

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra hospodářské úpravy lesů



Fakulta lesnická
a dřevařská

Ověření dendrometrických veličin trvalých zkusných
ploch pomocí dat laserového skenování

Diplomová práce

Autor: Bc. Tomáš Zamec
Vedoucí práce: Ing. Karel Kuželka, Ph.D.

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tomáš Zamec

Lesní inženýrství

Lesní inženýrství

Název práce

Ověření dendrometrických veličin trvalých zkusných ploch pomocí dat laserového skenování

Název anglicky

Verification of mensurational parameters acquired on permanent sample plots using LiDAR data

Cíle práce

Získat data z laserového skenování pro sadu trvalých zkusných ploch (TZP).

Identifikovat v datech jednotlivé stromy a zjistit jejich parametry.

Ověřit přesnost dendrometrických údajů TZP pomocí výstupů z analýzy dat laserového skenování.

Metodika

V součinnosti s katedrou HÚL budou získána 3D bodová mračna pomocí pozemních metod laserového skenování na trvalých zkusných plochách.

Na zkusných plochách budou sebrána pozemní data pomocí klasických dendrometrických metod (tloušťka, výška, pozice).

Bodová mračna budou zpracována pomocí dostupných nástrojů; budou detekovány jednotlivé stromy a zjištěny jejich parametry.

Údaje zjištěné klasickými dendrometrickými metodami budou ověřeny pomocí dat z laserového skenování a zjištěné rozdíly statisticky vyhodnoceny.

Harmonogram prací:

LS 2020/2021: Vytipování ploch, sběr pozemních dat, sběr LiDAR dat.

ZS 2021/2022: Detekce jednotlivých stromů, zjištění pozic a parametrů.

LS 2021/2022: Statistické zpracování, vyhodnocení.

Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

LiDAR, bodová mračna, trvalé zkušné plochy, dendrometrie, pozice

Doporučené zdroje informací

- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., & Lejeune, P. (2016). Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 7(6)
- 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.
- Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63–77.
- Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., & Danson, F. M. (2016). Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement. *Current Forestry Reports*, 2(3), 214–214.
- Olofsson, K., Holmgren, J., & Olsson, H. (2014). Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sensing*, 6(5), 4323–4344.
- SUROVÝ, P. – KUŽELKA, K. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA. *Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-3008-5.
- Trochta, J., Kruček, M., Vrška, T., & Kraňal, K. (2017). 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS ONE*, 12(5), 1–17.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Karel Kuželka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra hospodářské úpravy lesů

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2022

doc. Ing. Peter Surový, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Ověření dendrometrických veličin trvalých zkusných ploch pomocí dat laserového skenování vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Kuželky, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 8. 4. 2022

.....

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Karlu Kuželkovi, Ph.D. za konzultace k této práci a odborné vedení. Díky patří také kolegům z Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů v Brandýse nad Labem za vstřícnost a poskytnutá data. V neposlední řadě chci poděkovat mé rodině a blízkým za podporu, především pak manželce za obrovskou míru trpělivosti.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá principy laserového skenování a příklady jeho aplikace v lesnictví. V praktické části je ověřena přesnost dendrometrických veličin na vybraných trvalých zkušných plochách (TZP) pomocí ručního skeneru GeoSLAM ZEB-HORIZON. Na vybraných plochách mají dominantní zastoupení jehličnaté dřeviny *Picea abies*, nebo *Pinus sylvestris*. Segmentací stromů z bodových mračen byly získány dendrometrické veličiny pozice, výčetní tloušťka a výška jednotlivých stromů. Data z bodových mračen byla použita k ověření přesnosti manuálního sběru dat na TZP.

Střední kvadratická chyba RMSE při nejpřesnějším ověření pozic stromů dosahovala hodnoty 0,21 m. Při ověření výčetní tloušťky dochází k systematickému podhodnocení u ručního laserového skenování s průměrnou chybou -1,19 cm. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,58 cm. Lineární model neodhalil závislost mezi velikostí chyby a výčetní tloušťkou. Při porovnání měření výšek vychází průměrná chyba 4 cm a střední kvadratická chyba RMSE 1,36 m. Lineární model neodhalil závislost mezi velikostí chyby a výškou stromu.

Vyhodnocením odchylek bylo zjištěno, že měření na TZP pomocí klasických manuálních metod probíhá s dostatečnou přesností, potřebnou pro vyhodnocení produkčního výzkumu a odvození růstových trendů. Mobilní laserové skenování však umožňuje efektivnější a přesnější měření výšek a pozic stromů. Proto by se měla této technologii věnovat další pozornost k většímu uplatnění při inventarizaci lesa.

Klíčová slova: LiDAR, dendrometrie, trvalé zkušné plochy, detekce stromů, inventarizace lesa

Abstract

This diploma thesis presents laser scanning principles and examples of its application in forestry. The use of technology for verification of mensurational parameters acquired on permanent sample plots is investigated in practical part. Personal laser scanning (PLS) device GeoSLAM ZEB-HORIZON was used for data acquisition. The dominant tree species in the selected sample plots are *Picea abies* or *Pinus sylvestris*. With individual tree detection approach, tree location, diameter at breast height (DBH) and tree height were extracted from point clouds and used for data verification collected manually from permanent plots.

The root mean square error (RMSE) of the best tree location measurement was 0.21 m. DBH estimation from PLS showed systematic underestimation with mean deviation -1.19 cm and the RMSE was 1.58 cm. Values of the deviations showed no relationship with the reference diameters. Tree height estimation was acquired with mean deviation of 4 cm and the RMSE was 1.36 m. Values of the deviations showed no relationship with the reference height.

It was found that the measurement at sample plots using manual methods takes place with sufficient accuracy, necessary for the evaluation of production research and derived growth trends. However, mobile laser scanning provides more efficient and accurate measurement of tree heights and positions. Therefore, the technology should receive further attention to greater application in forest inventory.

Keywords: LiDAR, dendrometry, permanent sample plots, tree detection, forest inventory

Seznam obrázků

Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření a jeho využití v dálkovém průzkumu Země	17
Obrázek 2: Koncept aplikace DPZ.....	18
Obrázek 3: Rozdílné vlastností šíření světla žárovky, LED diody a laseru	23
Obrázek 4: Vizualizace rekursivního dělení krychle do oktantů.....	32
Obrázek 5: Proložení naskenovaných bodů kruhem, pomocí metody největší vzdálenosti.	34
Obrázek 6: Proložení bodů kruhem, metodou minimal bounding box.	34
Obrázek 7: Extrakce a vizualizace parametrů stromu v 3D Forest.....	35
Obrázek 8: ZEB-Horizon při skenování trvalé zkušné plochy.....	38
Obrázek 9: Trajektorie skenování na TZP 500301	39
Obrázek 10: Zpracované bodové mračno trvalé zkušné plochy 500316 s vysegmentovanými stromy a klasifikovaným terénem.....	41
Obrázek 11: Výřez kmene z bodového mračna ve výčetní tloušťce s dobře rozpoznatelným šumem laserového skeneru	55

Seznam grafů

Graf 1: Vzdálenosti odpovídajících stromů na ploše 500301	44
Graf 2: Zobrazení pozic stromů dle MLS a FieldMapu s popiskem ID stromu	45
Graf 3: Vzdálenosti odpovídajících stromů na ploše 500316	46
Graf 4: Zobrazení pozic stromů dle MLS a FieldMapu s popiskem ID stromu	47
Graf 5: Vzdálenosti odpovídajících stromů na ploše 500318	48
Graf 6: Zobrazení pozic stromů dle MLS a FieldMapu s popiskem ID stromu.....	49
Graf 7: Vztah mezi rozdíly ve výčetních tloušťkách odpovídajících si stromů z MLS - TZP a výčetní tloušťkou (DBH). Červeně regresní přímka.....	50
Graf 8: Rozdíly ve výčetních tloušťkách odpovídajících si stromů z MLS - TZP na jednotlivých plochách	51
Graf 9: Vztah mezi rozdíly ve výčetních tloušťkách odpovídajících si stromů z MLS - TZP a výčetní tloušťkou (DBH). Červeně regresní přímka.....	52
Graf 10: Rozdíly ve výškách odpovídajících si stromů z MLS - TZP na jednotlivých plochách.....	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Postup při segmentaci stromů z bodového mračka	42
---	----

Seznam použitých zkratk

CHM	Canopy Height Model
DBH	Diameter at Breast Height
DPZ	Dálkový průzkum Země
MLS	Mobile Laser Scanning
RMSE	Root Mean Square Error
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TZP	Trvalé zkušné plochy

Obsah

1. Úvod.....	13
2. Cíl práce.....	15
3. Rozbor problematiky	16
3.1. Dálkový průzkum Země.....	16
3.2. Elektromagnetické záření.....	17
3.3. Sběr dat pomocí DPZ.....	18
3.3.1. Spektrální rozlišení.....	19
3.3.2. Prostorové rozlišení.....	19
3.3.3. Časové rozlišení.....	20
3.3.4. Radiometrické rozlišení	20
3.3.5. Pasivní a aktivní senzory.....	21
3.3.6. Získání prostorových informací	21
3.4. Laserové skenování	21
3.4.1. Princip a konstrukce laseru	22
3.4.2. Měření pomocí laseru.....	23
3.4.3. Součásti laserových systémů	25
3.5. Druhy laserového skenování dle způsobu sběru dat.....	26
3.5.1. Letecké laserové skenování.....	26
3.5.2. Laserové skenování pomocí bezpilotních letadel.....	27
3.5.3. Statické laserové skenování.....	27
3.5.4. Mobilní pozemní skenování.....	28
3.6. SLAM	28
3.7. Využití pozemního laserového skenování v lesnictví	29
3.7.1. Měření tloušťek.....	29
3.7.2. Sortimentace nástrojato.....	30

3.7.3. Měření výšek	30
3.7.4. Ekologie a dynamika lesa.....	30
3.7.5. Odhad indexu listové plochy.....	31
3.8. Zpracování bodových mračen	31
3.8.1. Digitální model terénu	32
3.8.2. Mapa korunových výšek.....	33
3.8.3. Detekce stromů	33
3.8.4. Pozice stromů.....	33
3.8.5. Výčetní tloušťka.....	33
3.8.6. Rozměry korun stromů	35
4. Metodika sběru a zpracování dat	36
4.1. Projekt TZP - trvalé zkusné plochy.....	36
4.2. Vybrané trvalé zkusné plochy.....	37
4.3. Laserové skenování trvalých zkusných ploch.....	38
4.4. Zpracování dat	39
5. Výsledky	43
5.1. Pozice stromů.....	44
5.1.1. Pozice stromů - plocha 500301	44
5.1.2. Pozice stromů - plocha 500316	46
5.1.3. Pozice stromů - plocha 500318	48
5.2. Výčetní tloušťky.....	50
5.2.1. Výčetní tloušťka - plocha 500301	50
5.2.2. Výčetní tloušťka - plocha 500316	51
5.2.3. Výčetní tloušťka - plocha 500318	51
5.3. Výšky.....	52
5.3.1. Výška - plocha 500301	52
5.3.2. Výška - plocha 500316.....	53

5.3.3. Výška - plocha 500318	53
6. Diskuse	54
7. Závěr	57
8. Seznam literatury a použitých zdrojů.....	58

1. Úvod

Trvalé zkusné plochy poskytují unikátní časovou řadu vývoje dendrometrických veličin pro hlavní hospodářské dřeviny. Nejstarší, stále aktivní plochy byly založeny v roce 1964. Tyto plochy tak ještě byly měřeny pomocí analogových přístrojů a zaznamenávány na papírové zápisníky. Technologický vývoj je však neminul a všechny zápisníky byly digitalizovány a naskenovány k uchování původní informace. Analogové přístroje nahradily digitální. Digitální průměrka, laserový měřicí přístroj/výškoměr, odolný tablet a GPS zařízení dnes patří mezi tradiční vybavení používané pro měření lesů. S rozvojem technologií se nejenom zvyšuje přesnost měření, ale také se objevují možnosti efektivnějšího záznamu dalších veličin. Např. s výše zmíněnou sestavou přístrojů lze během několika hodin přiřadit všem stromům na zkusné ploše GPS souřadnici a určit tak jejich přesnou polohu. Technologický vývoj neustále pokračuje a dnes je k dispozici celá řada dalších možností, jak přesně a efektivně měřit les.

Jednou z takových technologií je LiDAR (Light Detection and Ranging), která využívá k určení vzdálenosti laserový paprsek a dobu jeho letu od vyslání paprsku po detekci jeho odrazu. Pomocí skenovací jednotky umožňuje vytvořit prostorová 3D mračna, která dokáží zachytit v různém detailu prostorovou strukturu lesa. Prvním, veřejnosti známějším, použitím této technologie je naskenování povrchu Měsíce na misi Apollo 15 v roce 1971. Od té doby prošly laserové měřicí přístroje určitým vývojem a stávají se postupně více dostupnými. Dnes už jsou k dispozici kompaktní ruční laserové skenery a lidarem disponují už i některé modely chytrých telefonů. Určit výčetní tloušťku a výšku stromu už lze i pomocí chytrého telefonu.

Pro svou přesnost a časovou efektivnost sběru dat byla technologie laserového skenování zvolena k ověření dendrometrických veličin na trvalých zkusných plochách, které jsou měřeny klasickou metodou. K provedení laserového skenování byla vybrána metoda pozemní, která díky vysokému prostorovému rozlišení dokáže zachytit detailní strukturu na úrovni jednotlivých stromů i na úrovni nižší, tedy jednotlivých částí stromu. Skenování bylo realizováno ručním

skenerem GeoSLAM ZEB Horizon, který doplňuje technologii lidarů implementací algoritmu SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), pod čímž si lze představit pojem sebelokalizace. Příklad tak není závislý na dostupnosti GNSS signálu a nedochází k nepřesnostem měření způsobeným slabým signálem pod korunovým zápojem.

K ověření dendrometrických veličin byly vybrány 3 zkušební plochy v přírodní lesní oblasti Karlovarská vrchovina, ve kterých dominují jehličnaté dřeviny *Picea abies* a *Pinus sylvestris*.

2. Cíl práce

Cílem této práce je ověření dendrometrických veličin z projektu trvalých zkusných ploch (TZP) pomocí dat laserového skenování. V terénu bude realizován sběr dat pomocí klasických dendrometrických metod na vybraných plochách. Šetřené veličiny jsou tloušťka, výška a pozice stromu. Ve spolupráci s katedrou HÚL budou získána 3D bodová mračna vybraných ploch. Na základě identifikace jednotlivých stromů a určení jejich parametrů bude ověřena přesnost dendrometrických údajů z TZP.

3. Rozbor problematiky

3.1. Dálkový průzkum Země

Sběr dat pomocí laserového skenování spadá do vědeckého oboru Dálkový průzkum Země (DPZ). V mezinárodní literatuře je dálkový průzkum znám jako remote sensing. Tento pojem zahrnuje širokou škálu technik pro získávání informací o objektech či jevech pomocí různých zařízení, která nejsou v přímém kontaktu s předměty pozorování (Halounová 2008). Vychází z principu, že všechny objekty reagují s dopadajícím elektromagnetickým zářením. Dochází k jeho odrazu, pohlcení, rozptylu a lomu (Campbell 2011). Jak moc je záření odráženo a změněno objektem závisí na vlastnostech jeho povrchu, kterými jsou např. velikost, chemické složení nebo orientace (Jackson 1991). Např. rostlina má jinou spektrální charakteristiku (změnu odrazivosti světla) než skála ve stejném prostředí. Vliv na toto záření mají všechny objekty, s nimiž se setká, tedy např. i částice atmosféry. Úkolem DPZ je detekovat a změřit odražené světlo a na základě jeho vlastností určit hledané vlastnosti skenovaných objektů (Campbell 2011).

Při zpracování výstupů DPZ jsou extrahovány dva druhy informací – prostorová a obsahová (Halounová 2008). Prostorová (geometrická) informace poskytuje znalosti např. o velikosti, tvaru a poloze objektů. Prostorové informace poskytuje především obor fotogrammetrie a metoda laserového skenování (Surový 2019). Druhou informací je informace obsahová, která vyjadřuje, co daný objekt ve skutečnosti znamená. K získání obsahové informace jsou využívány multispektrální a hyperspektrální snímky (Halounová 2008).

DPZ se řadí mezi geoinformační technologie, předmětem sledování je tedy zemský povrch. To jej předurčuje k širokému využití v oborech jako geologie, geografie a obecně v přírodovědných oborech k monitoringu přírodních zdrojů. Pomocí opakovaného skenování můžeme monitorovat také změny v čase, které na zemském povrchu probíhají (Halounová 2008).

