Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra Hospodářské úpravy lesa

Měření architektury stromu moderními dendrometrickými postupy

Measurement of tree architecture by modern dendrometric procedures

Disertační práce

Autor práce: Ing. Šleglová Kristýna

Vedoucí: doc. Ing. Peter Surový, Ph.D.

Konzultant: prof. Ing. Nuno de Almeida Ribeiro, Ph.D.

Studijní program: Hospodářská úprava lesa

Praha 2024

Zadání

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Autorka práce:	Ing. Kristýna Šleglová
Studijní program:	Hospodářská úprava lesa
Vedoucí práce:	doc. Ing. Peter Surový, PhD.
Garantující pracoviště:	Katedra hospodářské úpravy lesů a DPZ
Jazyk práce:	Čeština
Název práce:	**Měření architektury stromu moderními dendrometrickými postupy**
Název anglicky:	**Measurement of tree architecture by modern dendrometric procedures.**

Cíle práce:

Cílem práce je vytvořit postupy pro získávání trojrozměrných dat o architektuře stromu, pro modelovaní a analýzu růstu stromu pomoci strukturálních růstových modelu.

V práci budou vytvořeny:

1) Metodika a postup pro zjišťování údajů o struktuře nadzemní a podzemní části stromu pomoci magnetického digitizéru;

2) Zhodnoceni použiti tohoto typu měřeni pro nadzemní architekturu dřevin,

3) Zhodnoceni použiti tohoto typu měřeni pro hodnoceni podzemní morfologie kořenové soustavy;

4) Srovnaní měřeni pomoci magnetického digitizéru a jiných moderních dendrometrických metod zejména fotogrammetrie, nebo lidaru.

Výsledky budou publikovány v odborných časopisech s impakt faktorem registrovaných na WoS.

Metodika:

Metodika je založená na měření architektury dřevin, a to jak podzemní, tak nadzemní části. Měření bude probíhat pomocí magnetického digitizéru Fastrak Polhemus.

V hodnoceni nadzemní části se práce zaměří na moznost zachyceni vlivu světelných podmínek na tvorbu architektury stromu, ideálně v porostech s různým typem zápoje a podobně.

U podzemní architektury se práce zaměří na získaní struktury kořenového systému, ideálně u stejné dřeviny v podmínkách různých závlahových režimu, zhodnocení množství vody pro tvorbu kořenu a moznost hodnoceni pomoci tohoto typu měření.

Měření se uskuteční v České republice, na Slovensku a v Portugalsku.

U nadzemní se zhodnotí a srovná navrhovaný postup s dalšími postupy podle bodu 4 v části cíle a to zejména s laserovým skenováním a fotogrammetrickými metodami.

Doporučený rozsah práce:	60-80 stran
Klíčová slova:	Magnetický digitizer, 3D zobrazení, struktura kořenů, struktura korun

Doporučené zdroje informací:

1. Danjon F, Reubens B (2008) Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation.
2. FABRIKA, Marek; PRETZSCH, Hans. *Analýza a modelovanie lesných ekosystémov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. ISBN 978-80-228-2181-0.
3. Kurth, W. Specification of morphological models with L-systems and relational growth grammars. IMAGE. Z. Für Interdiszip. Bild. 2007, 3, 50–79.
4. Mutke S, Sieva¨nen R, Nikinmaa E, Perttunen J, Gil L (2005) Crown architecture of grafted Stone pine (Pinus pinea L.): shoot growth and bud differentiation.
5. Observations on 3-dimensional crown growth of Stone pine, Peter Surový, Nuno Ribeiro, Joa˜o Santos Pereira
6. Oppelt, A.L.; Kurth, W.; Dzierzon, H.; Jentschke, G.; Godbold, D.L. Structure and fractal dimensions of root systems of four co-occurring fruit tree species from Botswana. Ann. For. Sci. 2000, 57, 463–475.
7. Oppelt, A.L.; Kurth, W.; Godbold, D.L. Topology, scaling relations and Leonardo's rule in root systems from African tree species. Tree Physiol. 2001, 21, 117–128.
8. Prusinkiewicz P, Hammel M, Hanan J, Mech R (1996) Visual models of plant development. In: Rozenberg G, Salomaa A (eds) Handbook of formal languages, vol. III: beyond words. Springer-Verlag New York,
9. Sievänen, R.; Nikinmaa, E.; Nygren, P.; Ozier-Lafontaine, H.; Perttunen, J.; Hakula, H. Components of functional-structural tree models. Ann. For. Sci. 2000, 57, 399–412.
10. Surový, P., Ribeiro, N., Pereira, J. A. (2011) Obawrvations on 3-dimensional crown growth of stone pine. Agroforestry systems
11. Surový, P., Yoschimoto, A., N.A., R. (2012). Comparison of proning regismes for stone pine using a functional – structural plant model. Formath Sapporo

Předběžný termín: 2023/24 LS - FLD - Obhajoba DisP

Elektronicky schváleno: 19. 3. 2024
doc. Ing. Peter Surový, PhD.
Vedoucí katedry

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Měření architektury stromu moderními dendrometrickými postupy“ vypracovala samostatně a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji disertační 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 vědoma, že odevzdáním disertační 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 verzi tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne …… Ing. Kristýna Šleglová

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Peteru Surovému, Ph.D., za odborné vedení, cenné připomínky a ochotu při konzultacích během vypracovávání disertační práce. Také bych chtěla poděkovat prof. Ing. Nuno de Almeida Ribeiro, Ph.D., Ing. Constança de Sampaio e Paiva Camilo-Alves, Ph.D. a dalším kolegům z Universidade de Évora za spolupráci při získávání dat a při konzultacích během mého doktorského studia. Mé poděkování patří také doc. Ing. Janu Kašparovi, PhD., za cenné připomínky a odborné rady při závěrečných úpravách disertace. V neposlední řadě také děkuji mé rodině za jejich trpělivost a neustálou podporu.

Měření architektury stromu moderními dendrometrickými postupy

Abstrakt

Tato práce se soustředí na měření pomocí magnetického digitizéru Fastrak Polhemus, zařízení určeného k přesnému snímání polohy v prostoru. Vzhledem k tomu, že dosud nebyla stanovena metodika pro získávání strukturálních dat touto metodou, je zde podrobně zpracován celý postup měření. Důraz je kladen na to, jak správně měřit složitá data a zajistit, aby byla co nejpřesněji převedena do 3D modelů. V práci je popsán celý proces, od správného nastavení přístroje, přes metodiku sběru dat, až po jejich následné zpracování, čímž je zajištěna maximální přesnost výsledků. Hodnocení použití tohoto typu měření pro nadzemní architekturu stromů bylo provedeno na třech druzích dřevin. Prvním druhem byla borovice lesní, druhým dub korkový a třetím buk lesní. U borovice byla zkoumána závislost hustoty porostu na výšce jedinců přirozené obnovy a množství biomasy. U dubu korkového byla sledována orientace koruny v závislosti na zavlažování. U buku lesního byl soustředěn zájem na vztah mezi specifickou listovou plochou, transpirací vody a orientací listů a koruny vůči světovým stranám. K získání přesných údajů bylo využito magnetického digitizéru Fastrak Polhemus, který zajistil vysokou přesnost měření. Hodnocení podzemní morfologie kořenové soustavy bylo provedeno pouze u dřeviny dub korkový, kde byl zkoumán vliv zavlažování a sucha. V druhém případě se zkoumal vliv zalévacího systému na růst kořenů. Pro získání co nejpodrobnějších dat byl zvolen magnetický digitizér jako nejvhodnější metoda. Tato volba se během měření ukázala jako správná, neboť umožnila velmi přesné výsledky. Díky šetrnému čištění kořenů bylo možné změřit i jemné kořínky, což by u jiných metod nebylo možné. Tato technologie tak poskytla detailní informace o rozvoji kořenového systému, které by jinými způsoby nebylo možné získat. Při porovnání magnetického digitizéru s fotogrammetrií byla zvolena metoda fotogrammetrie. Analýza zahrnovala 28 stromů, které byly rovnoměrně rozděleny mezi listnaté a jehličnaté dřeviny. Parametry jako DBH (průměr kmene), výšky a objemy stromů, včetně objemů jednotlivých větví až do čtvrtého řádu, a počet větví v různých řádech byly srovnávány. Nejmenší rozdíly byly pozorovány u výšky stromů, zatímco největší odchylky se objevily u počtu větví v jednotlivých řádech. Bylo zjištěno, že fotogrammetrie obvykle nadhodnocuje hodnoty ve srovnání s metodou Fastrak.

Klíčová slova: 3D modely, architektura koruny, architektura kořenů, Fastrak Polhemus

Measurement of tree architecture by modern dendrometric procedures

Abstract

This work focuses on measurements using the Fastrak Polhemus magnetic digitizer, a device designed to accurately sense position in space. Since no methodology has yet been established for obtaining structural data by this method, the entire measurement procedure is detailed here. Emphasis is placed on how to properly measure complex data and ensure that it is converted into 3D models as accurately as possible. The entire process is described, from the correct instrument setup to the data collection methodology, to the subsequent processing of the data, ensuring maximum accuracy of the results. An evaluation of the use of this type of measurement for aboveground tree architecture was carried out on three tree species. The first species was Scots pine, the second cork oak and the third beech. For Scots pine, the dependence of stand density on the height of natural regeneration individuals and the amount of biomass was investigated. In cork oak, the crown orientation in relation to irrigation was studied. In beech, interest was focused on the relationship between specific leaf area, water transpiration and leaf and canopy orientation to cardinal directions. A Fastrak Polhemus magnetic digitizer was used to obtain accurate data, which ensured high accuracy of measurements. The assessment of the belowground root system morphology was carried out only for the cork oak tree species, where the effect of irrigation and drought was investigated. In the second case, the effect of watering on root growth was investigated. To obtain the most detailed data, the magnetic digitizer was chosen as the most appropriate method. This choice proved to be correct during the measurements. Due to the gentle cleaning of the roots, it was possible to measure even fine roots, which would not have been possible with other methods. This technology thus provided detailed information on the development of the root system. When comparing the magnetic digitizer with photogrammetry, the photogrammetry method was chosen. The analysis included 28 trees that were evenly split between deciduous and coniferous species. Parameters such as DBH (trunk diameter), tree heights and volumes, including the volumes of individual branches up to the fourth order, and the number of branches in different orders were compared. The smallest differences were observed for tree height, while the largest variations were observed for the number of branches in each row. It was found that photogrammetry usually overestimates the values compared to the Fastrak method.

Keywords: 3D models, crown architecture, root architecture, Fastrak Polhemus

Obsah

1 Úvod ... 18

1.1 Vývoj koruny ... 19

1.2 Vývoj kořenového systému ... 21

1.3 Vývoj a aplikace 3D digitalizace ... 23

1.3.1 Počátky a Vývoj 3D digitalizace ... 23

1.3.2 Techniky používané v 3D digitalizaci ... 24

1.3.3 Aplikace 3D digitalizace v lesnictví ... 24

1.3.4 Budoucnost 3D digitalizace ... 25

2 Trojrozměrná data ... 26

2.1 Povrchová data ... 26

2.2 Strukturální data ... 28

3 Architektura Koruny ... 31

3.1 Typy architektury koruny ... 31

4 Architektura Kořenů ... 36

4.1 Popis kořenového systému ... 37

4.1.1 Podrobný popis kořenového systému ... 38

4.2 Aspekty ovlivňující architekturu kořenového systému ... 42

4.2.1 Vodní stres ... 43

4.2.2 Transpirace vody ... 44

4.2.3 Dusičnan ... 45

4.2.4 Fosfor ... 46

4.3 Vykopání kořenů ... 46

5 Morfologie stromů ... 48

6 Modely dřevin ... 50

6.1 Klasifikace modelů lesů ... 53

6.2 Časově – hierarchická úroveň ... 53

6.3 Hiearchicko – prostorová úroveň ... 56

6.4 Empirické modely ... 60

6.5 Procesní modely ... 64

6.6 Strukturální modely ... 70

6.6.1 Bezkontextovo determinické L – systémy ... 74

6.6.2 Závorkové L – systémy ... 75

6.6.3 Stochastické L – systémy ... 76

6.6.4 Parametrické L-systémy ... 76

6.6.5 Kontextovo – sensitivní L-systémy ... 77
6.6.6 Modelování rostlinných orgánů ... 77
7 3D modely ... 82
7.1 Metoda fotogrammetrie pro získání 3D modelů dřevin ... 82
7.2 Metoda Lidar pro získání 3D modelů dřevin ... 83
7.3 Metoda digitalizace 3D modelů pomocí magnetického digitizéru ... 84
8 Metodika ... 85
8.1 Charakteristika zájmových území ... 85
8.2 Struktura dřevin ... 94
8.2.1 Modelovací softwary použité v mém PhD. ... 94
9 Výsledky ... 99
9.1 Metodika a postup pro získávání trojrozměrných dat o architektuře stromu, pro modelování analýzy růstu stromu pomoci strukturálních růstových modelů ... 99
9.1.1 Pomůcky pro měření ... 99
9.1.2 Fastrack Polhemus – Magnetický digitizér ... 100
9.1.3 Zapojení Přístroje ... 114
9.1.4 Sběr dat ... 138
9.1.5 Nadzemní část ... 138
9.1.6 Podzemní část ... 140
9.1.7 Chyby při měření ... 144
9.2 Zhodnoceni použití tohoto typu měření pro nadzemní architekturu dřevin ... 147
9.2.1 3D modely měřených borovic lesních ve čtyřech různých zkamenění. ... 152
9.2.2 3D modely Fagus sylvatika – červeně jsou označené listy. ... 162
9.3 Zhodnocení použití tohoto typu měřeni pro hodnoceni podzemní morfologie kořenové soustavy ... 164
9.3.1 3D modely Quercus suber – červené linie znázorňují hadice a vyskytují se pouze u feernetovaných jedinců ... 171
9.3.2 Srovnání plochy využívané kořenovým a korunovým systémem ... 174
9.4 Srovnání měření pomocí magnetického digitizéru a jiných moderních dendrometrických metod, zejména fotogrammetrie, nebo lidaru. ... 180
9.4.1 Ukázky listnatých dřevin porovnání dvou metod fotogrammetrie a Fastraku Polhemusu…… ... 209
9.4.2 Ukázky jehličnatých dřevin porovnání dvou metod fotogrammetrie a Fastraku Polhemusu ... 215
10 Diskuze ... 220
10.1 Zhodnoceni použití tohoto typu měření pro nadzemní architekturu dřevin ... 220
10.2 Zhodnocení použití tohoto typu měřeni pro hodnoceni podzemní morfologie kořenové soustavy ... 225

10.3 Srovnaní měřeni pomoci magnetického digitizeru a jiných moderních dendrometrických metod zejména fotogrammetrie ... 229

11 Závěr ... 233

12 Bibliografické zdroje ... 234

12.1 Příloha A – Quercus suber rostoucí pod různým zápojem ... 257

12.2 Příloha A – Quercus suber rostoucí na kopci ... 259

12.3 Příloha B – Quercus seber rostoucí pod kopcem ... 260

12.4 Příloha C – Kořen Quesrcus ilex měřený pro Museum ... 262

12.5 Příloha D – Publikace ... 263

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rekonstrukce společenstva stromů Calamophyton prim. (Giesen et al., 2013a) .. 19
Obrázek 2: Ukázky nalezených fosilních kmenů (Giesen et al., 2013a)..... 20
Obrázek 3: Strukturální model podzemních i nadzemních orgánů dubu korkového (Kuželka et al., 2014)..... 29
Obrázek 4: Rekonstrukce architektury borovice piniové (Surový et al., 2011b)..... 30
Obrázek 5: Různé morfologické formy korun stromů (Fabrika et al., 2011)..... 35
Obrázek 6: Ukázka Tap root 39
Obrázek 7: Ukázka searching root 39
Obrázek 8: Ukázka hloubkového kořene 40
Obrázek 9: Ukázky primárního laterálního kořene 40
Obrázek 10: Ukázka hloubkového kořene 41
Obrázek 11: Ukázka kořenové rouby..... 42
Obrázek 12: Klasifikace modelů lesa a základě metod modelování (Fabrika et al., 2011) 53
Obrázek 13: Graf časovo – hierarchické úrovně (Fabrika et al., 2011) 56
Obrázek 14: Klasifikace modelů podle hierarchicko-prostorové úrovně (Fabrika et al., 2011) 60
Obrázek 15: Jednosměrný přístup a prostorový přístup (Fabrika et al., 2011) 66
Obrázek 16: Horizontální vertikální a sférické úhly (Fabrika et al., 2011) 67
Obrázek 17: Ilustrace kořenově orientovaného preferenčního proudění (Mair et al., 2022) ... 68
Obrázek 18: Ukázka kódů želví 2D grafiky (Fabrika et al., 2011) 71
Obrázek 19: Ukázka představy směru Orlí grafiky (Fabrika et al., 2011) 71
Obrázek 20: Ukázka kódů želví 2D grafiky (Fabrika et al., 2011) 71
Obrázek 21: Coantorovo diskontinuum a Sierpinskí trojúhelník (Mandelbrot, 1989) 73
Obrázek 22: Popis osového stromu (podle Fabrika et al., 2011) 76
Obrázek 23: Bikubická záplata (Fabrika et al., 2011)..... 77
Obrázek 24: Ukázka fylotaxie (Fabrika et al., 2011) 78
Obrázek 25: Karteziánské 2D souřadnice (Fabrika et al., 2011) 79
Obrázek 26: Polární souřadnice 2D (Fabrika et al., 2011)..... 79
Obrázek 27: Karteziánské 3D souřadnice (Fabrika et al., 2011) 80
Obrázek 28: Cylindrické souřadnice (Fabrika et al., 2011) 80
Obrázek 29: Sférické souřadnice (Fabrika et al., 2011)..... 81

Obrázek 30: Výzkumná místa v Portugalsku 85
Obrázek 31: Výzkumné stromy umístěné na ploše v Montargil 87
Obrázek 32: Výzkumný strom umístění na ploše Avis (Camilo-Alves et al., 2022) 87
Obrázek 33: Výzkumné plochy umístěné v České republice 88
Obrázek 34: Podrobný plánek výzkumné plochy na území Doksy 89
Obrázek 35: Ukázka značek pro škálování a odkazování 91
Obrázek 36: Výzkumný stromy na ploše Suchdol 93
Obrázek 37: Výzkumná plocha Slovensko 94
Obrázek 38: Ikona GroIMP 95
Obrázek 39: Simulace koruny v 1 roce 2 roce 3 roce a 4 roce 96
Obrázek 40: Ukázka nadzemní a podzemní části vytvořené v GroIMP spolu s částí použitého kódu 96
Obrázek 41: Ukázka kódu pro kořen 97
Obrázek 42: Ukázka vloženého 3D modelu. 97
Obrázek 43: Ikona Speedtree 97
Obrázek 44: Ukázka korkové plantáže ve Speedtree vytvořeného pomocí Fastraku Polhemusu 98
Obrázek 45: Popis magnetického digitizéru 100
Obrázek 46: Stylus 101
Obrázek 47: Ukázka krychle (A) a koule (B) zdroj elektromagnetického pole 102
Obrázek 48: Ukázka tvorby magnetického pole.. 102
Obrázek 49: Ikona FastrakDigitizer 103
Obrázek 50: Náhled celého softwaru. 105
Obrázek 51: Vysvětlení hlavních částí softwaru 106
Obrázek 52: Popis zobrazujícího okna 3D modelu 107
Obrázek 53: Popis důležitých částí pole "File" 108
Obrázek 54: Popis panelu pro spojení dvou částí 3D modelů 109
Obrázek 55: Ikona PiMgr 110
Obrázek 56: Špatně synchronizovaný přístroj a software 110
Obrázek 57: Znovu synchronizovaní s přístrojem 111
Obrázek 58: Správně synchronizovaný přístroj a program 111
Obrázek 59: Změna hemisféry 112

Obrázek 60: Zobrazení hemisféry ... 112
Obrázek 61: Hemisféra X=1, Y=0, Z=0 ... 113
Obrázek 62: Hemisféra X=0, Y=1, Z=0 ... 113
Obrázek 63: Hemisféra X=0, Y=0, Z=1 ... 113
Obrázek 64: Hemisféra X=-1, Y=0, Z=0 ... 113
Obrázek 65: Hemisféra X=0, Y=-1, Z=0 ... 114
Obrázek 66: Hemisféra X=0, Y=0, Z=-1 ... 114
Obrázek 67: Přední strana ... 115
Obrázek 68: Zadní strana ... 115
Obrázek 69: Koncovka generátoru elektromagnetického pole a jednotka na Fastrak SEU ... 115
Obrázek 70: Zapojení z blízka a z dálky ... 116
Obrázek 71: Koncovka Stylusu a jednotka přípojky na Fastrak SEU ... 116
Obrázek 72: Zapojení z blízka a z dálky ... 117
Obrázek 73: Detail konců propojovacího kabele a jednotka přípojky na Fastrak SEU ... 117
Obrázek 74: Zapojení z blízka a z dálky ... 118
Obrázek 75: Koncovka napájecího kabele a jednotka přípojky na Fastrak SEU ... 118
Obrázek 76: Zapojení z blízka a z dálky ... 119
Obrázek 77: Poloha při vypnutí ... 119
Obrázek 78: Poloha při zapnutí ... 120
Obrázek 79: Nezapojený Fastrak v elektrice – kontrolka nesvítí ... 120
Obrázek 80: Zapojený Fastrak v elektrice – kontrolka svítí zeleně ... 121
Obrázek 81: Živý strom ... 121
Obrázek 82: Špatné umístění ... 122
Obrázek 83: Špatné umístění 2 ... 123
Obrázek 84: Správné umístění ... 124
Obrázek 85: Kontrolka zapnutí ... 125
Obrázek 86: Ikonka a náhled po otevření ... 126
Obrázek 87: Tlačítko RS232 ... 127
Obrázek 88: Stisknutí tlačítka start ... 128
Obrázek 89: Náhle nalezení COM portu v PC ... 129
Obrázek 90: Nastavení COM portu v softwaru ... 130
Obrázek 91: Tři strany ... 131

Obrázek 92: Postup měřená kmene dřeviny 132
Obrázek 93: Uložení souboru 133
Obrázek 94: Otevření souboru 134
Obrázek 95: Vytvořený 3D model kmene 135
Obrázek 96: Znázornění měření větve 136
Obrázek 97: Celý 3D strom 137
Obrázek 98: Grafické zobrazení kontinuality procesu 3 D modelování nadzemní části rostliny jedinců borovice lesní 139
Obrázek 99: Popis měřených částí stromu. 139
Obrázek 100: Ukázka zalévání při čištění kořene, pokud je půda moc tvrdá, čištění se vzduchem drobné nástroje pro čištění. 141
Obrázek 101: Ukázka referenčních bodů 142
Obrázek 102.: Ukázka možného popisu kořene a koruny 143
Obrázek 103: Zdvojení větve 145
Obrázek 104: Chyba prohození hemisféry 146
Obrázek 105: Výskyt kovu v magnetickým poli 146
Obrázek 106: 3D modely kořenů. červená linie zobrazuje zalévací zařízení 176
Obrázek 108: Kořen do Musea v Mértole 262

Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1: Vliv hustoty porostu na početnost větví v každém řádu. 149
Tabulka 2: Závislost výšky jedinců na hustotě mateřského porostu. 150
Tabulka 3: Závislost výšky jedinců přirozené obnovy na biomase řádů 151
Tabulka 4: Celkový objem každého stromu. N= 6..... 164
Tabulka 5: Dílčí korelace celkového objemu stromů s parametry stromů, bez kontroly a s kontrolou vlivu ošetření 166
Tabulka 6: Dílčí korelace ošetření s parametry stromů, bez kontroly a s kontrolou vlivu celkového objemu stromu. 167

Graf 1: Velikost větvení prvního (A), druhého (B) a třetího řádu (C) při různých hustotách porostu. 148
Graf 2: Míra větvení výšky borovic v závislosti na hustotě porostu. 150
Graf 3: Graf ukazuje orientaci celé koruny 0,5 cm: Zavlažováno, kontrola a povrchová kapková závlaha. Šipky ukazují orientaci směru 155
Graf 4: Graf zobrazuje orientační korunu do 0,5 cm: Zavlažováno, kontrola a povrchová kapková závlaha. Šipky ukazují směr orientace..... 156
Graf 5: Orientace listí vůči světovým stranám 157
Graf 6: Orientace koruny vůči světovým stranám 158
Graf 7: SLA a transpirace vody..... 160
Graf 8: SLA a azimut 161
Graf 9: Poměr koruny ke kořenům k celkovému objemu Q. Suber. Q. suber pěstované na dešti jsou od písmene A do písmene C. Zavlažované jsou od písmene D do písmene F 167
Graf 10: Root length by crown length of the rainfed and fertirrigated excavated trees. N = 6 168
Graf 11: Průměrný průměr kořenů s dešťovou vodou a kořenů s ferittigací. N = 6 169
Graf 12: Porovnání kořene a koruny 3 párů 169
Graf 13: Relativní podíl kořenových řádů podle stromů. F: zavlažované; R: deštěm zavlažované. N= 6 170
Graf 14: Kruhovitost koruny a kořene 170

Graf 15: Graf zobrazuje orientaci celého kořene: Zavlažování, kontrola a povrchová kapková závlaha. 177
Graf 16: Graf zobrazuje orientační kořen do 0,5 cm: a povrchové kapkové závlahy. 178
Graf 17: Graf ukazuje orientační kořen nad 0,5 cm: a povrchovou kapkovou závlahou. 179
Graf 18: Zobrazuje výsledky měření průměru kmenů (DBH) 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 181
Graf 19: Zobrazuje výsledky měření průměru kmenů (DBH) 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 182
Graf 20: Zobrazuje výsledky měření výšky 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 183
Graf 21: Zobrazuje výsledky měření výšky 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 184
Graf 22: Zobrazuje výsledky měření objemu kmene 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 185
Graf 23: Zobrazuje výsledky měření objemu kmene 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 186
Graf 24: Zobrazuje porovnání objemu větví listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 187
Graf 25: Zobrazuje porovnání objemu větví jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 188
Graf 26: Zobrazuje porovnání objemu větví 1.řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 189
Graf 27: Zobrazuje porovnání objemu větví 1.řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 190
Graf 28: Zobrazuje výsledky měření objemu větví 2 řádu14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 191
Graf 29: Zobrazuje porovnání objemu větví 2.řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 192
Graf 30: Zobrazuje porovnání objemu větví 3.řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 193
Graf 31: Zobrazuje výsledky objemu větví 3. řádu 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 194

Graf 32: Zobrazuje porovnání objemu větví 4.řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 195
Graf 33: Zobrazuje Porovnání objemu větví 4.řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 196
Graf 34: Zobrazuje porovnání celkového objemu listnatých dřevin 14listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 197
Graf 35: Zobrazuje Porovnání celkového objemu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 198
Graf 36: Zobrazuje porovnání počtu větví prvního řádu listnatých dřevin kmene14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 199
Graf 37: Zobrazuje porovnání počtu větví prvního řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 200
Graf 38: Zobrazuje porovnání počtu větví druhého řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 201
Graf 39: Zobrazuje porovnání počtu větví druhého řádu jehličnatý dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 202
Graf 40: Zobrazuje porovnání počtu větví třetího řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak 203
Graf 41: Zobrazuje porovnání počtu větví třetího řádu jehličnatých dřevin14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 204
Graf 42: Zobrazuje porovnání počtu větví čtvrtého řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak 205
Graf 43: Zobrazuje porovnání počtu větví čtvrtého řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 206
Graf 44: Zobrazuje porovnání celkového počtu větví řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 207
Graf 45: Zobrazuje porovnání celkového počtu větví řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak. 208

Seznam zkratek

AET	Actual Evapotranspiration	Skutečná evapotranspirace
BFD	Model Berry and Farion	Model Berry a Farion
BV	Wilting point	Bod vadnutí
CRP	Cloud Stanch Photogrammetry	Fotogrammetrie z krátké vzdálenosti
DBH	Diameter at Breast Height	Průměr kmene ve výšce prsou
DTM	Digital terrain model	Digitální model terénu
FSM	Funkčně strukturální stromový model	Functional structural tree model
GB	Model Giesen and Berry	Model Giesen a Berry
CHKO	Protected landscape area	Chráněná krajinná oblast
LAD	Lea fangle disribution	Rozdělení úhlů listů
LAI	Index leaf surfaces	Indexové listové plochy
LRP	Lateral root primordia	Laterální kořenový primordii
MBSD	Model Meyer - Berthoud, Soria and Decombeix	Model Meyer – Berthoud, Soria a Decombeix
NP	National Park	Národní park
OZ	Branch Plant	Odštěpný závod
PVK	Full water capacity	Plná vodní kapacita
PKP	Field capacity	Polní kapacita
POV	Persistence of Vision Raytracer	Trasovač paprsků s trváním vize
RMSE	Root Mean Square Error	Střední kvadratická chyba
SLA	Specific leaf area	Specifická listová plocha
VVK	Usable water capacity	Využitelní vodní kapacita

1 Úvod

Lesy jsou jedním z nejrozšířenějších biotopů na Zemi, pokrývají přibližně jednu třetinu suchozemského povrchu. Jsou domovem pro více než polovinu světové biodiverzity, což znamená, že hostí nespočet druhů rostlin, živočichů a mikroorganismů, které tvoří komplexní a vzájemně propojené ekosystémy. Lesy jsou také klíčovým úložištěm uhlíku, obsahují více než 60 % celkových uhlíkových zásob na pevnině. Tento uhlík je většinou uložen ve dřevě, které je nejhojnější biologickou sloučeninou na Zemi (Rathgeber et al., 2016). Dřeviny, které tvoří hlavní složku lesů, jsou specifické svou schopností produkovat dřevo. Dřevo jim umožňuje růst do výšky, čímž se dostávají nad ostatní rostliny a přibližují se ke zdroji světla, který je nezbytný pro fotosyntézu. Tento růstový mechanismus jim poskytuje významnou ekologickou výhodu. Lesy nejenže poskytují stanoviště pro mnoho druhů živočichů, ale také hrají zásadní roli v globálních ekologických procesech. Pomáhají regulovat klima, zadržují vodu a chrání půdu před erozí. Jejich schopnost pohlcovat uhlík má významný dopad na zmírňování změn klimatu. Bez lesů by mnohé ekosystémy a klimatické procesy, na které se spoléháme, nemohly fungovat. Proto je ochrana lesů klíčová pro udržení ekologické rovnováhy a biodiverzity na Zemi (Giesen et al., 2013).

Vedle jejich ekologické role mají lesy také ekonomický význam, což dokazuje i studie, která potvrdila vliv změny druhového složení na produkční potenciál lesních porostů. V lesích středních poloh byla pozorována vyšší produkce douglasky, která převyšovala smrk o 35 – 50 %. Přestože smrk vykazoval větší produkci než buk, tato výhoda platila pouze do doby, než trh se surovým dřívím zasáhla kůrovcová kalamita. V roce 2019 byla hodnota produkce obou druhů dřevin srovnatelná. Studie doporučuje pěstování smíšených porostů, které kromě přirozených druhů zahrnují i ekonomicky výnosné dřeviny. Z modelových výpočtů vyplývá, že 10 % podíl douglasky může v nižších a středních polohách nahradit snížení zastoupení smrku o 15 – 20 % a přitom zachovat výnosovou rovnováhu (Remeš et al., 2022).

Evoluce lesů začala v období středního až pozdního devonu, tedy přibližně před 395 až 359 miliony lety. První stromy pocházely z již vyhynulého rodu *Cladoxylopsida,* který představoval rané formy dřevin. Tyto prvotní stromy dosahovaly výšky od 8 do 12 metrů, což bylo v té době impozantní. Jejich stonky měly průměr přibližně 50 centimetrů a kořeny mohly sahat až do hloubky 70 centimetrů. Tyto rané stromy hrály klíčovou roli ve formování prvních

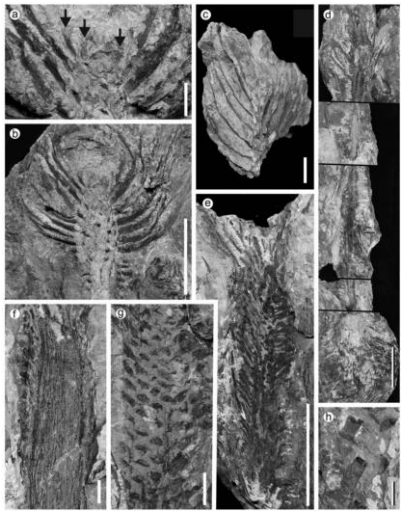
lesních ekosystémů, které postupně přispěly k rozvoji biodiverzity a změnám v atmosférických podmínkách na Zemi (obr.1) (Giesen et al., 2013a).

Obrázek 1. Rekonstrukce společenstva stromů Calamophyton primaeyum (Giesen et al., 2013a)

1.1 Vývoj koruny

V roce 2009 byla nalezena rostlinná fosilie z rodu *Cladoxylopsida* (obr. 2), která je považovaná za nejstarší zástupce dřevin na planetě. *Pseudosporochnalean cladoxylopsidy* jsou nejlépe rozpoznatelné na úrovni rodu díky charakteristické morfologii sterilních a plodných přívěsků, které se nacházejí na větvích (Berry, 2000). Druh *Calamophyton primaevum* popsaný Kraüselem a Weylandem v roce 1925 z naleziště v Kirbergu je nejlépe prostudovaným a pravděpodobně i jediným současně uznávaným druhem tohoto (Fairon-Demaret et al., 2000). Plodné přívěsky tohoto druhu mají tři páry podlouhlých sporangií, umístěných na krátkých zakřivených stopkách na každé ze dvou dceřiných os, které se nacházejí distálně od rozvětvení proximální osy terete (Author et al., 1960; Bonam et al., 1966; Leclercq, 1969). Růstová trajektorie a forma pseudosporochnaleanů od juvenilních stádií po dospělé jedince je stále předmětem diskuzí. V dnešní době rodu *Pseudosporochnales* byly navrženy dva protichůdné hypotetické modely růstu, které představili (Berry' et al., 1997; B. Meyer-Berthaud et al., 2010). Fosilie celých rostlin z Lindlaru mohou sloužit jako test pro tyto dvě teoretické koncepce. Obrázek 15 přináší schematické nákresy klíčových vzorků, které byly použity v této studii, a poskytuje dobré zobrazení rostlin různé výšky a průměru. Tyto vzorky jsou interpretovány jako reprezentanti přirozené populace, vykazující různá ontogenetická stádia v rámci přirozené variace. Průměry vzorků, zahrnující základnu a alespoň část vrcholu kmene, byly měřeny podél celé délky kmene. Tyto fosilie jsou následně porovnávány s růstovými fázemi předpovězenými

oběma modely. Protože fosilie neodpovídají přesně žádné z fází předpovězených těmito modely, byl navržen nový model růstu.



Obrázek 2. Ukázky nalezených fosilních kmenů (Giesen et al., 2013a)

Model BFD

Model Berry a Fairon – Demaret (BFD) předpokládá, že sekundární růst kmene byl umožněn přidáváním „zarovnaného xylemu“ kolem každé jednotlivé ploténky, která je součástí složitého cévního systému rostliny. Tento proces vedl k postupnému zvětšování kmene směrem k vrcholu. Pokud by byl tento sekundární růst plně zachován, kmen by získal kuželovitý, tedy mírně zúžený profil. (Berry’ et al., 1997) tento růstový model navrhli na základě svého výzkumu fosilních záznamů. Model BFD předpovídá, že zkameněliny kmenů budou mít v podstatě podobné proporce, nezávisle na jejich velikost. Nalezena fosílie tento model částečně podporuje, protože kompletní vzorky skutečně vykazují podobné proporce. Nicméně pozorování, že vrchol kmene je často větší než střední část, je neočekávané a tento model to nedokáže uspokojivě vysvětlit.

Model MBSD

Model Meyer-Berthaud, Soria a Decombeix (MBSD) navržený (Meyer-Berthaud et al., 2010) nabízí hypotézu růstu pro *Cladoxylopsida*, včetně skupiny *Pseudosporochnales*. Tento model, vycházející ze studia výjimečně zachovalé anatomie pozdně devonského rodu

Pietzschia, navrhuje, že v raných fázích růstu se kmen výrazně rozšiřoval na úrovni země, zatímco vrchol rostliny pokračoval v růstu směrem vzhůru. Sekundární zvětšení průměru kmene bylo omezeno na nejspodnější části, čímž kmen získal specifický tvar. Ačkoli tento model předpovídá různé tvary a proporce kmenů, nalezena fosílie tyto předpovědi nepodporuje, což vedlo k jeho zamítnutí pro druh *Calamophyton*.

Model GB

Giesen a Berry navrhli nový model růstu pro *Calamophyton* (model GB), který se zaměřuje na neobvyklé proporce těchto rostlin. Fosilie naznačují, že kmen *Calamophytonu* je v horní části převážně primární, což dokládají postranní větve a klenutý tvar vrcholu. Střední část kmene má však menší průměr než vrchol a základna, což dává kmenu tvar činky. Tento model předpokládá, že primární růst se zvětšuje směrem nahoru, zatímco sekundární růst rozšiřuje hlavně spodní část kmene. Juvenilní rostliny jsou štíhlé s jednoduchými větvemi, zatímco dospělé exempláře vykazují výraznou expanzi spodní části kmene. Zajímavé je, že další exemplář z Belgie, *Lorophyton goense*, odpovídá tomuto modelu, potvrzujíc jeho platnost pro raná stadia pseudosporochnalního růstu (Berry' et al., 1997).

1.2 Vývoj kořenového systému

S rozvojem lesních ekosystémů se kořeny stávaly stále složitějšími a rozmanitějšími. Tento vývoj reflektoval jak nezávislou evoluci stromů v několika hlavních skupinách rostlin, tak adaptaci kořenů pro různé funkce. Tato rozmanitost je patrná již v nejstarším známém fosilním lese, který se nachází v 385 milionů let starých sedimentech poblíž Gilboa ve státě New York. Zde se fosilie objevují jako odlitky pařezů stromů naplněné sedimenty (Stein et al., 2007) a jsou nalezeny i v půdách, z nichž byly pařezy odstraněny. Tyto nálezy poskytují cenné důkazy o struktuře lesa a povaze rostlinného společenstva (Stein et al., 2012). Ekosystém tvořil tropicko-subtropický pobřežní mokřad, pravidelně narušovaný záplavami. Stromy v Gilboa mohly dosáhnout výšky přes 8 metrů a hlavní dominantní formou byla vyhynulá skupina *Cladoxylales,* která se nacházela mezi ranými cévnatými rostlinami a současnými kapradinami. Vzhledem připomínaly stromové kapradiny, ale jejich kmeny byly ukotveny úzkými (asi 1 – 2 cm), nerozvětvenými, překrývajícími se kořeny, podobně jako u moderních palem (Stein et al., 2012). Tato růstová forma byla potvrzena kompletními fosiliemi na jiných lokalitách (Giesen et al., 2013). Pravděpodobně byly kmeny těchto rostlin duté, rákosovité a rychle rostoucí.

Stromy se zřejmě rychle zakořenily a významně přispěly ke stabilitě substrátu díky povaze svých kořenů.

Většina důkazů o kořenových systémech v raných lesích pochází z odlitků pařezů a kořenů a jejich stop zachovaných v paleosolech. Když je fosilizace kořenů doprovázena permineralizací buněk, můžeme získat další informace o tkáňových systémech a jejich vývoji. V nejstarších lesních ekosystémech byly krytosemenné rostliny nejrozšířenějšími a nejkosmopolitnějšími formami raných keřů, lián a stromů. Tyto rostliny byly příbuzné dnešním nahosemenným rostlinám, ale měly odlišné klíčové vlastnosti. Progymnospermy, které se podobaly kapradinám způsobem rozmnožování (uvolňování spor) a obecným tvarem listů, se od kapradin lišily tím, že měly dřevo nahosemenného typu ve stoncích a větvích (Rothwell et al., 2005). Podobnosti s moderními stromovitými nahosemennými rostlinami sahají až ke kořenům. Vyhynulé *Archaeopteridales* byly stromy, které dorůstaly značných rozměrů a dominovaly pobřežním biotopům před 383 až 359 miliony let. Pokud se zachovala anatomie jejich vnitřních tkáňových systémů, ukazuje, že jejich kořenové systémy se v mnoha ohledech podobaly kořenovým systémům dnešních jehličnanů (Brigitte Meyer-Berthaud et al., 2013) . Jejich kořeny byly rozsáhlé a dřevnaté s několika úrovněmi větvení. Primární a sekundární větve byly rozsáhlé a v podstatě neurčité. Tyto charakteristiky spolu s přítomností letokruhů v dřevě potvrzují, že kořeny *Archaeopteridales* byly schopné nepřetržitého růstu a dlouhodobého přežití v půdě (Kenrick et al., 2014). Zkamenělé kmeny ukazují, že kromě dobře vyvinutého kořenového systému měli *Archaeopteridales* také adventivní latentní primordia podobná těm, která produkují některé současné stromy, a která se nakonec vyvinou v kořeny na řízcích stonků (meyer-berthaud, 1999a). Kořeny také měly četné úzké adventivní kořínky, které rostly a vyvíjely se endogenně (Meyer-Berthaud et al., 2013). Schopnost neurčitého růstu hlavních kořenových větví spolu se schopností vyvíjet adventivní kořeny poskytovala těmto raným stromům flexibilní kořenový systém, který umožňoval efektivní využití půdního prostoru a dynamickou reakci na měnící se půdní podmínky.

Kořeny se postupně a nezávisle vyvíjely v několika hlavních rostlinných skupinách, přičemž rychle nabývaly na složitosti a funkčnosti. Některé specifické aspekty evoluce kořenů, které stále nejsou zcela objasněny, ale mohou být zkoumány, zahrnují buněčnou strukturu v kořenových meristémech, vznik postranních kořenů a vývoj kořenových čepiček a kořenových vlásků (Kenrick et al., 2014).

1.3 Vývoj a aplikace 3D digitalizace

3D digitalizace představuje klíčovou technologii, která má mimořádný přínos pro lesní hospodářství. Umožňuje totiž přesně převádět reálné objekty, jako jsou stromy, do digitálního formátu a detailně analyzovat jejich tvar, strukturu a růstové charakteristiky. V oblasti lesnictví poskytuje zásadní nástroje pro sledování vývoje stromů, jejich reakcí na změny v prostředí, a také pro optimalizaci lesního hospodářství prostřednictvím efektivního využití půdy a vodních zdrojů. Metoda 3D digitalizace usnadňuje analýzu jak nadzemních částí stromů, jako je koruna, tak podzemních částí, což umožňuje lepší pochopení dynamiky růstu kořenů a jejich vztahu k celkovému zdraví stromů. Tímto způsobem může přispívat ke zvýšení efektivity péče o lesy, predikci výnosů a udržitelnému hospodaření (Adamopoulos et al., 2021).

1.3.1 Počátky a Vývoj 3D digitalizace

První pokusy o 3D digitalizaci sahají do roku 1973, kdy Lang použil kloubové rameno k měření úhlů natočení pro první 3D digitalizaci rostlin. Tato raná technologie byla poměrně primitivní a její aplikace byly omezené na jednoduché struktury rostlin, nicméně představovala důležitý krok ve výzkumu, který umožnil poprvé zachytit tvar rostlin ve třech rozměrech (Lang, 1973). Vývoj této technologie pokračoval rychlým tempem, zejména díky nástupu nových metod. (Paulus, 2019) Byl proveden přehled dostupných technologií pro 3D zobrazování rostlin. Zahrnoval různé metody, včetně měření úhlů natočení, sonických technik a technik využívajících magnetické pole. Například sonická technika byla použita ve (Watanabe et al., 2005) při využití nástroje GTCO Freepoint3D, což umožnilo pokročilý sběr dat o rostlinných strukturách. V 80. a 90. letech se vývoj zrychlil s příchodem výpočetní techniky, což otevřelo cestu k novým technologiím, jako je laserové skenování (LIDAR). V roce 2011 například došlo k rekonstrukci 3D růstu koruny borovice lesní v Portugalsku, což představovalo významný milník v modelování stromové architektury (Surový et al., 2011).

1.3.2 Techniky používané v 3D digitalizaci

V současnosti se používá několik technologií pro digitalizaci dřevin.

Laserové skenování (LIDAR): Jedna z nejpopulárnějších metod, která používá laserové paprsky pro mapování objektů. Tato technologie se často využívá v lesnictví, například pro mapování hustoty lesních porostů nebo biomasy (Mikita et al., 2013).

Magnetické pole: Technika sledování pohybu senzoru v magnetickém poli, která umožňuje měření i uvnitř hustých korun stromů, kde optické techniky selhávají (Surový et al., 2012). Například na Fakultě lesnické a dřevařské v Praze byl použit magnetický digitizér Fastrak Polhemus pro zkoumání architektury stromů.

Sonické techniky: Použití akustických vln, které jsou efektivní zejména v laboratorních podmínkách. (Watanabe et al., 2005) popsali, jak tato metoda umožnila detailní zobrazení vnitřních struktur rostlin pomocí sonických vln.

Fotogrammetrie – Tento postup využívá velké množství fotografií pořízených z různých úhlů, které jsou následně pomocí softwaru sloučeny do 3D modelu. Fotogrammetrie je cenově dostupná a relativně snadno proveditelná metoda, avšak pro velmi detailní modely nemusí být vždy dostatečně přesná (Schenk et al., 2005).

1.3.3 Aplikace 3D digitalizace v lesnictví

V lesnictví a biologii rostlin se 3D digitalizace ukazuje jako revoluční nástroj. Modelování architektury stromů, kořenových systémů a jejich reakcí na environmentální stresory, jako jsou sucho, nedostatek světla nebo změny v dostupnosti živin, pomáhá lesníkům pochopit růst a vývoj stromů v různých podmínkách (Camilo-Alves et al., 2020). Například studie (Kwak et al., 2011) se zabývala vlivem intenzity světla a vody na růst korkového dubu a využila 3D modelování pro detailní analýzu růstu a vývoje sazenic. V oblasti lesnictví pomáhá 3D digitalizace při mapování lesních porostů, stanovení biomasy a sledování změn v lesních ekosystémech. Tyto metody umožňují přesnější odhady růstu a zdravotního stavu stromů, což je klíčové pro efektivní lesní management. Modelování kořenových systémů je další oblastí, kde se 3D digitalizace osvědčila jako užitečný nástroj. Digitální zobrazení kořenů poskytuje podrobné informace o jejich struktuře a interakcích s půdou, což je klíčové pro výzkum absorpce vody a živin. Tento výzkum je zásadní pro lesní hospodářství, protože umožňuje efektivnější řízení lesů v závislosti na dostupnosti přírodních zdrojů (Loïc, 2002).

1.3.4 Budoucnost 3D digitalizace

Vývoj 3D digitalizace neustále pokračuje a očekává se, že v budoucnu budou dostupné ještě přesnější a efektivnější metody. Jedním z perspektivních přístupů je použití Lindenmayerových systémů (L-systémů), které byly původně vyvinuty pro modelování růstu rostlin a které umožňují simulovat vývoj rostlin na základě opakování jednoduchých pravidel (Kurth, 1999). Tento přístup byl využit v několika studiích, například v článku (Lindenmayer, 1990), a nadále se rozvíjí. Zvyšující se dostupnost 3D skenovacích technologií a výpočetní kapacity umožní, aby se 3D digitalizace stala standardním nástrojem nejen v lesnictví, ale také v dalších oblastech ekologie, biologie a mnoha dalších vědeckých disciplín.

2 Trojrozměrná data

Máme tři základní rozdělení dat – jednorozměrná, dvojrozměrná, trojrozměrná. Nejjednodušší možností je jednorozměrný převod. Jednorozměrným příkladem je vyjádření výšky stromu v metrech. Umístění bodu na této ose je dáno pouze jedním rozměrem, kterým je vzdálenost od paty kmene. Dvojrozměrným příkladem jsou pak okraje korunových průmětů, vertikální profily korun a porostu. Jako poslední, nejsložitější možností, je trojrozměrné zobrazení dat. Ta jsou popsána třemi dimenzemi. Tyto dimenze můžeme označit jako výška, šířka, hloubka. Klasifikace dat, tj. třídění do nějakých shodných skupin jsou obecně různé. Data se mohou rozdělovat na data spojitá a nespojitá, data sbíraná kontaktně a snímaná z dálky. Jedním z rozdělení, praktickým pro lesnické účely, může být rozdělení na data povrchová a strukturální (Kuželka et al., 2014).

2.1 Povrchová data

Tato data se dají chápat jako bodová 3D data zaznamenaná z povrchu trojrozměrného objektu bez ohledu na to, jaký tvar tento objekt představuje. Jedním z typických příkladů jsou výsledky laserového skenování, fotogrammetrická bodová pole nebo roztroušená bodová pole vzniklá sběrem dat pomocí různých 3D měřících přístrojů. Hlavní výhodou povrchových dat je jejich nenáročnost na biologické vědomosti měřiče. Další výhodou je, že jsou rychle a snadno zobrazitelná. Nevýhodou je naopak obtížnost využití povrchových dat pro kvantitativní vyhodnocování objektů. Pro tyto účely jsou potřeba data zpracovat pomocí statistického modelování (Kuželka et al., 2014).

Získávání povrchových dat

Měření začíná vyhotovením obvodů pohybem stylusu kolem kmene. Obvody kmene by měly být zaznamenávány při každé změně zakřivení nebo při signifikantní změně tloušťky kmene. Důležitou součástí je také označení severu a vertikálního vektoru kvůli lepší orientaci modelu. Po získání bodů je potřeba vyhotovit model kmene. Existuje několik plně automatických metod, jejichž pomocí je možné povrch kmene sestrojit bez zásahu uživatele. To je například uvedeno v publikaci (Yoshimoto et al., 2014). Tyto metody se dělí do čtyř

skupin, z toho tři skupiny obsahují heuristické metody a čtvrtá obsahuje metodu založenou na matematickém programování.

Region growing approaches je skupina založená na principu postupného propojování nejbližších sousedních bodů z každého kruhu, čímž postupně vzniká povrch kmene. Metoda je rychlá a funguje spolehlivě na stromech bez výrazného zakřivení kmene.

1. Coutour tracking approaches je metoda založená na principu hledání nejbližšího bodu pomocí nejmenšího úhlu mezi rovinou vytvořenou trojicí posledních bodů a spojnicí s následujícím bodem.
2. Třetí skupina metod je velmi podobná jako druhá s tím rozdílem, že z konturových bodů jsou využity pouze dva a třetím bodem minimalizovaného úhlu je vždy střed horizontálního průřezu.
3. Čtvrtou metodou je nalezení povrchu kmene optimalizační metodou matematického programování, kde cílovou funkcí je minimalizace kmene. O této metodě napsal článek například (Yoshimoto et al., 2014), kde autor popisuje metodu založenou na optimálním spojení sousedních trojúhelníků pro konstrukci povrchu, který je vytvořen lokálně možnou kombinací tří digitalizovaných bodů na povrchu kmene. Tato metoda na rozdíl od přechozích tří metod poskytuje konzistentní konstrukci tvaru kmene stromu, a to i pro kmeny s extrémně nepravidelnou strukturou, jako jsou kmeny ohnutých stromů a mangrovníků s unikátním rozložením kořenů.

Vyhodnocení dat

Nejrychlejším výsledkem, který se dá z povrchových dat získat, je objem. Při určování objemu klasickými metodami může docházet k podhodnocování objemu v případě silně stočených kmenů. Při použití klasického válce k přiblížení povrchu kmene by na zobrazených částech vznikla chyba asi 30 %. Použitím digitální rekonstrukce se dají například určit koeficienty úpravy objemu podle různých stupních veličin. Další veličinou, která se dá zjistit poměrně snadno jednoduše ze zrekonstruovaného kmene, je výtvarnice. Proložením rovin v pravidelných výškách podle zvoleného intervalu se dají vypočítat souřadnice průsečíku a z nich určit obvod a obsah plochy.

Další zájmovou informací, která se dá získat z měřených bodů, je nerovnoměrnost neboli asymetrie horizontálních průřezů. Tato asymetrie může indikovat přítomnost reakčního dřeva, u některých dřevin například u korkového dubu, může naznačovat vyšší aktivitu transportu vody v kmeni na té straně, kde je kmen nejvíce vyvinutý (Kuželka et al., 2014).

2.2 Strukturální data

Představují data, která popisují strukturu organismů. Strukturu ve 3D pojetí jako permanentní vztah několika entit. Za entity jsou považovány známe geometrické tvary jako je válec, koule, kužel, kvádr. Výhoda strukturálních dat je, že popisují části stromů, jako je koruna nebo kořeny, geometricky jednoznačným způsobem. Díky tomu okamžitě získáváme představu o architektuře a vzhledu dané části stromu a je snadné a rychlé kvalifikovat údaje o biomase, délkách a objemech jednotlivých segmentů. Nevýhodou je, že strukturální data nejsou přímo zobrazitelná. Většinou jsou kódovaná ve formátu daného softwaru, který byl při měření použit (Kuželka et al., 2014).

Získávání strukturálních dat

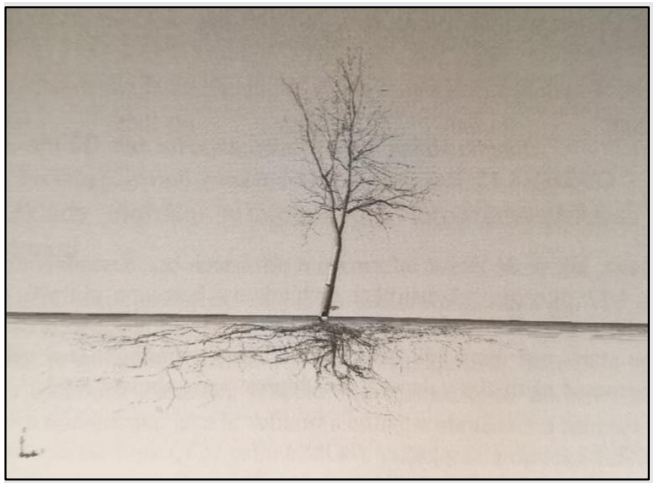
Měření strukturálních dat je několikrát složitější než měření povrchových dat. Jako hlavní důvod se uvádí, že tato data musí být správně kódovaná, aby bylo možné model správně zobrazit a vyhodnotit. Při měření s magnetickým digitizérem a softweru Fastrak Digitizer způsobí každé stlačení tlačítka uložení současné pozice a rotace stylusu do tabulky spolu s indexem měřeného bodu. Tloušťka měřeného segmentu je do tabulky vložena manuálně. Při hodnotách indexu větších nebo rovných dvěma, kdy jsou změřeny alespoň dva body (konec a začátek segmentu) se v zobrazovacím okně vykreslí válec se středy podstav v obou krajních bodech segmentu a s průměrem odpovídajícím změřené tloušťce segmentu. Postupně se tak vytváří strukturální model rostliny (Kuželka et al., 2014).

Vyhodnocení dat

O možnosti vyhodnocení dat se píše v publikaci(Surový et al., 2011a). Zde autoři popisují, že nejrychlejším a nejjednodušším údajem, který lze získat z naměřených dat, je celkový objem biomasy. V tomto článku byla změřena celková délka dvou jedinců borovice

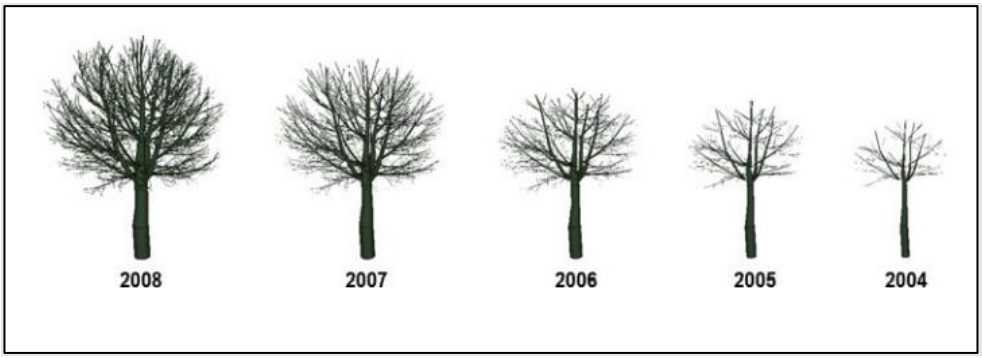
pinie (*Pinus pinea* L.). Jedinec s celkovou výškou 3,81 m dosahoval celkové délky nadzemních orgánů 547 m, celková délka jedince o výšce 4,2 m byla pak 759 m (obr.3).

Velmi podobně se dají analyzovat podzemní části stromů. U podzemních částí je mimořádně zajímavé hlavně rozložení biomasy v jednotlivých hloubkách nebo podle světových stran. Následným spojením nadzemní části a podzemní části je zase možné porovnávat rozptyl orgánů nadzemní i podzemní části. Obrázek 6. zobrazuje komplexní 3D data z nadzemní i podzemní části jedince dubu korkového (*Quercus suber* L.) o přibližné výšce 6 m. Data byla opět naměřena pomocí Polhemus Fastrak při použití referenčních bodů a destruktivního měření.



Obrázek 3. Strukturální model podzemních i nadzemních orgánů dubu korkového (Kuželka et al., 2014)

O mnoho důležitější informace, než je údaj od celkové biomase, je údaj o přírůstku na biomase, a to hlavně z důvodu, že digitalizace stromu pomocí digitizéru sebráním strukturálních dat je prakticky jediný způsob, jak se dají získat informace bez destruktivního měření. Obrázek 4 ukazuje rekonstrukci architektury borovice piniové v průběhu několika let podle (Surový et al., 2011a). Zobrazením jen těch částí koruny, které jsou starší než daný věk, můžeme vizuálně vyhodnotit stav několik let nazpět.



Obrázek 4. Rekonstrukce architektury borovice piniové (Surový et al., 2011b)

Ve zmíněné publikaci byl porovnáván vývoj koruny u jedinců v hustějším zápoji (vyšší konkurenci) a menším zápoji (nižší konkurenci). Bylo konstatováno, že vývoj biomasy koruny je pravděpodobně pomalejší při větší konkurenci. Kromě vývoje biomasy je samozřejmě možné sledovat i trojrozměrné rozmístění přírůstů. Při analýze horizontálního rozvoje byla například pozorována tendence stromů víc rozvíjet korunu směrem k přístupnému světlu.

Přesnost měření povrchových i strukturálních dat je dána především přesností přístroje použité pro digitalizaci. U přístroje Fastrak uvádí výrobce chybu 0.7 m pro pozice XYZ v závislosti na vzdálenosti zdroje (Kurth, 1999) Mnohem významnějším zdrojem chyby je metoda měření, kde, jak už bylo zmíněno, vzniká chyba uvedená (Danjon et al., 2008a) především přílišným tlačením na ovládací tlačítko stylusu a posouvání tenčích větviček. Tyto chyby se dají eliminovat tréninkem a častější kontrolou dat.

3 Architektura Koruny

Architektura koruny stromů je způsob, jakým se listové části stromů rozmisťují v různých částech stromů – což nám vytváří tzv. mikroprostředí. Stromy mají tendenci dosahovat charakteristického tvaru, když rostou samostatně v otevřeném prostoru, a to díky zděděnému vývoji (Chidi et al., 2014a). Architektura koruny má zásadní význam pro zachycování světla a pro distribuci světla ke každé konkrétní fotosyntetické jednotce koruny. Architekturu koruny stromu lze znázornit pomocí "modelů", které vymezují základní růstové strategie, které určují po sobě jdoucí architektonické fáze. Další růst "modelů" byl identifikován pro tropické stromy více než pro stromy mírného pásma (Chidi et al., 2014a). Zda jsou regresní modely stejné mezi pozicemi v koruně a zda model pro předpověď hmotnosti jehlic větví je platný na úrovni severních a jižních krajích poloh centrální klimatické zóny píše studie Gilmore et al., 1997). Zde se shromáždily čtyři různé polohy koruny ze 39 stromů jedle balzámová (*Abies balsamea* L.). Byly použity k analýze, k sestavení modelů popisujících kumulativní rozložení listové plochy v koruně a k předpovědi hmotnosti jehličí jednotlivých větví, průměrného úhlu větví a průměru větví, délku větví, poloměr koruny na větvičku a průměrnou délku větví, délku větví a poloměr koruny na větvičku, počet živých větví na větévku. Poloha koruny měla opravdu vliv na modely zkonstruované pro předpověď hmotnosti jehlic, úhlu větví a průměru větví, délky větví, poloměru koruny a počtu živých větví na větévku. Nicméně ve srovnání s rozšířeným modelem, který zahrnoval parametry vypočtené pro každou korunovou třídu, došlo ke změně. Došlo pouze k malé ztrátě přesnosti modelu, pokud byl použit obecný model. Ten byl zkonstruován na základě údajů shromážděných ze všech korunových tříd k předpovědi hmotnosti jehlic, úhlu větvení a průměru větví. Regresní rovnice jedinečné pro každou korunovou třídu byly potřebné k předpovědi tvaru koruny a rozložení listové plochy v koruně. Náš model hmotnosti jehličí větví, který byl sestaven z údajů shromážděných na jižním okraji centrální klimatické zóny, důsledně podhodnocoval hmotnost jehličí, když byl aplikován na severním okraji oblasti středního klimatického pásma.

3.1 Typy architektury koruny

Tvar dřeviny je formován prostorem, který vyplňuje. Většina rostlin však získává svůj charakteristický tvar, když roste samostatně v otevřeném prostoru, což je výsledkem zděděného vývojového programu (Henry S. Horn, 1971a). Tento vývoj obvykle spočívá v opakovaném

přidávání strukturně rovnocenných podjednotek, jako jsou větve, výhony a listy, což dává rostlinám modulární charakter. Tento vývojový program se vyvinul v rámci obecných biomechanických omezení. Například tvar stromové koruny je limitován tím, že horizontální větve jsou namáhavější než vertikální větve (Mattheck et al., 1991). I když architektura některých stromů zahrnuje po celý jejich život pouze jednu vegetativní osu, většina stromů má složitější strukturu s několika osami, z nichž každá vzniká z jiné prostřednictvím procesu zvaného větvení. Rostliny vykazují velkou rozmanitost ve vzorcích větvení. Větvení a růst stromů a keřů lze popsat pomocí vertikální (podélné) a horizontální (boční) symetrie. Vertikální symetrie se vyznačuje růstem větví na vrcholu (akrotonie) nebo na bázi (bazitonie), zatímco boční symetrie se projevuje růstem větví na horní (epitonie) nebo dolní (hypotonie) straně postranní větve. Keře obvykle vykazují bazitonické větvení, zatímco stromy se vyznačují akrotonickým větvením. Typické stromy mají hypotonické větvení, zatímco většina keřů a malých stromů vykazuje epitonické větvení (Sagade et al., 2015). Existuje však mnoho výjimek z těchto pravidel. Například pyramidální tvar koruny mnoha jehličnanů je výsledkem kombinace bazitonického větvení (běžného u keřů) s monopodiálním růstem hlavní osy. Vzorce větvení výhonů mohou být výrazně ovlivněny apikální kontrolou a apikální dominancí. Apikální kontrola znamená potlačení růstu postranní větve nadřazeným výhonem (distální výhon). Tento mechanismus ovlivňuje, zda strom roste v exkurentním (jednoduchý kmen, pyramidální tvar) nebo dekurentním (větvený) vzorci. Apikální dominance je sklon bočních pupenů zůstat v klidu, když hlavní výhon roste. Druhy se silnou apikální dominancí mají slabou apikální kontrolu, což vede k větveným stromům, zatímco druhy se slabou apikální dominancí mají silnou apikální kontrolu, což vede k růstu sloupovitých stromů (Wilson et al, 1993.). Architektura rostlin je výsledkem mnoha selekčních tlaků, avšak tvary jejich částí, jejich pružnost a odolnost vůči deformaci jsou omezeny známými mechanickými principy (Niklas, 1992). Protože nadzemní části rostlin musí čelit gravitačním a větrným silám, část biomasy je věnována na oporu. Mechanické struktury podobného tvaru jsou s rostoucí velikostí méně efektivní, takže podíl potřebný k podpoře rostlin se s velikostí rostlin rychle zvyšuje. Například pevnost větve nebo stonku roste s druhou mocninou jeho průměru, zatímco jeho hmotnost roste s druhou mocninou průměru krát délka (Gere et al., 2001) . Mechanické náklady spojené s geometrií koruny rostliny musí být vyváženy fotosyntetickými přínosy z efektivního zachycování světla. Zatímco gravitace způsobuje statické zatížení rostliny, dynamické zatížení větrem je často přechodné (Speck et al., 1990). Vítr však může trvale ovlivnit tvar rostlin, jejich

anatomii a hustotu dřeva, což vede k biomechanickým změnám na architektonické i anatomické úrovni (Ennos, 1997). Největší účinky větru na stromy se projevují v blízkosti stromové linie, kde mnohé druhy získávají tzv. krumholcovou formu (Ennos, 1997). Krummholc označuje ekologicky zakrslé stromy s rozložitou korunou, která se rozšiřuje v závětří krátkého kmene (Arno et al., 1984). Architektura koruny je klíčová nejen pro zachycování a distribuci světla, ale musí také poskytovat bezpečnostní rezervy pro vyrovnání se s gravitací a větrem. Biomechanická omezení je třeba zohlednit při hodnocení vlivu morfologie a architektury na výkonnost rostlin.

Koruny se jinak vyvíjejí v případě dostatku světla a jinak při nedostatku světla. Světlo může být limitujícím faktorem pro rostliny rostoucí v podrostu hustých lesů nebo při silné konkurenci mezi sousedy, zatímco v otevřených prostorech může být světla nadbytek, a dokonce škodlivé kvůli environmentálnímu stresu. Bylo zjištěno, že tvar a velikost rostlin se mění podle světelných podmínek a že rostliny mohou orientovat své listy různými způsoby, aby zvětšily nebo zmenšily plochu vystavenou světlu (Cescatti et al., 2004). Rostliny vykazují značnou variabilitu ve svých strukturálních vlastnostech, jak v rámci druhu, tak u jednotlivců. Například vzor větvení stromů není neměnný a může být výsledkem interakce mezi vývojem a fenotypem (Steingraeber, 1982). I když může být tato variabilita někdy způsobena genetickými poruchami, ve většině případů jde o plastickou reakci na místní podmínky, přičemž světlo je nejvíce prostorově a časově proměnlivým faktorem ovlivňujícím růst a přežití rostlin. Strukturální plasticita umožňuje rostlinám přizpůsobit se změnám prostředí a maximalizovat efektivitu v každé fázi růstu. Běžnou změnou, kterou rostliny zažívají, je postupný pokles dostupnosti světla během sukcese. U sukulentu slanorožce evropského (*Salicornia europaea* L.) bylo prokázáno, že změny ve vzoru větvení během sukcese maximalizují zachycení světla (Ellison et al., 1988). Nicméně i blízce příbuzné druhy se mohou výrazně lišit ve své schopnosti reagovat na světelné podmínky (Valladares et al., 2000). Zajímavé je, že některé druhy, které jsou přizpůsobeny na vysokou intenzitu záření, se při pěstování ve stínu moc nemění. To byl případ mangrovníků v Malajsii: jejich architektura a alometrie ve stínu se více podobala těm na plném slunci než architektuře stromů deštného pralesa s širokými listy ve stínu (Turner et al., 1995). Když rostliny rostou v hustých porostech nebo v podrostu, je světelná energie vzácná, nepředvídatelná a nerovnoměrně rozložená. Evoluce v těchto podmínkách vedla ke dvěma hlavním strategiím přežití: vyhýbání se stínu a tolerance vůči stínu. Mřížovce si vyvinuly působivou schopnost vyhýbat se stínu. Syndrom vyhýbání se stínu zahrnuje rychlejší růst

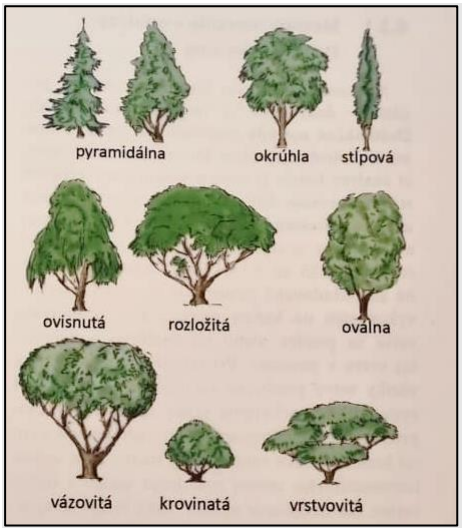
prodlužovacích výhonů, zvýšenou apikální dominanci a zpomalený vývoj listů a chloroplastů (W.K. Smith et al., 1997).

Růstový vzorec, který určuje jednotlivé fáze architektury rostlin, se u dřevin označuje jako architektonický model (Hallé et al., 1970). Tento model představuje vrozenou strategii růstu, která určuje nejen způsob formování rostliny, ale i její konečnou strukturu. Odráží základní růstový plán, na němž je postavena celá architektura rostliny. Identifikace architektonického modelu se opírá o pozorování čtyř hlavních skupin jednoduchých morfologických charakteristik:

1. růstový model, zahrnující determinovaný vs. nedeterminovaný růst a rytmický vs. kontinuální růst;
2. model větvení, který zahrnuje terminální vs. boční větvení, absence větvení, monopodiální vs. sympodiální větvení, rytmické vs. kontinuální větvení a okamžité vs. kontinuální větvení;
3. morfologická diferenciace os, která zahrnuje ortotropní vs. plagiotropní osy a osy s kombinovanými morfologickými a/nebo geometrickými rysy (s plagiotropními a ortotropními částmi);
4. kvetení na laterálních vs. terminálních výhoncích.

Každý architektonický model je charakterizován specifickou kombinací těchto morfologických znaků a je pojmenován podle známého botanika. Přestože teoreticky může existovat velké množství těchto kombinací, v přírodě se obvykle vyskytuje pouze 23 architektonických modelů. Tyto modely jsou relevantní pro všechny druhy dřevin a bylin, jak z tropických, tak z mírných oblastí a mohou být aplikovány na rostliny z blízce příbuzných i vzdálených taxonů. Architektonické modely slouží jako užitečný základ pro pochopení tvaru rostlin, ale variabilita a výjimky v každém vývojovém programu mohou zkomplikovat klasifikaci a naznačit potřebu dalších popisů tvarů korun. Například planika (*Arbutus* L.). může vykazovat dva různé architektonické modely v závislosti na světelných podmínkách, zatímco javor klen (*Acer pseudoplatanus* L.) a další dřeviny mohou během ontogeneze projít výraznými změnami ve vzorcích větvení a přejít z jednoho modelu na druhý (Bell, 1993). Bylo identifikováno 23 architektonických modelů, které zohledňovaly vývojovou morfologii stromů, keřů, některých lián, nižších cévnatých rostlin a zkamenělin. Modely nebyly považovány za součást evolučního kontinua, ale za popis individuálního vývoje. Vzhledem k tomu, že

vývojová plasticita stromů se může v průběhu jejich ontogeneze měnit, někteří pracovníci zpochybňují hodnotu architektonických modelů jako způsobu analýzy růstu rostlin. Nejčastějších typů korun je 9 (obr.5), patří mezi ně: pyrmidové, kulaté sloupová, povislá, rozložitá, oválná, vázovitá, křovinatá, vrstvovitá.



Obrázek 5. Různé morfologické formy korun stromů (Fabrika et al., 2011)

4 Architektura Kořenů

Nejen koruna stromů má svoji architekturu, ale i kořenový systém má svou vlastní architekturu (Ozier-Lafontaine et al., 1999a). Autoři zde zkoumají fraktální analýzu kořenové architektury pro prostorovou predikci větvení kořenů, hmotnosti a velikosti. Na základě předpokladů fraktálního modelu byl vyvinut statický trojrozměrný model kořenového systému S*epia gliricid*. Model byl sestaven z pozorování topologie, pravidel větvení, délky a průměru odkazu a orientace kořene, poskytovaných in situ a extrahovanými kořenovými systémy. Vyhodnocovací testy byly prováděny na úrovni závodu a na úrovni terénu. Na úrovni pole byla simulace 2D (Hu et al., 2003) Autoři uvádí parametry z modelu pro každý cyklus růstu, zahrnují pravděpodobnost rozvětvení, W (poměr rytmus hlavní osy vs. laterálních kořenů), B (pravděpodobnost vzrůstu) a C (pravděpodobnost na přežití). Kořenové segmenty byly prezentovány jako spojení z jednotlivých uzlů. V tomto smyslu kořen nemá žádné uzly, proto byl zaveden imaginární uzel se všemi základními délkami. Za účelem získání parametrů z modelu byly pěstovány semenáčky pšenice ve fytotronu v pískové kultuře zavlažované živným roztokem. Jednotlivé kořeny z 19 dní starých semenáčků byly skenovány a obrazy byly analyzovány s kořenovým obrazem softwaru pro analýzu WinRhizo. Kořeny byly seskupeny do 3 relativně homogenních skupin na základě analýzy o podobnosti podle 4 kritérií: délka části hlavního kořene, průměr z kořenového hrotu z hlavního kořene, laterální hustoty délky, boční hustota kořenů.

V minulosti byly pokusy zachytit architekturu naroubované borovice kamenné (*Pinea Stone* L.) Studie (Mutke et al., 2005), kde se autoři soustředí na aspekt a analýzu růstu, větvení u přibližně 5 000 jednotlivých výhonů na 27 naroubovaných borovic kamenných. Naměření dat na stojících stromech umožnilo studovat korelaci topologických a geometrických proměnných u jednotlivých stromů. Jediné známé korelace byly nalezeny s parametry mateřského výhonu, který se tvořil v předchozím roce. V roce 2005 se zkusily 3D zdigitalizovat i menší rostliny než stromy (Watanabe et al., 2005b). Pokus se uskutečnil na rýži, která byla pěstována v květináčích a úkolem bylo specifikovat její architekturu a najít vhodné funkce, které by reprezentovaly 3D růst ve všech tří fází. Veškerá data byla změřena 3D digitizérem. Struktury rostliny rýže v intervalech se zdigitalizovaly od fáze mladé sazenice do dospělosti. Formalismus L-systému byl použit k vytvoření rostlin 3D modelu rýže, zahrnující modely fenologického vývoje a období vzcházení listů jako funkci teploty a fotoperiody, které byly použity k určení načasování

vzcházení oje. Vztahy mezi uzlovými polohami a délkami listů, úhly listů a úhly oje byly analyzovány a použity ke stanovení růstových funkcí pro modely. „3 D virtuální rýže“ reprodukuje strukturální vývoj izolovaných rostlin a poskytuje dobrý odhad procesu odnožování a akumulace listů. Výsledky naznačily, že „3 D virtuální rýže“ má možnost demonstrovat rozdíly ve struktuře a vývoji mezi kultivary a za různých podmínek prostředí.

Pro analýzu kořenové architektury lze vypočítat šest proměnných, které se týkají průměru kořenů a jejich způsobu větvení. Tyto proměnné zahrnují: rychlost zmenšování průměru celého kořene, zúžení segmentu, rychlost větvení, poměr mezi celkovou plochou průřezu kořene před a po větvení, poměr mezi průměrem ztráty pro hlavní osu v bodě větvení a součtem průměrů větví, a průměr mezi průměrem hlavní osy proti proudu a průměrem větve, který vyjadřuje relativní velikost větví ve srovnání s hlavní osou. Na základě těchto proměnných se identifikovaly tři typy kořenů (Taproots, Short roots a running roots) u různých dřevin a půdních materiálů. Tyto typy mají vliv na funkčnost kořenového systému všech studovaných druhů (Vennetier et al., 2015).

4.1 Popis kořenového systému

Kořenový vývoj, který je klíčovým aspektem růstu a stability rostlin, lze podrobněji rozdělit do dvou hlavních stádií: primárního vývoje kořenů a laterálního vývoje kořenů.

Primární vývoj kořene

I když většina kořenového systému vzniká po embryonálním období z postranních kořenů, všechny tyto struktury pocházejí z vnitřní buněčné vrstvy primárního kořene. Postranní a adventivní kořeny navíc znovu vytvářejí stejnou anatomickou strukturu jako primární kořen, což potvrzují mikroskopická pozorování a exprese genových markerů (Malamy, 2005a). Proto je klíčové rozumět vývoji a udržování primárního kořene pro celkové pochopení vývoje kořene. Primární kořen se vytváří během embryogeneze a na jeho vrcholu se nachází kořenový meristém, což je populace kmenových buněk zodpovědných za neustálý růst všech typů kořenových buněk (Jürgens, 2001). Klidové centrum v jádru kořenového meristému se pomalu dělí a udržuje dvě sousední vrstvy rychle se dělících funkčních iniciál kmenových buněk, které jsou zdrojem všech buněk v rostoucím kořenu (Jiang et al., 2005; Van Den Berg et al., 1997). Společné funkce těchto a dalších genů umožňují pokračující růst primárního kořene

prostřednictvím dělení kmenových buněk. Jakmile buňky opustí niku kmenových buněk, přestanou se dělit, prodlužují se a diferencují do všech typů kořenových buněk (Sarkar et al., 2007) .

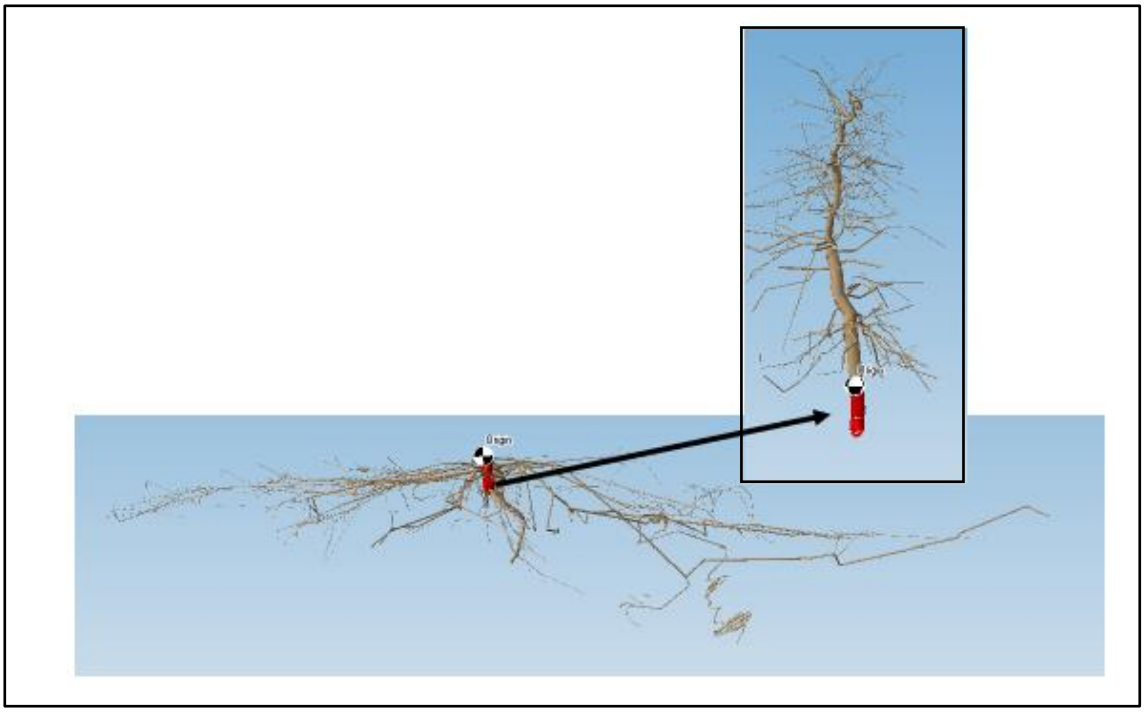
Laterální vývoj kořene

Většina kořenového systému se tvoří po embryonálním období a zahrnuje sekundární a terciární kořeny, které vyrůstají ze sekundárních kořenů. Všechny tyto kořeny se nazývají laterální kořeny a pocházejí z pericyklu primárního kořene (Malamy, 2005b). Přestože pericyklus vypadá radiálně symetricky, cévní svazky některých dvouděložných rostlin mají bilaterální symetrii se dvěma póly xylému a dvěma póly floému (Dolan et al., 1993). Laterální kořeny se tvoří pouze z pericyklických buněk u xylémových pólů(Blakely et al., 1982). Pozorování u kořenů hrachu ukázala, že vysoká teplota blokuje tvorbu laterálních kořenů, která se obnoví po přemístění rostlin na přijatelnou teplotu (Gladish et al., 1993). Toto bylo potvrzeno u huseníčky rolní (*Arabidopsis* L.), kde mitotické vzorce v pericyklu 2–6 mm od kořenového hrotu naznačují, že specifikace zakladatelských buněk probíhá v primární zóně diferenciace kořenů (De Smet et al., 2007). Nedávné důkazy ukázaly, že akumulace hormonu auxinu v pericyklických buňkách u xylémových pólů v blízkosti primárního kořenového meristému, nazývaného "bazální meristém", je úzce spojena se specifikací zakladatelských buněk (De Smet, Hyo Jung, et al., 2007).

