

Lesy České republiky, s.p.

**VÝZKUMNÉ PROJEKTY
GRANTOVÉ SLUŽBY LČR**

LESYČR



Projekt

**Metodologie vyhodnocování simulovaných
pěstebních zásahů ve 3D**

Závěrečná zpráva výzkumného projektu

Řešitel

Výzkumný ústav pro krajinu, v. v. i.

Odpovědný řešitel:

Ing. Martin Krůček, Ph.D.

Spoluřešitelé:

**Ing. Kamil Král, Ph.D., Ing. Václav Bubník, Mgr. Jakub Kašpar, Ph.D., doc. Ing. Tomáš
Vrška, Dr.**

Brno, únor 2026

Obsah

1. ÚVOD	6
2. POSTUP PRACÍ V PRŮBĚHU ŘEŠENÍ PROJEKTU	7
2.1. SBĚR A ZPRACOVÁNÍ DAT (METODIKA TLS A DIGITÁLNÍ REPLIKACE)	7
2.2. VÝVOJ SOFTWARE 3D FOREST: TECHNOLOGIE A ARCHITEKTURA	9
2.3. ANALYTICKÉ ALGORITMY A VÝHODY 3D PŘÍSTUPU	10
3. SPLNĚNÍ PLÁNOVANÝCH DÍLČÍCH CÍLŮ DLE ZADÁNÍ PROJEKTU	11
3.1. REALIZACE DÍLČÍCH VÝSTUPŮ DLE SMLOUVY O DÍLO	11
3.2. HODNOCENÍ NAPLNĚNÍ SPECIFICKÝCH PARAMETRŮ	12
4. POPIS VÝSLEDKŮ PROJEKTU	12
4.1. JÁDRO SYSTÉMU 3D FOREST	12
4.2. MODUL 3D-MARTELOSCOP – VYHODNOCENÍ SIMULOVANÉHO ZÁSAHU	20
4.3. PARAMETRIZACE MODELU IŁAND	52
4.4. STRUKTURA DAT PĚSTEBNÍCH PLOCH	55
5. UPLATNĚNÍ VÝSLEDKŮ VÝZKUMU V PRAXI, ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	59
5.1. MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ VÝSLEDKŮ V PRAXI	59
5.2. DISKUSE NAD VÝSLEDKY A VÝZNAM TECHNOLOGIE LIDAR	59
5.3. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ POSTUP	62
6. PUBLICITA PROJEKTU	64
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66

Anotace projektu:

Projekt „Metodologie vyhodnocování simulovaných pěstebních zásahů ve 3D“ realizovaný v rámci Grantové služby Lesů ČR výzkumným týmem VÚK ve spolupráci s Mendelovou univerzitou reaguje na potřebu adaptace lesních porostů na klimatickou změnu a na limity tradičních 2D výukových a simulačních přístupů (Marteloskopů), které nedokážou zachytit klíčové prostorové vlastnosti korun a jejich konkurenci. Na základě pozemního laserového skenování (TLS) byly vytvořeny digitální dvojčata vybraných pěstebních ploch a v open-source aplikaci 3D Forest byl vyvinut 3D pěstební тренаžér umožňující interaktivní návrh zásahu a jeho okamžité, automatizované vyhodnocení. Metodika rozšiřuje hodnocení nad rámec běžných porostních ukazatelů (DBH, objem hroubí) o detailní kvantifikaci uvolněného korunového prostoru, sdíleného (konkurenčního) objemu korun a světelných podmínek (dostupnost světla) a je určena pro podporu daty řízeného „smart forestry“, školení personálu LČR i modernizaci lesnické výuky.

Klíčová slova:

3D pěstební тренаžér; pozemní laserové skenování; LiDAR; digitální kopie lesa; 3D Forest; 3D-Marteloscop; konkurence korun; výchovný zásah

1. ÚVOD

Projekt s názvem „Metodologie vyhodnocování simulovaných pěstebních zásahů ve 3D“ byl realizován v rámci Grantové služby Lesů České republiky (LČR) výzkumným týmem z Výzkumného ústavu pro krajinu (VÚK) ve spolupráci s Mendelovou univerzitou v Brně. Hlavní motivací pro zahájení tohoto výzkumu je naléhavá potřeba adaptace lesních porostů na probíhající klimatickou změnu, která rozšiřuje možnosti hodnocení pěstebních zásahů o prostorovou dimenzi pro zajištění ekosystémových služeb i produkčních funkcí lesa. Klíčovou otázkou moderního lesnictví je rozhodování o čase, intenzitě a prostorovém uspořádání výchovných zásahů, což vyžaduje hluboké znalosti dynamiky lesa a pěstebních modelů.