3.2. Elektromagnetické záření

V dálkovém průzkumu je nositelem informace elektromagnetické záření. Na to lze nahlížet jako na vlnu, charakterizovanou rychlostí šíření (rychlost světla ve vakuu) a vlnovou délkou λ (vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají ve fázi). Zároveň jde o proud částic – fotonů s určitou energií E . Vztah mezi nimi vyjadřují rovnice:

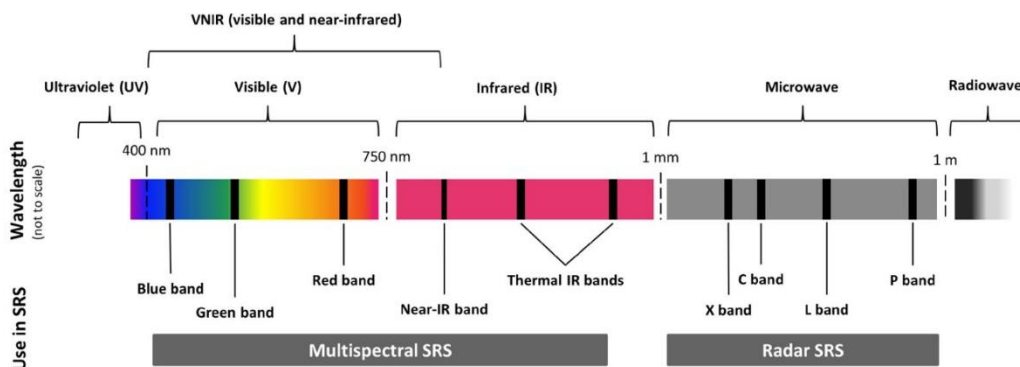
$$\lambda = \frac{c}{f} [m]$$

kde c je rychlost světla, přibližně $2,998 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a f je frekvence [Hz]

$$E = h \cdot f [J]$$

kde h je Planckova konstanta rovna hodnotě $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

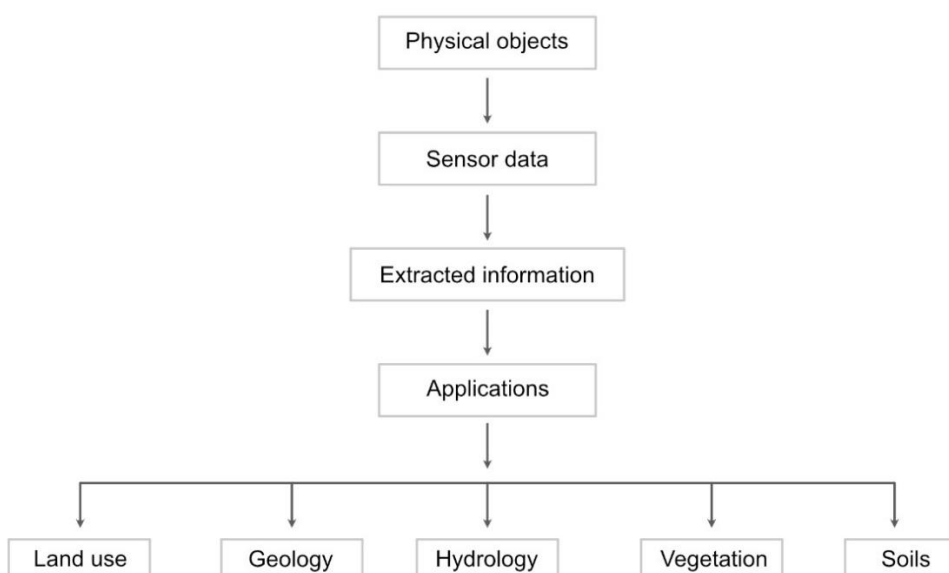
Podle vlnové délky se rozděluje elektromagnetické záření do stupnice, tzv. elektromagnetického spektra. Lidský zrak je schopný pozorovat elektromagnetické záření v rozsahu 400 nm – 750 nm. Tento rozsah je nazýván viditelné spektrum nebo také jednoduše světlo. Senzory využívané v DPZ jsou schopny zachytit mnohem širší spektrum záření. Kromě viditelného světla detekují i delší vlny infračerveného spektra (70 nm – 1 mm), mikrovlny (1 mm – 1 m) a rádiové vlny (delší než 1 m). Kratší vlny ultra červeného spektra se v DPZ nepoužívají, kvůli jejich silnému rozptýlení atmosférou (Campbell 2011).



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření a jeho využití v dálkovém průzkumu Země.

3.3. Sběr dat pomocí DPZ

Pro praktické uplatnění dálkového průzkumu Země a ucelené pochopení problematiky je potřeba při zpracování dat uvažovat v širších souvislostech. Předmětem zkoumání jsou hmotné objekty a prostředí, jako např. budovy, vegetace, půda, vodní plochy. Znalosti o nich lze nalézt v oborech jako geologie, lesnictví, krajinářství a mnohých dalších, které zkoumají různé části zemského povrchu (Campbell 2011). Data z dálkového průzkumu jsou pořizována, pokud monitorovací přístroj (fotoaparát, radar...) detekuje objekt zaznamenáním elektromagnetického záření, které odráží, nebo vyzařuje. Ale pouze pomocí správné analýzy a interpretace lze převést zaznamenaná data na informaci, která může být použita k řešení praktického problému. Data mohou být různě interpretována. Záleží, za jakým účelem šetření provádíme. Nad jedním snímkem lze provést analýzu k zjištění informací např. o půdě, ale také o vodních tocích nebo využití krajiny (Campbell 2011). Při praktickém uplatnění mohou být zjištěné informace kombinovány s dalšími zdroji dat. Např. v Národní inventarizaci lesů je terénní šetření doplněno o analýzu fotogrammetrických snímků a stereoskopické šetření leteckých snímků v infračerveném spektru (Kučera 2019).



Obrázek 2: Koncept aplikace DPZ.

(Campbell 2011)

Data z DPZ lze rozdělit podle výsledku měření na obrazová data a data neobrazová, jejichž výstupem je jednorozměrná veličina. Jiným hlediskem může být druh záznamu, kdy rozlišujeme data analogová, která jsou zaznamenávána na filmový materiál a data digitální, pořizována přímo v číselné podobě (Halounová 2008). Sběr dat DPZ lze uskutečnit z mnoha druhů nosičů. Podle jejich pozice lze rozlišovat pozemní sběr dat a sběr dat z létajících prostředků (družice, letadla, bezpilotní letadla). Pomocí těchto prostředků lze získat data optická (fotografie, multispektrální nebo hyperspektrální snímky) i data z laserového skenování (Surový 2019).

Porozumění a interpretace snímků z dálkového průzkumu je omezena mírou detailu, s kterým jsou data pořizována. Schopnost optického nástroje zajistit rozpoznatelnost objektu je dána rozlišením snímku. V dálkovém průzkumu existují čtyři druhy rozlišení (Surový 2019).

3.3.1. Spektrální rozlišení

Ve studiích dálkového průzkumu bývá klíčové vytvoření vztahu mezi množstvím odražené/vyzárené elektromagnetické energie v určitých pásmech vlnové délky ze zkoumaného objektu a jeho chemickými a materiálními vlastnostmi. Spektrální rozlišení je rozsah vlnových délek v elektromagnetickém spektru, vůči kterým je senzor přístroje citlivý (dokáže je zaznamenat) (Jensen 2014). Jde tedy o schopnost senzoru rozlišit odrazivost objektů v prostoru vlnové délky. Čím větší je spektrální rozlišení, tím větší je šance rozlišit povrchové objekty (Surový 2019). Campbell (2011), popisuje spektrální rozlišení takto: Běžnou mluvou bychom mohli říct, že hledáme rozdíly v „barvách“ objektů, i když dálkový průzkum většinou probíhá mimo viditelné spektrum, kde barvy v tradičním slova smyslu neexistují.

3.3.2. Prostorové rozlišení

Většina průzkumů DPZ určuje prostorové vlastnosti (pozice, velikost) snímaných objektů. Ke každému pixelu digitálního snímku je přidružena konkrétní souřadnice na povrchu. Prostorová informace sdružená s jednotlivými pixely má velký význam, kdy při převodu na běžné mapové zobrazení umožňuje využití odvozených informací s dalšími prostorovými podklady v geoinformačních systémech (Jensen 2014).

Prostorové rozlišení představuje velikost nejmenšího možného objektu, který lze identifikovat. Je dáno vlastnostmi senzoru, konkrétně velikostí pixelu, a také výškou nad snímaným povrchem. Čím menší je velikost pixelu, tím větší je detail a prostorové rozlišení (Surový 2019). Je třeba si uvědomit, že krajina se obecně velmi liší ve své prostorové spletnosti. Jednotvárná území mohou být dobře reprezentována i hrubší úrovní detailu, zatímco jiná ke správnému určení jejich zásadních vlastností vyžadují co možná nejjemnější rozlišení (Campbell 2011).

3.3.3. Časové rozlišení

Dálkový průzkum umožňuje zaznamenat stav zemského povrchu v určitém okamžiku. Opakovaný záznam určitého území získaný v čase může identifikovat procesy a změny povrchu a přispět tak k odhadu dalšího vývoje (Jensen 2014). S nástupem družicových systémů se naplno projevila hodnota časového rozlišení. S možností systematicky pozorovat stejné území, stejným senzorem dálkového průzkumu a v porovnatelných podmínkách, tyto systémy poskytují široké využití dat dálkového průzkumu v časových řadách (Campbell 2011). Dle Surový (2019), lze časové rozlišení kategorizovat:

Vysoké časové rozlišení: <24 hodin až 3 dny

Střední časové rozlišení: 4 až 16 dnů

Nízké časové rozlišení: více než 16 dnů

Požadavky na různé druhy rozlišení jsou často určitým kompromisem. Obecně, čím častěji chceme skenovat (vysoké časové rozlišení), tím nižší bude prostorové rozlišení. Například při monitorování hurikánů je potřeba vysoké časové rozlišení – každou půl hodinu, ale prostorové rozlišení je velmi nízké. Jeden pixel odpovídá území o velikosti několika čtverečních kilometrů (Jensen 2014).

3.3.4. Radiometrické rozlišení

Radiometrické rozlišení má vliv na to, jak přesně dokážeme zaznamenat elektromagnetické záření. Týká se v podstatě bitové hloubky, tj. kolik bitů v jednotlivých pixelech je použito na záznam dat. S větší bitovou hloubkou jsme schopni zaznamenat a rozlišit více hodnot pro úroveň intenzity záření. Do

jednoho bitu lze zapsat pouze dvě hodnoty, a to buď 0 nebo 1 („svítí/nesvítí“). S 8 bity je možné v každém pixelu zapsat 256 různých hodnot, u 16 bitů se jedná o 65 536 hodnot v každém pixelu. S větší bitovou hloubkou, a tím pádem přesnějším záznamem, roste velikost souboru (Surový 2019).

3.3.5. Pasivní a aktivní senzory

Dle zdroje elektromagnetického záření lze rozdělit senzory DPZ na pasivní a aktivní. Pasivní senzory zaznamenávají elektromagnetické záření, které je odraženo nebo vyzařováno samotnými objekty snímání. Zdrojem je především Slunce, resp. zemský povrch, od kterého se sluneční záření odráží. Mezi pasivní senzory řadíme např. fotoaparáty, videokamery a multispektrální senzory. Součástí aktivních systémů je i zdroj záření, jehož odraz od povrchu je zaznamenáván. Mezi aktivní senzory patří RADAR (vyzařuje rádiové vlny), LIDAR (laserové záření) a SONAR (vyzařuje zvukové vlny). Kromě toho lze rozlišit způsob záznamu na analogový a digitální (Jensen 2014).

3.3.6. Získání prostorových informací

Jeden z oborů DPZ, který se zabývá zpracováním prostorových informací o objektech na zemském povrchu, je fotogrammetrie. Z fotografických snímků detekuje polohu objektů, které jsou na snímcích zachyceny. Dále se zabývá také určením jejich rozměrů a tvarů. Pomocí techniky Structure from Motion lze z dvourozměrných fotografií automatizovaně rekonstruovat trojrozměrné objekty. Vzniklá fotogrammetrická mračna nesou informaci jak o prostorové struktuře, tak i o struktuře spektrální, kterou jednotlivé body přebírají z barvy odpovídajícího pixelu zdrojové fotografie (Surový 2019). Mezi hlavní výstupy fotogrammetrie patří digitální model terénu (DTM), digitální model povrchu (DSM), ortofotografie, 2D a 3D rekonstrukce objektů a různé další vizualizace. Prostorové informace lze získat také pomocí laserového skenování, které je v principu dost odlišné (Baltsavias 1999).

3.4. Laserové skenování

Laserové skenování je technologie, která měří vzdálenosti s využitím laserového paprsku. Je známá také pod názvem lidar (z angl. Light Detection and Ranging) a jelikož disponuje vlastním zdrojem záření – laserem, řadíme ji mezi systémy s aktivními senzory, což znamená, že tato technologie není

závislá na slunečním záření. K měření využívá porovnání vyslaného paprsku s jeho detekovaným odrazem od skenovaného objektu (Dolanský 2004).

3.4.1. Princip a konstrukce laseru

Laser je akronym z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze přeložit jako světlo zesilované stimulovanou emisí záření. Název přímo odkazuje na klíčovou roli stimulované emise, bez které by laserové světlo nevzniklo (Tarasov 1986). Skládá se ze tří základních částí:

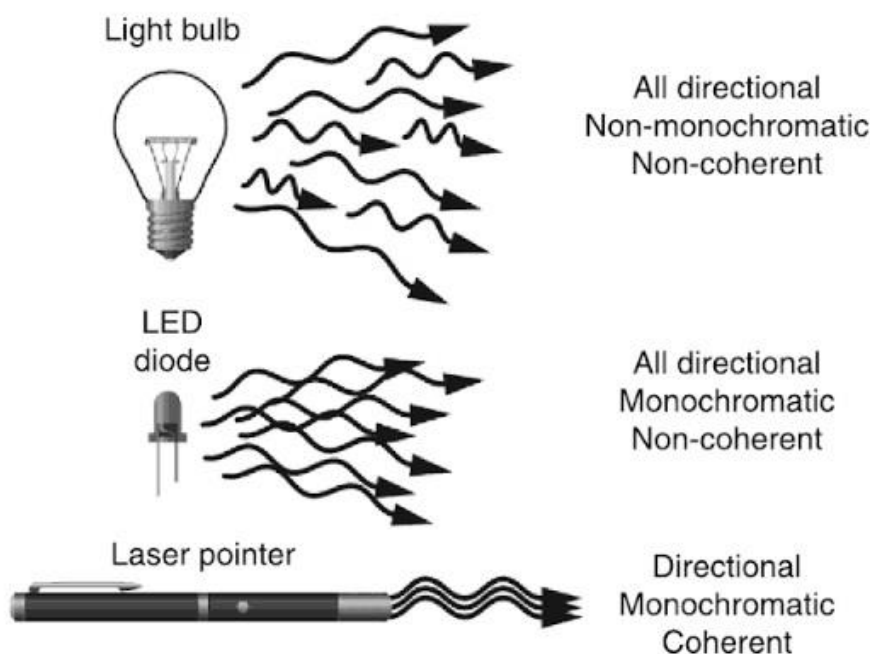
- Aktivní prostředí
- Budící element
- Optický rezonátor

Aktivní prostředí je látka libovolného skupenství obsahující atomy, iony nebo molekuly, které je možno vybudit na vyšší energetickou hodnotu. První prakticky funkční laser sestrojený Theodorem Maimanem v roce 1960 využíval jako aktivní médium rubínový krystal (Tarasov 1986). K tomu, aby mohlo dojít k vybudení aktivního prostředí, je zapotřebí vnějšího zdroje energie a budícího elementu. U Maimanova laseru jím byla výbojka, která spirálovitě obklopovala rubínový krystal (Vrbová 1994). Absorpcí zeleného a fialového světla z výbojky se elektrony aktivního média dostávají na vyšší energetickou hladinu. Téměř v okamžiku se atomy stabilizují na tzv. metastabilní hladině. Takto nabuzené elektrony tvoří inverzní populaci (Mills 1990). Některé elektrony v nabuzeném stavu mají tendenci se nahodile vracet do stavu původního. Během tohoto poklesu je uvolněn foton – spontánní emise. Pokud tento spontánní foton narazí na nabuzený elektron, opět dojde u elektronu k poklesu na základní energetickou hladinu a uvolnění dalšího fotonu. Tento uvolněný foton však má stejnou energii, směr a fázi jako foton, který ho stimuloval – stimulovaná emise (Jelínková 2013). Dosažení dostatečného množství fotonů putujících stejným směrem zajišťuje optický rezonátor. Optický rezonátor se skládá ze dvou planoparalelních zrcadel, mezi jež je umístěno aktivní prostředí takovým způsobem, aby jeho podélná osa koincidovala s optickou osou rezonátoru. Fotony, šířící se ve směru optické osy, se od zrcadla odrazí a znovu prochází aktivním prostředím. Během tohoto průchodu opět reagují s elektrony v

nabuzeném stavu a stimulují tak další fotony, mající stejný směr. Jedno ze zrcadel je totálně odrazné, druhé částečně propustné, umožňující výstup generovaného laserového záření (Vrbová 1994).

Takto vyprodukované světlo má své specifika:

- Nízká divergence – laserový paprsek je vysoce soustředován do určitého směru a i na velké vzdálenosti vykazuje minimální rozptyl
- Monochromaticnost – vyzářené fotony mají stejnou vlnovou délku
- Vysoká koherence – jednotlivé elektromagnetické vlny laserového světla se šíří prostorem o stejné frekvenci. Jejich fázový rozdíl se nemění.