4.1.1 Podrobný popis kořenového systému

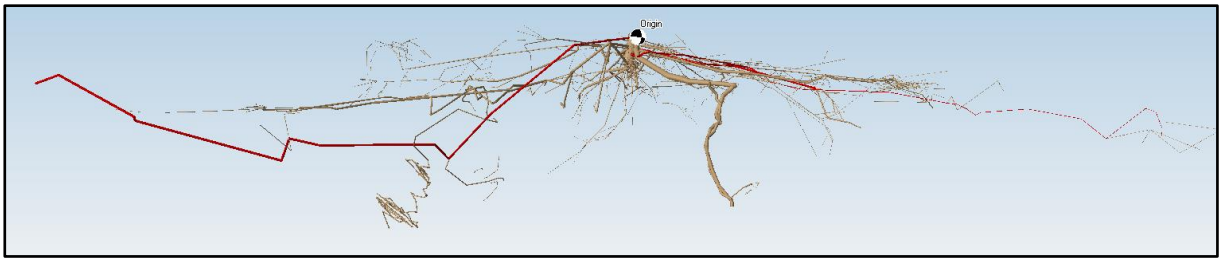
Kořenový systém je celá struktura kořenů, jak jemných, tak hrubých a rozprostírá se v podloží ve všech směrech – vodorovně, vertikálně i diagonálně. Tato komplexní síť kořenů poskytuje rostlině pevnou oporu, umožňuje efektivní přísun vody a živin a přispívá k jejímu zdravému růstu.

Tap root - První kořen, který se vyvine, je centrální a individuální kořen, jenž se orientuje vertikálně do hloubky. Tento kořen, vznikající ze žaludu, se v počáteční fázi klíčení označuje jako kořínek. Často je vnímán jako podzemní prodloužení kmene (obr. 6)
(Doutora et al., 2014).



Obrázek 6. Ukázka Tap root

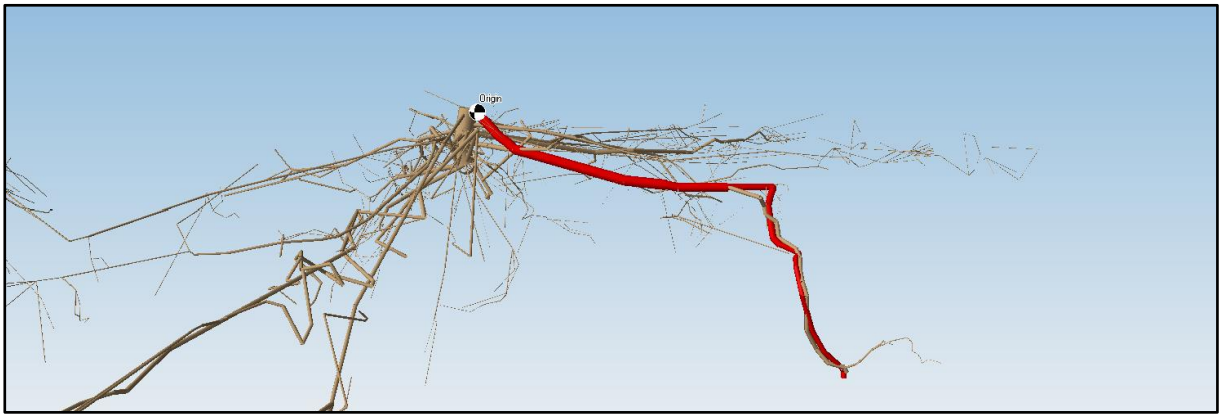
Vyhledávací kořen (Searching root): Kořen, který se prodlužuje směrem do hloubky, intenzivně pátrá po dostupných živinách a vodě v půdě. Tento růst mu umožňuje překonávat různé vrstvy půdy, čímž zajišťuje rostlině přístup k potřebným zdrojům pro její zdravý vývoj. Tímto způsobem se kořen neustále rozšiřuje a proniká do stále hlubších vrstev podloží, aby efektivně využil veškeré dostupné živiny a vodu (obr.7).



Obrázek 7. Ukázka searching root

Hloubkový kořen (Deep root): vertikálně rostoucí kořen stromu, který se prodlužuje směrem do hloubky půdy. Tento kořen hraje klíčovou roli při stabilizaci stromu a při zajišťování přístupu k vodě a živinám, které se nacházejí ve spodních vrstvách půdy, kam povrchové kořeny nemají dosah. Hluboký kořen je zvláště důležitý pro stromy rostoucí v

oblastech s nepravidelným přísunem vody nebo v suchých podmínkách, protože mu umožňuje čerpat vodu z větších hloubek (Obr. 8).



Obrázek 8. Ukázka hloubkového kořene

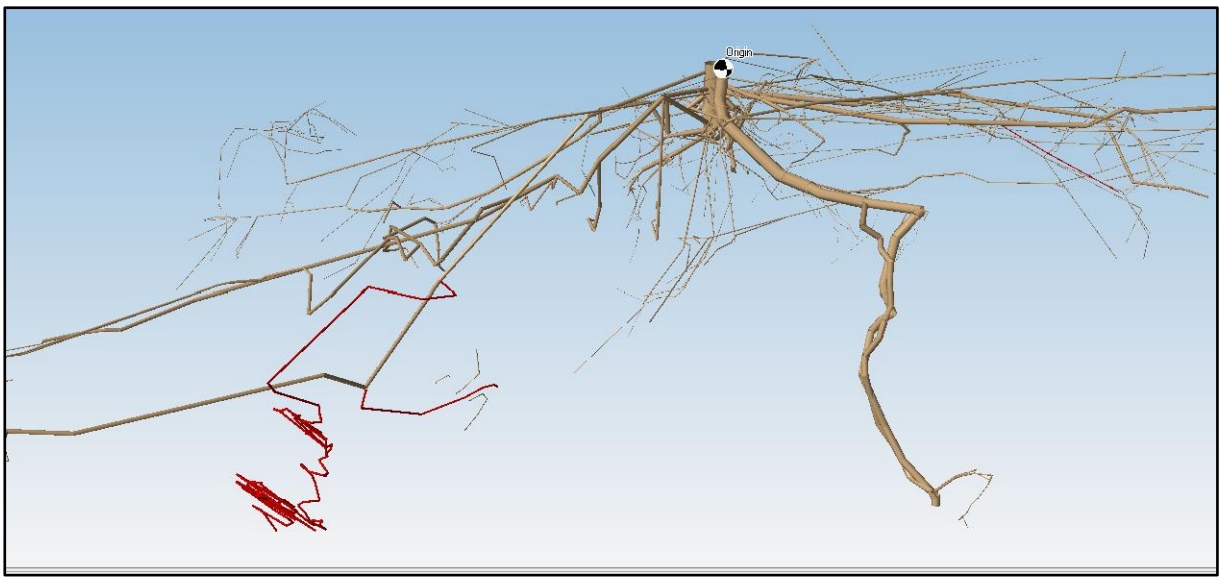
Laterální kořen: je kořen, který vyrůstá z jiného, již existujícího kořene. Tyto postranní kořeny se rozvíjejí z hlavního kořene, známého jako taproot, který je prvním kořenem rostoucím přímo dolů z embrya rostliny. Primární postranní kořeny se obvykle odchylují od tohoto hlavního kořene a rozvětvují se do stran, čímž vytvářejí síť kořenů, která zajišťuje rostlině stabilitu a umožňuje efektivnější příjem vody a živin z půdy(obr.9) (Doutora et al., 2014).

Obrázek 9. Ukázky primárního laterálního kořene

Rodičovský kořen a náhradní kořen: kořen, který vyrůstá z jiného kořene. Náhradní kořen vzniká jako postranní kořen v reakci na zranění rodičovského kořene. U většiny druhů rostlin náhradní kořeny pokračují v růstu ve směru, kterým rostl původní, poškozený kořen. Tyto náhradní kořeny jsou obvykle zařazeny do stejné kategorie jako kořen, který nahradily a hrají klíčovou roli v obnově a zachování funkčnosti kořenového systému (Doutora et al.,2014.).

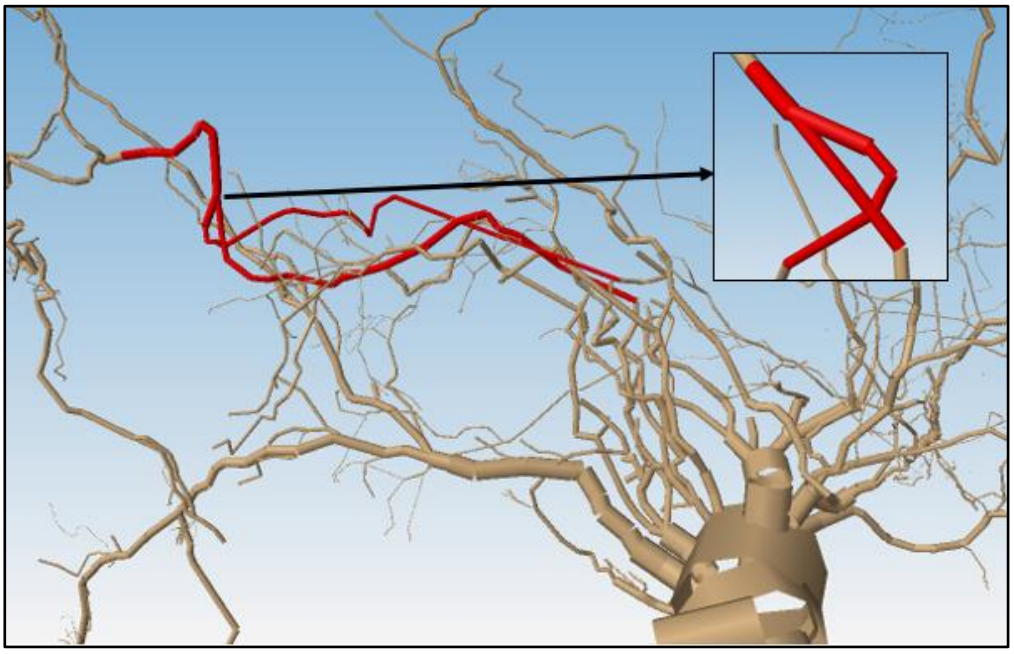
Hloubkový kořen (sinker root): kořeny druhého nebo třetího řádu, které se vyvíjejí z horizontálně orientovaných rodičovských kořenů. Tyto kořeny mají lignifikovanou strukturu a rostou vertikálně do hloubky, často přesahující hloubku rodičovského kořene. Jejich primární funkcí je absorpce vody z hlubších vrstev půdního profilu a její transport do xylému rostliny. V případě potřeby mohou také zajišťovat transport vody z hlubokých vrstev do povrchových horizontů, což je proces známý jako hydraulický zdvih (Obr. 10) (Doutora et al., 20014.).

Rozdíl mezi hlubokým kořenem a hloubkovým je ten, že deep root je hlavní kořen, který roste do hloubky od začátku růstu rostliny, zatímco sinker roots jsou sekundární kořeny, které rostou dolů z horizontálních kořenů a doplňují schopnost rostliny získávat vodu z hlubších vrstev půdy.



Obrázek 10. Ukázka hloubkového kořene

Kořenové rouby jsou malé struktury vzniklé spojením dvou silných kořenů, které rostou blízko sebe nebo se v určitém místě kříží. Toto spojení může být natolik pevné, že kořeny mohou sdílet své vnitřní tkáně (xylém, floém a kambium), což vede k jejich vzájemnému prorůstání. Kořenové rouby se mohou vyskytovat mezi kořeny stejného stromu, nebo mohou vznikat spojením s kořeny stromů v okolí. Termín „obrat“ označuje životnost jemných kořenů od jejich vzniku až do jejich úhynu. Tato doba se liší v závislosti na druhu dřeviny, průměru kořenů, typu půdy a dalších faktorech (obr. 11) (Doutora et al., 2014).



Obrázek 11. Ukázka kořenové rouby

4.2 Aspekty ovlivňující architekturu kořenového systému

Kořenový systém dřevin je v kontaktu s řadou abiotických faktorů, jako je stav vody v půdě a dostupnost živin, které jsou zásadní pro podporu růstu kořenového systému (López-Bucio et al., 2003). Tyto faktory se neustále mění a schopnost rostliny na ně reagovat a účinně získávat vodu a živiny přímo ovlivňuje její zdraví a úspěšnost reprodukce. Tato část představuje několik příkladů toho, jak rostliny přizpůsobují své kořenové systémy v reakci na různorodé vnější prostředí, přičemž se zaměřuje na specifické environmentální podněty, kde byly podrobně zkoumány molekulární dráhy. V další části bude popsáno, jak jsou tyto reakce

začleněny do vnitřního vývojového programu primárního a laterálního růstu kořenů (López-Bucio et al., 2003).

4.2.1 Vodní stres

Sucho je nejrozšířenějším abiotickým stresem, který negativně ovlivňuje produkci plodin po celém světě (Sharp et al., 2004). Pochopení mechanismů, které řídí toleranci vůči suchu, je proto klíčové, zejména s ohledem na očekávaný úbytek vodních zdrojů v budoucnu (Malamy, 2005b). U některých rostlin bylo pozorováno, že vývoj kořenového systému je méně ovlivněn suchem než růst výhonků (Sharp et al., 2004). Udržení růstu kořenů při vodním stresu je považováno za prospěšné pro zajištění dostatečného přísunu vody a tlaku buněčného turgoru (Sharp et al., 2004). Rozsáhlejší kořenový systém byl spojen s lepším přežitím listů (Ekanayake et al., 1985), vyšší odolností vůči suchu a vyšším výnosem zrna (Babu et al., 2003) v rýži, kukuřici a dalších plodinách (Malamy, 2005b). Existují důkazy, že tolerance vůči suchu je řízena mnoha geny kvantitativním způsobem, a proto byly identifikovány kvantitativní znaky ovlivňující tuto reakci (Ashraf, 2010). Avšak některé studie ukázaly nedostatečnou nebo dokonce negativní korelaci mezi vlastnostmi kořenů a zvýšeným výnosem zrna při suchu u kukuřice a rýže (Lafitte et al., 2000). Sucho je komplexní jev, zahrnující různé faktory jako stav vody v půdě, úroveň evapotranspirace, ozáření, vlastnosti půdy, úroveň živin a interakce se škůdci a sousedními rostlinami (A. H. Price et al., 2002). Definování "typického" sucha pro účely výzkumu je tedy obtížné, stejně jako použití různých genetických populací v jednotlivých studiích. Dosud většina molekulárních faktorů podílejících se na reakcích na sucho není známá a neexistuje vhodný modelový systém pro studium tohoto stresu na molekulární úrovni (Denby et al., 2005). Výzkum se proto zaměřuje na modelovou rostlinu huseníček rolní. Bylo provedeno mnoho studií o toleranci vůči suchu u huseníčku, ale jen málo se zaměřilo na kořenový systém v těchto podmínkách, zejména kvůli křehkosti kořenů, což ztěžuje kvantifikaci růstu v půdě. Proto se huseníček často pěstuje na agarových deskách s osmotickými látkami simulujícími vodní, což však vede ke snížení tvorby laterálních kořenů (Weele et al., 2000). Nedávný výzkum v laboratoři Malamy ukázal, že osmotický potenciál média je detekován kořeny, které vysílají signály do vzdušných tkání ke snížení jejich propustnosti, což ovlivňuje příjem sacharózy .Existuje jen málo důkazů, že osmotický stres v kultuře mění vývoj kořenového systému nezávisle na příjmu sacharózy vzdušnou tkání. Zjevně se kořenový systém mění v reakci na sucho u modelových plodin a existují náznaky, že zvětšená

hloubka a šířka kořenů poskytuje výhodu pro odolnost vůči suchu na poli kořenů (MacGregor et al., 2008).

4.2.2 Transpirace vody

Jak bylo zmíněno výše transpirace vody je důležitým ukazatel toho, jak nadzemní část dřeviny reaguje například na světové strany. Každá dřevina potažmo rostlina zaujímá určitou strategii růstu vůči svému životnímu prostředí. Z transpirace vody je možné zjistit jakou strategii zaujímá právě dřevina, která roste například na území s nedostatkem vody, s nedostatkem světla anebo která roste na povrchu s písčitou půdou. To vše dokážeme zjistit pomocí transpirace vody. Podzemní kořenovou biomasou se zabýval (Rewald et al., 2011). Zde autoři vyvinuli systém pro monitorování toku vody mezi kořenovými řády za pomoci miniaturizovaných komor. Různé kořenové řády 4letých citrusových vulkamerianských stromů byly analyzovány s ohledem na morfologii kořenů a tok vody. Osm kořenových řádů vykazovalo široké překrývání průměru, ale rozdíly v hustotě tkání a specifické kořenové oblasti (SRA) byly jasně rozlišitelné. Kořenové pořadí bylo identifikováno jako determinant toku vody. Kořeny prvního řádu vykazovaly výrazně vyšší rychlost příjmu vody než druhý a třetí kořenový řád, zatímco čtvrtý a pátý kořenový řád vykazoval přebytek vody. Přebytek vody naznačoval výskyt hydraulického přerozdělování v důsledku rozdílů v osmotických potenciálech. Doporučujeme, aby rostliny mohly využít hydraulické redistribuce, aby se zabránilo hrubému vysychání kořenů a aby se zvýšilo získávání živin. Naše studie ukázala, že nová metoda "miniaturní duplexní komory" umožnila přímé měření toků vody podle pořadí kořenů a může být hlavním nástrojem pro budoucí studie o vlastnostech kořenového řádu. Ve studii (Tfwala et al., 2019) se analyzují údaje o transpiraci stromů z 94 publikovaných studií provedených v různých lokalitách v letech 1970–2016, což představuje 196 datových bodů a hledá vztahy mezi morfologickými znaky, výškou stromu, průměrem na prsní výšku a faktory prostředí jako je průměrný roční úhrn srážek, průměrná roční teplota a nadmořská výška na spotřebu vody u 130 druhů stromů. Analyzovány byly také techniky použité ve studiích pro měření transpirace stromů. Logaritmická transformace se pohybovala mezi 0 a 7,1 L den -1. jednorozměrná 19 korelační a regresní analýza odhalila, že logaritmická transformace pozitivně a významně korelovala s výškou stromu.

4.2.3 Dusičnan

Po vodě je dusík druhým nejdůležitějším faktorem pro růst rostlin a tento požadavek lze uspokojit pouze aplikací dusíkatých hnojiv (Miller et al., 2005). I když koncentrace dusičnanů má malý vliv na primární růst kořenů, boční vývoj kořenů reaguje na vysoké koncentrace dusičnanů dvěma odlišnými způsoby. Pokud je celý kořenový systém vystaven vysokému obsahu dusičnanů (> 10 mM), dochází k celkovému snížení vývoje laterálních kořenů ve fázi po vzniku LRP a těsně před aktivací laterálního kořenového meristému (Zhang et al., 1998). Toto zastavení růstu LRP je pravděpodobně způsobeno akumulací dusičnanů ve vzdušných částech rostliny, což naznačuje, že jde o signály přenášené na velké vzdálenosti do kořenů (Ni et al., 2014). Zajímavé je, že při přechodu z vysoké na nízkou koncentraci dusičnanů (< 1 mM) dochází k téměř okamžitému obnovení růstu zastaveného LRP, což naznačuje existenci specifického kontrolního bodu regulovaného dusičnany v této fázi vývoje LRP (Ni et al., 2014). Naopak, když je celý kořenový systém vystaven nízkému obsahu dusičnanů (10 μM) a část kořenového systému je vystavena místu s vysokou koncentrací dusičnanů (10 μM), dochází v této oblasti k lokálnímu zvýšení vývoje laterálních kořenů (Hodge, 2004). Toto zvýšení bočního růstu kořenů není způsobeno zvýšenou iniciací LRP, ale zvýšenou rychlostí růstu bočních kořenů díky vyšší produkci buněk v laterálním kořenovém meristému(Ni et al., 2014). Bylo také prokázáno, že tento zvýšený boční růst kořenů je stimulován přímo dusičnany, a nikoli jejich následnými asimilačními produkty (Ni et al., 2014). Je zajímavé, že některé údaje naznačují, že vysoký obsah dusičnanů potlačuje vznik bočních kořenů na agarových deskách se sacharózou tím, že snižuje propustnost nadzemních tkání pro sacharózu v růstovém médiu, podobně jako při osmotickém stresu (MacGregor et al., 2008). Bylo by zajímavé přehodnotit výše uvedená data s ohledem na toto nové mechanistické chápání. Je sice jednoduché vysvětlit celkové potlačení laterální tvorby kořenů pomocí modelu propustnosti tkání, ale mnohem obtížnější je vysvětlit lokální proliferaci bočních kořenů v oblastech s vysokou koncentrací dusičnanů. Existují také protichůdné výsledky týkající se místní reakce postranních kořenů huseníčeku na dusičnanové skvrny (Linkohr et al., 2002).

4.2.4 Fosfor

Třetí nejdůležitější složkou je fosfát. Fosfát je klíčová živina pro rostliny, která se často váže na další prvky v půdě a tím se stává pro kořenový systém většinou nedostupná (López-Bucio et al., 2002). Aby se rostliny přizpůsobily nedostatku fosfátů, mění strukturu svých kořenů z důvodu zlepšení průzkumu půdy a zvýšení schopnosti přijímat živiny. Tyto změny zahrnují: zpomalení růstu primárních kořenů, zvýšení počtu postranních kořenů a rozvoj postranních kořenů blíže k hlavnímu kořenovému hrotu (López-Bucio et al., 2002). Tento adaptivní proces často vede ke snížení růstu výhonků, protože rostliny přesměrovávají sacharidy do kořenového systému (Hermans et al., 2006)), což způsobuje vyšší poměr kořenů vůči výhonkům při nízkých koncentracích fosfátů.

4.3 Vykopání kořenů

Máme několik technik pro měření architektury kořenů. Vyhloubení kořenů je možné několika způsoby:

- Roční hloubení pomocí lopat a ručního nářadí. Je pracnější a časově náročnější metodou. Pro představu úplné vyhloubení kořenového systému v objemu půdy 5m^3 s využitím všech hrubých kořenů zabere až 8 pracovních dnů (Reubens et al., 2007).

- Dalším způsobem výkopu kořenů je mokré hloubení. Výhodou mokrého výkopu je, že je rychlejší a při nízkém tlaku vody je zlomení jemných kořenů mnohem méně závažné. V písčitých půdách je mokré hloubení mnohem rychlejší než suché, ale s rostoucím obsahem jílu se časová výhoda snižuje (Stoeckeler et al., 1938). Hlavní nevýhodou mokrého výkopu je množství potřebné vody (Böhm, 2012) a skutečnost, že jemnější kořeny mají za mokra tendenci se k sobě přichytit, což znemožňuje efektivní studium větvení kořenů nebo jejich vztahu ke specifickým půdním vlastnostem.

- V posledních letech byla zdokonalena metoda hydraulického vykopávání půdy (Gross, 1995; Lindsey et al., 1995). Hydraulické vykopávání půdy může mít za následek minimální pozorovatelné dopady na živé kořeny a po vykopání lze kořeny v případě potřeby kontrolovat. Odstraňování kalů vyžaduje další vybavení a může vést k

dodatečnému odklízení, pokud je nutné skládkování (Gross et al., 2002). Vysokotlaké vzduchové trysky (Böhm, 2012; Rizzo et al., 2002) rovněž nezpůsobují poranění hrubých kořenů a nevyžadují vodu ani systém, který by je zbavoval hrudek. Výkop by měl být prováděn postupně po vrstvách nebo sektorech, přičemž by se mělo minimalizovat poškození architektury zajištěním kořenů v dané poloze pomocí kůlů a tahových úvazků nebo zavěšením hlavních kořenů na dřevěné fošny, které se rozpínají od pařezu až k okrajům výkopu (Danjon et al., 2008b; Edwards, 2003). Jakmile je kořenový systém uvolněn, existují dvě možnosti: buď měřit kořenový systém v jeho původní poloze ještě na poli (Danjon et al., 2008b; Oppelt et al., 2000) nebo vyjmout kořenový systém z půdy a měřit ho jinde (Di Iorio et al., 2005) . Pokud jde o první možnost, je důležité kořeny dostatečně uvolnit z důvodu přesného změření jejich architektury. Pokud je kořenový systém vyjmut, lze měření provádět mnohem pohodlněji, např. na vhodné výšce nebo pod přístřeškem za špatných povětrnostních podmínek.

5 Morfologie stromů

Morfologie stromů je studie, která se zabývá vnější stavbou rostlinného těla. Morfologie zahrnuje histologii, organologii a cytologii. V této kapitole se budeme zabývat transpirací vody ve dřevinách a morfologickými znaky.

Strukturou simulátoru růstu a morfologického větvení u čeledi borovicovité (*Pinaceae*) se zabývá Studie Ford et al., (1990). Autoři zde definují růst jako čistou produkci olistění, přírůstek tloušťky větví a export fotosyntátu do kmene. Morfologie větví je popsána prostorovým rozmístěním segmentů větví, resp. křivkovým profilem celé větve, která se ohýbá pod vlastním tlakem váhy. Růst je výsledkem pěti vzájemně se ovlivňujících procesů. Vývoj listů je výsledkem olistění na každoroční produkci nových větviček a odumírání listů. Rozdělení biomasy mezi růstem větví a exportem do kmene stromu je řízeno pomocí metody fenologií růstu větví. V období růstu větví je přírůstek biomasy rozdělen mezi prodlužování větví a s ním spojený růst větví – růstem olistění a tloustnutím větví. Držení větví ve vertikální rovině dodržuje určitý profil vychýlení. Produkce nových terminálů větví z předchozího roku probíhá v souladu se zásadami podle morfologických pravidel. Jsou popsány dva typy pravidel:

1. jednoduché číselné posloupnosti, kde počet větviček závisí na pořadí a délce mateřské větve
2. proces laterální inhibice mezi větvičkami v kombinaci se závislostí na pořadí větviček.

Tento soubor teorií popisuje růst větví na úrovni přírůstku hmotnosti, ztráty odumírání listů a export do kmene stromu. U každé ze čtyř hlavních složek: morfologické vlastnosti, charakteristiky olistění, fenologie a tloušťka větví lze předpokládat, že každá z nich bude mít vliv na přírůstek hmoty, ztráty a vývoz. Navrhovaný model implicitně definuje růst větví jako řídící proces, tj. růst větví sám o sobě určuje, zda se bude jednat o růst větví. Budoucí růst a tato kontrola je výsledkem interakcí mezi čtyřmi složkami. K prozkoumání těchto interakcí je třeba provést řadu simulací.

Metoda pro měření trojrozměrné architektury stromů, která funguje na úrovni větví a současně popisuje topologii rostlin (větvení), geometrii rostliny a morfologii větví, kombinuje 3D digitalizační zařízení (G. Colchester, 2012) spojené se softwarem Dip1Ami určeným pro

ovládání digitizéru a správu získávání dat. Snímky rostlin lze rekonstruovat ze sady dat pomocí softwaru pro sledování paprsků POV-Ray. Metoda byla aplikována na architektonickém popisu 6 20letého a 7 m vysokého ořechového stromu. Vizuální srovnání mezi stromovou fotografií a obrazem syntetizovaným z digitalizace je uspokojivé. Informace, které lze odvodit ze souboru dat na celém stromě i na úrovni výhonků, jsou ilustrovány z distribucí morfologie výhonků a z prostorového rozložení listové plochy a ovoce. Prostorové rozdělení listové plochy a plodu jsou v souladu s předchozími výsledky a hypotézami zahrnujícími světelné gradienty v koruně. Nakonec jsou diskutovány metody pro popis architektury 3D stromů, a také proveditelnost metody při aplikaci na tak velký strom (Sinoquet et al., 1997). V roce 2005 byl uskutečněn výzkum, který si kladl za cíl popis reakce sazenic korkovníku na světelný gradient v jejich prvním vegetačním období. Sazenice byly vypěstovány s různými síťovými filtry a zalévány na plnou polní kapacitu půdy. Reakce na různé úrovně světla byla studována z hlediska morfologie a růstu, měření výšek, průměrů, rozměrů fotosyntetického zařízení, nadzemní a podzemní biomasy. V dubnu, červnu a říjnu proběhly tři extrakce rostlin. Největší morfologická plasticita byla zaznamenána ve velikosti listů, která se změnila z 1,8 cm 2 za plného slunečního světla na 5,8 cm 2 v maximálním stínu. Sazenice korkového dubu vydržely úroveň světla 20 % při relativních rychlostech růstu (RGR) podobných těm při plném slunečním světle. Intenzity 12 světla pod 50 % však vedly k menší akumulaci kořenové biomasy. Rostliny pod 5 % světla vykazovaly jasné příznaky etiolace a jejich čistá míra asimilace byla prakticky nulová (Cardillo et al., 2006).

6 Modely dřevin

Nedorozumění v předchozích diskusích o vztazích mezi objemovým růstem a růstem v lineárních dimenzích objasňuje studie Norberg, (1988). Různé části rostlin musí často vykazovat různé režimy růstu (z funkčních důvodů); proto musí být funkce řídnutí pro celé rostliny často kombinací různých funkcí pro různé části rostlin (v dřívějších modelech byl na celou rostlinu aplikován jeden růstový režim – někdy chybně). Tento článek také odvozuje funkce řídnutí větve, aby odvozoval funkci řídnutí pro rostliny rostoucí podle principu elastické podobnosti. Když kořenová konkurence pohání řídnutí populace, geometrie nadzemních konstrukcí může být snadno v rozporu s funkcí řídnutí nadzemních částí rostlin. Autor také odhaluje artefakt allometrie z měřicích postupů v lesnictví, porovnává předpovědi z různých modelů s empirickými daty v literatuře a kriticky zkoumá dřívější modely (Norberg, 1988). Analýzu funkčně strukturálního stromového modelu, která je výsledkem rozvojových modelů na jedné straně a morfologických modelů na straně druhé popisuje Sievänen et al., (2000a). Stávající morfologické a funkčně – strukturální modely jsou stručně zhodnoceny. Tento článek představuje idealizovanou elementární jednotku, kterou lze použít jako základní součást FSM a určuje procesy, které je třeba zohlednit. Distribuce metabolitů a růst je identifikován jako jeden z hlavních kontaktních bodů, které je třeba zkoumat ve spojení s FSM a jsou zde uvedeny různé přístupy, které lze použít při konstrukci modelové složky pro tento proces. Nakonec se zde analyzují výpočetní požadavky FSM, diskutuje o výzvách, které představují a hodnotí se jejich použitelnost v řadě různých úkolů. Další studie, která uvádí údaje shromážděné ze čtyř různých poloh koruny Abies balsamea je Gilmore D.S et al., (1997). Byly zde použity k analýze, k sestavení modelů popisujících kumulativní rozložení listové plochy v koruně a k předpovědi hmotnosti jehličí jednotlivých větví, průměrného úhlu, průměru a délku větví, poloměr koruny na větve. Testovaly se zde hypotézy, že regresní modely jsou stejné mezi pozicemi v koruně, a že model pro předpověď hmotnosti jehlic větví je platný na úrovni severních a jižních krajních poloh centrální klimatické zóny. Poloha koruny měla opravdu vliv na modely zkonstruované pro předpověď hmotnosti jehlic, úhlu, průměru a délky větví, poloměru koruny a počtu živých větví na větev. Nicméně ve srovnání s rozšířeným modelem, který zahrnoval parametry vypočtené pro každou korunovou třídu, došlo ke změně. Došlo pouze k malé ztrátě přesnosti modelu, pokud byl použit obecný model. Ten byl zkonstruován na základě údajů shromážděných ze všech korunových tříd k předpovědi hmotnosti jehlic, úhlu větvení a průměru větví. Regresní rovnice, jedinečné pro každou korunovou třídu, byly potřebné

k předpovědi tvaru koruny a rozložení listové plochy v koruně. Náš model hmotnosti jehličí větví, který byl sestaven z údajů shromážděných na jižním okraji centrální klimatické zóny, důsledně podhodnocoval hmotnost jehličí, když byl aplikován na severní okraj oblasti středního klimatického pásma.

Fraktální analýza modelů kořenové architektury pro prostorovou predikci větvení kořenů, hmotnosti a velikost je důležitým ukazatelem pro zobrazení trojrozměrného modelu kořenového systému (Ozier-Lafontaine et al., 1999b). Na základě předpokladů fraktálního a trubkového modelu byl vyvinut statický trojrozměrný model kořenového systému sepia Gliricid. Model byl sestaven z pozorování topologie, pravidel větvení, délky a průměru odkazu a orientace kořene, poskytovaných in situ a extrahovanými kořenovými systémy. Vyhodnocovací testy byly prováděny na úrovni závodu a na úrovni terénu. Na úrovni pole byla simulace 2D kořenových map přesná pro vzory distribuce kořenů, ale počet simulovaných kořenových teček byl v povrchových vrstvách podceněn. Tento přístup se jevil jako vhodný ke studiu kořenového systému dospělých stromů. Ve srovnání s explicitními modely je hlavní výhodou fraktálního přístupu jeho plasticita a snadné použití. Model však poskytl vhodné předpovědi sušiny kořenů, celkové délky a průměru kořene na úrovni rostlin. Tato analýza je funkčně strukturálního stromového modelu, který je výsledkem rozvoje vývojových modelů na jedné straně a morfologických modelů na straně druhé. Stávající morfologické a funkčně – strukturální modely jsou stručně zhodnoceny (Sievänen et al., 2000a). Autoři zde představují idealizovanou elementární jednotku, kterou lze použít jako základní součást FSM a určuje procesy, které je třeba zohlednit. Distribuce metabolitů a růst je identifikován jako jeden z hlavních kontaktních bodů, které je třeba zkoumat ve spojení s FSM. Zde jsou uvedeny různé přístupy, které lze použít při konstrukci modelové složky pro tento proces. Analyzují se výpočetní požadavky FSM, diskutuje o výzvách, které představují a hodnotí se jejich použitelnost v řadě různých úkolů. V dnešní době je uznáno 22 architektonických modelů (Hallé, 2010). Čtyři nejběžnější druhy modelu jsou Leeuwenberův, Rauh, Massartův, Almez. Uvádí se zde, že každý strom má svůj specifický růstový program, který je řízený geny.

- Model Leeuwenbergův – používaný u čeledi Apocynaceae. Je to model, kdy stonky jsou svislé a je kvetoucí terminál.

- Model Rauh – vzpřímený kmen a větve, rytmicky větvené a boční kvetení.

- Massartův model je typický pro rod blahočety (*Araucaria* L.), čili vertikální kmen, rytmické větvení a boční pohlavnost.

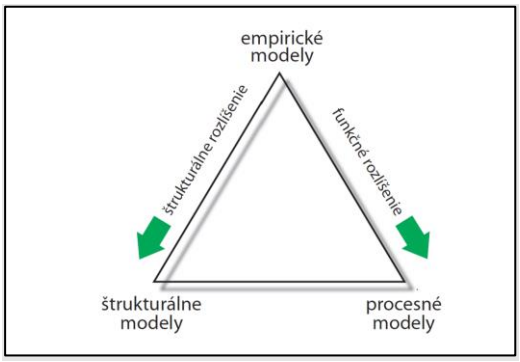
- Model Troll – v mládí roste každý stonek vodorovně a po opadu listů se základna stonku změní. Strom tedy roste jako součet těchto odnoží. Kvetení může být terminální jako u Annona nebo boční.

V článku jsou popsány odchylky, které mezi s sebou mají dané modely (Hallé, 2010). Prořezávání borovice pineové (*Pinus pinea* L.) pomocí modelu funkční strukturální rostliny je pro dnešní dobu klíčové (Surový et al., 2012). Modely funkčně strukturálních rostlin se stávají důležitými nástroji pro modelování struktury a růstu rostlin, včetně komplexních organismů jako jsou stromy. Tyto modely kombinují výhody empirických, mechanických a strukturálních modelů pro simulaci růstu jednotlivých rostlinných struktur (větve, pupeny, listy atd.). Tento přístup umožňuje realistické vyhodnocení reakce rostliny – včetně změn struktury a růstu na různé podmínky prostředí. Demonstruje potenciální využití těchto modelů k vyhodnocení růstu jednotlivých stromů v různých režimech řízení (prořezávání). Data použitá v této studii byla získána z 3D měření provedených digitizérem Fastrak Polhemus, se zvláštní pozorností věnovanou tvorbě pupenů a větvení. Každý segment pobočky byl analyzován, aby se odhadl jeho věk, což nám umožňuje dokumentovat roční strukturální změny. Pro simulaci a porovnání různých prořezávání používáme programovací jazyk XL a prostředí GroIMP (Surový et al., 2012). Další studie Condés et al., (2020), ve které byl hlavní cíl analyzovat alometrickou variaci borovic u nejběžnějších druhů podél gradientu suchosti Pyrenejského poloostrova a studovat reakci koruny na suchost, konkurenci. Určit, zda přítomnost inter-specifické konkurence modifikuje korunovou alometrii. K vývoji alometrických modelů, jejichž parametry byly zobecněny zahrnutím indikátorů suchosti a konkurence, byla použita sada 40 402 vzorků spolu s Martidinovým indexem suchosti jako indikátorem klimatických podmínek. Pozemky byly umístěny v monospecifických nebo smíšených porostech borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), borovice černé (*Pinus nigra* L.), borovice přímořské (*Pinus spinaster* L.), borovice pinie (*Pinus pinea* L.) a borovice halepské (*Pinus halepensis* L.). Podle výsledků jsou podmínky suchosti důležitými faktory modifikujícími korunovou alometrii studovaných druhů. Dále se zjistilo, že při modelování velikosti koruny by měla být vzata v úvahu jak velikostně symetrická, tak asymetrická konkurence, přičemž oba typy vedou k menšímu průměru koruny. Plastičnost

koruny studovaných druhů borovic v reakci na konkurenci vykazovala nízký rozsah variací, největší byla u borovice halepské, zatímco borovice lesní a borovice černá vykazovaly nejmenší. Vyvinuté modely odhalují významné druhově specifické účinky na korunovou alometrii, což ukazuje na schopnost druhů borovic přizpůsobit své koruny různým růstovým podmínkám (Condés et al., 2020).

6.1 Klasifikace modelů lesů

Klasifikovat modely lesa můžeme několika způsoby. Na základě metod modelování (empirické, strukturální, procesní) (obr.12), na základě času a prostoru (ekofyziologické, stromové, porostové, sukcesní, biomové) a na základě hierarchické a prostorové úrovně (stromové ekofyziologické, modely funkčních typů, ekofyziologické modely „big leaf“) (Fabrika et al., 2011).



Obrázek 12. Klasifikace modelů lesa na základě metod modelování (Fabrika et al., 2011)

V této práci budou více rozebrány modely rozdělené na základě metod modelování. Jak již bylo zmíněno výše, do této skupiny patří: Empirické modely, Procesní modely a Strukturální modely, které budou dále podrobněji rozebrány, neboť tyto modely, jsou nejdůležitější při tvorbě 3D modelů magnetickým digitizérem. Ostatní modely budou představeny pouze krátce.

6.2 Časově – hierarchická úroveň

V lesním prostředí probíhají složité procesy, které se odehrávají na různých úrovních od jednotlivých buněk až po celou biosféru. Tyto procesy jsou ovlivněny jak prostorovými, tak časovými faktory, přičemž hierarchie života v lese není určena pouze prostorovými dimenzemi,

ale také časovými měřítky, která mohou zahrnovat období od sekund až po tisíciletí. Na různých úrovních se vzájemně ovlivňují; vyšší úrovně řídí nižší úrovně prostřednictvím specifických parametrů, zatímco nižší úrovně předávají signály těm vyšším. Na časové ose je možné modely uspořádat podle jejich časového rozsahu, zatímco na prostorové ose se hierarchicky řadí úrovně od buněk až po biom. Na průsečíku těchto časových a prostorových úrovní se nachází různé typy modelů, jako jsou ekofyziologické modely, modely jednotlivých stromů, modely porostů, sukcesní modely a biomové modely. Každá úroveň vyžaduje specifické modely, které umožňují detailní pochopení složitých interakcí a dynamiky procesů v lesním ekosystému (obr. 13.) (Hans Pretzsch, 2001).

Ekofyziologické modely

Ekofyziologické modely se zaměřují na popis růstových změn na úrovni organických struktur prostřednictvím kauzálních procesů, jako jsou fotosyntéza, dýchání a alokace živin. Tyto modely se soustředí na procesní vztahy a často nevyužívají statistické vztahy, přičemž většinou modelují procesy na denní bázi. Patří mezi nejpočetnější a nejrozmanitější typy modelů (Komarov et al., 2003).

Stromové modely

Stromové modely rozkládají lesní porost na jednotlivé stromy a simulují jejich vzájemné interakce jako prostorově-časový systém. Tyto modely se obvykle zaměřují na statisticky odvozené rovnice, které regulují růstové chování jednotlivých stromů v závislosti na jejich růstových parametrech. Z časového hlediska většinou pracují s ročním intervalem (Fabrika et al., 2011).

Porostové modely

Porostové modely jsou jedny z nejstarších metod pro simulaci vývoje lesních porostů, které se zaměřují na průměrné charakteristiky porostu. Tyto modely zahrnují různé typy růstových tabulek a jsou považovány za přesnější, pokud obsahují dobře formulované biometrické zákony a jsou implementovatelné do počítačů. Některé modely, které představují přechod mezi modely zaměřenými na jednotlivé stromy a porosty, se zaměřují na frekvenci počtu kmenů, například podle tloušťkových tříd. Tyto modely často využívají diferenciální

rovnice, regresní modely nebo stochastické přístupy. Základní jednotkou těchto frekvenčních modelů je skupina stromů ve stejné kategorii (např. tloušťkový stupeň nebo věková třída). Porostové modely obvykle pracují s časovými horizonty deseti nebo pěti let, aby simulovaly změny v celé populaci nebo v distribuci početnosti (Mladenoff, 1996).

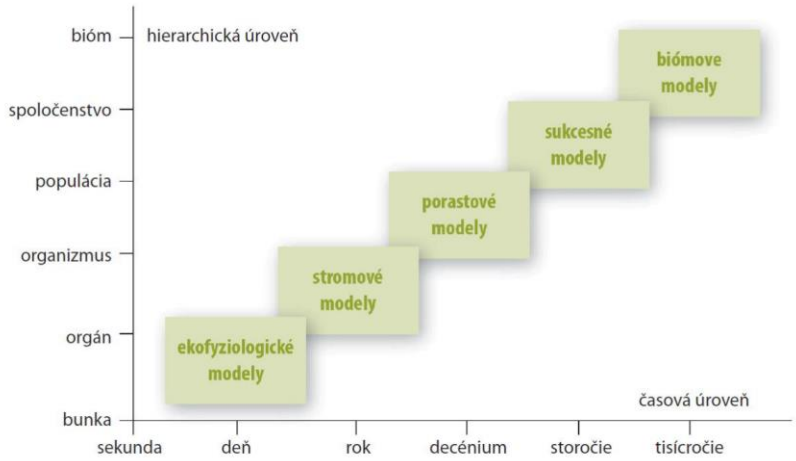
Sukcesní modely

Sukcesní modely se zaměřují na dynamiku růstu v rozsáhlých systémech složených z mozaikových a dílčích plošných jednotek, kde základní modelovou jednotkou je společenstvo stromů. Tyto modely předpovídají dlouhodobé změny neobhospodařovaných lesních porostů a důsledky změněných podmínek na produkci biomasy, přičemž zohledňují časové horizonty v řádu staletí (Lexer et al., 2001).

Biomové modely

Biomové modely, podobně jako sukcesní modely, pokrývají rozsáhlé oblasti jako jsou celé kontinenty a analyzují změny v dlouhých časových intervalech.

Při výběru modelu je důležité zvážit cíl modelování, potřebnou úroveň prostorového rozsahu, časový interval a úroveň detailu vstupních a výstupních údajů. Je klíčové použít model vhodný pro danou hierarchickou úroveň. Pokud neexistují modely pro konkrétní úroveň, lze přejít na vyšší nebo nižší úroveň. Přejít z vyšší úrovně na nižší se označuje jako „downscale“ a opačně jako „upscale“ (Thornton, 1998).



Obrázek 13. graf časovo – hierarchické úrovně (Fabrika et al., 2011)

6.3 Hierarchicko – prostorová úroveň

Modely používané k analýze lesních ekosystémů se dělí podle různých hierarchických a prostorových úrovní, což umožňuje detailní pochopení jejich složitého chování a reakcí. Na hierarchické úrovni lze modely rozdělit do osmi kategorií: jednotlivé orgány (např. listy nebo kořeny), jednotlivé stromy, velikostní třídy (skupiny stromů podle průměru), věkové třídy, populace nebo druhy, funkční typy (např. produkující nebo spotřebovávající biomasu), bioskupiny stromů (např. „patch“ nebo „gap“) a celé ekosystémy nebo biomy. Každá z těchto kategorií se zaměřuje na jiný aspekt lesního prostředí, od detailní analýzy jednotlivých organismů až po komplexní studium ekosystémů. Na prostorové úrovni se modely klasifikují do pěti kategorií: trojrozměrná pozice, dvourozměrná pozice, bioskupiny, porosty a regiony. Trojrozměrné modely poskytují informace o přesné poloze v prostoru pomocí souřadnic x, y a z, zatímco dvourozměrné modely se zaměřují pouze na horizontální souřadnice x a y. Bioskupiny, porosty a regiony jsou kategorie, kde stačí určit příslušnost daného objektu k širším prostorovým jednotkám. Na průsečíku časových a prostorových úrovní vznikají různé typy modelů, které jsou znázorněny v tzv. šachovnici modelů (obr.14). Tento diagram zobrazuje 13 různých modelů, přičemž každá kategorie modelu má svou specifickou pozici. Některé modely mohou mít více variant pozic v závislosti na jejich specifickém použití, což umožňuje flexibilní přizpůsobení různým analytickým potřebám (Fabrika et al., 2011; Lischke, 2001).

Statistické vegetační modely

Modely změny vegetačních typů na regionální úrovni zkoumají, jak se různé vegetační typy mění v reakci na klimatické a edafické podmínky. Pomocí statistických analýz propojují environmentální faktory jako je teplota, srážky a půdní vlastnosti, s klimaxovými společenstvy. Tyto modely simulují, jak variace v těchto podmínkách ovlivňuje vývoj a stabilitu vegetace. Výstupy modelů poskytují důležité informace pro plánování a řízení v oblasti ochrany přírody, lesnictví a udržitelného využívání krajiny, přičemž pomáhají předvídat budoucí vegetační trendy a jejich dopady na ekosystémy a biodiverzitu (Guisan et al., 2000).

Stromové ekofyziologické modely

Simulují růst orgánů stromů ve dvojrozměrném nebo trojrozměrném prostoru, přičemž aplikují procesní vztahy jako fotosyntézu a alokaci živin. Tyto modely zohledňují přesnou polohu jednotlivých orgánů, což umožňuje detailní analýzu jak různé faktory ovlivňují vývoj stromu. Ve dvojrozměrném prostoru se zaměřují na horizontální rozložení, zatímco v trojrozměrném prostoru zahrnují i vertikální aspekty. Modely pomáhají porozumět dynamice růstu stromů a jsou užitečné v lesnickém výzkumu a managementu lesních ekosystémů (Komarov et al., 2003).

Stromové funkčně-strukturální modely

Simulují morfologii stromů pomocí analýzy jejich topologie a architektury. Využívají růstové gramatiky, které definují pravidla pro vývoj orgánů stromu, jako jsou větve a listy. Tyto modely zohledňují procesní souvislosti, jako jsou distribuce živin a vliv klimatických podmínek, což umožňuje detailně analyzovat, jak různé faktory ovlivňují růst a strukturu stromu. Modely tak poskytují cenné informace pro výzkum a management lesních ekosystémů (Chelle et al., 2007).

Stromové empirické modely závislé na pozicích

Simulují růst jednotlivých stromů prostřednictvím statistických vztahů, přičemž konkurence mezi stromy je určena horizontální strukturou porostu. Tyto modely využívají údaje o umístění a velikosti stromů k analýze, jak prostorové uspořádání ovlivňuje jejich

konkurenci a růst. To napomáhá efektivnímu plánování a řízení lesních ekosystémů (Fabrika, 2005).

Stromové empirické modely nezávislé na pozicích

Simulují růst stromů, aniž by zohlednily jejich konkrétní umístění v porostu. Místo toho se zaměřují na konkurenci mezi stromy na základě obecných statistických vztahů a průměrných charakteristik porostu. Tento přístup umožňuje modelování růstu bez ohledu na prostorové rozmístění stromů (Wykoff et al., 1982).

Stromové modely „patch“ nebo „gap“

Soustředí se na analýzu vývoje stromů v malých, vymezených oblastech. Tyto modely studují, jak jednotlivé stromy interagují a jak se vyvíjejí v rámci skupin v konkrétních lokalitách. Jejich hlavním cílem je pochopit, jak dochází k sukcese ekosystémů – tedy k postupným změnám v rostlinných společenstvech a jejich strukturách během času. Modely typu patch zkoumají, jak se změny v malých oblastech, například v důsledku přirozených poruch nebo změn v prostředí, promítají do dynamiky celého ekosystému. Modely typu gap se zaměřují na vliv různých otvorů nebo prázdných míst v porostu na růst a regeneraci stromů, což pomáhá lépe pochopit, jak takové mezery ovlivňují sukcese a strukturu lesních komunit (Price et al., 2001).

Frekvenční modely typu patch nebo gap

Tyto modely zjednodušují analýzu lesních ekosystémů tím, že rozdělují stromy do vrstev nebo kohort. Tento přístup urychluje výpočty, protože místo detailního modelování každého stromu se zaměřuje na agregované vlastnosti skupin stromů. Rozdělením na vrstvy nebo kohorty se zjednodušuje simulace a analýza dynamiky porostu, což činí modely efektivnějšími a rychlejšími (Karl et al., 1994).

Frekvenční populační modely

Analyzují dynamiku populací stromů v homogenních věkových nebo velikostních třídách. Dělí stromy do skupin podle jejich věku nebo velikosti a zkoumají, jak se tyto skupiny mění v čase. Tento přístup usnadňuje sledování růstu, úmrtnosti a zmlazování v rámci skupin, místo detailního modelování jednotlivých stromů. Modely používají statistické techniky k predikci změn v populaci a poskytují cenné informace pro efektivní plánování a management lesních ekosystémů (Metz et al., 2014).

Populační a druhové modely

Zaměřují se na analýzu celkového vývoje populací nebo druhů bez rozdělení na menší části. Studují dynamiku celých populací nebo druhů pomocí statistických vztahů, které zahrnují faktory jako růst, reprodukci a úmrtnost. Tyto modely umožňují predikovat budoucí trendy a vzorce chování na úrovni celého druhu nebo populace, což je užitečné pro plánování ochrany a managementu přírody (Fabrika et al., 2011).

Modely funkčních typů

Třídí druhy podle jejich podobných ekologických a biologických vlastností, což pomáhá přiblížit složitou biodiverzitu přirozených ekosystémů. Tento přístup je zvlášť užitečný v tropických deštných pralesech, kde zachycuje rozmanité funkce a role různých druhů. Klasifikace na základě funkčních typů zjednodušuje analýzu rozmanitosti a interakcí druhů, čímž přispívá k lepšímu pochopení ekologických procesů a dynamiky těchto komplexních a biodiverzitou bohatých ekosystémů (Metz et al., 2014).

Modely dynamiky „patch“ nebo „gap“ skupin

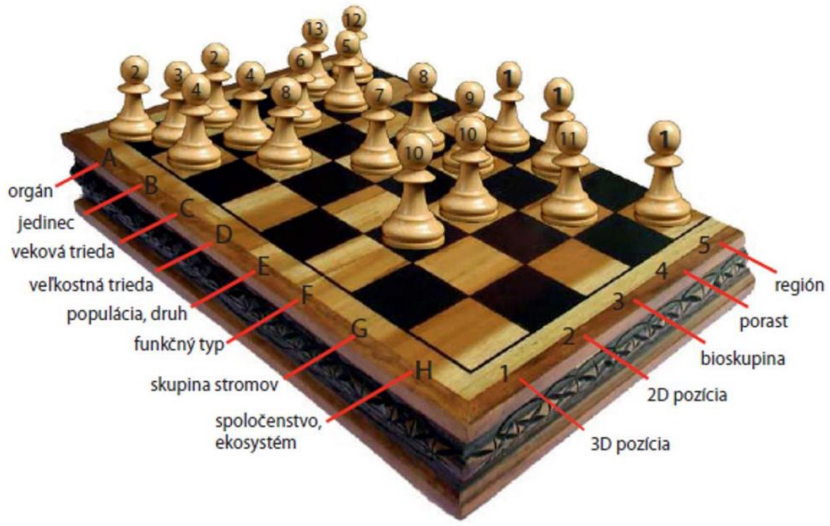
Analyzují změny v rozložení a struktuře stromových bioskupin na rozsáhlých územích. Sledují, jak se lesní porosty mění v důsledku ekologických procesů, jako jsou přirozené disturbance nebo lidské zásahy. Tyto modely pomáhají pochopit, jak různé části lesního ekosystému ovlivňují sebe navzájem a jak se vyvíjí vegetace v reakci na tyto změny (Liénard et al., 2016).

Ekofyziologické modely, jako je model „Big Leaf“

Simulují fyziologické procesy v listech stromu, přičemž používají zjednodušenou reprezentaci stromu. Zaměřují se na klíčové procesy, jako je fotosyntéza a transpirace, aby pochopily, jak jednotlivé části listů ovlivňují celkové chování stromu. Tento model poskytuje informace o tom, jak strom reaguje na změny v prostředí, například na variace v dostupnosti vody nebo světla a pomáhá tak analyzovat dopady ekologických faktorů na zdraví a růst stromů (Wang et al., 1998).

Ekofyziologické modely průměrného stromu

Zaměřují se na fyziologické procesy u stromů s průměrnými vlastnostmi, které reprezentují homogenní porosty stejného věku a velikosti. Tyto modely analyzují, jak faktory jako voda, světlo a živiny ovlivňují růst a zdraví stromů a poskytují cenné informace pro efektivní řízení a plánování lesů (Fabrika et al., 2011).



Obrázek 14. Klasifikace modelů podle hierarchicko-prostorové úrovně (Fabrika et al., 2011)

6.4 Empirické modely

Empirické modely se zaměřují na analýzu změn biometrických veličin v čase pomocí statistických metod, které vycházejí z experimentálních měření. Tyto modely jsou omezeny na základní soubor, který je reprezentován výběrovým vzorkem použitým při jejich vytváření. Mezi nejznámější empirické modely patří růstové tabulky, které poskytují informace o růstu a

vývoji rostlin. V rámci lesních ekosystémů zahrnují empirické modely různé kategorie, jako je modelování kmene stromu, koruny stromu, tloušťkové struktury kmene, prostorové struktury, konkurence mezi stromy a mortalita stromů. Tyto modely umožňují predikci a analýzu lesních ekosystémů na základě dostupných dat (Fabrika et al., 2011).

Modelování kmene stromu

Kmen stromu hraje v modelování stromových struktur klíčovou roli, protože je nositelem zásadních veličin, jako jsou tloušťka a výška stromu, a také parametrů koruny, z nichž se následně odvozuje objem a biomasa kmene a další důležité charakteristiky. Prvním krokem při modelování kmene je vytvoření modelu jeho tvaru a určení morfologické křivky kmene. Pro vytvoření této křivky potřebujeme mít k dispozici kvalitní datový materiál, který nám umožní odvodit potřebné charakteristiky a následně vytvořit morfologickou křivku. Základní data pro modelování morfologické křivky zahrnují matici kmenového profilu, která se skládá ze dvou vektorů: prvním je vektor měření výšky na kmeni a druhým vektor tloušťky kmene v jednotlivých bodech. Tuto matici následně zobrazíme v grafu, kde na ose x zobrazíme tloušťky kmene a na ose y výšky jednotlivých měření. Z takto vytvořeného grafu lze poté odvozovat další důležité charakteristiky, jako jsou tvarové kvocienty a tvarové řády. Tyto kvocienty a řády nám umožňují provádět přesné výpočty dalších parametrů, jako je například objem kmene, jeho biomasa nebo další důležité elementy. Díky těmto modelům můžeme lépe pochopit, jak různé stromy rostou a jakým způsobem se jejich kmeny vyvíjejí v závislosti na různých faktorech (Fabrika et al., 2011; Gaffrey et al., 2001).

Modelování koruny stromu

V této části se využívá morfologická křivka pro vyjádření korunového profilu stromu. Kromě toho se také uplatňuje korunová projekce, která představuje svislý průmět koruny ze shora dolů. Pro získání těchto dat se používají výhradně bezkontaktní metody. Modelování morfologické křivky koruny spočívá v nahrazení koruny geometrickým tělesem, které může být jediné nebo lze korunu rozdělit na dvě části – osvětlenou a zastíněnou. Při měření parametrů koruny se zaměřujeme především na její šířku a výšku nasazení. Výška nasazení koruny představuje vzdálenost od paty kmene po první zelenou větev. Tyto údaje jsou klíčové pro přesné modelování koruny, které umožňuje lepší porozumění struktury stromu a jeho růstu.

Pomocí těchto metod lze získat přesné informace o tvaru a velikosti koruny (Pretzsch et al., 2002).

Modelování tloušťkové struktury

Modelování tloušťkových struktur stromů zahrnuje několik klíčových přístupů. Regresní modely se zaměřují na změny v tloušťkových početnostech a používají rovnice, kde se mění parametry jako věk, poloha a tvar stromu, aby se predikovala tloušťka v závislosti na těchto proměnných. Dalším přístupem jsou modely diferenciálních rovnic, které začínají výchozím stavem popisujícím počet stromů v jednotlivých tloušťkových třídách a následně modelují jejich změny v čase, přičemž tyto modely jsou deterministické a nezohledňují náhodné výkyvy. Na rozdíl od toho stochasticky evoluční modely zahrnují náhodné prvky a skládají se z několika komponentů: driftové funkce (deterministická složka), difuzní složky (stochastická složka) a mortalitní funkce (konstantní procento úmrtnosti). Tyto složky se kombinují do Markovských procesů, které poskytují pravděpodobnosti přechodu stromů mezi tloušťkovými třídami, čímž zohledňují jak trend, tak variabilitu v růstu a mortalitě (Fabrika et al., 2011).

Modelování výškové struktury

Výškovou strukturu lesa lze modelovat obdobně jako tloušťkovou strukturu, avšak vzhledem k tomu, že mezi tloušťkou a výškou stromů existuje korelaceObvykle efektivnější je modelovat výšku prostřednictvím výškových křivek. Tyto křivky představují regresní vztah mezi výškou a tloušťkou stromu. Výškové křivky mohou být různé v závislosti na typu lesa—jednověkový nebo smíšený—a na tom, zda se modeluje stromová nebo průměrná křivka. U jednověkových lesů se používá stádiová výšková křivka, která ukazuje, jak se mění výška stromu v závislosti na jeho tloušťce v konkrétním porostu. U výškových tarifů se pak modeluje průměrná výška vůči průměrné tloušťce porostu. Na rozdíl od výškových tarifů, které vyjadřují výšku stromů v závislosti na jejich tloušťce, vývojová výšková křivka popisuje změnu výšky s věkem stromu nebo porostu a přechází od statického modelu k dynamickému jevu. Modelování výškových křivek se provádí pomocí různých regresních funkcí, přičemž mezi známé autory těchto modelů patří například Assmann, Michajlov a Wolf (Fabrika, 2005; Nevalainen, 2017).

Modelování prostorové struktury

Při modelování stromů v porostu je důležité znát jejich prostorové umístění, což zahrnuje například uspořádání listů nebo orgánů. K hodnocení biodiverzity a prostorové struktury porostu se často používá Poissonovo rozdělení, které popisuje náhodné rozložení stromů v prostoru. Prostorovou strukturu můžeme analyzovat z různých aspektů, včetně horizontálního rozmístění stromů, hustoty porostu, diferenciace struktury z hlediska diverzity. Tyto aspekty hodnotíme na různých úrovních. Existují dva hlavní přístupy k modelování rozložení stromů: náhodný způsob (Poissonovo rozdělení) a modelování shluků. Pokud se dřeviny shlukují do skupin nebo pásů, můžeme použít pravděpodobnostní modely založené na těchto shlucích. Kružnice se definují poměrem, zatímco pásy se určují délkou a šířkou. Dále se spočítá celkový počet agregovaných dřevin, pravděpodobnost agregace všech dřevin a pravděpodobnost výskytu doplňkových dřevin v daném prostoru (Ammer et al., 1999).

Modelování konkurence stromů

Konkurenční tlak stromů se řeší pomocí konkurenčního indexu, který následně ovlivňuje modelování růstu stromu v tloušťce, výšce a parametrech koruny. Tento index vyjadřuje jak konkurenční tlak okolních stromů ovlivňuje růst daného stromu. Prvním krokem je určení konkurenčních stromů, což se provádí několika metodami. Metoda fixního poloměru vytyčuje kolem hodnoceného stromu kruh, přičemž všechny stromy uvnitř tohoto kruhu jsou považovány za konkurenční. Metoda průniku korun spočívá ve vykreslení korun hodnoceného stromu a okolních stromů; stromy, jejichž koruny se protínají s korunou hodnoceného stromu, jsou konkurenční. Metoda úhlového počítání využívá úhel s vrcholem ve středu hodnoceného stromu, který se postupně vytyčuje kolem stromu ve všech směrech; stromy, které jsou v rámci tohoto úhlu větší než stanovený průměr, jsou konkurenční. Metoda světelného kužele vytváří kolem hodnoceného stromu kužel s vrcholem v jeho bázi; stromy zasahující do tohoto kuželu jsou považovány za konkurenční. K hodnocení konkurenčního tlaku se používají různé konkurenční indexy, jako například konkurenční index průniku korun podle Bella (Bella, 1971), konkurenční index podle Hegyiho (Fabrika et al., 2011), index kruhových segmentů podle Alemdaga (Alemdag, 1978), poměr rozměru stromů podle Martina a Eka (Martin et al., 1984), horizontální řez, poměr velikosti koruny stromů podle Biginga a Dobbertina (Bachmann,

1998), korunový konkurenční světelný index podle Pretzschia (Bachmann, 1998) a korunový konkurenční faktor.

Modelování mortality stromů

Mortalitu lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnitřní mortalita se týká omezení produkčního prostoru a zahrnuje různé přístupy. Jedním z nich je metoda konstantní pravděpodobnosti, která se používá v procesních modelech a vyjadřuje konstantní pravděpodobnost úmrtí stromů v určitém věku na základě počátečního počtu stromů a maximálního věku. Dalším přístupem je Reinkeho pravidlo hustoty porostu, které určuje maximální počet stromů, který plocha může obsáhnout. Podobně Yodovo pravidlo samodiferenciace, které místo průměrné tloušťky zohledňuje průměrnou biomasu. Asmanovo pravidlo maximální hustoty porostu se soustředí na maximální hustotu kruhové základny porostu. Růstovo – závislá mortalita zohledňuje limity stanoviště a konkurenci a zahrnuje přístupy jako logické funkce, diskriminační funkce a metoda hraničního konkurenčního tlaku. Vnější mortalita se zaměřuje na vliv rizik z vnějších faktorů na přežití nebo úhyn stromu, přičemž riziko je modelováno jako součet tří složek: ohrožení, vystavení a zranitelnost. Celkové riziko úmrtí se spočítá jako součet těchto složek a pokud je toto riziko vynásobeno hodnotou populace, získáme hodnotu ztráty (Fabrika et al., 2011).

6.5 Procesní modely

Tyto modely zahrnují biologické, fyzikální a environmentální procesy ovlivňující růst stromů a produkci biomasy. Jejich hlavním cílem je poskytovat přesné predikce, které nacházejí uplatnění v lesním hospodářství, ekologickém výzkumu a plánování ochrany přírody. Modely se zaměřují na prostředí jako:

- Půda: zdroj vody a živin,
- Rostliny: asimilace, disimilace, alokace,
- Klimatické podmínky: sluneční záření a koncentrace CO_2.

Na rozdíl od empirických modelů tyto modely zohledňují proces fotosyntézy, která probíhá v kratších intervalech než jeden rok, jelikož přímo reaguje na aktuální klimatické a půdní podmínky. Standardně pracují s hodinovým časovým rozlišením (Schulze et al., 2005).

Klimatické prostředí

Tyto charakteristiky získám:

- Měřením
- Generátory počasí

Měření

Klimatické stanice sledují různé parametry jako srážky a vítr. Numerické modely predikce počasí jsou založeny na fyzikálních zákonech atmosféry a popisují pohyby vzduchových hmot. Tyto modely vytvářejí horizontální a vertikální mřížku, která pokrývá celou Zemi. V každém bodě této mřížky se vypočítávají konkrétní atmosférické vlastnosti, přičemž model využívá pokročilou fyziku k zobrazení detailnějších charakteristik atmosféry.

Generátory počasí

Dokáží vygenerovat hodinové intervaly počasí, například model Metandroll, nebo Aladin.

Sluneční záření

Musí být s hodinovým intervalem. Vychází z astronomie, kdy na základě zeměpisné délky, šířky, nadmořské výšky, expozice, sklonu, horizontu, oblačnosti a znečištění ovzduší se dokáže určit poloha slunce na obloze a na základě stavu atmosféry,především oblačnosti, se může předpovídat jaké je přímé a difúzní záření. V tomto případě na volné ploše (Fabrika et al., 2010).

Modely atmosférických rovnic a modely fyziky atmosféry

Při zápoji se musí počítat s redukcí záření. K tomu se uplatní Lambertberův zákon: násobí sluneční záření na volné ploše, násobí exponenciální složku, do které vstupuje index listové plochy, koeficient propustnosti tzv. extinkční koeficient, protože každý list má jiný tvar a jinou propustnost (Jarvis et al., 1983).

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{2k \cdot LAI}$$

LAI = Index listové plochy

K = zanikající koeficient

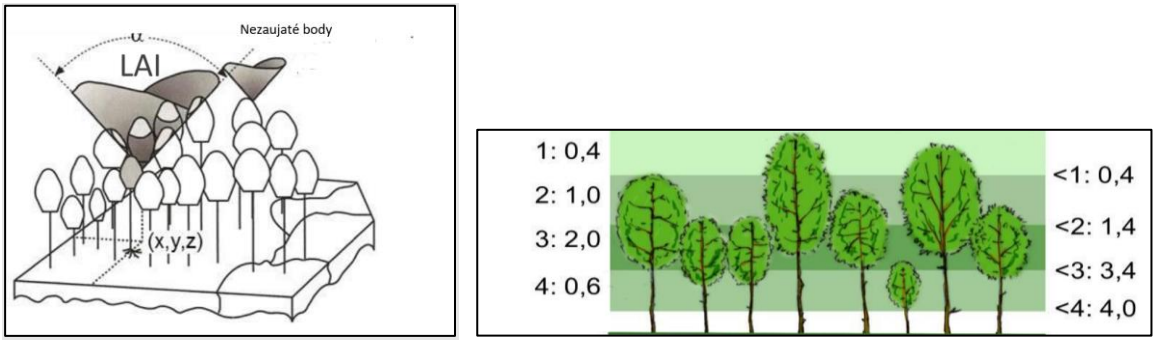
φ_0 = sluneční záření na volné ploše

φ = redukované záření v ploše

Index listové plochy = poměr povrchu listu vegetace a povrchu území, na kterém daná vegetace roste. Je to bezrozměrné číslo s nejčastějším rozpětím od 0 při ploše bez vegetace až po 6 při hustých porostech (Fabrika et al., 2011).

Lambertberův zákon může fungovat buď jako jednosměrný přístup – okolo každého stromu se vytvoří pomyslný kužel, ve kterém se sleduje propustnost slunečního záření na základě množství koruny, která do tohoto kuželu spadá a celé části biomasy koruny.

Prostorový přístup – vrstva koruny se rozdělí na dvě části a každá část má popsanou vlastní listovou plochu. Následně se jednoduchým způsobem utvoří kumulativní součty listové plochy. V profilu lesního prostoru se vykreslí body kumulace a vytvoří polynom v určité vrstvě lesního porostu (Sloboda et al., 1989).



Obrázek 15. Jednosměrný přístup a prostorový přístup (Fabrika et al., 2011)

LAD = leaf angle distribution

Vyjadřuje, jaké je rozmístění listů v jednotlivých úhlech. Tento úhel se dá předepsat frekvenční funkcí

$$k = \frac{\sqrt{LAD^2 + tan^2[z]}}{LAD + 1{,}744 \cdot (LAD^{+1{,}181})^{-0{,}733}}$$

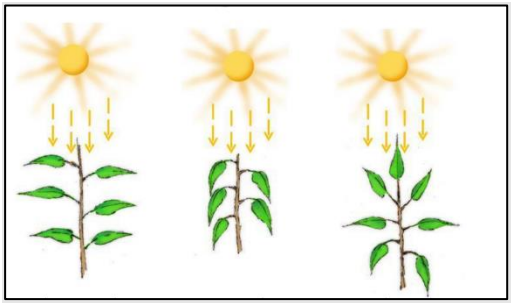
LAD = koeficient LAD

K = extinkční koeficient

Z = momentální poloha slunce na obloze

- Osa x-jednotlivé úhly olistěné
- Osa y-početnost listů,které obsahují daný úhel

Existuje několik rozložení úhlu listu: horizontální, vertikální, sférické (obr.16) (Campbell et al., 2000)



Obrázek 16. Horizontální vertikální a sférické úhly (Fabrika et al., 2011)

Propustnost slunečních paprsků korunou stromu nebo porostu

Používá se tzv. Ray tracing Model (trasování paprsků)

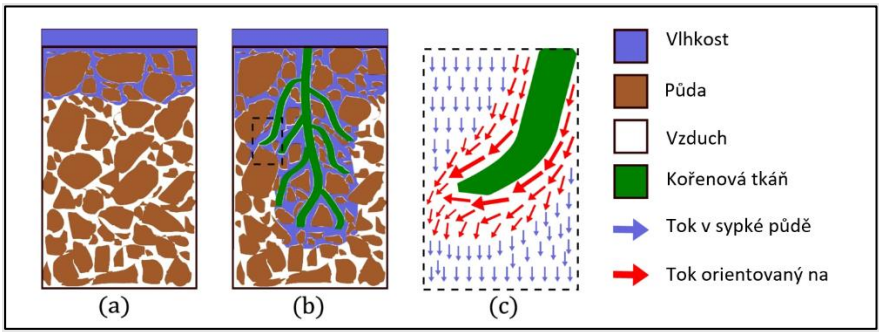
V daném bodě je sledovaná velikost slunečního záření. Daný paprsek se pouští tak, aby zachytil celou horní hemisféru. Pokračuje se od zenitového úhlu v určitém směru k horizontu, nejčastěji se jedná o směr od severu v daném cyklu 1°, 2°, 5°. Na daných slunečních paprscích se sleduje velikost překážky. Překážky mohou být různého charakteru:

- Kmen – nepropustná překážka
- Koruna – redukce LAI
- Terén – nepropustná překážka

Tímto způsobem se modeluje horní hemisféra slunečního záření (Fabrika et al., 2010).

Modelování pedotransferové funkce

Tyto funkce jsou především důležité při modelování kořenového systému. Potřebují nejen CO2 a fotosyntézu, ale i volumetrickou kapacitu.



Obrázek 17: Ilustrace kořenově orientovaného preferenčního proudění (PF). Půdní doména ležící ladem bez výskytu PF. b Vegetační půdní doména s výskytem PF. c Reprezentativní objem vegetační půdní oblasti, složený z objemu sypké půdy (modře) a objemu půdy, ve které se vyskytuje PF orientovaný na kořeny (červeně). (Mair et al., 2022)

Rozlišujeme čtyři druhy půdních hydrolimitů:

- Plná vodní kapacita (PVK) = maximální vodní kapacita – Vlhkost půdy je při úplném zaplnění všech pórů vodou. Tato hodnota je prakticky rovna pórovitosti. Většinou však zůstává v části pórů uzavřen vzduch, proto je tedy ve skutečnosti nižší než pórovitost

- Polní kapacita (PKP) - vlhkost půdy, kterou půda udrží po zalití a infiltraci do profilu. V terénu nikdy nelze dosáhnout rovnovážného stavu, jde o dynamický proces, proto je její určení velmi přibližné. Pro ČR je polní vodní kapacita definována obsahem vody ve vzorku stanoveným při tlaku od 10 do 50 kPa, což je vyjádřeno v logaritmické stupnici pF od 2,00 do 2,70. Polní kapacita definuje maximální vlhkost, která zůstává v půdě dva nebo tři dny poté, co byla půda zavlažena při zanedbatelném odtoku. Tento údaj je závislý na vlastnostech půdního profilu, jako je hydraulický gradient, rozvrstvení půdního profilu, hystereze, bobtnání a smršťování nebo přítomnost nepropustné vrstvy či vysoká hladina

podzemní vody, proto nelze obecně definovat hodnotu potenciálu pro tuto vlhkost. Pro výpočty a odhady je důležité asociovat polní vodní kapacitu vždy s hodnotou pF nebo hodnotou sacího tlaku v kPa.

- Bod vadnutí (BV) - Bývá uváděn jako spodní limit dostupnosti vody pro většinu rostlin. Je to vlhkost půdy, při které rostlina trvale vadne, absorpce vody kořeny je menší než transpirace. Skutečný bod trvalého vadnutí závisí na mnoha faktorech, meteorologických vlivech, osmotickém vegetačním stádiu a mnoha dalších.

- Využitelná vodní kapacita (VVK) - Množství vody, které se udrží v půdě po delší dobu a které je rostlinami využitelné, se nazývá využitelná vodní kapacita. Vypočte se jako rozdíl polní kapacity (PK) a bodu vadnutí (BV). Hranice vody využitelné rostlinami v půdním profilu sahá od povrchu půdy po konec kořenové zóny (Mair et al., 2022).

Modelování hydrologické bilance:

Modeluje se na základě všech komponentů, které v daném cyklu proudí – srážky v korunách, intercepce v korunách, transpirace, evaporace, boční odtok vody v půdě, povrchový odtok …

$$\theta_S(t + \Delta t) = \theta_S(t) + \frac{R - I_R - E_T - E_S + q_L - q_D - q_r}{z_s}$$

θ_s – objemový obsah vody v půdě ($m^3.m^{-3}$)

R – srážky (mm)

I_r – intercepce srážek (mm)

E_t – transpirace rostliny (mm)

E_s – evoparace půdy (mm)

q_L- boční výpar vody (mm)

q_D – odvod vody (mm)

q_R – průtok vody (mm)

Z_s – hloubka vrstvy půdy (mm)

Modelování vodivosti průduchů

Množství CO_2 a O_2, které prochází průduchy rostlin. Tento proces je ovlivněn fotosynteticky aktivním zářením, teplotou, vlhkostí a vodním potenciálem vzduchu. (Fabrika et al., 2011).

6.6 Strukturální modely

Strukturální modely se zabývají vývojem morfologie jednotlivých stromů na základě topologie orgánů a architektury stromů. Hlavní myšlenka strukturálních modelů byla: „ *Rostliny rostou podle určitých pravidel tak, že se sami vyvíjejí podle jejich architektury*“ Modelovací software jsou L – Systémy. Ty byly vyvinuty v roce 1968 Aristidem Lindenmayerem, maďarsko-nizozemským biologem a teoretickým počítačovým vědcem. Jsou to paralerní přepisovací systémy. Podstatou tvorby je přepisování řetězců podle určitých pravidel. Tyto pravidla jsou předem definovaná v rámci množiny pravidel nazývající gramatika. Vznikly jako výsledek modifikace původních formálních gramatik používaný v matematice tak, aby se daly využít na modelování vývoje náhrady jedné buňky v další generaci konečným počtem buněk s definovaným stavem => této náhradě se říká přepisování. Stanovená pravidla jsou rekurzivní = v každém kroku se nahrazují všechny původní buňky za skupinu nových buněk podle daných pravidel. Těmito pravidly se zabezpečuje, že každá nová generace je podobná předcházející a pouze se rozrůstá = sebepodobnost (Fabrika et al., 2011).

Gramatické interpolace řetězců

Máme dvě grafiky, které rozlišujeme – želví grafika (2D) a orlí grafika (3D)

Želví grafika – Je to pojem v počítačové grafice pro metodu programování vektorové grafiky použitím relativního kurzora „želvy“ v dvojrozměrné karteziánské souřadnicové soustavě. Představuje klíčovou vlastnost jazyka LOGO (obr. 18).

ZÁKLADNÍ KÓDY PRO PROGRAMOVÁNÍ

F = posune se o jednotku délky a nakreslí čáru

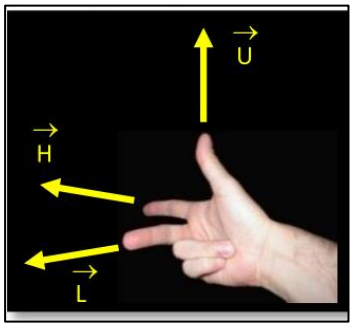
F = posune se o jednotku délky, ale nenakreslí čáru

+ = rotace želvy o dopředu stanovený úhel do leva

- = rotace želvy doprava

Obrázek 18. Ukázka kódů želví 2D grafiky (Fabrika et al., 2011)

Orlí grafika – je rozšíření želví grafiky do prostorové trojrozměrné karteziánské souřadnicové soustavy. Aby bylo možné vykreslit objekty nejen v rovině, ale i v prostoru, byla želví grafika doplněna o další grafické symboly definující pohyby dalším směrem (obr. 19). Orlí grafika definuje 3 osy. Východisková poloha je dopředu, tedy vodorovným směrem od polohy pozorovatele. Osa H je shodná s východiskovou polohou orla. Osa U vyjadřuje svislý směr nahoru a osa L vyjadřuje vodorovný boční směr doleva. Pro snazší představu nám může sloužit obyčejná ruka (obr.19).



Obrázek 19:Ukázka představy směru Orlí grafiky (Fabrika et al., 2011)

ROZŠÍŘENĚ KÓDY PRO PROGRAMOVÁNÍ

+ = rotace vlevo
- = rotace doprava
} Okolo svislé osy U

^ = rotace nahoru
& = rotace dolů
} Okolo osy L

\ = rotace doprava
/ = rotace doleva
} Okolo osy H

$ = orel se překlápí úplně naopak

Obrázek 20. Ukázka kódů želví 2D grafiky (Fabrika et al., 2011)

Několik důležitých pojmů

Růstová gramatika = je přepis ve formě L – systémů na produkci morfému. Obsahuje v sobě Axiom (pravidlo) a východiskové parametry.

