupcích id_vdata a id_pdata vyskytují hodnoty
> circular_base_pdata <- merged_table %>%
+   filter(!is.na(id_vdata) & !is.na(id_pdata)) %>%
+   mutate(circular_base_pdata = (dbh_pdata/2/100)^2 * pi) %>%
+   summarize(total_circular_base_pdata = sum(circular_base_pdata)) %>%
+   pull()
>
> # výpis výsledků
> print(paste("Celková kruhová základna pro sloupec dbh_vdata:", circular_base_vdata))
[1] "Celková kruhová základna pro sloupec dbh_vdata: 3.35232833259811"
> print(paste("Celková kruhová základna pro sloupec dbh_pdata:", circular_base_pdata))
[1] "Celková kruhová základna pro sloupec dbh_pdata: 3.20635999764431"
>
>
> KZ=circular_base_pdata/circular_base_vdata
> KZ
[1] 0.9564576
> |
```

## Příloha 13: Rskript zjištění kruhové základny všech stromů na ploše

```
> # výpočet hodnoty pro každý řádek
> celkzk <- (pdata$dbh/2/100)^2*pi
>
> # výpočet celkové sumy nového sloupce
> celkova_suma <- sum(celkzk)
>
> # výpis výsledku
> print(celkova_suma)
[1] 3.313475
> |
```

## Příloha 14: Rskript výpočtu aritmetického průměru (ME) a kvadratické chyby (RMSE)

```
> #MEDBH
>
> # vyfiltrovaní řádků, kde jsou hodnoty v obou sloupcích id_vdata a id_pdata
> Medbh <- merged_table[!is.na(merged_table$id_vdata) & !is.na(merged_table$id_pdata), ]
>
> # výpočet chyb
> Medbh$chyba <- Medbh$dbh_pdata - Medbh$dbh_vdata
>
> # výpočet aritmetického průměru chyb
> ME <- mean(Medbh$chyba)
> ME
[1] -0.1413718
>
> #write.csv(Medbh, "dbh_Data", row.names = FALSE)
>
> #RMSE
> RMSE=sqrt(mean(Medbh$chyba^2))
> RMSE
[1] 2.586875
> |
```

## Příloha 15: Rskript výpočtu KZ pro Vdata pro shodné stromy s Pdaty

```
> # Detekce kruhová základna
>
> # vyfiltrujeme merged_table tak, aby obsahovala pouze řádky, které mají platné hodnoty v id_pdata
a zároveň mají odpovídající id_vdata v vdata
> filtered_merged_table <- merged_table %>%
+   filter(!is.na(id_vdata) & !is.na(id_pdata) & id_vdata %in% vdata$id)
>
> # vypočítá kruhovou základnu pro sloupec dbh_vdata pouze pro vyfiltrované řádky merged_table
> circular_base_vdata <- filtered_merged_table %>%
+   mutate(circular_base_vdata = (dbh_vdata/2/100)^2 * pi) %>%
+   summarize(total_circular_base_vdata = sum(circular_base_vdata)) %>%
+   pull()
>
> # Zobrazí výsledek
> circular_base_vdata
[1] 4.602085
```