Obrázek 3: Rozdílné vlastnosti šíření světla u žárovky, LED diody a laseru.

(Jelínková 2013)

3.4.2. Měření pomocí laseru

V současném laserovém skenování se používají dvě techniky na měření vzdálenosti. Pulzní lasery určují vzdálenost pomocí změření času mezi vysláním krátkého pulzu světla a detekováním jeho zpětného odrazu. Změřena je tedy doba letu pulzu – tranzitní čas (Wehr 1999).

Vzdálenost je pak vypočtena jako dráha, kterou urazí světlo za změřený čas:

$$R = \frac{1}{2} c \cdot t$$

kde R – měřená vzdálenost [m], mezi měřicí jednotkou a skenovaným objektem, c – rychlost šíření světla [$m \cdot s^{-1}$], t – celková doba letu pulzu [s]. Přesnost měření vzdálenosti přímo závisí na tom, jak přesně je skenovací jednotka schopna změřit tranzitní čas (Wehr 1999).

Druhou technologií je určení vzdálenosti pomocí fázového posunu. Laserová jednotka vyzařuje souvislý paprsek světla, který je zároveň modulován. Porovnáním referenční modulace s modulací detekovaného, odraženého světla, se určí počet celých vlnových délek na trase tam a zpět. Senzor dále porovná, v jaké fázi byl signál přijat a na základě délky vlny a fázového rozdílu vypočítá poslední část vzdálenosti (Surový 2019). Měření vzdálenosti porovnáním fází odeslané a přijaté vlny popisuje vzorec:

$$R = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{c}{f} \cdot \phi$$

kde R – měřená vzdálenost [m], ϕ – fázový posun detekované vlny, f – frekvence [Hz], c – rychlost šíření světla [$m \cdot s^{-1}$].

Porovnáním charakteristik vyslaného a detekovaného záření, ať už u pulzního nebo fázového laseru, lze získat informace o struktuře terénu a vegetace (Wehr 1999).

U pulzních laserů, vlivem skenovaného povrchu, může nastat situace, kdy laserový senzor detekuje více než jeden odraz z vyslaného pulsu. To zpravidla nastává při skenování porostu, kdy paprsek prostupuje korunami stromů, štěpí se a částečně odráží od listů, větví a povrchu země (Reutebuch 2005). V takových případech může senzor zachytit až 10 odrazů z jednoho pulsu. Množství odrazů ovlivňuje také velikost stopy laseru a úhel, pod kterým byl paprsek vyslán. Pulzní lasery jsou vhodné na venkovní měření, protože jsou schopny zjistit vzdálenost objektů i na stovky metrů (Surový 2019). Fázové lasery zachytí celkový průběh letu paprsku včetně intenzity (Wagner 2004). Mají ale kratší dosah, řádově v desítkách metrů. Na kratší vzdálenosti jsou ale

přesnější než pulzní. Hodí se proto ke skenování na kratší vzdálenosti, např. v budovách.

K zachycení struktury 3D povrchu jediným paprskem laseru je potřeba paprsky vychylovat (rozmítat) do všech směrů. Pro určení prostorové souřadnice bodu, odkud se paprsek odrazil, je proto potřeba kromě vzdálenosti přesně zaznamenat také horizontální a vertikální úhel, pod kterým byl paprsek vyslán (Surový 2019).

3.4.3. Součásti laserových systémů

Základním prvkem laserových systémů je laserová jednotka, která zajišťuje vyslání laserového paprsku, detekci odrazu a následné určení vzdálenosti. Laser i senzor pro detekci jsou umístěny na totožných optických osách, což zajišťuje, že skenovaný bod povrchu je vždy v zorném poli laserového senzoru (Wehr 1999).

Další součástí laserového systému je skenovací jednotka. Díky ní lze jediným paprskem laseru zachytit 3D strukturu povrchu. Jedná se o opticko-mechanickou součástku, která zvýší rozsah laseru tím, že vychýlí paprsek v určitém směru. U pozemních skenerů jde často o rotující zrcátko. Celkový úhel vychýlení definuje úhel záběru neboli zorné pole (Dolanský 2004).

Aby mohla být naskenovanému bodu přiřazena prostorová souřadnice, je potřeba znát v každém okamžiku měření přesnou pozici a orientaci laserové jednotky v souřadnicovém systému (Wehr 1999). Inerciální jednotka (IMU) měří dynamické změny pohybu prostředku, který nese laser (např. letadlo, vozidlo). IMU tedy zaznamenává náklon, pootočení a změnu rychlosti. Navigační jednotka GNSS přitom ukládá aktuální pozici. GNSS a IMU dohromady poskytují informaci k přesné lokalizaci bodu, ve kterém laserový puls dopadl na skenovaný objekt. Při zpracování naskenovaných dat jsou data z laserové, skenovací a inerciální navigační jednotky propojena, aby mohl vzniknout georeferencovaný trojdimenzionální bod pro každý detekovaný odraz vyslaného pulzu. Jednotlivé body tvoří dohromady bodové mračno skenovaného povrchu (White 2015).

3.5. Druhy laserového skenování dle způsobu sběru dat

Laserové skenování lze provést různými způsoby. Skenovat lze buď přímo na zemském povrchu, nebo s využitím létajících prostředků. Do pozemního způsobu řadíme metodu mobilního a statického laserového skenování. U létajících prostředků rozlišujeme skenování z družic, letadel a bezpilotních letadel (Van Leeuwen 2010).

3.5.1. Letecké laserové skenování

V oboru lesnictví nabízí letecké laserové skenování možnost detailního zachycení trojdimenzionální struktury korunového zápoje stromů. Na základě hustoty mračen bodů, jejich výšek a dalších charakteristik, lze pak odvodit veličiny popisující lesy jak v jejich vertikálním, tak i horizontálním členění. Představuje tak alternativní nástroj pro popis vegetace s využitím v lesním hospodářství pro přesnější inventarizaci nebo ke zjištění ekologických podmínek (Vauhkonen 2014).

Skenovací zařízení umístěné na letadle pořizuje prostorová data o povrchu na rozsáhlých územích, a to v dostatečném prostorovém rozlišení a s přesnými souřadnicemi (Vauhkonen 2014). V každém okamžiku skenování je totiž zaznamenávána přesná poloha a orientace skeneru. Výstupem skenování jsou digitální data, která po zpracování tvoří 3D mračna bodů zachycující skenovaný povrch s prostorovou souřadnicí každého detekovaného bodu (Dolanský 2004). Přesto se však nejedná o nejvhodnější způsob k odvození přesných charakteristik na úrovni jednotlivých stromů. Pro veličiny jako výčetní tloušťka, pozice stromu ve výčetní výšce a průběh kmene, jsou bodová mračna z leteckého skenování příliš řídká a vhodnějším způsobem je pozemní laserové skenování (Maltamo 2011). Jednotlivé stromy mohou být detekovány i z leteckého skenování s využitím modelu reprezentujícího výšky korun stromů (Canopy height model) (Hyypä 1999). Většinou se však volí plošný přístup (Area based approach), jehož výstupem jsou taxační veličiny jako výčetní kruhová základna, zásoba a střední výška určené pro celé porosty, nebo na plochu hektaru (Surový 2019b). Tyto odhady jsou založeny na statistické závislosti mezi daty z leteckého skenování a daty naměřenými na zkušných plochách při pozemním šetření. Odvozená data jsou závislá na kvalitě a

množství referenčního terénního šetření (Maltamo 2011). Letecké laserové skenování je v lesnictví hojně využíváno, např. k odhadu výšek stromů, zásoby, charakteristik korunového zápoje a měření přírůstu (Chen 2019).

3.5.2. Laserové skenování pomocí bezpilotních letadel

Mezi široce užívanou technologií dálkového průzkumu Země se rychle zařadila bezpilotní letadla (UAV – unmanned aerial vehicles) a bezpilotní systémy (UAS – unmanned aerial systems, RPAS – remotely piloted aerial systems) (Surový 2019). Lidarová data pořízená bezpilotními systémy spojují výhody leteckého a pozemního skenování. Svým záběrem dokážou nasnímat velká území a zároveň díky nízké letové výšce a pomalé rychlosti letu dokáží detekovat velmi hustá bodová mračna v řádech tisíců bodů na metr čtvereční. Takto kvalitní reprezentace prostorové struktury lesa dokáže zachytit parametry na úrovni jednotlivých stromů (Kuželka 2020). Mezi další výhody bezpilotních letadel patří jejich dostupnost a nízké pořizovací i operační náklady. Uživatelům je tak umožněno získávat data s požadovanou frekvencí bez závislosti na specializovaných dodavatelských firmách (Surový 2019).

3.5.3. Statické laserové skenování

Statické pozemní skenování (TLS, z angl. Terrestrial Laser Scanning) umožňuje získat milimetrovou úroveň detailů prostředí ve velmi krátkém čase. V porovnání s leteckým skenováním jsou bodová mračna z TLS podstatně hustší a umožňují získat základní charakteristiky stromů, jakými jsou výčetní tloušťka a výška stromu. V podstatě lze z bodových mračen vyextrahovat kompletní geometrii jednotlivých stromů s vysokou přesností. Svým dosahem a přesností je TLS ideálním způsobem k detailnímu šetření jednotlivých stromů na úrovni zkušných ploch a porostů (Chen 2019). Při měření se skener umístí na stativ do středu zájmové oblasti a provede se první sken kompletního zorného pole (360° v horizontálním směru a 311° ve vertikálním). Tím, že skenování probíhá ze statického polohy, je nutné oblast naskenovat několikrát z různých pozic a směrů. Jinak skener nemůže detekovat stromy, které jsou ve směru laserového paprsku v zástínu stromů stojících blíže skeneru (Liang 2016). Až 40 % stromů na ploše není možné detekovat tímto jediným skenem ze středu plochy. Tento hlavní problém TLS roste s hustotou porostu a se

vzdáleností od skeneru, kdy se laserový paprsek přes bližší stromy nedostane k těm vzdálenějším, i když svým dosahem by to možné bylo (Astrup 2014). K zachycení celistvého tvaru kmene je potřeba, aby byl konkrétní strom naskenován 3–4krát z různých směrů. Přesto však většina stromů není detekována v celé své velikosti z důvodu přetrvávajícího zastínění korunami. Skenování kruhové zkusné plochy o poloměru do 15 metrů zabere v případě, kdy je pořízeno 4–5 skenů, přibližně hodinu (Liang 2016).

3.5.4. Mobilní pozemní skenování

V porovnání s TLS, mobilní pozemní skenování (MLS – mobile laser scanning) umožňuje proces skenování provádět za pohybu. Tím lze za stejný časový úsek obsáhnout daleko větší území než pomocí TLS. Zároveň je jednodušší pomocí MLS detekovat jednotlivé stromy, kdy je pohybem redukován zástin vzdálenějších stromů. Laserová jednotka může být nesena vozidlem (automobil, robot aj.), případně v batohu (skenovací batohy) nebo pouze v ruce (ruční skenery). Tím je zaručen větší rozsah než u pozemního skenování a zároveň větší detail než u leteckého skenování (Hyypä 2013). Stejně jako při leteckém skenování, MLS využívá navigační systém GNSS a inerciální měřicí jednotku k přesnému určení pozice a orientace skeneru. Pod hustým zápojem korun stromů je však častým problémem nízká úroveň GNSS signálu, což výrazně ovlivňuje přesnost skenování. Oproti TLS jsou tedy data z mobilního skenování méně přesná a obsahují více šumu, redukují však hlavní nevýhody TLS – zástin stromů při skenování ze statické polohy a vyšší časovou náročnost skenování (Kukko 2017).

3.6. SLAM

Zvláštním případem pozemního skenování je technologie SLAM (z angl. Simultaneous Localization and Mapping). Na tento proces se nahlíží jako na dva vzájemně závislé problémy. Je možné vytvořit mapu v neznámém prostředí a zároveň ve stejný okamžik určit svou pozici pomocí této mapy? Jak trajektorie skenovacího přístroje, tak pozice bodů prostředí jsou zpracovávány přímo, bez předchozí znalosti místa (Durrant-Whyte 2006). Technologie SLAM je dnes v kombinaci s lidarem využívána k samostatnému navigování přístrojů prostorem, např. u autonomních vozidel, dále např. k mapování dolů, sesuvů

půdy a městského prostředí (Chen 2019). Díky algoritmům, které řeší problém SLAM, není v přístrojích, které tuto technologii využívají, nutné používat navigační systém GNSS. Přístroj tak není nijak limitován tím, zda je dostupný GNSS signál, což odstraňuje hlavní problém u mobilního laserového skenování, kdy při skenování pod korunami stromů může být signál slabý až nedostupný (Gollob 2020).

Pro úspěšné detekování všech stromů na ploše, včetně přesné detekce výčetní tloušťky, je u ručních SLAM skenerů důležitá trasa skenování. V návaznosti na SLAM algoritmus se zdůrazňuje, aby každé skenování začínalo a končilo ve stejném bodě. Kromě toho by měla být trasa rovnoměrně rozvržena (Gollob 2020). Bauwens (2016) volí trasu, kdy je po hranici výzkumné plochy skenováno alespoň jednou a vnitřek plochy je pochůzkou napříč skenován nejméně čtyřikrát.

3.7. Využití pozemního laserového skenování v lesnictví

Následující podkapitola uvádí příklady použití pozemního laserového skenování v lesnictví, ať už s využitím statického nebo mobilního skenování. Díky vysokému prostorovému rozlišení se často jedná o použití, které přináší poznatky na úrovni jednotlivých stromů. Ty lze shrnout i do charakteristik na úrovni zkušných ploch nebo porostů.

3.7.1. Měření tlouštěk

Pozemní laserové skenování, ať už statické nebo mobilní, představuje nejvhodnější způsob z metod DPZ k určení tlouštěk stromů. Nejběžnější metodou je napasování kruhu nebo válce na body v mračnách, které odpovídají jednotlivým kmenům (viz kap. 3.7.5). Díky vysoké úrovni detailů lze z bodových mračen pozemního skenování vyextrahovat nejen tloušťku výčetní, ale i tloušťky napříč kmenem, a získat tak kompletní profil kmene (Olofsson 2014). U ostatních metod, ať už s využitím družic nebo leteckých prostředků, nelze detekovat kmeny stromů skrze zápoj korun. Lze však nepřímo odhadnout výčetní tloušťky pomocí charakteristik bodových mračen (White 2015). Z jiných způsobů DPZ mají možnost přímo detekovat tloušťky kmenů i bezpilotní letadla

(Kuželka 2020), i když hustota bodů na kmenech je nižší. Srovnatelnou úroveň detailů s MLS lze dosáhnout pomocí bezpilotních letadel, pokud je jejich trasa letu zvolena pod korunami stromů (Hyypä 2021).

3.7.2. Sortimentace nastojato

Komplexní software od firmy Treemetrics Ltd. (ForestHQ 2022) využívá pozemního skenování k sortimentaci dříví nastojato. Umožňuje simulovat konkrétní výřezy skenovaných stromů, včetně těžařských zbytků, a odhadnout potencionální produkci dřeva z naskenovaného porostu. Sbírat data do programu Forest HQ lze i pomocí aplikace Arboreal, která měří tloušťku a výšku stromů pouze pomocí mobilního telefonu s technologií lidar.

3.7.3. Měření výšek

K určení výšek stromů existuje několik přístupů. Běžně se určují výšky jednotlivých stromů z výškové mapy (CHM), kterou lze sestavit i pomocí pozemního skenování. Olofsson (2014) odhaduje výšku stromů z bodového mračna pomocí výškového percentilu, který je počítán od modelu terénu. Výška stromů je pak dána jako 100. percentil, tedy nejvyššími body. Vypořádal však systematickou chybu podhodnocení výšek, kterou může způsobovat nižší hustota bodů ve vrcholcích stromů. Ta je ovlivňována hustotou korunového zápoje a mírou blokace laserových paprsků větvemi. Důležitým aspektem je také robustnost algoritmu, resp. s jakou přesností dokáže segmentovat jednotlivé stromy i v hustých porostech s prolínajícími korunami jednotlivých stromů.

3.7.4. Ekologie a dynamika lesa

Pozemní laserové skenování vnáší nový pohled také do průzkumu ekologie a dynamiky lesa. Díky přesnému měření a vysokému detailu nasnímaných dat dokáže zachytit prostorovou strukturu lesa, tvar jednotlivých stromů a zmlazené stromy v podrostu, které jsou z leteckého skenování málokdy detekovány. Metz (2013) zrekonstruoval ze skenování tvary korun k šetření dynamiky růstu buku lesního v různých směsích. Na základě tvaru koruny buku byl vypočítán index kompetice v jednotlivých směsích. Určení parametrů korun stromů lze provést v programu 3D Forest, kde je možné určit mnoho parametrů

korun, např. dimenze koruny, pozice, výška, objem, pozice protnutí více korun (Trochta 2017).