Morfém = textový řetězec ve formě slova anebo souboru znaků, který generuje morfologii rostliny na základě geometrického obrazce s vlastnostmi graftálu.

Graftál = grafické vyjádření morfému založené na želví nebo orlí grafice, produkuje vizuální formu rostlinné morfologie

Fraktál = geometrický objekt vybudovaný pomocí rekurzie. Jde o nepravidelný fragmentovaný geometrický útvar, který může být rozdělený na části, z kterých je každá alespoň přibližně podobná.

Geometrické objekty můžeme dělit na:

- Jednorozměrné – 1D
- Dvojrozměrné – 2D
- Trojrozměrné – 3D

Toto rozdělení se nazývá topologická dimenze. Při objektech, které mají fraktální vlastnosti a mají rozšířené spektrum možností, se používá místo topologické dimenze fraktální dimenze (Mandelbrot, 1989).

Fraktální dimenze je matematický koncept, který měří složitost a "drsnost" geometrických útvarů, obzvláště těch, které vykazují sebe podobnost. Fraktální dimenze může být neceločíselná a často vyjadřuje, jak moc je útvar vyplněn.

Při objektech, které nejsou fraktály jsou jejich topologické dimenze rovné s fraktálními dimenzemi. V tomto případě se přeškáluje úsečka například koeficientem $\frac{1}{3}$ a vznikne úsečka třetinové délky. To znamená, že na pokrytí původní úsečky jsou nutné 3 nové úsečky. Jakmile se použije $\frac{1}{5}$,bude na pokrytí té samé úsečky potřeba 5 nových úseček.

Jak se přeškáluje trojúhelník s koeficientem $\frac{1}{2}$, na jeho pokrytí jsou nutné 4 nové trojúhelníky. Jak se přeškáluje $\frac{1}{4}$, na jeho pokrytí je potřeba 16 nových trojúhelníků. Fraktální dimenze je definována vzorcem:

$$D = \lim_{d \to 0} \frac{ln\left[N\left(\frac{1}{d}\right)^2\right]}{ln\left[\frac{1}{d}\right]} = 2$$

Stejně jako úsečka, má i trojúhelník shodnou topologickou dimenzi s fraktální dimenzí, neboť hodnota vychází 2- celé číslo.

Změna nastává ve chvíli, kdy se bude přeškálovat Cantorovo diskontinuun (obr.21) Pokud se přeškáluje koeficientem $\frac{1}{3}$,stačí na pokrytí 2 útvary. Pokud se dosadí koeficient $\frac{1}{9}$,budou potřeba 4 menší útvary. Fraktální dimenze má vzorec:

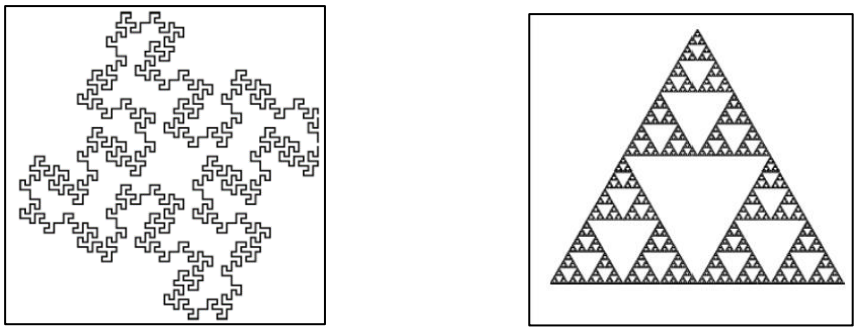
$$D = \lim_{d \to 0} \frac{ln[2^k]}{ln\, 3^k} = 0{,}631$$

Topologická dimenze Cantorovoa diskontinua (obr. 21a) je 0, protože se skládá pouze z bodů. Fraktální dimenze je však větší a to 0,631.

Jak se přeškáluje Sierpinského trojúhelník (obr.21b) s koeficientem $\frac{1}{2}$,tak na jeho pokrytí budou potřeba 3 nové trojúhelníky. Fraktální dimenze má vzorec:

$$D = \lim_{d \to 0} \frac{ln[3^k]}{ln\, 2^k} = 1{,}585$$

Po nekonečném počtu vyňatých trojúhelníků bude sierpinský trojúhelník jen nekonečnou sítí čar. Jeho plocha je 0 a topologická dimenze 1.



Obrázek 21. Coantorovo diskontinuum a Sierpinskí trojúhelník (Mandelbrot, 1989)

Lze tedy říci, že fraktály jsou útvary u kterých fraktální dimenze je vyšší než jejich topologická dimenze. Vlastnosti fraktálu byly využity na modelování morfologie rostlin a definovaly tzv. růstové gramatiky. Růstové gramatiky obsahují parametry, axiom, pravidla (Prusinkiewicz et al., 2013)

Druhy L- systémů

1. Bezkontextovo determinické L- systémy (D0L)
2. Závorkové L- systémy
3. Stochastické L- systémy
4. Parametrické L – systémy
5. Kontextovo sensitivní L-systémy (1L, 2L, IL)

6.6.1 Bezkontextovo determinické L – systémy

- Patří mezi základní L – systémy, ze kterých se odvozují systémy vyšší úrovně
- Přepisování symbolů v těchto systémech nezávisí od kontextu před nebo za symbolem a každý symbol má vlastní pravidlo.
- Jak nějaký symbol nemá definované pravidlo platí implicitní pravidlo X --> X
- Na vytvoření toho samého výsledného objektu se využívají dva odlišné postupy, a to přepisování hran nebo přepisování uzlů.
- Postup závisí na zvolené formální gramatiky. Výsledkem bude ten samý graftál. Využijí se však rozdílné morfémy.

Přepisování hran:

Rozšiřuje postupy použité v Kochově vločce definici pravé a levé hrany. Hrana se ztotožňuje s čarou, která je kreslená s příkazem F (pohni se do předu), v grafice tato hrana může mít definovaný atribut levé nebo pravé orientace. Příklady přepisování hran:

- Dračí Křivka
- Sierpinského pletenec
- Hexagonálná Gosperova křivka
- Kvadratická Gosperova křivka

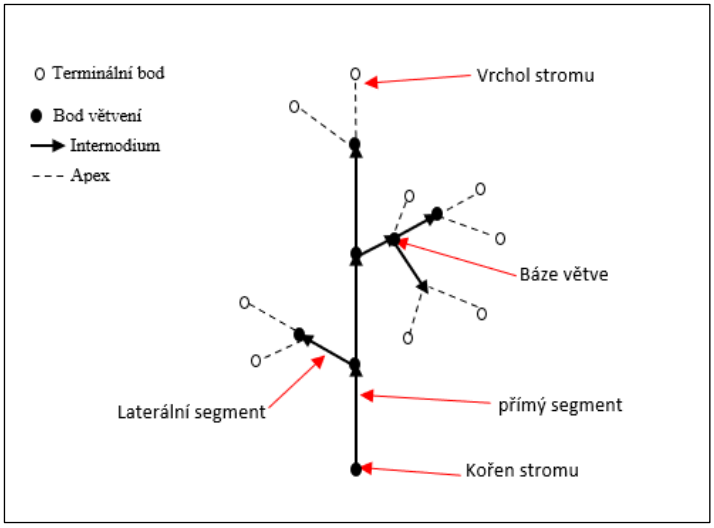
Přepisování uzlů:

Uzly reprezentují objekty, které mají definovaný tvar. Označují se negrafickými symboly (A, L, R) , které nedefinují pohyb polohy želvy nebo orla. Na uzlu je definovaný vstupný bod P a výstupný bod Q. Bod obsahuje index označený uzel. Pro vstupní a výstupní bod je definovaný vektor, který slouží na určení způsobu napájení na pohyb želvy nebo orla.
Příklady přepisování uzlů:

- Pupen
- Květ
- List
- Hilbertova křivka (Prusinkiewicz et al., 2013)

6.6.2 Závorkové L – systémy

- Růst stromů produkuje složité morfologické struktury, které se vyznačují často velmi bohatým větvením.
- Lindenmayer zavedl pojem tzn. osové stromy.
- Nahrazují teoretickou grafickou notaci klasické stromové struktury prostřednictvím botanicky motivované notace.
- Stromy vytvářejí osy, které mohou být n -tého stupně. Základem stromu je osa nultého stupně. Jde o hlavní osu stromu (kmen). Osy vyšších stupňů jsou větve. Každá osa má svou bázi a vrchol a osy se skládají ze segmentů. To jsou části, které vznikají jediným pohybem želvy. Segmenty na hlavní ose se nazývají přímé a mají negativní geotropický směr. Segmenty na osách vyšších stupňů se nazývají prostranné nebo laterální. Segmenty, které vznikly v závěru poslední interaxe tedy koncové se nazývají apex. Starší segmenty se nazývají internódium. (obr.22)
- Pro účely modelování rozvětvujících se struktur, se využívá přepisovací mechanismus vhodný pro osové stromy. Přepisovací mechanismus má stromové pravidlo, které nahrazuje předcházející hranu (segment) prostřednictvím následujícího osového stromu a to tak, že počáteční bod segmentu se ztotožní s bází osového stromu a koncovým bodem segmentu se ztotožní s vrcholem osového stromu (Fabrika et al., 2011).



Obrázek 22: Popis osového stromu (podle Fabrika et al., 2011)

6.6.3 Stochastické L – systémy

- Pro náhradu jednoho symbolu se používá více pravidel. Každé má přidělenou hodnotu pravděpodobnosti. Součet pravděpodobnosti pravidel je 1 neboli 100 %.
- Princip interpretace růstové gramatiky spočívá v tom, že se na základě zvolené pravděpodobnosti náhodně vybere pravidlo při každé interakci a toto pravidlo se použije na vykreslení grafiky (Quirót et al., 1996).

6.6.4 Parametrické L-systémy

- Obohacují sadu příkazů o další symboly např. tloušťku, barvu.
- Symboly pro pohyb a natočení byly doplněné o parametr udávající hodnotu posunu a otočení.
- Parametry se udávají v kulatých závorkách a mohou obsahovat i reálná čísla, proměnné nebo aritmetické operace a exponenciální operátory. Jejich umístění v závorce indikuje aritmetickou operaci.
- Později přidána podmínková pravidla doplněná o podmínkovou část. Podmínková část se uvádí za označením přepisovaného symbolu s argumentem ve formě přeměnné a odděluje se dvojtečkou (Quirót et al., 1996).

6.6.5 Kontextovo – sensitivní L-systémy

- Pravidla mohou být občas závislé i na kontextu symbolu.
- Tento efekt je užitečný při simulaci interakce mezi části rostliny například při toku živin. Díky těmto potřebám byly zavedeny Kontextovo – sensitivní L-systémy.
- Pomocí formalizmu závorkových L systémů se dá vyjádřit šíření signálu v rostlině:

  - Akropektální šíření – vyjadřuje pohyb signálu (živin) od kořene směrem k apexomu.
  - Bazipetální šíření – Vyjadřuje pohyb signálu od apexomu ke kořenu (Prusinkiewicz et al., 2013).

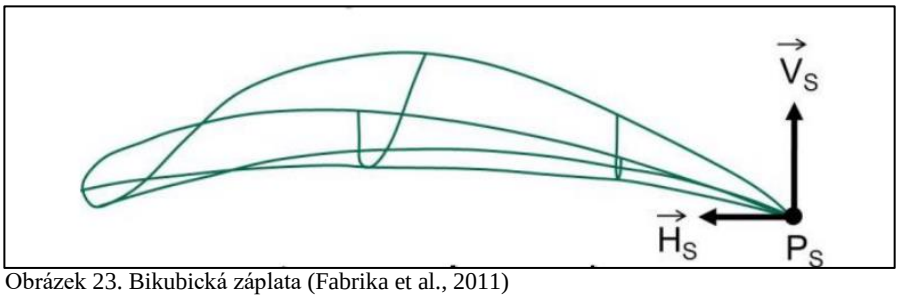
6.6.6 Modelování rostlinných orgánů

- Napojují se na kontaktní body ve směru příslušných vektorů želvy nebo orla. Jde o předem definované objekty, které mají funkci uzlu.
- Terminální orgány mají pouze vstupné body a vektory. Kontaktní bod je pouze jeden.
- Meziorgány mají i výstupní body a vektory. Kontaktní body jsou dva a orgány leží mezi dvěma internódy.

Orgány se modelují pomocí:

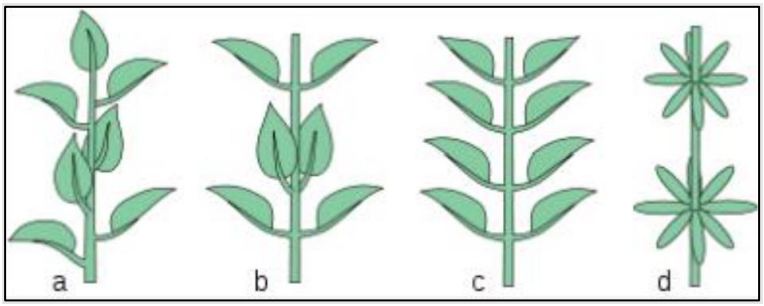
- Biskupcké záplaty
- Fylotaxie
- Zlatý řád

Bikubické záplaty – prostorové souřadnice bodů na záplatě jsou určené na základě parametrického tvaru definovaného dvěma vstupními parametry A a V. Analygické rovnice definují souřadnice y a z odvozeny například interaktivním návrhem: plocha na obrazovce počítače grafických záplat (obr.23) (Bartels et al., 1995).



Obrázek 23. Bikubická záplata (Fabrika et al., 2011)

Fylotaxie – Botanický termín pro způsob pravidelného uspořádání rostlinných orgánů. Například listy mohou být uspořádané protilehlé, střídavě spirálovité nebo přeslenité (obr. 24) (Fabrika et al., 2011).



Obrázek 24. Ukázka fylotaxie a) střídavě b) vstřcné c) vstřícné d) přeslenité (Fabrika et al., 2011)

Zlatý řád – teorie zlatého řádu je napojena na Fibonacciho úhel – Tento úhel objevil italský matematik Leonard Fibonacci, který působil v roce 1170–1250.

Fibonacciho řád je řád čísel začínající 0 a 1, přičemž další je součet předcházejících čísel v tomto řádě. (0 + 1 = 1; 1 + 1 = 2; 1 + 2 = 3; 2 + 3 = 5;…), kdybychom Fibonacciho řád zvětšovali do nekonečna a potom vydělili v tom řádě předcházející čísla, dostali bychom hodnotu zlatého řádu, která je vyjádřena číslem „tau“ $\tau = \left[\frac{(\sqrt{5}+1)}{2}\right]^{-2}$ => Fibonacciho číslo = 1,618

Fibonacciho úhel je pak následovný: $360^0 \cdot t^{-2}$ => $360^0 \left[\frac{(\sqrt{5}+1)}{2}\right]^{-2}$ => Poté co se dosadí do vzorce Fibonacciho číslo vyjde Fibonacciho úhel = 137,5°

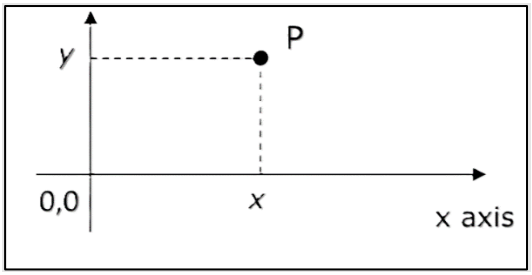
Pomocí Fibonacciho úhlu můžeme modelovat například květ slunečnice(Fabrika et al., 2011).

Souřadnicové systémy získávání dat pro růstové gramatiky

Stromy můžeme měřit ve dvou prostorách, a to buď dvojrozměrném prostoru nebo trojrozměrném prostoru. U dvojrozměrného prostoru se používají souřadnice karteziánské neboli pravoúhlé a polární.

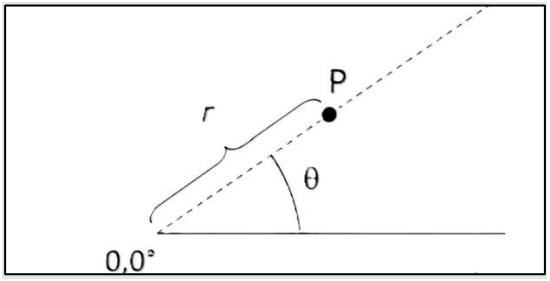
Karteziánské souřadnice používají dvě na sebe kolmé osy. Vodorovná osa se označuje jako osa x a svislá osa jako osa y. V průsečíku těchto os, který je označován jako počátek, mají

obě souřadnice hodnotu 0;0. Směrem doprava po ose x se hodnoty zvyšují, stejně tak směrem nahoru po ose y. Zápis těchto souřadnic se pak značí jako P(x,y). Tato soustava je velmi užitečná pro jednoduché určení polohy bodů v rovině, zejména při práci s grafy nebo v inženýrství (Fabrika et al., 2011).



Obrázek 25: Karteziánské 2D souřadnice (Fabrika et al., 2011)

Polární souřadnice se vyznačují úhlem θ (theta) a vzdáleností r. Úhel θ je měřen od kladné poloosy x proti směru hodinových ručiček. Vzdálenost r je délka úsečky mezi počátkem souřadnicové soustavy (0,0) a daným bodem. Zápis souřadnic bodu v polární soustavě je P(r,θ). Tato soustava je obzvláště užitečná při práci s kruhovými a spirálovými tvary, neboť umožňuje jednoduché vyjádření bodů pomocí úhlů a vzdáleností.

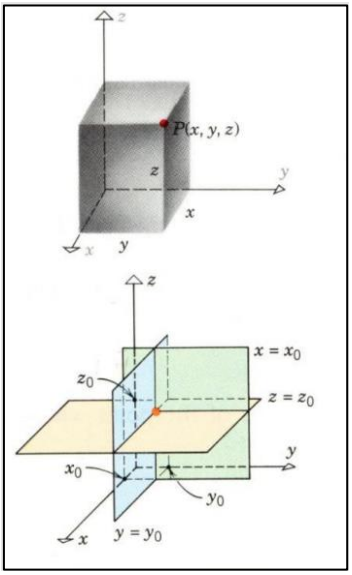


Obrázek 26. Polární souřadnice 2D (Fabrika et al., 2011)

Trojrozměrný prostor využívá tři základní typy souřadnicových soustav, které umožňují popis polohy bodů a objektů v prostoru různými způsoby: karteziánské, cylindrické a sférické souřadnicové soustavy.

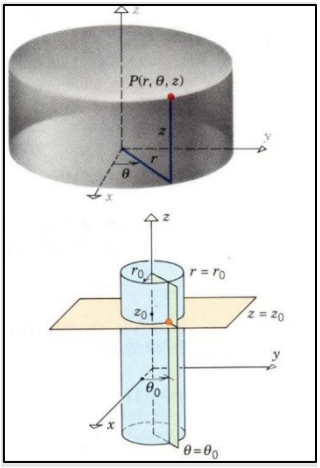
Karteziánské souřadnice v trojrozměrném prostoru využívají tři na sebe kolmé osy x, y a z. Počátek souřadnicové soustavy je v průsečíku těchto os. Hodnota souřadnic bodu se pak zapisuje jako P(x,y,z). Tato soustava je velmi praktická pro popis polohy bodů v prostoru,

například v architektuře nebo v počítačové grafice, kde je třeba pracovat s trojrozměrnými modely (Fabrika et al., 2011).



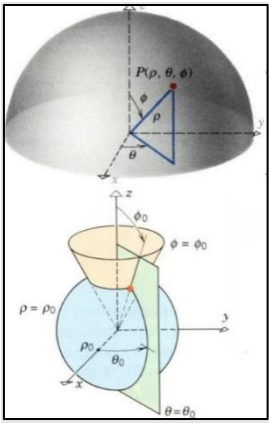
Obrázek 27. Karteziánské 3D souřadnice (Fabrika et al., 2011)

Cylindrické souřadnice používají horizontální vzdálenost r od osy z, vertikální vzdálenost z od roviny xy a úhel θ od kladné poloosy x. Bod se následně zaznamenává jako P(r,θ,z). Cylindrické souřadnice jsou užitečné při popisu objektů s rotační symetrií, jako jsou válce nebo kužely. Při práci s těmito souřadnicemi je snazší manipulace s objekty, které mají pravidelnou kruhovou základnu a výšku.



Obrázek 28. Cylindrické souřadnice (Fabrika et al., 2011)

Sférické souřadnice využívají vzdálenost ρ (ro) od počátku souřadnicové soustavy, horizontální úhel θ a vertikální úhel φ (phi). Horizontální úhel se nazývá azimut a vertikální úhel se nazývá zenitový úhel. Bod v této soustavě se zapisuje jako P(ρ,θ,φ). Sférické souřadnice jsou ideální pro popis polohy bodů na sféře, například při astronomických pozorováních nebo v geodézii, kde je třeba určit polohu bodů na zemském povrchu.



Obrázek 29. Sférické souřadnice (Fabrika et al., 2011)

Karteziánská soustava v trojrozměrném prostoru nabízí jednoduchost a přímočarost při práci s kvádry a jinými pravoúhlými objekty. Cylindrická soustava se výborně hodí pro válcové objekty a sférická soustava je nejlepší volbou pro práci se sférickými tělesy. Každá z těchto soustav má své specifické využití v různých oblastech vědy a techniky.

Celkově lze říci, že měření stromů a jiných objektů ve dvojrozměrném nebo trojrozměrném prostoru vyžaduje použití vhodné souřadnicové soustavy, která umožní přesné a efektivní určení polohy bodů. Karteziánské, polární, cylindrické a sférické souřadnice poskytují různé způsoby, jak toto měření provádět, a jejich správná volba závisí na konkrétním typu úlohy a vlastnostech měřeného objektu (Fabrika et al., 2011).

7 3D modely

3D modely dřevin jsou digitální reprezentace stromů a keřů, které zachycují jejich strukturu ve třech rozměrech. Měřit architekturu dřevin můžeme různými způsoby, včetně fotogrammetrie, Lidaru a magnetického digitizéru. Fotogrammetrie využívá fotografií k vytvoření 3D modelů, zatímco Lidar používá laserové paprsky k měření vzdáleností a vytváří 3D modely. V kapitole je krátce popsaná fotogrammetrie a Lidar- metoda, která byla zvolena jako nejvhodnější pro naši analýzu architektury dřevin. Tento přístup umožňuje přesnější a detailnější studium struktury a růstu stromů.

7.1 Metoda fotogrammetrie pro získání 3D modelů dřevin

Fotogrammetrie ve svém základním pojetí využívá informace obsažené v jednom nebo více 2D snímcích. Vytvořené snímky jsou poté převedeny speciálním softwarem AgiSoft PhotoScan do virtuálních 3D mračen bodů. V této podobě mohou být prováděny další úpravy a vypočítány potřebné údaje (Torres-Sánchez et al., 2018)Proces začíná tím, že je nutné odlišit zelenou vegetaci od pozadí, což je klíčové pro pozdější rekonstrukci povrchu korun stromů. Na fotografiích se často vyskytuje nejen samotná dřevina, ale i jiné druhy vegetace, jako jsou keře nebo tráva. Pro separaci dřevin od pozadí se často využívá software CloudCompare, který umožňuje oddělit mračna bodů na základě různých výšek. Tento krok je nezbytný pro přesné určení struktury a tvaru jednotlivých stromů. Fotogrammetrie, stejně jako každá jiná metoda, má své výhody a nevýhody. Jednou z výhod je rychlost sběru dat v terénu. Tato výhoda je však kompenzována pomalejším zpracováním dat v kancelářských úpravách. Ve studii (Mikita et al., 2016) byla zkoumána možnost využití kombinace pozemní a letecké fotogrammetrie pro inventarizaci lesa. Výsledky ukázaly, že tato metoda je nejen vysoce přesná, ale také značně časově úsporná, což výrazně zefektivňuje terénní práce. Navíc se ukázalo, že využití kombinované fotogrammetrie může vést ke snížení nákladů na pracovní sílu, čímž se stává ekonomicky výhodnou alternativou pro sběr dat v lesnictví.

7.2 Metoda Lidar pro získání 3D modelů dřevin

Lidar ve svém základním principu využívá laserových paprsků k měření vzdáleností. Lidar vysílá tisíce až miliony laserových pulsů za sekundu a měří dobu, za kterou se paprsky odrazí zpět. Z těchto měření se vytvoří detailní 3D mračno (Lau et al., 2018). Aby bylo možné získat požadované parametry a vytvořit 3D model dřeviny, musí být jako první eliminován vliv terénu. Rastrový digitální model terénu (DTM) se používá pro normalizaci nezpracovaných výšek bodů. DTM je generován z nezpracovaných mračen bodů na základě aktivního obrysového algoritmu implementovaného TreesVis softwarem pro zpracování dat Lidar a ledně na základě funkce pravděpodobnosti rozložení výšky se paprsek odráží od povrchu porostu. Shluky na vodorovném projekčním obraze ukazují rozložení korun stromů v dané výškové úrovni, přičemž jednotlivé koruny jsou viditelné na stejném místě v několika svislých sousedních vrstvách. Extrakce jednoho stromu spočívá ve sledování obrysů korun na projekčních snímcích od shora dolů, kdy obrysy v horních vrstvách tvoří shluky. Vyšší počet surových bodů se předpokládá tam, kde jsou přítomny koruny stromů, zejména na jejich obrysech, a vyšší hustota bodů je reprezentována vyšší hodnotou šedé na projekčním obraze. Morfologický proces začíná nejjasnějšími pixely, které jsou brány jako semena a postupně zpracovávány, aby se extrahovaly potenciální oblasti koruny stromu, přičemž náročnost detekce roste v nižších vrstvách kvůli splývání korun sousedních stromů. Hierarchický morfologický algoritmus je implementován paralelně uvnitř i vně zvětšených referenčních oblastí. Využití referenčních oblastí neovlivní vznik nových korun stromů v nižších nadmořských výškách díky souběžnému procesu uvnitř i vně těchto oblastí. Každá detekovaná koruna stromu je popsána 2D oblastmi koruny v různých výškových úrovních. Z těchto oblastí lze vytvořit 3D hranoly odpovídající tloušťce vrstev a kombinací všech hranolů v různých úrovních pak vzniká prizmatický 3D model koruny (Münzinger et al., 2022).

Jedna z velkých nevýhod a zároveň důvod, proč tyto metody nemohly být použity pro t disertační práci je, že nedokáží změřit i ty části korun, které se nacházejí ve středu koruny. A nelze změřit větve tenčí než 5mm. Problémem jsou i jehličnaté nebo listnaté stromy pokud již nahodily listí. Chyby při zjišťování přesné architektury se vlivem jehličí a listí zvyšují.

7.3 Metoda digitalizace 3D modelů pomocí magnetického digitizéru

Magnetický digitizér – přistroj na získávání jak povrchových, tak strukturálních dat je založený na principu snímání pozice ukazatele v 3D prostoru. Magnetické pole, které přístroj vytváří, je schopno pronikat skrze materiály, tedy i dřevo a tím je možno pomocí přístroje měřit i architektonicky složité části stromu například kořeny. Získaná data byla změřena přístrojem magnetickým digitizérem, a to přesně Fastrak Polhemus.(Kuželka et al., 2014)

Zdroje magnetického pole se dělí podle rozsahu na čtyři druhy:

- *Short ranger* – má rozsah uváděný výrobcem do 60 centimetrů. Používá se především v menším rozsahu, například na pracovním stole. Pro měření v lese nemá tak velký praktický význam.
- *Standard* – má rozsah uváděný výrobcem do 150 centimetrů. Tento zdroj se dá použít při digitalizování uvnitř prostornějších místností. Zde se mohou digitalizovat menší stromy nebo jednotlivé větve stromu při destrukčním měření.
- *Extended range* – u tohoto typu je rozsah pole cca 214 centimetrů. Je nejpraktičtějším zdrojem s ohledem na přesnost a přesouvání v terénu. Jeho rozsah je dostatečný na digitalizování kmenů metodou povrchových bodů i na digitalizaci struktur menších stromů do 4 metrů.
- *Long ranger* – magnetické pole je s největším rozsahem cca 4,5 metru. Výhodou tohoto zdroje je, že dokáže zdigitalizovat předměty s průměrnou velikosti do 9 metrů a při tom se s ním nemusí manipulovat. Špatná manipulace při měření ve svahu je naopak nevýhodou (Kuželka et al., 2014).

Každá metoda měření má své výhody a nevýhody. Měření digitizérem Fastrak je časově náročné na sběr dat v terénu,následné zpracování dat v kanceláři náročné není. Vzhledem k tomu, že magnetický digitizér potřebuje pro měření napájecí zdroj, měření 1 m vysokého stromu trvá asi 45 minut. Samozřejmě je třeba vzít v úvahu i další faktory, například větvení vrchlíku. Shromážděná data lze použít k vytvoření strukturálních modelů, které mohou pomoci předpovědět růst daného stromu a vyhodnotit podmínky prostředí. Pro konstrukční modely lze použít software GroIMP (verze 2.0.1), ve kterém jsou nutné přesné 3D modely,z důvodu přesné simulace růstu. Trojrozměrné modely měřené pomocí Fastraku lze tedy v GroIMP použít pro simulace růstu přímo z naměřených dat bez dalších úprav.

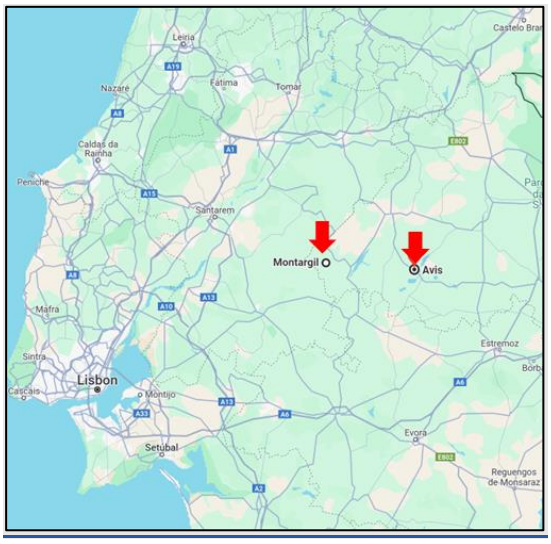
8 Metodika

Data byla měřena na třech lokalitách.

- První lokalita se nachází v Portugalsku, přesněji v oblasti Montargil a Avis,
- druhá lokalita v České republice v oblasti Doksy a Suchdol,
- třetí lokalita na Slovensku, přesněji v oblasti Strážovské vrchy.

8.1 Charakteristika zájmových území

Portugalsko



Obrázek 30. Výzkumná místa v Portugalsku

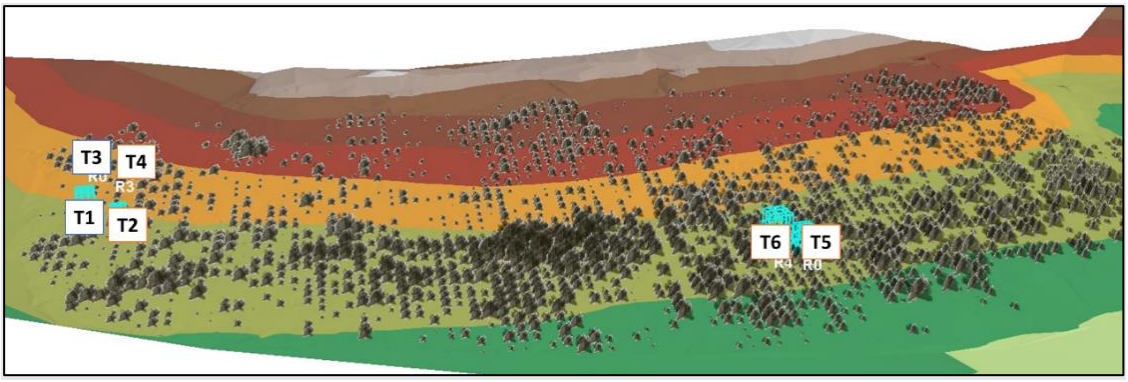
Montargil

Studie se uskutečnila v „Herdade do Corunheiro“ poblíž města Coruche v Portugalsku. Tato oblast se vyznačuje typickým středomořským subhumidním klimatem s horkými a suchými léty. Normální roční průměr srážek v regionu je 704 mm a průměrná roční teplota je 15,1 °C (1971-2000, podle údajů Portugalského institutu pro moře a atmosféru). Q. suber pokrývá 69 % zalesněné plochy v tomto regionu, což představuje největší plochu obsazenou tímto druhem v Portugalsku (Camilo-Alves et al., 2020). Pokusná plocha o rozloze 6 ha byla založena v roce 2014 na bývalé orné půdě pro domácí využití. Před výsadbou bylo provedeno

hodnocení půdního profilu na osmi náhodných místech do hloubky 2 m. Půda byla charakterizována jako nestrukturní s písčitou texturou, volnou houževnatostí a sypkostí, nelepivostí, bez plasticity a s minimálním zhutněním. Více než 75 % částic bylo klasifikováno jako hrubý písek a obsah organické hmoty byl velmi nízký (0,32 %). Mezi jednotlivými lokalitami nebyly zjištěny žádné významné rozdíly v půdním profilu a nebylo dosaženo žádného zvětralého matečného materiálu (horizont C). Pozemek má sklon přibližně 7 % a směřuje k severu pod úhlem 12 stupňů (Camilo-Alves et al., 2020). Plán experimentu je podrobně popsán v (Camilo-Alves et al., 2020). Stručně řečeno, čtyři ošetření plus kontrola, seskupené do bloků se čtyřmi až pěti zavlažovacími řádky, byly čtyřikrát opakovány a náhodně rozmístěny po celé studijní lokalitě. Zpočátku byla půda hluboce rozrývána ve směru Z-V pro výsadbové linie 4 x 4 m. Podpovrchová kapková závlaha byla zakopána 40 cm dolů a 60 cm východně od výsadbové linie, a to pro všechna ošetření a kontrolu.

Sběr dat:

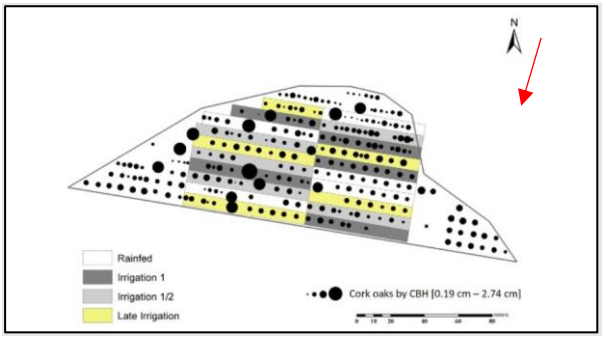
Podzemní kořenový systém u dubu korkového (Quercus suber) byl zkoumán v oblasti Montargil v Portugalsku. Výzkum se zaměřil na šest stromů, které byly rozděleny do tří dvojic na základě podobné nadzemní architektury. Cílem studie bylo zjistit, zda má zalévání vliv na kořenovou architekturu těchto stromů. Zkoumány byly čtyři hlavní parametry určující architekturu kořenů: vliv zalévání na celkový objem kořenů a koruny, délku kořenů, průměrnou tloušťku kořenů a rozložení kořenů do tloušťkových stupňů. Quercus suber byl zkoumán v oblasti Avis a Montargil v Portugalsku. Výzkum se zaměřil na sedm stromů. Cílem studie bylo zjistit, zda a jaký vliv má typ zalévání na vývoj architektury koruny stromů a kořenový systém. Dále proběhla analýza kořenového systému ve vztahu k zavlažovacímu systému. Na výzkumné lokalitě Montargil byl zavlažovací systém instalován od jihu k severu, vždy na východní straně korkového dubu. Na této lokalitě byla rovněž zkoumány nezavlažované korkové duby z důvodu zjištění, zda se jejich orientace liší od orientace zavlažovaných jedinců. Vzhledem ke složité struktuře kořenů byly rozděleny do několika částí. Nejprve byl zkoumán celý kořenový systém, poté kořeny o průměru menším než 0,5 cm a následně kořeny o průměru větším než 0,5 cm.



Obrázek 31. Výzkumné stromy umístěné na ploše v Montargil

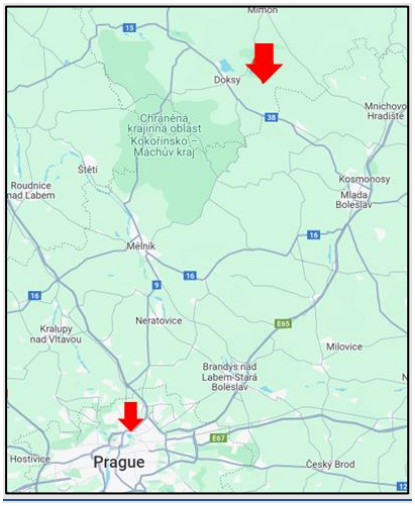
Avis

Studie se uskutečnila na lokalitě „Herdade do Conqueiro“ (39°03´N, 07°58´W) poblíž Avisu v Portugalsku. Oblast se vyznačuje typickým středomořským sub humidním klimatem s horkým a suchým létem. Normální roční průměr pro celkový úhrn srážek v regionu je 593 mm a pro průměrnou teplotu 16,3 °C. V roce 2003 byla na krajním okraji intenzivního olivového háje s kompou 7 × 3,5 m založena 1,6hektarová porostní plocha s korkovými duby zavlažovanými hnojivy. Rostliny jsou od jeho výsadby zavlažovány stejným způsobem jako přilehlý olivový háj, tedy povrchovým kapkovým systémem. Na farmě se nachází les korkových dubů roztroušených po porostu. Terén je rovinatý a vzdálený 50 m od nádrže „Barragem do Maranhão“. Půda byla charakterizována jako málo nasycený glejový luvizem. Hodnocení půdního profilu a odběr vzorků byly provedeny na jednom místě ve třech hloubkách (Camilo-Alves et al., 2022).



Obrázek 32. Výzkumný strom umístění na ploše Avis (Camilo-Alves et al., 2022)

Česká republika



Obrázek 33. Výzkumné plochy umístěné v České republice

Doksy

Oblast Doksy v severních Čechách je převážně zalesněná, s minimem otevřených ploch, jako jsou skály a bažiny. Tento lesnatý region, rozkládající se na přibližně 300 km², vytváří izolovanou enklávu, která se výrazně odlišuje od okolní krajiny s převahou orné půdy. Region je pískovcový pseudokras v pokročilém stádiu vývoje s krajinnými prvky jako skalnaté pískovcové pahorky, občasné sopečné kopce, ploché nebo mírně svažité náhorní plošiny a mělké rašelinné pánve (Novák et al., 2012). Většina povrchů se nachází v nadmořské výšce mezi 270 a 300 m, přičemž několik kopců přesahuje 500 m. Křídové pískovce, které zde dominují, jsou křemičité a mohou obsahovat i uhličitan nebo železo (Novák et al., 2012).

Půdy jsou většinou písčité nebo rašelinné s výrazným nedostatkem jílu a živin. Podle map (Vacek et al., 2021) se zde vyskytují především humózní železité podzoly, arenické kambizemě a arenické regosoly. Oblast má vlhké, kontinentální klima s teplým a suchým vegetačním obdobím. Roční srážky jsou průměrně 635 mm, z toho pouze 364 mm během vegetačního období. Průměrná roční teplota vzduchu je 7,3 °C, s maximálními teplotami až 31,5 °C. Zimní klima připomíná podmínky v nadmořských výškách 700–800 m, s obdobím mrazů od října do května (Brichta et al., 2020).

Výzkumné plochy se nacházejí přibližně 8 km od města Doksy, v rovinatém terénu ve výšce 300 m n. m. Tato oblast se vyznačuje přirozeným výskytem borovice lesní. Lesní porosty jsou spravovány Vojenskými lesy a farmami České republiky, přičemž celková rozloha lesů v této oblasti činí 26 920 ha. Studovaná lokalita (N 50 ° 33,77548', E 14 ° 43,49143") je podložena pískovcem s dominantním půdním typem Arenic Podzol (Šleglová et al., 2024).

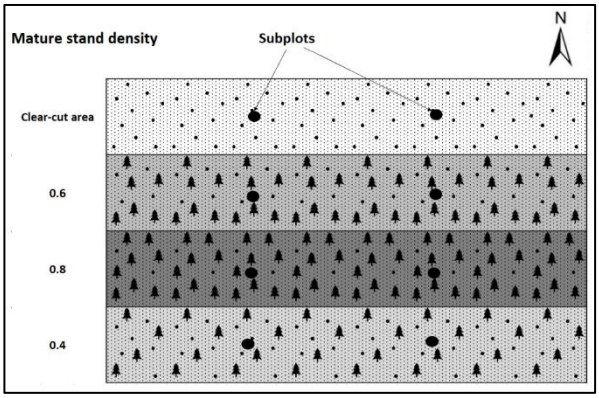
Dnes je oblast převážně zalesněná, přičemž dominují borovice lesní (68 %) a smrk (16 %). Menší zastoupení má buk,bříza a dub. Historie osídlení ukazuje, že oblast byla ovlivněna aktivitami jako lov, dřevorubectví a těžba. V 20. století vojenské aktivity vedly k obnově přírodních procesů. Dnes je území chráněno a řízeno s důrazem na ochranu přírody a udržitelné lesnictví (Novák et al., 2012).

Sběr dat

Bylo vybráno celkem 32 borovic přirozené obnovy z oblastí s různou hustotou mateřského porostu. Na každé ploše bylo odebráno osm stromů přirozené obnovy, přičemž byly zohledněny rozdíly v hustotě dospělého porostu. Hustota byla stanovena na úrovni 0,4 (40 % původního porostu), 0,6 (60 % původního porostu) a 0,8 (80 % původního porostu) a bez mateřského porostu (obr. 34).

Zkoumaly se zde tři hlavní parametry určující architekturu korun:

- Závislost větvení na hustotě porostu,
- závislost výšky jednotlivců přirozené obnovy na hustotě,
- závislost výšky jedinců přirozené obnovy na biomase řádů.



Obrázek 34. Podrobný plánek výzkumné plochy na území Doksy

Suchdol

Další část výzkumu se uskutečnila v oblasti „Suchdol“ ležící na souřadnicích 50°8′25″N, 14°22′25″W. Historie Libosadu je úzce spjata s rozvojem kampusu České zemědělské univerzity (ČZU) v Praze. Krajinářské úpravy v areálu univerzity začaly už v roce 1961, kdy profesor Jiří Mareček navrhl a realizoval rozsáhlou výsadbu zeleně na místě bývalého řepného pole. Hlavním cílem bylo vytvořit příjemné prostředí pro studenty a zaměstnance, reprezentovat univerzitu a poskytnout demonstrační prostor pro výuku zahradní a krajinářské architektury. Mareček a jeho tým vytvořili 22 tematických celků, které jsou dodnes obdivovány. Založení samotného Libosadu začalo v roce 2006 na zanedbaném místě, které dříve sloužilo jako městská skládka. Projekt vedli profesor Mareček a jeho spolupracovník Jan Mejstřík. Realizace trvala tři roky a vyžadovala pečlivou přípravu půdy, protože většina plochy byla pokryta metrovou vrstvou zeminy nad vrstvou odpadů o síle 15–20 metrů. Rostliny byly pečlivě vybrány z okrasných školek po celé republice. Název Libosad byl zvolen jako pocta zahradníkům z minulých století, kteří vytvářeli takzvané "sady pro libost", což je termín pocházející z 18. století. Dnes je Libosad unikátním pedagogickým zázemím, kde studenti studují kompoziční principy, rostlinný materiál a jeho estetické i funkční využití v krajinářské architektuře. Rozloha Libosadu činí 2,67 hektaru, což poskytuje dostatečný prostor pro jeho tematické celky a rozmanité ukázky rostlinných druhů. Jehličnaté dřeviny tvoří přibližně 40 % a listnaté dřeviny 60 % celkové výsadby (Libosad, 2022).

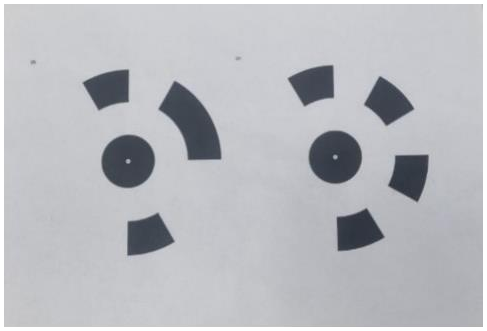
Sběr dat

U dat ze Suchdola se porovnávalo měření Fastrakem a fotogrammetrii. Pro tato srovnání byla zvolena fotogrammetrie. Vybráno bylo celkem 14 listnatých a 14 jehličnatých dřevin (obr.36). Měření probíhalo v Libosadu na Suchdole. Srovnávala se výška, DBH, objemy – celkových a jednotlivých řádů a dále byl porovnáván také jejich počet. Výše zmiňovaná metoda není součástí samostatného cíle práce, proto zde krátce popsuji sběr dat a metodiku výpočtů.

Sběr dat fotogrammetrií

Pro sběr dat byl použit chytrý telefon (iPhone 12 Pro). Samotný proces byl proveden pomocí aplikace LensBuddy, která umožňuje uživateli předdefinovat parametry sekvenčního snímání. V tomto případě byl snímek pořízen každou sekundu a počet snímků na jeden strom se pohyboval v rozmezí 239 až 1000.

Před pořízením snímků bylo nutné nejdříve kolem každého stromu umístit papírové značky pro škálování a odkazování, exportované za softwaru Agisofe Metashape. (obr.35) Většina značek byla umístěna na zem, v co největší blízkosti stromu. Zbývající, menší značky, byly umístěny naopak na libovolné větve daného stromu. Poté byl každý strom zachycen na fotografiích, přičemž kamera kopírovala kruhovou trajektorii, která se skládala ze čtyř nebo pěti kruhů v závislosti na složitosti zkoumaného stromu. První kruh poskytuje informace o celkovém habitu stromu a umístění značek, zatímco zbývající části trajektorie mají za cíl získat bližší pohled na jednotlivé části stromu, jako je spodní, střední a koncová část jeho kmene.



Obrázek 35. Ukázka značek pro škálování a odkazování

Zpracování dat v programu TreeQSM

Nasbírané snímky byly zpracovány pomocí softwaru Agisoft Metashape v několika základních krocích: detekce značek, vizuální kontrola detekovaných značek, zarovnání a optimalizace kamery, generování hustého mračna, kalibrace barev a filtrace bodů v hustém mračnu.

Nastavení pro zarovnání kamery bylo zvoleno s nejvyšší možnou přesností. Byly aktivovány funkce generického předvýběru, odhadovaného referenčního předvýběru a adaptivního přizpůsobení modelu kamery. Limit klíčových bodů byl nastaven na 40 000 a limit

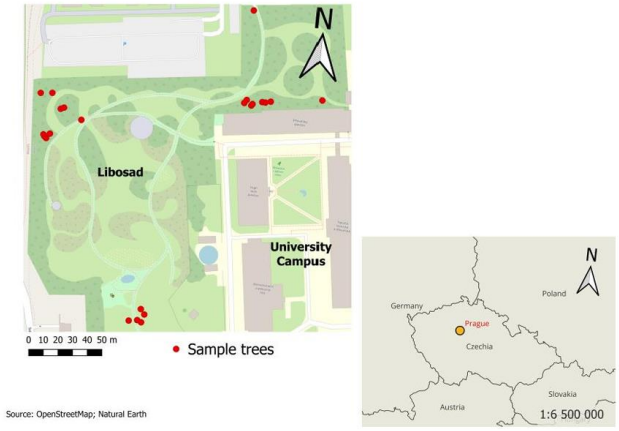
vázaných bodů na 4 000. Husté mračno bodů bylo vytvořeno s kvalitou "Ultra high" a pouze mírným filtrováním. Funkce pro výpočet důvěryhodnosti bodů byla zapnuta, protože důvěryhodnost bodů je klíčová pro další úpravy mračna bodů.

Filtrování hustého mračna bodů bylo nezbytné kvůli původnímu nadměrnému šumu, který by znemožnil analýzu. Body s důvěryhodností rovnající se nebo menší než 2 byly vyloučeny. Také byly odstraněny barevné body z nejtenčích větví, které měly barvu podobnou pozadí (obvykle modré jako obloha). Tyto body vznikly z mapování barev na husté mračno a jejich umístění nemuselo být vždy správné, ačkoliv jejich barva byla chybná. Špatně umístěné body s nesprávnými barvami často nadhodnocovaly průměr větví, což bylo způsobeno pohybem stromů ve větru. Filtrace podle barvy byla použita ke snížení vlivu tohoto pohybu a identifikaci pravděpodobně špatně umístěných bodů.

Při hodnocení jehličnatých stromů byla úprava složitější, protože model zahrnoval i asimilační orgány. Ty byly odfiltrovány podle zelené barvy. Tento postup byl částečně úspěšný, ale neodstranil všechny body, pouze většinu.

Odfiltrovaná hustá mračna bodů byla exportována a uložena do formátu .txt pomocí softwaru CloudCompare. Tento formát byl zvolen, protože je kompatibilní se softwarem TreeQSM, který se používá v následujících krocích pracovního postupu. TreeQSM dokáže vytvářet kvantitativní modely struktury stromů na základě jejich mračen bodů a funguje pouze v prostředí Matlab. Tyto modely obsahují informace o průměrech, objemech, počtech větví, úhlech mezi větvemi, křivce zúžení kmene a dalších aspektech stromové architektury. Protože TreeQSM je nastaven pro vzrostlé stromy, bylo nutné vstupní argumenty pro zkoumané stromy této studie snížit o 100. Výsledky byly tímto způsobem velmi spolehlivé. Každý strom byl programem vyhodnocen pětkrát, protože každý proces přináší trochu odlišné výsledky. Čím více postupů je provedeno, tím spolehlivější je průměr ze získaných hodnot, jak doporučují tvůrci softwaru.

Sběr dat a zpracování dat pomocí Fastraku digitizeru byl popsán podrobněji ve výsledku. 1. Naměřené údaje se rozdělily podle druhů (zda jde o jehličnany nebo listnaté jedince).



Obrázek 36. Výzkumný stromy na ploše Suchdol

Slovensko

Strážovské vrchy

OZ Považská Bystrica spravuje lesy v oblasti středního Pováží, která zahrnuje pohoří Malé a Biele Karpaty, Považský Inovec a Strážovské vrchy. Tato oblast, zasahující do okresů Ilava, Považská Bystrica a Trenčín, se vyznačuje výraznou rozmanitostí terénu a je rozdělená řekou Váh, což způsobuje rozdíly v geologii, půdách a druhovém složení lesů. Strážovské vrchy, s nejvyšším vrcholem Strážovem (1 213 m n. m.), jsou charakteristické vápencovými skalami, hlubokými údolími a rozsáhlými lesy, které jsou domovem mnoha vzácných druhů rostlin a živočichů. Část tohoto pohoří je chráněna v rámci CHKO Strážovské vrchy, která byla založena v roce 1989 a rozkládá se na ploše 30 979 hektarů. Tato chráněná oblast spadá pod správu NP Veľká Fatra a zahrnuje také výzkumnou plochu. Na levé straně Váhu, ve Strážovské hornatině, se nacházejí lesy s převahou buku (44 %), doplněné borovicí, s menším zastoupením smrků, modřínů, jedlí a dubů. Tyto lesy rostou na vápencovém a dolomitovém podloží s mělkými, živinově chudými půdami. Na pravé straně Váhu, v masivu Javorníků, převažují jehličnany (61 %), zatímco listnaté dřeviny tvoří 39 %. Lesy v této oblasti se nacházejí ve výškách od 165 do 1 042 m n. m. a spadají do různých lesních vegetačních stupňů, přičemž převažuje třetí stupeň. Významné části území patří pod CHKO Biele Karpaty, CHKO Malé Karpaty a CHKO Strážovské vrchy (Lesy SR, 2023.).

Sběr dat

V této výzkumné oblasti bylo vybráno 10 stromů. Na každém stromě bylo odebráno 30 listů, které byly následně digitalizovány. Studie se zaměřila na analýzu orientace listů a koruny stromů vůči světovým stranám. Dále byly zkoumány vztahy mezi specifickou listovou plochou (SLA) a transpirací vody, stejně jako mezi SLA a azimutem.

Obrázek 37. Výzkumná plocha Slovensko

8.2 Struktura dřevin

Strukturou dřevin se rozumí vytvoření 3D modelu. Za strukturu lze považovat permanentní vztah několika entit. Za entity jsou považovány známe geometrické tvary, jako je válec, koule, kužel a kvádr. Tyto tvary nám urychlují kvalifikaci údajů o biomase, délkách a objemech různých segmentů (tj. částí větví, kmene).

Vzhledem k tomu, že metodika pro sběr strukturálních dat je jedním z cílů této disertační práce, je podrobněji popsaná ve výsledcích.

8.2.1 Modelovací softwary použité v mém PhD.

Vytvořené 3D modely se dají použít do dalších softwarů například do GroIMP nebo do Speedtree. Rozdíl je , že GroIMP je software pro růstové gramatiky, zatímco Speedtree je pro tvorbu a úpravu modelů pro Virtuální realitu.

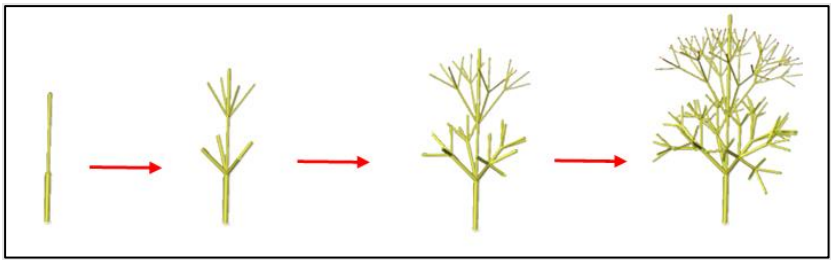
Modelování v GroIMP

Obrázek 38. Ikona GroIMP

Mezi metodami pro vytváření fotorealistických virtuálních organismů, zejména rostlin, a ve vědeckých modelech vegetace, jsou klíčové techniky založené na pravidlech, jako jsou formální gramatiky. Nejčastěji se používají Lindenmayerovy systémy (L-systémy), ale kombinace některých typů grafových gramatik s objektově orientovaným programováním nabízí ještě více možností pro specifikaci vývoje 3D struktur, morfologie virtuálních organismů a základních procesů, například metabolických reakcí. Příklady gramatických pravidel a virtuálních geometrických struktur, které z nich vznikají, lze realizovat pomocí open-source softwaru GroIMP (https://grogra.de/). Tento přístup založený na gramatikách se často nepoužívá přímo k vytváření obrázků jako vzorů grafických prvků v rovině, ale k vytváření virtuálních 3D scén, které jsou následně zobrazovány pomocí standardních technik počítačové grafiky založené na geometrii.

Program pro simulaci procesu na počítači je často specifikován zápisem základních kroků výpočtu v určeném pořadí, které se má aplikovat při jeho provádění. Toto pořadí může zahrnovat podmíněné větvení a smyčky(Kurth et al., 1997).

V softwaru GroIMP se modelují buď vlastní modely (obr. 38) anebo modely, které se vytvořily v programu. S 3D modely se může dále pracovat jako s vytvořenými růstovými modely. Pokud se tvoří 3D model fiktivní, který nebyl dříve změřen a vychází se z růstových gramatik, jsou odlišná počáteční pravidla pro modelování kořene a koruny. Koruna má nejdůležitější vlastnost růstu gravitropismus, zatím co kořen roste pro gravitaci.



Obrázek 39. Simulace koruny v 1 roce 2 roce 3 roce a 4 roce

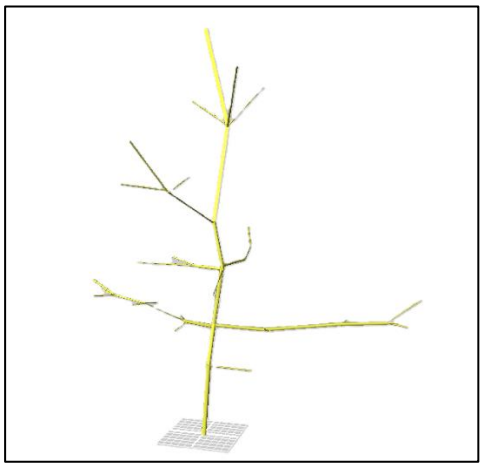
```
    A(x,y)==> F(2,0.5,7) Rotate(1,2,4);
    B(x)==> Sphere(0.15).(setShader(YELLOW))[F(3,0.2,5)[RU(60)RL(10) ] LMul(0.5)DMul(0.3)C ]for((1:5))(RH(72)[RL(80)Flower]);
    C(x,y)==> F(4,0.5,5)[RU(180)RL(180)][B(x*0.3,y*0.3)Leaf]
                [RU(90)RL(90)][RL(50)RU(33)A(x*1,y*2)A ][RU(-60)RL(-10)B Flower]
                ;

a:M3,(a.s>7)==>F(a.len,a.withd)[RU(160)] ;
    M3(x,y,s)==> if(s>1) (F(1,0.5,6))[RL(-90)M3(x*1,y*0.9,s*3)];
m:M1,(m.s ==2)==>[RU(30)M1(1,0.5,6)][RU(-90)RL(10)M1(m.len*0.8,m.withd*0.3,m.s*3)];
    m:M1,(m.s >7)==> F(m.len,m.withd)[RU(40)] [ RU(-10)M1(m.len*0.3,m.withd*0.4, m.s*1) ];
    M1(x,y,s)==>if(s>1)  (Translate(0,0,0) F(3,0.5,6))[RU(-90)RL(10)M1(x*0.8,y*0.3,s*3)];
b:M4,(b.s>7)==>F(b.len,b.withd)[RL(-30)] ;
    M4(x,y,s)==> if(s>1) (F(1,0.5,6))[RU(30)M4(x*0.9,y*0.9,s*3)RL(-90) M4(x*0.3, y*0.5,s*5)] ;
```

Obrázek 40. Ukázka nadzemní a podzemní části vytvořené v GroIMP spolu s částí použitého kódu

Pro modelování kořenů je zásadní zajistit, aby růst probíhal směrem dolů, což je ve shodě s přirozeným růstem kořenů směrem ke gravitaci. Proto se do axiomu často přidává instrukce RU (-180), která zajistí otočení směrem dolů. Tento přístup umožňuje simulovat gravitropismus, což je orientace růstu rostlin vzhledem k gravitaci. V praxi se to často kombinuje s dalšími pravidly a pravděpodobnostními podmínkami, aby výsledný model kořenů byl co nejrealističtější. Na obrázku níže je příklad kódu, který ilustruje tento postup. V tomto kódu jsou kořeny vytvářeny za pomoci L-systémů (Lindenmayerových systémů), kde jsou definována pravidla růstu a pravděpodobnosti, které určují, jakým směrem a jak rychle se kořeny rozrůstají. Tento způsob modelování je užitečný pro různé aplikace, včetně počítačové grafiky, simulace ekosystémů a výzkumu v oblasti botaniky (Kurth, 1999).

Obrázek 41. Ukázka kódu pro kořen

Jak již výše bylo uvedeno lze do růstového simulátoru nahrát i vytvořené 3modely za pomoci programu Fastraku Polhemusu. Proto simulaci přesného růstu 3D modelu se musí měřit každý nový přírůst jako nový segment.



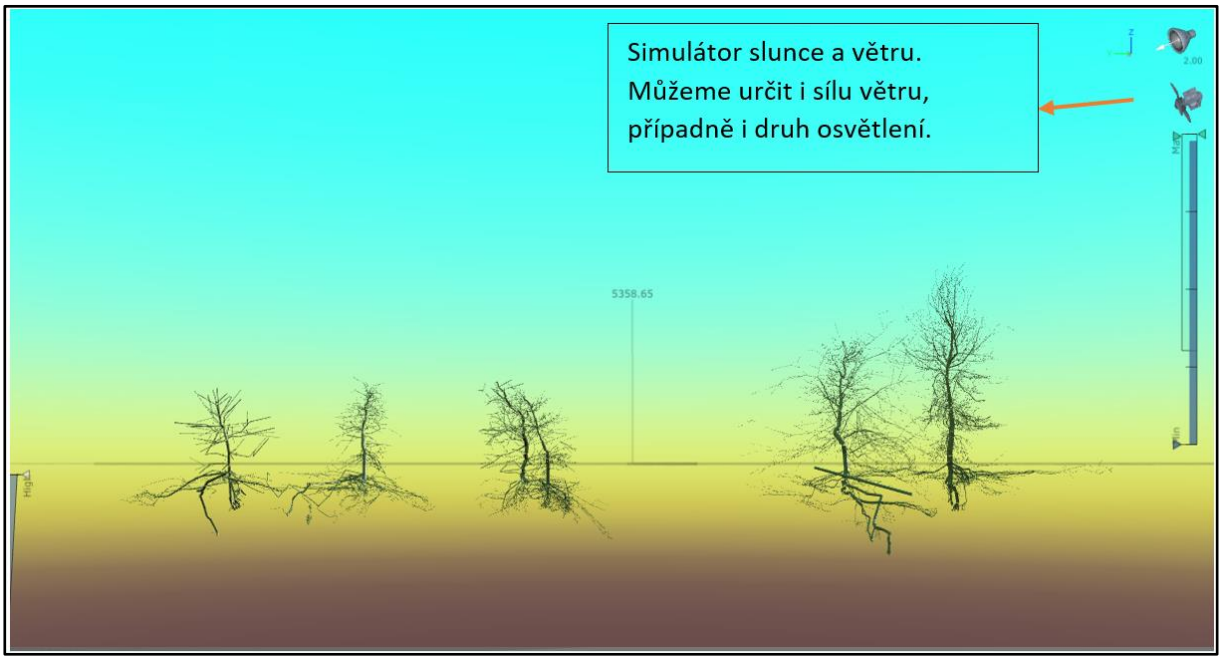
Obrázek 42. Ukázka vloženého 3D modelu.

GroIMP je software pro růstové gramatiky, ale ve chvíli, kdy je potřebné nasimulovat elementární vlivy, použije se software Speedtree.

Modelování ve Speedtree

Obrázek 43. Ikona Speedtree

Aby mohly být v tomto softwaru dále upravovány naše 3D modely, musí být nejprve uloženy jako soubor. Tento formát je univerzálně akceptován mnoha 3D modelovacími programy, což umožňuje snadný přenos modelů mezi různými aplikacemi. Ve Speedtree mohou být modely nejen upravovány, ale také mohou být přidány realistické prvky, jako je listí, které modelům dodává přirozený vzhled. Kromě toho lze ve Speedtree nasimulovat vliv větru, což přidává modelu dynamiku a realističnost. Také může být nasimulováno sluneční světlo, aby bylo vidět, jak bude model vypadat v různých světelných podmínkách. Takto upravené modely mohou být vloženy do virtuální reality a může být nasimulován reálný les. Speedtree tak poskytuje kompletní sadu nástrojů pro tvorbu a úpravu 3D modelů rostlin, stromů, které mohou výrazně zvýšit kvalitu projektů.



Obrázek 44. ukázka korkové plantáže ve Speedtree vytvořeného pomocí Fastraku Polhemusu

9 Výsledky

Ve výsledcích byla podrobně prozkoumána metodika a postup získávání trojrozměrných dat. Bylo zhodnoceno využití tohoto typu měření pro nadzemní části dřevin, konkrétně u borovice lesní, dubu korkového a buku lesního. Při analýze nadzemních částí dřevin nebyla opomenuta ani podzemní část, která bude hodnocena na příkladu dubu korkového. Na závěr bylo provedeno srovnání měření pomocí magnetického digitizéru s jinou metodou. Jako alternativní metoda byla zvolena fotogrammetrie, přičemž Lidar byl zvažován jako další možnost z důvodu posouzení přesnosti a efektivity různých měřicích metod.

9.1 Metodika a postup pro získávání trojrozměrných dat o architektuře stromu, pro modelování analýzy růstu stromu pomoci strukturálních růstových modelů

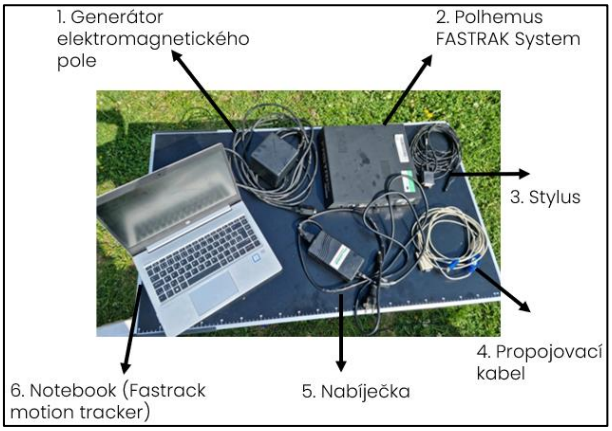
Nejprve budou popsány pomůcky nezbytné pro získávání trojrozměrných dat o architektuře stromu, zahrnující jak nadzemní, tak podzemní části dřevin. Následně bude detailně představen přístroj Magnetický digitizér Fastrak Polhemus, včetně vysvětlení pojmů jako stylus a generátor magnetického pole. Po tomto úvodu bude popsáno zapojení přístroje a samotné měření architektury stromu. Poté bude věnována pozornost sběru dat, přičemž nejprve bude zaměřeno na nadzemní část a poté na podzemní část, u které je nutno provést čištění kořenů. Na závěr budou identifikovány možné chyby při měření, aby uživatelé této metodiky mohli předejít potenciálním problémům a zajistit tak přesnost a spolehlivost získaných dat.

9.1.1 Pomůcky pro měření

1. Fastrak Polhemus
2. Generátor (zdroj elektřiny)
3. Kompresor – AirSpade 2000 HT138 (pro získávání dat z kořenů)
4. Program Fastrak Digitizér
5. Plastové posuvné měřítko
6. Další pomůcky pro výkop kořenů

9.1.2 Fastrack Polhemus – Magnetický digitizér

Fastrack Polhemus je založený na principu snímání pozice stylusu v 3D prostoru. Magnetické pole, které vytváří přístroj, je schopno proniknout skrze materiály, tedy i dřevo. Velkou výhodou přístroje je, že se dají měřit i architektonicky složité části stromu například kořeny. Další výhodou je schopnost měřit malé a tenké části dřevin. Velkou nevýhodou přístroje lze spatřit v tom, že v okolí měření nesmějí být přítomny žádné kovové předměty.



Obrázek 45. Popis magnetického digitizéru

a) **Stylus**

Stylus je zařízení ve tvaru pera, které slouží k přesnému zaznamenávání polohy objektů v prostoru. Kromě zaznamenávání souřadnic X, Y a Z stylus také měří úhel, pod kterým je každý bod vytvořen. Tato funkce je klíčová pro správné modelování 3D objektů, kde je nutné zachovat přesnost jak v poloze, tak v orientaci bodů. Stylus umožňuje vytvářet 3D modely s mimořádnou přesností – souřadnice jsou zaznamenávány s přesností na 0,07 cm a úhly s odchylkou pouze 0,15°, což zajišťuje detailní a přesnou rekonstrukci.

Stylus je dostupný ve dvou variantách – s délkou 7 palců (17,78 cm) nebo v kratší verzi s délkou 3,5 palce (6,04 cm). Maximální průměr těla stylusu je 0,75 palce (1,9 cm), zatímco hrot je dlouhý 0,8 palce (2,03 cm) s průměrem 0,156 palce (0,4 cm). Celková hmotnost stylusu bez připojeného kabelu činí 28,3 gramů. Uživatelé si mohou vybrat stylusy s kabelem o délce 3 nebo 6 metrů, v závislosti na jejich potřebách.

Stylus je vybaven cívkou přijímače a tlačítkovým spínačem umístěným na rukojeti, který ovlivňuje výstup dat. Díky preciznímu nastavení je měření polohy přesně sladěno s hrotem stylusu, což zajišťuje vysokou úroveň přesnosti a spolehlivosti výsledků. Stylus funguje jako přijímač s elektrickým středem, který je softwarově posunut od hrotu, což umožňuje přesnou detekci pohybů. Přepínač na stylusu funguje při připojení ke stanici 1 a ovládá různé režimy systému Fastrak, který poskytuje jak jednoduché, tak kontinuální výstupy záznamů.

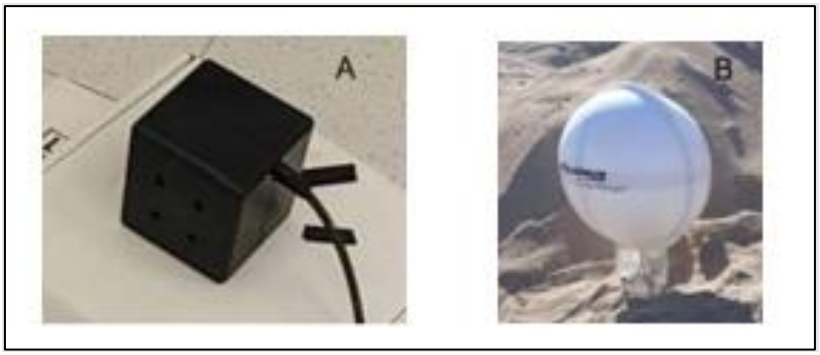
Obrázek 46. Stylus

b) Zdroj elektromagnetického pole

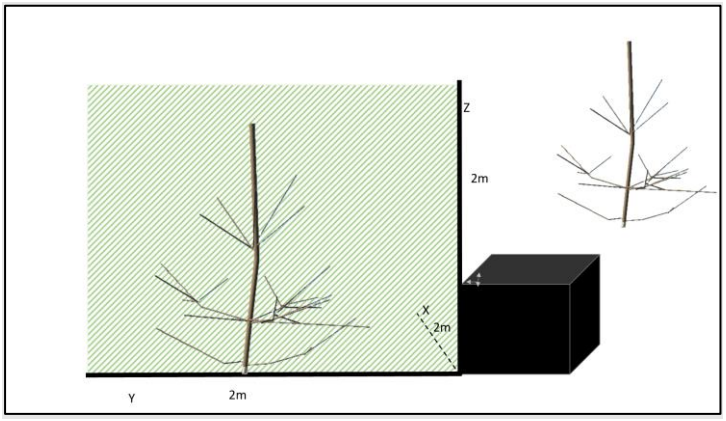
Zdroj elektromagnetického pole může mít tvar koule nebo krychle, přičemž každý typ vytváří pole s různým dosahem. Koule generuje magnetické pole s dosahem až 4 metry, zatímco krychle má dosah 2 metry. Toto magnetické pole je definováno souřadnicemi X, Y a Z, které jsou klíčové pro přesné měření polohy a orientace objektů. Vysílač, který vytváří toto elektromagnetické pole, slouží jako referenční bod pro měření polohy a orientace přijímačů.

Vysílač je obvykle umisťován v pevné poloze na nekovový povrch nebo stojan, který je umístěn v blízkosti přijímačů, aby byla zajištěna maximální přesnost měření. Pokud je nutné vysílač připevnit na delší dobu, má na spodní straně čtyři otvory se závitem ¼ - 20 NC, které umožňují jeho bezpečné uchycení. Doporučuje se používat nylonové kování pro pevné a stabilní uchycení.

Je rovněž důležité, aby kabely vysílače byly vedeny odděleně od kabelů přijímačů, aby se předešlo možnému rušení signálu. Vysílače jsou běžně vyráběny ve dvou variantách – jako dvoupalcová šedá kostka nebo čtyřpalcová černá kostka. Výběr varianty závisí na konkrétních potřebách aplikace a požadovaném rozsahu magnetického pole.



Obrázek 47. Ukázka krychle (A) a koule (B) zdroj elektromagnetického pole



Obrázek 48. Ukázka tvorby magnetického pole. Zelené pole zobrazuje, jakým směrem je vytvářeno magnetické pole.

Jak je zřejmé z umístění magnetického pole, měření je možné pouze u objektů nacházejících se v tomto poli. Pokud je potřeba měřit objekt umístěný mimo oblast magnetického pole, například na bílé ploše mimo jeho dosah, je nutné přemístit zdroj magnetického pole tak, aby se objekt dostal zpět do jeho vlivu.

Pro lepší orientaci a přesné umístění objektu v magnetickém poli mohou být užitečné vizuální indikátory – šipky. Tyto šipky naznačují směr, ve kterém je magnetické pole generováno a pomáhají zajistit, že objekt je umístěn v optimální pozici pro měření. U krychlových zdrojů magnetického pole jsou šipky umístěny na horní straně kostky, což ukazuje směr pole vzhledem k povrchu, na kterém je zdroj umístěn. U zdrojů ve tvaru koule jsou šipky umístěny na přední části koule, aby indikovaly směr generování pole.

Tyto vizuální pomůcky jsou klíčové pro správné umístění objektu v magnetickém poli. Zajišťují, že objekt je v oblasti s maximální intenzitou pole. Tím se minimalizuje možnost chyby a zajišťuje přesné a spolehlivé měření.

Software FastrakDigitizer

Obrázek 49. Ikona FastrakDigitizer

Fastrak Digitizer je pokročilý software vyvinutý pro zpracování dat z Fastrak® motion trackeru, známého nástroje pro přesné sledování pohybu. Tento software poskytuje široké možnosti analýzy a vizualizace pohybových dat. Fastrak Digitizer nabízí dva hlavní režimy sběru dat: kontinuální a segmentový.

Software je klíčovým nástrojem pro získávání a analýzu dat v mnoha oblastech, včetně lesního hospodářství. V této oblasti je obzvláště důležitý při vytváření 3D modelů lesních ekosystémů, měření jejich dynamických změn a přispívá k efektivnějšímu řízení lesních zdrojů a lepšímu pochopení ekologických procesů.

Schopnost integrovat a analyzovat data v reálném čase je zásadní pro vytváření přesných a aktuálních modelů, které mohou být využity k plánování a optimalizaci lesnických praktik. Fastrak Digitizer tedy hraje klíčovou roli v moderním lesním hospodářství a ekologickém výzkumu.

Kontinuální režim

Nepřetržitý (kontinuální) režim je aktivován stisknutím tlačítka na stylusu a zastavením sběru dat dalším stisknutím, což umožňuje snadnou kontrolu nad tím, co je zaznamenáváno. Tento režim je ideální pro přesné mapování kontur objektů, čímž poskytuje cenné informace pro aplikace, kde je důležitá detailní tvaru. V nepřetržitém (kontinuálním) režimu je Fastrak Digitizer používán jako vysoce přesný nástroj pro detailní sběr a analýzu dat. Při sběru dat je možné nastavit minimální vzdálenost mezi jednotlivými body. To je zásadní pro dosažení vysoké přesnosti a detailnosti mapování povrchů, což je důležité pro vytváření podrobných 3D modelů a analýzu jemných detailů. Body jsou vizualizovány na obrazovce v reálném čase, což umožňuje okamžitou kontrolu výsledků a provádění úprav bezprostředně během sběru dat. Tato

funkce je velmi užitečná, protože poskytuje okamžitou zpětnou vazbu a umožňuje rychle korigovat chyby nebo nepřesnosti.

Segmentový režim

V segmentovém režimu sběru dat jsou počáteční a koncový bod segmentu označeny kliknutím na tlačítko stylusu. Tyto body jsou automaticky spojeny segmentem o specifikovaném průměru, který může být dle potřeby upravován. Tento režim je zvláště efektivní pro měření lineárních objektů, kde je důležitá jasná definice začátku a konce segmentu. Segmentový režim je obzvlášť přínosný pro 3D modelování stromů a dalších přírodních objektů. Umožňuje přesné měření a mapování jednotlivých částí, což je klíčové pro realistické a detailní modely. Průměr segmentu lze flexibilně měnit během zpracování dat. Tento přístup je zvlášť důležitý u stromů s nepravidelným růstem, kde jakákoliv nepřesnost může výrazně zkreslit celkový obraz. Díky segmentovému měření lze vytvořit přesný 3D model, který je vhodný pro další analýzy, například pro studium růstu stromu nebo jeho stability.

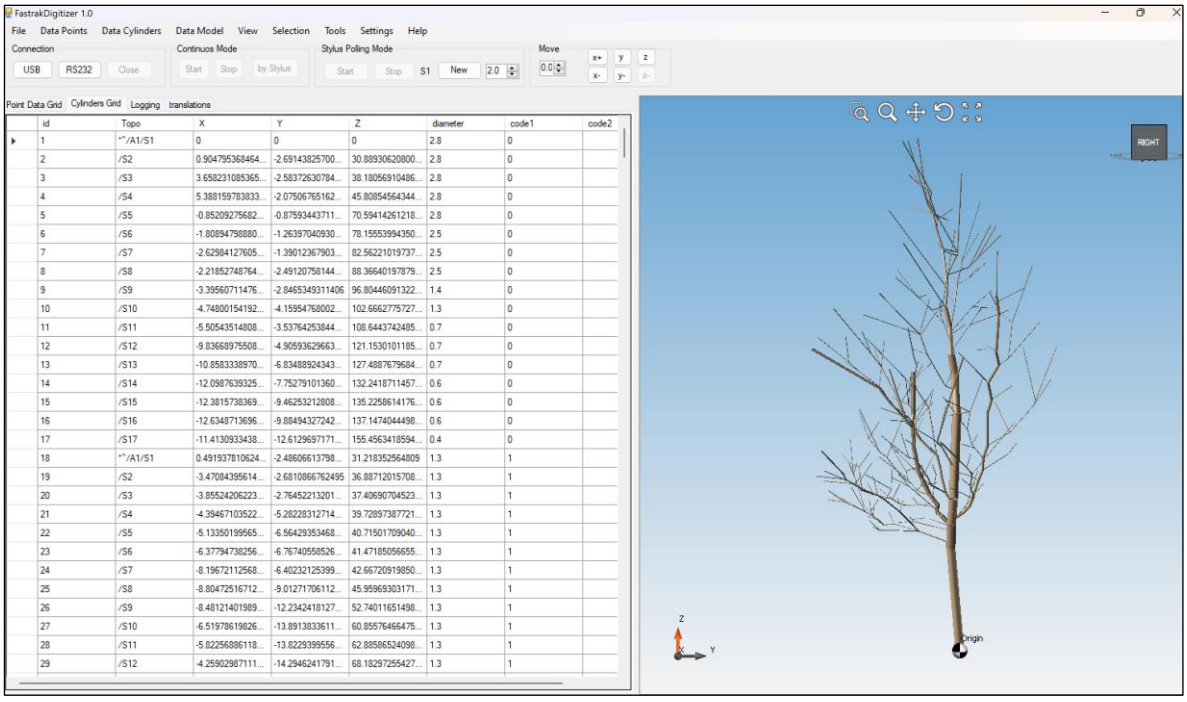
Zpracování dat

Zpracování dat ve Fastrak Digitizeru zahrnuje několik klíčových funkcí:

a) **Vytváření sítě z bodů**: Na základě nasbíraných bodů lze vytvářet sítě, které představují strukturu a tvar objektu. Tato síť umožňuje vizualizaci a analýzu tvaru objektu v trojrozměrném prostoru.
b) **Dělení sítě vodorovnými řezy**: Síť lze dále dělit vodorovnými řezy, což umožňuje podrobnou analýzu tvaru a struktury objektu na různých úrovních. Tyto řezy mohou být užitečné pro studium průřezů a vnitřních vlastností objektu.
c) **Vyhodnocení tvaru, objemu, průměru a povrchu**: Software umožňuje detailní vyhodnocení tvaru, objemu, průměru a povrchu v různých řezech. Tato funkce je zásadní pro získání přesných a kvantitativních údajů o analyzovaném objektu, což je klíčové pro vědecké a technické aplikace.

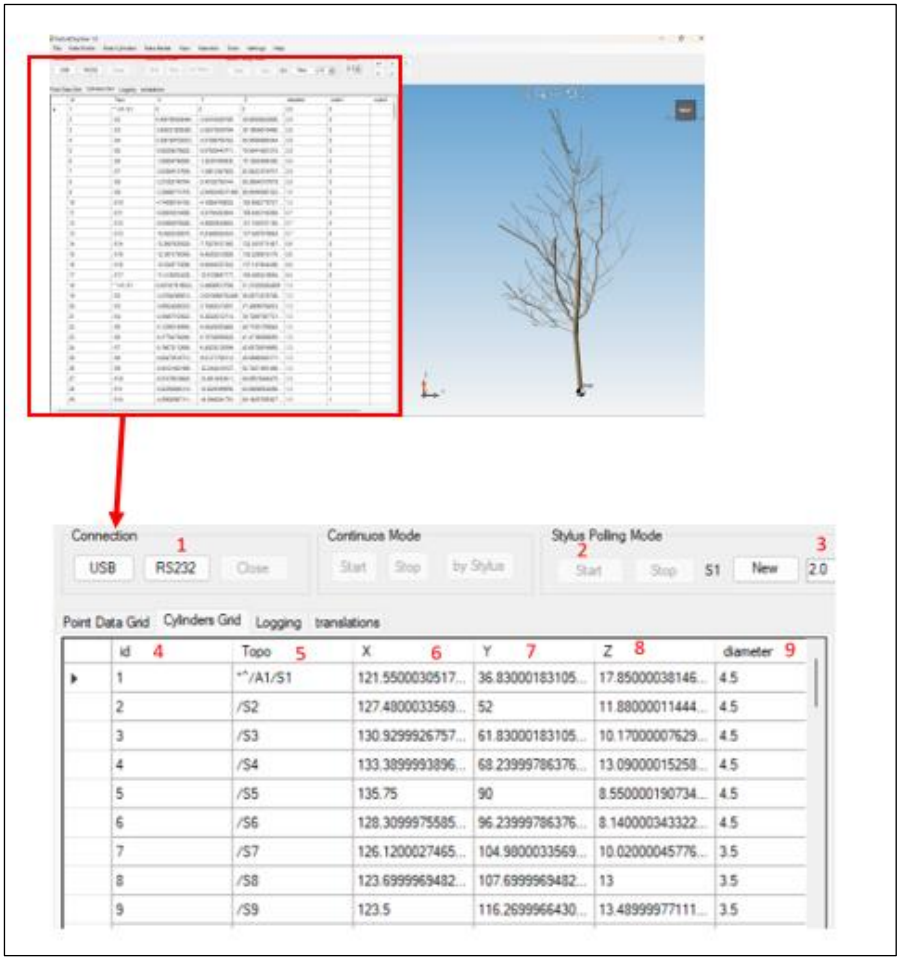
Fastrak Digitizer je nástroj pro sběr a zpracování 3D dat. Jeho schopnost pracovat v kontinuálním a segmentovém režimu spolu s pokročilými funkcemi pro zpracování a analýzu

dat, z něj činí neocenitelný nástroj pro profesionály v různých oborech. Díky tomuto softwaru mohou uživatelé získat detailní a přesné informace o tvaru, objemu a dalších vlastnostech objektu, což je zásadní pro řadu vědeckých a technických aplikací (obr. 49).



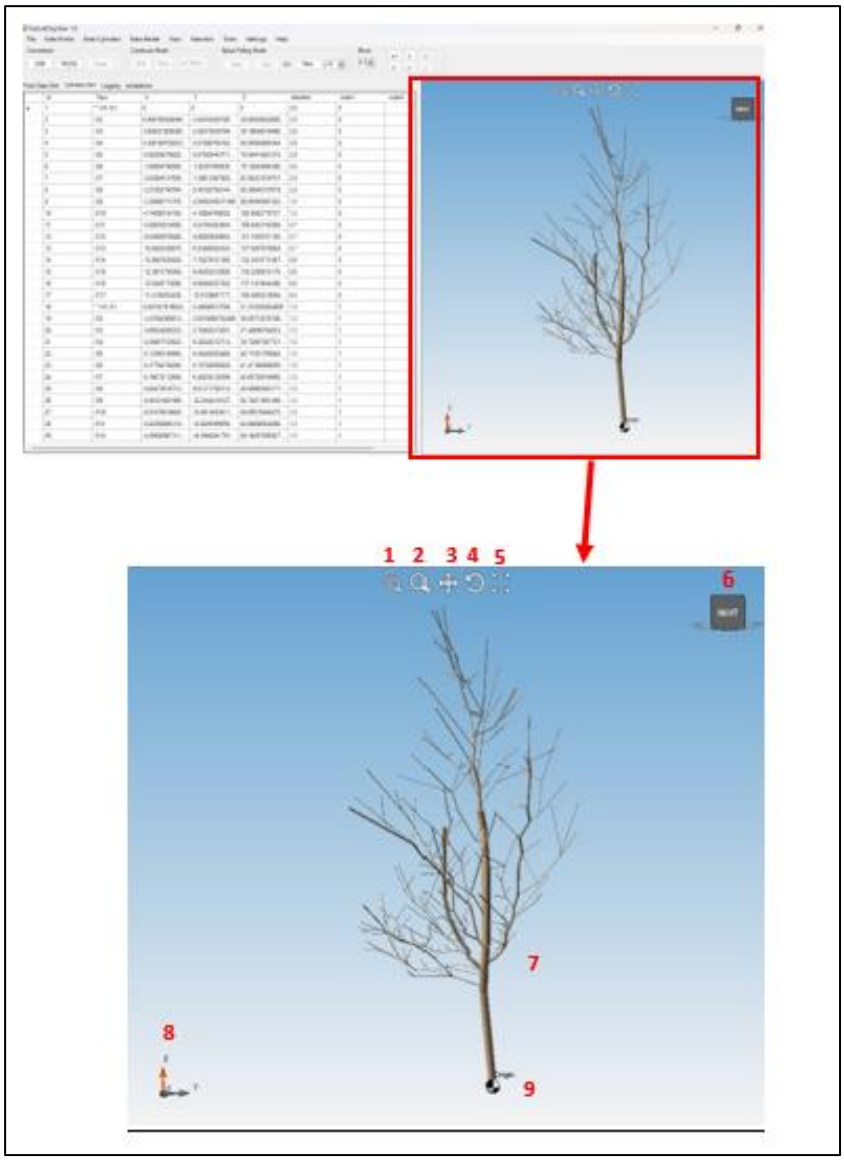
Obrázek 50. Náhled celého softwaru.

Vzhledem k rozmanitosti funkcí, které tento software nabízí, budou podrobněji popsány některé z nejdůležitějších funkcí, které byly použity při zpracování disertační práce.



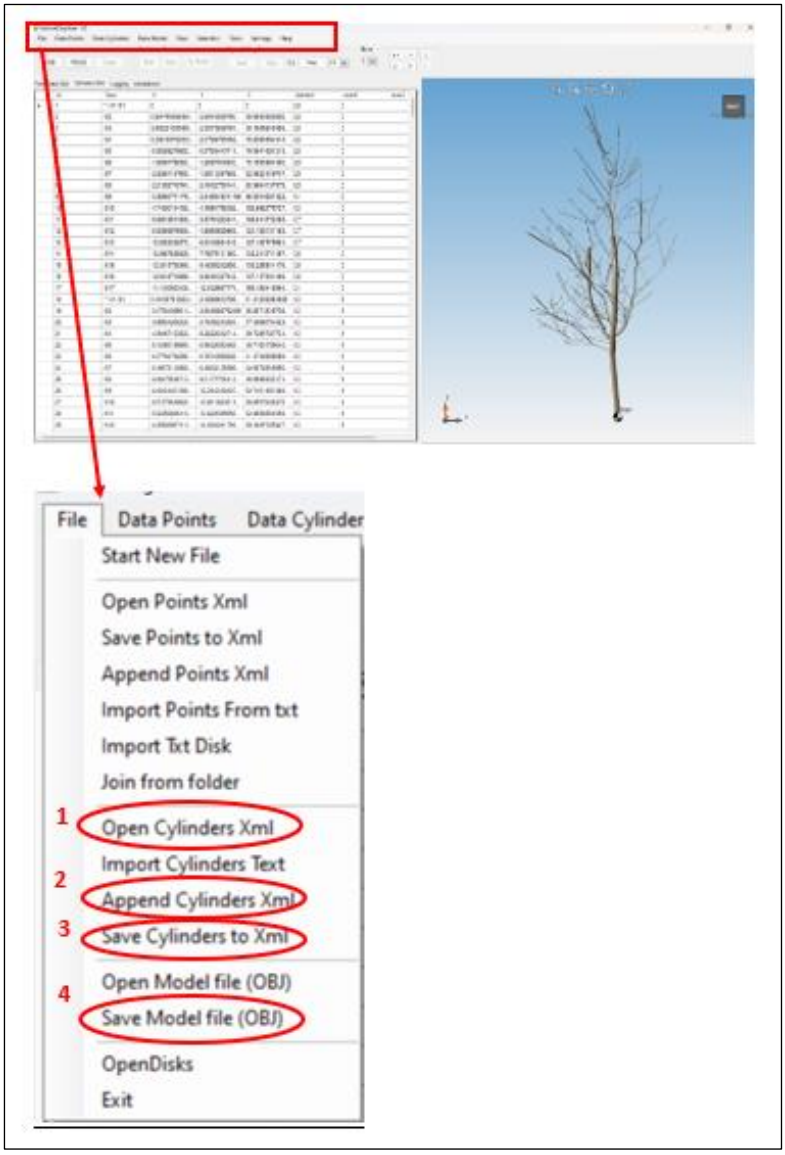
Obrázek 51. Vysvětlení hlavních částí softwaru

1. Propojuje magnetický digitizér s programem
2. Zapíná časování měření segmentů
3. Mění průměr každého segmentu
4. Pořadí bodů
5. Zaznamenává počáteční bod segmentu /A1/S1 a pokračující bod segmentů /S2, /S3…
6. Umístění bodu v souřadnici X
7. Umístění bodu v souřadnici Y
8. Umístění bodu v souřadnici Z
9. Záznam průměru každého bodu



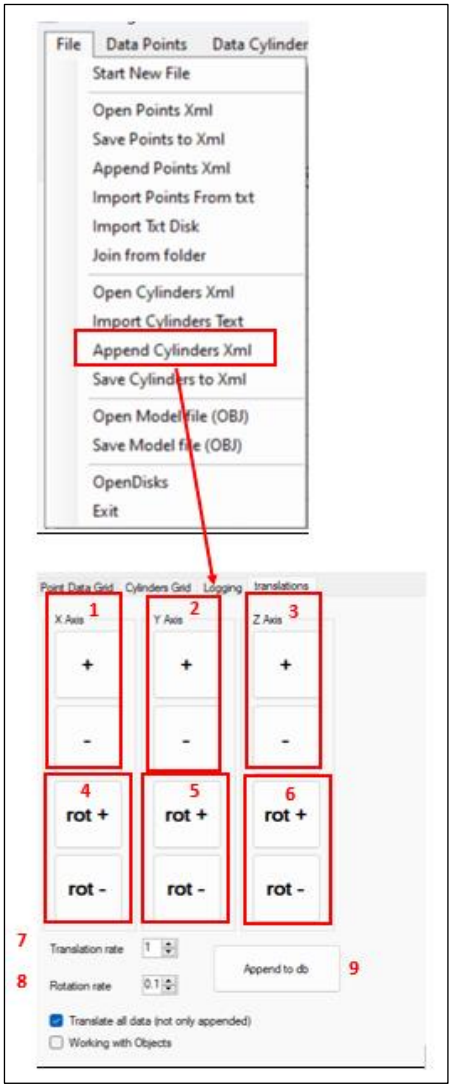
Obrázek 52. Popis zobrazujícího okna 3D modelu

1. Oddálení 3D modelu
2. Přiblížení 3D modelu
3. Posunutí 3D modelu
4. Otočení 3D modelu
5. Zobrazení celého modelu
6. Orientace modelu vůči světovým stranám
7. 3D model
8. Orientace 3D modelu vůči souřadnicím X, Y, Z
9. Zobrazuje počátek magnetického pole



Obrázek 53. Popis důležitých částí pole "File"

1. Pomocí „Open Cylinders Xml“ otevřeme vytvořené modely
2. Pomocí „Append Cylinders Xml“ otevřeme druhou část jednoho modelu
3. Pomocí „Save Cylinders to Xml“ uložíme vytvořené modely pro pozdní otevření v Fastrak digitizer nebo GroIMP
4. Pomocí „Save Model file (OBJ)“ uložíme vytvořené modely pro pozdní otevření v programu Speed tree a dalších pro úpravy pro virtuální realitu



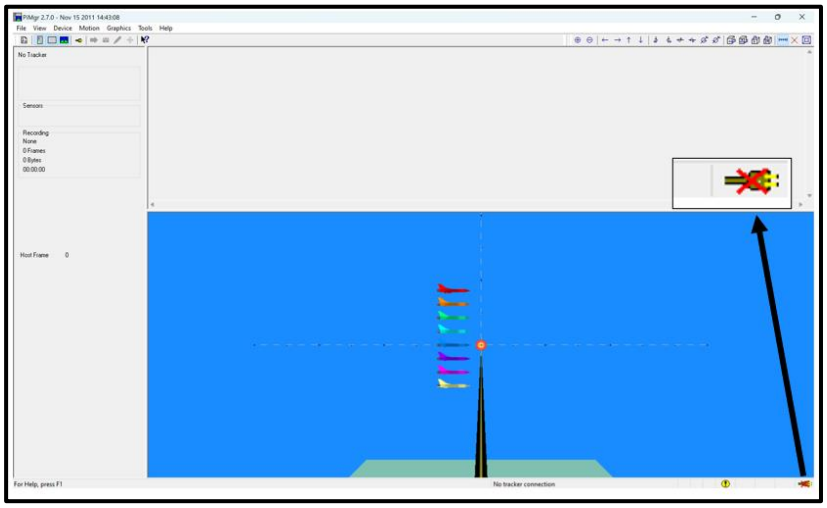
Obrázek 54. Popis panelu pro spojení dvou částí 3D modelů

1. Posunuti přidaného modelu na ose X o „+“ nebo „–“ dané délky
2. Posunutí přidaného modelu na ose Y o „+“ nebo „–“ dané délky
3. Posunutí přidaného modelu na ose Z o „+“ nebo „–“ dané délky
4. Rotace přidaného modelu v rámci osy X o „+“ nebo „–“ danou velikost rotace
5. Rotace přidaného modelu v rámci osy Y o „+“ nebo „–“ danou velikost rotace
6. Rotace přidaného modelu v rámci osy Z o „+“ nebo „–“ danou velikost rotace
7. Změna míry posunu
8. Změna velikosti rotace
9. Uložení přidaného modelu

Software PiMgr

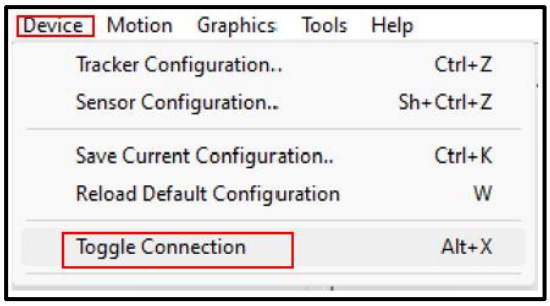
Obrázek 55:Ikona PiMgr

Slouží jako doprovodný software pro správné přepínání hemisfér při použití zařízení Fastrak. Aby bylo možné úspěšně navázat připojení, musí být zařízení Fastrak zapnuté a připojené k počítači přes USB nebo RS-232 rozhraní. V případě této práce bylo připojení realizováno pomocí RS-232, což poskytuje stabilní a spolehlivé spojení pro přenos dat.



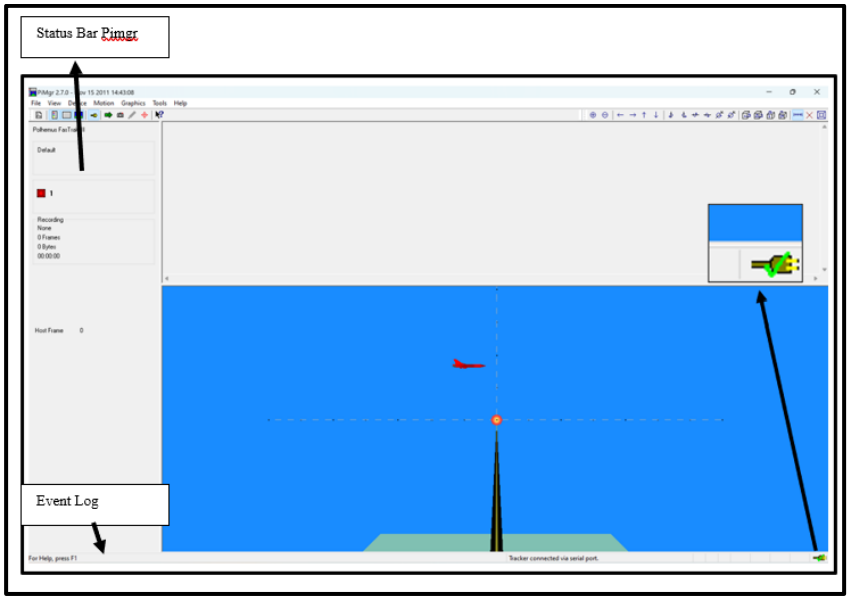
Obrázek 56. Špatně synchronizovaný přístroj a software

Pokud se připojení nezdaří (obr. 55), je nezbytné provést kontrolu všech součástí, zda jsou správně zapojené a funkční. V případě potřeby je možné připojení nastavit ručně. Klikne se na ikonu „Device“ na hlavní ploše softwaru, zvolí se možnost „Toggle Connection“ (obr. 56). Software se během následujících 20 sekund pokusí znovu vyhledat a připojit zařízení. Tento krok může být opakován a pomáhá zajistit, že všechny komponenty systému spolu správně komunikují.



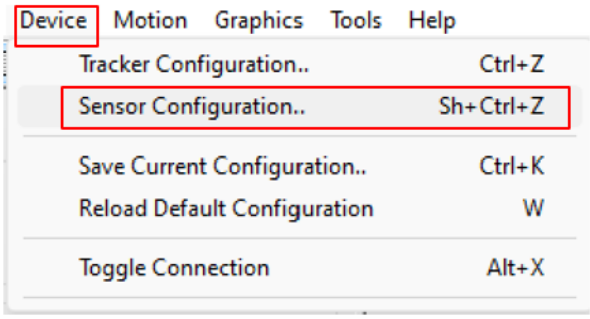
Obrázek 57. Znovu synchronizovaní s přístrojem

Výsledek jakéhokoliv automatického nebo ručního připojení zobrazí ve Status Baru aplikace PiMgr. Pokud je tracker detekován a spojení proběhne úspěšně, Status Bar to potvrdí. Naopak, pokud tracker není nalezen nebo dojde k chybě během připojování, zobrazí se varování. Chybová hlášení se automaticky ukládají do Event Logu, kde si je možno později prohlédnout a podrobněji analyzovat. (obr. 57).



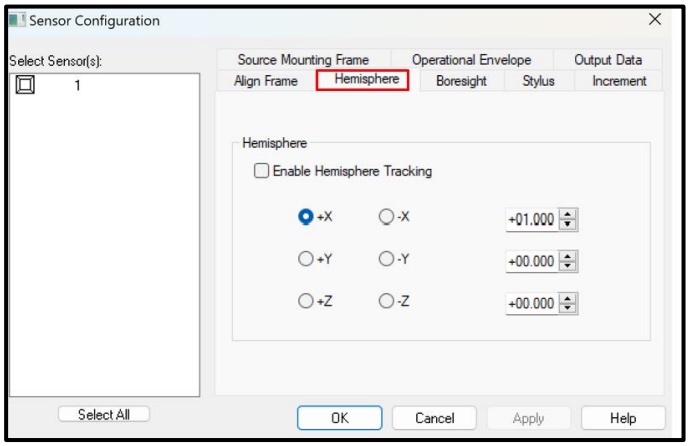
Obrázek 58. Správně synchronizovaný přístroj a program

Díky symetrii magnetických polí vytvářených zdrojem existují pro každou sadu dat ze senzorů zpracovávaných systémem Fastrak dvě možná matematická řešení. V důsledku toho je v každém okamžiku aktivní pouze polovina prostorové sféry kolem zdroje. Tato polovina sféry, nazývaná aktuální hemisféra, je určena na základě velikosti úhlů mezi osami x, y, z senzoru a osami X, Y, Z referenčního rámce. Změna hemisféry se provádí kliknutím na „Device“ v horním panelu a následně na „Sensor Configuration“ (obr. 58).



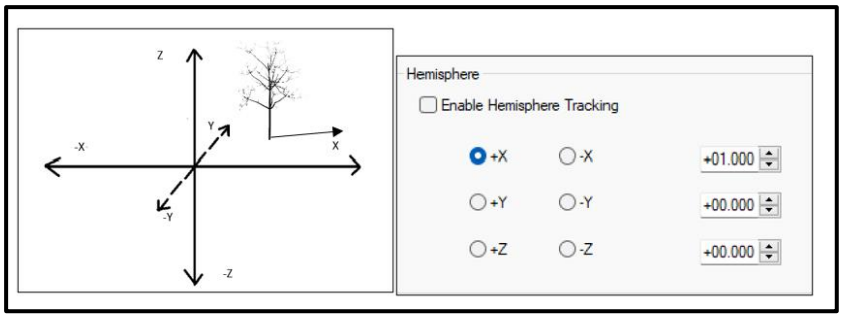
Obrázek 59. Změna hemisféry

Jako první se musí kliknout na ikonu „Hemisphere“. Výchozí hemisféra je nastavena jako kladná polokoule X. Polokouli lze vybrat kliknutím na jedno ze 6 nastavení diskrétních polokoulí: +X,+Y,+Z,-X,-Y,-Z (obr.59).

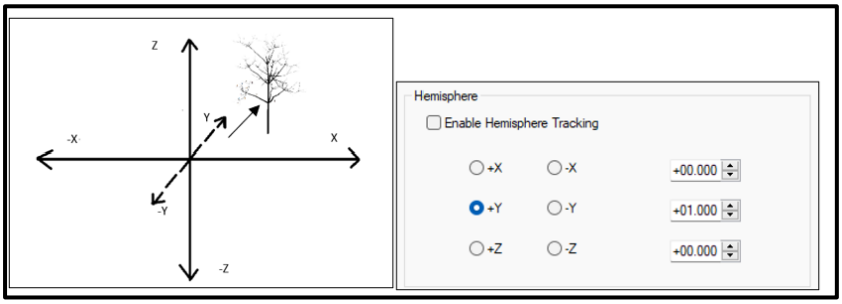


Obrázek 60. Zobrazení hemisféry

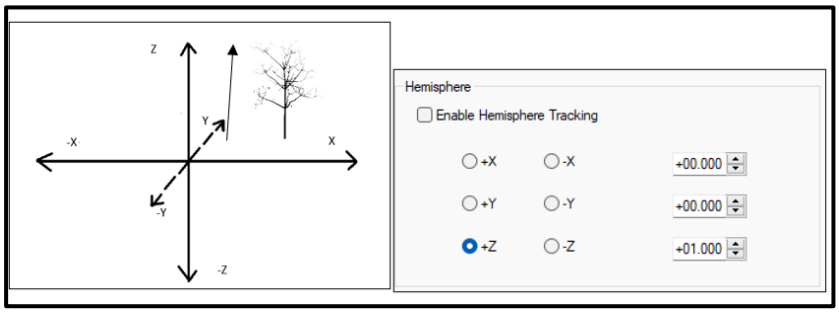
Aby bylo lépe pochopeno, jak dochází k přepínání hemisfér vůči objektu, bude ukázáno, jak vypadá umístění měřeného subjektu při přepínání mezi hemisférami. Na obrázcích (obr. 60–65) bude znázorněno, jak se měněná pozice a orientace měřeného subjektu mění při přechodu mezi jednotlivými hemisférami. Tento vizuální přehled umožňuje lepší pochopení vlivu změny hemisfér na pozici a orientaci subjektu v prostoru, což je klíčové pro správné měření a analýzu. Porozumění této dynamice je nezbytné pro přesné sledování a vyhodnocování dat v aplikacích využívajících více hemisférických referenčních systémů.



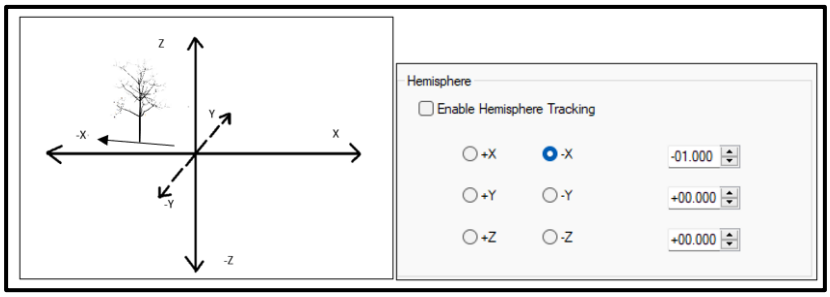
Obrázek 61. Hemisféra X=1, Y=0, Z=0



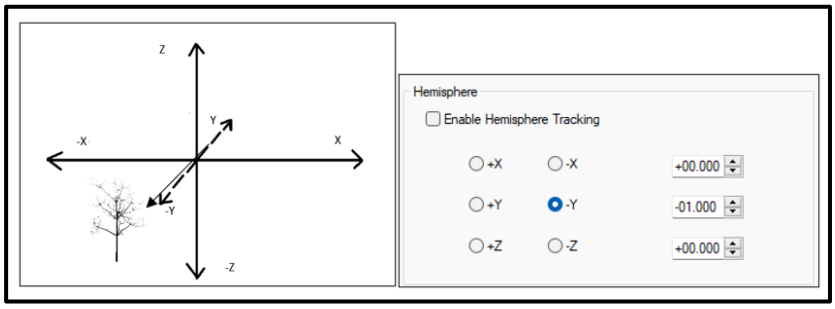
Obrázek 62. Hemisféra X=0, Y=1, Z=0



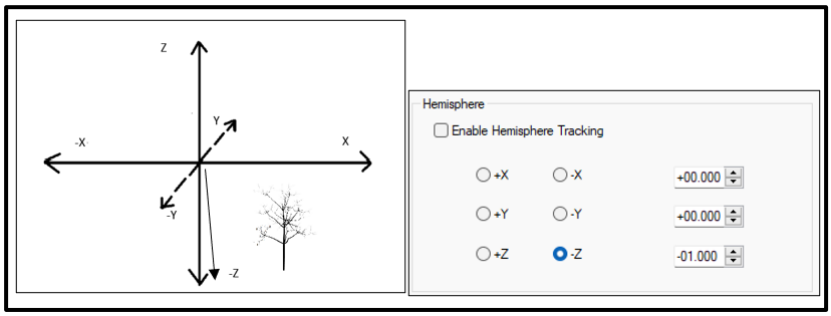
Obrázek 63. Hemisféra X=0, Y=0, Z=1



Obrázek 64, Hemisféra X=-1, Y=0, Z=0



Obrázek 65. Hemisféra X=0, Y=-1, Z=0

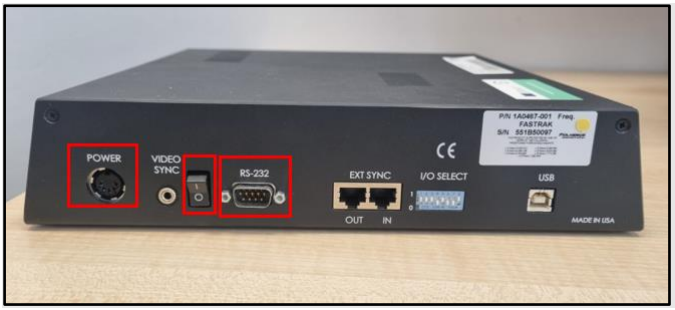


Obrázek 66. Hemisféra X=0, Y=0, Z=-1

9.1.3 Zapojení Přístroje

Vzhledem k tomu, že přístroj je složen z několika částí, je nezbytné podrobně popsat, jak se zapojuje každá komponenta. Jednotka Fastrak SEU je vybavena dvěma připojovacími stranami – přední a zadní. Na obrázcích (obr. 66 a obr. 67) jsou znázorněny klíčové části, které jsou zásadní pro měření dat. Na přední straně jsou vyznačeny důležité komponenty, jako jsou trasmitter a receivers – one spolu s kontrolkou. Na zadní straně jsou zobrazeny další nezbytné prvky, mezi které patří power, zapínač a RS-232. Tyto komponenty jsou zásadní pro správné nastavení a fungování přístroje. Při připojování je třeba věnovat pozornost každému detailu, aby bylo zajištěno správné propojení a funkčnost zařízení. Porozumění umístění a funkci jednotlivých komponentů je zásadní pro efektivní využití jednotky Fastrak SEU a pro získávání přesných měření dat.

Obrázek 67. Přední strana



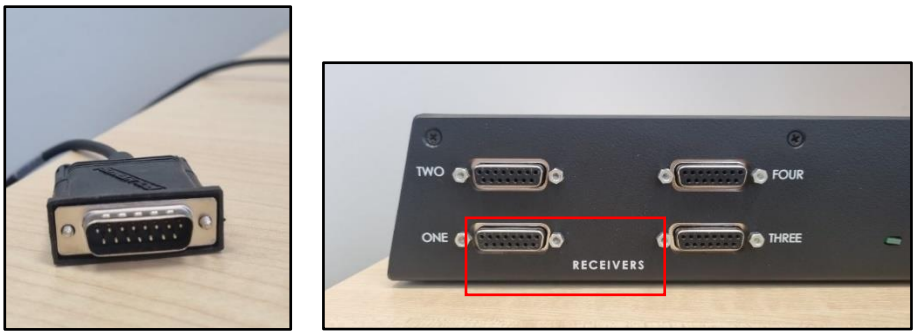
Obrázek 68. Zadní strana

Nyní budou postupně připojeny všechny části do jednotky Fastrak SEU. Nejprve bude připojen generátor elektromagnetického pole (viz obr. 68). Pro správné připojení je vhodné použít tvarovou specifikaci koncovky jako pomůcku. Tato část bude vložena do příslušného portu na jednotce Fastrak SEU, označeného jako transmitter (viz obr. 69). Při připojování je důležité sledovat přesné umístění a orientaci koncovky, aby bylo zajištěno správné propojení. Jakmile je generátor elektromagnetického pole připojen, bude celkové zapojení zkontrolováno. Celkový pohled na zapojení, který ilustruje všechny připojené komponenty a jejich vzájemné propojení, je znázorněn na obrázku 70. Tento obrázek poskytuje přehled o konečném uspořádání a zajišťuje, že všechny části jsou správně zapojeny a připraveny k použití. Důkladné dodržení tohoto postupu je nezbytné pro správnou funkčnost zařízení a zajištění přesných měření.

Obrázek 69: Koncovka generátoru elektromagnetického pole a jednotka na Fastrak SEU

Obrázek 70. Zapojení z blízka a z dálky

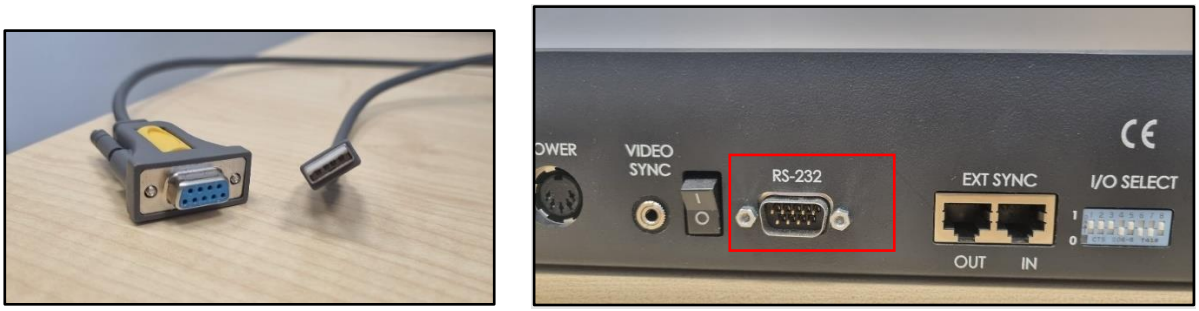
Další částí, kterou je nutné zapojit, je Stylus neboli přijímač. Jako vodítko pro správné usazení do portu slouží tvar koncovky Stylusu.. Tvar koncovky, který je zobrazen na obrázcích 71 až 73, pomáhá zajistit správné umístění a orientaci při připojování. Stylus je zasunut do příslušného portu na jednotce Fastrak SEU. Je důležité pečlivě připojit konektor tak, aby byl dosažen optimální kontakt a funkčnost. Při připojování se kontroluje, zda je konektor zcela zasunut a zajištěn v odpovídajícím portu, aby se předešlo problémům s přenosem dat. Po připojení Stylusu se provádí kontrola celkového zapojen z důvodu ověření správného připojení všech částí. Tento krok je klíčový pro zajištění, že systém funguje správně, a že budou získána přesná data. Pečlivé dodržování těchto pokynů zajišťuje, že celý systém je připraven k efektivnímu a přesnému měření.



Obrázek 71. Koncovka Stylusu a jednotka přípojky na Fastrak SEU

Obrázek 72. Zapojení z blízka a z dálky

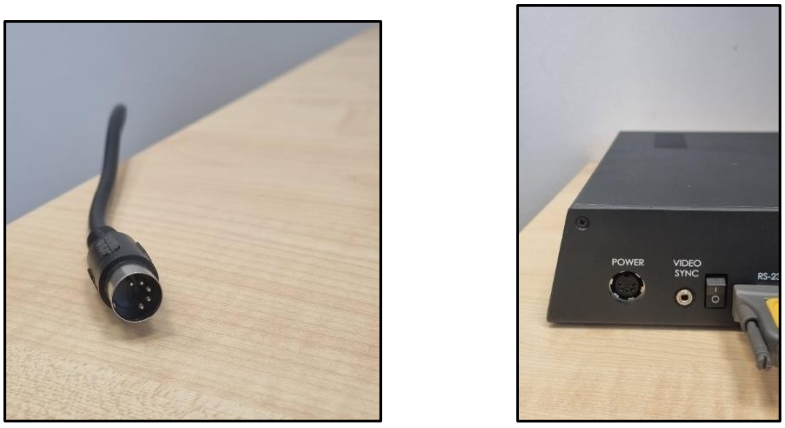
Předposlední díl, který je potřeba zapojit, je propojovací kabel mezi Fastrakem a notebookem s programem Fastrak. Tento kabel musí mít na jednom konci koncovku RS-232 a na druhém konci konektor USB. Při připojování je důležité dbát na správné umístění koncovky RS-232, která je určena pro připojení k jednotce Fastrak SEU. Tato přípojka na Fastrak SEU je označena jako RS-232, což je zobrazeno na obrázcích 74 až 76. Při připojování je nutno zajistit správné zasunutí konektoru do odpovídajícího portu na jednotce. Po připojení kabelu se kontroluje, zda je konektor RS-232 pevně a bezpečně připojen k Fastraku. Na druhém konci kabelu se připojuje USB konektor k notebooku. Je důležité ověřit, že všechny spoje jsou pevné, a že kabel je správně zapojen, aby se předešlo problémům s přenosem dat mezi Fastrakem a notebookem. Pečlivé dodržování těchto kroků zajišťuje správné fungování systému a plynulý přenos dat.



Obrázek 73. Detail konců propojovacího kabele a jednotka přípojky na Fastrak SEU

Obrázek 74. Zapojení z blízka a z dálky

Poslední část, kterou je nutno zapojit, je napájecí kabel. Tento kabel se připojuje k jednotce prostřednictvím pětipinového vstupního napájecího konektoru typu „DIN“. Konektor typu „DIN“ je označen jako napájecí konektor a jeho správné umístění je zobrazeno na obrázcích 77 až 79. Při připojování napájecího kabelu se nejprve zajišťuje, že konektor typu „DIN“ je správně zasunut do odpovídajícího portu na jednotce. Pětipinový konektor je navržen tak, aby se připojil pouze jedním způsobem, což usnadňuje správné připojení. Po zasunutí konektoru se kontroluje, zda je pevně a bezpečně připojen, aby nedošlo k problémům s dodávkou elektrického napájení. Jakmile je napájecí kabel připojen, je důležité ověřit, že všechny spoje jsou v pořádku, a že napájení je správně dodáváno do zařízení. Správné připojení napájecího kabelu je klíčové pro zajištění spolehlivého fungování jednotky a předcházení potenciálním problémům s napájením. Pečlivé dodržování těchto kroků zajišťuje správný chod celého systému.



Obrázek 75. Koncovka napájecího kabele a jednotka přípojky na Fastrak SEU

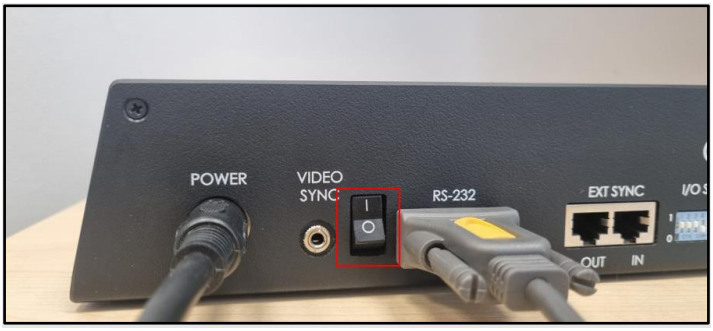
Obrázek 76. Zapojení z blízka a z dálky

Jakmile je kabel připojen do elektrické zásuvky, musí být nejdříve zapnuta jednotka Fastrak SEU. Po připojení kabelu je důležité přístroj správně aktivovat, aby mohl začít fungovat. Na obrázcích 80 a 81 je ilustrováno, jak zařízení vypadá v různých stavech.

Na obrázku 80 je zobrazen stav přístroje, když je vypnutý. V této poloze se nachází kontrolka a indikátor, což signalizuje, že jednotka není aktivní. Zkontroluje se, zda nejsou přítomné žádné viditelné problémy s připojením, a zda jsou všechny části správně připojené.

Na obrázku 81 je znázorněn stav přístroje, když je zapnutý. Jakmile je Fastrak SEU zapnutý, začne být připraven k použití a je možno přistoupit k dalším krokům měření. Tento krok je klíčový pro správnou funkci přístroje a pro zajištění jeho efektivního používání.

Obrázek 77. Poloha při vypnutí



Obrázek 78. Poloha při zapnutí

Pro ověření, zda je Fastrak správně připojen k elektrické síti, je používána kontrolka. Kontrolka se automaticky rozsvítí, pokud je přístroj správně zapojen a napájen. Tento indikátor poskytuje vizuální potvrzení o správné funkci zařízení.

Na obrázku 82 je zachycena kontrolka v zapnutém stavu. Když je Fastrak správně připojen, kontrolka se rozsvítí, což naznačuje, že přístroj je správně napájen a připraven k použití. Při této kontrole se ujistí, že všechny připojení jsou pevná a že kabely jsou v pořádku.

Na obrázku 83 je znázorněna situace, kdy kontrolka není rozsvícena. Tento stav značí problém s připojením nebo napájením. Pokud kontrolka nesvítí, je třeba zkontrolovat zdroj napájení a zjistit, kde může být problém. Kontrolka tedy slouží jako důležitý nástroj pro zajištění správného fungování přístroje a prevenci možných problémů s napájením.

Obrázek 79. Nezapojený Fastrak v elektrické síti – kontrolka nesvítí

Obrázek 80. Zapojený Fastrak v elektrické síti – kontrolka svítí zeleně

Při měření strukturálních dat je nezbytné zajistit správné postavení a rozložení stroje, aby bylo možné získat co nejpřesnější 3D modely. Je důležité, aby byl stroj umístěn a nastaven tak, aby přesně odpovídal požadované pozici pro měření. Tento proces zahrnuje správné nastavení přístroje a jeho přesné umístění vzhledem k měřenému objektu.

Názornou ukázkou je zvolen strom s jednodušší architekturou, jehož měření je ilustrováno na obrázku 84. Při správném postavení stroje se zajistí, že výsledný 3D model bude přesně odpovídat skutečnému tvaru a struktuře měřeného objektu. Jakékoliv odchylky v postavení stroje mohou vést k nepřesnostem v 3D modelu, což může ovlivnit kvalitu a použitelnost výsledných dat. Proto je kladen velký důraz na pečlivé nastavení a kontrolu správného umístění stroje před zahájením měření.

Obrázek 81. Živý strom

Samozřejmě, jak je uvedeno v návodu, je nejprve zapojen Fastrak Pohlemus. Následně je třeba určit správné umístění generátoru magnetického pole (obr. 84). Pro dřeviny vysoké

méně než 2 metry je doporučeno použít generátor ve tvaru kostky. Tento typ generátoru zajistí potřebné magnetické pole v dostatečném dosahu a rovnoměrně pokryje měřený objekt.

Při umisťování generátoru je důležité brát v úvahu jeho velikost a tvar, aby se dosáhlo rovnoměrného pokrytí. Generátor ve tvaru kostky je ideální volbou pro menší dřeviny, protože umožňuje přesné měření a modelování. Po správném umístění generátoru a zapojení Fastrak Pohlemus může být zahájeno měření.

Obrázek 82. Špatné umístění

Takto umístěná kostka není schopna zajistit přesné měření daného stromu. Při podrobnějším zkoumání je zjištěno, že souřadnice X, Y a Z jsou nesprávně orientovány vůči stromu. Tento problém vzniká, když kostka není nastavena tak, aby odpovídala orientaci stromu. Nesprávná orientace kostky vede k odchylkám ve směru souřadnicových os, což brání správnému zachycení polohy stromu. Pro zajištění přesného měření je nezbytné, aby byly souřadnice X, Y a Z správně vyrovnány s orientací stromu. Když je kostka správně nastavena a její souřadnice odpovídají požadované konfiguraci, je možné dosáhnout přesného měření a kvalitních výsledků. Bez tohoto správného nastavení není možné dosáhnout požadované úrovně přesnosti v zachycení polohy a vlastností stromu. Pokud by bylo třeba měřit s nesprávně umístěnou kostkou, bylo by nutné upravit hemisféru, jak bylo uvedeno výše.

Obrázek 83. Špatné umístění 2

V tomto případě jsou identifikovány dvě chyby při umístění. První chybou je, že kostka je umístěna příliš daleko od daného stromu. Takové umístění vyžaduje použití generátoru ve tvaru koule pro dosažení přesného měření. Generátor ve tvaru koule poskytuje širší dosah magnetického pole, což je nezbytné pro měření na větší vzdálenosti. Druhou chybou je umístění kovového stolu s Fastrakem Polhemusem v blízkosti magnetického pole. Kov v blízkosti magnetického pole způsobuje nepřesnosti v měření, protože kov ovlivňuje magnetické pole a tím mění výsledky měření. Přítomnost kovu může zkreslit magnetické pole a vést k chybným datům, což negativně ovlivňuje přesnost měření. Proto je důležité zajistit, aby bylo měření prováděno bez vlivu kovových objektů v blízkosti magnetického pole a aby bylo optimalizováno umístění přístrojů. Oprava těchto chyb je klíčová pro dosažení přesných a spolehlivých výsledků.

Obrázek 84. Správné umístění

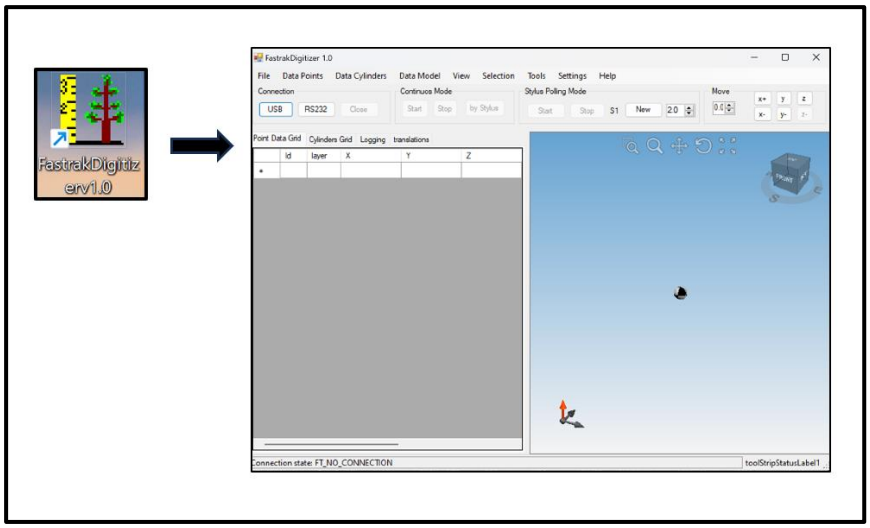
V tomto případě je kostka umístěna správně. Jak je zobrazeno na obrázku a v jeho detailu, je kostka orientována tak, že strom je zahrnut v magnetickém poli os X, Y a Z. Vzdálenost mezi kostkou a koncem stromu je nastavena na méně než 2 metry, jak je zřejmé ze žlutého měřicího pásma, kde je tato vzdálenost označena. Kostka tedy splňuje požadavky pro správné měření, protože její umístění a orientace zajišťují, že strom je plně zahrnut v požadovaném měřicím poli. Toto nastavení kostky je optimální pro dosažení přesných výsledků měření. Současně je Fastrak Polhemus správně zapojen a generátor magnetického pole je umístěn v souladu s požadavky měření. Tímto způsobem je připraveno vše potřebné pro zahájení samotného měření stromu. Jakmile je vše správně nastaveno a zkontrolováno, lze přistoupit k měření s jistotou, že výsledky budou přesné a spolehlivé.

Nyní je přistoupeno k zapnutí softwaru pro měření. Nejprve je zapnut přístroj Fastrak Polhemus, následně se spustí software Fastrak digitizer. Tento krok je zásadní pro propojení přístroje a softwaru. Pro kontrolu správného zapojení je nutné se ujistit, že kontrolka na přístroji

svítí zeleně. Jak je znázorněno na obrázku 88, zelené světlo potvrzuje, že elektrický proud je v pořádku a zařízení je připraveno k použití. Pokud by kontrolka nesvítila, bylo by třeba zkontrolovat připojení k elektrické síti. Po ověření funkčnosti přístroje je software Fastrak digitizer připraven k zahájení práce. Tento software slouží k ovládání celého procesu měření, včetně nastavování parametrů a zaznamenávání výsledků. Po spuštění softwaru probíhá nastavení systému, které zajišťuje, zda jsou všechna zařízení správně synchronizována a připravena ke sběru dat. Jakmile je systém plně aktivován a kontrolka potvrzuje bezproblémový provoz, lze přistoupit k samotnému měření a sběru dat, která jsou následně zpracována pro další analýzu a vytvoření přesných 3D modelů.

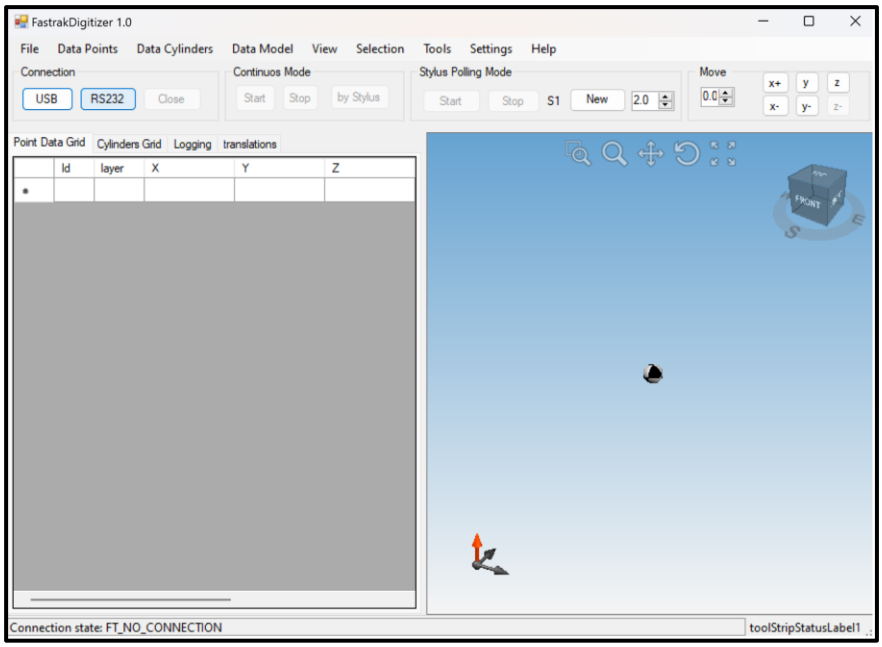
Obrázek 85. Kontrolka zapnutí

Na počítači je nejprve vyhledána ikonka programu Fastrak Digitizer, která se nachází na ploše nebo v nabídce programů. Program je následně otevřen dvojklikem myši, čímž se spustí uživatelské rozhraní aplikace. Tento postup je zobrazen na obrázku 89, kde je ikona jasně viditelná a označena pro snadnou orientaci. Po dvojkliku se zahajuje proces načítání softwaru, během kterého dochází k automatickému propojení mezi softwarem a přístrojem Fastrak Polhemus. V průběhu tohoto procesu se ověřuje, zda je zařízení správně zapojeno a připraveno ke sběru dat. Na obrazovce se zobrazí hlavní okno programu, kde jsou dostupné jednotlivé funkce a možnosti nastavení měření. Pokud by program nefungoval správně nebo se nespustil, je doporučeno zkontrolovat připojení zařízení a ujistit se, že je vše zapojeno v souladu s postupy uvedenými v manuálu. Po úspěšném otevření Fastrak Digitizeru lze přistoupit k dalšímu kroku, kterým je nastavení parametrů pro měření.



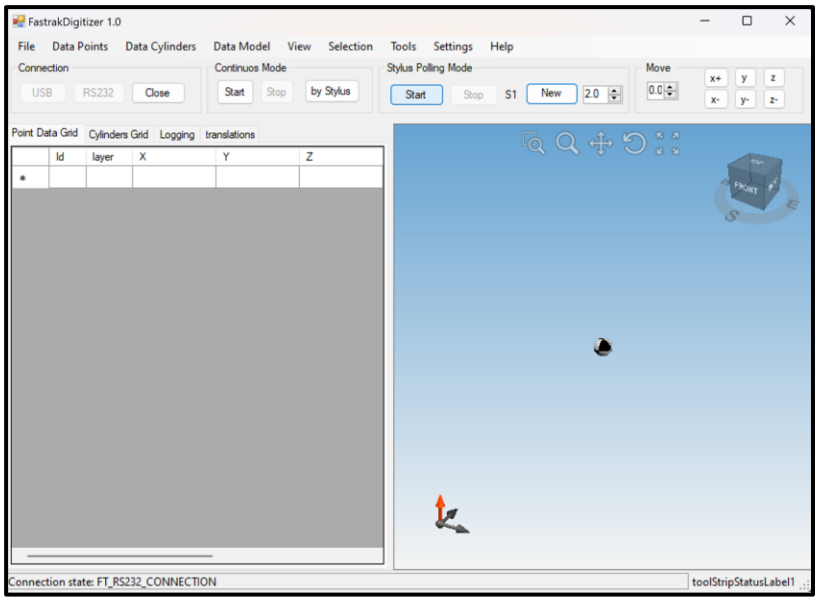
Obrázek 86. Ikonka a náhled po otevření

Po otevření programu Fastrak Digitizer je notebook propojen s přístrojem pomocí kliknutí na tlačítko označené jako RS232, které se nachází v uživatelském rozhraní softwaru (viz obr. 90). Toto tlačítko slouží k navázání spojení mezi počítačem a přístrojem Fastrak Polhemus prostřednictvím komunikačního portu RS232. Jakmile je na tlačítko kliknuto, program začne vyhledávat připojené zařízení a ověřovat jeho dostupnost. Po úspěšném kliknutí na RS232 se v programu zobrazí potvrzení, že byl přístroj správně detekován a je připraven k dalšímu použití. Pokud by přístroj nebyl rozpoznán, je doporučeno zkontrolovat kabelové propojení mezi notebookem a Fastrak Polhemusem, přičemž pozornost musí být věnována správnému zapojení komunikačního kabelu RS232. Jakmile je potvrzeno, že připojení bylo úspěšně provedeno, lze přistoupit k dalším krokům měřicího procesu.



Obrázek 87. Tlačítko RS232

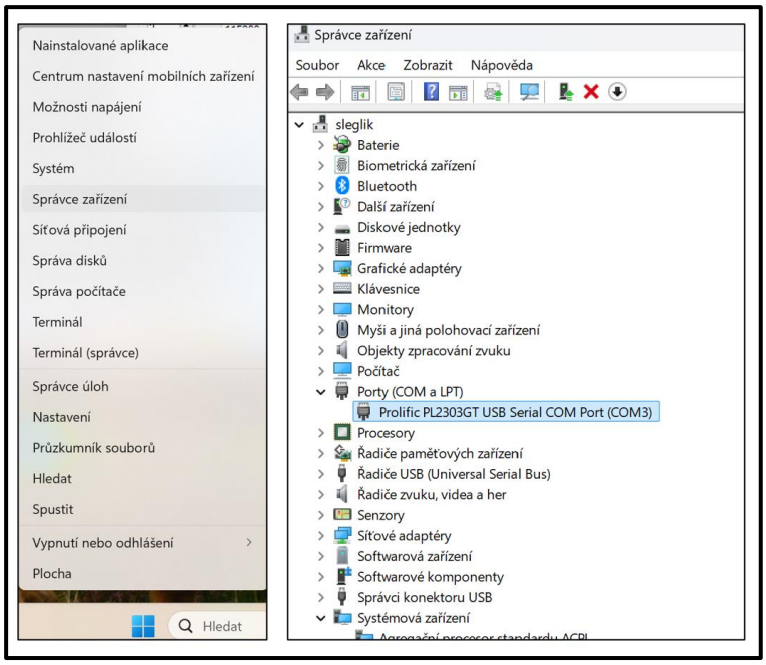
Po otevření programu Fastrak Digitizer a navázání spojení s přístrojem je dalším krokem volba typu dat, která budou měřena. V uživatelském rozhraní programu se nachází dvě hlavní možnosti: kontinuální data nebo segmentová data. V tomto případě jsou vybírána segmentová data, což znamená, že se bude měřit pomocí jednotlivých segmentů, které jsou definovány začátkem a koncem měřeného úseku. Pro zahájení měření segmentových dat je v softwaru nutné kliknout na tlačítko „Start“ nacházející se v sekci „Stylus Polling Mode“ (viz obr. 91). Po stisknutí tohoto tlačítka software aktivuje režim měření, který umožňuje zaznamenávání bodů pomocí stylusu, přičemž každý segment je tvořen dvěma body – počátečním a koncovým. Jakmile je segmentový režim aktivován, je přístroj připraven k manuálnímu sběru dat. Stylus se používá k označení bodů, které definují jednotlivé segmenty, a ty jsou automaticky zaznamenávány do softwaru. Tento postup je ideální pro přesné měření objektů, které je potřeba rozdělit na menší části, například linie nebo hrany složitých stromových struktur. U dřevin, které mají složitou architekturu, je klíčové zachytit každý detail větví a kmene, aby výsledný 3D model co nejlépe odpovídal skutečnosti. Proto je rozdělení na segmenty nezbytné – umožňuje to přesně definovat různé části stromu a zajistit věrné zobrazení jeho tvaru a rozložení. Po stisknutí tlačítka „Start“ systém čeká na interakci uživatele se stylusem a data začnou být zaznamenávána v reálném čase.



Obrázek 88. Stisknutí tlačítka start

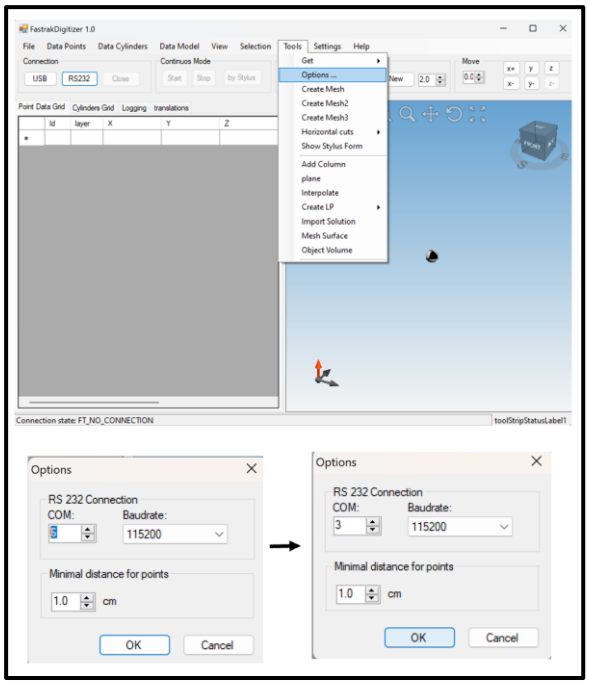
V případě, že program nedokáže propojit přístroj, je patrné, že ikona „Start“ nebude aktivní, což signalizuje problém s připojením. Pokud k tomu dojde, je nezbytné zkontrolovat správné propojení zařízení a následně upravit připojení. Prvním krokem je odpojení stávajícího připojení mezi notebookem a přístrojem Fastrak. Po odpojení je třeba zkontrolovat, zda je kabel RS232 pevně zasunut do příslušného portu na přístroji i notebooku. Následně se provádí opětovné připojení kabelu, aby bylo zajištěno, že všechna propojení jsou pevná a správně zasunutá. Je nutné se ujistit, že propojovací kabel není poškozen nebo uvolněn, protože by to mohlo způsobit další problémy s připojením. Jakmile je kabel znovu připojen, program bude znovu spuštěn. Pokud ikona „Start“ stále není aktivní, je nutné vyzkoušet jiný port na notebooku nebo použít náhradní kabel RS232. Změna portu na notebooku se uskuteční následovným způsobem.

Pravým tlačítkem myši se klikne na ikonu „Start“. Otevře se správce zařízení, ve kterém se následně zobrazí seznam portů – COM, LPT. V tomto konkrétním případě je identifikován port připojený k COM3, jak je znázorněno na obrázku 92. Po otevření správce zařízení jsou porty zobrazeny v seznamu, kde jsou zřetelně uvedeny jejich názvy a čísla. V rámci správce zařízení se zkontroluje číslo a stav příslušného portu, který je připojený.



Obrázek 89. Náhle nalezení COM portu v PC

Po zkontrolování a případné úpravě portu v počítači se znovu otevře Fastrak Digitizer. V programu se nastaví stejný port, jaký je nastaven v počítači, aby bylo zajištěno správné propojení mezi zařízením a softwarem. Tento proces se zahájí kliknutím na tlačítko „Tools“, které otevře sekci „Options…“. V této sekci se vyhledá možnost pro nastavení portu a přenastaví se na stejný port, jaký je použit v počítači. V tomto konkrétním případě je port nastaven na číslo 3, jak je zobrazeno na obrázku 93. Jakmile je port v programu Fastrak Digitizer přenastaven, jsou obě zařízení synchronizována. Veškerá připojení a komunikace mezi Fastrak Digitizerem a počítačem probíhá bez problémů.



Obrázek 90. Nastavení COM portu v softwaru

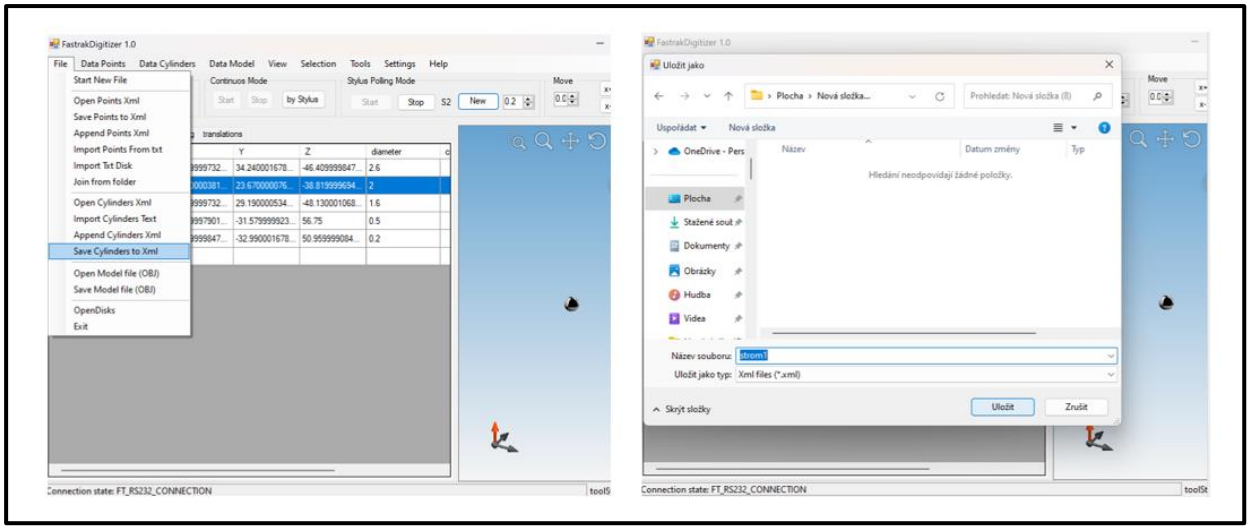
Každý následný krok měření je složen ze tří podkroků. Prvním podkrokem je měření tloušťky daného bodu. Tento proces zahrnuje umístění měřicího zařízení na specifické místo a zaznamenání jeho tloušťky. Jakmile je tloušťka změřena, přistupuje se k druhému podkroku, kde se změněná tloušťka zadává do programu. Program automaticky upravuje nastavení na základě nových dat. Třetím podkrokem je stisknutí tlačítka na stylusu, které aktivuje proces měření a zaznamenává výsledky. Je nezbytné zajistit, aby měřítko bylo přiloženo ke všem třem stranám měřeného bodu. Tento krok je klíčový pro zajištění přesnosti měření a správného zachycení tvaru objektu. Na obrázku 94 je znázorněno, jak by měřítko mělo být správně přiloženo, aby pokrylo všechny potřebné strany. Dodržením postupu se minimalizují chyby a zajistí se co nejpřesnější měření.

Obrázek 91. Tři strany

Proces měření začíná vždy u paty stromu. Nejprve je změřena tloušťka v tomto bodě a následně je naměřená hodnota zapsána do programu. Po kliknutí na tlačítko „New“ se program připraví na zaznamenání nového měření a stisknutím tlačítka na stylusu je měření tohoto bodu dokončeno. Následně se přechází k druhému bodu, který v tomto případě představuje místo, kde se strom rozvětvuje. Změřená tloušťka je zapsána do programu. Místo kliknutí na „New“ se nyní stiskne klávesa „Enter“, Kliknutí na „New“ by vytvořilo nový počáteční bod, což by bylo nevhodné pro pokračování v měření. Po stisknutí „Enter“ je znovu zaměřeno na další místo měření a opět se stiskne tlačítko na stylusu. Stylus musí být vždy přikládán kolmo na kmen, protože tímto způsobem zaznamenává i úhly, což je nezbytné pro přesné měření. Tento postup se opakuje až do posledního vrcholného bodu dřeviny. Při každém měření je důležité, aby stylus byl správně orientován a měření prováděno podle standartních postupů, což zajišťuje přesné zachycení tvaru stromu. Tento důkladný a pečlivý proces měření je klíčový pro vytvoření přesných 3D modelů dřevin (obr. 95).

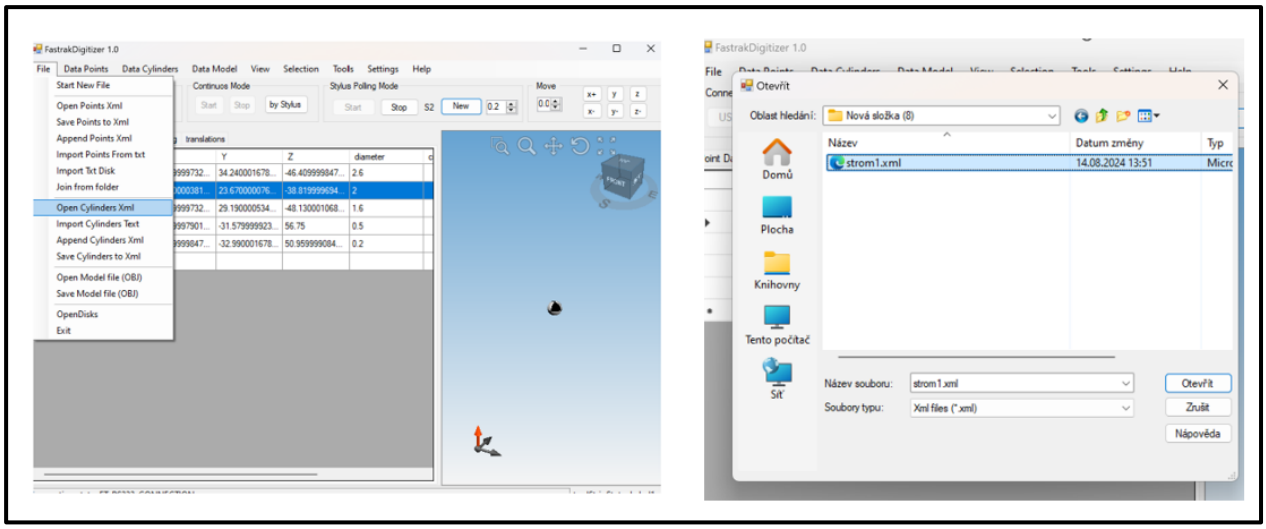
Obrázek 92. Postup měření kmene dřeviny

Vzhledem k tomu, že první body zaznamenané během měření se před uložením a znovuotevřením dokumentu nezobrazují jako 3D model, ale jsou uloženy pouze jako jednotlivé body a jejich souřadnice, je nezbytné vytvořený 3D model kmene uložit na disk nebo do jiného úložiště, čímž se zachovají všechny dosud zaznamenané body a jejich souřadnice. Vizualizace v kontextu 3D modelu je možná až po uložení, stejně jako provádění úprav a analýz. Tento krok zahrnuje ověření, že všechny zaznamenané body jsou správně zobrazeny a že 3D model reflektuje všechny měřené hodnoty. Je důležité zajištění komplexního modelu a správného umístění všech bodů v rámci 3D prostoru. Tímto způsobem je možné pokračovat v detailní analýze a úpravách, což je klíčové pro získání přesného a úplného 3D modelu kmene (Obr. 96).



Obrázek 93. Uložení souboru

Nejprve se klikne na nabídku „File“ v horní části obrazovky. Po kliknutí se otevře rozbalovací nabídka, kde se vyhledá a zvolí možnost „Save Cylinders to XML“. Tento krok otevře dialogové okno pro uložení souboru, kde je potřeba určit cílovou složku pro ukládání. V okně pro výběr složky se naviguje k místu, kam se má soubor uložit. Po vybrání správné složky se klikne na tlačítko „Uložit“, čímž se zahájí proces ukládání. Při ukládání souboru do formátu XML je důležité ověřit, že se soubor ukládá na správné místo, aby byl snadno dostupný pro pozdější použití. Jakmile je volba „Uložit“ potvrzena, proces ukládání probíhá a soubor je uložen do vybrané složky. Tento postup zajišťuje, že všechny zaznamenané údaje a měřené hodnoty jsou bezpečně uloženy v XML formátu, který je vhodný pro další zpracování a analýzu. Po dokončení uložení je možné soubor otevřít a pokračovat v práci s ním, přičemž jsou k dispozici všechna potřebná data a informace.



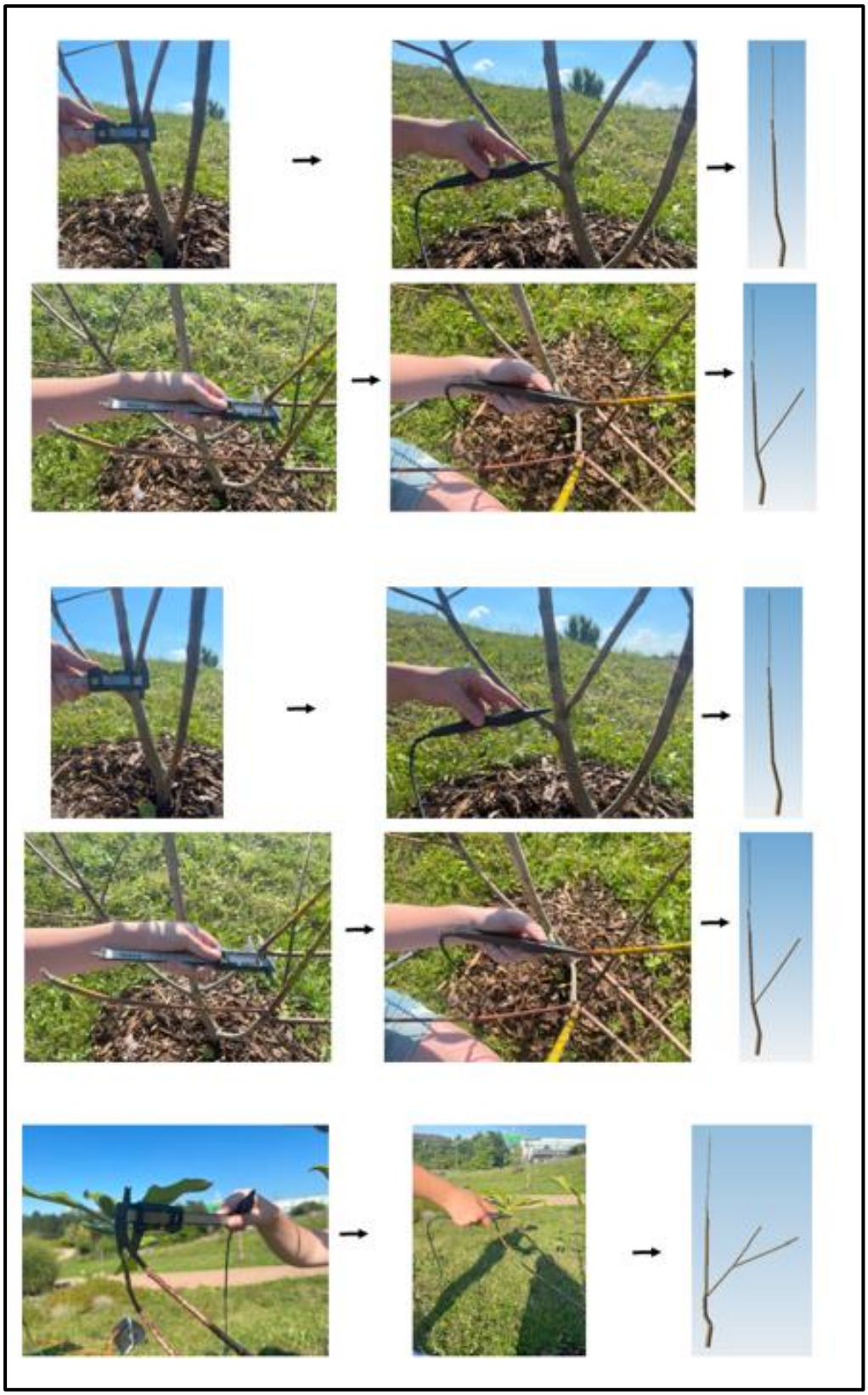
Obrázek 94. Otevření souboru

Opět se klikne na tlačítko „File“ v horní části aplikace. V rozbalovací nabídce se vyhledá a vybere možnost „Open Cylinders XML“. Tím se otevře dialogové okno pro otevření souboru, kde se naviguje k umístění, kam byl soubor dříve uložen. Uložený soubor je vyhledán v seznamu a jakmile je nalezen, klikne se na něj a následně na tlačítko „Otevřít“.

Po kliknutí na „Otevřít“ se zahájí načítání souboru, který obsahuje data v XML formátu. Jakmile je soubor úspěšně načten, aplikace zobrazí 3D model kmene na obrazovce. Tento model je nyní viditelný v pracovní oblasti, což umožňuje jeho detailní prozkoumání a analýzu. Zobrazený 3D model kmene obsahuje všechny dříve zaznamenané body a jejich souřadnice, které byly uloženy v XML souboru. Tímto způsobem se zajistí přesné a úplné zobrazení, což usnadňuje další práci s modelem. V případě potřeby je možné provádět dodatečné úpravy a analýzy přímo na zobrazeném 3D modelu.

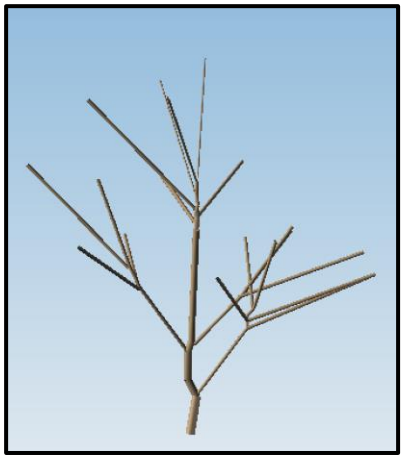
Obrázek 95. Vytvořený 3D model kmene

Nyní se vytváří 3D model větve. Nejprve se vybere větev, která je umístěna výše než nejnižší větev, aby se ilustrovala postupnost a přesnost měření. V aplikaci se následně aktivuje funkce pro modelování větví a zahájí se proces zaznamenávání bodů na vybrané větvi. Tento postup zahrnuje umístění měřícího zařízení na konkrétní body větve, kde se měří její tloušťka a geometrické charakteristiky. Při vytváření modelu se bod po bodu zaznamenávají přesné souřadnice a rozměry větve. Jakmile jsou všechny potřebné body na větvi změřeny, data jsou zpracována a vytvoří se 3D model. Tento model přesně zobrazuje tvar a strukturu vybrané větve. Zobrazení výsledného modelu umožňuje detailní prozkoumání a analýzu struktury větve. Na obrázku 99 je zobrazena větev, která byla vybrána pro tento postup, a která je umístěna výše než nejnižší větev. Vytvořený 3D model poskytuje cenné informace pro další studium a vyhodnocení. Tento postup zajišťuje, že všechny důležité aspekty větve jsou správně zachyceny a vizualizovány v 3D prostoru.



Obrázek 96. Znázornění měření větve

Proces digitalizace stromu pokračuje tímto způsobem, dokud není celý strom kompletně zdigitalizován. Nejprve se identifikují jednotlivé části stromu, které je třeba měřit, a poté se systematicky zaznamenávají všechny klíčové body. Každý bod je měřen a jeho data jsou ukládána do systému, aby bylo možné vytvořit přesný 3D model celého stromu. Jakmile je jeden úsek stromu zdigitalizován, přechází se na další úsek, přičemž se postupuje po celém obvodu a výšce stromu. Měří se nejen tloušťka kmene, ale také případné větve a rozvětvení, aby byl model co nejpřesnější. V průběhu procesu je důležité pravidelně kontrolovat přesnost měření a správnost uložených dat, aby bylo zajištěno, že výsledný model bude odpovídat skutečnému stromu. Jakmile jsou všechna měření dokončena a všechny body jsou zaznamenány, jsou data sloučena a vytvořený 3D model celého stromu je zobrazen. Tento model pak poskytuje kompletní vizualizaci stromu, která je důležitá pro další analýzu a studium. Na obrázku 100 je znázorněn celý strom, jak je zobrazován po dokončení procesu digitalizace.



Obrázek 97. Celý 3D strom

Po dokončení měření a vytvoření základního 3D modelu stromu mohou být další detaily nebo poznámky, které jsou důležité pro budoucí analýzu dat, přidány v pozdější fázi. Tento krok zahrnuje zapsání všech dodatečných informací, které mohou být relevantní pro interpretaci výsledků nebo pro specifické analytické postupy. Další informace, jako jsou poznámky o specifických charakteristikách měřených částí stromu, jsou zaznamenány přímo do databáze. To může zahrnovat podrobnosti o zvláštních rozměrech, neobvyklých vlastnostech nebo jakýchkoli anomáliích, které mohou být důležité pro přesné hodnocení modelu. Z důvodu ztráty možných informací je důležité, aby všechny tyto poznámky byly přidány co nejdříve. Jakmile

jsou všechny potřebné detaily zapsány, mohou být použity pro podrobnější analýzu a hodnocení modelu.

9.1.4 Sběr dat

Vzhledem k tomu, že sběr dat pro nadzemní a podzemní část dřevin probíhá odlišně především kvůli specifickým požadavkům na zpracování podzemní části, která musí být nejprve důkladně očištěna, bude tato kapitola rozdělena do dvou částí. První část se zaměří na sběr dat nadzemní části dřevin, kde bude podrobně popsán postup měření. Druhá část bude věnována sběru dat podzemní části, s důrazem na proces čištění kořenů, který je nezbytný pro správné a spolehlivé vyhodnocení získaných dat.

9.1.5 Nadzemní část

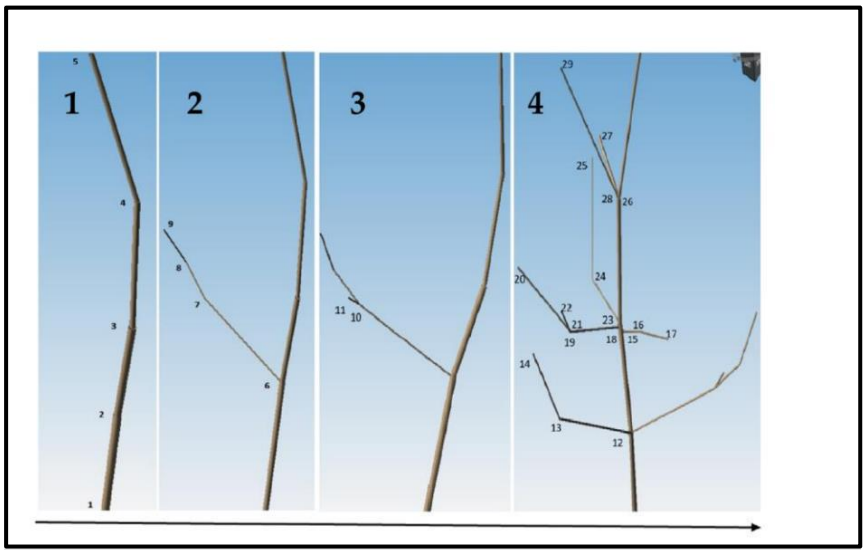
Data budou rozdělena na nadzemní část (korunu) a podzemní část (kořen). Nejprve bude popsán sběr dat obou částí. Dále budou probrány možné chyby při měření a v neposlední řadě bude popsána problematika referenčních bodů. Při měření dřevin je důležité vzít v úvahu jejich výšku. Pokud je dřevina vysoká do 2 metrů, lze použít jako zdroj elektromagnetického pole krychli. Pro dřeviny vysoké mezi 2 a 4 metry je vhodnější použít kouli. U dřevin vyšších než 4 metry, což je případ zkoumaný v této práci, je nutné použít takzvané referenční body, které budou podrobněji popsány v samostatné kapitole. V takovém případě je třeba korunu stromu rozdělit na menší části. K tomu se doporučuje použití metru, aby se předešlo rozdělení na části delší než 4 metry.

Měření vždy začíná u paty kmene, což znamená, že první bod se zaměří na kmen u terénu. Posledním bodem je bod na vrcholu stromu (obr. 101). Body mezi patou kmene a vrcholem se označují tam, kde vyrůstá nová větev, nebo kde dochází k zakřivení či změně kmene. U každého bodu se také měří tloušťka pomocí posuvného měřítka, které se přikládá kolmo k ose kmene. Posuvné měřítko se musí dotýkat kmene ve třech bodech: stálým ramenem, posuvným ramenem a hřbetem s měřící osou.