3.7.5. Odhad indexu listové plochy

Index listové plochy (LAI) vyjadřuje množství listů v korunovém zápoji. Jde o důležitý parametr, který lze použít k interpretaci zdravotního stavu lesa. Index listové plochy lze odhadnout z více metod DPZ. Např. v Česku probíhá celorepublikové šetření s využitím satelitních snímků Sentinel-2 v kombinaci s daty z pozemního šetření (Lukeš 2018). Odhadem LAI pomocí pozemního šetření se zabýval Li (2017), který vytvořil algoritmus pro segmentaci jednotlivých stromů z bodových mračen, včetně rozpoznání listů s přesností extrakce 84,63 % – 86,53 %.

3.8. Zpracování bodových mračen

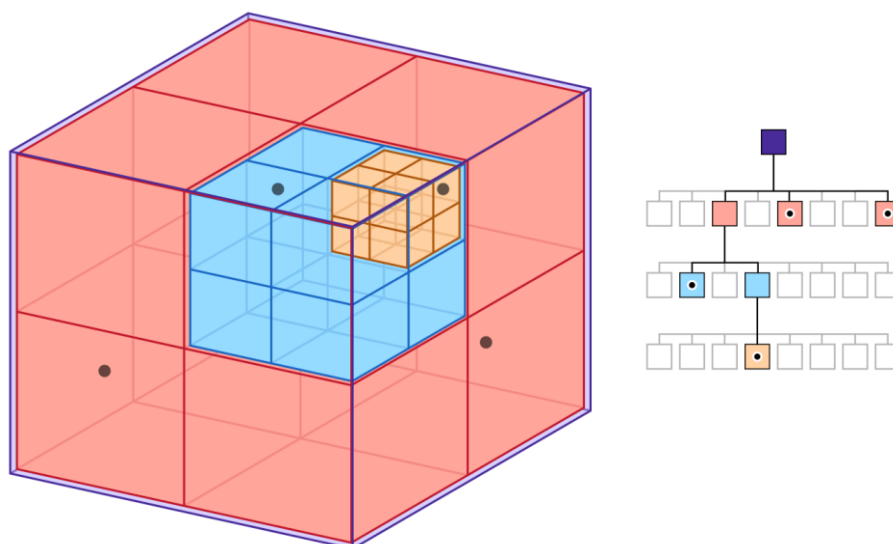
Pozemní laserové skenování poskytuje detailní prostorový pohled na lesy. Výstupem skenování jsou zaznamenaná bodová mračna, řádově s miliony bodů umístěných v 3D prostoru s až milimetrovou přesností. Kvůli tomuto obrovskému objemu dat a vysokému potenciálu k extrakci informací je jejich automatické a zároveň přesné zpracování klíčovým aspektem úspěšného použití v praxi (Trochta 2017).

S vývojem technologie lidar rostl také počet algoritmů implementovaných ke zpracování těchto dat. Existuje několik softwarů a knihoven, které se zabývají zpracováním bodových mračen. Každý výrobce implementuje algoritmy na zpracování obrazu trochu jiným způsobem, výstupy se tak mohou v různé míře lišit dle vybraného programu nebo knihovny. 3D Forest (Trochta 2017) je zaměřen na segmentaci jednotlivých stromů s určením základních parametrů stromu a specifických charakteristik korun. Aplikace Arboreal (TreeMetrics) umožňuje skenovat kmeny stromů pomocí mobilů s technologií lidar. Účelem je ekonomické zhodnocení dřeva na stojato. LiForest (True Reality Geospatial Solutions) je více zaměřen na zpracování charakteristik v rámci porostů, především z leteckého skenování. S bodovými mračny pracuje také

DendroCloud, který umožňuje extrahovat jednotlivé tloušťky stromů i v délce celého kmene (Koreň).

3.8.1. Digitální model terénu

Klíčové parametry stromů, jako výška a výčetní tloušťka, lze určit pouze pomocí vzdálenosti od povrchu země. Proto je při zpracování bodových mračen, ať už z leteckého nebo pozemního skenování, klíčové správně klasifikovat body, které představují terén. U velmi hustých bodových mračen z pozemního skenování se používají různé algoritmy k určení správných nejnižších bodů, které nejlépe představují terén. V softwarech na zpracování bodových mračen je terén pomocí algoritmů extrahován automaticky. Uživatel může ovlivnit detail terénu pomocí parametru rozlišení. Jednoduchým algoritmem na určení terénu je tzv. octree, který je často užíván v 3D grafice. Jde o datovou strukturu typu strom, která má přesně 8 potomků, v případě 3D grafiky jde o objekt krychle. Pomocí rekurzivního dělení je bodové mračno děleno na menší objekty, opět s osmi potomky, dokud není dosaženo požadovaného rozlišení (délka strany výsledných krychlí – prostorové rozlišení digitálního modelu terénu). Výsledný terén je reprezentován body v krychlích s nejmenší hodnotou souřadnice v ose Z (Trochta 2017).



Obrázek 4: Vizualizace rekurzivního dělení krychle do oktantů
Vpravo: datová struktura typu strom s osmi potomky. (DULAL 2018)

3.8.2. Mapa korunových výšek

Mapa korunových výšek (angl. Canopy Height Model) je rastrový obrázek, jehož každému pixelu je přiřazena hodnota výšky. Předpokladem k vytvoření mapy výšek je klasifikace bodového mračna na terén (vytvoření DTM) a zbytek, tedy vegetaci (non-ground points). Pro každý bod vegetace lze určit jeho vertikální vzdálenost od terénu, tedy jeho výšku. Dalším krokem je rozdělení mračna do čtvercové sítě. Každé buňce je přiřazena průměrná nebo maximální hodnota výšek na ploše buňky. Na rozsah hodnot v jednotlivých buňkách je namapována barevná škála, čímž vznikne výsledný 2D rasterový obrázek reprezentující výšky stromů (Surový 2019).

3.8.3. Detekce stromů

Jednou z metod, jak detekovat jednotlivé stromy v bodových mračcích, je Houghova transformace (RHT). Nejprve je z bodového mračna vyříznuta úzká podmnožina bodů v rozsahu přibližně 1 – 1,5 m nad DTM. Tim zredukujeme prostor pro aplikaci Houghovy transformace, která prokládá zadanými body kružnici. Každý detekovaný kruh spolu s jeho body představuje výřez kmene konkrétního stromu, který je základem vytvoření modelu celého stromu (Simonse 2003). Detekce stromů je také možná z modelu reprezentujícího výšky korun stromů (Canopy height model), kdy jsou stromy detekovány na základě lokálních maxim výšek, reprezentujících vrcholy jednotlivých stromů nebo z tzv. inverse watershed (Koch 2014).

3.8.4. Pozice stromů

Pozicí stromu se rozumí pozice středu kmene v oblasti báze kmene. K určení pozice lze využít opět Houghovu transformaci pro detekci kruhu. Pomocí aplikace RHT na bodová mračna kmene se ve výšce 1,3 m a 0,65 m detekují kružnice. Pozice stromu je definována jako průsečík vektoru středů kružnic s modelem terénu. Pozici stromu lze určit také pomocí mediánu souřadnic zadaných bodů kmene pro osu X a Y. Souřadnice Z se určí jako medián ze souřadnic několika bodů, které jsou nejbližší terénu (Trochta 2017).

3.8.5. Výčetní tloušťka

K zjištění výčetní tloušťky stromu je potřeba znát pozici stromu a digitální model terénu (DTM). Nad danou pozicí stromu je ve výšce 1,3 metru od DTM

proveden horizontální výřez z bodového mračka. Výška výřezu může být defaultně implementována v programu, nebo zadána uživatelem. Např. v programu 3D Forest je výřez silný 10 cm, jsou tedy použity body ve výšce 1,25–1,35 cm od DTM. Dalším krokem je interpolace bodů kruhem (circle-fitting), jehož průměr nejlépe reprezentuje výčetní tloušťku. Mezi používané metody patří např. Houghova transformace, metoda nejmenších čtverců implementovaná v programu 3D Forest, nebo minimal bounding box a metoda největší vzdálenosti v programu Dendrocloud. Jejich výstup se může lišit, především, když kmen není naskenován ze všech stran, viz obrázek 4 a 5. U metody minimal bounding box může docházet k posunu (Koreň).



Obrázek 5: Proložení naskenovaných bodů kruhem, pomocí metody největší vzdálenosti (Koreň).

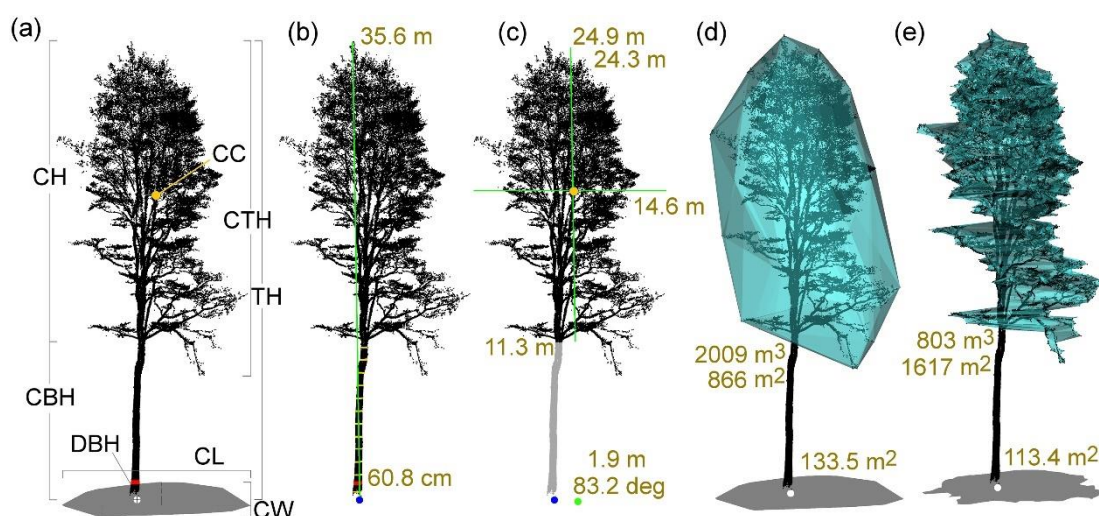


Obrázek 6: Proložení bodů kruhem, pomocí metody minimal bounding box.

V případě částečně naskenovaného kmene může docházet k posunu kruhu směrem k části s více body (Koreň).

3.8.6. Rozměry korun stromů

Jednou z pokročilejších možností zpracování bodových mračen je zjištění parametrů korun. Pomocí algoritmu Gift wrapping lze vytvořit konvexní obal koruny. Z výsledného polygonu lze spočítat povrch a objem koruny. Pro nepravidelné koruny je vhodnější konkávní obal, který s využitím algoritmu Divide and conquer (rozděl a panuj) dělí hrany polygonu dle zadané nejmenší délky a tím výsledný obal lépe přilne k jednotlivým větvím. Z konkávního obalu lze rovněž určit plochu a objem koruny (Trochta 2017).



Obrázek 7: Extrakce a vizualizace parametrů stromu v programu 3D Forest.

- a) CBH nasazení koruny, CH – výška koruny, CTH – celková délka koruny, CL – délka koruny, CW – šířka koruny, CC – střed koruny, DBH – výčetní tloušťka, TH – výška stromu, bílý bod – pozice stromu
- b) Spočteny základní parametry a profil kmene (žluté kruhy)
- c) Koruna stromu se středem
- d) 3D konvexní obal s ortogonální projekcí do roviny terénu
- e) 3D konkávní obal s ortogonální projekcí do roviny terénu

(Trochta 2017)

4. Metodika sběru a zpracování dat

4.1. Projekt TZP - trvalé zkusné plochy

Terénní šetření probíhalo na trvalých zkusných plochách (TZP). Na území ČR byly v minulosti založeny dva rozsáhlé soubory výzkumných ploch. Poloprovozní výzkumné plochy (PVP) byly zakládány v 60. a 70. letech za účelem vypracování růstových tabulek hlavních dřevin Československa. Trvalé zkusné plochy (TZP) byly zakládány především v 80. letech pro sledování změn, které mohou nastat v lesních půdách pod vlivem imisí. Současný projekt TZP je výsledkem sjednocení systému PVP a původních TZP do jednoho uceleného souboru výzkumných ploch. Tento cílový soubor reprezentativních ploch poskytuje informace o stavu lesů pro potřeby produkčního výzkumu, odvození růstových trendů, sledování vývoje zdravotního stavu porostů, změn stanovištních podmínek a dalších jevů, významných pro růst lesa. Projekt terénního sběru dat na trvalých zkusných plochách probíhá od roku 1964. Všechny analogové zápisníky byly digitalizovány a zároveň naskenovány k uchování původní informace. V současné době (konec roku 2021) je v databázi TZP evidováno 868 aktivních ploch (ÚHÚL 2021).

Samotné šetření na TZP zahrnuje zaměření pozic jednotlivých stromů, měření výčetní tloušťky všech stromů nad hranicí hroubí (7 cm), určení sociálního postavení stromů dle Kraftovy stupnice, monitoring výskytu zlomů a jiného poškození korun v hlavní úrovni porostu, poškození kmene, určení výšky vybraných stromů aj. Jednotlivé stromy jsou označeny číslem (ÚHÚL 2021).

Výčetní tloušťka je měřena pomocí digitální průměrky Haglöf DP II. K měření výšek se používá laserový výškoměr TruPulse 360B. Výška je měřena u vybraných stromů, určených aplikací v rozsahu 30–80 výšek dle dřevinné skladby plochy. Na každé trvalé zkusné ploše je pomocí GPS zařízení zaměřen hlavní roh plochy. Od tohoto bodu je možné na ploše zaměřit přístrojem TruPulse staniční body, z nichž lze opět zaměřit jednotlivé stromy. Z přístroje TruPulse je každým zaměřením odeslána vzdálenost a azimut. V aplikaci je dopočtena finální souřadnice od hlavního rohu plochy. Přístroj TruPulse měří vzdálenost s přesností na desetiny metru (ÚHÚL 2021).

4.2. Vybrané trvalé zkusné plochy

K ověření přesnosti měření na Trvalých zkusných plochách s využitím pozemního laserového skenování byly vybrány 3 trvalé zkusné plochy.

TZP 500301

Smrková plocha v přírodní lesní oblasti Karlovarská vrchovina (PLO 3) se nachází u obce Horní Slavkov na území CHKO Slavkovský les. Leží v nadmořské výšce 629 m n. m. na rovinném terénu. Na ploše se v době měření vyskytovalo 152 stromů s tloušťkou větší než 7 cm, z toho 139 jedinců smrku ztepilého a 13 borovice lesní. Plocha má tvar obdélníku o rozměrech 52 x 38 metrů. Věk porostu je 105 let. Výčetní tloušťka středního kmene je 32,3 cm.

TZP 500316

Plocha s hlavní dřevinou borovicí lesní se nachází v PLO 3 u obce Cihelny. Leží v nadmořské výšce 561 m n.m., na rovinném terénu. Lesní typ stanoviště je 5M1 – Chudá jedlová bučina modální. Geologické podloží tvoří granit. Na ploše se v době měření vyskytovalo 128 stromů s tloušťkou větší než 7 cm – 125 jedinců borovice lesní, 1 smrk ztepilý a 2 břízy bělokoré. Plocha má tvar obdélníku o rozměrech 40 x 51 metrů. Věk porostu je 92 let. Výčetní tloušťka středního kmene je 26,7 cm.

TZP 500318

Plocha s hlavní dřevinou smrkem ztepilým. Nachází se v PLO 3 u obce Krásno na území CHKO Slavkovský les. Leží v nadmořské výšce 782 m n.m. na rovinném terénu. Lesní typ stanoviště je 6K1 – Kyselá smrková bučina modální. Geologické podloží tvoří pararula. Na ploše se v době měření vyskytovalo 130 stromů s tloušťkou větší než 7 cm, z toho jedna borovice lesní. Plocha má tvar obdélníku o rozměrech 54 x 64 metrů. Věk porostu je 125 let. Výčetní tloušťka středního kmene je 34,5 cm.