Po změření kmene je třeba změřit větve koruny. Opět začínáme u báze větve a značíme body tam, kde se větev větví, kde dochází ke změně tloušťky nebo při jiných významných změnách. Každý bod musí mít zaznamenanou tloušťku. Měří se celá větev včetně veškerého

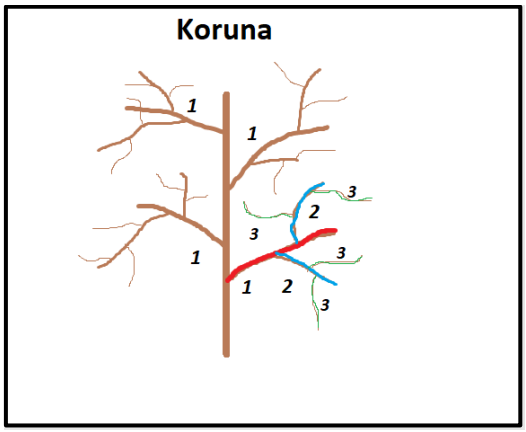
rozvětvení, poté se přechází na další větev. Pro lepší orientaci lze použít představu transpirace vody a pravidlo měření podle hodinových ručiček.

Při měření velmi vysokých dřevin je nezbytné, aby byla měření co nejpřesnější, a to jak při určování polohy jednotlivých bodů, tak při zaznamenávání tloušťky. Každý bod, kde se kmen nebo větev významně mění, by měl být pečlivě zmapován a změřen. Tímto způsobem lze získat přesný 3D model stromu, který umožňuje analyzovat jeho strukturu a růstové vlastnosti.



Obrázek 98. Grafické zobrazení kontinuality procesu 3 D modelování nadzemní části rostliny jedinců borovice lesní

Kromě tloušťky se do programu Fastrak digitizér zaznamenávají i řády. To je z důvodu lepšího rozeznání celého rozložení architektury koruny.



Obrázek 99. Popis měřených částí stromu: 1 - větve prvního řádu; 2 – větve druhého řádu; 3 – větve třetího řádu.

Kmen stromu označujeme jako nulový řád, protože představuje výchozí bod pro všechny další větve. Větev, která vyrůstá přímo z kmene, je označena jako větev prvního řádu. Dále větev vyrůstající z větve prvního řádu je větev druhého řádu. Tento postup pokračuje, takže větev vyrůstající z větve druhého řádu je větev třetího řádu, a tak dále. Tento systematický způsob označování pokračuje, dokud nepopíšeme všechny větve až k těm nejmenším, které jsou nejvyššího řádu. Toto detailní členění nám umožňuje důkladně mapovat strukturu stromu (obr.102). Přesné označování větví podle řádů pomáhá lépe pochopit hierarchii a uspořádání růstových procesů stromu. Každý řád větví poskytuje informace o způsobu, jakým se strom rozvětvuje a jak se jeho jednotlivé části vyvíjejí. Tato struktura také ukazuje, jak se živiny a voda rozvádějí z kmene do jednotlivých větví a listů.

9.1.6 Podzemní část

Měření kořenů je komplexní, avšak nesmírně důležitý proces. Přesné a pečlivé odkrytí kořenových systémů poskytuje cenné informace, které jsou klíčové pro pochopení růstu a zdraví rostlin. Tento proces vyžaduje značné úsilí a opatrnost, avšak získané výsledky mohou výrazně přispět k našim znalostem o rostlinné ekologii a fungování ekosystémů. Studium kořenových systémů nám umožňuje nahlédnout do základních mechanismů, které ovlivňují vitalitu a stabilitu rostlin, a tím i celkový zdravotní stav ekosystémů, ve kterých se nacházejí.

a) Čištění kořenů

Měření kořenů je náročnější úkol, protože vyžaduje jejich odkrytí, což samo o sobě může být složitý proces. Kromě toho není vždy snadné přesně vidět, jak jednotlivé kořeny rostou a jak se rozvětvují. K odkrytí kořenů se obvykle používá kompresor, který pomáhá očistit zeminu pomocí vzduchové hadice. V minulosti se k tomuto účelu používala voda smíchaná se vzduchem, ale tento postup často vedl k lámání drobných kořenů, což bylo nežádoucí. Úspěšnost čištění kořenů závisí také na struktuře půdy. Pokud se jedná o písčitou půdu, lze zeminu očistit pouze pomocí vzduchu, což je šetrnější k jemným kořenům (obr. 100B). Pokud je však půda oglejená nebo jílovitá, je někdy nutné použít i vodu, ale s velkou opatrností. Půdu je třeba udržovat v optimálním stavu – nesmí být příliš tvrdá, ale ani příliš mokrá. (obr.100A). Příliš mokrá půda by mohla při dalším čištění vytvářet hroudy, které by mohly poškodit menší kořeny. Pro očištění jemných kořenů je často nutné použít různé nástroje, jako jsou štětce, malé

lopatky a špachtle (obr.100C). Tyto nástroje umožňují jemné a precizní čištění, aniž by došlo k poškození křehkých kořenových struktur. Proces čištění musí být prováděn velmi opatrně a pečlivě, protože i drobné poškození kořenů může ovlivnit celkové výsledky. Odkrytí a měření kořenů poskytuje cenné informace o jejich struktuře a růstových vzorcích. Kořeny jsou zásadní pro příjem vody a živin a jejich správné fungování je klíčové pro celkové zdraví stromu. Přesné měření a dokumentace kořenového systému mohou pomoci vědcům lépe pochopit, jak různé typy půdy a enviromentální podmínky ovlivňují růst a vývoj kořenů. Kořenové systémy jsou často složitější a rozmanitější než nadzemní části rostlin. Mohou zasahovat do značných hloubek a rozprostírat se na velkých plochách, což ztěžuje jejich úplné zmapování.

Obrázek 100. Ukázka zalévání při čištění kořene, pokud je půda moc tvrdá, čištění se vzduchem drobné nástroje pro čištění.

Měření kořenů začíná podobně jako měření koruny stromu, tedy správným položením magnetického pole. V tomto případě se však doporučuje použít jako zdroj magnetického pole kouli, protože její dosah je 4 metry, což je vhodné pro přesné měření v blízkosti kořenového systému. V magnetickém poli nesmí být žádný kovový předmět, aby nedošlo k ovlivnění výsledků měření. K zaznamenání tloušťky jednotlivých bodů u kořenů je opět potřeba posuvné měřítko, které umožní přesné měření průměru kořenů na různých místech.

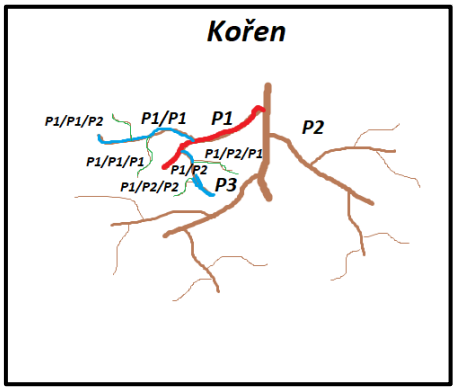
Hlavní rozdíl mezi měřením koruny a kořenů spočívá v použití referenčních bodů u kořenů. Referenční body jsou klíčové pro správné a přesné měření, a proto musí být pečlivě umístěny. Tyto body nesmějí být vytvořeny v jedné rovině, aby se zajistila maximální přesnost měření. Z důvodu možného zkreslení výsledků nesmějí být umístěny ve velké vzdálenosti od sebe. Referenční body musí být dobře viditelné, aby bylo možné snadno a přesně identifikovat měřená místa.

Použití referenčních bodů při měření kořenů umožňuje lepší orientaci a přesnost při zaznamenávání údajů o kořenovém systému. Tento postup je nezbytný pro získání spolehlivých a přesných dat, která jsou klíčová pro další analýzu a pochopení růstu a zdraví stromů. Detailní měření kořenů poskytuje cenné informace o jejich struktuře a funkci, což je důležité pro komplexní studium rostlinné ekologie a fungování ekosystémů (obr.101).

Obrázek 101. Ukázka referenčních bodů

Měření kořenů je složitější v tom, že nelze vždy očistit celý kořen. Nejprve se vytvoří referenční body na kmenu, které v budoucnu slouží pro spojení naměřených částí kořenů. Po zanesení vytvořených referenčních bodů začíná měření samotných kořenů u kmene. Další bod se vytvoří v místě výrůstu nového kořenu nebo určitého zakřivení či změny tloušťky kořene. Pokud kořen není zcela odkrytý, vytvoří se referenční body, takže poslední body, které se změří,

budou referenční. Při každém měření kořenů v novém souboru, je nutné zavést referenční body na kmenu. V případě pokračování části změřeného kořene se zanesou referenční body, které jsou na rozpracovaném kořenu. Takto se pokračuje, dokud není změřený celý kořenový systém.



Obrázek 102. Ukázka možného popisu kořene a koruny

Měření kořenů vyžaduje specifický přístup k jejich popisu. Hlavní kořen se nepopisuje nebo jej lze označit jako kořen 0. Popis dalších částí kořenového systému začíná vždy od povrchu země směrem do hloubky. První segment navazující na hlavní kořen se označí jako P1. Kořen, který navazuje na segment P1, se popíše jako P1/P1. Pokud další kořínek navazuje na P1/P1, popíšeme jej jako P1/P1/P1. Jiný kořínek, který navazuje na P1/P1, označíme jako P1/P1/P2. Druhý segment navazující na P1 se označí jako P1/P2. Tímto způsobem se pokračuje, dokud není popsaná celá jedna část kořenového systému. Po dokončení se přechází na další segment, který navazuje na hlavní kořen, a označí se jako P2. Popis pokračuje obdobným způsobem jako u první části, tedy P2/P1, P2/P1/P1, atd. (obr.102).

Při popisování a měření kořenů je důležité vzít v úvahu, jakým způsobem kořeny rostou, aby nedošlo k záměně s kořenovým systémem jiného jedince. Tento problém se často vyskytuje, pokud jsou stromy umístěny blízko sebe nebo jsou starší. Správné určení kořenů patřících k danému stromu je klíčové pro přesnost měření. Platí zde pravidlo transpirace vody, což znamená, že kořeny se nikdy nerozvětvují proti směru růstu silnějšího kořene z něhož vyrůstají.

Tento přístup zajišťuje měření skutečného kořenového systému daného jedince. Kořeny rostou směrem dolů a do stran od hlavního kořene, což je třeba mít na paměti při jejich mapování.

9.1.7 Chyby při měření

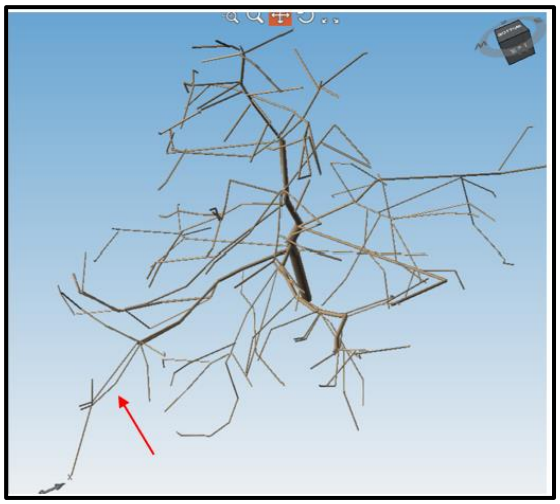
Při měření dřevin mohou nastat různé zásadní chyby, které mohou ovlivnit přesnost a spolehlivost výsledků. Mezi tyto chyby patří vynechání větve při měření, dvojité změření jedné větve, pohnutí zdrojem magnetického pole při měření, prohození hemisféry a výskyt kovu v magnetickém poli.

Vynechání větve při měření

Tato chyba nastává, když během měření některé větve nejsou vůbec zaznamenány. Představit si transpiraci vody, která probíhá jak v nadzemní, tak i podzemní části, může pomoci pochopit význam správného měření všech větví. Pro zamezení této chyby je možné použít označení již změřených větví, což je běžná praxe při měření nadzemních částí rostlin. U podzemních částí však nelze používat náplasti nebo barevné papírky kvůli čištění kořenů pomocí vzduchu, což představuje určité omezení.

Dvojité změření jedné větve

Dvojité změření jedné větve je dalším častým zdrojem chyb, který může výrazně ovlivnit výsledky měření. Každou větev je nutné změřit pouze jednou. Opakované měření stejné větve může vést k chybám v celkovém součtu a zkreslení výsledků. Představit si proces transpirace vody může napomoci vizualizaci důležitosti přesnosti měření; právě tak, jako voda cirkuluje a je rovnoměrně rozložena v rostlině. Jedním ze způsobů, jak předejít dvojímu měření, je zavedení efektivního značení již změřených větví. Použití barevných štítků nebo jiného typu označení na větvích může výrazně zjednodušit proces měření a zajistit, že každá větev bude zaznamenána jen jednou (obr. 103).



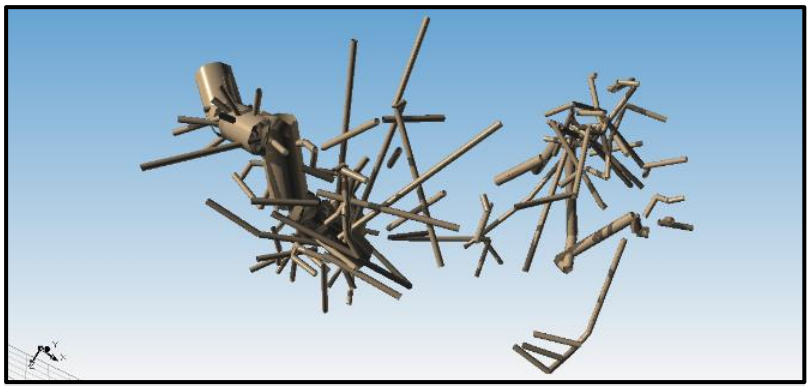
Obrázek 103. Zdvojení větve

Pohnutí zdrojem magnetického pole

Tato chyba je způsobena pohybem zdroje magnetického pole během měření, což může mít zásadní dopad na přesnost a spolehlivost výsledků. Když se měří magnetické pole, je nezbytné být velmi opatrný a zajistit, aby zdroj magnetického pole zůstal stabilní po celou dobu měření. Jakýkoli pohyb, ať už záměrný nebo náhodný, může vést k nepřesným výsledkům, které mohou zkreslit analýzu dat a ovlivnit interpretaci výsledků.

Prohození hemisféry

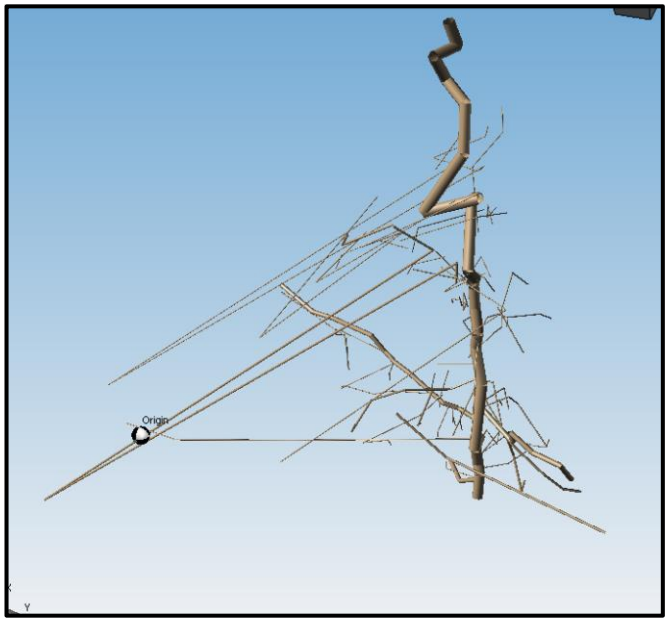
Prohození hemisféry, což znamená nesprávné nastavení magnetického pole, není běžná chyba, ale pokud se to stane, je důležité znovu měřit celou dřevinu. Správné postavení magnetického pole je totiž klíčové pro přesnost měření. Pokud se chyba stane, je nezbytné v doprovodném programu „FTGui“ přehodit hemisféru a následně začít měřit celou dřevinu znovu. Tento krok je nezbytný k zajištění všech přesných údajů. Po přehodnocení hemisféry je dobré provést kontrolní měření, které ověří, že bylo nastavení správně opraveno. Jakým způsobem se prohodí hemisféra v doprovodném programu, se psalo výše.



Obrázek 104. Chyba prohození hemisféry

Výskyt kovu v magnetickém poli

Poslední zmíněná chyba spočívá v přítomnosti kovových předmětů v magnetickém poli, což může mít vážné důsledky pro přesnost měření. Kovy mají schopnost narušit magnetické pole, což může vést k výrazným odchylkám ve výsledcích. Tato narušení mohou způsobit, že měřicí zařízení nebude schopno zachytit správné hodnoty, a tím ovlivní celý proces analýzy dat. Je proto nezbytné zajistit, aby v blízkosti generátoru magnetického pole a v blízkosti cívky na stylusu, nebyly žádné kovové předměty. Před začátkem měření by měl být prostor pečlivě prozkoumán a vyklizen od veškerých kovových objektů.



Obrázek 105. Výskyt kovu v magnetickým poli

Při prvních dvou chybách, tedy vynechání větve a dvojitém změření jedné větve, je nejlepší představit si transpiraci vody. Toto platí jak pro nadzemní, tak i podzemní část rostlin. Značení již změřených větví je efektivním způsob, jak předejít těmto chybám, a to zejména při měření nadzemní části rostlin. U podzemních částí je značení složitější kvůli procesu čištění kořenů vzduchem.

Zásadní chyby při měření mohou výrazně ovlivnit výsledky a je důležité jim předcházet. Použitím správných technik, jako je značení větví a pečlivé manipulace se zdrojem magnetického pole, můžeme minimalizovat riziko chyb a zajistit přesné a spolehlivé měření. Správné postavení magnetického pole a eliminace kovových předmětů v jeho blízkosti jsou klíčové kroky pro úspěšné měření. Pokud se přesto nějaká chyba vyskytne, je důležité ji co nejdříve identifikovat a opravit, aby bylo možné dosáhnout co nejpřesnějších výsledků.

9.2 Zhodnoceni použití tohoto typu měření pro nadzemní architekturu dřevin

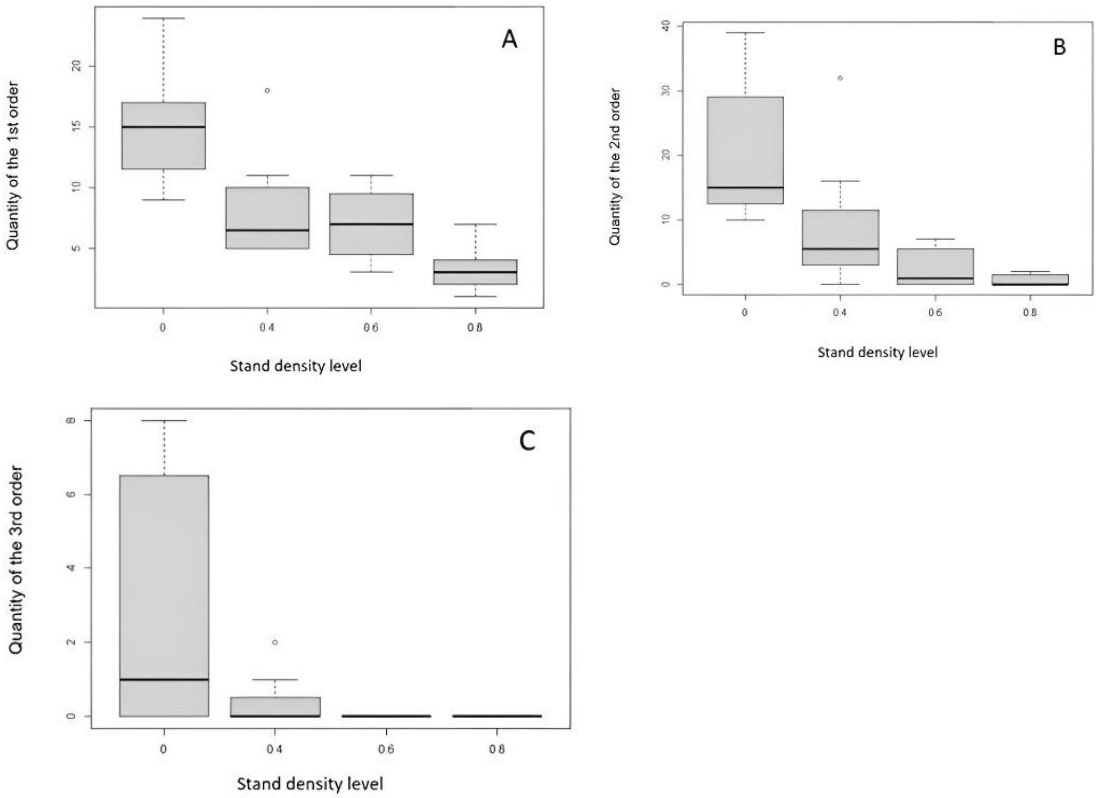
V souvislosti s klimatickými změnami je nezbytné řešit měnící se složení lesních porostů a změny v tradičních postupech obhospodařování lesů. Pro tento účel je klíčové porozumět alokaci biomasy, která je přímo ovlivněna architekturou koruny. Pro tento účel byly vybrané tři druhy dřevin: borovice lesní (Pinus sylvestris L.) – Česká republika, dub korkový (Quercus suber L.) – Portugalsko a buk lesní (Fagus sylvatica L.) – Slovensko. Vzhledem k rozmanitosti druhů a různosti oblastí sběru se rozeberou výsledky pro jednotlivé dřeviny zvlášť. Výsledky tykající se borovice lesní a dubu korkového jsou již přijaté publikace. Výsledek týkající se buku lesního je stále v rozepsané formě.

Pinus sylvestris

Závislost větvení na hustotě porostu

Nejčastější výskyt větví prvního, druhého a třetího řádu byl zjištěn v oblastech holosečí, zatímco nejnižší počet větví prvního, druhého a třetího řádu byl zjištěn v oblastech s hustotou porostu 0,8 (80 %). Na ploše holoseče byl výskyt prvního řádu, zatímco na plochách s hustotou 0,4 (40 %) a 0,6 (60 %) nebyl statisticky významný rozdíl v počtu výskytu větví prvního řádu

(obr. A). Nejnižší početnost větví I. řádu byla patrná na ploše hustoty porostu 0,8. Podobné výsledky byly získány i pro početnost větví druhého řádu a byly pozorovány statisticky významné rozdíly mezi plochou holoseče a plochou hustoty porostu 0,4. Opět platí, že hustota porostu o ploše 0,8 měla nejnižší výskyt z větví druhého řádu (graf 1). Větve III. řádu byly opět nejhojnější v oblasti holosečí a minimální v porostní hustotě 0,4 plochy. Na parcelách s hustotou 0,6 a 0,8 nebyly nalezeny větve třetího řádu



Graf 1. Velikost větvení výskytu větvení prvního (**A**), druhého (**B**) a třetího řádu (**C**) při různých hustotách porostu. Boxploty zobrazují směrodatné odchylky (šedý pruh), medián (černá vodorovná čára) a minimální a maximální hodnoty

Analýza je zaměřena na vliv hustoty porostu na početnost jednotlivých větví. V následující tabulce se uvádí koeficient zobecněného lineárního modelu vztahu mezi hustotou porostu a četnosti pořadí větvení (tabulka 1). Podle regresního koeficientu pro každý lineární model (pro řády 1, 2 a 3) tabulka 1 ukazuje, že hustota porostu má statisticky významný vliv na počet jednotlivých větví. V případě větví prvního řádu je nejvyšší počet větví patrný v oblasti holoseče, a to s průměrnou hodnotou 15. Nejnižší výskyt je v oblasti hustoty porostu 0,8. V případě druhého řádu je nejvyšší počet větví také v oblasti holoseče, a to s průměrnou hodnotou 14. Nejnižší výskyt větví druhého řádu je v oblasti hustoty porostu 0,8 s průměrnou hodnotou 1,

zatímco v případě větví třetího řádu je nejvyšší frekvence opět v oblasti holoseče (tabulka 1). Pokud jde o hustotu porostu 0,4, větve třetího řádu se vyskytují jen zřídka a v hustotě porostu 0,6 a 0,8 zcela chybí. Z výsledku vyplývá, že se zvyšující se hustotou porostu klesá frekvence jednotlivých řádů větví jedinců přirozené obnovy.

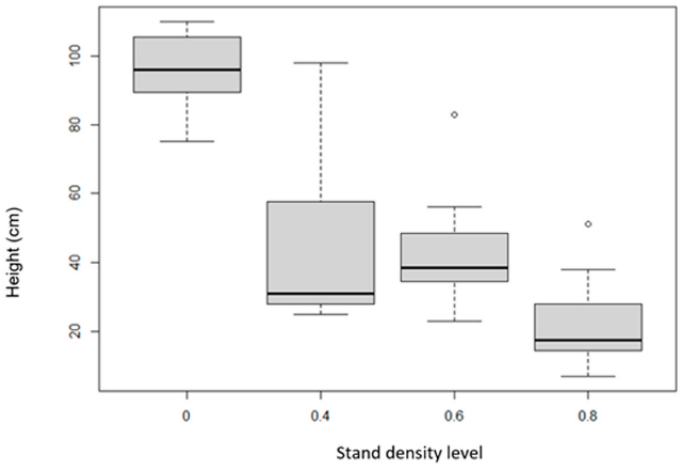
Coefficients	**Intercept**	**Stock Density (Estimate)**	**STD**	**Error from Value**	**Pr (>|z|)**
Order 1	2.73680	−1.62223	0.20893	−7.765	8.19×10^{-15} ***
Order 2	3.11377	−3.28529	0.24351	−13.49	$<2 \times 10^{-16}$ ***
Order 3	1.1635	−6.4741	I.14	−4.721	2.35×10^{-6} ***

Tabulka 1. Vliv hustoty porostu na početnost větví v každém řádu.

Výsledky naznačují, že hustota porostu má významný vliv na početnost větví v každém řádu. Průsečík představuje abundanci, když je hustota porostu nulová. S přibývající řádem pozorujeme větší změny v odhadovaných koeficientech, což naznačuje složitější vztah mezi hustotou porostů a počtem řádů. Všechny *nízké* p-hodnoty (***), které jsou hlášeny, ukazují na statistickou významnost tohoto efektu. Z naší analýzy vyplývá, že hustota porostu hraje klíčovou roli při ovlivňování početnosti jednotlivých řádů.

Závislost výšky jedinců přirozené obnovy na hustotě porostu

Nejvyšší borovice byly nalezena v oblasti holoseči s průměrnou výškou 90 cm, zatímco nejmenší borovice byly nalezeny v oblasti s hustotou porostu 0,8 (15 cm). Borovice v porostu o hustotě 0,6 (35 cm) byly v průměru větší než borovice o hustotě porostu 0,4 (30 cm) (tabulka 2, 2). Na základě prezentovaných hodnot můžeme potvrdit hypotézu, že hustota porostu má statisticky významný vliv na výšku jedinců přirozené obnovy.



Graf 2. Míra větvení výšky borovic v závislosti na hustotě porostu. Boxplot graf zobrazuje směrodatné odchylky (šedý pruh), medián (černá vodorovná čára), minima a maxima.

Coefficients	**Estimate**	**STD**	**Error from Value**	**Pr (>|z|)**
Intercept	2.73680	0.09168	29.852	$<2 \times 10^{-16}$ ***
Stand density level	−1.6223	0.20893	−7.765	8.19×10^{-15} ***

Tabulka 2. Závislost výšky jedinců na hustotě mateřského porostu.

Průsečík představuje očekávanou výšku stromu, když je hustota porostu nulová. Úroveň hustoty porostu vyjadřuje očekávanou změnu výšky stromu, která zvyšuje hustotu porostu. Označuje vyšší hladinu významnosti, a to na hladině významnosti 0,01. Nulová hypotéza platí a pravděpodobnost je menší než 1 %.

V tabulce 2 je zkoumán vztah mezi výškou stromu, hustotou porostu a hustotou mateřského porostu. Níže naleznete výklad jednotlivých sloupců.

Hodnota průsečíku je 2,73680. Tato hodnota je statisticky významná (p-hodnota $< 2 \times 10{-}16$), což naznačuje, že se může očekávat výrazně vyšší výška jedinců i při nízké hustotě mateřského porostu. Koeficient pro "úroveň hustoty porostu" je −1,6223. Záporné znaménko znamená, že očekávaná výška stromu klesá s rostoucí hustotou porostu. Tento koeficient je opět statisticky významný (p-hodnota $8{,}19 \times 10{-}15$), což potvrzuje, že hustota porostu má významný vliv na výšku stromu. Tyto informace jsou klíčem k pochopení dynamiky ekosystémů a mohou mít důležité důsledky pro lesnické a ekologické strategie.

Závislost výšky jedinců přirozené obnovy na biomase řádů

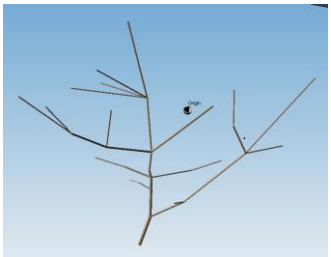
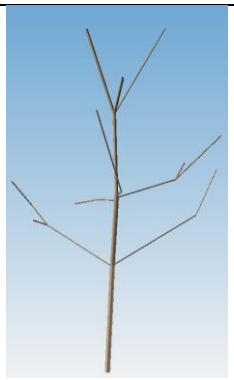
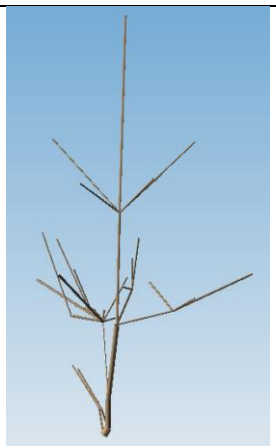
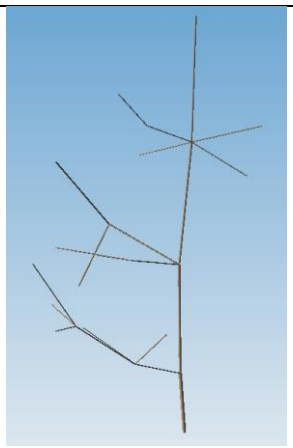
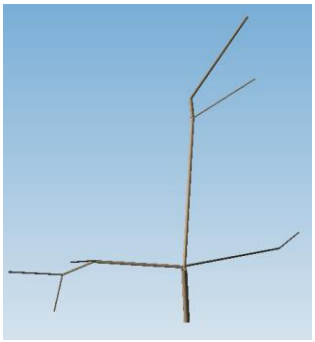
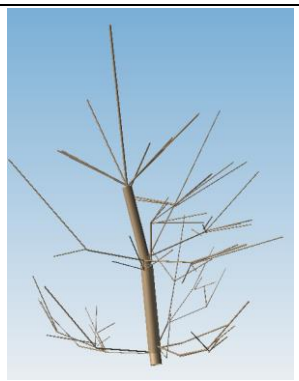
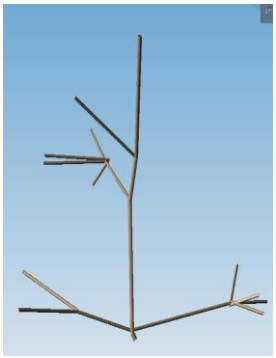
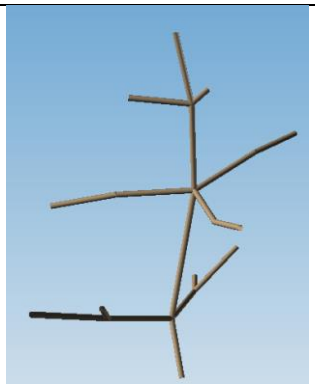
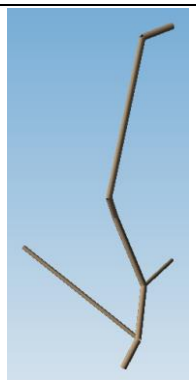
Naše analýza se zaměřuje na vztah mezi výškou stromu a celkovou biomasou větví každého řádu. Níže je uvedena interpretace jednotlivých sloupců (tabulka 3). Byla hodnocena závislost výšky stromu na celkové biomase investované do větví s ohledem na jejich řád. Modelová hypotéza je, že přirozená obnova borovice lesní zvyšuje její výšku se stejnou intenzitou, s jakou přibývají její větve, tj. že výška borovice lesní pozitivně koreluje s počtem větví v každém řádu (biomasy), nebyla potvrzena (tabulka 3). Naproti tomu statistický model ukazuje, že výška přirozené obnovy negativně koreluje s množstvím biomasy generované z větví třetího řádu; Toto zjištění lze také interpretovat tak, že čím více biomasy strom uloží do větví třetího řádu, tím menší výšky dosáhne.

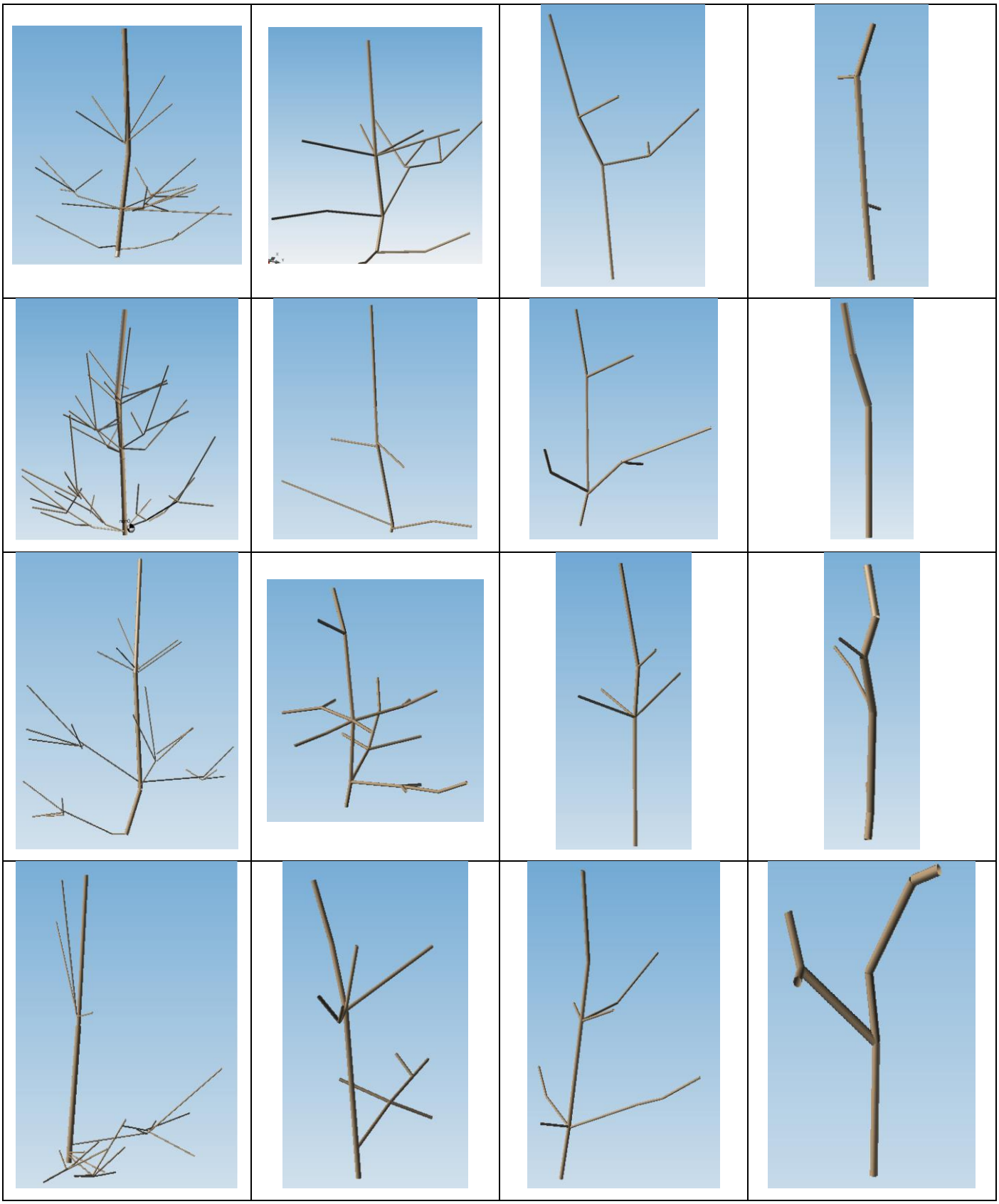
Coefficients	**Estimate**	**STD**	**Error from Value Pr (>|z|)**	
Order 1	0.087987	0.016221	5.424	1.10×10^{-5} ***
Order 2	0.013591	0.006651	2.043	0.05127
Order 3	−0.233641	0.080563	−2.900	0.00749 ***

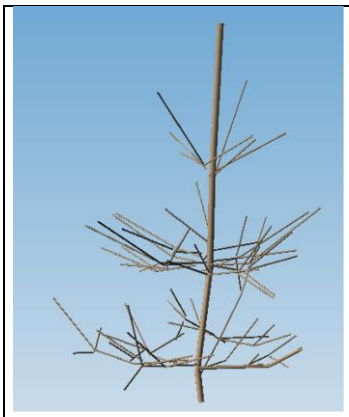
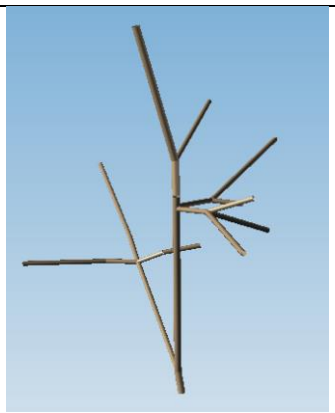
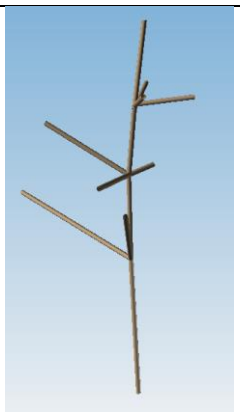
Tabulka 3. Závislost výšky jedinců přirozené obnovy na biomase řádů

"Řád 1" je 0,087987, což znamená významný pozitivní vliv na výšku jedince s jednotkovým nárůstem biomasy větví prvního řádu (p-hodnota 1,10 × 10−5 ***). Řád 2: Koeficient pro "Řád 2" je 0,013591, s p-hodnotou (0,05127) nad hladinou významnosti 0,05, což naznačuje potenciální nevýznamnost, i když určitý vliv na výšku může stále existovat. Řád 3: Koeficient pro "Řád 3" je −0,233641, což ukazuje na významný negativní vliv biomasy větví třetího řádu na individuální výšku (p-hodnota 0,00749 ***). Označuje vyšší hladinu významnosti, a to na hladině významnosti 0,01. Nulová hypotéza platí a pravděpodobnost je menší než 1 %.

9.2.1 3D modely měřených borovic lesních ve čtyřech různých zkamenění.

Stand density 0	Stand density 0.4	Stand density 0.6	Stand density 0.8
			
			
			



Quercus suber

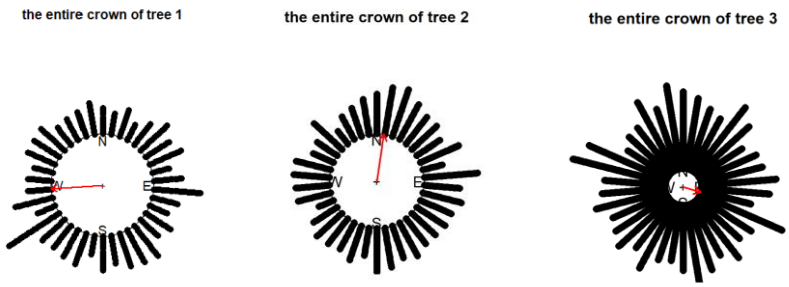
Analyzována byla celá koruna a následně větve o průměru do 0,5 cm, protože tyto větve jsou klíčovým ukazatelem růstu koruny.

Celá koruna

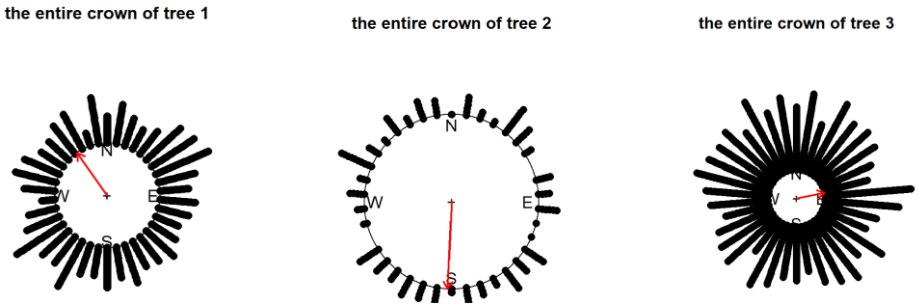
Zatímco orientace kořenů všech tří stromů byla shodně podobná, orientace korun se výrazně lišila. U hnojených stromů má strom 1 korunu orientovanou na západ, směrem od hadice. Koruna stromu 2 je orientována na sever, takže je poněkud blíže k hadici. Strom 3 má korunu orientovanou na východ, přímo k hadici. U kontrolních stromů je koruna stromu 1 orientována na severozápad, koruna stromu 2 na sever a koruna stromu 3 na východ. V případě částečně hnojeného stromu je koruna orientována jihovýchodně, což naznačuje mírnou odchylku od hadice (graf 3).

Podpovrchové kapkové zavlažování.

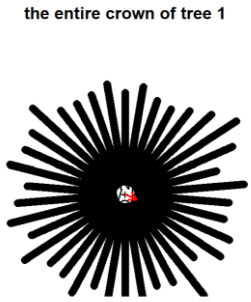
Zavlažované



Nezavlažované



Povrchové kapkové zavlažování



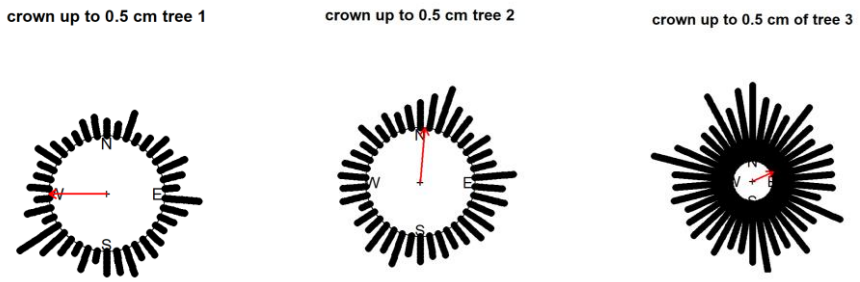
Graf 3. Graf ukazuje orientaci celé koruny 0,5 cm: Zavlažováno, kontrola a povrchová kapková závlaha. Šipky ukazují orientaci směru

Koruna pod 0.5 cm

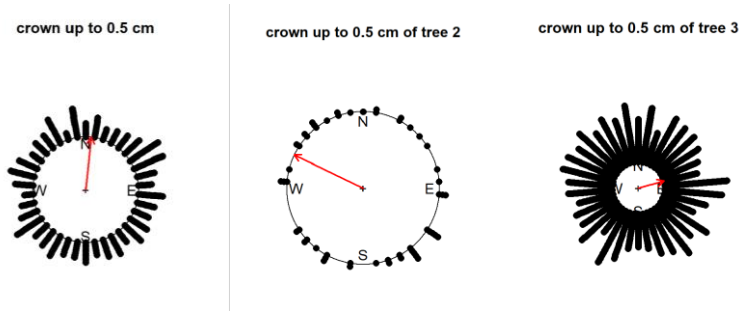
U větví menších než 0,5 cm je ve dvou případech orientace k severu, tedy blíže k hadici, což platí pro stromy 1 a 2. Ve třetím případě je orientace směrem k hadici, tedy na východ. U kontrolních stromů se orientace větví ve všech třech případech liší. První strom má větve orientované na sever, druhý na severozápad a třetí na východ, tedy směrem k hadici. U částečně hnojeného stromu jsou větve orientovány na západ, podél hadice (graf 4).

Podpovrchové kapkové zavlažování.

Zavlažované



Nezavlažované



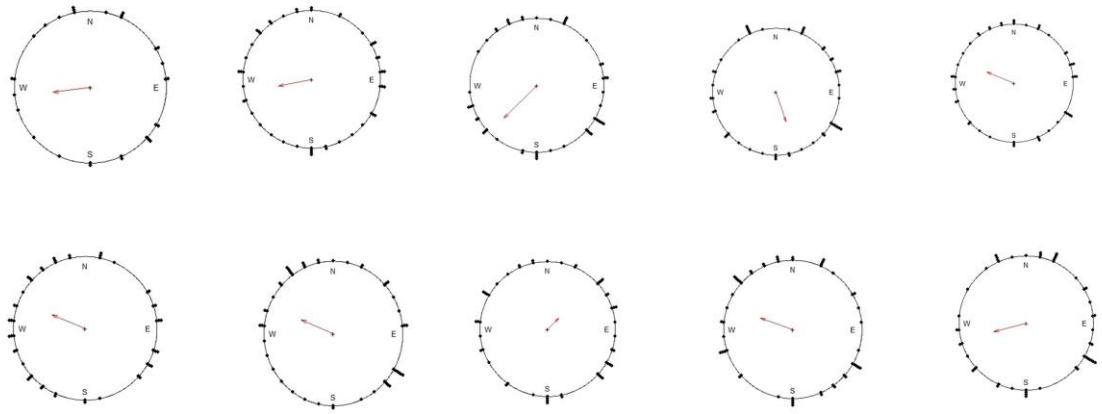
Povrchové kapkové zavlažování

Graf 4. Graf zobrazuje orientační korunu do 0,5 cm: Zavlažováno, kontrola a povrchová kapková závlaha. Šipky ukazují směr orientace

Fagus sylvatica

Analýza orientace listů vůči světovým stranám

Na obrázku je zobrazeno deset grafů, které představují orientaci listů na různých stromech ve vztahu k světovým stranám. Každý graf ukazuje převládající směr růstu listů, přičemž černé značky na obvodu znázorňují konkrétní směry a červená šipka uvnitř kruhu ukazuje převládající orientaci. Z grafů je patrné, že několik stromů konkrétně první, třetí a devátý, má listy převážně orientované na západ. Další stromy, jako čtvrtý a desátý, mají listy směřující více na východ a jihovýchod, zatímco pátý a osmý preferují jihozápad. Zajímavé je, že směr na západ, jihozápad a jihovýchod se objevuje opakovaně, což může naznačovat vliv ekologických či mikroklimatických podmínek, které ovlivňují růst listů u těchto stromů.

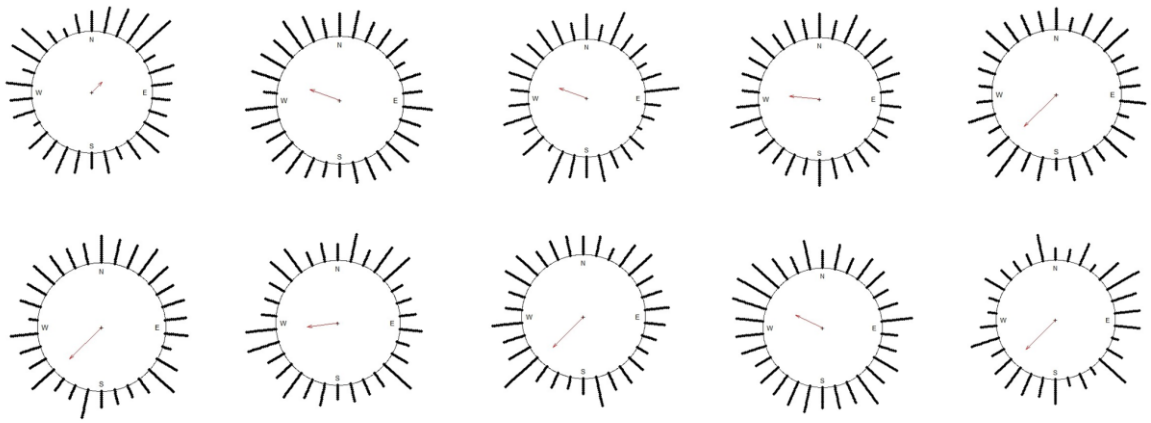


Graf 5. Orientace listí vůči světovým stranám

Analýza orientace koruny vůči světovým stranám

Na druhém obrázku je zobrazena orientace korun deseti stromů ve vztahu k světovým stranám. Každý graf ukazuje směr, kterým jsou koruny stromů orientovány, přičemž černé značky na obvodu znázorňují rozložení větví a červená šipka uvnitř kruhu zobrazuje převládající směr celé koruny. Z grafů je patrné, že orientace korun se liší strom od stromu. Některé stromy směřují svou korunu na jihozápad nebo severozápad, zatímco jiné na jihovýchod či východ. Tento rozdíl v orientaci může být způsoben různými faktory, jako je dostupnost slunečního světla, vítr nebo prostorová dispozice okolního prostředí. Celkově

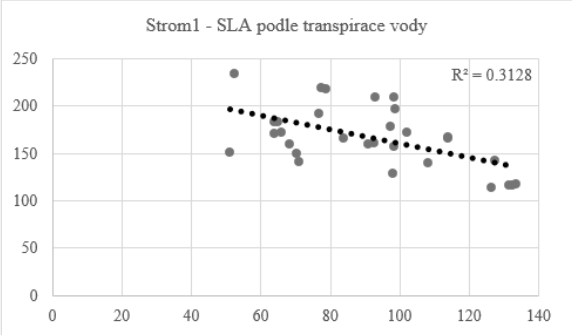
orientace korun stromů ukazuje variabilitu, která může reflektovat jejich adaptaci na lokální podmínky.

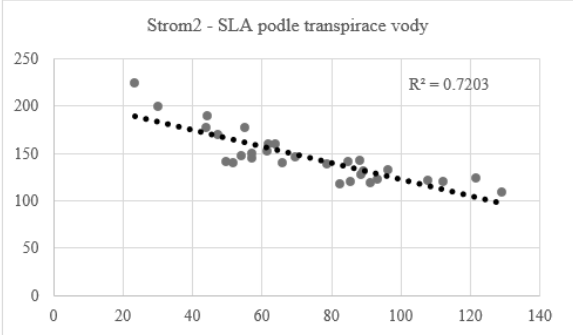


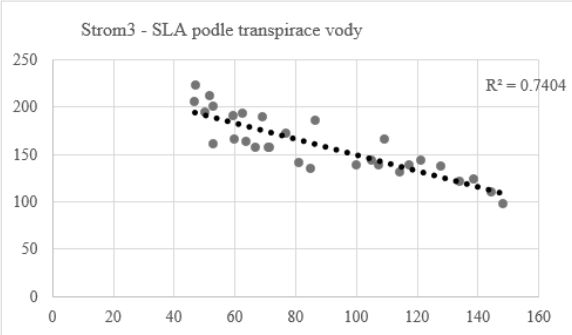
Graf 6. Orientace koruny vůči světovým stranám

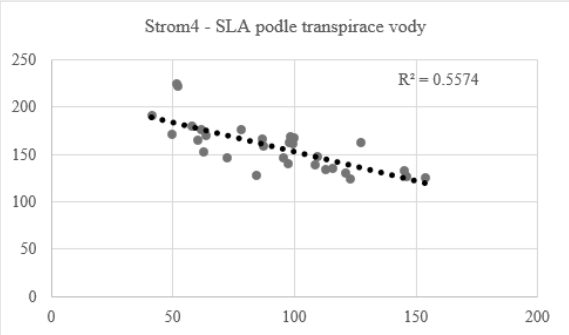
Vztah mezi SLA a transpirace vody

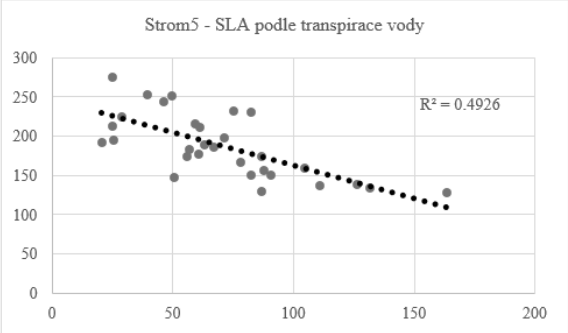
Na grafu 5 je znázorněn vztah mezi SLA a transpirací vody u deseti různých stromů. Každý graf ukazuje hodnoty SLA v závislosti na transpiraci vody, přičemž je zřejmá proložená regresní křivka a hodnoty koeficientu determinace R^2, které udávají míru shody mezi modelovanými a skutečnými daty. U stromů 1, 5, 6 a 10 se objevuje střední úroveň korelace s R^2 v rozmezí 0,31 až 0,57, což naznačuje, že transpirace vody částečně vysvětluje variabilitu SLA, ale jsou zde i další vlivy. Naopak stromy 2, 3, 7, 8 a 9 vykazují silnější vztah s hodnotami R^2 mezi 0,67 a 0,74, což znamená, že u těchto stromů má transpirace vody významnější vliv na SLA. Většina grafů ukazuje negativní korelaci, což znamená, že s rostoucí transpirací vody dochází k poklesu hodnot SLA. Tento vztah může být způsoben tím, že stromy s vyšší transpirací mají tendenci mít menší a méně husté listy. Celkově však není tento vztah u všech stromů stejný, což naznačuje, že různé stromy mohou na změny ve vodním režimu reagovat odlišně, pravděpodobně v závislosti na dalších environmentálních a fyziologických faktorech

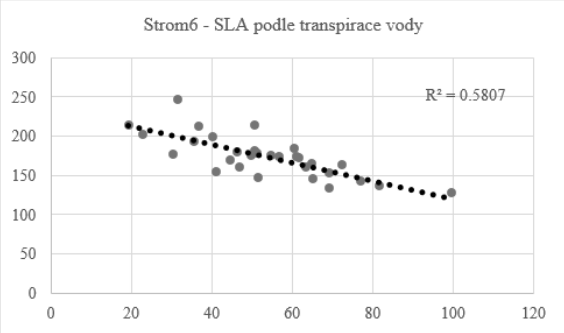

Strom1 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.3128

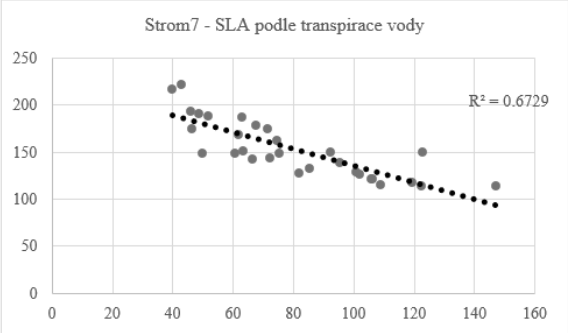

Strom2 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.7203

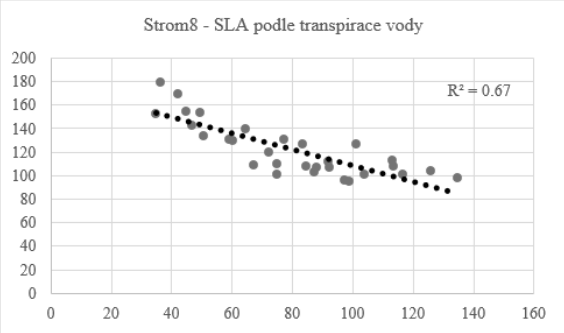

Strom3 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.7404

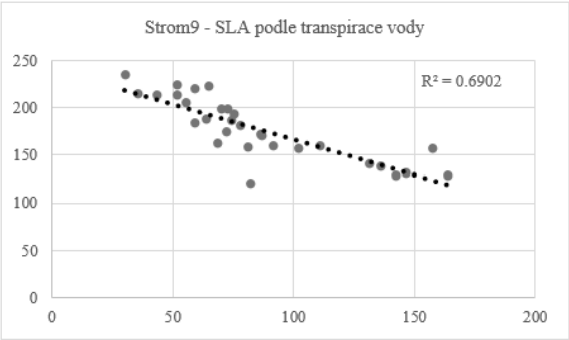

Strom4 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.5574

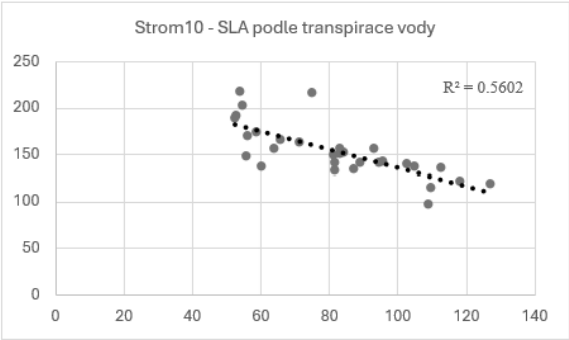

Strom5 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.4926


Strom6 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.5807


Strom7 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.6729


Strom8 - SLA podle transpirace vody
R² = 0.67

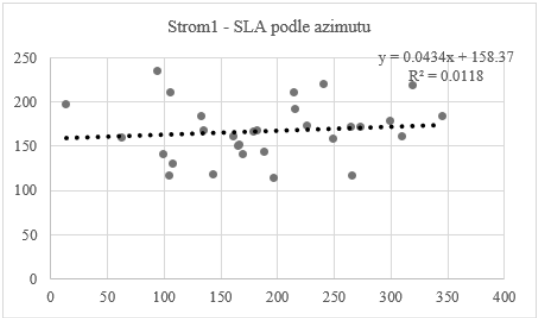


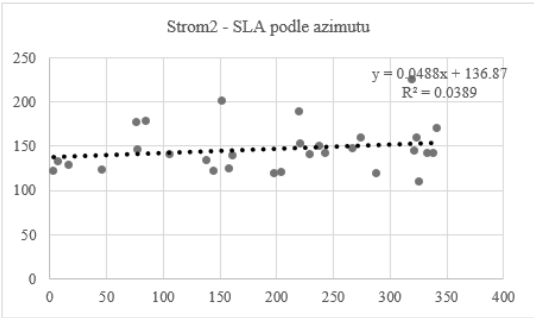


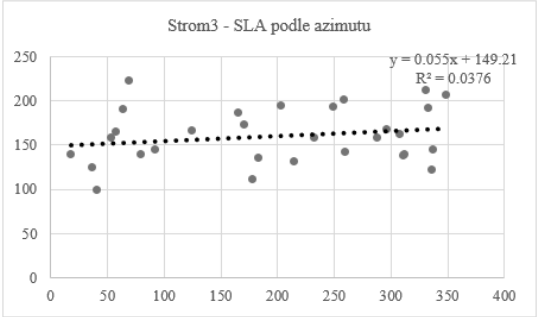
Graf 7. SLA a transpirace vody

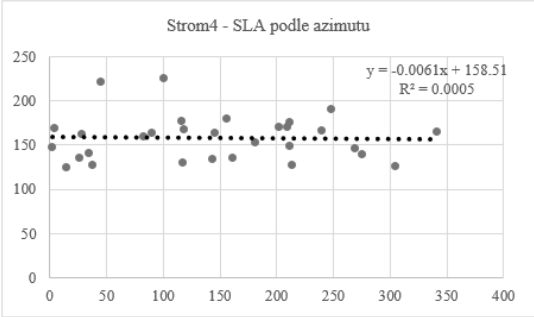
Vztah mezi SLA a azimutem

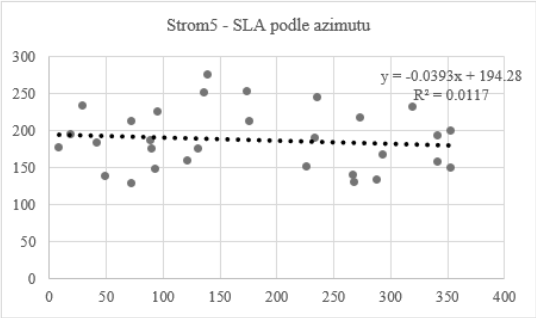
Na obrázku je zobrazen vztah mezi SLA a azimutem pro deset různých stromů. Každý graf reprezentuje tento vztah pro jeden strom, přičemž datové body znázorňují hodnoty SLA v závislosti na azimutu, který udává směr orientace listu. Přerušovaná čára v každém grafu představuje regresní přímku, která ukazuje trend mezi SLA a azimutem, a hodnota R^2 udává míru toho, jak dobře tato přímka odpovídá datům. Ve všech grafech jsou hodnoty R^2 velmi nízké, což naznačuje, že mezi SLA a azimutem neexistuje silný nebo významný vztah. Regresní přímky jsou téměř vodorovné, což potvrzuje, že změna azimutu nemá výrazný vliv na změnu hodnot SLA pro většinu stromů. Výsledky tak ukazují, že specifická listová plocha (SLA) zůstává relativně stabilní bez ohledu na směr orientace listů, alespoň u těchto konkrétních stromů v tomto experimentu.

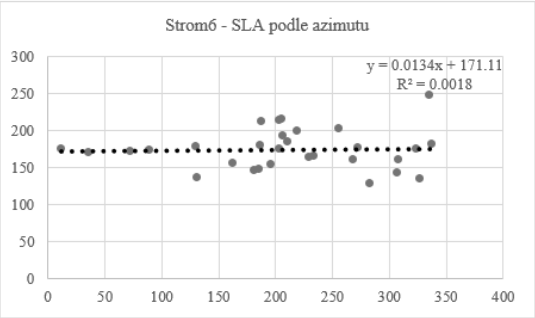


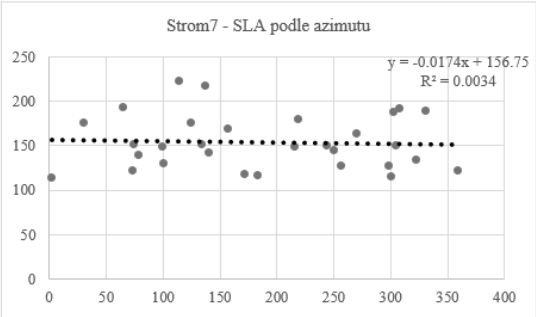


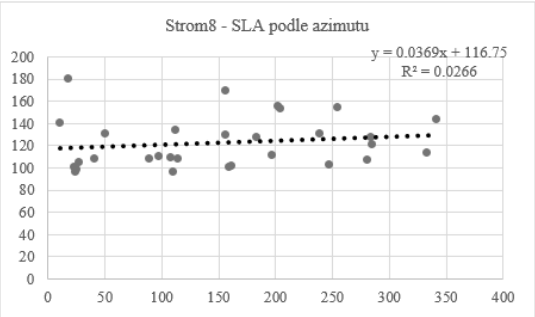


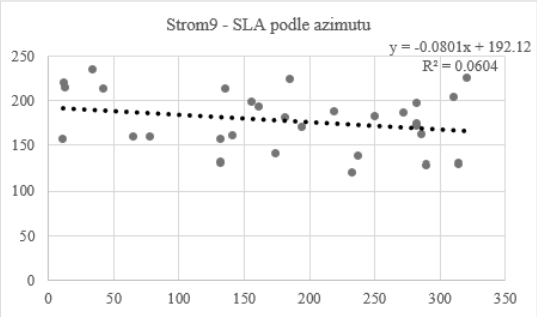


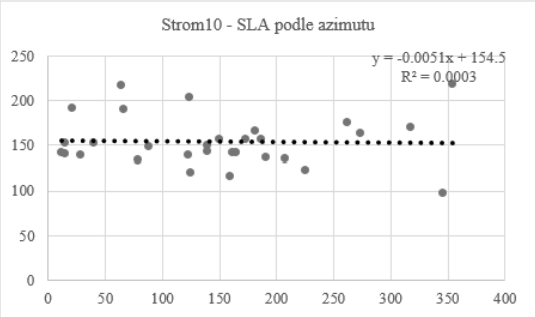






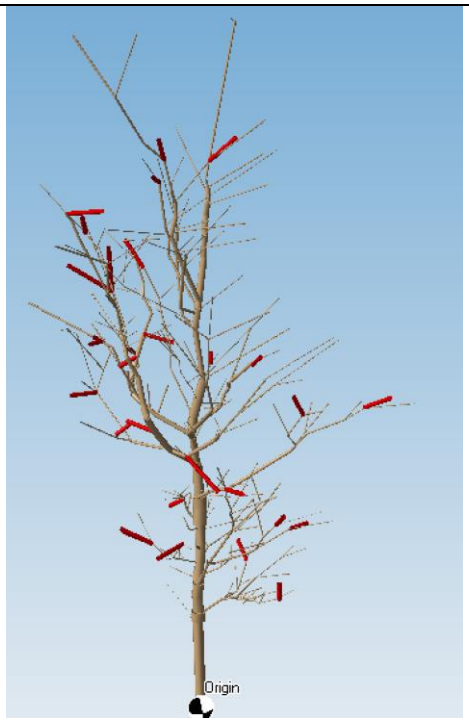
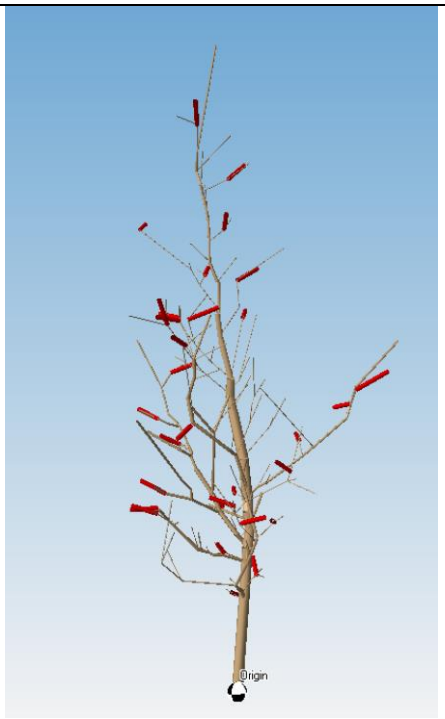
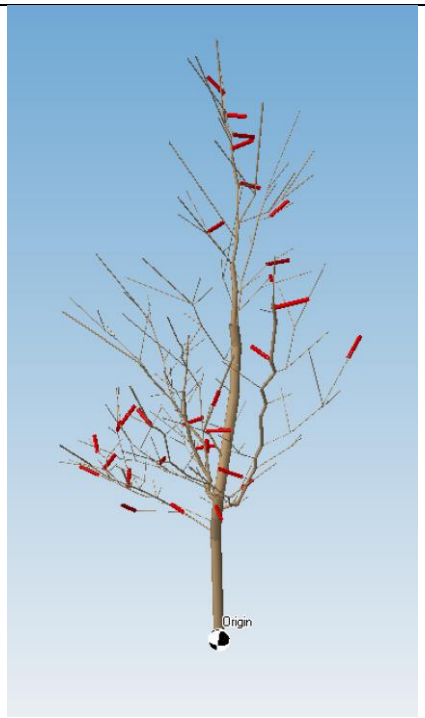


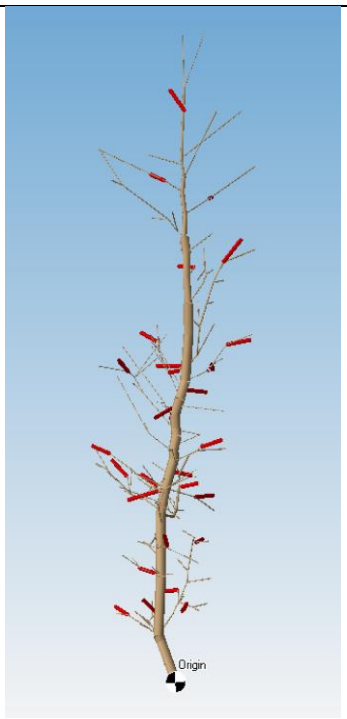
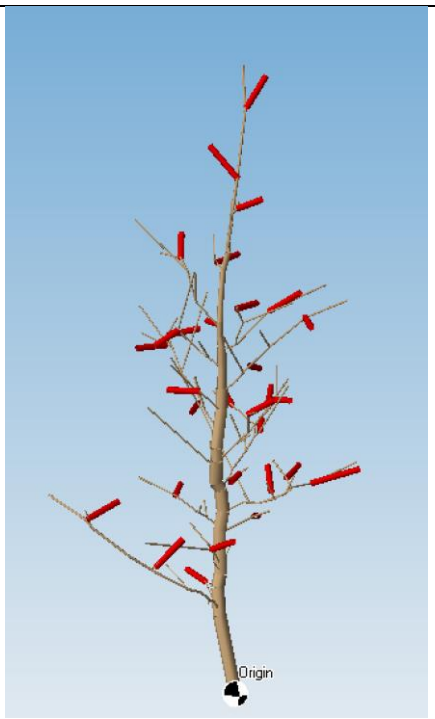
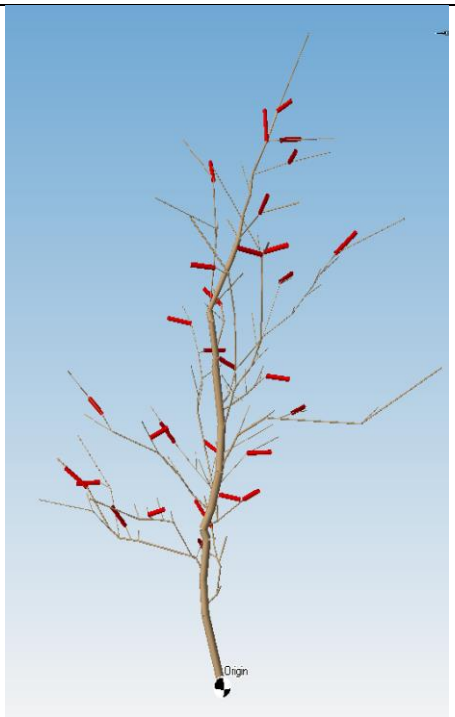


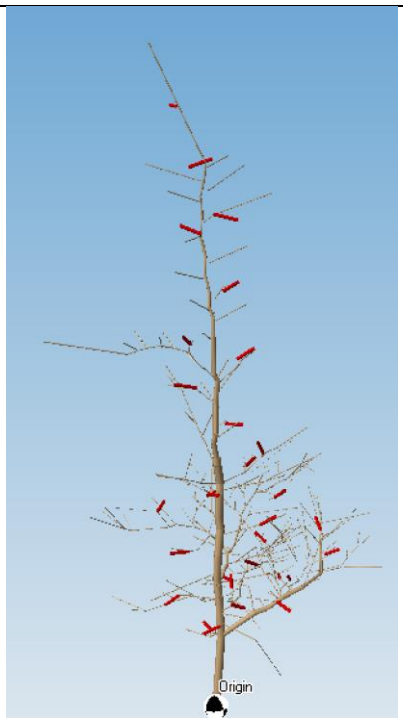
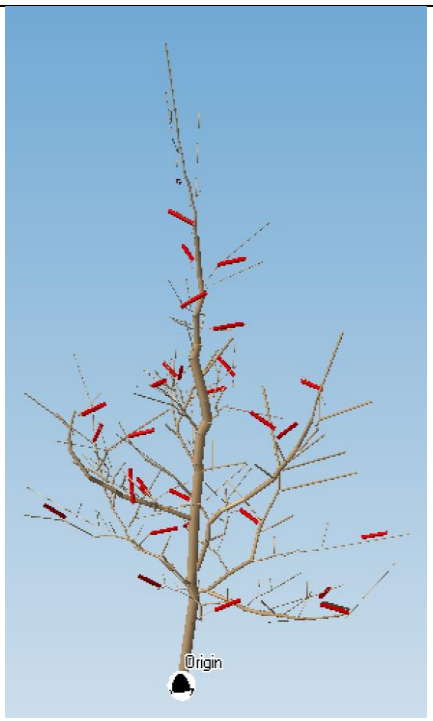


Graf 8. SLA a azimut

9.2.2 3D modely Fagus sylvatika – červeně jsou označené listy.

1		**2**	
3		**4**	

5		**6**	
7		**8**	

9		**10**	

9.3 Zhodnocení použití tohoto typu měřeni pro hodnoceni podzemní morfologie kořenové soustavy

Objem stromů posiluje experimentální design, kdy byly stromy seskupeny do dvojic s podobnými rozměry (tabulka 2). Nejmenší stromy (dvojice 1) měly objemy, které tvořily ½ a 1/3 celkového objemu stromů ve dvojici 2, resp. ve dvojici 3. V rámci největší dvojice stromů (dvojice 3) však měl strom zavlažovaný hnojivem o 1/3 větší objem než jeho protějšek zavlažovaný deštěm.

	Pair 1		Pair 2		Pair 3	
	Tree 1	Tree 2	Tree 3	Tree 4	Tree 5	Tree 6
treatment	rainfed	fertirrigated	rainfed	fertirrigated	rainfed	fertirrigated
Total volume (m3)	0.010	0.008	0.052	0.044	0.076	0.115

Tabulka 4. Celkový objem každého stromu. N= 6

Dílčí korelace

Mezi parametry pozitivně související s velikostí stromu patřily všechny dílčí objemy, plocha a délka koruny a plocha využívaná kořeny (tab. 5). Kořeny z řádů 1 a 3 byly negativně korelovány s velikostí stromu, zatímco kořeny z řádu 4 vykazovaly opačný trend. Vlivem ošetření nedošlo k žádnému významnému ovlivnění.

Pokud jde o ošetření, významné korelace byly pozorovány pouze při kontrole vlivu velikosti stromu. Stromy ošetřené fertilizací měly větší objem kmene, ale vykazovaly menší průměrný průměr kořenů (tab. 6).

			total volume					
controlling variable			**none**			**treatment (0,1)**		
Parameters			**Pearson correl.**	**Sig. (2-tailed)**	**df**	**Pearson correl.**	**Sig. (2-tailed)**	**df**
treatment			0,131	0,805	4			
volume	**total**		1,000		0	1		
	aerial part	**trunk**	0,986	**<0,0001**	4	0,998	**<0,0001**	3
		branches	0,969	**0,001**	4	0,972	**0,006**	3
		crown	0,984	**<0,0001**	4	0,993	**0,001**	3
	root system	**collar root**	0,972	**0,001**	4	0,975	**0,005**	3
		roots	0,939	**0,005**	4	0,974	**0,005**	3
		total	0,958	**0,003**	4	0,983	**0,003**	3
	root/ shoot		-0,369	0,472	4	-0,378	0,530	3
surface	**crown**		0,978	**0,001**	4	0,98	**0,003**	3
	root		0,733	0,098	4	0,747	0,147	3
length	**crown**		0,929	**0,007**	4	0,928	**0,023**	3
	root		0,639	0,172	4	0,632	0,253	3
Average root diameter			0,509	0,302	4	0,848	0,070	3

root orders	**1**	-0,884	**0,019**	4	-0,882	**0,048**	3
	2	-0,868	**0,025**	4	-0,942	**0,017**	3
	3	0,158	0,765	4	0,154	0,805	3
	4	0,872	**0,023**	4	0,952	**0,012**	3
shape area	**root**	0,829	**0,041**	4	0,891	**0,042**	3
	crown	0,561	0,247	4	0,639	0,246	3
Circularity	**root**	0,219	0,677	4	0,215	0,728	3
	crown	0,637	0,174	4	0,655	0,230	3

Tabulka 5. Dílčí korelace celkového objemu stromů (reprezentující velikost stromů) s parametry stromů, bez kontroly (sloupec „žádný“) a s kontrolou vlivu ošetření (dešťové: 0; zavlažované: 1)

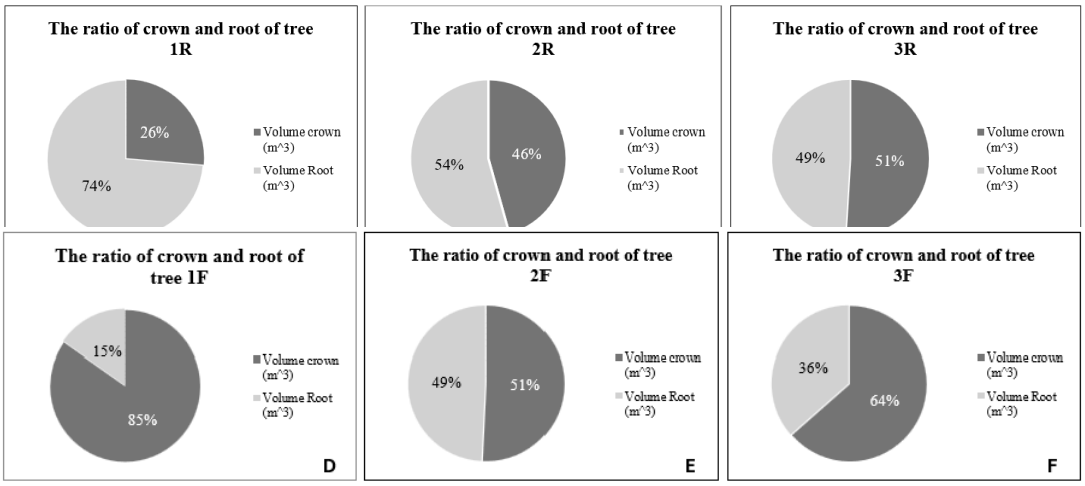
			Treatment					
controlling variable			**None**			**total volume (tree size)**		
parameters			**Pearson correl.**	**Sig. (2-tailed)**	**df**	**Pearson correl.**	**Sig. (2-tailed)**	**df**
treatment			1		0	1		0
volume	**total**		0,131	0,805	4			
	aerial part	**trunk**	0,285	0,584	4	0,934	**0,020**	3
		branches	0,221	0,674	4	0,385	0,523	3
		crown	0,264	0,613	4	0,762	0,134	3
	root system	**collar root**	0,049	0,927	4	-0,337	0,580	3
		roots	-0,134	0,800	4	-0,754	0,141	3
		total	-0,09	0,865	4	-0,762	0,134	3
	root/ shoot		-0,656	0,157	4	-0,66	0,226	3
surface	**crown**		0,203	0,700	4	0,357	0,555	3
	root		-0,054	0,919	4	-0,223	0,719	3
length	**crown**		0,126	0,812	4	0,013	0,984	3
	root		0,158	0,764	4	0,098	0,876	3

Average root diameter		-0,699	0,122	4	-0,898	**0,039**	3
root orders	**1**	-0,12	0,821	4	-0,008	0,989	3
	2	-0,515	0,296	4	-0,815	0,093	3
	3	0,04	0,940	4	0,02	0,975	3
	4	0,525	0,285	4	0,847	0,070	3
shape area	**root**	-0,231	0,659	4	-0,614	0,271	3
	crown	-0,312	0,547	4	-0,47	0,425	3
Circularity	**root**	0,043	0,935	4	0,015	0,981	3
	crown	-0,083	0,876	4	-0,217	0,726	3

Tabulka 6. Dílčí korelace ošetření (dešťové: 0; zavlažované: 1) s parametry stromů, bez kontroly (sloupec „žádný“) a s kontrolou vlivu celkového objemu stromu (reprezentujícího velikost stromu).

Vliv fertirrigace na poměr objemu kořenů a korun.

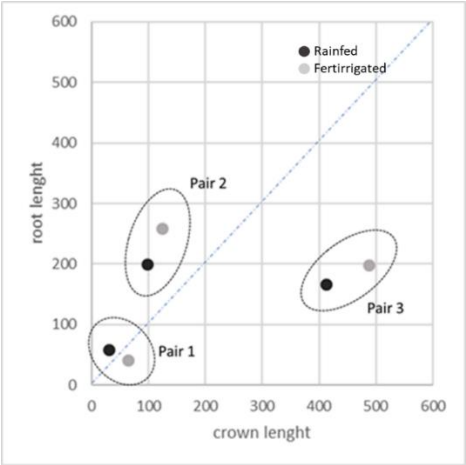
Graf 9 znázorňuje poměr objemu koruny a kořenů stromů ve třech různých velikostních kategoriích v podmínkách zavlažování a deště. Ačkoli Pearsonovy korelace nebyly pro tento parametr významné, tyto výsledky naznačují, že ošetření ovlivnilo rozložení objemu mezi nadzemní a podzemní částí stromů u nejmenšího páru stromů. V podmínkách srážek vykazoval nejmenší strom výraznou převahu kořenového systému – tato převaha se však snižovala, což vedlo k vyrovnanému poměru objemu koruny a kořenů. Naproti tomu u stromů s úrodnou půdou se projevil opačný trend.



Graf 9. Poměr koruny ke kořenům k celkovému objemu Q. Suber. Q. suber pěstované na dešti jsou od písmene A do písmene C. Zavlažované jsou od písmene D do písmene F

Délka kořenů a větví

Grafické srovnání celkové délky kořenů a celkové délky větví ukazuje trend: nejmenší stromy (pár 1) vykazovaly vyrovnanější investice do délky kořenů a korun, střední stromy (pár 2) vykazovaly větší investice do délky kořenů a největší stromy (pár 3) vykazovaly větší alokaci zdrojů do růstu větví (graf 10).

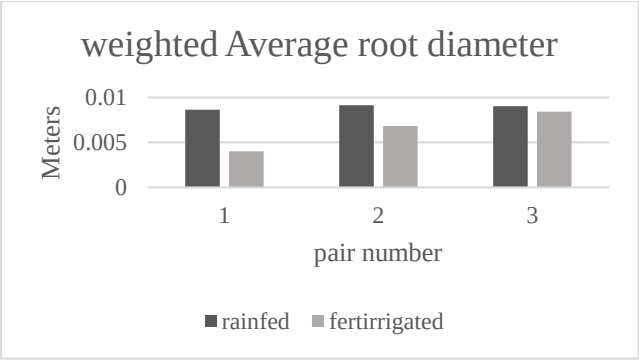


Graf 10. Root length by crown length of the rainfed and fertirrigated excavated trees. N = 6

Vážený průměr průměru kořene

Stromy zavlažované dešťovou vodou měly trvale silnější kořeny než stromy zavlažované hnojivy (graf 11). Největší rozdíl v tloušťce kořenů byl pozorován ve skupině 1, kde měly stromy napájené deštěm výrazně silnější kořeny než jejich protějšky zavlažované hnojivy. Ve skupině 2 byl rozdíl menší, ale stále významný, přičemž kořeny stromů s dešťovou výživou byly stále silnější než kořeny stromů zavlažovaných fertigační vodou. Nejmenší rozdíl v tloušťce kořenů byl pozorován ve skupině 3, kde byly kořeny stromů s dešťovou vodou a stromů zavlažovaných fertilizací blíže u sebe.

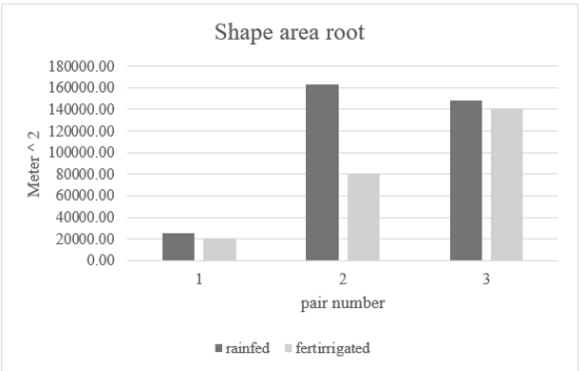
Je pozoruhodné, že stromy zalévané deštěm vykazují konzistentní průměrný průměr kořenů bez ohledu na jejich velikost. Naproti tomu průměr kořenů fertigovaných stromů roste s velikostí a dosahuje hodnot srovnatelných s průměrem kořenů stromů zalévaných deštěm pouze u největšího stromu.

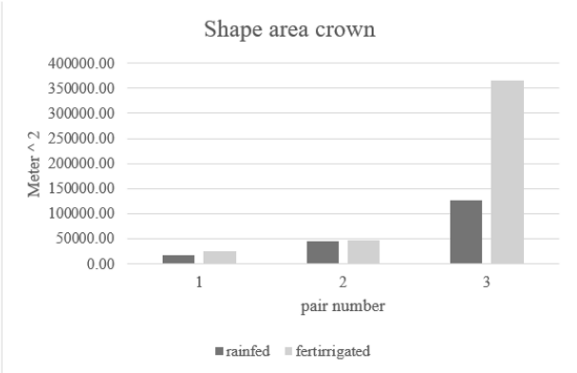


Graf 11. Průměrný průměr kořenů kořenů s dešťovou vodou a kořenů s ferittigací. N = 6

Srovnání plochy využívané kořenovým a korunovým systémem

Rozdíl mezi kořeny zavlažovanými deštěm a kořeny zavlažovanými hnojivy byl nejvýraznější u kořenů páru 2. (graf 12). Nejvýraznější rozdíl v ploše koruny mezi stromy zavlažovanými hnojivem a stromy zavlažovanými dešťovou vodou byl pozorován u páru 3, největšího páru. U zbývajících dvou párů byl rozdíl v ploše koruny mezi fertigovanými a dešťovými stromy minimální.

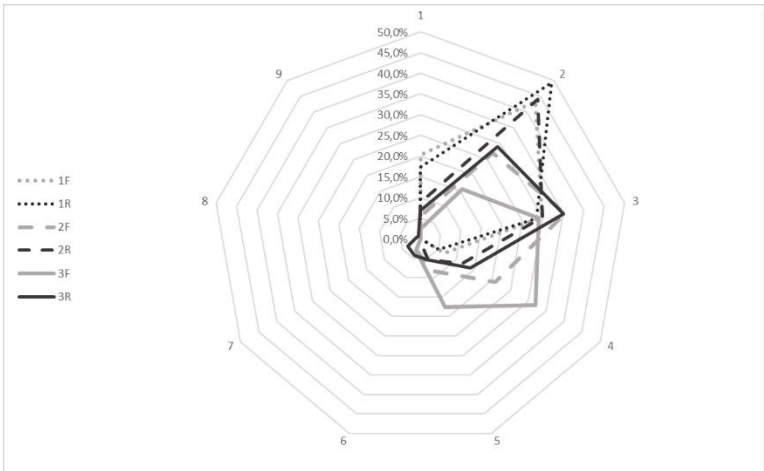




Graf 12. Porovnání kořene a koruny 3 párů

Porovnání pořadí větví a kořenů

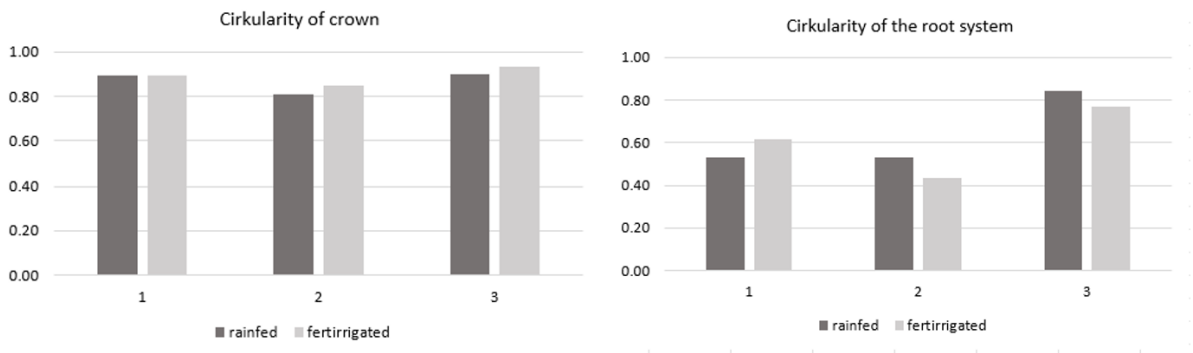
Zatímco větve se dělily až na tři řády, kořenové řády sahaly až do devátého řádu. Kořeny prvního řádu převažovaly u nejmenších stromů (dvojice 1) a u opadavého stromu z dvojice 2. U největšího stromu se projevila společná dominance kořenů třetího a čtvrtého řádu, zatímco u zbývajících dvou stromů převažovaly kořeny třetího řádu (graf 13).



Graf 13. Relativní podíl kořenových řádů podle stromů. F: zavlažované; R: deštěm zavlažované. N= 6

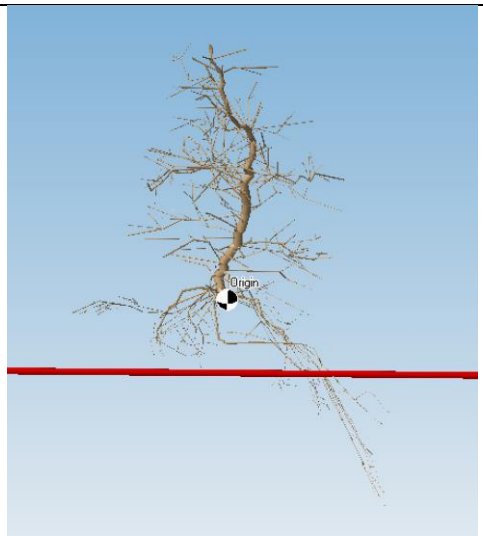
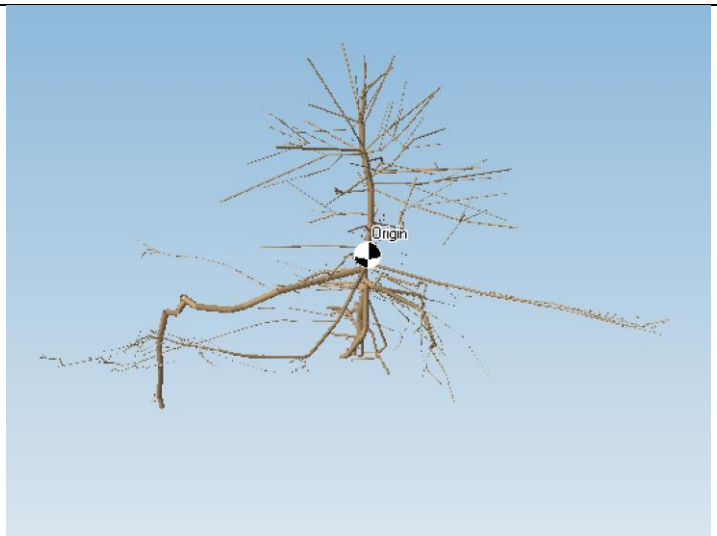
Kruhovitost koruny a kořene

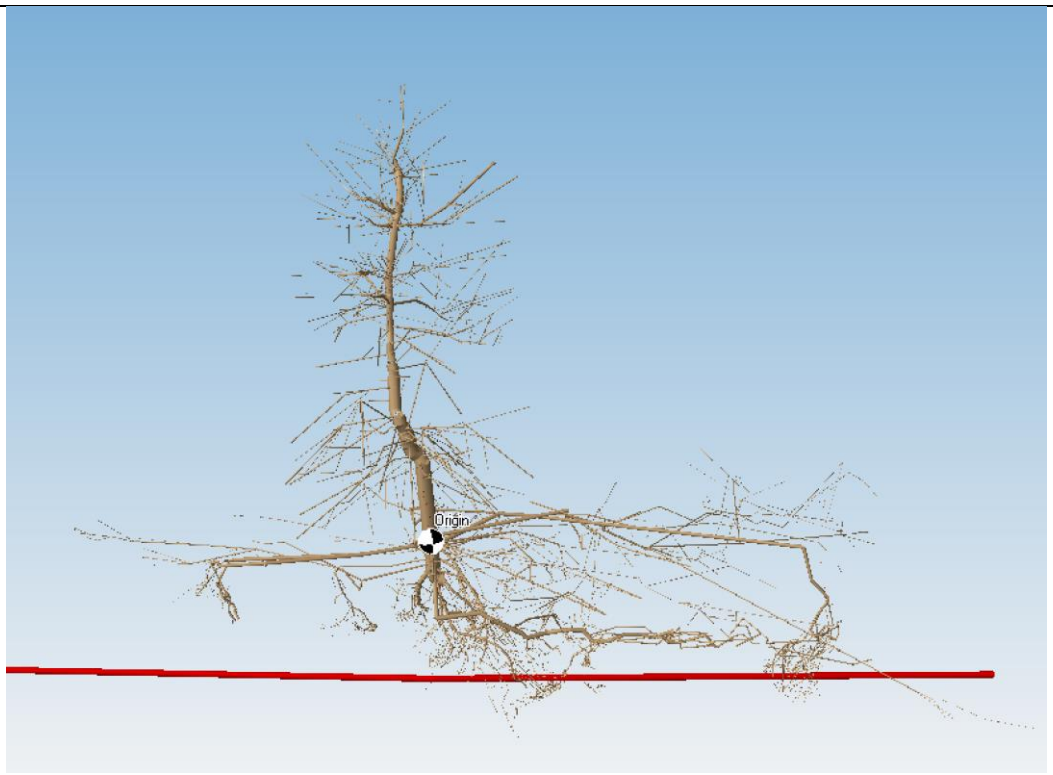
Kořeny mají obvykle méně kruhový tvar než koruny stromů. U všech stromů neexistují relevantní rozdíly v kruhovitosti korun. Největší stromy (dvojice 3) však vykazovaly větší kruhovitost kořenů než ostatní dvojice (graf 12). Nejvýraznější rozdíl v kruhovitosti se vyskytuje u dvojice 1 a dvojice 2, kde je rozdíl mezi kořeny a korunou největší, zatímco třetí dvojice vykazuje menší rozdíl v kruhovitosti. Největší kruhovitost kořenů má však dvojice 3.

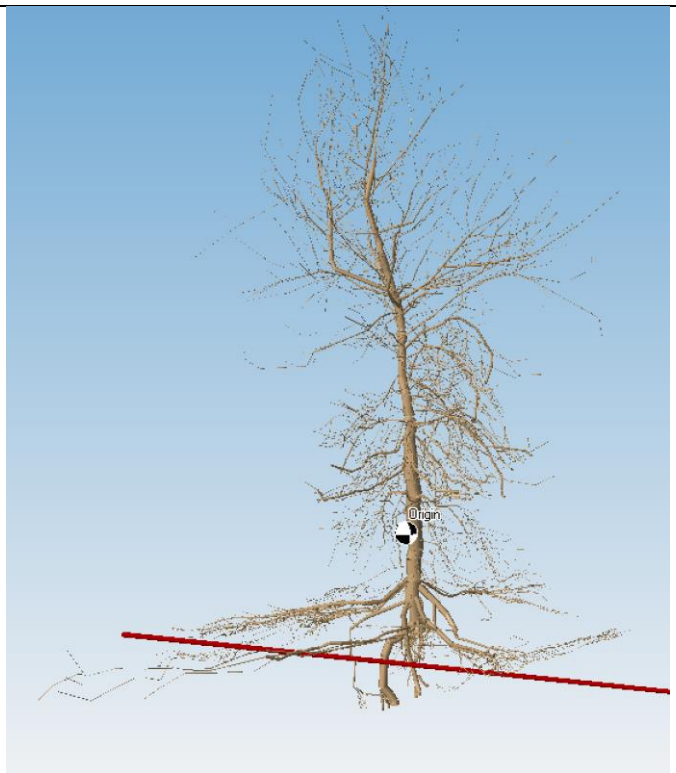


Graf 14. Kruhovitost koruny a kořene

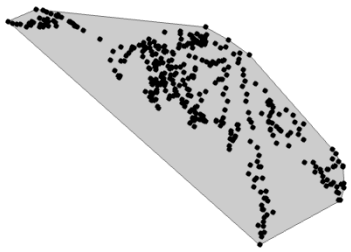
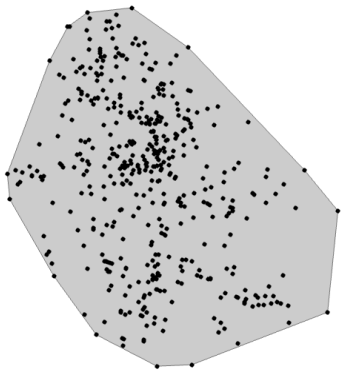
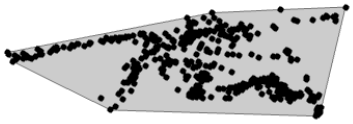
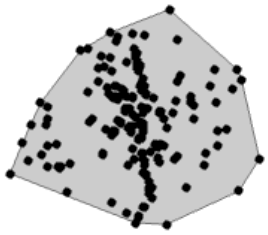
9.3.1 3D modely Quercus suber – červené linie znázorňují hadice a vyskytují se pouze u feernetovaných jedinců

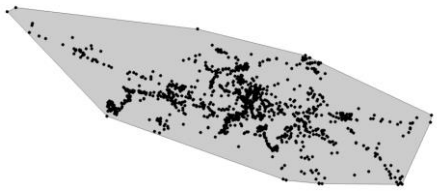
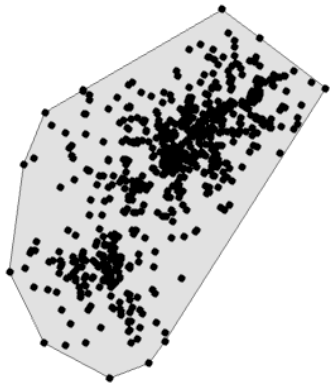
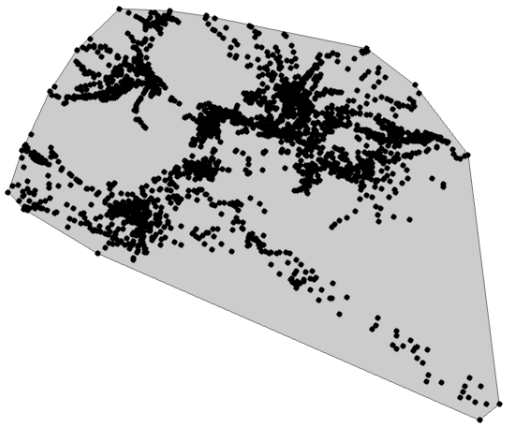
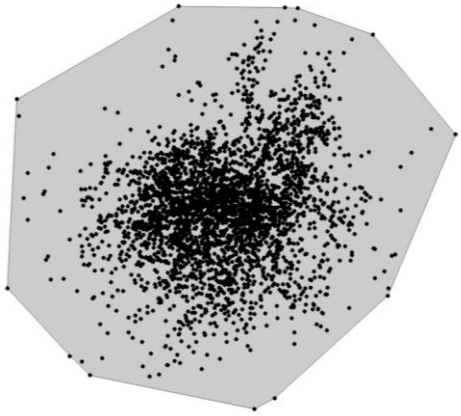
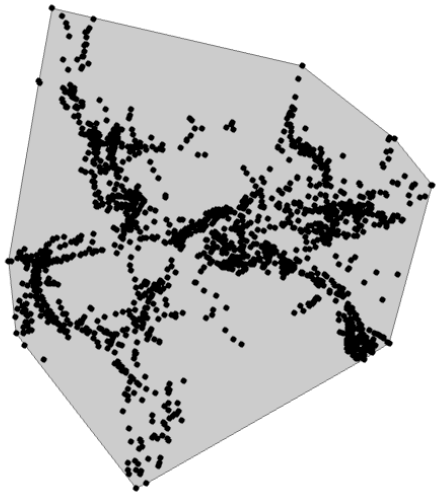
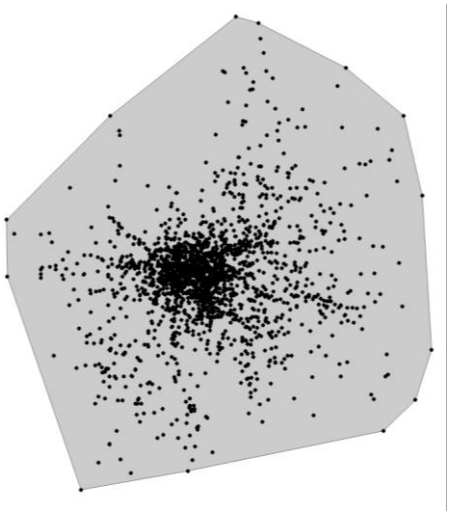
1F	
1R	

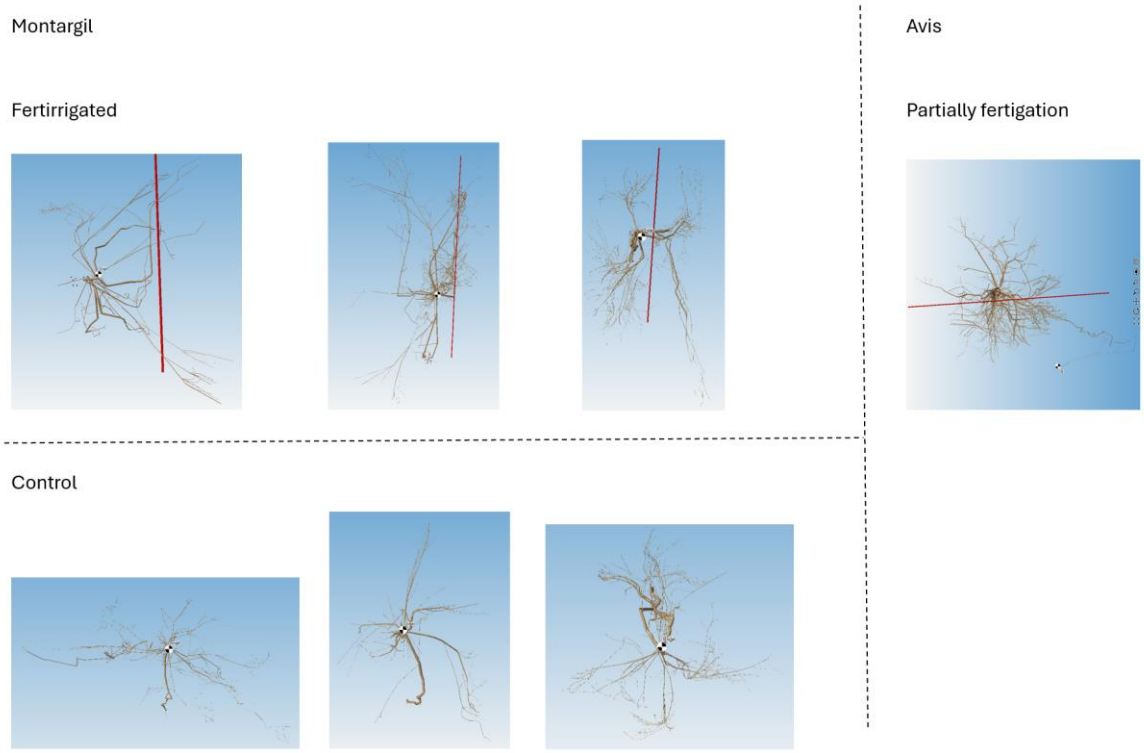
2F	
2R	

3F	
3R	

9.3.2 Srovnání plochy využívané kořenovým a korunovým systémem

Tree	Root	Crown
Tree 1F		
Tree 1R		
Tree 2F		

Tree 2R		
Tree 3F		
Tree 3R		



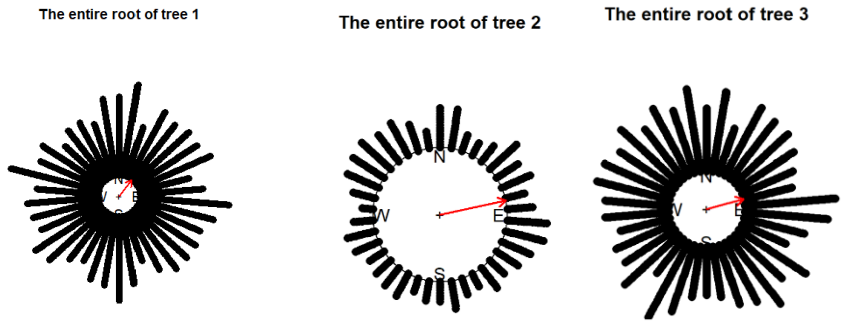
Obrázek 106. 3D modely kořenů. červená linie zobrazuje zalévací zařízení

Celé kořeny

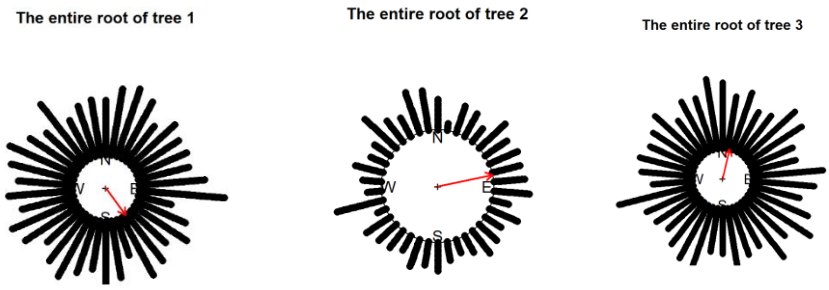
Kořeny zavlažovaných stromů jsou zpravidla orientovány na východ, kde se nachází zavlažovací trubka. Strom 1 má kořeny orientované především na severovýchod, zatímco stromy 2 a 3 jsou orientovány přímo na východ, směrem k trubici. V případě kontrolních stromů jsou jejich kořeny opět orientovány převážně na východ. Strom 1 je však orientován na jihovýchod, strom 2 přímo na východ a strom 3 se od předchozího stromu 3 liší orientací na severovýchod. Poslední zkoumaný strom má kořeny orientovány na sever. V tomto případě se hadice nachází na jihu, takže většina kořenů roste směrem od hadice (graf 15).

Podpovrchové kapkové zavlažování.

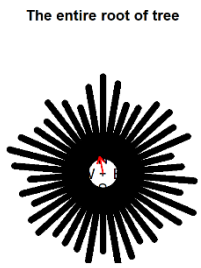
Zavlažované



Nezalévané



Povrchové kapkové zavlažování



Graf 15. Graf zobrazuje orientaci celého kořene: Zavlažování, kontrola a povrchová kapková závlaha. Červené šipky ukazují směr orientace

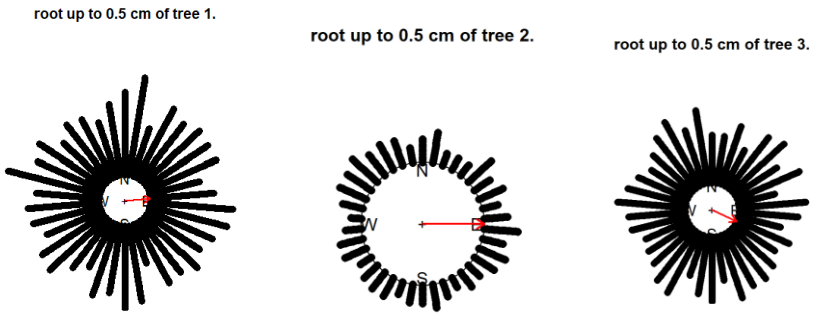
Kořeny do 0.5 cm

Kořeny menší než 0,5 cm (Graf 16) jsou u stromů s fertigačním systémem orientovány převážně na východ. První a druhý strom mají kořeny orientované přímo na východ, zatímco strom 3 je orientován mírně jihovýchodně. U kontrolních jedinců jsou kořeny stromu 1

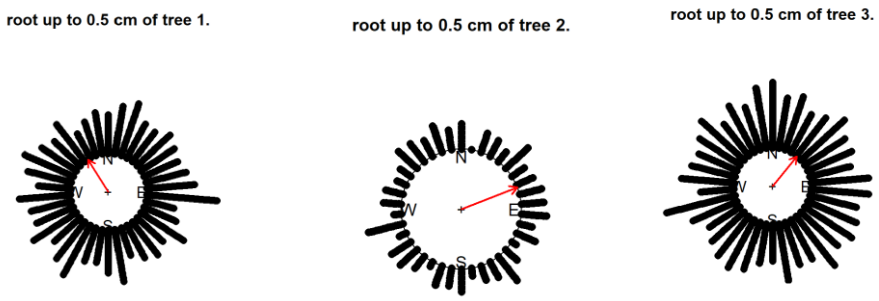
orientovány na severozápad, směrem od tubusu. Kořeny stromu 2 jsou orientovány více na východ, zatímco kořeny stromu 3 směřují na severovýchod. Poslední strom z oblasti Avis má kořeny orientovány na sever, kde se nachází hadice.

Podpovrchové kapkové zavlažování.

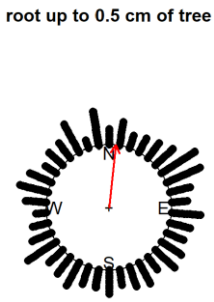
Zavlažované



Nezalévané



Povrchová kapkové zavlažování



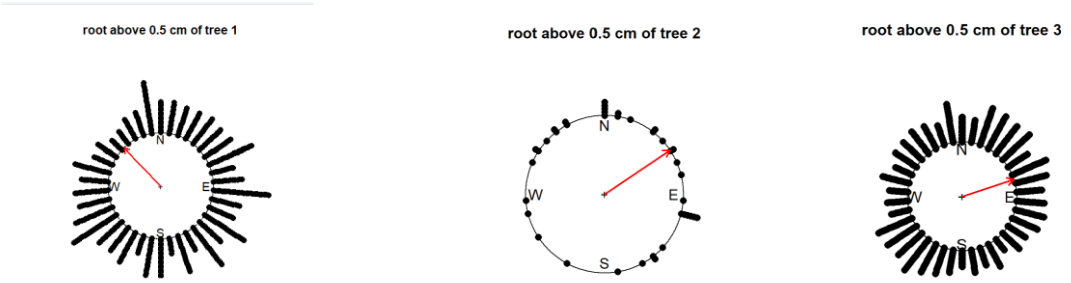
Graf 16. Graf zobrazuje orientační kořen do 0,5 cm: a povrchové kapkové závlahy. Šipky ukazují směr orientace

Kořeny nad 0.5 cm

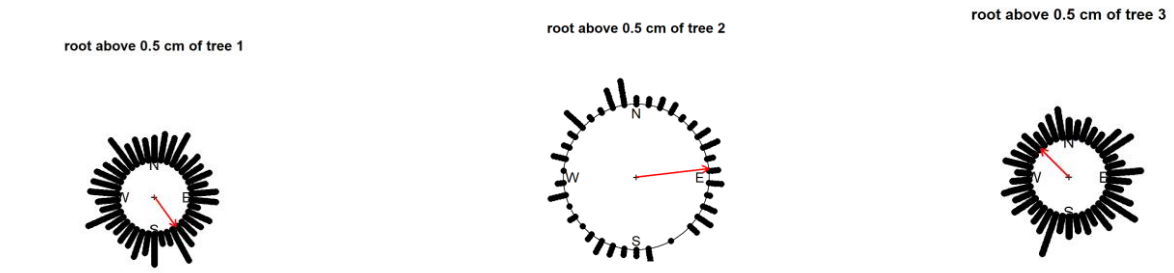
Kořeny větší než 0,5 cm (graf 17) u hnojených jedinců již nevykazují jednotnou orientaci. 1. strom má kořeny orientované na severozápad, zatímco kořeny2. stromu jsou orientovány na severovýchod. 3. strom má kořeny orientované na východ. U kontrolních stromů jsou kořeny stromu 1 orientovány na jihovýchod, kořeny stromu 2 na východ a kořeny stromu 3 na severozápad. Částečně hnojený strom má kořeny orientované na západ, ani směrem k hadici, ani od ní.

Podpovrchové kapkové zavlažování.

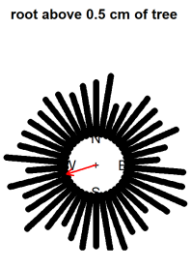
Zavlažované



Nezalévané



Povrchové kapkové zavlažování.

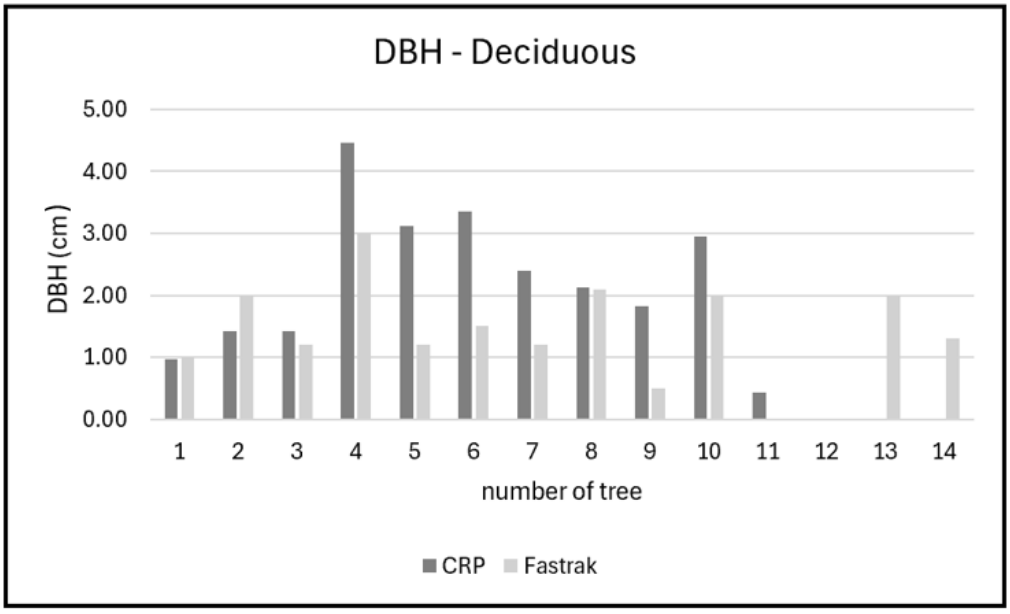


Graf 17:Graf ukazuje orientační kořen nad 0,5 cm: a povrchovou kapkovou závlahou. Šipky ukazují směr orientace

9.4 Srovnání měření pomocí magnetického digitizéru a jiných moderních dendrometrických metod, zejména fotogrammetrie, nebo lidaru.

Porovnání DBH listnatých dřevin

V případě listnatých dřevin vykazovala metoda CRP obvykle vyšší průměry kmenů než metoda Fastrak. Například u stromu číslo 4 metoda CRP naměřila průměr přes 4 cm, zatímco metoda Fastrak pouze kolem 2 cm, což představuje největší rozdíl mezi oběma metodami. Podobné rozdíly byly pozorovány u stromů 5, 6 a 10, kde metoda CRP měřila přibližně dvojnásobné hodnoty oproti metodě Fastrak. Na druhou stranu, u stromů 1, 2, 3 a 8 byly hodnoty naměřené oběma metodami velmi podobné, s průměry okolo 1 cm, což naznačuje větší shodu mezi měřeními. Specifický problém nastal u stromu číslo 12, kde metoda CRP nevypočítala DBH nad 1.30 m, což vedlo k hodnotě 0. To ukazuje, že pro některé stromy mohou být výsledky metody CRP nedostatečné nebo neúplné. U stromu 11 byly naměřené hodnoty obou metod velmi nízké, pod 1 cm, což může být důsledkem chyb měření nebo technických problémů. Zajímavé je, že stromy 13 a 14 mají hodnoty pouze z metody Fastrak, což ukazuje na možnost absence měření metodou CRP. Celkově metoda CRP vykazuje tendenci měřit vyšší průměry kmenů než metoda Fastrak, což může být důsledkem rozdílů v technologiích a přesnosti měření obou metod. RMSE pro DBH u listnatých dřevin je 1.185089, což nám může pomoci určit, zda 3D modely získané fotogrammetrií nebo metodou Fastrak jsou více shodné (graf 18).

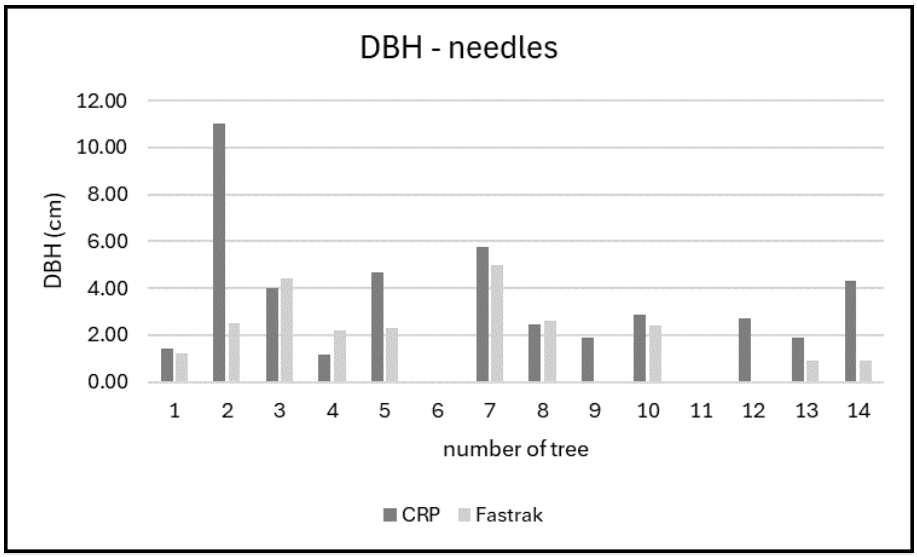


Graf 18. Zobrazuje výsledky měření průměru kmenů (DBH) 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání DBH jehličnatých dřevin

V případě měření jehličnatých dřevin metoda CRP obvykle poskytuje vyšší průměry kmenů než metoda Fastrak. Tento rozdíl je nejvýraznější u konkrétních stromů, jako jsou stromy číslo 2, 5 a 14, kde metoda CRP naměřila průměry přes 10 cm, 4 cm a 4 cm. Naopak metoda Fastrak měřila průměry kolem 2 cm, 2 cm a 1 cm, což ukazuje na výrazný nesoulad mezi oběma metodami. Tento trend naznačuje, že metoda CRP má tendenci k měření vyšších hodnot průměru kmenů v porovnání s metodou Fastrak. U některých stromů však byly hodnoty měřené oběma metodami velmi podobné. Například u stromů 1, 3, 8 a 10 byly rozdíly mezi naměřenými hodnotami minimální, což naznačuje, že v těchto případech obě metody poskytují konzistentní výsledky. U stromu číslo 1 naměřila metoda CRP průměr 1.43 cm, zatímco metoda Fastrak naměřila 1.44 cm. Tento vysoký stupeň shody mezi metodami ukazuje, že v některých případech mohou obě metody poskytovat podobné výsledky. Strom číslo 11 a strom číslo 6 byly menší než 1.30 m, což vedlo k tomu, že se u těchto stromů nezobrazují žádné hodnoty. Tento fakt naznačuje omezení v metodice měření, kdy u menších stromů je obtížné přesně měřit oběma metodami. Takové omezení může ovlivnit přesnost a spolehlivost výsledků získaných pro menší jedince. Celkově graf ukazuje variabilitu měření průměru kmenů mezi metodami CRP a Fastrak pro různé jehličnaté stromy. Metoda CRP má častější tendenci měřit vyšší

hodnoty průměru kmenů. RMSE pro DBH u jehličnatých dřevin je 2.280459. Tento údaj o chybě měření naznačuje, že metoda CRP může mít nižší přesnost pro jehličnaté stromy ve srovnání s metodou Fastrak. Na základě těchto výsledků lze říci, že shodnější výsledky DBH jsou dosaženy při tvorbě 3D modelů listnatých dřevin. To ukazuje, že metoda CRP může být vhodnější pro měření listnatých stromů, kde její schopnost poskytovat vyšší hodnoty průměru kmenů může být výhodou. Zároveň je třeba zvážit, zda metoda Fastrak může být preferována v aplikacích, kde je vysoká přesnost měření klíčová, a to zejména pro jehličnaté stromy (graf 19).

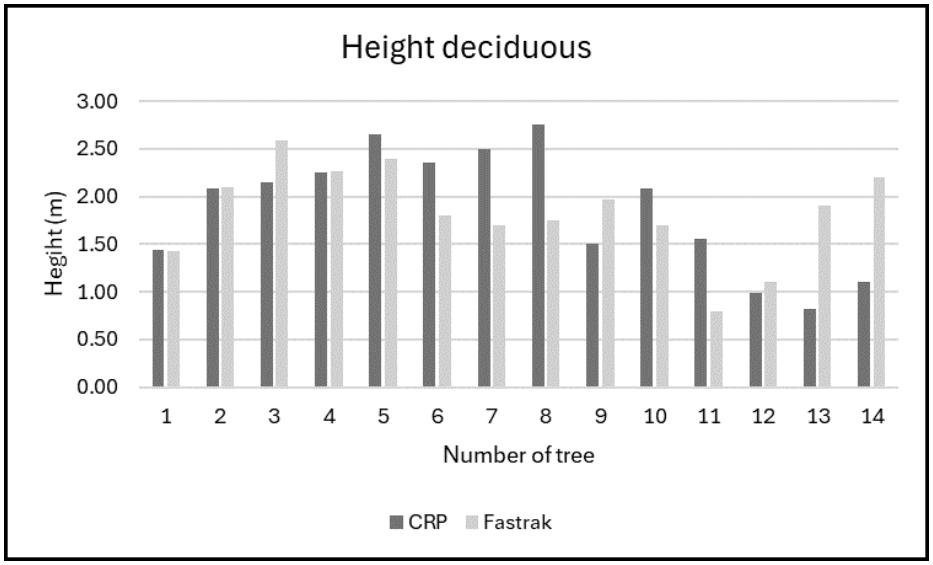


Graf 19. Zobrazuje výsledky měření průměru kmenů (DBH) 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání výšky listnatých dřevin

Při porovnávání výšek listnatých dřevin mezi metodami fotogrammetrie a Fastrak se objevují zajímavé rozdíly a vzorce, které odrážejí specifické vlastnosti obou metod. Ve čtyřech případech byly naměřené výšky oběma metodami téměř shodné, což naznačuje vysokou míru shody v těchto konkrétních měřeních. To může být indikátorem, že obě metody jsou v těchto případech stejně účinné při měření výšek. Na druhou stranu, v šesti případech fotogrammetrie naměřila vyšší výšky než Fastrak. Tento trend může naznačovat, že fotogrammetrie má tendenci vykazovat vyšší hodnoty, což může být způsobeno různými faktory včetně měřicí technologie nebo metodikou zpracování dat. Například u stromu číslo 7 byla výška naměřená

fotogrammetrií 2.5 metru, zatímco Fastrak měřil pouze nad 1.5 metru. U stromu číslo 8 fotogrammetrie vykázala výšku téměř 3 metry, zatímco Fastrak naměřil výšku pouze nad 1.5 metru. Naopak ve čtyřech případech fotogrammetrie vytvořila nižší výšky než metoda Fastrak. Tento rozdíl může být způsoben různými vlivy, včetně počasí, jako je vítr, který hrál významnou roli při měření výšek. Vítr mohl způsobit podhodnocení výšek naměřených fotogrammetrií. Tento vliv je patrný na stromech číslo 3, 9, 13 a 14, kde Fastrak vykázal výrazně vyšší hodnoty. Například u stromu číslo 13 naměřila fotogrammetrie výšku menší než 1m, zatímco Fastrak dosáhl téměř 2m. Obě metody se však v některých případech shodovaly, jak ukazují stromy číslo 1, 2, 4 a 5, kde byly hodnoty téměř identické nebo velmi podobné s chybovostí pouze v několika centimetrech. Pro přesnější porovnání výsledků obou metod byla vypočtena odchylka, která v tomto případě činila 0.63. Přestože mezi metodami existují určité rozdíly, celková přesnost měření výšek dřevin je relativně vysoká (graf 20).

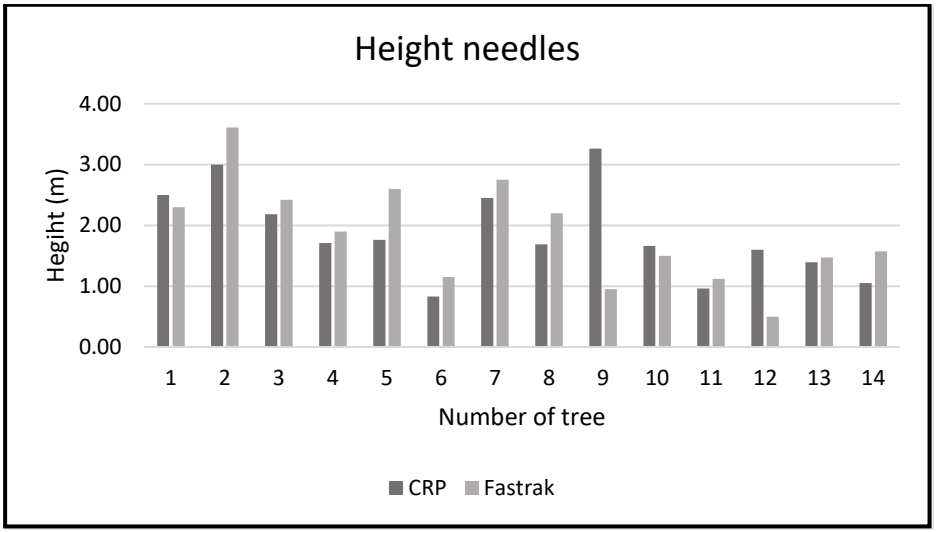


Graf 20. Zobrazuje výsledky měření výšky 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání výšky jehličnatých dřevin

Při porovnávání měření výšek jehličnatých dřevin pomocí dvou metod, fotogrammetrie a Fastraku, se ukazuje, že výsledky jsou obecně velmi podobné, přičemž rozdíly nejsou výrazné. Ve většině případů jsou výšky téměř vyrovnané. Konkrétně v šesti případech měly výšky naměřené oběma metodami srovnatelné výsledky. Fotogrammetrie naměřila vyšší hodnoty pouze ve třech případech, zatímco v pěti případech vykázala nižší výšky než metoda

Fastrak. Nicméně, porovnání obou metod odhalilo výrazné rozdíly pouze ve dvou specifických případech. U stromu číslo 9 dosáhla výška vypočtená pomocí fotogrammetrie přibližně 3.50 m, zatímco metoda Fastrak měřila výšku pouze 1 m. U stromu číslo 12 dosáhla výška naměřená fotogrammetrií hodnoty 1.5 m, zatímco Fastrak ukázal hodnotu pouze 0.5 m. K menšímu rozdílu došlo u stromu číslo 5, kde fotogrammetrie naměřila výšku kolem 1.5 metru, zatímco Fastrak ukázal hodnotu 2.5 metru. U ostatních stromů se rozdíly ve výškách pohybovaly v rámci 0,5m, v těchto případech byly výsledky obou metod blízké. RMSE pro měření výšek jehličnatých dřevin byla v tomto případě 0.78. Tento údaj naznačuje, že chyby v měření nejsou výrazné a rozdíl mezi chybovostí při měření výšek listnatých a jehličnatých dřevin nebyl tak markantní. Lze tedy konstatovat, že přesnost měření výšek nezávisí zásadně na použité metodě měření. Zjištění ukazují, že ačkoli mohou existovat určité odchylky mezi metodami, ve většině případů poskytují obě metody srovnatelné výsledky (graf 21).

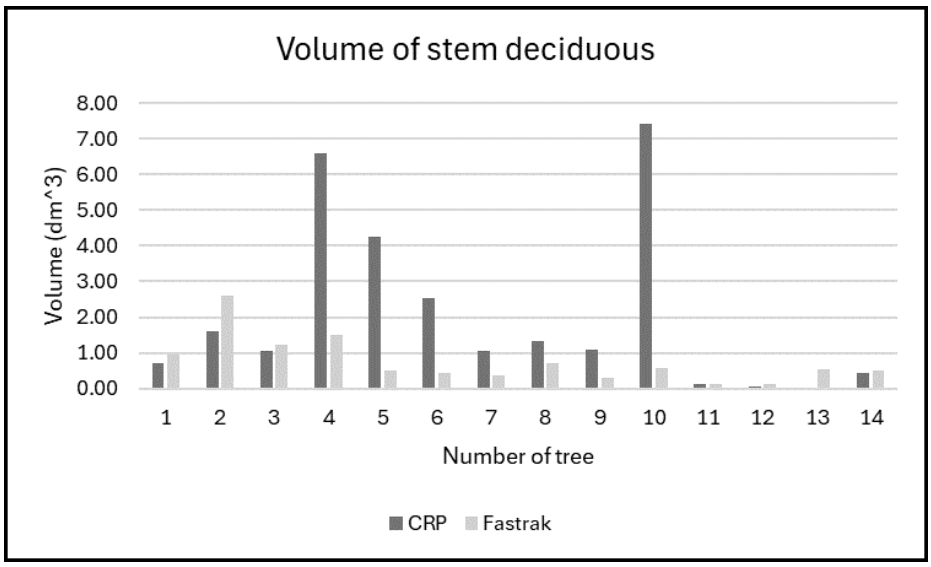


Graf 21. Zobrazuje výsledky měření výšky 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu kmene listnatých dřevin

Při porovnávání objemu kmene listnatých dřevin se ukazuje, že metoda fotogrammetrie má tendenci výrazně nadhodnocovat naměřené hodnoty ve srovnání s metodou Fastrak. Zejména u sedmi stromů, konkrétně u stromů označených čísly 4, 5, 6, 7, 8, 9 a 10, byly hodnoty naměřené fotogrammetrií výrazně vyšší než hodnoty získané metodou Fastrak. Například u stromu číslo 4 byla fotogrammetrií naměřena hodnota objemu kolem 6.5 dm^3, zatímco Fastrak vykázal pouze 1.5 dm^3. Podobné rozdíly byly zaznamenány u stromu číslo 5, kde

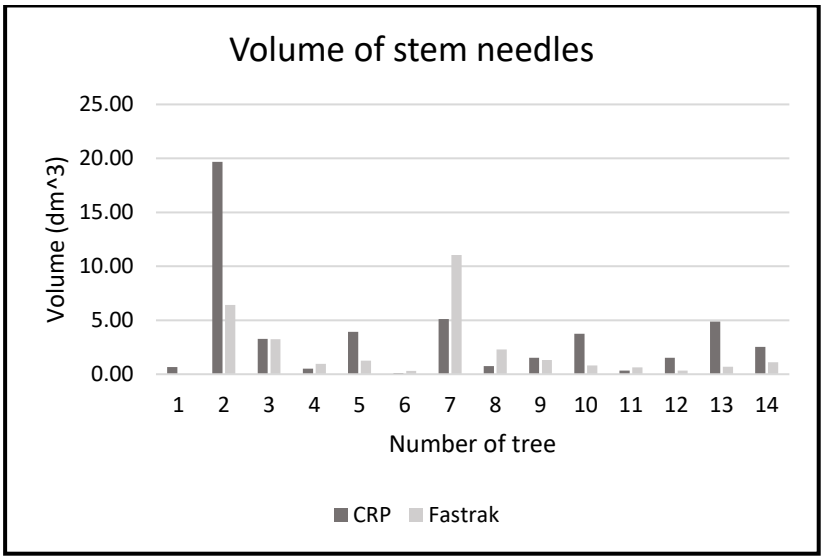
fotogrammetrie ukázala objem přibližně 4 dm³, zatímco Fastrak naměřil pouze 0.5 dm³. U stromu číslo 6 byl rozdíl o něco menší, kdy fotogrammetrie naměřila přibližně 2 dm³, zatímco Fastrak pouze 0.5 dm³. Největší odchylka byla zaznamenána u stromu číslo 10, kde fotogrammetrie zjistila objem přes 7 dm³, zatímco metoda Fastrak vykázala pouze asi 1 dm³. Na druhou stranu, ve dvou případech, konkrétně u stromů číslo 2 a 13, byla naměřená hodnota metodou Fastrak vyšší než hodnoty získané fotogrammetrií. U stromu číslo 2 dosáhl Fastrak hodnoty přibližně 2 dm³, zatímco fotogrammetrie naměřila kolem 1.5 dm³. U stromu číslo 13 byla hodnota naměřená Fastrakem přibližně 0.5 dm³, zatímco fotogrammetrie ukázala nižší hodnotu. Naproti tomu u stromů číslo 1, 3, 11, 12 a 14 byly hodnoty naměřené oběma metodami velmi podobné, což naznačuje, že obě metody poskytují v těchto případech vyrovnané výsledky. Celková chyba měření, vyjádřená pomocí RMSE, byla 2.59, což je výrazně horší než chyby zjištěné při měření výšky nebo DBH listnatých dřevin. Tento vysoký RMSE ukazuje na značné odchylky v měření objemu, což může být důsledkem specifických vlastností metod, různých přístupů k měření a zpracování dat, nebo možných chybných kalibrací a vlivů prostředí (graf 22).



Graf 22. Zobrazuje výsledky měření objemu kmene 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu kmene jehličnatých dřevin

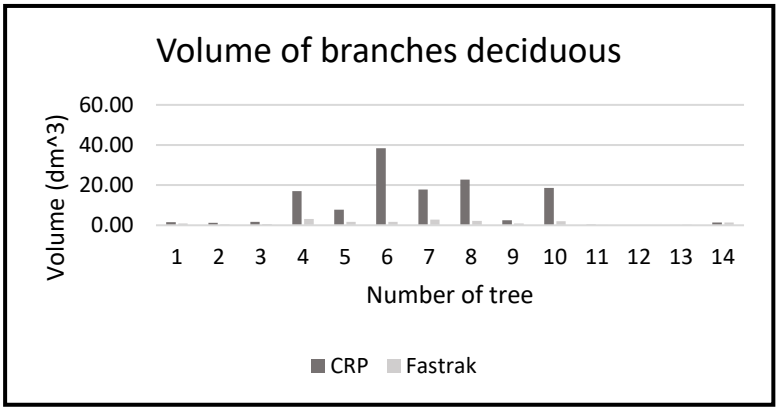
Při porovnání metod pro zjišťování objemu jehličnatých dřevin se ukázalo, že fotogrammetrie nadhodnocovala výsledky v sedmi případech, zatímco metoda Fastrak měla vyšší hodnoty pouze ve dvou případech. U zbylých pěti stromů byly naměřené hodnoty oběma metodami velmi podobné, což naznačuje lepší shodu v těchto případech. Podrobněji, zjišťování objemu pomocí fotogrammetrie nadhodnocovalo výsledky u stromů číslo 1, 2, 5, 10, 12, 13 a 14. Například u stromu číslo 1 fotogrammetrie naměřila objem přes 0.5 dm³, zatímco Fastrak zaznamenal hodnotu pod 0.5 dm³. Nejvýraznější rozdíl byl u stromu číslo 2, kde fotogrammetrie naměřila objem kolem 20 dm³, zatímco Fastrak ukázal pouze přibližně 6 dm³. U stromu číslo 5 nebyl rozdíl tak extrémní, ale fotogrammetrie nadhodnotila objem o 2 dm³ ve srovnání s Fastrakem. Podobně u stromů číslo 10, 12 a 14 nebyly rozdíly mezi metodami tak výrazné, ale stále se objevovalo nadhodnocení ze strany fotogrammetrie. Výraznější rozdíl byl zaznamenán u stromu číslo 13, kde fotogrammetrie naměřila objem kolem 5 dm³, zatímco Fastrak pouze 0.5 dm³. Naopak, vyšší hodnoty byly naměřeny metodou Fastrak u stromů číslo 7 a 8. U stromu číslo 7 Fastrak zjistil objem přes 10 dm³, zatímco fotogrammetrie naměřila pouze 5 dm³. U stromu číslo 8 byl rozdíl menší, ale Fastrak naměřil hodnotu vyšší o 0.5 dm³ než fotogrammetrie. U zbývajících stromů číslo 3, 4, 6, 9 a 11 byly rozdíly mezi naměřenými hodnotami menší než 0.5 dm³. RMSE chyba při měření objemu u jehličnatých dřevin byla 4.23, což ukazuje na horší zjistitelnost objemu kmene v případě jehličnatých dřevin ve srovnání s listnatými dřevinami (graf 23).



Graf 23. Zobrazuje výsledky měření objemu kmene 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví listnatých dřevin

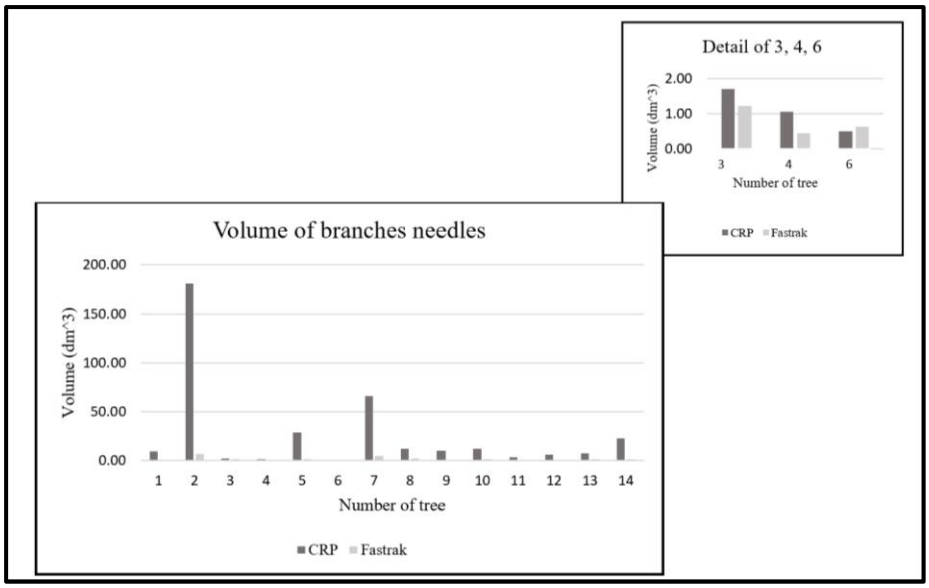
Při porovnávání objemu větví mezi metodou fotogrammetrie a metodou Fastrak byly zaznamenány výrazné rozdíly. Fotogrammetrie v šesti případech výrazně nadhodnocovala objemy, což je v kontrastu s výsledky metody Fastrak. Nikdy se nestalo, že by fotogrammetrie podhodnocovala objemy. Tento jev naznačuje, že fotogrammetrie má tendenci poskytovat vyšší odhady objemů než skutečné hodnoty, přičemž její výsledky jsou v některých případech srovnatelné s výsledky metody Fastrak. Podrobněji, nejvýraznější rozdíl byl zaznamenán u stromu číslo 6, kde fotogrammetrie naměřila objem téměř 40 dm^3, zatímco Fastrak vykázal pouze přibližně 2 dm^3. U stromů číslo 4, 5, 7, 8 a 10 byly rozdíly mezi objemy rovněž značné; fotogrammetrie v těchto případech nadhodnotila objemy přibližně o 20 dm^3 až 14 dm^3 ve srovnání s metodou Fastrak. U stromů 4, 8 a 9 byl rozdíl hodnot podobný, kdy fotogrammetrie naměřila objem přibližně 20 dm^3, zatímco Fastrak naměřil necelých 5 dm^3. Na druhou stranu, u zbývajících stromů, konkrétně u stromů číslo 1, 2, 3, 9, 11, 12 a 13, byly rozdíly mezi metodami menší, v rozmezí od 0.12 dm^3 do 1.69 dm^3. Strom číslo 14 představuje výjimečný případ, kde objem naměřený oběma metodami se zcela shodoval. Tento případ ukazuje na situaci, kdy obě metody poskytly identické výsledky na rozdíl od jiných stromů, kde byly rozdíly mnohem výraznější. RMSE chyba pro měření objemu větví dosáhla hodnoty 13.41, což je výrazně více než RMSE pro měření objemu kmene, které bylo pouze 2.59. Tento rozdíl naznačuje, že fotogrammetrie má větší potíže s přesným určením objemu větví ve srovnání s kmenem. Tyto výsledky ukazují, že přesnost metody fotogrammetrie může být ovlivněna specifickými charakteristikami větví, což činí měření objemu větví méně spolehlivým ve srovnání s měřením objemu kmene (graf 24).



Graf 24. Zobrazuje Porovnání objemu větví listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví jehličnatých dřevin

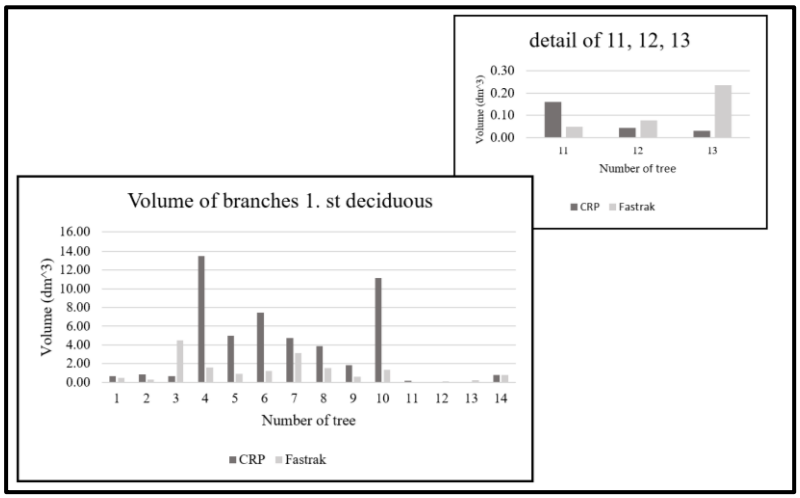
U jehličnatých dřevin podobně jako u listnatých, fotogrammetrie vykazuje tendenci výrazně nadhodnocovat objem stromů ve srovnání s metodou Fastrak. Tento rozdíl je obzvláště patrný u několika stromů, kde fotogrammetrie poskytuje výrazně vyšší hodnoty. Například u stromu číslo 2 naměřila objem téměř 200 dm³, zatímco metoda Fastrak přisoudila tomuto stromu objem nedosahující ani 1 dm³. Podobné výrazné odchylky byly zaznamenány u stromů číslo 5, 7 a 14. U stromu číslo 5 naměřila fotogrammetrie objem přibližně 30 dm³, zatímco Fastrak pouze 1.5 dm³. Strom číslo 7 byl vyhodnocen fotogrammetrií na přibližně 60 dm³, zatímco Fastrak ukázal objem kolem 5 dm³. U stromu číslo 14 fotogrammetrie vypočítala objem kolem 20 dm³, zatímco metoda Fastrak stanovila objem pouze na 1 dm³. Menší, ale stále významné rozdíly byly zaznamenány u stromů číslo 1, 8, 9, 10, 11, 12 a 13, kde rozdíly v naměřených objemech činily od 5 do 10 dm³. Nejmenší rozdíly mezi metodami byly zjištěny u stromů číslo 3, 4 a 6, kde odchylky nepřesáhly 1 dm³. Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 50.73, což je výrazná odchylka ve srovnání s menšími chybami, které byly zaznamenány u měření objemu listnatých dřevin. Tento vysoký RMSE ukazuje, že fotogrammetrie má výrazné problémy s přesným měřením objemu u jehličnatých dřevin a metoda Fastrak je spolehlivější. Výsledky ukazují, že ačkoli je fotogrammetrie efektivní při měření objemu listnatých dřevin, její použití u jehličnatých dřevin vede k výrazným nepřesnostem (graf 25).



Graf 25: zobrazuje Porovnání objemu větví jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 1.řádu listnatých dřevin

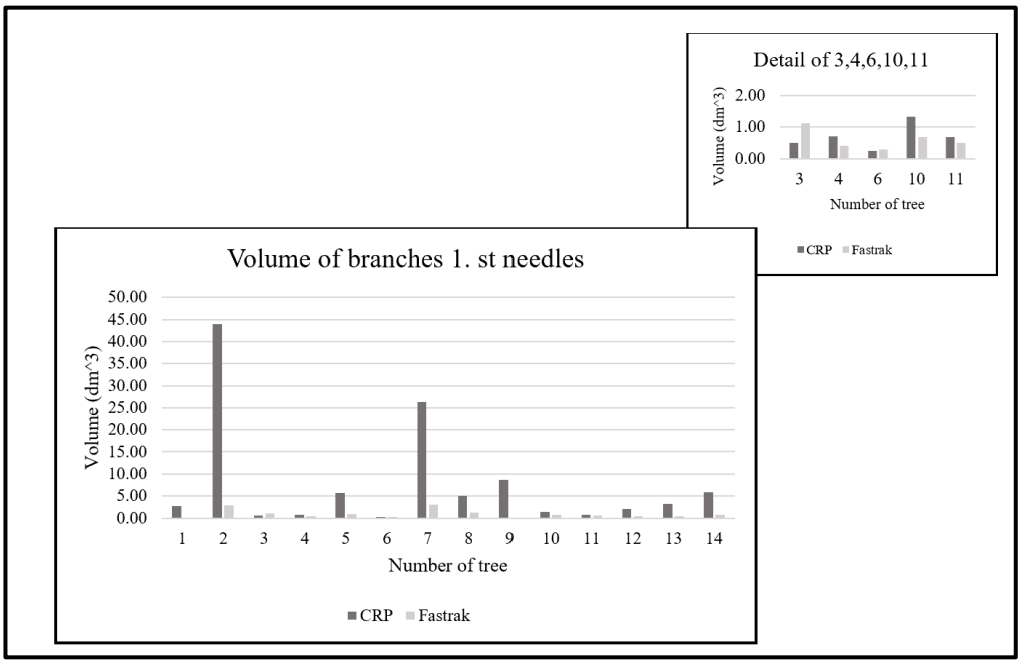
Při zjišťování objemu prvního řádu u listnatých dřevin se opět ukazuje tendence fotogrammetrie k nadhodnocování. Ze všech změřených stromů fotogrammetrie vykázala nadhodnocení objemu ve čtyřech případech, zatímco v jednom případě došlo k podhodnocení. Zbývajících pět případů vykazuje poměrně vyvážené výsledky mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak. U konkrétních stromů byly rozdíly mezi metodami značné. Například u stromu číslo 4 fotogrammetrie naměřila objem téměř 14 dm³, zatímco metoda Fastrak vykázala pouze 2 dm³. Podobně u stromu číslo 5 byl rozdíl menší, ale stále výrazný – fotogrammetrie vykázala objem o 4 dm³ vyšší než Fastrak. U stromu číslo 6 dosáhl objem podle fotogrammetrie přibližně 8 dm³, zatímco metoda Fastrak ukázala pouze 1 dm³. Největší rozdíl byl zaznamenán u stromu číslo 10, kde fotogrammetrie uvedla objem téměř o 10 dm³ vyšší než Fastrak. Naopak, v případech, kdy fotogrammetrie podhodnotila objem, jako například u stromu číslo 3, byl rozdíl přibližně 4 dm³ ve prospěch metody Fastrak. U zbývajících devíti stromů byly rozdíly mezi oběma metodami minimální, pohybovaly se v rozmezí od 0 do 2 dm³. Nejpřesnější měření bylo dosaženo u stromu číslo 14, kde obě metody poskytly shodné výsledky, bez zaznamenaného rozdílu v objemu. Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 4.77 údaj, který v celkovém kontextu není příliš vysoký. Tato chyba naznačuje, že fotogrammetrie, přestože má tendenci nadhodnocovat objem, stále poskytuje relativně konzistentní výsledky, a to zejména v případech, kdy rozdíly mezi metodami jsou minimální (graf 26).



Graf 26. Zobrazuje porovnání objemu větví 1.řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 1.řádu jehličnatých dřevin

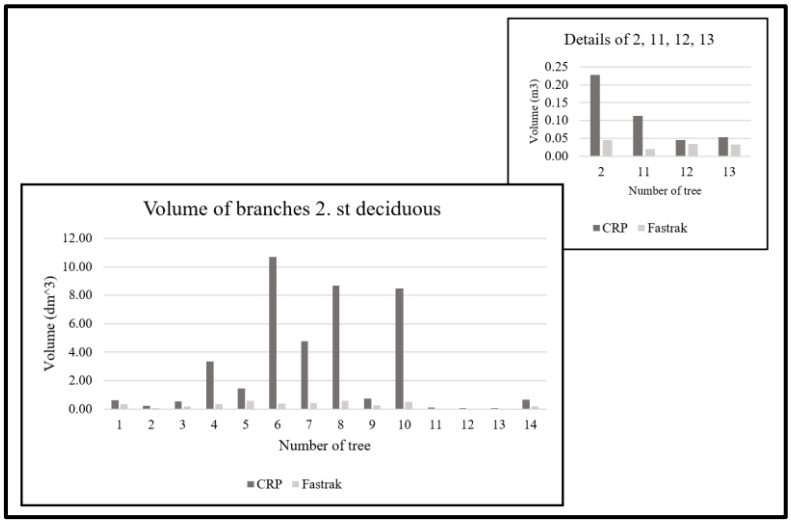
Při porovnávání metod pro zjišťování objemu prvního řádu u jehličnatých dřevin fotogrammetrie opět vykazuje tendenci k nadhodnocování, avšak výrazně vyšší hodnoty byly zaznamenány pouze ve třech případech. U stromu číslo 2 fotogrammetrie vypočetla objem přibližně 45 dm³, zatímco metoda Fastrak vykázala pouhých 3 dm³. Podobně u stromu číslo 7 byl rozdíl mezi metodami 23 dm³, přičemž fotogrammetrie udávala výrazně vyšší hodnotu. U stromu číslo 9 se objem vypočtený fotogrammetrií rovnal téměř 9 dm³, zatímco metoda Fastrak naměřila pouze 0.5 dm³. Naopak v případech, kdy metoda Fastrak vykázala vyšší objem než fotogrammetrie, byly rozdíly minimální. U stromů číslo 3 a 6 se rozdíly pohybovaly mezi 0.05 dm³ a 0.6 dm³. Ostatní stromy vykázaly mírné nadhodnocení objemu fotogrammetrií, ale tyto rozdíly nebyly tak výrazné, pohybovaly se od 0,2 dm³ do 5 dm³. Tento jev byl zaznamenán u stromů číslo 1, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 13 a 14. Celkově se objemy naměřené oběma metodami v pěti případech téměř shodovaly, což naznačuje, že fotogrammetrie může být při správném použití dostatečně přesná i pro měření objemu jehličnatých dřevin. Přestože rozdíly mezi metodami nejsou ve všech případech dramatické, celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 13.03, což je výrazně vyšší než RMSE chyby u listnatých dřevin (graf 27).



Graf 27. Zobrazuje porovnání objemu větví 1.řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 2.řádu listnatých dřevin

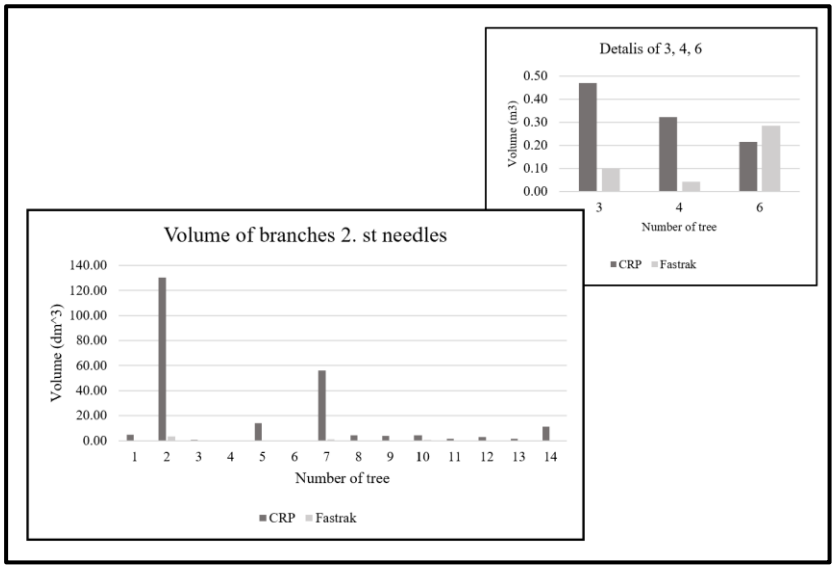
Při zjišťování objemu větví třetího řádu u listnatých dřevin fotogrammetrie opět vykazuje tendenci k nadhodnocení, podobně jako v předchozích případech. Výrazné nadhodnocení bylo zaznamenáno u stromů 6, 8 a 10. U stromu 6 fotogrammetrie vykázala objem přes 10 dm³, zatímco metoda Fastrak naměřila pouze do 0.5 dm³ (graf 28). Podobně u stromů 8 a 10 byl objem podle fotogrammetrie přibližně 8 dm³, zatímco metoda Fastrak vykázala hodnoty kolem 0.5 dm³, což ukazuje na rozdíl přibližně 8 dm³ mezi těmito metodami. I když byly u stromů 4 a 7 také zaznamenány vyšší objemy pomocí fotogrammetrie, rozdíly nebyly tak výrazné. U stromu 4 fotogrammetrie ukázala objem lehce přes 3 dm³, zatímco Fastrak naměřil do 0.5 dm³. U stromu 7 byl rozdíl mezi měřenými objemy kolem 4 dm³, což naznačuje mírnější nadhodnocení. Na druhé straně, u zbývajících devíti stromů – konkrétně u stromů 1, 2, 3, 5, 9, 11, 12, 13 a 14 – byly rozdíly mezi hodnotami naměřenými oběma metodami menší než 0.5 dm³, což ukazuje na vyšší míru shody mezi metodami v těchto případech. Tento trend naznačuje, že fotogrammetrie může být při měření objemu větví třetího řádu listnatých dřevin poměrně přesná, zejména pokud se nadhodnocení vyskytuje méně často. Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 4.36, což je lepší než u zjišťování objemu větví prvního řádu listnatých dřevin, kde byly rozdíly výraznější. Tento výsledek ukazuje, že přestože fotogrammetrie a Fastrak mohou vykazovat významné rozdíly v některých případech, většina měření poskytuje relativně přesné výsledky s nízkou chybou.



Graf 28: zobrazuje výsledky měření objemu větví 2 řádu14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 2.řádu jehličnatých dřevin

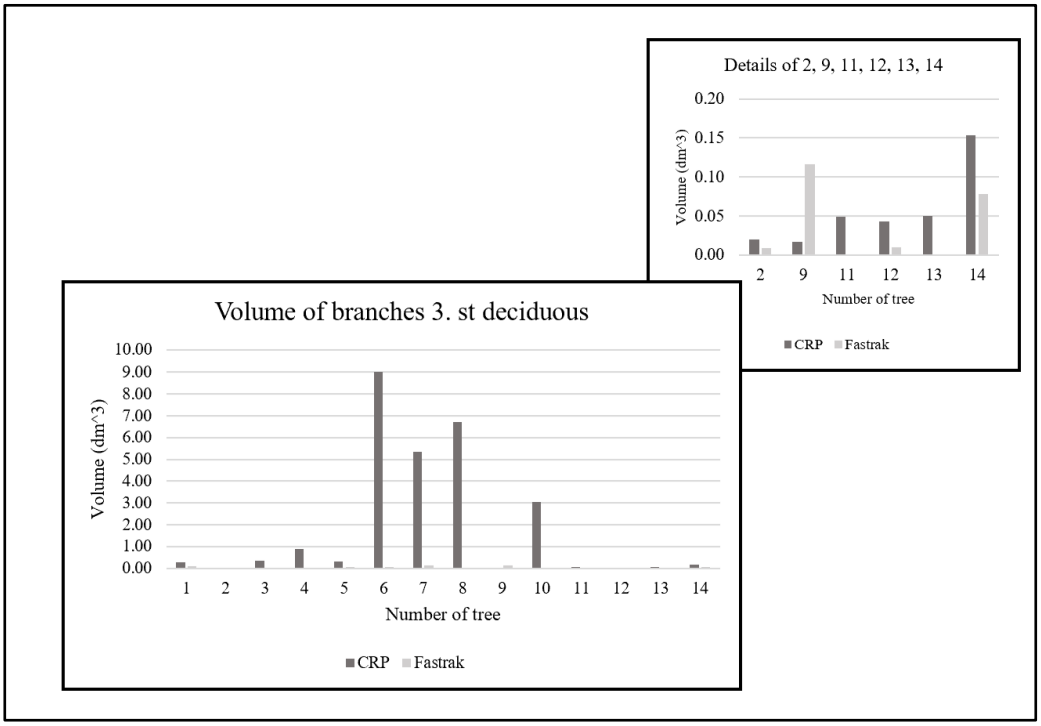
Podobně jako u předchozího porovnání objemu větví druhého řádu, fotogrammetrie opět vykazuje tendenci k nadhodnocení. U čtyř stromů bylo toto nadhodnocení velmi výrazné, kdy naměřené objemy pomocí fotogrammetrie výrazně převyšovaly hodnoty zjištěné metodou Fastrak. Například u stromu 2 fotogrammetrie zaznamenala objem přibližně 130 dm³, zatímco metoda Fastrak vykázala pouze 4 dm³. Tento rozdíl je jedním z největších mezi metodami. Druhý nejvýraznější rozdíl byl u stromu 7, kde fotogrammetrie vypočítala objem přibližně 60 dm³, zatímco Fastrak ukázal pouze kolem 1 dm³. Třetí nejvýznamnější rozdíl se objevil u stromu 5, kde fotogrammetrie vykázala objem kolem 15 dm³ a Fastrak pouze 0.5 dm³. Méně výrazné nadhodnocení fotogrammetrií se vyskytovalo u pěti dalších stromů, kde rozdíly mezi oběma metodami byly nižší, pohybovaly se od 4 dm³ do 10 dm³, například u stromů 1, 8, 10 a 14. U stromu 6 byla fotogrammetrie podhodnocena ve srovnání s metodou Fastrak, přičemž rozdíl byl minimální. Ve zbývajících pěti případech se rozdíl mezi objemy naměřenými fotogrammetrií a Fastrakem pohyboval od 0.5 dm³ do 2.5 dm³, což naznačuje, že výsledky jsou v těchto případech relativně blízké. Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 37.36, což je poměrně vysoké. Tento výsledek naznačuje, že vysoké rozdíly v objemech větví druhého řádu, měřených fotogrammetrií, výrazně přispívají k vyšší chybovosti. Tento vysoký RMSE ukazuje, že fotogrammetrie je méně přesná při měření objemu větví druhého řádu u listnatých dřevin než u jehličnatých (graf 29).



Graf 29. Zobrazuje porovnání objemu větví 2.řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 3.řádu listnatých dřevin

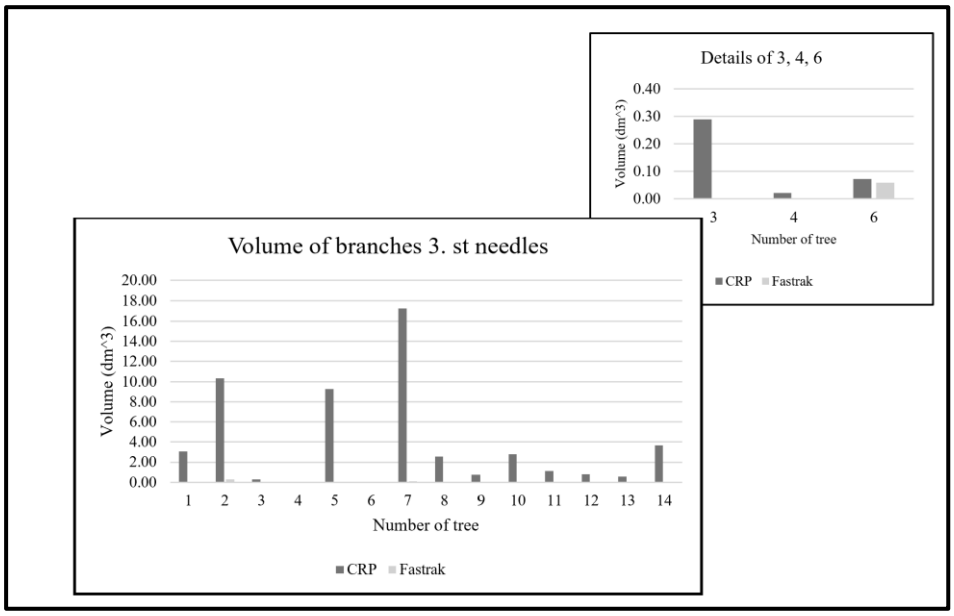
Při hodnocení objemů třetího řádu u listnatých dřevin fotogrammetrie opět vykazuje tendenci k nadhodnocování, avšak rozdíly mezi metodami nejsou tak výrazné jako u předchozích řádů. V této kategorii byly zaznamenány výraznější rozdíly ve třech případech, konkrétně u stromů 6, 7 a 8. U těchto stromů fotogrammetrie naměřila objemy výrazně vyšší než metoda Fastrak: u stromu 6 byla hodnota téměř 9 dm³ ve srovnání s 0.5 dm³ naměřenými Fastrakem, u stromu 8 fotogrammetrie ukázala objem přibližně 7 dm³, zatímco Fastrak necelých 0.5 dm³ a u stromu 7 fotogrammetrie vypočítala objem mírně přes 5 dm³, zatímco Fastrak opět ukázal pouze 0.5 dm³. Méně výrazný rozdíl mezi metodami byl zaznamenán u stromu 10, kde rozdíl činil přibližně 3 dm³. V jednom případě, u stromu 9, fotogrammetrie podhodnotila objem ve srovnání s Fastrakem, přičemž rozdíl byl minimální, pouze 0.10 dm³. U zbývajících devíti stromů se rozdíly mezi metodami pohybovaly od 0.7 do 1 dm³, přičemž nejmenší rozdíl byl u stromu 2, kde činil pouhých 0.01 dm³. Celková RMSE chyby dosáhla hodnoty 3.41, což představuje zlepšení oproti předchozímu řádu. Tento výsledek ukazuje, že fotogrammetrie poskytuje relativně přesné výsledky u většiny měřených stromů třetího řádu, ačkoliv vyšší RMSE chybu stále ovlivnily případy s výraznými rozdíly mezi metodami (graf 30).