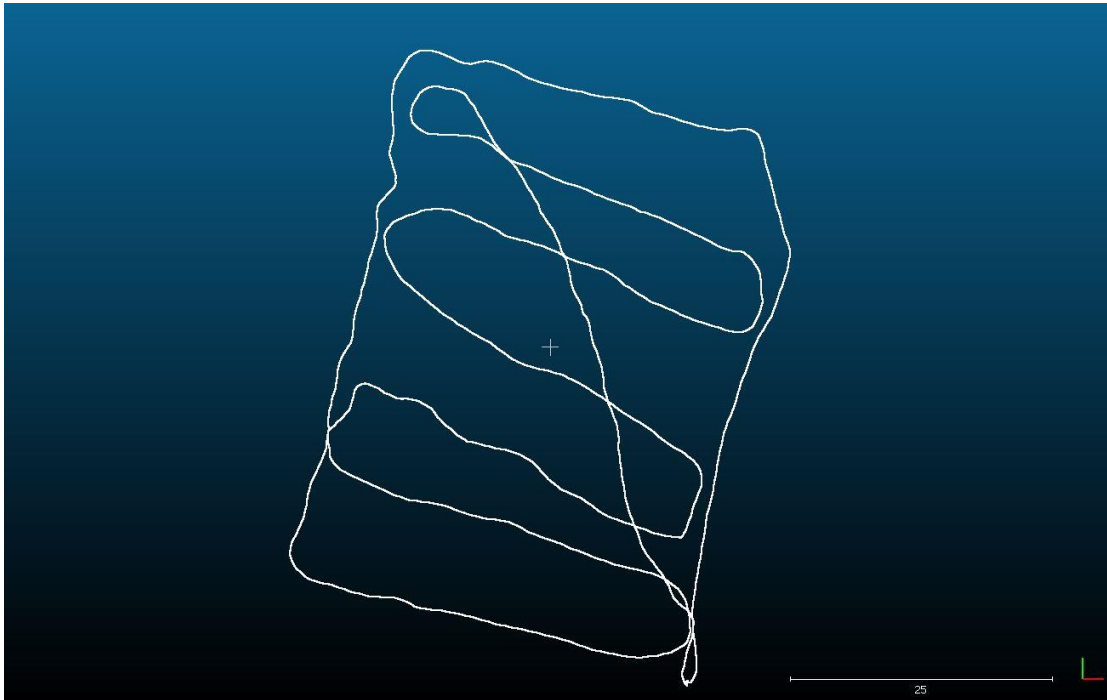
4.3. Laserové skenování trvalých zkušných ploch

Skenování vybraných ploch proběhlo 13. prosince 2021. Pro sběr dat byl použit skener ZEB-Horizon, který využívá SLAM algoritmus pro lokalizaci skeneru v neznámém prostředí za souběžného pořizování 3D bodových mračen. Jeho dosah ve venkovních podmínkách je 60–80 metrů, k udržení dobré hustoty bodů se však doporučuje dodržovat vzdálenost od skenovacích objektů menší, nejvíce do 50 metrů. Zorné pole skeneru je 360° v horizontální rovině a 270° ve vertikální. Dokáže zaznamenat až 300 000 bodů za vteřinu. Jedná se o lehké přenosné zařízení, skládající se ze 3 částí: ruční skener s otočnou hlavou, datové uložště a baterie. Hmotnost celku je 2,76 kg. Vlnová délka laseru je 903 nm (GeoSLAM 2020).



Obrázek 8: ZEB-Horizon při skenování trvalé zkušné plochy

ZEB-Horizon se skládá z lidarového skeneru, fungujícího na principu měření tranzitního času a inerciální měřicí jednotky pro detekování náklonů a orientace otočné hlavy. Zpracování surových dat do 3D bodového mračna lze provést pouze v aplikaci GeoSLAM Hub (GeoSLAM 2020).



Obrázek 9: Trajektorie skenování na TZP 500301

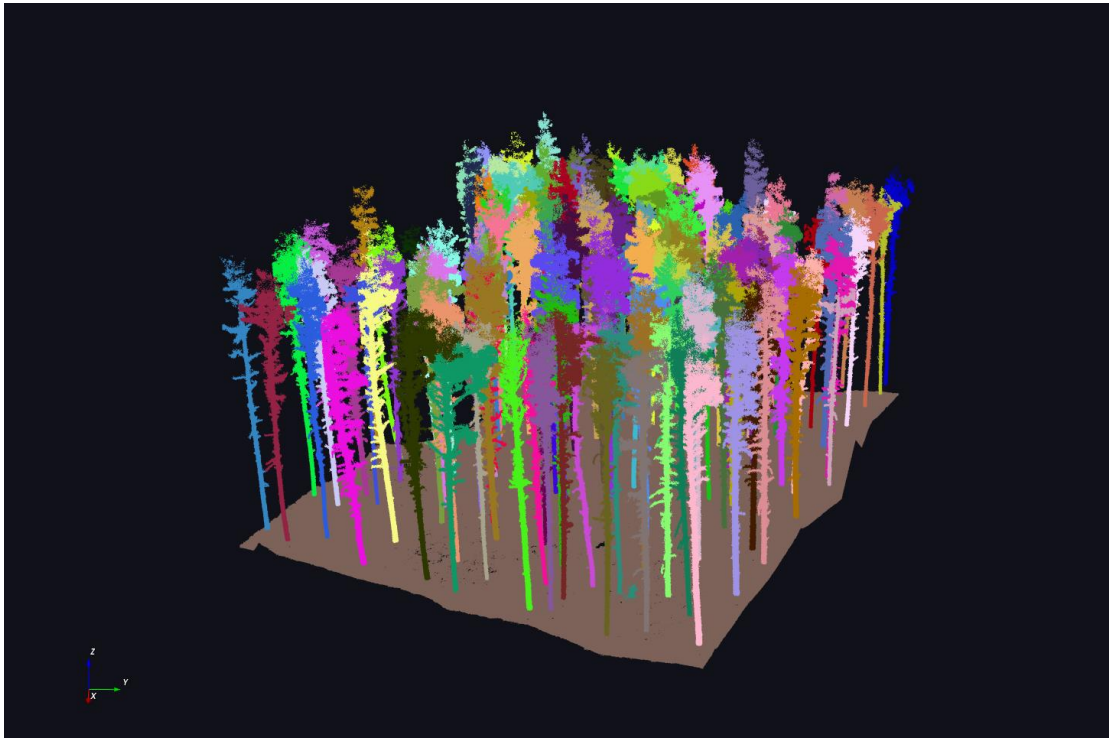
Trajektorie chůze při skenování byla zvolena dle obecných doporučení při využívání technologie SLAM a částečně dle Bauwens (2016). Byla splněna podmínka na uzavření smyčky, tedy začátek i konec skenování v totožném místě. Dále alespoň jednou byla trasa vedena po hranici plochy a vnitřek plochy byl naskenován s dostatečnou hustotou.

4.4. Zpracování dat

Porovnání klasického měření s laserovým skenováním proběhlo na úrovni jednotlivých stromů. Z bodového mračka byly vysegmentovány jednotlivé stromy a určena jejich pozice, výčetní tloušťka a výška. Následně byly tyto zjištěné veličiny použity k ověření přesnosti měření v projektu TZP.

Proces segmentace jednotlivých stromů byl proveden s využitím programů 3D Forest, CloudCompare a ArcGIS Pro. Segmentace stromů je možná pouze s využitím programu 3D Forest. V tomto případě však nedocházelo k detekci vrcholů většiny stromů. Tento problém byl dán především vlastnostmi bodového mračka z pozemního laserového skenování, kdy hustota bodů

v nejvyšších částech stromů je oproti hustotě bodů v dolní části kmene výrazně nižší. Kvůli hustému zápoji korun neproniklo do vrcholů tolik laserových paprsků, přesto zde byl dostatek bodů k určení přesných výšek. Druhou příčinou tohoto problému byla implementace algoritmu pro segmentaci stromů v programu 3D Forest. V nastavení funkce Automatic Tree Segmentation nebyla nalezena vhodná varianta argumentů, které by umožnily identifikaci kompletních stromů až po vrcholky a zároveň by byl zachován takový detail rozpoznání, aby nedocházelo ke spojení stromů, jejichž koruny se dotýkaly. Tento problém byl řešen vytvořením dvou různých bodových mračen z původního souboru. V prvním případě se jedná o výřez do výšky 10 metrů, tedy bez korun. V bodovém mračnu zůstaly zachovány pouze spodní části kmenů. Tím lze zajistit přesnou detekci a určení pozic jednotlivých stromů. Druhý soubor byl vytvořen s využitím detekovaných souřadnic. Kolem nich byl vytvořen kruhový polygon o průměru 1,5–3 metry v závislosti na korunovém zápoji a dřevině. U borovice, jakožto dřeviny silně reagující na rozvolnění korunového zápoje, byl zvolen průměr 3 metry. Vytvořený soubor polygonů kolem pozic stromů byl následně použit jako šablona k extrakci bodů. Výstupem je bodové mračno s kmeny i korunami v celé své délce, ale se značným ořezem větví. Stromy jsou tak více izolovány, nedotýkají se větvemi a lze snadněji určit jejich přesnou výšku. Nutností je vizuální kontrola, kdy u šikmých stromů nedochází k zahrnutí celé délky kmene. U těchto jedinců je nutná manuální segmentace. Postup segmentace s využitím všech tří programů je znázorněn v tabulce 1.



Obrázek 10: Zpracované bodové mračno trvalé zkušné plochy 500316 s vysegmentovanými stromy a klasifikovaným terénem.

Krokem, který se nepodařilo zautomatizovat, bylo přiřazení vyextrahovaných stromů, resp. jejich parametrů, ke stromům z TZP. Tento proces byl proveden manuálně v programu CloudCompare (CloudCompare 2022). Poté byla vyexportovaná data s parametry jednotlivých stromů porovnána a statisticky vyhodnocena v programu RStudio, dle Kuželka (2018).

Tabulka 1: Postup při segmentaci stromů z bodového mračna

Software / Úkol	Funkce	Výstup
3D Forest / Určení polohy stromů	Terrain by octree	Klasifikace bodů do dvou skupin, terén a vegetace.
	Remove selected points from cloud	Ořez korun a přízemní vegetace, výstup: části kmenů.
	Automatic tree segmentation	Funkce k segmentaci jednotlivých stromů. Jako vstupní argumenty funkce je klasifikované mračno bodů jako vegetace (v tomto případě pouze části kmenů) a mračno klasifikované jako terén. Výstupem jsou identifikované, jednotlivé kmeny.
	Position lowest points / RHT	Určení pozice pro jednotlivé kmeny a jejich export.
ArcGis / Vytvoření kruhových polygonů kolem souřadnic	Import souřadnic stromů, Display XY data	Import souřadnic získaných z 3D Forest a jejich zobrazení.
	Buffer	Vytvoření kružnice kolem všech pozic o průměru 1,5–3 m.
	Feature To Polygon	Transformace kružnic na kruhy.
CloudCompare / Ořez větví dle polygonů	Extract sections	Z původního mračna bodů jsou vyříznuty body dle shapefilu s kruhy. Tím vznikne nové bodové mračno s více izolovanými stromy – odříznutí větví.
3D Forest / Určení výčetní tloušťky a výšky stromů	Automatic tree segmentation	Segmentace nově vzniklého bodového mračna. Díky větší izolaci stromů je možné nastavit menší detail detekce a tím zahrnout i nejdříve detekované body (vrcholky stromů).
	Position lowest points / RHT	Určení pozic v novém mračnu pro jednotlivé stromy.
	DBH LSR/RHT	Určení výčetní tloušťky.
	Height	Určení výšky stromů.
	Export Tree Parameters	Do textového souboru vyexportovány parametry jednotlivých stromů.

5. Výsledky

Jednotlivé podkapitoly obsahují ověření dendrometrických veličin – pozice stromu, výčetní tloušťka a výška – šetřených v rámci projektu TZP pomocí dat z mobilního laserového skenování. Porovnání je rozpracováno pro jednotlivé plochy.

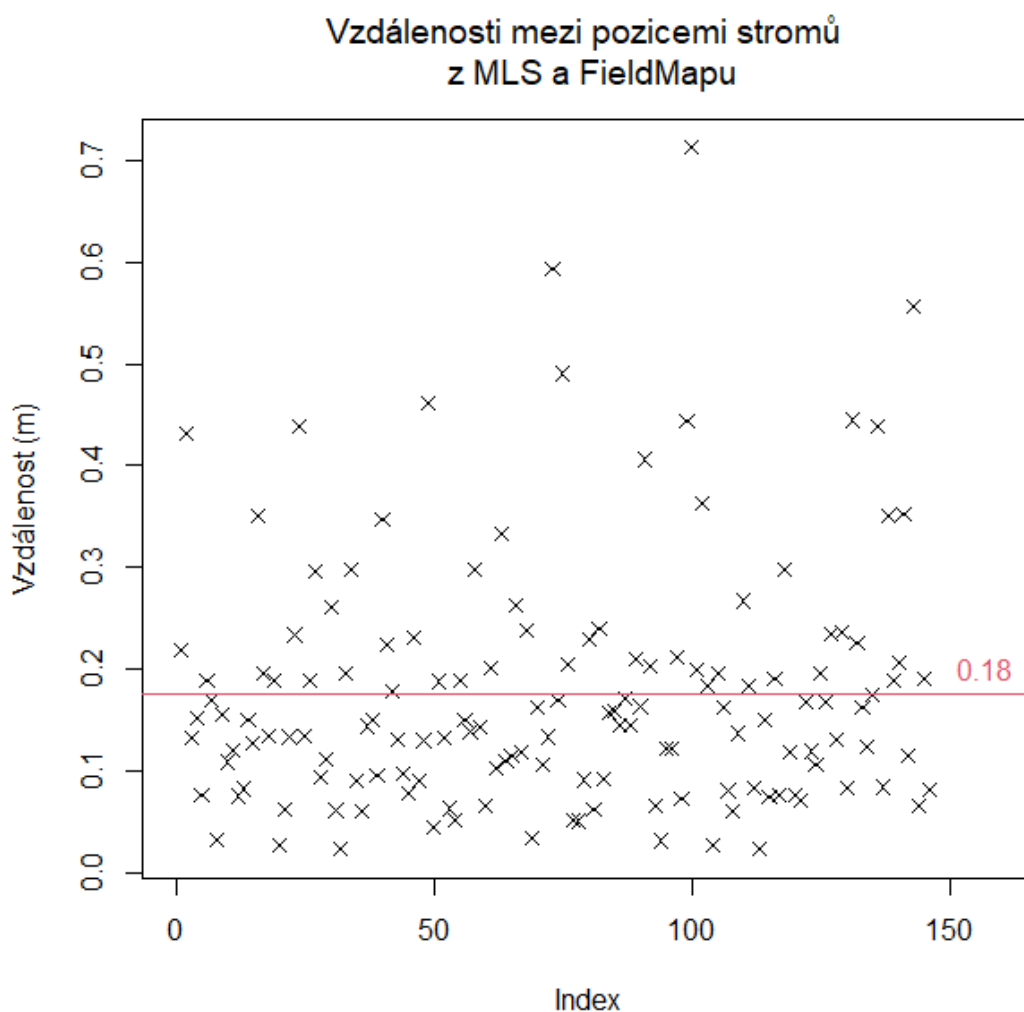
Pro ověření pozice stromů byla použita Prokrustova analýza v prostředí MATLAB. Prokrustova analýza umožňuje porovnání dvou vícerozměrných prostorů a pomocí transformací hledá kompromis, který minimalizuje sumu čtverců vzdáleností mezi odpovídajícími si body (Procrustes). Po určení ideální transformace k minimalizaci odchylek byly relativní souřadnice z TZP transformovány do prostoru relativních souřadnic z laserového skenování. Pro odpovídající body byla spočítána vzdálenost mezi pozicemi z MLS a z TZP a určena průměrná vzdálenost mezi nimi a střední kvadratická chyba RMSE.

Při ověření výčetní tloušťky byl proveden párový t-test k ověření, zda nedochází k systematické chybě a vypočtena průměrná chyba a střední kvadratická odchylka RMSE. Identický postup byl zvolen při ověření výšky stromů. Z dat TZP byly k ověření výšek použity pouze stromy se změřenou výškou v terénu. Ostatní stromy, u nichž je při zjišťování taxačních veličin použita modelová výška, nebyly při ověření výšek použity.