Graf 30. Zobrazuje porovnání objemu větví 3.řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 3.řádu jehličnatých dřevin

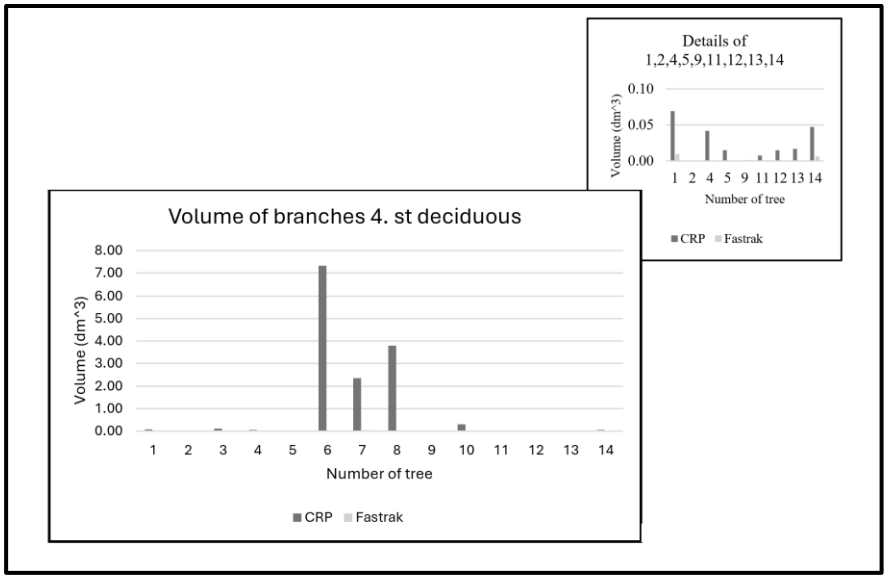
V měření objemu u jehličnatých dřevin fotogrammetrie pravidelně vykazuje tendenci k nadhodnocování. Největší nadhodnocení bylo zaznamenáno u stromu číslo 7, kde fotogrammetrie ukázala objem přes 16 dm³, zatímco metoda Fastrak naměřila objem pod 0.5 dm³. Druhý nejvýraznější rozdíl byl u stromu číslo 2 s odhadem 10 dm³ fotogrammetrií a 0.5 dm³ Fastrakem. U stromu číslo 5 byl rozdíl přibližně 9 dm³. Méně výrazné rozdíly byly zaznamenány u stromů 1, 8, 10, 11 a 14; u stromů 1 a 14 fotogrammetrie odhadla objem kolem 3 dm³, zatímco Fastrak ukázal hodnoty do 0.02 dm³ a u stromů 8, 10 a 11 byly rozdíly mezi metodami menší než 2.5 dm³. Nejmenší rozdíly byly pozorovány u stromů 3, 4, 6, 9, 12 a 13, kde rozdíly mezi metodami byly menší než 1 dm³. Zejména strom 6 měl chybu pouze 0.01 dm³, což se považuje za minimální. RMSE chyba pro objemy 3. řádu jehličnatých dřevin dosáhla hodnoty 6.08, což je vyšší než RMSE pro objemy 3. řádu listnatých dřevin. Tento výsledek naznačuje, že fotogrammetrie je přesnější při měření objemu větví 3. řádu u listnatých než u jehličnatých dřevin (graf 31).



Graf 31. Zobrazuje výsledky objemu větví 3. řádu 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 4.řádu listnatých dřevin

U měření objemů čtvrtého řádu listnatých dřevin fotogrammetrie stále ukazuje tendenci k nadhodnocování ve srovnání s metodou Fastrak. Výrazné rozdíly byly zaznamenány u tří konkrétních stromů: u stromu 6, kde fotogrammetrie vypočetla objem přibližně 7 dm³ a Fastrak méně než 0.01 dm³; u stromu 8, kde fotogrammetrie ukázala objem přibližně 4 dm³ a Fastrak opět pouze 0.01 dm³; u stromu 7, kde fotogrammetrie poskytla objem kolem 2 dm³, zatímco Fastrak změřil 0.02 dm³. Ve zbývajících případech, u stromů 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13 a 14 byly rozdíly mezi objemy měřenými oběma metodami menší než 0.5 dm³. U stromu 2 nebyl čtvrtý řád zjištěn žádnou z metod a podobně u stromů 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12 a 13 metoda Fastrak nezaznamenala žádný čtvrtý řád, zatímco fotogrammetrie vykázala objem pouze do 0.06 dm³. RMSE chyba dosáhla hodnoty 2.29, což je lepší výsledek než u objemu třetího řádu listnatých dřevin, což naznačuje, že přesnost měření čtvrtého řádu je lepší než u měření objemu třetího řádu (graf 32).

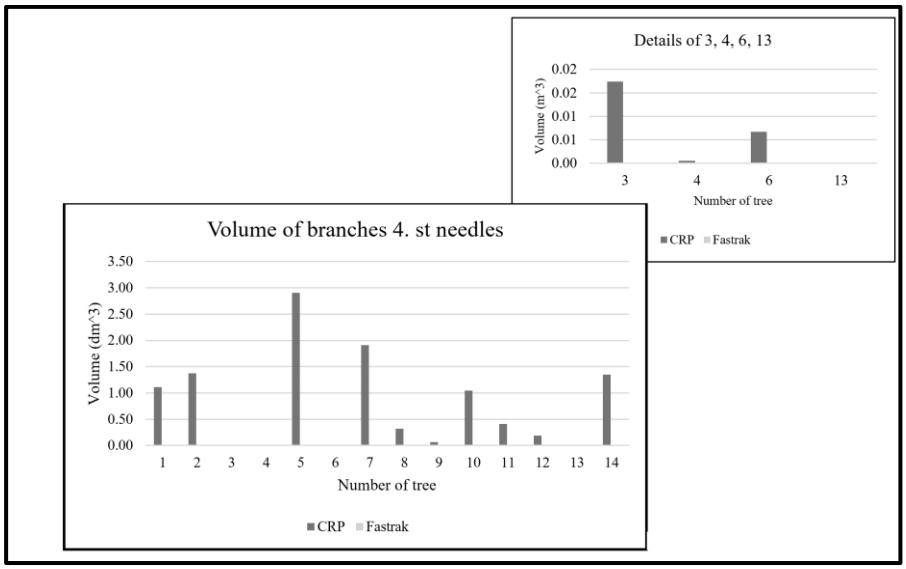


Graf 32. Zobrazuje porovnání objemu větví 4.řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání objemu větví 4.řádu jehličnatých dřevin

U jehličnatých stromů fotogrammetrie pravidelně vykazuje vyšší objemy než metoda Fastrak. Nejvýraznější rozdíl byl zaznamenán u stromu číslo 5, kde fotogrammetrie zaznamenala objem téměř 3 dm³, zatímco metoda Fastrak neodhalila žádný čtvrtý řád. U dalších

stromů, jako jsou stromy 1, 2, 7, 10 a 14 byl rozdíl mezi metodami přibližně 1 dm³, přičemž metoda Fastrak také neodhalila čtvrtý řád. U stromů 3, 4, 8, 9, 11, 12 a 13 byly rozdíly menší než 0,5 dm³, což se považuje za zanedbatelné. V těchto případech byla absence čtvrtého řádu u obou metod ovlivněna přesností měření. Celková RMSE chyba v tomto případě byla 1.15, což je lepší výsledek než u měření objemu u listnatých stromů. Tento výsledek naznačuje, že i přes vyšší objemy měřené fotogrammetrií, byla její přesnost u jehličnatých stromů lepší než u listnatých (graf 33).

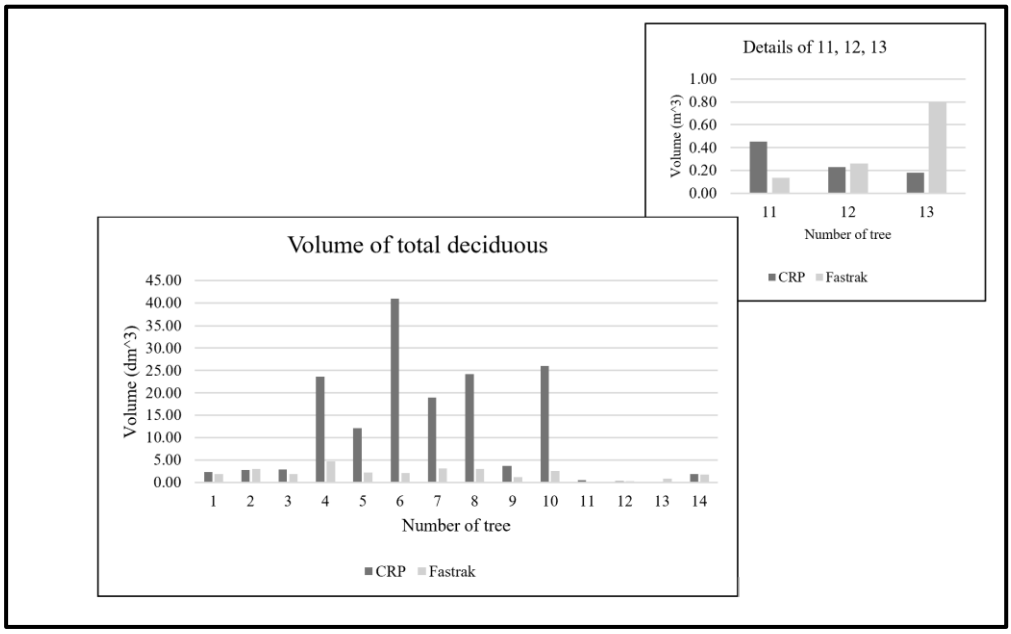


Graf 33. Zobrazuje Porovnání objemu větví 4.řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání celkového objemu listnatých dřevin

Při porovnávání celkového objemu listnatých dřevin se fotogrammetrie opět ukázala jako metoda, která ve většině případů poskytuje vyšší objemy než metoda Fastrak. Výrazný rozdíl mezi metodami byl zaznamenán u stromů 4, 6, 7, 8 a 10, kde fotogrammetrie vykázala objemy výrazně vyšší než Fastrak. Největší rozdíl byl u stromu 6, kde fotogrammetrie vypočítala objem přibližně 40 dm³, zatímco Fastrak ukázal pouze 2 dm³. Podobně velké rozdíly byly u stromů 4, 8 a 10, kde fotogrammetrie měřila objem přibližně 25 dm³, zatímco Fastrak zaznamenal kolem 2 dm³. Strom 7 měl rozdíl mezi metodami přibližně 15 dm³, u stromů 5 a 9 byl rozdíl mezi metodami menší. U stromu 5 fotogrammetrie odhadla objem přibližně 12 dm³,

zatímco Fastrak ukázal asi 2 dm, a u stromu 9 fotogrammetrie poskytla objem přibližně 3 dm³, zatímco Fastrak pouze 1 dm³. V některých případech, jako u stromů 2, 12 a 13, fotogrammetrie podhodnocovala objemy, přičemž rozdíly byly od 0.03 do 0.6 dm³. U zbývajících stromů 1, 3, 11 a 14 byly rozdíly rovněž minimální, přičemž fotogrammetrie vykazovala vyšší hodnoty než Fastrak, ale rozdíly byly do 0.5 dm³. Celková RMSE chyba byla 15.18, což naznačuje, že větší část této chyby byla způsobena nesrovnalostmi v měření objemu větví, přičemž fotogrammetrie poskytuje většinou vyšší hodnoty než Fastrak (graf 34).

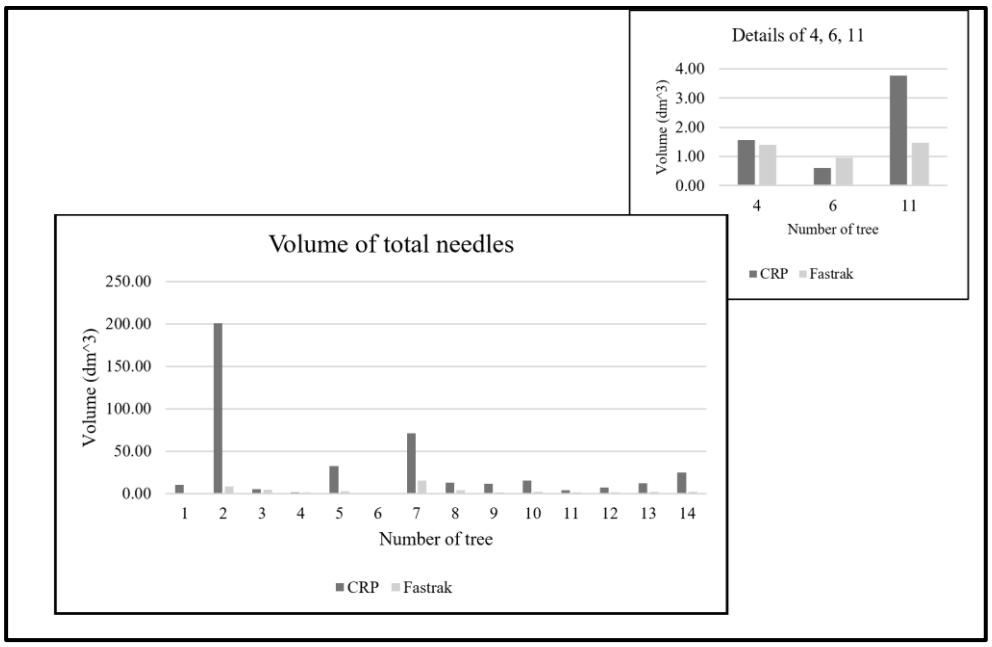


Graf 34. Zobrazuje porovnání celkového objemu listnatých dřevin 14listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání celkového objemu jehličnatých dřevin

Při porovnávání celkového objemu jehličnatých dřevin ukazuje fotogrammetrie většinou tendenci k nadhodnocování výsledků, což může být způsobeno vlivem přítomnosti jehličí. Nejvýraznější nadhodnocení bylo zaznamenáno u stromu číslo 2, kde fotogrammetrie odhadla objem na přibližně 200 dm³, zatímco metoda Fastrak naměřila pouze kolem 8 dm³. Další významné rozdíly mezi metodami byly u stromů 1, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 a 14. U stromu 7 fotogrammetrie poskytla objem přibližně 70 dm³, zatímco Fastrak ukázal 15 dm³. U stromů 1 a 8 fotogrammetrie naměřila objemy kolem 9 dm³, zatímco Fastrak měřil 0,50 dm³ u stromu 1 a 4 dm³ u stromu 8. U stromů 5 a 14 fotogrammetrie odhadla objemy na přibližně 30 dm³ a

20 dm³, zatímco Fastrak naměřil v obou případech kolem 3 dm³. Stromy 9, 10 a 13 měly rozdíly mezi metodami přibližně 10 dm³. U stromů 11 a 12 byly rozdíly menší než 10 dm³, přičemž fotogrammetrie měřila objem přibližně 4 dm³ u stromu 11 a 8 dm³ u stromu 12, zatímco Fastrak ukázal 2 dm³ a 1 dm³ u těchto stromů. Jediný případ, kdy fotogrammetrie vykázala menší objem než Fastrak, byl u stromu 6, avšak rozdíl byl minimální. U stromů 3 a 4 byla fotogrammetrie rovněž nadhodnocující, ale rozdíl mezi metodami byl nevýrazný. Celková RMSE chyba byla 54,88, což je výrazně vyšší než u listnatých dřevin. Tato zvýšená chyba může být způsobena problémy s filtrováním jehličí fotogrammetrií, což vede k nadhodnocení objemu (graf 35).

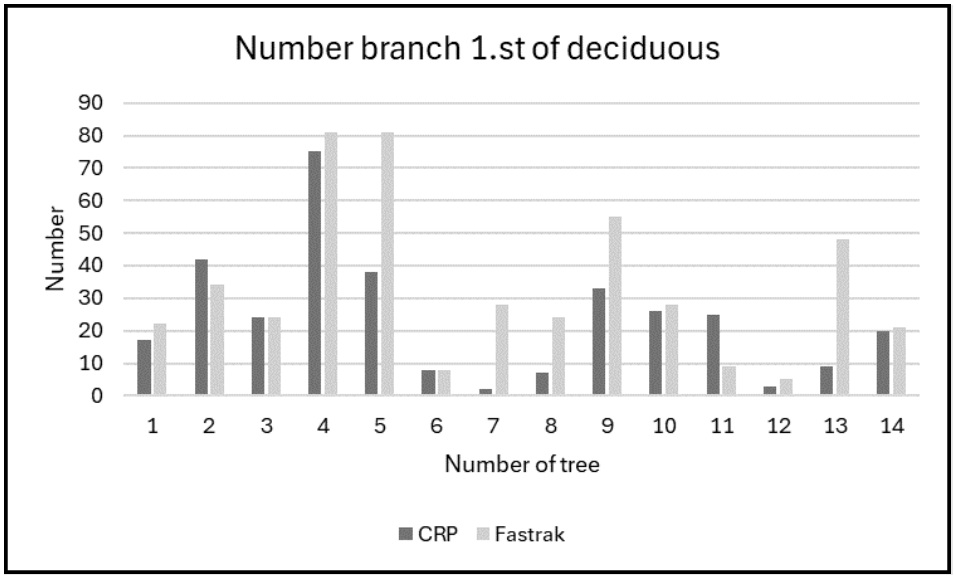


Graf 35. Zobrazuje Porovnání celkového objemu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání počtu větví prvního řádu listnatých dřevin

Při porovnání počtu větví prvního řádu mezi metodami fotogrammetrie a Fastrak se ukazuje, že fotogrammetrie často podhodnocuje výsledky ve srovnání s Fastrakem. U čtyř stromů byl rozdíl v počtu větví větší než 20 a u dvou dalších stromů překročil rozdíl 10 větví. U zbývajících stromů byly rozdíly menší než 10 větví. Podrobněji, u stromů 5, 7, 9 a 13 byl rozdíl mezi metodami výrazně větší než 20 větví. Fotogrammetrie u stromu 5 napočítala 38 větví, zatímco Fastrak ukázal 81 větví. U stromu 7 fotogrammetrie zjistila pouze 7 větví, zatímco Fastrak napočítal 28. Strom 9 vykázal 33 větví podle fotogrammetrie a 55 podle

Fastraku a strom 13 měl 9 větví podle fotogrammetrie a 48 podle Fastraku, což představuje další výrazné rozdíly. Stromy 8 a 11 vykazovaly rozdíly mezi 10 a 20 větvemi. U stromu 8 fotogrammetrie zjistila 7 větví, zatímco Fastrak naměřil 24 větví. Naopak strom 11 měl podle fotogrammetrie 25 větví, zatímco Fastrak ukázal pouze 9 větví. Dalších pět stromů mělo rozdíl v počtu větví do 10, přičemž Fastrak vždy naměřil více větví než fotogrammetrie. Patří sem stromy 1 (rozdíl 5 větví), 4 (rozdíl 6 větví), 10 (rozdíl 2 větve), 12 (rozdíl 2 větve) a 14 (rozdíl 1 větev). Strom 2 byl jediný, kde fotogrammetrie zaznamenala více větví než Fastrak, s rozdílem 8 větví. Strom 3 byl výjimečný tím, že mezi oběma metodami nebyl žádný rozdíl (graf 36). Celková RMSE chyba byla 19.29, což naznačuje značné variace v přesnosti měření mezi oběma metodami.

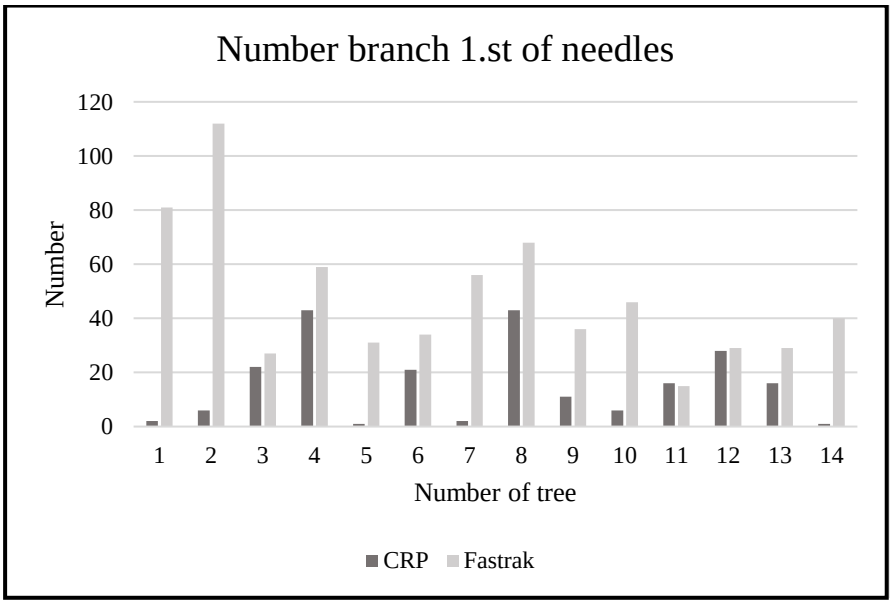


Graf 36. Zobrazuje porovnání počtu větví prvního řádu listnatých dřevin kmene14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání počtu větví prvního řádu jehličnatých dřevin

Při porovnávání počtu větví prvního řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak se ukazuje, že fotogrammetrie často podhodnocuje výsledky ve srovnání s Fastrakem. V osmi případech byl rozdíl v počtu větví větší než 20 a v dalších dvou případech překročil rozdíl 10 větví. U zbývajících stromů byly rozdíly menší než 10 větví. Největší rozdíl v počtu větví byl zaznamenán u stromu 2, kde fotogrammetrie napočítala pouze 6 větví, zatímco Fastrak zjistil 112 větví, což představuje rozdíl 106 větví. Další stromy s rozdílem větším než 20 větví

zahrnují stromy 1, 5, 7, 8, 9, 10 a 14. U stromu 1 fotogrammetrie zjistila pouze 2 větve, zatímco Fastrak napočítal 80. Stromy 5 a 14 měly podle fotogrammetrie pouze 1 větev, ale Fastrak zjistil 30 a 39 větví. U stromů 8 a 9 byl rozdíl v počtu větví 25. Stromy 7 a 10 vykázaly podle fotogrammetrie 2 a 6 větví, zatímco Fastrak zjistil 56 a 46 větví. Stromy s rozdílem mezi 10 a 20 větvemi zahrnují stromy 4, 6 a 13. Strom 4 vykázal rozdíl kolem 16 větví, zatímco stromy 6 a 13 měly rozdíl přibližně 13 větví. Strom 3 měl rozdíl menší než 10 větví a stromy 11 a 12 vykázaly rozdíl pouze 1 větev. U stromu 11 měla fotogrammetrie o 1 větev více než Fastrak, zatímco u stromu 12 to bylo naopak. Tento rozsah rozdílů mezi metodami zdůrazňuje variabilitu přesnosti fotogrammetrie v porovnání s Fastrakem, zvláště u stromů s hustší nebo komplikovanější strukturou větví (graf 37). Celková RMSE chyba je 43.33, což ukazuje, že je přesnější určování větví prvního řádu u listnatých dřevin než u jehličnatých.

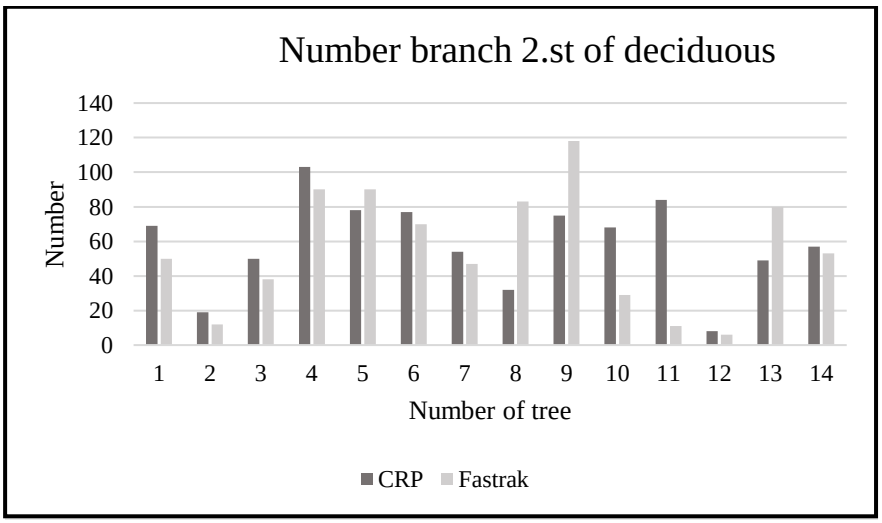


Graf 37. Zobrazuje porovnání počtu větví prvního řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání počtu větví druhého řádu listnatých dřevin

Při porovnání počtu větví druhého řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak fotogrammetrie často nadhodnocuje výsledky. V pěti případech byl rozdíl větší než 20 větví a v dalších čtyřech případech přesáhl rozdíl 10 větví. U zbývajících stromů byly rozdíly menší než 10 větví. Největší rozdíl byl zaznamenán u stromu 11, kde fotogrammetrie napočítala přes 80 větví, zatímco metoda Fastrak zjistila pouze kolem 10 větví. Další stromy s rozdílem

přesahujícím 20 větví zahrnují stromy 8, 9, 10 a 13. U stromu 9 fotogrammetrie podhodnotila počet větví, když napočítala 70 větví, zatímco Fastrak zjistil téměř 120 větví. U stromu 8 fotogrammetrie naměřila přibližně 30 větví, zatímco Fastrak přesáhl 80 větví. U stromu 13 nebyly rozdíly také výrazné, s fotogrametrií zaznamenávající 50 větví a Fastrakem 80 větví. Strom 10 vykázal rozdíl více než 20 větví, kde fotogrammetrie nadhodnocovala počet větví o téměř 40. Další skupina stromů, kde rozdíl v počtu větví dosahoval od 10 do 20, zahrnuje stromy 1, 3, 4 a 5. U stromu 5 fotogrammetrie podhodnotila počet větví o přibližně 10, zatímco u stromů 1, 3 a 4 fotogrammetrie vykázala větší počet větví než Fastrak. U stromu 4 rozdíl činil pouhé 4 větve. Zbývající stromy 2, 6 a 7 vykázaly rozdíl 7 větví, s nadhodnocením počtu větví fotogrammetrií (graf 38). Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 30.76, což je horší výsledek než u počtu větví prvního řádu u listnatých stromů. Tento výsledek naznačuje vyšší míru nepřesnosti fotogrammetrie při počítání větví u složitějších stromových struktur.

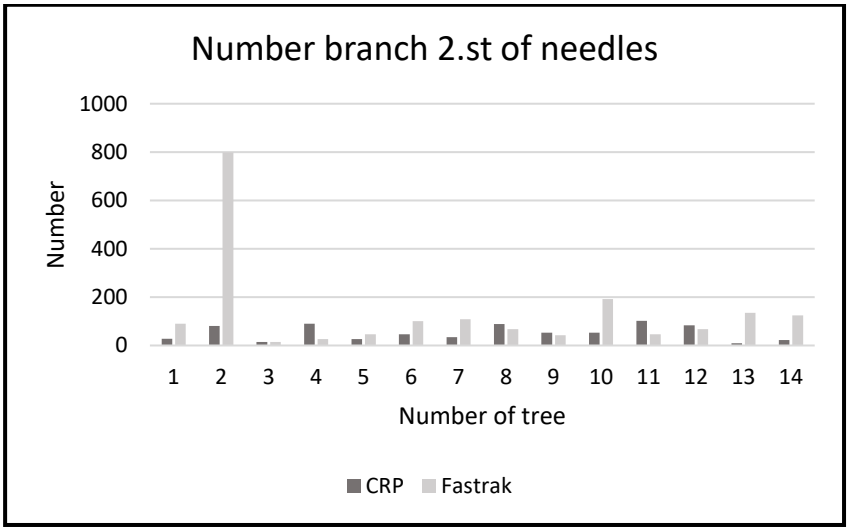


Graf 38. Zobrazuje Porovnání počtu větví druhého řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání počtu větví druhého řádu jehličnatý dřevin

Při porovnání počtu větví druhého řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak se ukazuje, že fotogrammetrie často podhodnocuje výsledky ve srovnání s Fastrakem. V pěti případech byl rozdíl mezi metodami větší než 20 větví, zatímco ve dvou dalších případech přesáhl rozdíl 10 větví. Pouze u jednoho stromu nebyl zaznamenán žádný rozdíl v počtu větví. Nejvýraznější rozdíl byl u stromu 2, kde fotogrammetrie napočítala méně než 100

větví, zatímco Fastrak zjistil téměř 800 větví. Podobné podhodnocení se objevilo u stromů 10, 13 a 14. U stromu 10 fotogrammetrie naměřila přibližně 60 větví, zatímco Fastrak detekoval kolem 200 větví. Strom 13 vykázal pod 10 větví podle fotogrammetrie, zatímco Fastrak zjistil přibližně 130 větví. Strom 14 měl podle fotogrammetrie přibližně 20 větví, zatímco Fastrak zaznamenal více než 100 větví. Ve všech těchto případech fotogrammetrie výrazně podhodnotila počet větví. Další stromy s významnými rozdíly zahrnují stromy 1, 4, 6, 7 a 11. U stromů 1, 6 a 7 fotogrammetrie opět podhodnotila počet větví, zatímco stromy 4 a 11 nadhodnotila. Rozdíly v počtu větví mezi 10 a 20 vykázaly stromy 5, 8, 9 a 12. U stromu 5 fotogrammetrie podhodnotila počet větví, zatímco u stromů 8, 9 a 12 nadhodnotila. Strom 3 měl shodný počet větví podle obou metod – 15 větví druhého řádu (graf 39). Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 203. Metoda Fastrak je tedy přesnější než fotogrammetrie při zjišťování počtu větví druhého řádu u jehličnatých dřevin.

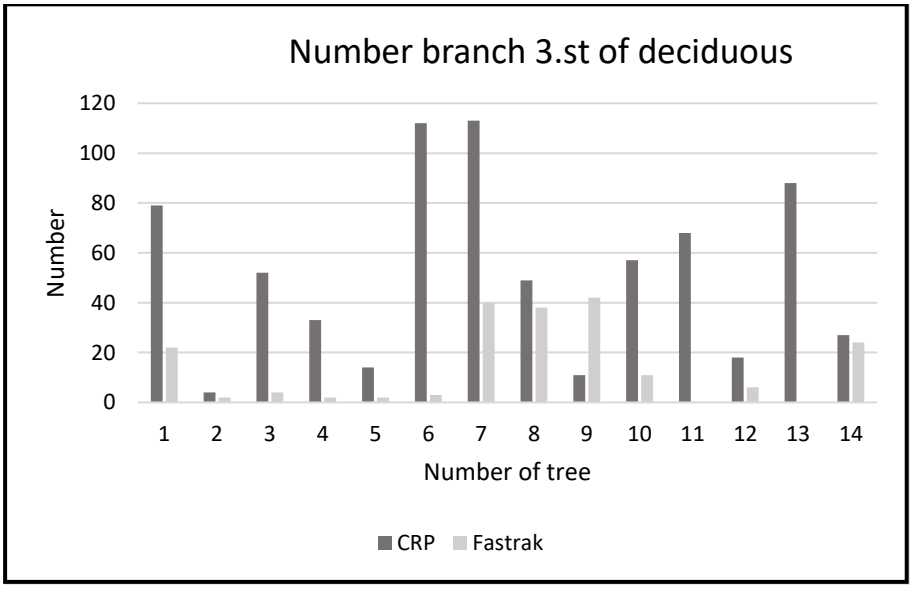


Graf 39. Zobrazuje Porovnání počtu větví druhého řádu jehličnatý dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání počtu větví třetího řádu listnatých dřevin

Při porovnání počtu větví prvního řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak se ukazuje, že fotogrammetrie často nadhodnocuje výsledky. V devíti případech byl rozdíl mezi metodami větší než 20 větví a v dalších třech případech přesáhl rozdíl 10 větví. Pouze v jednom případě fotogrammetrie podhodnotila počet větví. Nejvýraznější rozdíl mezi metodami byl zaznamenán u stromu 6, kde rozdíl přesahoval 100 větví. Další významné rozdíly byly u stromů

1, 3, 4, 7, 10, 11 a 13, kde rozdíl činil více než 40 větví. Například u stromu 13 fotogrammetrie zaznamenala více než 80 větví, zatímco Fastrak nezjistil žádnou větev třetího řádu. Podobné podhodnocení se objevilo u stromu 11, kde fotogrammetrie nalezla větve prvního řádu, ale Fastrak ne. Strom 10 vykázal přibližně 60 větví podle fotogrammetrie, zatímco Fastrak zjistil pouze 10 větví. U stromů 1, 3 a 4 byl rozdíl kolem 50 větví. Strom 7 měl podle fotogrammetrie více než 100 větví, zatímco Fastrak odhalil přibližně 40 větví. Stromy 5, 8 a 12 vykázaly rozdíl 10 větví, zatímco stromy 2 a 14 měly rozdíl pouhé 2 a 3 větve, což lze považovat za téměř přesné (graf 40). Celková RMSE chyba byla 53.18, což je horší než u počtu větví předchozích řádů u listnatých dřevin. Tento výsledek ukazuje, že fotogrammetrie je méně přesná při určování počtu větví prvního řádu v porovnání s metodou Fastrak.

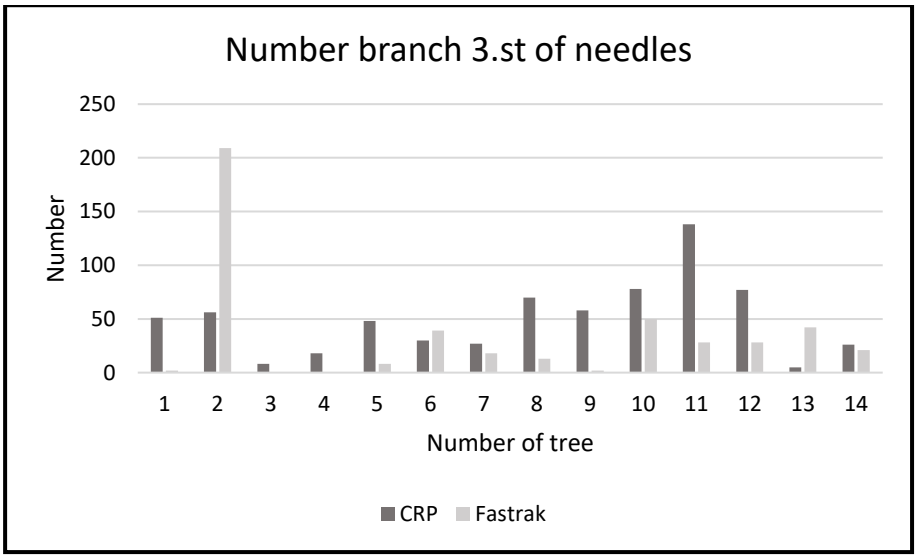


Graf 40. Zobrazuje porovnání počtu větví třetího řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak

Porovnání počtu větví třetího řádu jehličnatých dřevin

Při porovnání počtu větví třetího řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak se ukazuje, že fotogrammetrie často nadhodnocuje výsledky. V devíti případech byl rozdíl mezi metodami větší než 20 větví a v jednom případě překročil rozdíl 10 větví. Pouze ve třech případech fotogrammetrie podhodnotila počet větví. Nejvýraznější podhodnocení se objevilo u stromu 2, kde fotogrammetrie zaznamenala přibližně o 150 větví méně než Fastrak, což byl nejhorší výsledek. U stromu 13 fotogrammetrie odhalila méně než 10 větví, zatímco Fastrak

zjistil přibližně 40 větví. Strom 6 vykázal nejmenší rozdíl, přičemž fotogrammetrie ukázala pouze o 9 větví méně než Fastrak, což je nejpřesnější výsledek z této skupiny. Ostatní stromy vykazovaly nadhodnocení počtu větví fotogrammetrií. Například strom 11 měl podle fotogrammetrie téměř 150 větví, zatímco Fastrak odhalil pouze kolem 30 větví. Stromy 8 a 9 vykázaly rozdíly kolem 60 větví. Stromy 1 a 12 měly rozdíly kolem 50 větví, přičemž fotogrammetrie zaznamenala přibližně o 50 větví více než Fastrak. Strom 10 vykázal podle fotogrammetrie téměř 80 větví, zatímco Fastrak zjistil 50 větví. U stromu 5 byl rozdíl 40 větví. Strom 4 měl rozdíl v rozmezí od 10 do 20 větví, kde fotogrammetrie odhalila přibližně 20 větví, zatímco Fastrak nezjistil žádnou větev třetího řádu. Podobně strom 3 vykázal 8 větví podle fotogrammetrie a žádnou podle Fastraku. Strom 7 měl rozdíl 10 větví, zatímco strom 14 vykázal nejmenší rozdíl, pouhých 5 větví (graf 41). Celková RMSE chyba byla 60.37, což je vyšší než u počtu větví prvního a druhého řádu u listnatých dřevin. Tento výsledek dokazuje, že fotogrammetrie je méně přesná při určování počtu větví třetího řádu v porovnání s metodou Fastrak.

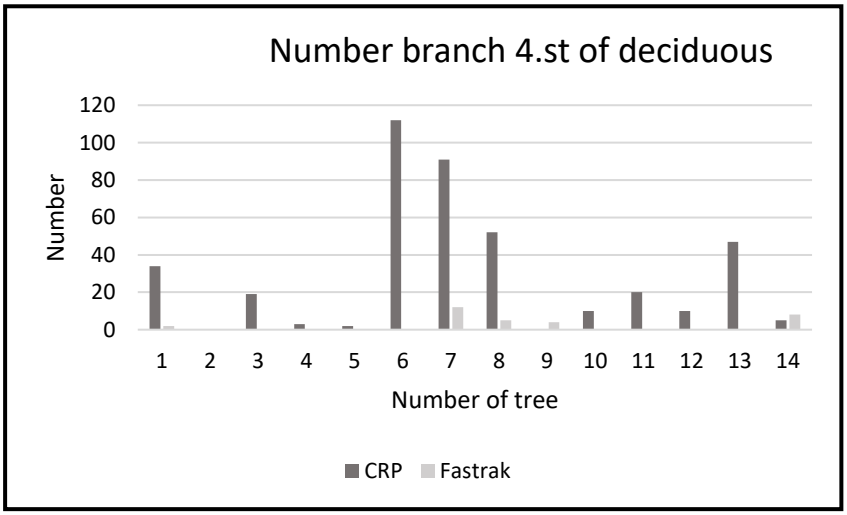


Graf 41. Zobrazuje porovnání počtu větví třetího řádu jehličnatých dřevin14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání počtu větví čtvrtého řádu listnatých dřevin

Při porovnání počtu větví čtvrtého řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak se ukazuje, že fotogrammetrie výrazně nadhodnocuje výsledky. V šesti případech byl rozdíl mezi

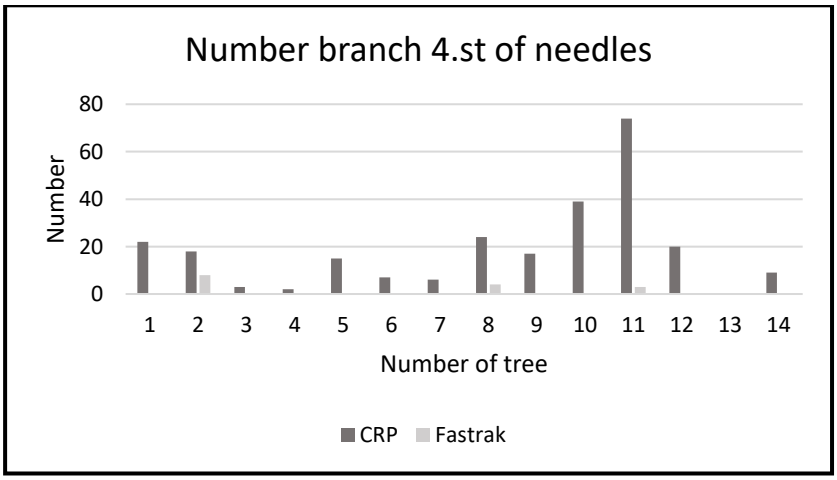
metodami větší než 20 větví, v dalších čtyřech případech překročil rozdíl 10 větví. Pouze u zbývajících stromů byly rozdíly menší než 10 větví. Nejvýraznější rozdíl byl pozorován u stromu 6, kde fotogrammetrie zaznamenala více než 100 větví, zatímco Fastrak nezaznamenal žádnou větev čtvrtého řádu. Tento výrazný nesoulad naznačuje možné limity jedné nebo obou metod při detekci drobných větví u hustě větvených stromů. U stromu 13 Fastrak nezjistil žádný čtvrtý řád, zatímco fotogrammetrie odhalila přibližně 50 větví, což ukazuje na potíže s citlivostí detekce drobných větví. Podobné výsledky byly zaznamenány i u stromu 11, kde fotogrammetrie našla 20 větví, ale Fastrak žádnou. U stromu 1 fotogrammetrie zaznamenala přes 30 větví, zatímco Fastrak zjistil méně než 10, což opět ukazuje na nadhodnocení počtu větví fotogrammetrií. Naopak u stromů 2, 9 a 14 byly rozdíly mezi metodami méně výrazné. U stromu 2 se žádný čtvrtý řád nevyskytoval, což se shodovalo mezi oběma metodami a ukazuje na přesnost v tomto případě. U stromu 9 a 14 byla naměřena větší konzistence mezi metodami, i když rozdíly byly malé. Stromy 7, 8, 10 a 12 vykazovaly podobné vzory, kde fotogrammetrie nalezla přibližně 10 až 50 větví, zatímco Fastrak nezaznamenal žádné. To dokazuje potíže s detekcí menších větví u Fastraku (graf 42). Celková RMSE chyba byla 42.45, což představuje lepší výsledek než u počtu větví třetího řádu, ale horší než u prvního a druhého řádu u listnatých dřevin. Tento výsledek sice ukazuje na variabilitu úspěšnosti obou metod v různých situacích, přesto je fotogrammetrie méně přesná při určování počtu větví čtvrtého řádu než metoda Fastrak.



Graf 42. Zobrazuje porovnání počtu větví čtvrtého řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak

Porovnání počtu větví čtvrtého řádu jehličnatých dřevin

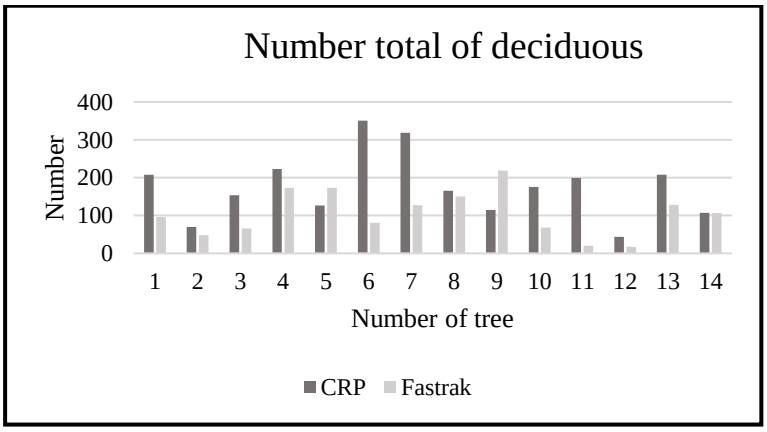
Při porovnání počtu větví čtvrtého řádu mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak fotogrammetrie pravidelně nadhodnocovala výsledky. V šesti případech byl rozdíl větší než 20 větví a v dalších pěti případech překročil rozdíl 10 větví. Pouze v jednom případě se počet větví shodoval. Zatímco Fastrak zaznamenal větve čtvrtého řádu pouze u tří stromů (2, 8 a 11), fotogrammetrie vykázala vždy vyšší počty. Největší nesoulad byl u stromu 11, kde fotogrammetrie zaznamenala přes 70 větví, zatímco Fastrak pouze 5 větví. U stromu 2 Fastrak identifikoval téměř 10 větví, zatímco fotogrammetrie napočítala téměř 20 větví. Strom 8 ukázal podobné rozdíly, kdy fotogrammetrie našla více než 20 větví, zatímco Fastrak zaznamenal pouze kolem 5 větví. Naopak u stromu 13 nebyly žádné větve čtvrtého řádu zjištěny žádnou metodou, což naznačuje shodu mezi metodami. V ostatních případech fotogrammetrie vždy vykázala vyšší počet větví než Fastrak. Nejvýraznější rozdíly byly u stromů 1, 10 a 12. U stromu 10 fotogrammetrie zaznamenala téměř 40 větví, zatímco Fastrak žádnou. Stromy 1 a 12 měly přibližně 20 větví navíc podle fotogrammetrie. Stromy 5 a 9 měly zjištěný počet větví mezi 15 a 17. Ostatní stromy, jako jsou 3, 4, 6, 7 a 14 měly nižší počet větví, přičemž nejmenší hodnoty byly u stromů 3 a 4 (3 a 2 větve) (graf 43). Celková RMSE chyba činila 24.84, což je lepší výsledek než u porovnání čtvrtého řádu listnatých dřevin. Tato výjimka naznačuje, že pro jehličnaté dřeviny je fotogrammetrie v případě čtvrtého řádu přesnější než metoda Fastrak.



Graf 43. Zobrazuje porovnání počtu větví čtvrtého řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

Porovnání celkového počtu větví řádu listnatých dřevin

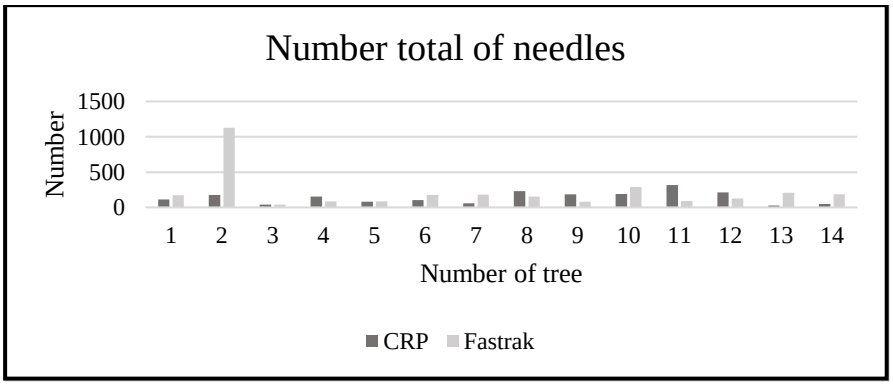
Při porovnání celkového počtu větví všech řádů fotogrammetrie pravidelně nadhodnocovala výsledky ve srovnání s metodou Fastrak. Ve dvanácti případech byl rozdíl větší než 20 větví, v jednom případě přesáhl 10 větví a pouze u jednoho stromu byl rozdíl menší než 10 větví. Fotogrammetrie podhodnocovala počet větví pouze u dvou stromů. Nejvýraznější rozdíly byly zaznamenány u stromů 6 a 7. U stromu 6 fotogrammetrie odhalila 350 větví, zatímco Fastrak zjistil pouze 80 větví. Podobně strom 7 vykazoval přes 300 větví podle fotogrammetrie, zatímco Fastrak identifikoval téměř 150 větví. Fotogrammetrie nadhodnocovala počet větví také u stromů 1, 4 a 13, kde fotogrammetrie zaznamenala více než 200 větví ve srovnání s Fastrakem, který zjistil 100 a méně větví. Například u stromu 1 fotogrammetrie určila přes 200 větví, zatímco Fastrak nalezl téměř 100 větví. Strom 4 měl téměř 200 větví podle fotogrammetrie a méně než 100 větví podle Fastraku. U stromu 13 fotogrammetrie zjistila 200 větví, zatímco Fastrak detekoval něco přes 100 větví. U stromu 8 byly výsledky téměř vyrovnané, kdy fotogrammetrie zaznamenala mírně přes 150 větví a Fastrak přesně 150 větví. Strom 10 vykázal rozdíl, kde fotogrammetrie našla téměř 200 větví, zatímco Fastrak pouze 60 větví. U stromu 11 fotogrammetrie určila 200 větví, zatímco Fastrak zaznamenal pouze 20 větví. Nejlepší shoda byla u stromu 14, kde byl rozdíl pouze jedna větev. U stromů 2 a 12, které měly počet větví pod 100, byl rozdíl přibližně 20 větví (graf 44). Celková RMSE chyba dosáhla hodnoty 118.64, což představuje nejhorší výsledek při porovnání údajů u listnatých dřevin. Tento výsledek dokazuje vysokou variabilitu v přesnosti mezi oběma metodami při určování celkového počtu větví u různých stromů.



Graf 44 Zobrazuje porovnání celkového počtu větví řádu listnatých dřevin 14 listnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

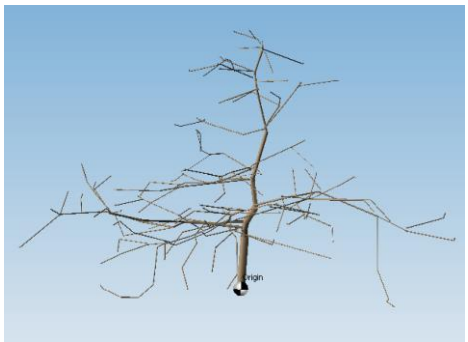
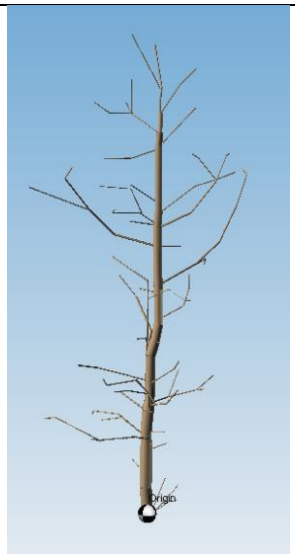
Porovnání celkového počtu větví řádu jehličnatých dřevin

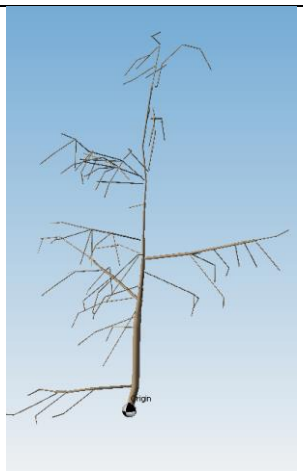
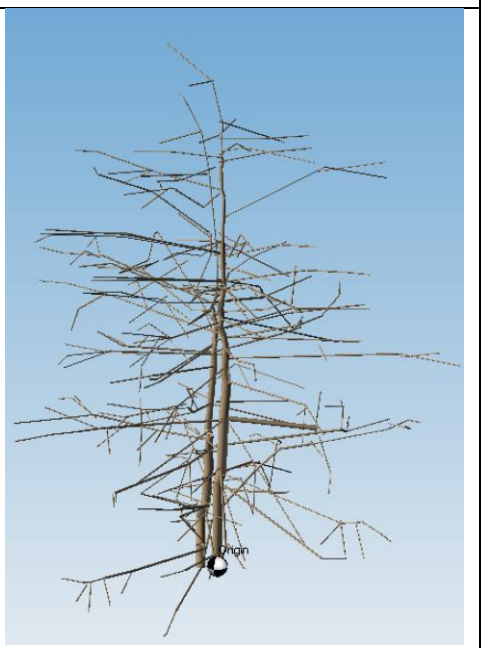
Porovnání počtu větví u jehličnatých dřevin ukazuje na výrazné rozdíly mezi fotogrammetrií a metodou Fastrak. Na rozdíl od listnatých dřevin, kde fotogrammetrie často nadhodnocovala výsledky, u jehličnatých dřevin fotogrammetrie častěji podhodnocovala počet větví. V dvanácti případech byl rozdíl větší než 20 větví, zatímco ve zbývajících případech byl rozdíl menší než 10 větví. Pouze u pěti stromů fotogrammetrie nadhodnocovala počet větví. Fotogrammetrie vykázala vyšší počet větví u stromů 4, 8, 9 a 12. Například u stromu 4 zaznamenala fotogrammetrie přibližně 150 větví, zatímco Fastrak odhalil kolem 100 větví. Podobně u stromu 8 fotogrammetrie zjistila přes 200 větví, zatímco Fastrak identifikoval přibližně 150 větví. U stromu 12 byl rozdíl ještě výraznější, kdy fotogrammetrie napočítala více než 200 větví, zatímco Fastrak pouze něco málo přes 100 větví. Strom 9 měl téměř 200 větví podle fotogrammetrie, zatímco Fastrak našel jen necelých 100 větví. Naopak u většiny ostatních stromů fotogrammetrie podhodnocovala počet větví. Nejvýraznější rozdíl byl u stromu 2, kde rozdíl mezi počtem větví zjištěným fotogrammetrií a Fastrakem dosáhl téměř 1 000 větví. Strom 11 vykazoval více než 300 větví podle fotogrammetrie, zatímco Fastrak zjistil méně než 100 větví. Fotogrammetrie také zaznamenala více než 100 větví u stromů 1, 6 a 10, přičemž Fastrak buď těsně dosáhl, nebo překročil počet 200 větví. Naopak u stromů 7, 13 a 14 fotogrammetrie neidentifikovala ani 100 větví, zatímco Fastrak zjistil vyšší počet větví a u stromu 13 dosáhl až 200 větví (graf 45). Celková RMSE chyba v tomto případě dosáhla hodnoty 276.62, což je nejvyšší chyba ze všech porovnávaných údajů. Určování počtu větví u jehličnatých dřevin je náročnější než u listnatých dřevin a podtrhuje složitost přesného mapování větví u různých typů stromů. Výrazné rozdíly mezi metodami fotogrammetrie a Fastraku v této oblasti zdůrazňují variabilitu v přesnosti obou metod.

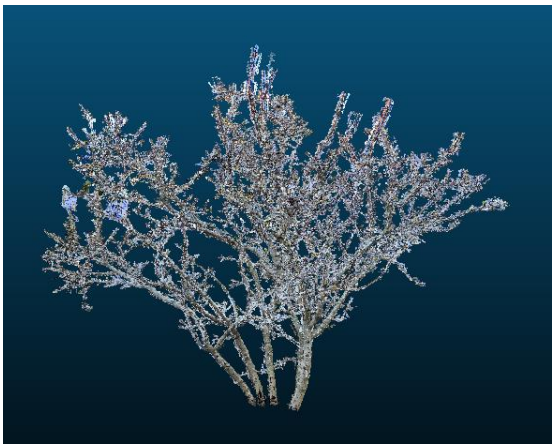
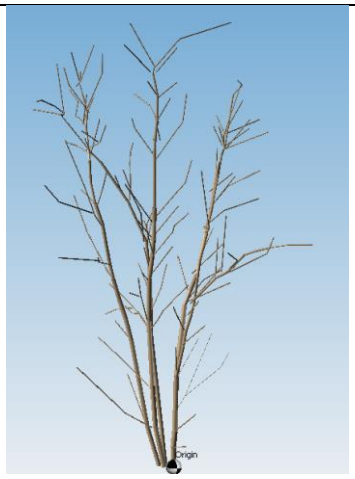


Graf 45. Zobrazuje porovnání celkového počtu větví řádu jehličnatých dřevin 14 jehličnatých stromů pomocí dvou různých metod: CRP a Fastrak.

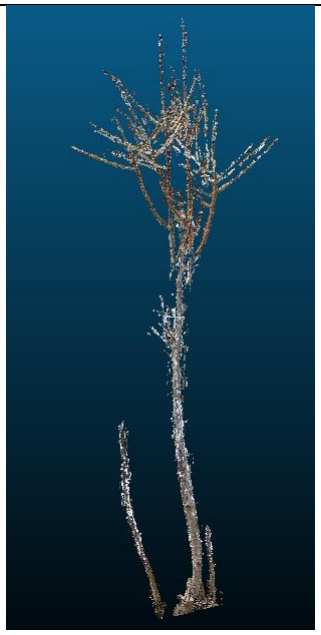
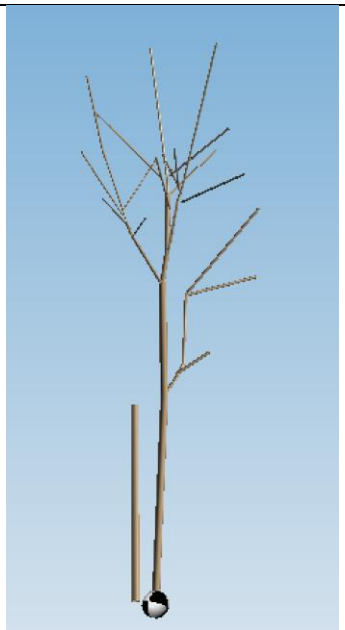
9.4.1 Ukázky listnatých dřevin porovnání dvou metod fotogrammetrie a Fastraku Polhemusu

Číslo stromu	Photogrammetry	Fastrak Polhemus
1		
2		

3		
4		

5		
6		
7		

8		
9		
10		

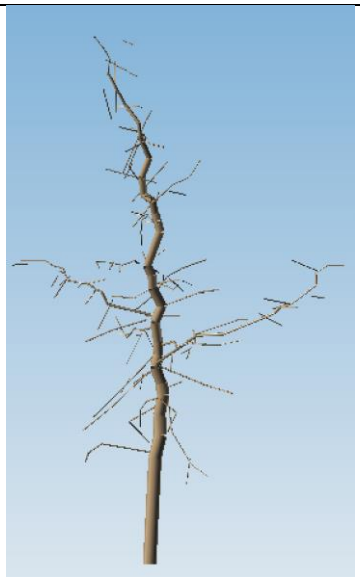
11		
12		

13		
14		

9.4.2 Ukázky jehličnatých dřevin porovnání dvou metod fotogrammetrie a Fastraku Polhemusu

Číslo stromu	Photogrammetry	Fastrak Polhemus
1		
2		

3		
4		
5		

6		
7		
8		

9		
10		
11		

12		
13		
14		

10 Diskuze

10.1 Zhodnoceni použití tohoto typu měření pro nadzemní architekturu dřevin

Vzhledem k rozsáhlosti této kapitoly, která zahrnuje několik výzkumů na různých dřevinách, bude diskuze rozdělena do několika podčástí. V první části bude pojednáno o dřevině borovice lesní, kde byla zkoumána závislost větvení na hustotě porostu, závislost výšky přirozené regenerace na hustotě porostu a závislost výšky přirozené regenerace na biomase řádů. Každý z těchto aspektů bude diskutován zvlášť. Následně bude věnována pozornost dubu korkovému, u kterého byla zkoumána orientace koruny a kořenů vůči světovým stranám. Poslední dřevinou diskutovanou v této kapitole bude buk lesní, kde se zaměření výzkumu týkalo orientace listí a koruny, stejně jako vlivu SLA a azimutu na transpiraci.

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*)

Závislost větvení na hustotě porostu

Lidar nemůže přesně detekovat větve, protože nedokáže měřit překrývající se větve nebo větve uvnitř korun. Přesto lze pomocí Lidaru vytvořit model struktury koruny. Byla vyvinuta metoda, která překrývá trojrozměrnou mřížku na lesní porost (Jaeger et al., 2018; Kurth, 2007; Thomas et al., 2017) . Magnetický digitizér lze použít k určení modelu koruny, avšak k pochopení přesné strategie jednotlivých stromů je třeba znát větvení koruny přímo. V souladu s naší první hypotézou byl počet řádů větví vyšší v mýtinách, zatímco nejnižší počet byl v oblastech s hodnotou 0,8. Rozdíly v hustotě porostu v oblastech 0,4 a 0,6 byly patrné, ale nebyly statisticky významné. Výsledky naší studie naznačují, že pokud borovice rostou v mýtinách, budou více větvené (Bílek et al., 2018). Ačkoli to pomáhá stabilitě stromu, větvené koruny mohou být náchylnější k potenciálním požárům, zejména s ohledem na klimatické výkyvy v posledních letech (Lefsky et al., 2001; Lefsky et al., 1999; Lefsky et al., 2005; Wagner, 1997). Modely architektury korun stromů v mírných lesích jsou omezeny na několik studií (Lefsky et al., 2001), což ztěžuje srovnání specifických metod našeho výzkumu s podobnými modely. Aby však strom přežil v konkurenčním a restriktivním prostředí, jeho architektura musí poskytovat tzv. „funkční výhody“ (Šleglová et al., 2024). Například, když bříza bělokorá (*Betula pendula* L.) čelí intenzivní konkurenci, investuje více do výšky než do

průměru. To platí i pro borovici lesní v mladém věku, i když v menší míře (Šleglová et al., 2024).

V naší studii se vyvinutí koruny zpomalovalo v porostech s vyšší hustotou než v těch s hustotou nižší. Jiná studie také potvrdila například tendenci borovice lesní vyvíjet svou korunu směrem k dostupnému světlu (Šleglová et al., 2024). Zatím však zůstává otázkou, jak se šířka koruny a počet řádů u existujících sazenic bude vyvíjet po dalším uvolnění mateřského porostu. Například (Riikonen et al., 2016a) ukázali, že sazenice borovice lesní reagují velmi dobře na snížení hustoty porostu prostým zvýšením šířky koruny. Světelná plasticita korun některých druhů stromů, tj. tendence dosáhnout velmi charakteristického tvaru koruny, může být silně ovlivněna dědičným vývojem stromu (Hallé, 2010) Naše studie je však v souladu s předpokladem, že architektura koruny je klíčová pro zachycení a distribuci světla do každé specifické fotosyntetické jednotky koruny. Architekturu korun stromů lze reprezentovat „modely“, které vymezují základní strategie růstu definující postupné architektonické fáze (Šleglová et al., 2024), což podporují i naše měření pomocí magnetického digitizeru Fastrak Polhemus(G.Colchester,2012).

Závislost výšky přirozené regenerace na hustotě porostu

Jelikož magnetický digitizer poskytuje přesné 3D modely, lze vyvodit závěry o závislosti výšky stromů na hustotě porostu. Existuje mnoho studií, které určují výšku vegetace pomocí dat z Lidaru. Při měření magnetickým digitizerem se nemusíme zabývat žádnou optimální velikostí, protože se zakládá na magnetické vlnové délce. Maximální výška stromu byla s nejvyšší přesností 85–90% (Konopka et al., 2020). Přesnost magnetického digitizeru je však 99%, s odchylkou pouhých 0,7 mm od skutečné výšky stromu.

V souladu s naší druhou hypotézou byly nejvyšší borovice nalezeny v mýtinách, zatímco nejmenší v oblastech s hustotou porostu 0,8. Nebyly nalezeny žádné statisticky významné rozdíly v oblastech hustoty porostu 0,4 a 0,6. Tento výsledek potvrzuje i studie (Brichta et al., 2020).Nejvyšší hustota borovic je na loukách, kde jsou nejvyšší borovice, následovaná hustotou porostu 0,4 a hustotou 0,6 a 0,8. Dřívější literatura podporuje výše uvedené závěry, že lepší růst mladých borovic je patrný v oblastech s nižší hustotou porostu (Hood et al., 2014) Hustota porostu je zde charakterizována jako významný ukazatel přímo

související s architekturou koruny (Paletto et al., 2009). Další možný negativní vliv na výšku stromů ve skupině zastínění byl přítomností brusnice (Vaccinium myrtillus L.) (Riikonen et al., 2016b; Surový et al., 2011b). Na našich parcelách byla brusnice hojně zastoupena na úrovni hustoty porostu 0,8, který obsahoval také nejmenší stromy přirozené regenerace borovice. Data ze studie Brichta et al. (F Danjon et al., 1999) však naznačují opačný – pozitivní – vliv konkurence brusnice na výšku přirozeně regenerujících se stromů. Naše studie však ukázala, že vyšší hustota porostu znamená menší výšku stromů, kromě hustoty porostu 0,6, kde byly stromy průměrně vyšší než v oblasti s hustotou porostu 0,4.

Dříve citované výjimky z tohoto pravidla by mohly být způsobeny specifickými mikrohabitátními podmínkami na místě odběru vzorků. Vzhledem k vysoké konkurenci na vrstvě bylin se zdá, že nejkritičtějším mechanismem je osvětlení, které ovlivňuje výšku v zakmenění porostu a sekundárně celková architektura dřevin (Chidi et al., 2014 b; Pietrzykowski et al., 2014). V naší studii byl zvažován pouze růst stromů, zatímco jiné práce zkoumaly různé faktory ovlivňující růst. Například ortotropie je nejčastěji spojována s podmínkami vysoké intenzity světla, zatímco plagiotropie je spojena se stínovými podmínkami. Obě ortotropie a plagiotropie jsou spojeny s určitými omezujícími faktory a jsou považovány za mechanismy, které umožňují synchronizaci růstu s příležitostnými příznivými podmínkami (Wiedermann, 1925). Avšak samotné zvažování architektonického modelu pravděpodobně nestačí k vysvětlení všech vazeb mezi ekologickým stavem druhu a jeho architekturou. Podle Horna (Horn, 1971 b) architektonické modely přímo neodrážejí adaptivní geometrii dospělých rostlin. Několik druhů sdílejících stejný architektonický model může mít velmi odlišné tvary. Model druhu a strategie jsou minimálně související, protože tvar stromu je flexibilní (Wiedermann, 1925). Naše výsledky se dobře srovnávají s výsledky jiného pionýrského druhu, konkrétně s břízou bělokorou (*Betula pendula* L.). Studie zabývající se břízou potvrdila, že bříza čelící intenzivní světelné konkurenci je pětkrát menší než bříza bez konkurence o světlo (Hoffman et al., 2016). Tento výsledek tedy není v rozporu s našimi závěry, že stromy přirozené regenerace borovice vykázaly nejmenší výšky pouze v oblasti s hustotou porostu 0,8.

Závislost výšky přirozené regenerace na biomase řádů

Co se týče naší třetí hypotézy, výška stromu je korelována pouze s větvemi prvního a druhého řádu, nikoli s větvemi třetího řádu. Nicméně vzhledem k nedostatku podobných studií lze relevantně diskutovat zejména o tom, proč třetí řád neovlivnil výšku přirozené regenerace. Stevens a Perkins (Aleksandrowicz-Trzcińska et al., 2017) zmiňují korelaci mezi výškou stromu a relativní velikostí v tomto kontextu a zpochybňují taxonomickou velikost tohoto efektu. Naše data ukazují, že výskyt větví třetího řádu měl tendenci klesat se zvyšující se hustotou porostu. Mladé borovice v otevřených oblastech investují biomasu jak do laterálních větví, tak do růstu výšky. Naše výsledky dále potvrzují pozorování, že větvení koruny není žádoucí, pokud je cílem získat dřevo vysoké kvality, jak bylo zjištěno na výzkumném pozemku zkoumajícím vliv řezání na pletivo stromu, založeném v roce 1951(Henry S. Horn, 1971b). Výsledky této práce lze srovnat například s prací Šebeň et al., 2013, která se zaměřila na smrk ztepilý (*Picea abies* L.), kde byl vyšší poměr mezi přírůstky výšky a přírůstky laterálních větví nalezen výhradně u dominantních stromů. V tomto případě byly přírůstky výšky dvakrát vyšší než přírůstky laterálních větví. U potlačených stromů byl poměr přírůstků výšky k přírůstkům větví kolem 1. Větvení není v lesnictví příliš žádoucí (Fisher et al., 1982; Shan et al., 2018). Tento závěr naznačuje, že v případě řízení zastínění může být regenerace borovice lesní dostatečně rychlá a kvalita jedinců zajištěna pouze tehdy, pokud je porost výrazně proříznut.

Dub korkový (*Quercus Suber*)

Stromy jsou stále více považovány za modulární organismy a jejich opakující se vzorec jednoduchých struktur v průběhu času je považován za proces zodpovědný za vývoj koruny. V našem případě byl potvrzen vliv zavlažování na korunu, zejména ve vztahu k posledním řadám, verze 29.0.2.0 (20). Tyto řady jsou velmi důležité pro rozhodování o dalším růstu koruny (Fabrika et al., 2019). Co se týče celé koruny, zde nebyl výsledek tak jednoznačný. Bylo pozorováno výrazné rozložení koruny podél zavlažovacího systému. Dalším důležitým aspektem, který jsme zkoumali, byl vliv okolních stromů na náš vybraný strom. Tato konkurence závisí na vzdálenosti mezi stromy. Stromy ve vzdálenosti do 2 m mají vysoký konkurenční vliv, zatímco stromy vzdálené více než 4 m mají minimální konkurenční vliv (Ford et al., 2017). Verzaniho studie zkoumala konkurenční vlivy. Konkurenční vlivy na velikost

stromu se lišily podle velikosti. V neprořezaných oblastech byl růst výšky negativně závislý na velikosti nebo nezávisel na velikosti a nebyl ovlivněn uzavřením koruny (Inoue et al., 2008). Tato zjištění mohou být užitečná pro plánování a správu zavlažovacích systémů tak, aby lépe vyhovovaly potřebám rostlin a optimalizovaly jejich růst a vývoj (Playán et al., 2006).

Naopak tendence koruny orientovat se směrem k severu může souviset s převládajícími větry nebo jako ochranná reakce proti nadměrnému slunečnímu záření. Zůstává však nejasné, proč byla tato orientační tendence pozorována výhradně u stromů se zavlažováním dešťovou vodou. Výsledky studie (Eberhardt et al., 2018) zaměřené na vlastnosti dřeva a šířku letokruhů u borovice dlouhověké odhalila významné rozdíly v podílu pozdního dřeva a hustotě letokruhů mezi severní a jižní stranou stromů. Na severní straně byl zaznamenán výrazně vyšší podíl pozdního dřeva a hustota letokruhů, zatímco mezi stranami nebyly zjištěny rozdíly v hustotě raného nebo pozdního dřeva. Tato zjištění naznačují, že zvýšená hustota letokruhů na severní straně může souviset s vyšším podílem pozdního dřeva, což může být ovlivněno dostupností vlhkosti později v růstové sezóně. Tyto výsledky jsou relevantní pro naši studii o korkovém dubu, kde by vliv zavlažování na orientaci a strukturu kořenů, korun mohl být spojen s dostupností vlhkosti během růstu. Pozorované směrové rozdíly ve vlastnostech dřeva nabízejí cenný kontext pro pochopení toho, jak orientace stromů a dostupnost vody ovlivňují růst a architekturu v různých klimatických podmínkách.

Buk lesní (*Fagus Sylvatika*)

Analýza vztahu mezi SLA (specifickou listovou plochou) a transpirací vody ukazuje rozdílné výsledky mezi jednotlivými stromy. U stromů 1, 5, 6 a 10 byla zjištěna střední korelace s hodnotami koeficientu determinace (R^2 0,31–0,57) což naznačuje, že transpirace vody částečně ovlivňuje SLA, ale i další faktory, jako jsou příjem živin či světelné podmínky, rovněž hrají významnou roli. Naopak u stromů 2, 3, 7, 8 a 9 byla korelace silnější (R^2 0,67–0,74), což svědčí o tom, že transpirace má u těchto stromů významný vliv na SLA. Zajímavým aspektem většiny grafů je negativní korelace mezi SLA a transpirací, což znamená, že s rostoucí transpirací dochází k poklesu SLA. Tento vztah lze interpretovat jako adaptaci stromů na zvýšenou potřebu vody – stromy s vyšší transpirací mají menší a méně husté listy, což pomáhá snižovat odpařování a maximalizovat efektivitu při omezené dostupnosti vody. Tento jev podporuje hypotézu, že stromy pod vodním stresem regulují své fyziologické procesy tak, aby lépe hospodařily s vodou. Vztah mezi SLA a azimutem, tedy orientací listů vůči

světovým stranám, vykazoval minimální vliv. Nízké hodnoty koeficientu determinace (R^2) a téměř vodorovné regresní přímky naznačují, že azimut nemá významný vliv na SLA. Tento výsledek je překvapivý, protože se očekávalo, že směr listů vůči slunci ovlivní jejich strukturu a velikost. Pravděpodobně měly stromy rovnoměrný přístup ke slunečnímu světlu nebo větší roli hrály jiné faktory, například dostupnost vody či teplotní podmínky (Hajek et al., 2016). Podobné závěry přináší i studie, která ukázala, že u buku je SLA ovlivněno světelnými podmínkami až o 20 % (Bebre et al., 2022).

Poslední část studie se zaměřila na orientaci korun stromů a směr růstu listů vůči světovým stranám. Grafy ukázaly značné rozdíly v orientaci korun mezi stromy, přičemž některé koruny směřovaly na jihozápad nebo severozápad, zatímco jiné na jihovýchod či východ. Tyto rozdíly mohou být ovlivněny faktory jako dostupnost slunečního světla, směr větru nebo prostorová omezení. Variabilita v orientaci korun naznačuje, že stromy se přizpůsobují lokálním podmínkám například tím, že maximálně využívají sluneční záření nebo minimalizují expozici během nejteplejší části dne, což pomáhá snížit vodní stres. Podobný trend byl zaznamenán u orientace listů, kde některé stromy měly listy orientované na západ, zatímco jiné na východ nebo jihovýchod. Směr na západ, jihozápad a jihovýchod se opakovaně objevoval, což naznačuje, že tyto orientace mohou být výhodné kvůli mikroklimatickým podmínkám jako je dostupnost světla nebo ochrana před přehříváním (Delucia et al., 1991; Hajek et al., 2016). Ve studii (Blad et al., 1972), která zkoumala orientaci listů sóji vůči světovým stranám, bylo zjištěno, že vliv azimutu na listy sóji nevykazuje žádný preferovaný směr. Tento výsledek naznačuje, že v případě sóji orientace listů nemá výrazný vliv na jejich strukturu nebo rozložení, což může být odlišné od zjištění v naší studii o stromech.

10.2 Zhodnocení použití tohoto typu měřeni pro hodnoceni podzemní morfologie kořenové soustavy

Ve středomořských oblastech, kde sezónní sucho významně ovlivňuje ekosystémy, hraje dostupnost půdní vody klíčovou roli při regeneraci dubů a dalších dřevin. Omezený přístup k vodě během suchých období je hlavním faktorem, který může významně ovlivnit úspěšnost regenerace těchto rostlin. Voda je zde jedním z hlavních limitujících zdrojů a její nedostatek může nejen zpomalit růst sazenic, ale také snížit jejich schopnost přežít drsné podmínky středomořského klimatu. Pochopení vlivu vodních zdrojů je proto zásadní pro úspěšné řízení a ochranu těchto dřevinných společenstev v měnícím se klimatu (Gómez-

Aparicio et al., 2008). Přítomnost vody však ovlivňuje růst stromů již od samého počátku. Na této experimentální ploše již mladé rostliny vykazovaly zvýšený radiální růst v reakci na letní fertigaci. Podobně studie (Dinis et al., 2015) zkoumala malé semenáčky Q. suber při různých typech hnojení. Autoři uvádějí, že typ hnojení měl vliv na vývoj jemných kořenů. Ve studii byly strukturální rozdíly nejvýraznější u nejmenších stromků. U stromků hnojených dešťovou vodou se projevily výrazné investice do kořenového systému v poměru ke koruně. To může být příčinou sníženého růstu stromu ve vztahu k ostatním stromům, stejně jako zvýšené alokace zdrojů na rozvoj kořenů za účelem přístupu k podzemní vodě nebo většímu objemu půdy. Naproti tomu fertigovaný protějšek vykazoval opačný trend a rozvíjel úměrně větší korunu vzhledem ke svému kořenovému systému. Větší stromy (dvojice 2 a 3) však vykazovaly kořenový systém úměrnější velikosti jejich koruny. Pokud je velikost považována za zástupný ukazatel věku, dostupnost vody má výraznější vliv na strukturu stromu v ranějších fázích vývoje. V průběhu času se však tyto strukturální rozdíly mohou zmenšovat, jak stromy dále rostou. Tuto domněnku posiluje také délka koruny ke kořenům a prozkoumaná plocha. S rostoucí velikostí stromů je patrná počáteční investice do kořenového systému, následovaná korunou (obr. 5 a 7). To naznačuje, že stromy dávají v počátečních fázích přednost rozvoji kořenového systému. Je známo, že Q. suber spoléhá na podzemní vodu, aby se vyrovnal s letním suchem (David et al., 2007; Otieno et al., 2006), což svědčí o strategii vyhýbání se suchu (Nardiny et al., 1999). Primární strategií stromků je vývoj hlubokých kořenů, aby přežily nepříznivé podmínky (Chirino et al., 2008; Tsakaldimi et al., 2005), což je vzorec jasně pozorovaný u nejmenšího dešťového stromu.

Faktorem, který nejvíce koreloval s ošetřeními, byl průměrný průměr kořenů. Metaanalýza pro bylinné druhy zjistila, že podmínky sucha často vedou ke zvýšení průměru kořenů (Zhou et al., 2019). Silnější kořeny mohou snižovat riziko hydraulického selhání a zvyšovat schopnost rostliny získávat živiny a vodu (Lozano et al., 2020a). V rozporu s našimi zjištěními je studie (Morillas et al., 2023). Autoři pozorovali, že semenáčky Q. suber při vysoké dostupnosti vody vykazují větší průměry kořenů. Zároveň však zjistili, že tento parametr koreluje se zvýšeným přežíváním v podmínkách sucha.

Objem kmene byl jedinou složkou korelující s ošetřeními. Vývoj větví a kořenů se obvykle řídí sezónními zákonitostmi. Naproti tomu radiální růst probíhá po celý rok, což ukazuje větší závislost na meteorologických podmínkách než na fenologických cyklech. Radiální růst Q. suber sledovaný dvakrát týdně vykazoval lineární závislost na dostupnosti vody

až do určité hranice, což vedlo k výraznému růstu u stromů, které dostávaly fertigaci (Camilo-Alves et al., 2022).

Plocha prozkoumaná kořeny korelovala s velikostí stromu, i když v případě středně velkého páru stromů byly patrné rozdíly. Větší plocha prozkoumaná kořeny může být reakcí na hledání vody a živin v celé půdě, jak bylo pozorováno u stromu z dvojice 2, který byl zavlažován deštěm. Ačkoli má tento strom ve srovnání se svým protějškem zavlažovaným hnojivy menší celkovou délku kořenů (graf 12), jeho kořenová architektura a tvar (přílohy A a B) odhalují některé velmi dlouhé kořeny, které tyto výsledky vysvětlují.