5.1. Pozice stromů

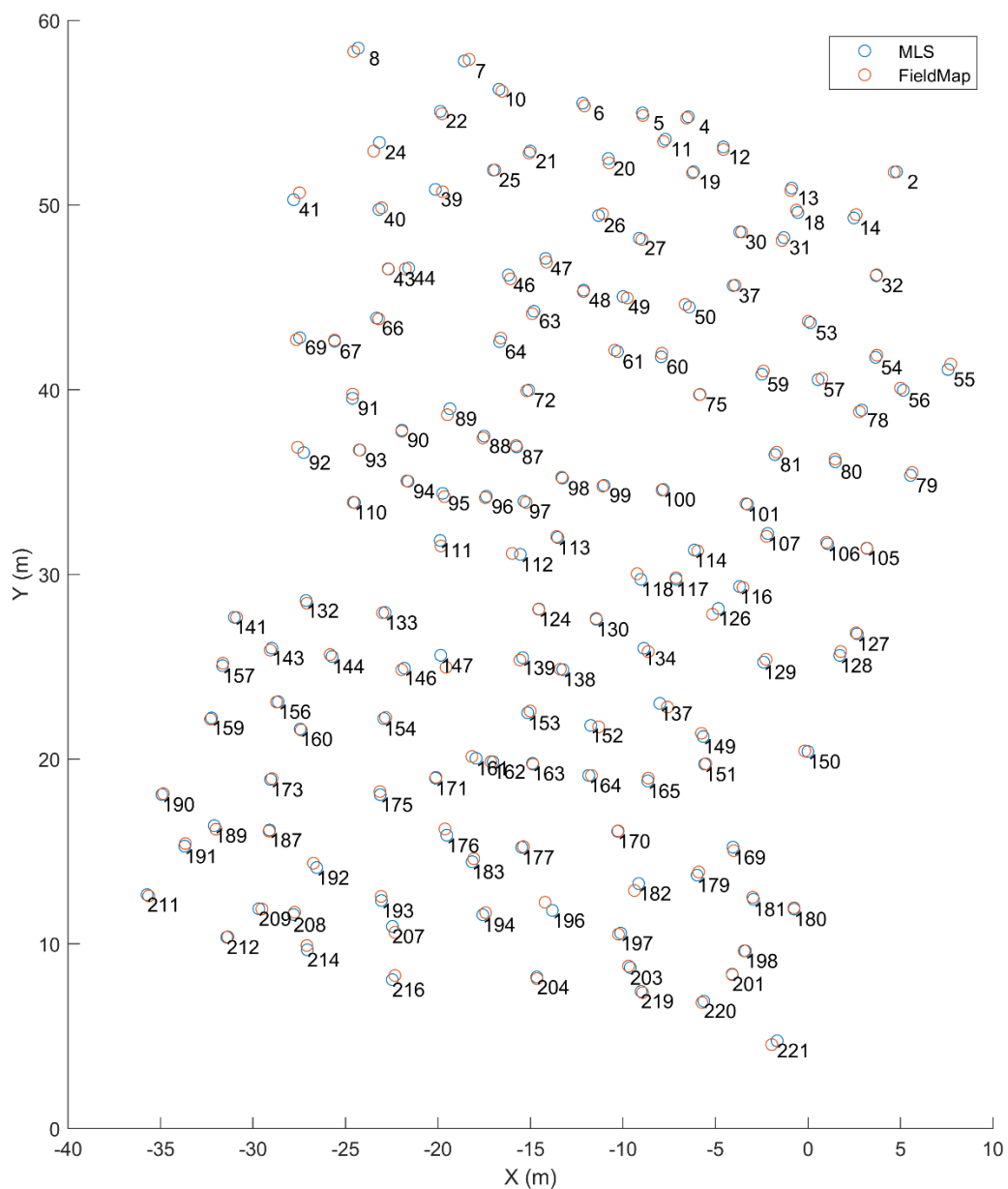
5.1.1. Pozice stromů - plocha 500301

Vzdálenost mezi pozicemi stromu, určených pomocí MLS a FieldMapu, se průměrně lišila o 0,18 m. Střední kvadratická chyba RMSE je 0,21 m. Dle regresní analýzy neexistuje závislost mezi vzdáleností odpovídajících si bodů a vzdáleností v jednotlivém směru osy x, nebo osy y. Nevzniká tedy systematická chyba.



Graf 1: Vzdálenosti odpovídajících stromů na ploše 500301

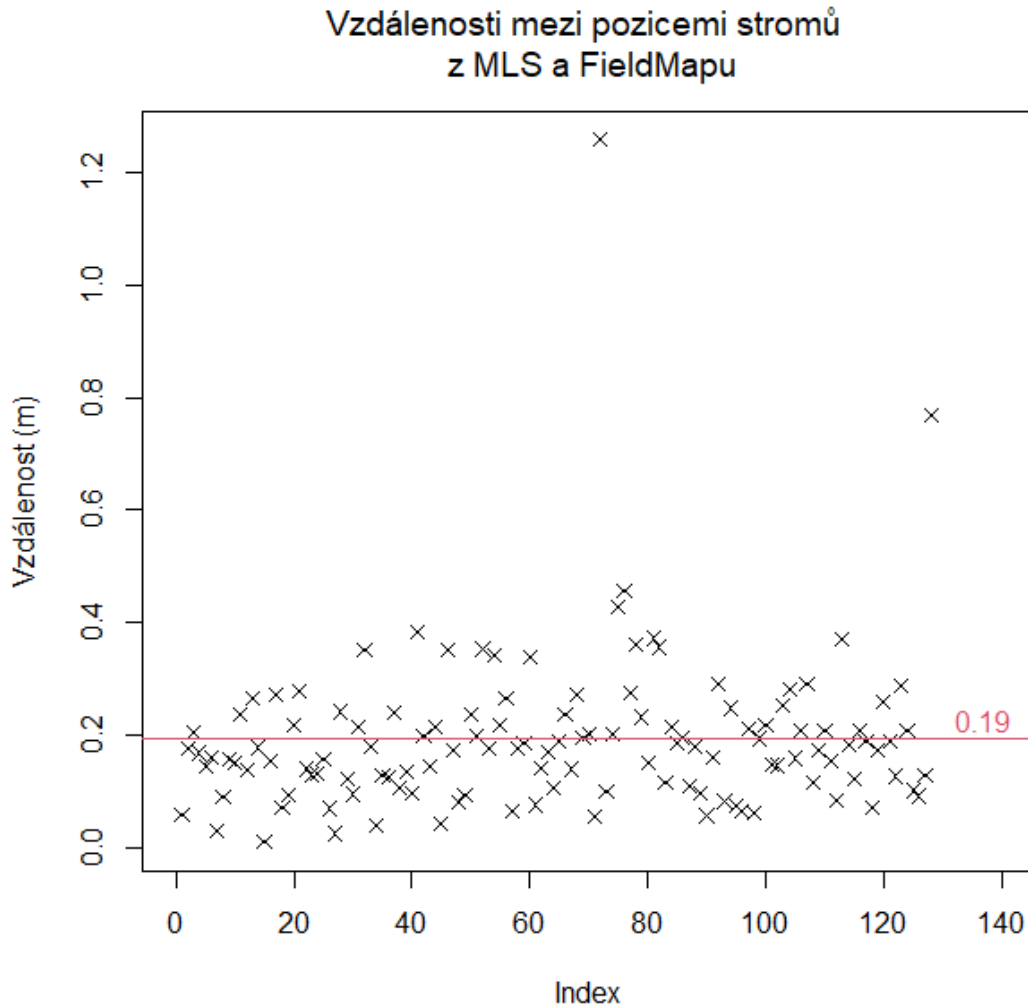
Pozice stromů na ploše 500301



Graf 2: Zobrazení pozic stromů dle MLS a FieldMapu s popiskem ID stromu

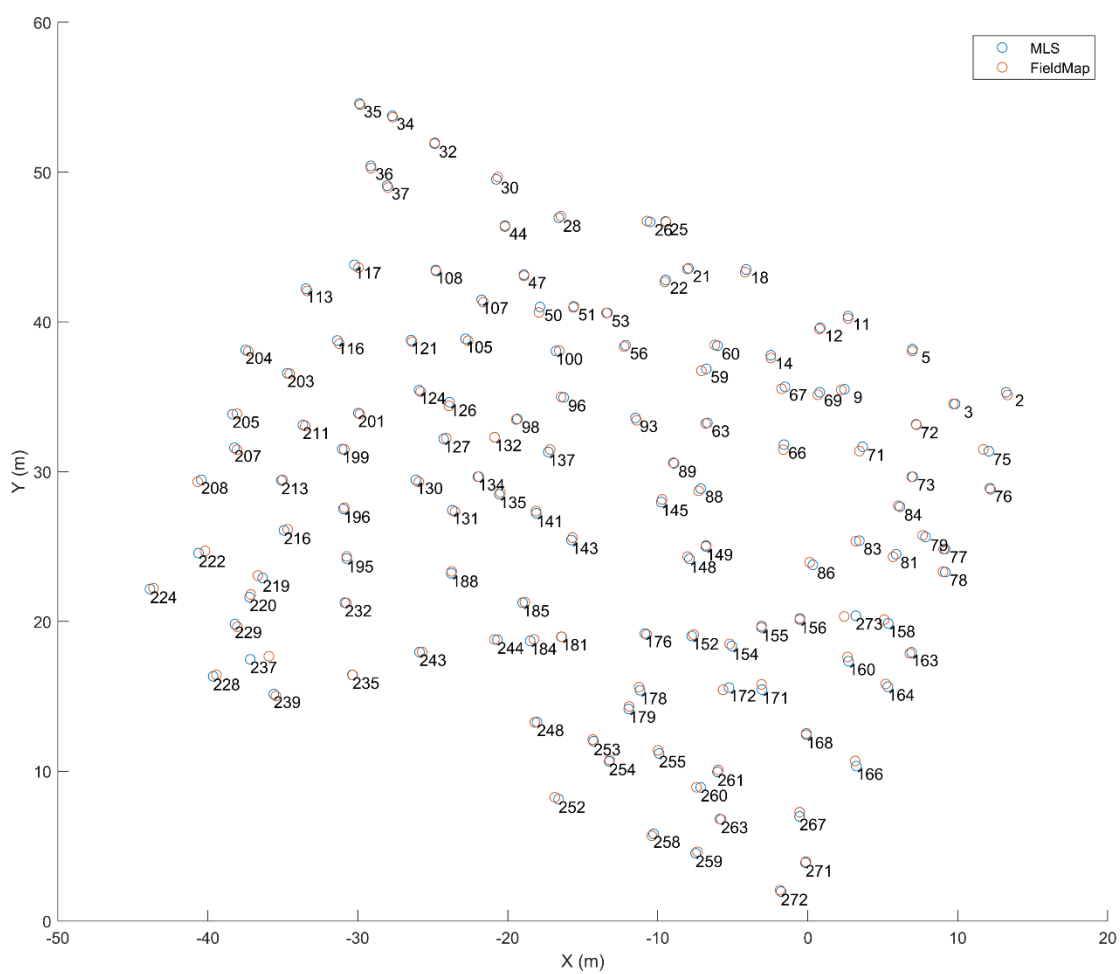
5.1.2. Pozice stromů - plocha 500316

Vzdálenost mezi pozicemi stromu, určených pomocí MLS a FieldMapu, se průměrně lišila o 0,19 m. Střední kvadratická chyba RMSE je 0,24 m. Dle regresní analýzy neexistuje závislost mezi vzdáleností odpovídajících si bodů a vzdáleností v jednotlivém směru osy x, nebo osy y. Nevzniká tedy systematická chyba.



Graf 3: Vzdálenosti odpovídajících stromů na ploše 500316

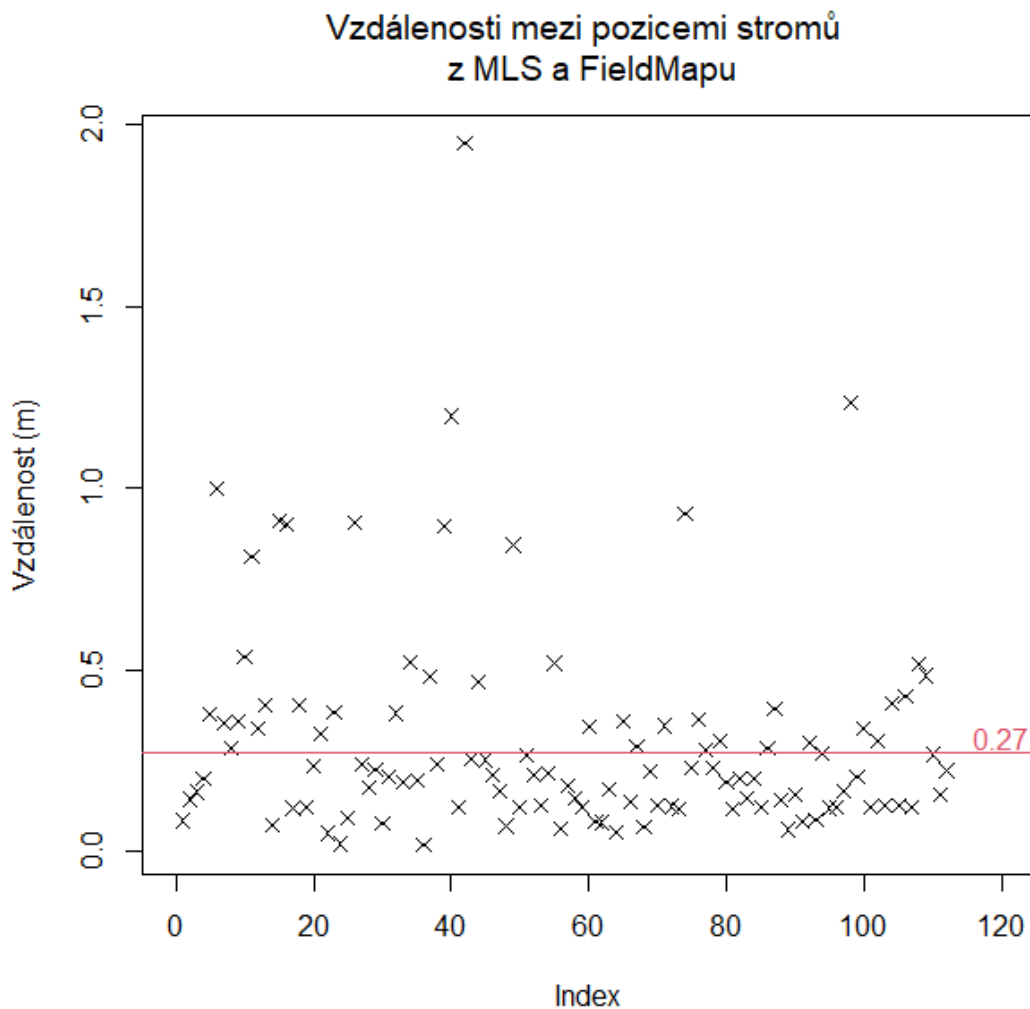
Pozice stromů na ploše 500316



Graf 4: Zobrazení pozic stromů dle MLS a FieldMapu s popiskem ID stromu

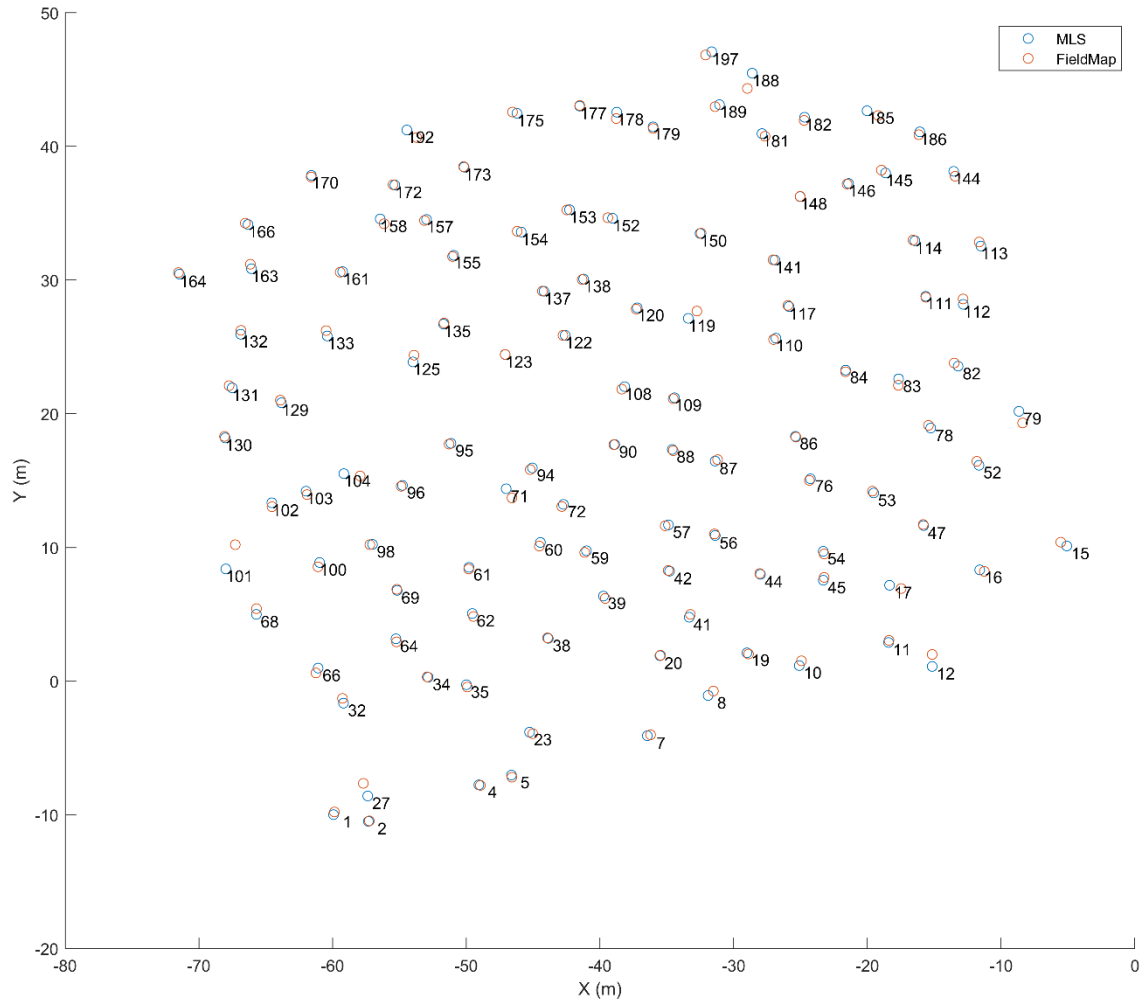
5.1.3. Pozice stromů - plocha 500318

Vzdálenost mezi pozicemi stromu, určených pomocí MLS a FieldMapu, se průměrně lišila o 0,30 m. Střední kvadratická chyba RMSE je 0,42 m. Dle regresní analýzy neexistuje závislost mezi vzdálenostmi odpovídajících si bodů a vzdáleností v jednotlivém směru osy x, nebo osy y. Nevzniká tedy systematická chyba. Na této ploše se nachází nejvíce stromů, s rozdílnými souřadnicemi, ve vzdálenosti přesahující 1 metr, což vychyluje hodnotu průměrné chyby. Po eliminování 5 % nejvyšších a 5 % nejnižších hodnot z výpočtu mírně klesne průměrná chyba na 0,27 m a RMSE na 0,33 m.