Kruhovitost kořenů naznačuje, že se kořeny vyvíjejí ve všech směrech. Tato studie nezjistila žádný významný vliv ošetření na tuto proměnnou. Předchozí studie provedená na stejné pokusné ploše zaznamenala podobné výsledky: dvouleté sazenice vyvíjely své kořeny nezávisle na zavlažovacím systému a umístění vlhkých cibulí, ačkoli sledovaly rýhy (Camilo-Alves et al., 2022). V této studii bylo téměř dosaženo kroužkovitosti kořenů u větších stromů, kde byly kořeny vyvinutější – ne konkrétně v délce kořenů (protože dvojice 2 měla větší délku kořenů než dvojice 3), ale v pořadí kořenů (graf 12). Pokud by fertirrigace snížila kruhovitost kořenů, naznačovalo by to, že stromy byly závislé na vlhkých cibulích vytvořených zavlažovacími kapkami. Protože toto nebylo pozorováno, naznačuje to, že zavlažovací systém mohl být později odstraněn.

Hustota okolní půdy hraje také významnou roli v růstu a struktuře kořenového systému. V Portugalsku byl zkoumán vliv zhutnění půdy na kořenový systém mladých sazenic, přičemž se ukázalo, že délka kůlového kořene je negativně ovlivněna v hloubce 60 a 30 cm (Dinis, Surový, et al., 2015). To naznačuje, že na vývoj kořenů má vliv nejen dostupnost vody, ale také hustota půdy. Interakce mezi dostupností vody a hustotou půdy poukazuje na složitost vývoje stromů, zejména v počátečních fázích. Zatímco stromy hnojené hnojivem mohou vyčlenit více zdrojů na růst koruny, stromy zalévané v utužených půdách mohou být nuceny upřednostnit vývoj kořenů, aby měly přístup k omezenému množství vody a živin. Postupem času, jak stromy rostou a jejich kořenový systém se rozšiřuje, se může vliv těchto rozdílů v raných fázích růstu zmenšovat a vést k vyváženější struktuře mezi kořenovým systémem a korunou. Počáteční podmínky, včetně zhutnění půdy a dostupnosti vody, však hrají zásadní roli při utváření raného vývoje a dlouhodobých růstových vzorců těchto stromů.

Přítomnost vody může ovlivnit schopnost kořenů přijímat vodu. Například u kořenů bavlníku, které jsou dlouhodobě vystaveny nedostatku vody, se snížila jejich schopnost přijímat vodu (Luo et al., 2016). Rostliny zažívají stres ze sucha, když se stanovené procento obsahu vody v půdě nedoplní přirozenými srážkami nebo zavlažováním (Barataud et al., 1995; Chen et al., 2010). Od okamžiku, kdy dojde k náhlému stresu suchem, začne transpirace vody jedincem klesat (North et al., 1997). Celkový příjem vody kořeny v podmínkách sucha závisí také na půdě, vzduchových mezerách mezi půdou a kořenem (Alsina et al., 2011; Pinheiro et al., 2005). Různé vrstvy půdy mají různé podmínky pro vodu, takže při nedostatku vody na povrchu se Quercus suber snaží vytvořit hlubší kořeny a najít tak potřebnou vodu (Wan et al., 2000). Při nedostatku vody má Quercus suber tendenci vytvářet silnější kořeny, které pak rostou, dokud nedosáhnou kompaktní půdy nebo skalního podloží (Dinis, Surovy, et al., 2015). Tyto skutečnosti se potvrdily i v naší studii, neboť jedinci vystavení období sucha (dešťovým podmínkám) měli větší celkovou délku a větší průměrnou tloušťku. To naznačuje, že kořeny hledaly vodu ve spodních vrstvách půdy. Ve studii (Du et al., 2008) testovali zavlažování vodou na kořenech bavlníku. Jejich výsledky ukázaly, že nižší dávky závlahové vody výrazně snížily výšku rostlin, což způsobilo, že rostlina bavlníku trpěla silným vodním stresem (Du et al., 2008).

Částečné zavlažování kořenových zón bylo v posledních letech testováno (Kang et al., 2004). Výnosy a produkce koruny při střídavém částečném zavlažování kořenových zón brázdami byly testovány u zavlažované kukuřice. Ukázalo se, že vlhkost má významný vliv na charakter a tvorbu kořenů. Kořeny bez této vláhy byly částečně zaschlé a neschopné přijímat vodu (Kang et al., 2004). Studie (Scott et al., 2013) uvádí korelaci mezi zdravými a klesajícími korunami. Pokud má strom zdravou korunu, má více jemných kořenů než stromy s chřadnoucími korunami. Kořeny, které mají upadající koruny, mají také více nekróz jemných kořenů než zdravé koruny (Scott et al., 2013).

Při analýze orientace kořenů byly kořeny rozděleny na dvě části: silné (nad 0,5 cm) a tenké (pod 0,5 cm). Silné kořeny měly větší zastoupení dál od zavlažovacího systému, zatímco tenké kořeny měly větší zastoupení na zavlažované straně. Podobný experiment byl proveden v Německu, kde bylo porovnáváno zavlažování M. aquaticum a zjištěno, že vývoj kořenového systému významně reagoval na dostupnost vody a živin. Do 15 cm půdy byla hustota kořenů nejvyšší v podmáčené části a nejnižší v odvodněné části (Schmidt et al., 2009).

Rychlejší růst kořenů byl také potvrzen u bílého dubu (Quercus alba L.), který byl monitorován v polních podmínkách, podobně jako náš zjištěný korkový dub. Při vysokém vodním potenciálu půdy dosáhla rychlost prodlužování kořenů maximální hodnoty, zatímco počet rostoucích kořenů a intenzita růstu kořenů byly nízké. Vztah mezi růstem kořenů a vodním potenciálem listů naznačil, že růst kořenů přispívá k odolnosti bílého dubu vůči suchu (Rzigui et al., 2018). (Lozano et al., 2020b) a rychlost růstu klesá, když se snižuje vlhkost půdy. Ve svém experimentu zkoumali růst kořenů červeného dubu a bílého dubu. Zjistili, že při nízkém množství vody nebo vysokém stresu byla průměrná suchá hmotnost sazenic pouze 11%. Při vystavení vysokému stresu byl růst výhonků potlačen více než růst kořenů. Nakonec porovnali duby mezi sebou a zjistili, že každý reagoval na stresové podmínky odlišně. Kořeny bílého dubu rostly mírně lépe než kořeny červeného dubu při vodním stresu (Disante et al., 2011).

10.3 Srovnaní měřeni pomoci magnetického digitizeru a jiných moderních dendrometrických metod zejména fotogrammetrie

V dnešní době se studium architektury dřevin, zejména u mladých jedinců, stává stále důležitějším kvůli snaze porozumět růstu stromů (Anest et al., 2021). Vyvstává otázka, zda fotogrammetrie dokáže dosáhnout stejné úrovně přesnosti jako technologie Fastrak Polhemus. Zatímco Fastrak Polhemus je známý minimálními chybami při měření mladých stromů, jeho časové nároky v terénu nemusí být vždy optimální (Mokros et al., 2018; Korpela, 2004). Proto se jako možná alternativa objevuje blízká fotogrammetrie a v této studii byla srovnána se systémem Fastrak. Analýza se zaměřila na hodnoty RMSE (Root Mean Square Error) pro čtyři klíčové ukazatele přesnosti měření: výšku stromu, DBH (průměr ve výšce prsou), objem a počet větví.

Měření výšky vykazovalo největší konzistenci mezi oběma metodami, zatímco největší odchylky byly pozorovány v odhadu objemu jehličnatých stromů, kde rRMSE činil 34,17 %. Tato výrazná chyba je pravděpodobně způsobena zastíněním větví vlivem asimilačního aparátu stromu, což ztěžuje zachycení přesných fotografií spodních částí kmene nebo vnitřních částí větví. Navíc odstranění asimilačních orgánů ve 3D modelech vedlo ke ztrátě některých dřevnatých částí, jak je znázorněno na obrázcích 12 nebo 4. Komplexnost efektivního

odstranění okolních bodů mraku, zejména u jehličnanů, dále ovlivňuje přesnost měření. I listnaté stromy představují výzvy, protože jejich větší pohyb při větrných podmínkách znesnadňuje fotogrammetrickou rekonstrukci vrcholových výhonů. Tento pohyb nejen snižuje důvěru v data z 3D bodového mraku, ale také generuje značný šum, což vede ke ztrátě tenkých větví během filtrování kvůli jejich již nízké důvěře při rekonstrukci. Tyto a další faktory jsou rovněž zmíněny v jiných studiích jako běžný problém fotogrammetrie (Frey et al., 2018; Zhu et al., 2021) a jejich dopady byly číselně shrnuty v komparativní analýze navrhované studie. Pravděpodobné je, že omezení těchto vlivů by výrazně zlepšilo výkon fotogrammetrie. V praktických venkovních podmínkách lesa nebo parku by tyto vlivy mohly být redukovány pouze získáním většího množství snímků za lepších světelných podmínek, zejména z úhlů odhalujících vnitřní architekturu koruny stromu. Nicméně k úspěšnému použití algoritmu Structure from Motion pro vytvoření bodového mraku je třeba použít vhodný pracovní postup.

Studie srovnávající metody dálkového snímání pro rekonstrukci stromové architektury jsou v současné době vzácné, a pokud je srovnáme s několika dostupnými studiemi, jako například Miller et al., (2015) lze pozorovat relativní výkon. Miller et al., (2015) ručně změřili 30 stromů v květináčích a data porovnali s fotogrammetrickými 3D rekonstrukcemi. Rozměry 3D modelu byly rovněž měřeny ručně pomocí softwaru Agisoft PhotoScan. Pomocí těchto metod byla výška měřena s rRMSE 3,74 %, DBH s rRMSE 9,6 %, objem větví s rRMSE 47,53 % a celkový objem s 18,53 % rRMSE (Miller et al., 2015). Velmi podobné výsledky ukázala i studie Morgenrotha a Gomeze (Morgenroth et al., 2014). Tyto výsledky ukazují lepší výkonnost než v navrhované studii. Na druhou stranu metodika obou zmíněných studií vyžadovala značné množství manuální práce a podmínky pro pořizování fotografií byly výhodnější. V navrhované studii pracovní postup spočíval v automatickém provádění odhadů rozměrů poskytovaných softwarem TreeQSM a stromy byly přirozeně pěstovány v půdě bez možnosti přemístění do vhodnějšího prostoru s menším větrem a méně překážkami. Hlavním zdrojem chyb v této prezentované studii je pravděpodobně skutečnost, že při manuálním měření rozměrů stromu v 3D modelu může člověk přesně odhadnout, kde větve začínají a končí i v řídkém bodovém mraku. Při použití softwaru je však tato schopnost ztracena a výsledek závisí na hustotě bodového mraku, který je negativně ovlivněn výše zmíněnými jevy.

Podobně byly malé struktury, jako v této navrhované studii, zkoumány i ve studii Koesera a kol. (Koeser et al., 2016). Tato studie vypočítala objem kořenů stromů a k tomuto účelu použila také CRP. rRMSE u odhadů činilo 12,3 % a výsledky naznačily, že fotogrammetrie je pro tyto účely vhodná.

Další publikované studie se většinou zaměřují na odhad inventarizačních atributů lesa u dospělých stromů, zejména DBH a výšku dospělých stromů. Srovnání těchto výsledků s výsledky dosaženými v této navrhované studii by mělo odůvodnit použitou metodiku, přestože výsledky ukazují, že jsou nutná vylepšení. Ve studii Surového a kol. (Surový at al.,2016) byla data z 20 dospělých stromů vyhodnocena pomocí CRP a výsledné RMSE pro DBH kmene činilo 1,87 cm. Podobně Mokroš a kol. (Mokroš et al., 2018) dosáhli odhadů DBH s rRMSE menším než 2 %.

Naopak, naše studie zjistila RMSE pro DBH u listnatých stromů na 1,12 cm a u jehličnatých stromů na 2,87 cm, což odpovídá relativním chybám 44,8 % a 114,8 % respektive. I když jsou tyto výsledky horší než ve zmíněných studiích, je důležité vzít v úvahu, že naše studie se zaměřila na malé stromy s často silně zastíněnými kmeny a složitější architekturou a celý úkol byl náročnější. Pohled na dosažené výsledky u malých stromů ve srovnání s dospělými stromy naznačuje, že čím větší objekty jsou, tím lepší výsledky jsou dosaženy.

Metody pozemního skenování a fotogrammetrie jsou potenciálně velmi přesné pro měření průměru kmene a výšky stromů.Ppro měření objemu bývají tyto metody méně přesné. Typ stromu také hraje významnou roli v přesnosti měření. Naše výsledky naznačují, že listnaté stromy je obecně snazší měřit než jehličnany, pravděpodobně kvůli jejich jednodušší struktuře větví a koruny. Naopak jehličnany mají obvykle složitější větvení a hustší koruny, což ztěžuje přesné měření parametrů, jako je objem.

Je velmi vhodné věnovat pozornost aspektům, které snižují kvalitu fotogrammetrie, neboť jsou to pravděpodobně hlavní problémy v této oblasti. Možná, že jiné metody skenování, jako je TLS nebo MLS s dostatečným rozlišením, by mohly být pro tento úkol vhodné, ale dosud nebyly v tomto oboru dostatečně testovány.

Autoři navrhované studie věří, že její výsledky mohou přinést větší povědomí o tématu rekonstrukce architektury stromů, a že bude proveden další výzkum v oblasti analýzy 3D dat, přičemž se zaměří zejména na snadno použitelné a více automatizované zpracování.

11 Závěr

Metoda sběru dat použita v této studii je velmi podrobně a pečlivě zpracována, aby každý uživatel, který bude používat stejnou metodu jako v této práci, snadno pochopil celý proces. Metodika zahrnuje všechny kroky od připojení přístroje Fastrak Polhemus, přes jeho správné umístění, až po samotné měření a vytvoření 3D modelu. Tato podrobná metodika zajišťuje, že i noví uživatelé budou schopni efektivně a přesně využít tuto metodu měření.

Použití přístroje Fastrak Polhemus se ukázalo jako efektivní nejen pro měření koruny stromu, ale také pro analýzu kořenů. Tento přístroj umožňuje přesně zaznamenat vnitřní části koruny a překrývající se větve, což je významné zejména v mladých porostech, kde fotogrammetrie není efektivní. U kořenů se ukázalo, že nezalévané stromy měly větší kořenový systém, zejména u menších stromů, zatímco fertigované stromy měly vyrovnanější poměr objemu koruny a kořenů. Zavlažování ovlivnilo objem kmene více než kořenový systém. Výsledky naznačují, že fertigační systémy mohou být vyřazeny bez negativního vlivu na vitalitu stromů. Analýza dat ukázala, že pětileté borovice lesní v holoseči mají nejvyšší hustotu větvení a otevřená holoseč poskytuje nejlepší podmínky pro růst. Počet větví třetího řádu není pozitivně korelován s výškou stromů, což naznačuje, že mladé borovice investují biomasu jak do bočních větví, tak do výškového růstu. Analýza orientace listů a korun ukázala variabilitu, která může odrážet vliv ekologických podmínek, jako je dostupnost slunečního světla a vítr. Vztah mezi SLA a transpirací vody ukázal smíšené výsledky, přičemž většina stromů vykazuje negativní korelaci mezi SLA a transpirací vody. Vztah mezi SLA a azimutem neukázal výrazné vlivy, což naznačuje, že SLA zůstává stabilní bez ohledu na orientaci listů.

Metoda sběru dat pomocí magnetického digitizéru Polhemus Fastrak poskytuje vysoce kvalitní 3D modely, což je výhodné pro další výzkum. Vzhledem k pracnosti analýzy kořenů doporučujeme další studie zaměřené na vztah mezi zavlažováním, zhutněním půdy a strukturou kořenů u různých velikostí stromů, aby se lépe pochopily tyto vztahy a optimalizovaly zavlažovací strategie.

12 Bibliografické zdroje

Abdel-Rahman, A. A., & El-Sharkawi, H. M. (1974). Response of olive and almond orchards to partial irrigation under dry – farming practices in semi-arid regions: II. Plant – Soil water relations in olive during the growing season. Plant and Soil, 41, 13–31.

A.D. Bell. (1993). Plant Form. Oxford University Press, New York.

Adamopoulos, E., Rinaudo, F., & Ardissono, L. (2021). A Critical Comparison of 3D Digitization Techniques for Heritage Objects †. ISPRS Int. J. Geo-Inf, 10, 10. doi: 10.3390/ijgi

Aleksandrowicz-Trzcińska, M., Drozdowski, S., Wołczyk, Z., Bielak, K., & Zybura, H. (2017). Effects of reforestation and site preparation methods on early growth and survival of scots pine (Pinus sylvestris L.) in South-Eastern Poland. Forests, 8(11). doi: 10.3390/f8110421

Alemdag, I. S. (1978). Evaluation of Some Competition Indexes for the Prediction of Diameter Increment in Planted White Spruce. Forest Management Institute,Forests and forestry

Alsina, M. M., Smart, D. R., Bauerle, T., De Herralde, F., Biel, C., Stockert, C., Negron, C., & Save, R. (2011). Seasonal changes of whole root system conductance by a drought-tolerant grape root system. Journal of Experimental Botany, 62(1), 99–109. doi: 10.1093/jxb/erq247

Anest, A.; Charles-Dominique, T.; Maurin, O.; Millan, M.; Edelin, C.; Tomlinson, K.W. Evolving the Structure: Climatic and Developmental Constraints on the Evolution of Plant Architecture. A Case Study in Euphorbia. New Phytologist 2021, 231, 1278–1295, doi:10.1111/nph.17296.

Ashraf, M. (2010). Inducing drought tolerance in plants: Recent advances. In Biotechnology Advances (Vol. 28, Issue 1, pp. 169–183). doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.11.005

Author, B., Leclercq, S., & Andrews, H. N. (1960). Calamophyton bicephalum, a New Species from the Middle Devonian of. In Source: Annals of the Missouri Botanical Garden (Vol. 47, Issue 1)

Bachmann, M. (1998). Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. Methodische

Untersuchung in Bergmischwäldern. Forslicheforschungsberichte.

Barataud, F., Moyne, C., Br6da, N., & Granier, A. (1995). Soil water dynamics in an oak stand IL A model o f the soil-root network compared with experimental data. In Plant and Soil (Vol. 172). Kluwer Academic Publishers.

Bartels, R. H., Beatty, J. C., & Barsky, N. A. (1995). An introduction to splines for use in computer graphics and geometric modeling. Morgan Kaufmann.

Bebre, I., Marques, I., & Annighöfer, P. (2022). Biomass Allocation and Leaf Morphology of Saplings Grown under Various Conditions of Light Availability and Competition Types. Plants, 11(3). doi: 10.3390/plants11030305

Bella, I. E. (1971). A New Competition Model for Individual Trees. Forest Science, 17(3), 364–372.

Berry, C. M. (2000). A reconsideration of Wattieza Stockmans (here attributed to Cladoxylopsida) based on a new species from the Devonian of Venezuela. In Review of Palaeobotany and Palynology (Vol. 112).

Berry', C. M., & Fairon-Demaret, M. (1997). C 1997 by The University of Chicago. All rights reserved. In Int. J. Plant Sci (Vol. 158, Issue 3). Retrieved from http://www.journals.uchicago.edu/t-and-c

Bílek, L., Vacek, Z., Vacek, S., Bulušek, D., Linda, R., & Král, J. (2018). Are clearcut borders an effective tool for scots pine (Pinus sylvestris L.) natural regeneration? Forest Systems, 27(2). doi: 10.5424/fs/2018272-12408

Blad, B. L., & Baker, D. G. (1972). Orientation and Distribution of Leaves Within Soybean Canopies 1.

Blakely L. M., M. Durham, T. A. Evans, & Ruth M. Blakely. (1982). Experimental studies on lateral root formation in radish seedling roots. I. General methods, developmental stages, and spontaneous formation of laterals. Botanical Gazette 143, 3, 341–352.

Böhm, W. (2012). Methods of studying root systems. Springer Science & Business Media.

Bonam, P. M., & Banks, H. P. (1966). CALAMOPHYTON IN THE MIDDLE DEVONIAN OF NEW YORK STATE 1 (Vol. 53, Issue 8).

Brichta, J., Bílek, L., Linda, R., & Vítámvás, J. (2020). Does shelterwood regeneration on natural Scots pine sites under changing environmental conditions represent a viable alternative to traditional clear-cut management? Central European Forestry Journal, 66(2), 104–115. doi: 10.2478/forj-2020-0014

Camilo-Alves, C., Dinis, C., Vaz, M., Barroso, J. M., & Ribeiro, N. A. (2020). Irrigation of young cork oaks under field conditions-testing the bestwater volume. Forests, 11(1). doi: 10.3390/f11010088

Camilo-Alves, C., Nunes, J. A., Poeiras, A. P., Ribeiro, J., Dinis, C., Barroso, J. M., Vaz, M., & Almeida-Ribeiro, N. (2022). Influence of water and nutrients on cork oak radial growth – looking for an efficient fertirrigation regime. Silva Fennica, 56(3). doi: 10.14214/sf.10698

Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2000). An introduction to environmental biophysics. Springer Science & Business Media.

Cardillo, M., Mace, G. M., Gittleman, J. L., & Purvis, A. (2006). Latent extinction risk and the future battlegrounds of mammal conservation. In PNAS March (Vol. 14, Issue 11). Retrieved from www.pnas.orgcgidoi10.1073pnas.0510541103

Cescatti, A., & Niinemets, Ü. (2004). Leaf to Landscape.

Chelle, M., Evers, J. B., Combes, D., Varlet-Grancher, C., Vos, J., & Andrieu, B. (2007). Simulation of the three-dimensional distribution of the red:far-red ratio within crop canopies. New Phytologist, 176(1), 223–234. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02161.

Chen, J., Lin, L., & Lü, G. (2010). An index of soil drought intensity and degree: An application on corn and a comparison with CWSI. Agricultural Water Management, 97(6), 865–871. doi: 10.1016/j.agwat.2010.01.017

Chidi, E. B., Ebenezer, M. I., & Kenneth, E. U. (2014a). Tree Crown Architecture: Approach to Tree Form, Structure and Performance: A Review. International Journal of Scientific and Research Publications, 5(9). Retrieved from www.ijsrp.org

Chidi, E. B., Ebenezer, M. I., & Kenneth, E. U. (2014b). Tree Crown Architecture: Approach to Tree Form, Structure and Performance: A Review. International Journal of Scientific and Research

Publications, 5(9). Retrieved from www.ijsrp.org

Chirino, E., Vilagrosa, A., Hernández, E. I., Matos, A., & Vallejo, V. R. (2008). Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in Quercus suber L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. Forest Ecology and Management, 256(4), 779–785. doi: 10.1016/j.foreco.2008.05.035

Condés, S., Aguirre, A., & del Río, M. (2020). Crown plasticity of five pine species in response to competition along an aridity gradient. Forest Ecology and Management, 473. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118302

Crown architecture of Abies balsamea from four canopy position. (1997). Retrieved from http://treephys.oxfordjournals.org/da Silva, R. B. G., Gabira, M. M., Prado, D. Z. Do, Uesugi, G., Simões, D., & da Silva, M. R. (2020). Influence of mean leaf angles and irrigation volumes on water capture, leaching, and growth of tropical tree seedlings. Forests, 11(11), 1–15. doi: 10.3390/f11111198

Danjon, F, Sinoquet, H., Godin, C., Colin, F., & Drexhage, M. (1999). Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPmod software. In Plant and Soil (Vol. 211). Retrieved from http://www.polhemus.com

Danjon, Frédéric, & Reubens, B. (2008a). Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. In Plant and Soil (Vol. 303, Issues 1–2, pp. 1–34). Springer Netherlands. doi: 10.1007/s11104-007-9470-7

Danjon, Frédéric, & Reubens, B. (2008b). Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. In Plant and Soil (Vol. 303, Issues 1–2, pp. 1–34). Springer Netherlands. doi: 10.1007/s11104-007-9470-7

David, T. S., HenriQues, M. O., Kurz-besson, C., Nunes, J., Valente, F., Vaz, M., Pereira, J. S., Siegwolf, R., Chaves, M. . M., Gazarini, L. C., & David, J. S. (2007). Water-use strategies in two co-occurring Mediterranean evergreen oaks: surviving the summer drought. Tree Physiology, 27(793–803).

De Smet, Hyo Jung, Hanne Baillieux, Peter P. De Deyn, Peter Mariën, & Philippe Paquier. (2007). The cerebellum and language: the story so far. Folia Phoniatrica et Logopaedica, 59(4), 165–170.

De Smet, I., Tetsumura, T., De Rybel, B., dit Frey, N. F., Laplaze, L., Casimiro, I., Swarup, R., Naudts, M., Vanneste, S., Audenaert, D., Inzé, D., Bennett, M. J., & Beeckman, T. (2007). Auxin-dependent regulation of lateral root positioning in the basal meristem of Arabidopsis. Development, 134(4),

681–690. doi: 10.1242/dev.02753

Delucia, E. H., Shenoi, H. D., Naidu, S. L., & Day, T. A. (1991). International Association for Ecology Photosynthetic Symmetry of Sun and Shade Leaves of Different Orientations. In Source: Oecologia (Vol. 87, Issue 1).

Denby, K., & Gehring, C. (2005). Engineering drought and salinity tolerance in plants: Lessons from genome-wide expression profiling in Arabidopsis. In Trends in Biotechnology (Vol. 23, Issue 11, pp. 547–552). doi: 10.1016/j.tibtech.2005.09.001

Di Iorio, A., Lasserre, B., Scippa, G. S., & Chiatante, D. (2005). Root system architecture of Quercus pubescens trees growing on different sloping conditions. Annals of Botany, 95(2), 351–361. doi: 10.1093/aob/mci033

Dinis, C., Surovy, P., Ribeiro, N. A., Machado, R., & Oliveira, M. R. G. (2015). Cork Oak Seedling Growth under Different Soil Conditions from Fertilisation, Mycorrhizal Fungi and Amino Acid Application. Journal of Agricultural Science, 8(1), 55. doi: 10.5539/jas.v8n1p55

Dinis, C., Surový, P., Ribeiro, N., & Oliveira, M. R. G. (2015). The effect of soil compaction at different depths on cork oak seedling growth. New Forests, 46(2), 235–246. doi: 10.1007/s11056-014-9458-0

Disante, K. B., Fuentes, D., & Cortina, J. (2011). Response to drought of Zn-stressed Quercus suber L. seedlings. Environmental and Experimental Botany, 70(2–3), 96–103. doi: 10.1016/j.envexpbot.2010.08.008

Diversity and evolution of land plants. (1995). Chapman & Hall.

Dolan, L., Janmaat, K., Willemsen, V., Linstead, P., Poethig, S., Roberts, K., & Scheres, B. (1993). Cellular organisation of the Arabidopsis thaliana root. 119, 71–84.

Doutora, P., Do, M., Gamito De Oliveira, R., Nuno, D., Cabral De Almeida, M., Doutor, R., Surový, P., & Dinis, C. O. (2014). INSTITUTO DE INVESTIGAÇÃO E FORMAÇÃO AVANÇADA ÉVORA, NOVEMBRO 2014 CORK OAK (Quercus suber L.) ROOT SYSTEM: A STRUCTURAL-FUNCTIONAL 3D APPROACH.

Downloaded from www.nrcresearchpress. (2010). In Can. J. For. Res. Retrieved from www.nrcresearchpress.com

Du, T., Kang, S., Zhang, J., & Li, F. (2008). Water use and yield responses of cotton to alternate partial root-zone drip irrigation in the arid area of north-west China. Irrigation Science, 26(2), 147–159. doi: 10.1007/s00271-007-0081-0

Edwards, J. G. (2003). Field based 3D digitising of woody root architecture–techniques and results. In Proc. 3rd Int. Symp. on Dynamics of Physiological Processes in Woody Roots, 28.

Ekanayake, I. J., O'toole, J. C., Garrity, D. P., & Masajo, T. M. (1985). Inheritance of Root Characters and their Relations to Drought Resistance in Rice.

Ellison, A. M., & Niklas, K. J. (1988). BRANCHING PATTERNS OF SALICORNIA EUROPAEA (CHENOPODIACEAE) AT DIFFERENT SUCCESSIONAL STAGES: A COMPARISON OF THEORETICAL AND REAL PLANTS. American Journal of Botany, 75(4), 501–512. doi: 10.1002/j.1537-2197.1988.tb13468.x

Ennos, A. R. (1997). Wind as an ecological factor. Springer Science & Business Media, 12.

F. Hallé, & R.A.A. Oldeman. (1970). Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Paris:Masson.

Fabrika, M. (2005). Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA: Koncepcia, konštrukcia a programové riešenie. Technická univerzita vo Zvolene.

Fabrika, M., & Merganič, J. (2010). Modelling solar radiation in forest canopy for the purposes of forest growth modelling. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/265818441

Fabrika, M., & Pretzsch, H. (2011). Analýza a modelovanie lesných ekosystémov. Technická univerzita vo Zvolene.

Fairon-Demaret, M., & Berry, C. M. (2000). A RECONSIDERATION OF HYENIA ELEGANS KRA¨USELKRA¨KRA¨USEL ET WEYLAND AND HYENIA "COMPLEXA" LECLERCQ: TWO MIDDLE DEVONIAN CLADOXYLOPSIDS FROM WESTERN EUROPE. In Int. J. Plant Sci (Vol. 161, Issue 3). Retrieved from http://www.journals.uchicago.edu/t-and-c

Fisher, J. B., & Hibbs, D. E. (1982). Plasticity of Tree Architecture: Specific and Ecological Variations Found in Aubreville's Model. In Source: American Journal of Botany (Vol. 69, Issue 5).

Ford, R., & Ford, E. D. (1990). Structure and Basic Equations of a Simulator for Branch Growth in the Pinaceaet. In J. theor. Biol (Vol. 146).

Frey, J.; Kovach, K.; Stemmler, S.; Koch, B. UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. Remote Sens (Basel) 2018, 10, 912, doi:10.3390/rs10060912.

G. Colchester. (2012). 3SPACE ® FASTRAK ® USER MANUAL OPM00PI002 REV. G.

G. Jürgens. (2001). Apical–basal pattern formation in Arabidopsis embryogenesis. The EMBO Journal.

Gaffrey, D., Sloboda, S., Fabrika, M., & Šmelko, Š. (2001). Terrestrial single-image photogrammetry for measuring standing trees, as applied in the Dobroč virgin forest. Journal of Forest Science, 41(2), 75–87.

Garnier, E., & Berger, A. (1985). Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. Journal of Horticultural Science, 60(1), 47–56. doi: 10.1080/14620316.1985.11515600

Gavrikov, V. L., & Sekretenko, O. P. (1996). EtOLOGI[DL mODELLInG Shoot-based three-dimensional model of young Scots pine growth. In Ecological Modelling (Vol. 88).

Giesen, P., & Berry, C. M. (2013a). Reconstruction and growth of the early tree Calamophyton (Pseudosporochnales, Cladoxylopsida) based on exceptionally complete specimens from Lindlar, Germany (Mid-Devonian): Organic connection of Calamophyton branches and Duisbergia trunks. International Journal of Plant Sciences, 174(4), 665–686. doi: 10.1086/669913

Giesen, P., & Berry, C. M. (2013b). Reconstruction and growth of the early tree Calamophyton (Pseudosporochnales, Cladoxylopsida) based on exceptionally complete specimens from Lindlar, Germany (Mid-Devonian): Organic connection of Calamophyton branches and Duisbergia trunks. International Journal of Plant Sciences, 174(4), 665–686. doi: 10.1086/669913

Gilmore D.S, & Seymmour R.S. (1997). Crown architecture of Abies balsamea from four canopy positions.

Gladish, D. K., & Rost, T. L. (1993). 8472/93 $6.01)+ q),(lll Printed in (;real Britain (Vol. 33, Issue 2). Pergamon Press.

Gómez-Aparicio, L., Pérez-Ramos, I. M., Mendoza, I., Matías, L., Quero, J. L., Castro, J., Zamora, R., & Marañón, T. (2008). Oak seedling survival and growth along resource gradients in Mediterranean forests: Implications for regeneration in current and future environmental scenarios. Oikos, 117(11), 1683–1699. doi: 10.1111/j.1600-0706.2008.16814.x

Gross, R., & Julene, M. (2002). Supersonic air jets preserve tree roots in underground pipeline installation. On Oak Woodlands: Oaks in California's Changing Landscape, 381.

Gross Rob. (1995). Construction application of hydraulic soil excavation. Proceedings: trees and building sites. International Society of Arboricultural, 177–184.

Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. In Ecological Modelling (Vol. 135). Retrieved from www.elsevier.com/locate/ecolmodel

Hajek, P., Kurjak, D., Von Wühlisch, G., Delzon, S., & Schuldt, B. (2016). Intraspecific variation in wood anatomical, hydraulic, and foliar traits in ten European beech provenances differing in growth yield. Frontiers in Plant Science, 7(JUNE2016). doi: 10.3389/fpls.2016.00791

Hallé, F. (2010). ARTÍCULO INVITADO ARQUITECTURA DE LOS ÁRBOLES. In Bol. Soc. Argent. Bot (Vol. 45, Issue 4).

Henry S. Horn. (1971a). The adaptive geometry of trees: Vol. No.3. Princeton University Press.

Henry S. Horn. (1971b). The adaptive geometry of trees: Vol. No.3. Princeton University Press.

Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., & Verbruggen, N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? In Trends in Plant Science (Vol. 11, Issue 12, pp. 610–617). doi: 10.1016/j.tplants.2006.10.007

Hervé Sinoquet, & Pierre Rivet. (1997). Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device.

Hodge, A. (2004). The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. In New Phytologist (Vol. 162, Issue 1, pp. 9–24). doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01015.

Hoffman, C. M., Morgan, P., Charneley, S., Collins, B. M., & Mell, W. (2016). Fire regime conditions and crown fire potential in western US forests. Forest Ecologi Managemment, 378, 57–67.

Hood, S. M., Smith, S. L., & Ottmar, R. D. (2014). Crown Fire Behavior in Western Conifer Forests: A Synthesis of Research and Management Implications. United States Department of Agriculture Forest Service: Washington, 73–74.

https://grogra.de/. (2021.)

Hu, B. G., & Jaeger, M. (2003). Analysis and modeling of the root system architecture of winter wheat seedling. Springer and Tsinghua University Press. Retrieved from https://hal.inria.fr/inria-00122503

Ijsrp. (2015). September 2015 Online Print Version International Journal of Scientific and Research Publications. Retrieved from http://www.ijsrp.org/e-journal.html

Inoue, S., Shirota, T., Mitsuda, Y., Ishii, H., & Gyokusen, K. (2008). Effects of individual size, local competition and canopy closure on the stem volume growth in a monoclonal Japanese cedar (Cryptomeria japonica D. Don) plantation. Ecological Research, 23(6), 953–964. doi: 10.1007/s11284-008-0462-8

J. M. Gere, & B.J. Goodno. (2001). Mechanics of Materials 5th. Brooks Cole.

Jaeger, H. A., & Cantillon-Murphy, P. (2018). Distorter characterisation using mutual inductance in electromagnetic tracking. Sensors (Switzerland), 18(9). doi: 10.3390/s18093059

Jarvis, P. G., & Leverenz, J. W. (1983). Productivity of Temperate, Deciduous and Evergreen Forests.

Jiang, K., & Feldman, L. J. (2005). Regulation of root apical meristem development. In Annual Review of Cell and Developmental Biology (Vol. 21, pp. 485–509). doi: 10.1146/annurev.cellbio.21.122303.114753

Kang, S., & Zhang, J. (2004). Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2437–2446. doi: 10.1093/jxb/erh249

Karl, H., & Bugmann, M. (1994). On the Ecology of Mountainous Forests in aChanging Climate: A Simulation Study.

Kenrick, P., & Strullu-Derrien, C. (2014). The origin and early evolution of roots. Plant Physiology, 166(2), 570–580. doi: 10.1104/pp.114.244517.

Koeser, A.K.; Roberts, J.W.; Miesbauer, J.W.; Lopes, A.B.; Kling, G.J.; Lo, M.; Morgenroth, J. Testing the Accuracy of Imaging Software for Measuring Tree Root Volumes. Urban For Urban Green 2016, 18, 95–99, doi:10.1016/j.ufug.2016.05.009.

Komarov, A., Chertov, O., Zudin, S., Nadporozhskaya, M., Mikhailov, A., Bykhovets, S., Zudina, E., & Zoubkova, E. (2003). EFIMOD 2 - A model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. Ecological Modelling, 170(2–3), 373–392. doi: 10.1016/S0304-3800(03)00240-0.

Konopka, B., Šebeň, V., Merganicova, K., & Pajtík, J. (2020). Silver birch aboveground biomass allocation pattern, stem and foliage traits with regard to intraspecific crown competition. Central

European Forestry Journal, 66(12).

Korpela, Ilkka. Individual Tree Measurements by Means of Digital Aerial Photogrammetry; Finnish Society of Forest Science, 2004; ISBN 9514019156.

Kurth, W. (1999). Towards universality of growth grammars: Models of Bell, Pagès, and Takenaka revisited.

Kurth, W. (2007). Repositorium für die Medienwissenschaft Specification of Morphological Models with L-Systems and Relational Growth Grammars. doi: 10.25969/mediarep/16747.

Kurth, W., & Jürgenson, G. A. (1997). Triebwachstum und Verzweigung junger Fichten in Abhängigkeit von den beiden Einflußgrößen “Beschattung” und “Wuchsdichte”: Datenaufbereitung und-analyse mit GROGRA.

Kuželka, K., Brožková, H., Marušák, R., Surový, P., Tauber, R., Urbánek, V., & Vopěnka, P. (2014). Měření lesa moderními metody sběru a zpracování dat. Česká Zemědělská Univerzita v Praze, 53–79.

Kwak, M. J., Lee, S. H., & Woo, S. Y. (2011). Growth and anatomical characteristics of different water and light intensities on cork oak (Quercus suber L.) seedlings. African Journal of Biotechnology, 10(53), 10964–10979. doi: 10.5897/ajb11.2846

Lafitte, R., & Courtois, B. (2000). Genetic variation in performance under reproductive-stage water deficit in a doubled haploid rice population in upland fields. Production in Water-Limited Environments, 97.

Lang, A. R. G. (1973). LEAF ORIENTATION OF A COTTON PLANT. In Agricultural Meteorology (Vol. 11).

Lau, A., Bentley, L. P., Martius, C., Shenkin, A., Bartholomeus, H., Raumonen, P., Malhi, Y., Jackson, T., & Herold, M. (2018). Quantifying branch architecture of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. Trees - Structure and Function, 32(5), 1219–1231. doi: 10.1007/s00468-018-1704-1.

Leclercq, S. (1969). CALAMOPHYTON PRIMAEVUM: THE COMPLEX MORPHOLOGY OF ITS FERTILE APPENDAGE I (Vol. 56, Issue 7).

Lefsky, M.A., Cohen, W. B., & Spies, T. A. (2001). An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. Canadian Journal of Forest Research, 31(1), 78–87. doi: 10.1139/cjfr-31-1-78

Lefsky, Michael A, Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G., & Shugart, H. H. (1999). Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA.

Lefsky, Michael A., Harding, D. J., Keller, M., Cohen, W. B., Carabajal, C. C., Del Bom Espirito-Santo, F., Hunter, M. O., & de Oliveira, R. (2005). Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. Geophysical Research Letters, 32(22), 1–4. doi: 10.1029/2005GL023971.

Lesy SR. (2022). Lesy Slovensej republiky, Štátny podnik.

Lexer, M. J., & Ho Ènninger, K. (2001). A modifed 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. Retrieved from http://www.boku.ac.at/waldbau.

Libosad. (2022). LIBO SAD.

Liénard, J., & Strigul, N. (2016). An individual-based forest model links canopy dynamics and shade tolerances along a soil moisture gradient. Royal Society Open Science, 3(2). doi: 10.1098/rsos.150589.

Lindenmayer, A. (1990). The algorithmic beauty of plants.

Lindsey, P. A., Gross, R., Milano, R., Watson, G., & Neely, D. (1995). An investigation to assess the importance of street infrastructure improvement on roots of adjacent cork oak tree. Trees and Building Sites. International Society of Arboricultural, Savoy, Illinois, 22–32.

Linkohr, B. I., Williamson, L. C., Fitter, A. H., & Leyser, H. M. O. (2002). Nitrate and phosphate availability and distribution have different effects on root system architecture of Arabidopsis. Plant Journal, 29(6), 751–760. doi: 10.1046/j.1365-313X.2002.01251.

Lischke, H. (2001). New developments in forest modeling: Convergence between applied and theoretical approaches. Natural Resource Modeling, 14(1), 71–102. doi: 10.1111/j.1939-7445.2001.tb00051.

Loïc, P. (2002). Modeling root system architecture. In Plant Roots.

López-Bucio, J., Cruz-Ramírez, A., & Herrera-Estrella, L. (2003). The role of nutrient availability in regulating root architecture. In Current Opinion in Plant Biology (Vol. 6, Issue 3, pp. 280–287). Elsevier Ltd. doi: 10.1016/S1369-5266(03)00035-9.

López-Bucio, J., Hernández-Abreu, E., Sánchez-Calderón, L., Nieto-Jacobo, M. F., Simpson, J., & Herrera-Estrella, L. (2002). Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. Plant Physiology, 129(1), 244–256. doi: 10.1104/pp.010934.

Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Flaig, I. C., & Rillig, M. C. (2020a). Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. Functional Ecology, 34(11), 2224–2235. doi: 10.1111/1365-2435.13656.

Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Flaig, I. C., & Rillig, M. C. (2020b). Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. Functional Ecology, 34(11), 2224–2235. doi: 10.1111/1365-2435.13656.

Luo, H. H., Zhang, Y. L., & Zhang, W. F. (2016). Effects of water stress and rewatering on photosynthesis, root activity, and yield of cotton with drip irrigation under mulch. Photosynthetica, 54(1), 65–73. doi: 10.1007/s11099-015-0165-7.

MacGregor, D. R., Deak, K. I., Ingram, P. A., & Malamy, J. E. (2008). Root system architecture in Arabidopsis grown in culture is regulated by sucrose uptake in the aerial tissues. Plant Cell, 20(10), 2643–2660. doi: 10.1105/tpc.107.055475.

Mair, A., Dupuy, L. X., & Ptashnyk, M. (2022). Model for water infiltration in vegetated soil with preferential flow oriented by plant roots. Plant and Soil, 478(1–2), 709–729. doi: 10.1007/s11104-022-05501-6.

Malamy, J. E. (2005a). Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. In Plant, Cell and Environment (Vol. 28).

Malamy, J. E. (2005b). Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. In Plant, Cell and Environment (Vol. 28).

Mandelbrot, B. B. (1989). Fractal geometry: what is it, and what does it do ?

Martin, G. L., & Ek, A. R. (1984). A Comparison of Competition Measures and Growth Models for Predicting Plantation Red Pine Diameter and Height Growth. Forest Science, 30(3), 731–743.

Mattheck, C., & Vorberg, U. (1991). The Biomechanics of Tree Fork Design. Botanica Acta, 104(5), 399–404. doi: 10.1111/j.1438-8677.1991.tb00248.

Metz, A. J., & Diekmann, O. (2014). The dynamics of physiologically structured populations (Vol. 68). Springer.

Meyer-Berthaud, B., Soria, A., & Decombeix, A. L. (2010). The land plant cover in the Devonian: A reassessment of the evolution of the tree habit. Geological Society Special Publication, 339, 59–70. doi: 10.1144/SP339.6.

Meyer-Berthaud, Brigitte, Decombeix, A. L., & Ermacora, X. (2013). Archaeopterid root anatomy and architecture: New information from permineralized specimens of famennian age from anti-atlas (morocco). International Journal of Plant Sciences, 174(3), 364–381. doi: 10.1086/668685.

Meyer-Berthaud, B., Soria, A., & Decombeix, A. L. (2010). The land plant cover in the Devonian: a reassessment of the evolution of the tree habit. Geological Society, London, Special Publications, 339(1), 59-70.

Mikita, T., Janata, P., & Surovỳ, P. (2016). Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. Forests, 7(8). doi: 10.3390/f7080165.

Mikita, T., Klimánek, M., & Cibulka, M. (2013). Evaluation of airborne laser scanning data for tree parameters and terrain modelling in forest environment. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 61(5), 1339–1347. doi: 10.11118/actaun201361051339.

Miller, A. J., & Cramer, M. D. (2005). Root nitrogen acquisition and assimilation. In Plant and Soil (Vol. 274, Issues 1–2, pp. 1–36). doi: 10.1007/s11104-004-0965-1.

Miller, J., Morgenroth, J., & Gomez, C. (2015). 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. Urban Forestry and Urban Greening, 14(4), 932–940. doi: 10.1016/j.ufug.2015.09.001

Miller, J.; Morgenroth, J.; Gomez, C. 3D Modelling of Individual Trees Using a Handheld Camera: Accuracy of Height, Diameter and Volume Estimates. Urban For Urban Green 2015, 14, 932–940, doi:10.1016/j.ufug.2015.09.001.

Mladenoff, D. J. (1996). LANDIS: a spatial model of forest landscape disturbance, succession and management. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/258047725.

Mokros, M.; Liang, X.; Surový, P.; Valent, P.; Čerňava, J.; Chudý, F.; Tunák, D.; Saloň, I.; Merganič, J. Evaluation of Close-Range Photogrammetry Image Collection Methods for Estimating Tree Diameters. ISPRS Int J Geoinf 2018, 7, doi:10.3390/ijgi7030093.

Mokroš, M.; Výbošťok, J.; Tomaštík, J.; Grznárová, A.; Valent, P.; Slavík, M.; Merganič, J. High Precision Individual Tree Diameter and Perimeter Estimation from Close-Range Photogrammetry. Forests 2018, 9, doi:10.3390/f9110696.

Morgenroth, J.; Gomez, C. Assessment of Tree Structure Using a 3D Image Analysis Technique—A Proof of Concept. Urban For Urban Green 2014, 13, 198–203, doi:10.1016/j.ufug.2013.10.005.

Morillas, L., Leiva, M. J., Pérez-Ramos, I. M., Cambrollé, J., & Matías, L. (2023). Latitudinal variation in the functional response of Quercus suber seedlings to extreme drought. Science of the Total Environment, 887. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164122.

Münzinger, M., Prechtel, N., & Behnisch, M. (2022). Mapping the urban forest in detail: From LiDAR point clouds to 3D tree models. Urban Forestry and Urban Greening, 74. doi: 10.1016/j.ufug.2022.127637

Mutke, S., Sievänen, R., Nikinmaa, E., Perttunen, J., & Gil, L. (2005). Crown architecture of grafted Stone pine (Pinus pinea L.): Shoot growth and bud differentiation. Trees - Structure and Function, 19(1), 15–25. doi: 10.1007/s00468-004-0346-7.

Nardiny, A., Lo Gullo, M. A., & Salleo, S. (1999). Competitive strategies for water availability in two Mediterranean Quercus species. Plant, Cell and Environment, 22, 109–116.

Nevalainen, S. (2017). Comparison of damage risks in even-and uneven-aged forestry in Finland. Silva Fennica, 51(3). doi: 10.14214/sf.1741.

Ni, J., Shen, Y. X., Zhang, Y. Y., & Liu, Y. (2014). Histological characterization of the lateral root primordium development in rice. Botanical Studies, 55(1). doi: 10.1186/s40529-014-0042.

Norberg, R. A. (1988). THEORY OF GROWTH GEOMETRY OF PLANTS AND SELF-THINNING OF PLANT POPULATIONS: GEOMETRIC SIMILARITY, ELASTIC SIMILARITY, AND DIFFERENT GROWTH MODES OF PLANT PARTS. In Am. Nat (Vol. 131, Issue 2). Retrieved from http://www.journals.uchicago.edu/t-and-c.

North, G. B., & Nobel, P. S. (1997). Root-soil contact for the desert succulent Agave deserti in wet and drying soil. In Netc Phytol (Vol. 135).

Novák, J., Sádlo, J., & Svobodová-Svitavská, H. (2012). Unusual vegetation stability in a lowland pine forest area (Doksy region, Czech Republic). Holocene, 22(8), 947–955. doi: 10.1177/0959683611434219

Oppelt, A. L., Kurth, W., Dzierzon, H., Jentschke, G., & Godbold, D. L. (2000). Structure and fractal dimensions of root systems of four co-occurring fruit tree species from Botswana.

Otieno, D. O., Kurz-Besson, C., Liu, J., Schmidt, M. W. T., Do, R. V. L., David, T. S., Siegwolf, R., Pereira, J. S., & Tenhunen, J. D. (2006). Seasonal variations in soil and plant water status in a Quercus suber L. stand: Roots as determinants of tree productivity and survival in the Mediterranean-type ecosystem. Plant and Soil, 283(1–2), 119–135. doi: 10.1007/s11104-004-7539-0.

Ozier-Lafontaine, H., Lecompte, F., & Sillon, J. F. (1999a). Fractal analysis of the root architecture of Gliricidia sepium for the spatial prediction of root branching, size and mass: model development and evaluation in agroforestry. In Plant and Soil (Vol. 209).

Ozier-Lafontaine, H., Lecompte, F., & Sillon, J. F. (1999b). Fractal analysis of the root architecture of Gliricidia sepium for the spatial prediction of root branching, size and mass: model development and evaluation in agroforestry. In Plant and Soil (Vol. 209).

Paletto, A., & Tosi, V. (2009). Forest canopy cover and canopy closure: Comparison of assessment techniques. European Journal of Forest Research, 128(3), 265–272. doi: 10.1007/s10342-009-0262.

Paulus, S. (2019). Measuring crops in 3D: Using geometry for plant phenotyping. In Plant Methods (Vol. 15, Issue 1). BioMed Central Ltd. doi: 10.1186/s13007-019-0490-0.

Pietrzykowski, M., & Daniels, W. L. (2014). Estimation of carbon sequestration by pine (Pinus sylvestris L.) ecosystems developed on reforested post-mining sites in Poland on differing mine soil substrates. Ecological Engineering, 73, 209–218. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.058.

Pinheiro, H. A., DaMatta, F. M., Chaves, A. R. M., Loureiro, M. E., & Ducatti, C. (2005). Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of Coffea canephora. Annals of Botany, 96(1), 101–108. doi: 10.1093/aob/mci154.

Pretzsch, H, & Biber, P. (2002). The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation.

Pretzsch, Hans. (2001). Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag,Berlin, 341.

Price, A. H., Steele, K. A., Moore, B. J., & Jones, R. G. W. (2002). Upland rice grown in soil-®lled chambers and exposed to contrasting water-de®cit regimes II. Mapping quantitative trait loci for root morphology and distribution.

Price, D. T., Zimmermann, N. E., Van Der Meer, P. J., Lexer, M. J., Leadley, P., Jorritsma, I. T. M., Schaber, J., Clark, D. F., Lasch, P., Mcnulty, S., Wu, J., & Smith, B. (2001). REGENERATION IN GAP MODELS: PRIORITY ISSUES FOR STUDYING FOREST RESPONSES TO CLIMATE CHANGE.

Prusinkiewicz, P., & Hanan, J. (2013). Lindenmayer systems, fractals, and plants. (Vol. 79). Springer Science & Business Media.

Quiróst, R., Lluch, J., Chover, M., & Viv6, R. (1996). GEOMETRIC SUBSTITUTION USING RANDOM L-SYSTEMS. In Comput. & Graphics (Vol. 20, Issue 5).

Rathgeber, C. B. K., Cuny, H. E., & Fonti, P. (2016). Biological basis of tree-ring formation: A crash course. In Frontiers in Plant Science (Vol. 7, Issue MAY2016). Frontiers Research Foundation. doi: 10.3389/fpls.2016.00734.

Remeš, J., & Pulkrab, K. (2022). EKONOMICKÝ EFEKT ZMĚNY DRUHOVÉ SKLADBY LESNÍCH POROSTŮ JAKO VÝSLEDEK ADAPTACE NA ZMĚNY KLIMATU. VÚLHM, v. v. i, 5–10.

Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. In Trees - Structure and Function (Vol. 21, Issue 4, pp. 385–402). doi: 10.1007/s00468-007-0132-4.

Rewald, B., Ephrath, J. E., & Rachmilevitch, S. (2011). A root is a root is a root? Water uptake rates of Citrus root orders. Plant, Cell and Environment, 34(1), 33–42. doi: 10.1111/j.1365-3040.2010.02223.

Riikonen, J., Kettunen, N., Gritsevich, M., Hakala, T., Särkkä, L., & Tahvonen, R. (2016a). Growth and development of Norway spruce and Scots pine seedlings under different light spectra. Environmental and Experimental Botany, 121, 112–120. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.06.006.

Riikonen, J., Kettunen, N., Gritsevich, M., Hakala, T., Särkkä, L., & Tahvonen, R. (2016b). Growth and development of Norway spruce and Scots pine seedlings under different light spectra. Environmental and Experimental Botany, 121, 112–120. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.06.006.

Rizzo, D. M., & Gross, R. (2002). Distribution of Armillaria on pear root systems and a comparison of root excavation techniques. The Supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology, 305–311.

Rothwell, G. W., & Lev-Yadun, S. (2005). Evidence of polar auxin flow in 375 million-year-old fossil wood. American Journal of Botany, 92(6), 903–906. doi: 10.3732/ajb.92.6.903.

Rzigui, T., Jazzar, L., Baaziz Khaoula, B., Fkiri, S., & Nasr, Z. (2018). Drought tolerance in cork oak is associated with low leaf stomatal and hydraulic conductances. IForest - Biogeosciences and Forestry, 11(6), 728–733. doi: 10.3832/ifor2749-011.

S. F. Arno, & R.P. Hammerly. (1984). Timberline: mountain and Arctic forest frontiers. The Mountaineers, Seattle, WA.

Saavedra-Nieves, P., & Crujeiras, R. M. (2022). Nonparametric estimation of directional highest density regions. Advances in Data Analysis and Classification, 16(3), 761–796. doi: 10.1007/s11634-021-00457-4.

Sarkar, A. K., Marijn Luijten, Shunsuke Miyashima, Michael Lenhard, Takashi Hashimoto, Keiji Nakajima, Ben Scheres, Renze Heidstra, & Thomas Laux. (2007). Conserved factors regulate signalling in Arabidopsis thaliana shoot and root stem cell organizers. Nature446, 7137, 811–814.

Schenk, T., & Quarter, A. (2005). Introduction to Photogrammetry.

Schmidt, M. W. T., Schreiber, D., Correia, A., Ribeiro, N., Surový, P., Otieno, D., Tenhunen, J., & Pereira, J. S. (2009). Sap Flow in Cork Oak Trees at Two Contrasting Sites in Portugal (Vol. 846).

Schulze, E. D., Beck, E., & Müller-Hohenstein, K. (2005). Plant ecology. Springer Science & Business Media.

Scott, P. M., Shearer, B. L., Barber, P. A., & Hardy, G. E. S. J. (2013). Relationships between the crown health, fine root and ectomycorrhizae density of declining Eucalyptus gomphocephala. Australasian Plant Pathology, 42(2), 121–131. doi: 10.1007/s13313-012-0152-4.

Šebeň, V., Bošel'A, M., Konôpka, B., & Pajtík, J. (2013). Indices of tree competition in dense spruces stand originated from natural regeneration. Forestry Journal, 59(3), 172–179. doi: 10.2478/v10114-011-0024-9.

Shan, R., & Junghans, L. (2018). “Adaptive radiation” optimization for climate adaptive building facade design strategy. Building Simulation, 11(2), 269–279. doi: 10.1007/s12273-017-0406-8.

Sharp, R. E., Poroyko, V., Hejlek, L. G., Spollen, W. G., Springer, G. K., Bohnert, H. J., & Nguyen, H. T. (2004). Root growth maintenance during water deficits: Physiology to functional genomics. Journal of Experimental Botany, 55(407), 2343–2351. doi: 10.1093/jxb/erh276.

Sievänen, R., Nikinmaa, E., Nygren, P., Ozier-Lafontaine, H., Perttunen, J., & Hakula, H. (2000a). Components of functional-structural tree models.

Sievänen, R., Nikinmaa, E., Nygren, P., Ozier-Lafontaine, H., Perttunen, J., & Hakula, H. (2000b). Components of functional-structural tree models.

Šleglová, K., Brichta, J., Bílek, L., & Surový, P. (2024). Measuring the Canopy Architecture of Young Vegetation Using the Fastrak Polhemus 3D Digitizer. Sensors, 24(1). doi: 10.3390/s24010109.

Sloboda, B., & Pfreundt, J. (1989). Baum-und Bestandeswachstum. Ein systemanalytischer, räumlicher Ansatz mit Versuchsplanungskonsequenzen für die Durchforstung und Einzelbaumentwicklung. Proc Dt Verb Forstl Forschungsanst, Sek Ertragskd, in Attendorn, 17.

Stein, W. E., Berry, C. M., Hernick, L. V., & Mannolini, F. (2012a). Surprisingly complex community discovered in the mid-Devonian fossil forest at Gilboa. Nature, 483(7387), 78–81. doi: 10.1038/nature10819.

Stein, W. E., Berry, C. M., Hernick, L. V., & Mannolini, F. (2012b). Surprisingly complex community discovered in the mid-Devonian fossil forest at Gilboa. Nature, 483(7387), 78–81. doi: 10.1038/nature10819.

Stein, W. E., Mannolini, F., Hernick, L. V., Landing, E., & Berry, C. M. (2007). Giant cladoxylopsid trees resolve the enigma of the Earth’s earliest forest stumps at Gilboa. Nature, 446(7138), 904–907. doi: 10.1038/nature05705.

Steingraeber, D. A. (1982). PHENOTYPIC PLASTICITY OF BRANCHING PATTERN IN SUGAR MAPLE (ACER SACCHARUM)! (Vol. 69, Issue 4).

Stoeckeler, J. H., & Kluender, W. A. (1938). The Hydraulic Method of Excavating the Root Systems of Plants THE HYDRAULIC METHOD OF EXCAVATING THE ROOT SYSTEMS OF PLANTS 1 Lake States Forest Experiment Station2. In Source: Ecology (Vol. 19, Issue 3).

Surový, P.; Yoshimoto, A.; Panagiotidis, D. Accuracy of Reconstruction of the Tree Stem Surface Using Terrestrial Close-Range Photogrammetry. Remote Sens (Basel) 2016, 8, doi:10.3390/rs8020123.

Surov´y, S., Yoshimoto, A., & Ribeiro, &. (2012). Comparison of Pruning Regimes for Stone Pine (Pinus pinea L.) Using a Functional-Structural Plant Model (Vol. 11).

Surový, P., Ribeiro, N., & Pereira, J. S. (2011a). Observations on 3-dimensional crown growth of Stone pine. Agroforestry Systems, 82(2), 105–110. doi: 10.1007/s10457-010-9344-5.

Surový, P., Ribeiro, N., & Pereira, J. S. (2011b). Observations on 3-dimensional crown growth of Stone pine. Agroforestry Systems, 82(2), 105–110. doi: 10.1007/s10457-010-9344-5.

Surový, P., Yoshimoto, A., & Panagiotidis, D. (2016). Accuracy of reconstruction of the tree stem surface using terrestrial close-range photogrammetry. Remote Sensing, 8(2). doi: 10.3390/rs8020123.

Surový, Yoshimoto, A., & Ribeiro, N. A. (2012). Comparison of Pruning Regimes for Stone Pine (Pinus pinea L.) Using a Functional-Structural Plant Model (Vol. 11).

Tfwala, C. M., Van Rensburg, L. D., Schall, R., Zietsman, P. C., & Dlamini, P. (2019). Whole tree water use: Effects of tree morphology and environmental factors. Ecological Indicators, 102, 366–373. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.02.054.

T.H. Speck, H.C. Spatz, & D. Vogellehner. (1990). Contributions to the biomechanics of plants. I. Stabilities of plant stems with strengthening elements of different cross-sections against weight and wind forces. BotanicaActa, 103(1), 111–122.

Thomas, R., Lello, J., Medeiros, R., Pollard, A., Robinson, P., Seward, A., Smith, J., Vafidis, J., & Vaughan, I. (2017). Data Analysis with R Statistical Software A Guidebook for Scientists. Retrieved from www.newportprinting.co.uk

Thornton, P. E. (1998). Regional ecosystem simulation: Combining surface-and satellite-Regional ecosystem simulation: Combining surface-and satellite-based observations to study linkages between terrestrial energy based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets and mass budgets. Retrieved from https://scholarworks.umt.edu/etd/10519.

Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Peña, J. M., Jiménez-Brenes, F. M., Arquero, O., Lovera, M., & López-Granados, F. (2018). Mapping the 3D structure of almond trees using UAV acquired photogrammetric point clouds and object-based image analysis. Biosystems Engineering, 176, 172–184. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.018.

Tsakaldimi, M., Zagas, T., Tsitsoni, T., & Ganatsas, P. (2005). Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types. Plant and Soil, 278(1–2), 85–93. doi: 10.1007/s11104-005-2580-1.

Turner, I. M., Gong, W. K., Ong, J. E., Bujang, J. S., & Kohyama, T. (1995). The Architecture and Allometry of Mangrove Saplings. In Source: Functional Ecology (Vol. 9, Issue 2). Retrieved from http://www.jstor.orgURL:http://www.jstor.org/stable/.

Tyree, M. T., & Sperry, J. S. (1988). Do Woody Plants Operate Near the Point of Catastrophic Xylem Dysfunction Caused by Dynamic Water Stress?' ANSWERS FROM A MODEL. In Plant Physiol (Vol. 88). Retrieved from https://academic.oup.com/plphys/article/88/3/574/6083380.

Ulrich Ammer, V., & SCHUBERT Zusammenfassung, H. (1999). Arten-, Prozef~-und Ressourcenschutz vor dem Hintergrund faunistischer Untersuchungen im Kronenraum des Waldes Conservation of species, processe~ and resources against the background of faunistic investigations of the forest canopy. 118, 70–87.

Vacek, Z., Cukor, J., Vacek, S., Linda, R., Prokůpková, A., Podrázský, V., Gallo, J., Vacek, O., Šimůnek, V., Drábek, O., Hájek, V., Spasić, M., & Brichta, J. (2021). Production potential, biodiversity and soil properties of forest reclamations: Opportunities or risk of introduced coniferous tree species under climate change? European Journal of Forest Research, 140(5), 1243–1266. doi: 10.1007/s10342-021-01392.

Valladares, F., Wright, S. J., Lasso, E., Kitajima, K., & Pearcy, R. W. (2000). Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a panamanian rainforest. Ecology, 81(7), 1925–1936. doi: 10.1890/0012-9658(2000)081[1925:PPRTLO]2.0.CO;2.

Van Den Berg, Claudia, Viola willemsen, Giel Hendriks, Peter Weisbeek, & Ben Scheres. (1997). Short-range control of cell differentiation in the Arabidopsis root meristem. Nature 390, 6657, 287–289.

Van Der Weele1, C. M., Spollen2, W. G., Sharp2, R. E., & Baskin1, T. I. (2000). 350 WD Special Issue. In Journal of Experimental Botany (Vol. 51).

Vennetier, M., Zanetti, C., Meriaux, P., & Mary, B. (2015). Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes. Plant and Soil, 387(1–2), 81–101. doi: 10.1007/s11104-014-2272-9.

Wagner. (1997). Conditions for the start and spead of crown fire.

Wan, C., Xu, W., Sosebee, R. E., Machado, S., & Archer, T. (2000). Hydraulic lift in drought-tolerant and-susceptible maize hybrids. In Plant and Soil (Vol. 219).

Wang, Y.-P., & Leuning, R. (1998). A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I: Model description and comparison with a multi-layered model.

Watanabe, T., Hanan, J. S., Room, P. M., Hasegawa, T., Nakagawa, H., & Takahashi, W. (2005a). Rice morphogenesis and plant architecture: Measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modelling. Annals of Botany, 95(7), 1131–1143. doi: 10.1093/aob/mci136.

Watanabe, T., Hanan, J. S., Room, P. M., Hasegawa, T., Nakagawa, H., & Takahashi, W. (2005b). Rice morphogenesis and plant architecture: Measurement, specification and the reconstruction of structural development by 3D architectural modelling. Annals of Botany, 95(7), 1131–1143. doi: 10.1093/aob/mci136.

Wiedermann, E. (1925). Die praktismen Erfolge des Kieferndauerwaldes. Verlag von Friedr; Vieweg & Sohn: Braunschweig, Germany, 184.

W.K. Smith, T.C. Vogelmann, E.H. DeLucia, D.T. Bell, & K.A. Shepherd. (1997). Leaf form and photosynthesis. Do leaf structure and orientation interact to regulate internal light and carbon dioxide? . BioScience, 47, 785–793.

Wykoff, R. , W., Crookston, L. N., & Stage, R. A. (1982). User's guide to the stand prognosis model (Vol. 113). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Yoshimoto, A., Surový, P., Konoshima, M., & Kurth, W. (2014). Constructing tree stem form from digitized surface measurements by a programming approach within discrete mathematics. Trees - Structure and Function, 28(6), 1577–1588. doi: 10.1007/s00468-014-1065-3.

Zhang, H., & Forde, B. G. (1998). An Arabidopsis MADS Box Gene That Controls nutrient - Induced Changes in root architecture. Retrieved from www.sciencemag.org

Zhou, M., Wang, J., Bai, W., Zhang, Y., & Zhang, W. H. (2019). The response of root traits to precipitation change of herbaceous species in temperate steppes. Functional Ecology, 33(10), 2030–2041. doi: 10.1111/1365-2435.13420.

Zhu, R., Guo, Z., Zhang, X. Forest 3D Reconstruction and Individual Tree Parameter Extraction Combining Close-Range Photo Enhancement and Feature Matching. Remote Sens (Basel) 2021, 13, 1633, doi:10.3390/rs13091633.

Přílohy

Příloha A: Quercus suber z Mitry, rostoucí pod různým zápojem

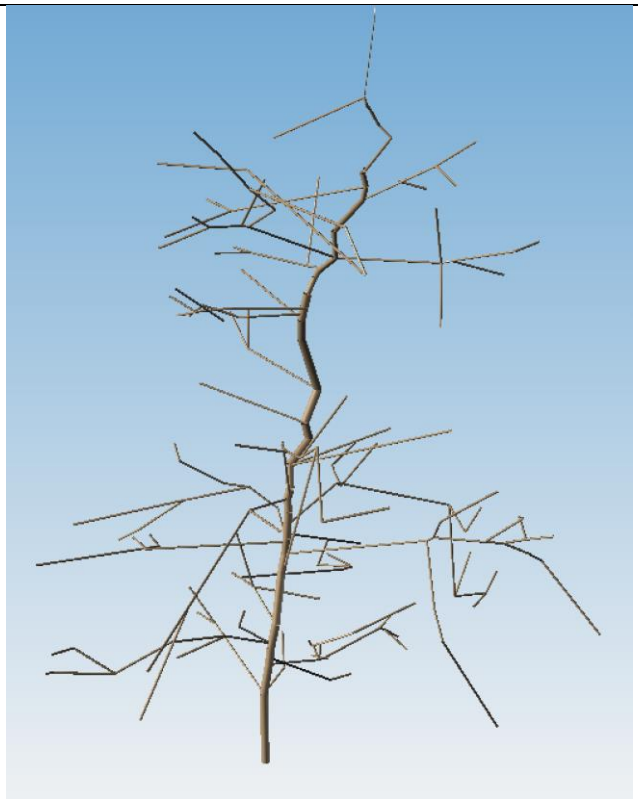
Příloha B1, B2: Quercus suber z Montargilu.

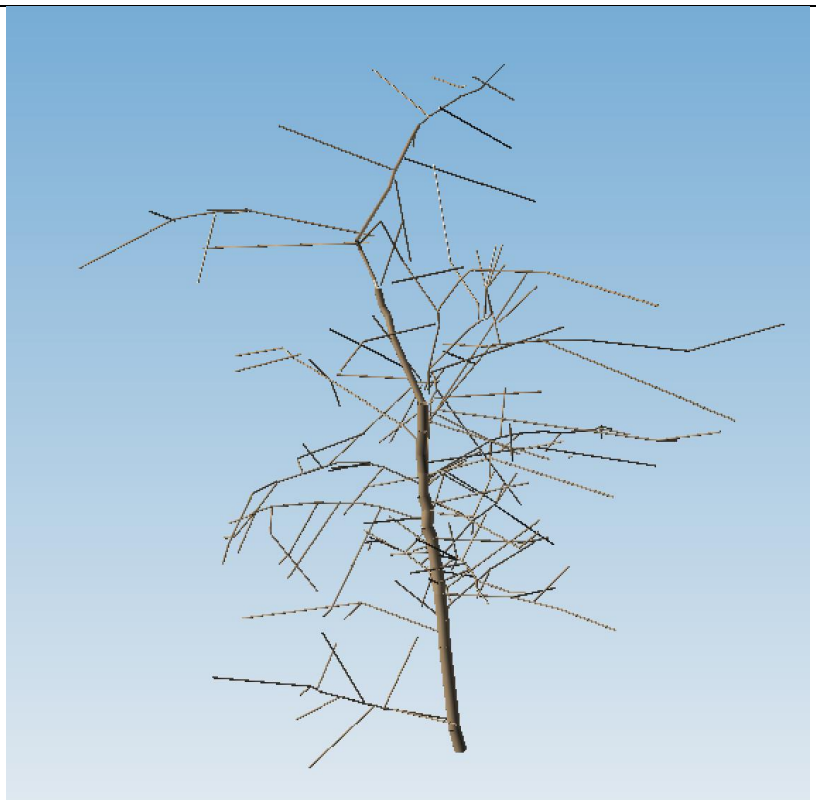
Příloha C: Quercus ilex z Mertoly

Příloha D: publikace

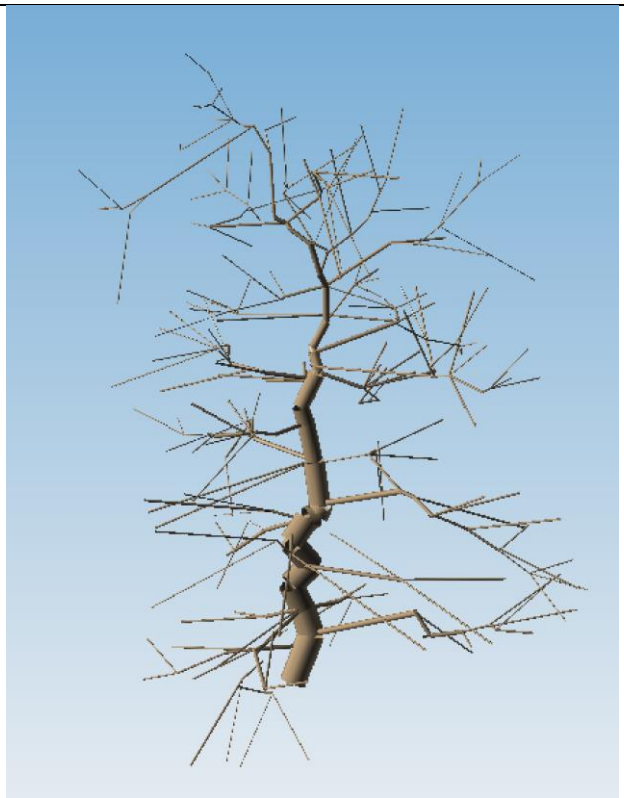
Tyto modely nebyly použity pro výsledky, z důvodu změření malého počtu jedinců. Vzhledem k tomu že veškeré 3D modely byly měřeny v cizině, nebylo možné doměřit potřebná data. Dále se zde vyskytuje změřený kořen Quercus ilex, jehož 3D model je určený na výstavu v muzeu v Estação Biológica de Mértola.

12.1 Příloha A – Quercus suber rostoucí pod různým zápojem

Without canopy	
Under canopy	

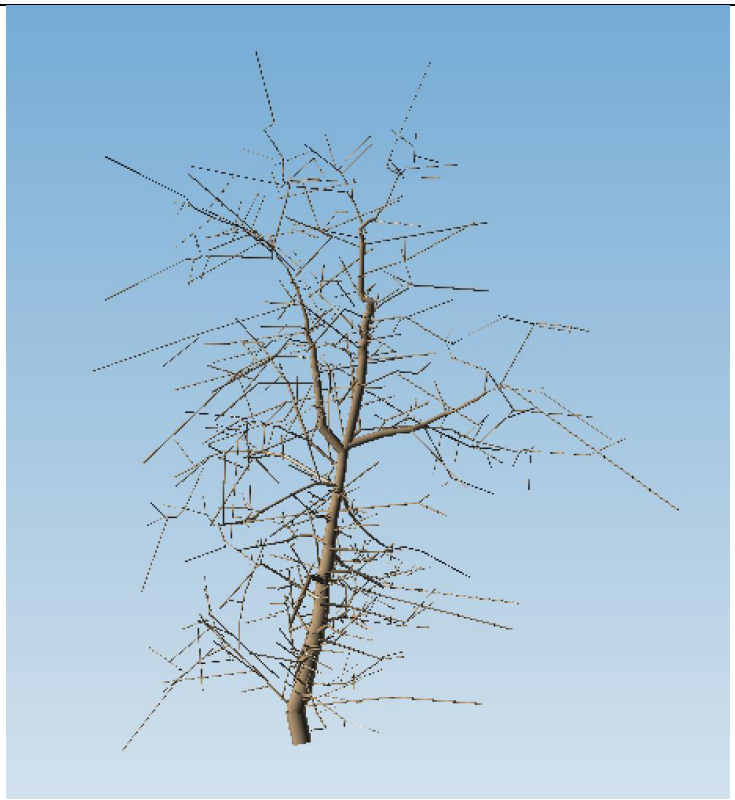
Without canopy	

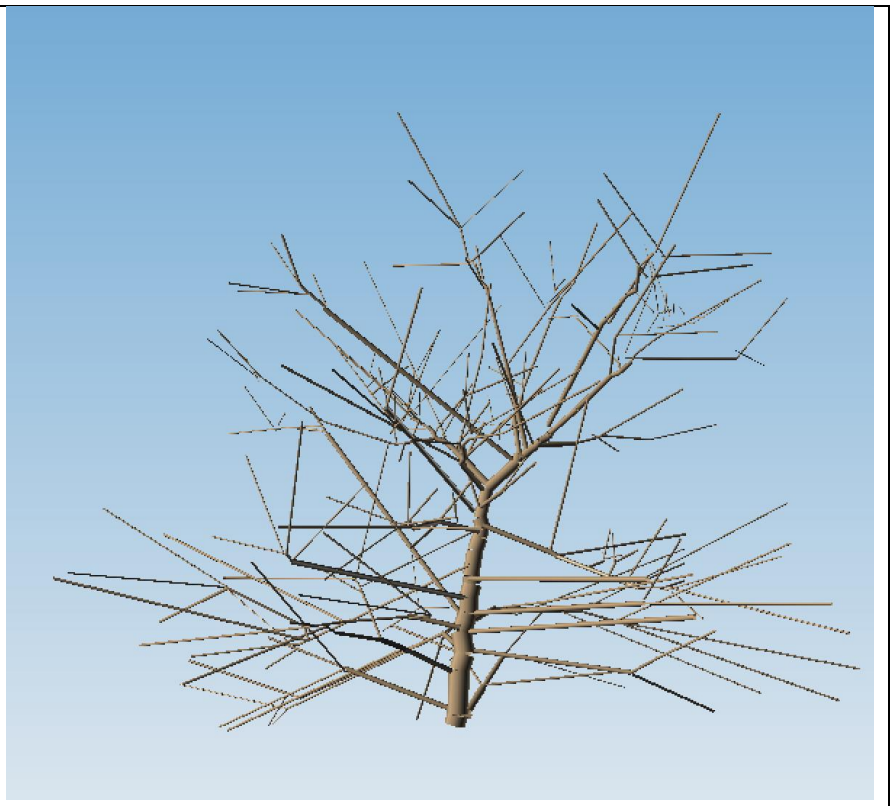
12.2 Příloha B1 – Quercus suber rostoucí na kopci

With water	
Without water	

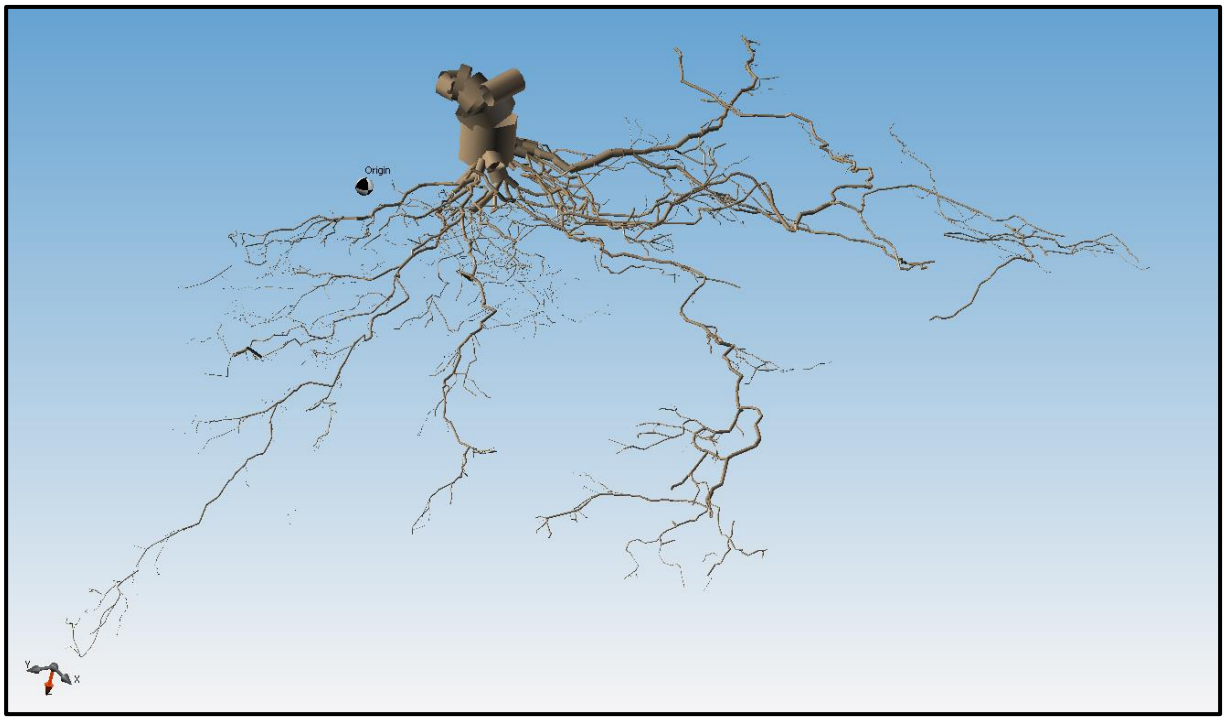
With water	

12.3 Příloha B2 – Quercus seber rostoucí pod kopcem

With water	

Without water	
Without water	

12.4 Příloha C – Kořen Quesrcus ilex měřený pro Museum



Obrázek 107:Kořen do Musea v Mértole

12.5 Příloha D – Publikace

Přijaté publikace

1. Šleglová K., Brichta J., Bílek L., & Surový P. (2023). Measuring the Canopy Architecture of Young Vegetation Using the Fastrak Polhemus 3D Digitizer. *Sensors*, *24*(1), 109.

2. Assessing the effect of cork oak fertigation on crown and root structure using electro-magnetic tracking system .pdf

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status	Date Final Disposition Set	Final Disposition
Action Links	FORESTRYJOURNAL-D-24-00037	Assessing the effect of cork oak fertigation on crown and root structure using electro-magnetic tracking system	25-09-2024	21-10-2024	Accept		

Submitnuté publikace

1. Šleglová K., Hrdina M., Surový P. (2024) Discovering Tree Architecture: A comparison of the Perfor-mance of 3D digitizing and Close-Range Photogrammetry. Remote sensing – Discovering Tree Architecture A comparison of the Perfor-mance of 3D digitizing and Close-Range Photogrammetry.pdf

2. Šleglová K., Camilo-Alves C., Poeiras A., Ribeiro J., Ribeiro N., Surový P., (2024) Analysis of Canopy orientation in relation to Irrigation system of Quercus suber using the Magnetic Digitizer – Analysis of Canopy orientation in relation to Irrigation system of Quercus suber using the Magnetic Digitizer.pdf