Graf 5: Vzdálenosti odpovídajících stromů na ploše 500318

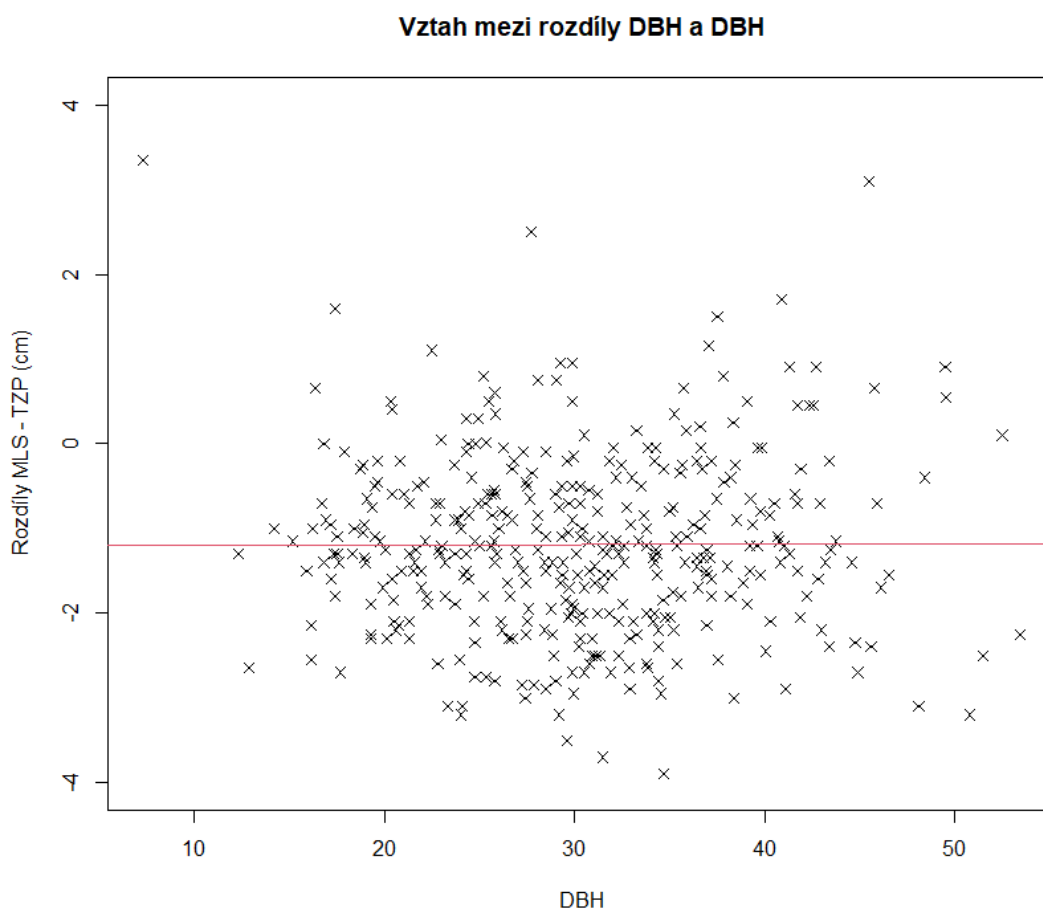
Pozice stromů na ploše 500318



Graf 6: Zobrazení pozic stromů dle MLS a FieldMapu s popiskem ID stromu

5.2. Výčetní tloušťky

Celkově bylo ověřeno 392 tloušťek. Dle párového t-testu poskytují metody měření systematicky odlišné výsledky při měření výčetní tloušťky. Dochází k podhodnocení měření výčetní tloušťky u mobilního laserového skenování s průměrnou chybou -1,19 cm. S 95% pravděpodobností se rozdíl středních hodnot nachází v intervalu -1,30 cm až -1,09 cm. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,58 cm. Lineární model neodhalil závislost mezi velikostí chyby (rozdílů DBH) a výčetní tloušťkou (DBH).



Graf 7: Vztah mezi rozdíly ve výčetních tloušťkách odpovídajících si stromů z MLS - TZP a výčetní tloušťkou (DBH). Červeně regresní přímka.

5.2.1. Výčetní tloušťka - plocha 500301

Dle párového t-testu poskytují metody měření systematicky odlišné výsledky při měření výčetní tloušťky. Dochází k podhodnocení měření výčetní tloušťky u mobilního laserového skenování s průměrnou chybou -1,09 cm.

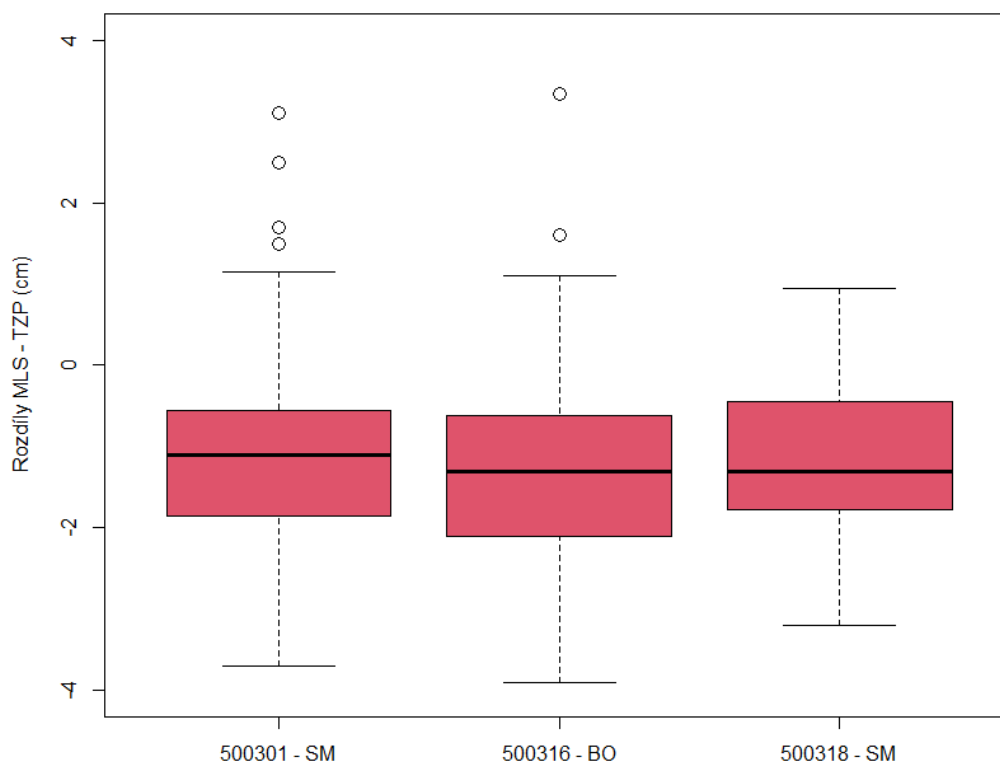
S 95% pravděpodobností se rozdíl středních hodnot nachází v intervalu -1,27 cm až -0,92 cm. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,54 cm.

5.2.2. Výčetní tloušťka - plocha 500316

Dle párového t-testu poskytují metody měření systematicky odlišné výsledky při měření výčetní tloušťky. Dochází k podhodnocení měření výčetní tloušťky u mobilního laserového skenování s průměrnou chybou -1,31 cm. S 95% pravděpodobností se rozdíl středních hodnot nachází v intervalu -1,5 cm až -1,12 cm. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,70 cm.

5.2.3. Výčetní tloušťka - plocha 500318

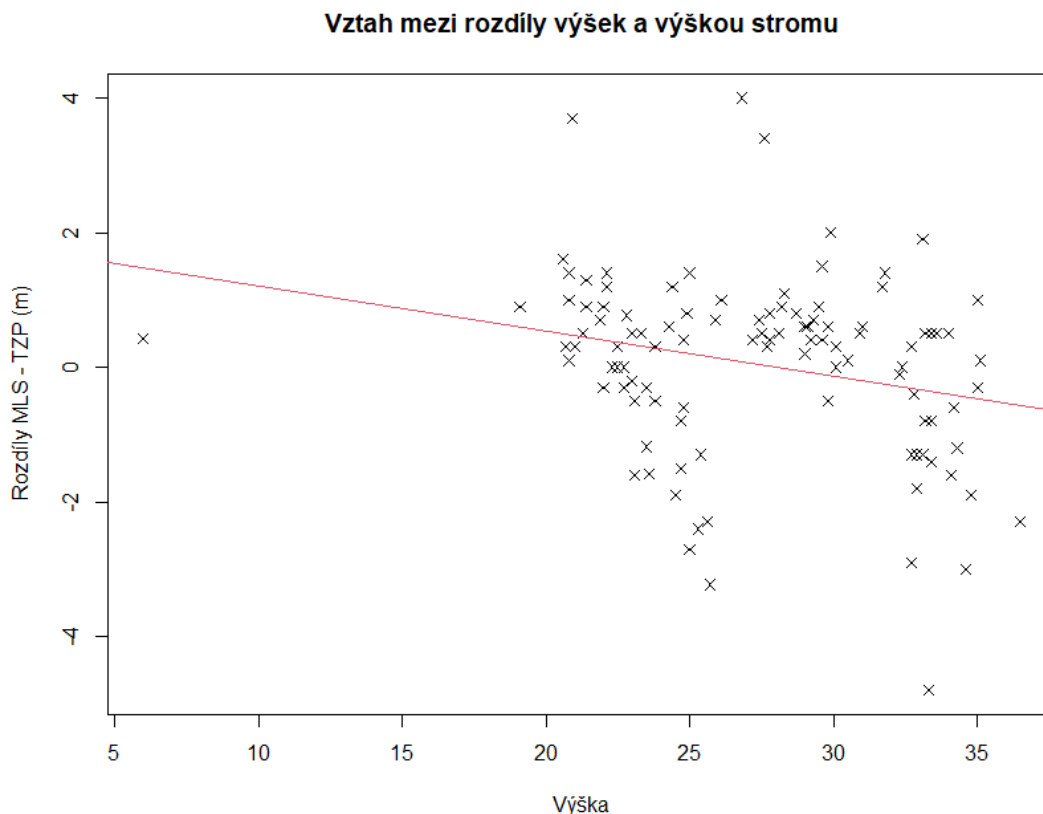
Dle párového t-testu poskytují metody měření systematicky odlišné výsledky při měření výčetní tloušťky. Dochází k podhodnocení měření výčetní tloušťky u mobilního laserového skenování s průměrnou chybou -1,19 cm. S 95% pravděpodobností se rozdíl středních hodnot nachází v intervalu -1,37 cm až -1,00 cm. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,53 cm.



Graf 8: Rozdíly ve výčetních tloušťkách odpovídajících si stromů z MLS - TZP na jednotlivých plochách

5.3. Výšky

Celkově bylo ověřeno 106 výšek. Dle párového t-testu poskytují metody měření výšek stejné výsledky bez statisticky významné chyby. S 95% pravděpodobností bude chyba střední hodnoty v intervalu -0,21 až 0,3 metru. Průměrná chyba je 4 cm. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,36 m. Lineární model neodhalil závislost mezi velikostí chyby (rozdílů výšek) a výškou stromu.



Graf 9: Vztah mezi rozdíly ve výčetních tloušťkách odpovídajících si stromů z MLS - TZP a výčetní tloušťkou (DBH). Červeně regresní přímka.

5.3.1. Výška - plocha 500301

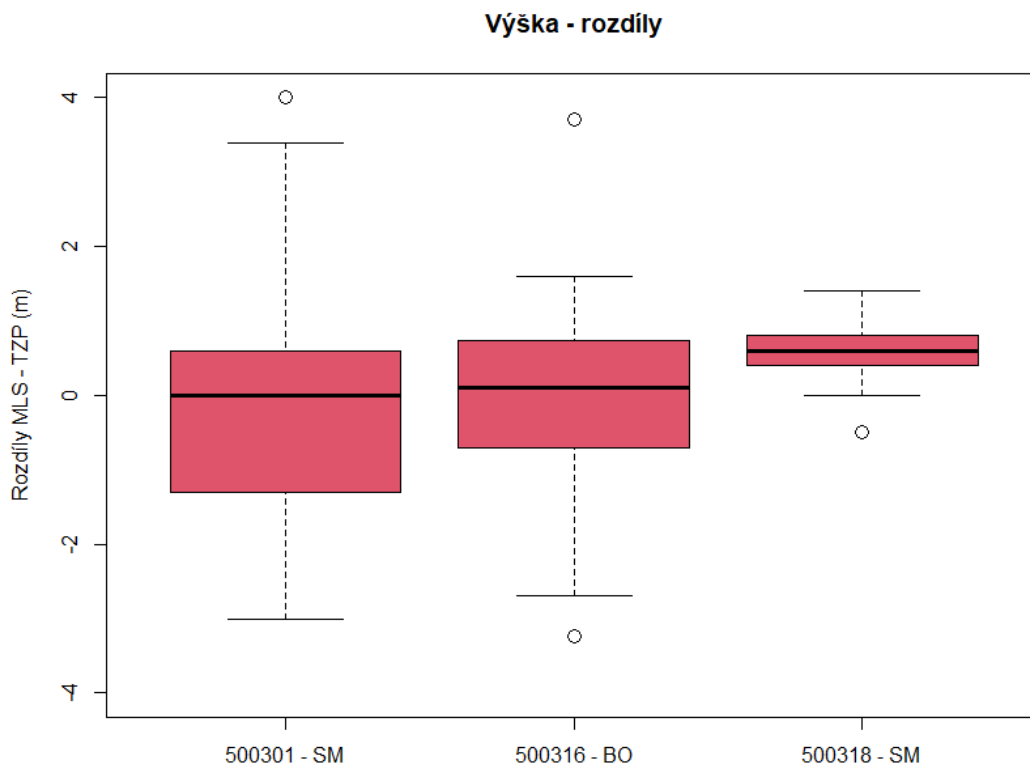
Dle párového t-testu poskytují metody měření výšek stejné výsledky bez statisticky významné chyby. S 95% pravděpodobností bude chyba střední hodnoty v intervalu -0,76 až 0,4 metru. Průměrná chyba je -18 cm laseru vůči měření přístrojem TruPulse. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,72 m.

5.3.2. Výška - plocha 500316

Dle párového t-testu poskytují metody měření výšek stejné výsledky bez statisticky významné chyby. Průměrná chyba je -8 cm laseru vůči měření přístrojem TruPulse. S 95% pravděpodobností se chyba střední hodnoty nachází v intervalu -0,49 až 0,32 m. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,31 m.

5.3.3. Výška - plocha 500318

Dle párového t-testu poskytují metody měření systematicky odlišné výsledky při měření výšky. Dochází k nadhodnocení hodnoty výšky u mobilního laserového skenování s průměrnou chybou 0,57 m. S 95% pravděpodobností se rozdíl středních hodnot nachází v intervalu 0,41 m až 0,73 m. Střední kvadratická chyba RMSE je 0,69 m.

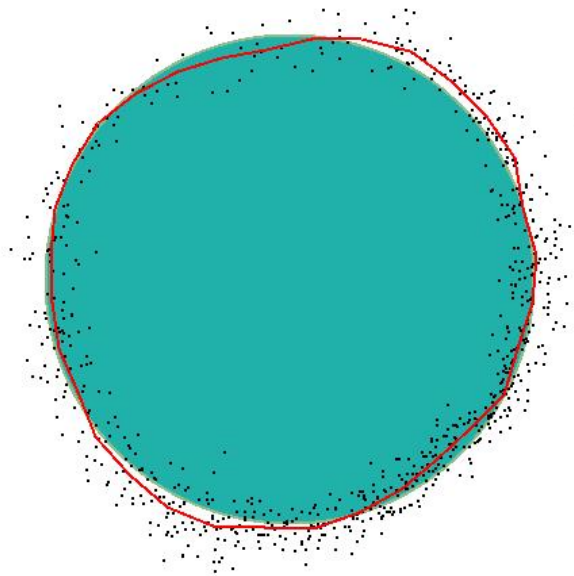


Graf 10: Rozdíly ve výškách odpovídajících si stromů z MLS - TYP na jednotlivých plochách.

6. Diskuse

Při ověření přesnosti zaměření pozic jednotlivých stromů byla vyhodnocena střední kvadratická chyba pro jednotlivé plochy s hodnotami 0,21 m, 0,24 m a 0,42 m. Laserové skenování s využitím technologie SLAM má tu výhodu, že není závislé na dostupném GNSS signálu. Může tak přesně a detailně mapovat své okolí. Při zpracování dat je pak pozice stromu určena pomocí algoritmů a modelu terénu přesně na střed, do osy kmene. Během zaměřování pozic pomocí přístroje TruPulse je zaznamenána pozice na povrchu kmene. U stromů velkých dimenzí tak vzniká chyba o velikosti poloměru kmene. Zaměření z různých staničních bodů navíc generuje mírně odlišnou pozici. Ověřováním pozic stromů pomocí ručního laserového skeneru se zabýval například Chen (2019). V porostu s převládajícím jerlínem japonským (*Sophora japonica*) určil pozice stromů s RMSE 0,26 m. MLS bylo porovnáváno se zaměřením pomocí zeměměřičské totální stanice. Hodnota RMSE z TZP je podobná, jako při měření Chen (2019) s využitím totální stanice. Lze konstatovat, že pozice stromů na TZP jsou měřeny se srovnatelnou přesností, které dosahují sofistikovanější přístroje. Přesnost je dostačující i pro praktické využití při sledování růstových trendů.

U měření výčetní tloušťky dochází k systematické odchylce měření. Lze vycházet z toho, že měření pomocí digitální průměrky lze označit jako referenční, i díky tomu, že na plochách je vyznačeno měřiště přesně v 1,3 metrech, pokud není v místě měření ovlivněna tloušťka např. poškozením kmene. Na všech plochách se projevilo podhodnocení výčetní tloušťky laserovým skenerem. Pro smrkové plochy je hodnota RMSE 1,54 a 1,53 cm. Pro plochu s borovicí je RMSE rovna 1,70 cm. Podobné hodnoty vyzoroval také Bauwens (2016), který měřil výčetní tloušťku stromů různých druhů se střední kvadratickou odchylkou RMSE 1,1 cm. Bauwens dále uvádí, že tato odchylka může být způsobena šumem laserového skeneru, který je u mobilních skenerů vyšší než u skenerů statických. Ruční skenery mají taktéž nižší přesnost než statické a vliv na měření lze předpokládat i u stromů s hrubší borkou.



Obrázek 11: Výřez kmene z bodového mračna ve výčetní tloušťce s dobře rozpoznatelným šumem laserového skeneru, který se projevuje rozptýleností bodů od relativně celistvého povrchu. (z prostředí programu DendroCloud)

Gollob (2020) k laserovému skenování použil stejný ruční přístroj ZEB-HORIZON. U smrkových ploch detekoval výčetní tloušťku s RMSE v rozsahu mezi 2,37 cm a 3,26 cm. Stejně jako v této práci se jedná o podhodnocení tloušťky z MLS. Tato chyba se zvětšuje s většími tloušťkami stromů. U výčetních tloušťek nižších než 10 cm, je naopak hodnota z MLS nadhodnocena. Závislost velikosti odchylky z MLS na velikosti výčetní tloušťky nebyla v této práci prokázána. Hodnoty RMSE v podobném rozsahu vykazuje ve své práci také Liu (2018).

Systematické podhodnocení výčetní tloušťky oproti klasickému měření průměrkou a hodnota RMSE je v souladu se závěry jiných autorů (Bauwens 2016; Liu 2018). Lze tak konstatovat, že klasické měření výčetní tloušťky na TZP probíhá přesně.

Šetření měření výšek neprokázalo systematickou chybu u celkového souboru všech měřených výšek. Střední kvadratická odchylka RMSE je 1,36 m a průměrná chyba 4 cm. Na ploše 500318 byla po vyhodnocení t-testu zamítnuta hypotéza, že střední hodnota rozdílů je rovna nula. Měření vykazují

systematické podhodnocení přístrojem TruPulse s průměrnou chybou 0,57 m. Postup extrakce výšek z bodového mračka byl stejný jako u ostatních ploch, není proto předpoklad, že by vznikla systematická chyba během zpracování laserových dat. K vyloučení možnosti vzniku chyby při segmentaci byla tato plocha zpracována také s použitím algoritmu a postupu dle Kuželka (2020). Podobnými hodnotami průměrné chyby 0,68 m a RMSE 1,34 m však alternativní postup potvrzuje, že chyba mohla vzniknout spíše při měření přístrojem TruPulse, mírným systematickým podhodnocením výšek. Střední kvadratická odchylka všech výšek je podobná jako u Liu (2018), kde byly ověřovány dendrometrické veličiny převážně v jehličnatých porostech různých věkových stádií, pomocí statického pozemního skenování. Měření výšek vyspělých porostů smrku a jedle (*Picea & Abies fabri*) vykazovalo RMSE 1,28 m, u borovic 0,76 m (*Pinus densata*), resp. 0,54 m (*Pinus yunnanensis*).

Měření výšek na TZP probíhá s dostatečnou přesností potřebnou pro praktické sledování růstových trendů. Vyhodnocení výsledků však odhalilo systematické podhodnocení o 0,57 m na jedné z ploch. Přesnost výšek měřených pomocí TruPulse je limitována samotným přístrojem, který detekuje jeden pulz a pouze první odraz. Nemusí tak být detekován nejvyšší bod stromu. Zároveň je měření každého stromu ovlivňováno lidským faktorem. Pomocí ručního skeneru ZEB-HORIZON lze dosáhnout vyšší přesnosti, navíc v kratším čase a pro všechny stromy na ploše.

7. Závěr

Na vybraných trvalých zkusných plochách byla ověřena přesnost měření tří dendrometrických veličin: pozice, výčetní tloušťka a výška stromu. Klasické manuální měření bylo porovnáno s mobilním laserovým skenováním realizovaným ručním skenerem GeoSLAM ZEB-HORIZON ve spolupráci s katedrou HÚL. Z naskenovaných bodových mračen byly vysegmentovány jednotlivé stromy a následně určeny jejich parametry. Po přiřazení vysegmentovaných stromů a jejich hodnot k odpovídajícím datům stromů z TZP, bylo provedeno statistické vyhodnocení.

Pro ověření přesnosti pozic stromů byla vypočtena vzdálenost mezi odpovídajícími souřadnicemi z TZP a laserového skenování. Pro jednotlivé plochy byla zjištěna střední kvadratická odchylka RMSE s hodnotami 0,21 m, 0,24 m a 0,42 m.

Vyhodnocení výčetních tlouštěk poukázalo na systematické podhodnocování mobilního laserového skenování s RMSE 1,54 m a průměrnou chybou -1,19 cm. Statistické vyhodnocení nepotvrdilo závislost mezi velikostí odchylky a tloušťkou.

Dále bylo ověřeno 106 naměřených výšek. Střední kvadratická chyba RMSE je 1,36 m. Na ploše 500318 bylo rozpoznáno systematické podhodnocení výšek u měření s přístrojem TruPulse, a to s průměrnou chybou 0,57 m. Statistické vyhodnocení nepotvrdilo závislost mezi velikostí odchylky a výškou stromu.

Z porovnání s laserovým skenováním lze odvodit, že měření na TZP s pomocí klasických dendrometrických metod probíhá s dostatečnou přesností pro potřeby produkčního výzkumu a odvození růstových trendů. Pozemní laserové skenování však umožňuje efektivněji a přesněji zaznamenat výšky a pozice stromů. Proto by si zasloužilo další pozornost pro větší uplatnění v lesnictví, například při ověřování přesnosti dendrometrických veličin listnatých dřevin měřených na TZP.

8. Seznam literatury a použitých zdrojů

ASTRUP, Rasmus, Mark DUCEY, Aksel GRANHUS, Tim RITTER a Nikolas VON LÜPKE, 2014. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. **44**(6), 666-676 [cit. 2022-03-31]. ISSN 0045-5067. Dostupné z: doi:10.1139/cjfr-2013-0535

BALTSAVIAS, Emmanuel P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. **54**(2-3), 83-94 [cit. 2022-04-09]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-2716(99)00014-3

BAUWENS, Sébastien, Harm BARTHOLOMEUS, Kim CALDERS a Philippe LEJEUNE, 2016. Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning. *Forests* [online]. **7**(12) [cit. 2022-04-01]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f7060127

CAMPBELL, James a Randolph WYNNE, 2011. *Introduction to Remote Sensing*. 5th Edition. New York: The Guilford Press. ISBN 13: 9781609181765.

CLOUDCOMPARE, 2022. *CloudCompare* [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://www.cloudcompare.org/>

DOLANSKÝ, Tomáš, 2004. *Lidary a letecké laserové skenování. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. Acta Universitatis Purkynianae*. ISBN 80-704-4575-0.

DULAL, SAURAB, 2018. *Octree Construction and Nearest Neighborhood Search(NNS)* [online]. In: . [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://dulalsaurab.github.io/computerscience/octree-construction-and-nns/>

DURRANT-WHYTE, H. a T. BAILEY, 2006. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine* [online]. **13**(2), 99-110 [cit. 2022-04-09]. ISSN 1070-9932. Dostupné z: doi:10.1109/MRA.2006.1638022

ForestHQ [online], 2022. Treemetrics Ltd. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: www.treemetrics.com

GEOSLAM, 2020. *ZEB-HORIZON User Manual* [online]. GeoSLAM Ltd. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/02/ZEB-Horizon-User-Manual-v1.3.pdf>

GOLLOB, Christoph, Tim RITTER a Arne NOTHDURFT, 2020. Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. *Remote Sensing* [online]. **12**(9) [cit. 2022-04-01]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12091509

HALOUNOVÁ, Lena a Karel PAVELKA, 2008. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-3124-1.

HYYPPÄ, J., A. JAAKKOLA, Y. CHEN a A. KUKKO, 2013. Unconventional LIDAR mapping from air, terrestrial and mobile. In: FRITSCH, Dieter. *Photogrammetric Week 13* [online]. s. 205-214 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo13/180Hyyppae.pdf>

HYYPPÄ, J a M. INKINEN, 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* [online]. 27-42 [cit. 2022-04-01].

HYYPPÄ, Juha, Xiaowei YU, Teemu HAKALA, Harri KAARTINEN, Antero KUKKO, Heikki HYYTI, Jesse MUHOJOKI a Eric HYYPPÄ, 2021. Under-Canopy UAV Laser Scanning Providing Canopy Height and Stem Volume Accurately. *Forests* [online]. **12**(7) [cit. 2022-04-01]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f12070856

CHEN, Shilin, Haiyang LIU, Zhongke FENG, Chaoyong SHEN, Panpan CHEN a Claudionor RIBEIRO DA SILVA, 2019. Applicability of personal laser scanning in forestry inventory. *PLOS ONE* [online]. **14**(2) [cit. 2022-04-03]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0211392

JACKSON, Ray a Alfredo HUETE, 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine* [online]. **11**(3-4), 185-200 [cit. 2022-04-09]. ISSN 01675877. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-5877(05)80004-2

JELÍNKOVÁ, Helena, ed., 2013. *Lasers for medical applications: Diagnostics, Therapy and Surgery*. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-0-85709-237-3.

JENSEN, John R., 2014. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* [online]. 2nd Edition. Harlow: Pearson Education Limited [cit. 2022-03-30]. ISBN 13: 978-1-292-02170-6.

KOCH, Barbara, Teja KATTENBORN, Christoph STRAUB a Jari VAUHKONEN, 2014. Segmentation of Forest to Tree Objects. MALTAMO, Matti, Erik Næsset a Jari VAUHKONEN, ed. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, s. 89-112 [cit. 2022-04-10]. Managing Forest Ecosystems. ISBN 978-94-017-8662-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-8663-8_5

KOREŇ, Milan. *DendroCloud User Guide* [online]. Technical University in Zvolen [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <http://gis.tuzvo.sk/dendrocloud/download/>

KUČERA, Miloš, Radim ADOLT, Ivo KOHN et al., 2019. *Národní inventarizace lesů v České republice - výsledky druhého cyklu (2011-2015)* [online]. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem [cit. 2022-04-07]. ISBN 978-80-88184-23-2. Dostupné z: https://nil.uhul.cz/downloads/2019_kniha_nil2_web.pdf

KUKKO, Antero, Risto KAIJALUOTO, Harri KAARTINEN, Ville LEHTOLA, Anttoni JAAKKOLA a Juha HYYPPÄ, 2017. Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. **132**, 199-209 [cit. 2022-04-01]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.09.006

KUŽELKA, Karel, Martin SLAVÍK a Peter SUROVÝ, 2020. Very High Density Point Clouds from UAV Laser Scanning for Automatic Tree Stem Detection and Direct Diameter Measurement. *Remote Sensing* [online]. **12**(8) [cit. 2022-04-02]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12081236

KUŽELKA, Karel a Peter SUROVÝ, 2018. *Statistika v R: zpracování dat závěrečných prací pro lesnické obory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2921-8.

LIANG, Xinlian, Ville KANKARE, Juha HYYPPÄ et al., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. **115**, 63-77 [cit. 2022-03-31]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006

LI, Shihua, Leiyu DAI, Hongshu WANG, Yong WANG, Ze HE a Sen LIN, 2017. Estimating Leaf Area Density of Individual Trees Using the Point Cloud Segmentation of Terrestrial LiDAR Data and a Voxel-Based Model. *Remote Sensing* [online]. **9**(11) [cit. 2022-04-10]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs9111202

LIU, Guangjie, Jinliang WANG, Pinliang DONG, Yun CHEN a Zhiyuan LIU, 2018. Estimating Individual Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at Plot Level. *Forests* [online]. **9**(7) [cit. 2022-04-03]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f9070398

LUKEŠ, Petr, 2018. *Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí satelitních dat Sentinel-2*. 1. vydání. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů. ISBN 978-80-88184-21-8.

MALTAMO, M., O. BOLLANDSAS, E. NAESSET, T. GOBAKKEN a P. PACKALEN, 2011. Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory. *Forestry* [online]. **84**(1), 23-31 [cit. 2022-03-31]. ISSN 0015-752X. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/cpq039

METZ, Jérôme, Dominik SEIDEL, Peter SCHALL, Dina SCHEFFER, Ernst-Detlef SCHULZE a Christian AMMER, 2013. Crown modeling by terrestrial laser scanning as an approach to assess the effect of aboveground intra- and interspecific competition on tree growth. *Forest Ecology and Management* [online]. **310**, 275-288 [cit. 2022-04-03]. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2013.08.014

MILLS, T. N., 1990. An Introduction to Lasers and Laser Physics. MCNICHOLAS, T. A., ed., T. MCNICHOLAS. *Lasers in Urology* [online]. London: Springer London, s. 1-21 [cit. 2022-04-09]. The Bloomsbury Series in Clinical Science. ISBN 978-1-4471-1785-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-1783-4_1

OLOFSSON, Kenneth, Johan HOLMGREN a Håkan OLSSON, 2014. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. *Remote Sensing* [online]. **6**(5), 4323-4344 [cit. 2022-04-02]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs6054323

Procrustes. In: *MATHWORKS* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/stats/procrustes.html#responsive_offcanvas

REUTEBUCH, Stephen, Hans-Erich ANDERSEN a Robert MCGAUGHEY, 2005. Light Detection and Ranging (LIDAR): An Emerging Tool for Multiple Resource Inventory. *Journal of Forestry* [online]. (103), 286-292 [cit. 2022-04-09].

SIMONSE, Merlijn, Tobias ASCHOFF, Heinrich SPIECKER a Michael THIES, 2003. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laser Scanning. In: *Proceedings of the Scandlaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*. Ume^oa, Sweden, s. 251-257.

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

SUROVÝ, Peter a Karel KUŽELKA, 2019b. Acquisition of Forest Attributes for Decision Support at the Forest Enterprise Level Using Remote-Sensing Techniques—A Review. *Forests* [online]. **10**(3) [cit. 2022-04-02]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f10030273

TARASOV, L. V., 1986. *Laser Physics and Applications*. Moscow: Mir Publishers.

TROCHTA, Jan, Martin KRŮČEK, Tomáš VRŠKA, Kamil KRÁL a Jian YANG, 2017. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest

structures using terrestrial LiDAR. *PLOS ONE* [online]. **12**(5) [cit. 2022-04-01]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0176871

ÚHÚL, 2021. *Pracovní postup terénního sběru dat na TZP*. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem.

VAN LEEUWEN, Martin a Maarten NIEUWENHUIS, 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research* [online]. **129**(4), 749-770 [cit. 2022-04-09]. ISSN 1612-4669. Dostupné z: doi:10.1007/s10342-010-0381-4

VAUHKONEN, Jari, Matti MALTAMO, Ronald MCROBERTS a Erik NæSSET, 2014. Introduction to Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, s. 1-16 [cit. 2022-04-04]. Managing Forest Ecosystems. ISBN 978-94-017-8662-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-017-8663-8_1

VRBOVÁ, Miroslava, 1994. *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus. Oborová encyklopedie. ISBN 80-858-4956-9.

WAGNER, W, A. ULRICH, T. MELZER, C. BRIESE a K. KRAUSE, 2004. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. **2004**(35), 414–419 [cit. 2022-04-07].

WEHR, Aloysius a Uwe LOHR, 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. **54**(2-3), 68-82 [cit. 2022-03-31]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-2716(99)00011-8

WHITE, Joanne, John ARNETT, Michael WULDER, Piotr TOMPALSKI a Nicholas COOPS, 2015. Evaluating the impact of leaf-on and leaf-off airborne laser scanning data on the estimation of forest inventory attributes with the area-based approach. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. **45**(11), 1498-1513 [cit. 2022-04-07]. ISSN 0045-5067. Dostupné z: doi:10.1139/cjfr-2015-0192