Dosavadní metody školení a simulací, reprezentované především mezinárodní sítí Marteloskopů, narážejí na technologické limity svého striktního 2D pojetí. V těchto systémech jsou stromy znázorněny pouze jako body v mapě s přidruženými atributy, což zcela postrádá informace o velikosti, tvaru a postavení korun, jejich vzájemném kontaktu a sdílení růstového prostoru. Pro současné lesnictví jsou přitom údaje o korunách naprosto klíčové, neboť právě zde probíhají asimilační procesy rozhodující o stabilitě a přežití jedinců v období klimatických extrémů.

Důležitost posunu ke 3D a využití technologie LiDAR (laserové skenování), představuje další krok směrem k širšímu využití prostorových dat v lesnickém rozhodování. Tato technologie umožňuje přechod od odhadů k preciznímu hodnocení struktury lesa, které je nákladově efektivní a poskytuje včasná data pro multifunkční management. Implementace digitálních kopií lesa (tzv. digital twins) vytvořených pomocí pozemního laserového skenování (TLS) dovoluje lesníkům pracovat s plně realistickým modelem, kde lze vizualizovat a objektivně posoudit efekty selektivních zásahů ještě před jejich fyzickým provedením.

Cílem projektu bylo vyvinout metodologii pro vyhodnocování simulovaných pěstebních zásahů v prostředí 3D reprezentace lesa, která překonává omezení tradičních 2D přístupů a umožňuje automatizované a okamžité hodnocení variant pěstebních zásahů. V rámci vývoje metodologie byl vytvořen prototypový softwarový nástroj umožňující její implementaci, testování a demonstraci na reálných datech. Výsledná metodologie se nezaměřuje pouze na tradiční parametry (výčetní tloušťka, objem hroubí), ale přináší detailní kvantifikaci uvolněného korunového prostoru a konkurenčního tlaku mezi sousedními stromy. Součástí výstupů jsou také algoritmy a jejich implementace v prototypovém softwarovém nástroji,

který byl využit pro ověření metodiky na reálných datech laserového skenování a pro demonstraci její aplikovatelnosti v praxi.

2. POSTUP PRACÍ V PRŮBĚHU ŘEŠENÍ PROJEKTU

V rámci projektu byla vyvinuta a otestována komplexní metodika pro transformaci tradičního lesnického vzdělávání do digitálního prostředí 3D Forest. Práce zahrnovaly sběr dat pomocí laserového skenování, adaptaci existujícího softwaru 3D Forest, vývoj doplňujícího analytického modulu 3D-Marteloscop a integraci růstového simulátoru iLand pro predikci vývoje porostu.

2.1. Sběr a zpracování dat (Metodika TLS a digitální replikace)

Základem projektu je využití technologie pozemního laserového skenování (TLS) k vytvoření tzv. digitálních dvojčat (digital twins) lesních porostů. Sběr dat byl prováděn pomocí skeneru Leica RTC360 s pracovním rozsahem 0,5–130 m a vysokou přesností ± 1 mm.

Strategie sběru:

Data byla sbírána v pseudo-pravidelném čtvercové síti s rozestupy přibližně 15 metrů, aby bylo zajištěno plné pokrytí zájmové plochy a minimalizována slepá místa (stíny). U opadavých a smíšených porostů probíhalo měření v bezlistém stavu, což je technický předpoklad pro lepší penetraci laserového paprsku korunami a přesnou rekonstrukci jejich struktury.

Registrace a unifikace:

Surové skeny byly registrovány pomocí cloud-to-cloud algoritmů v softwaru Leica REGISTER360+. Výsledné mračno bodů bylo následně unifikováno pomocí voxelové sítě s rozlišením 5 mm, čímž došlo k odstranění redundantních dat při zachování maximální geometrické věrnosti.

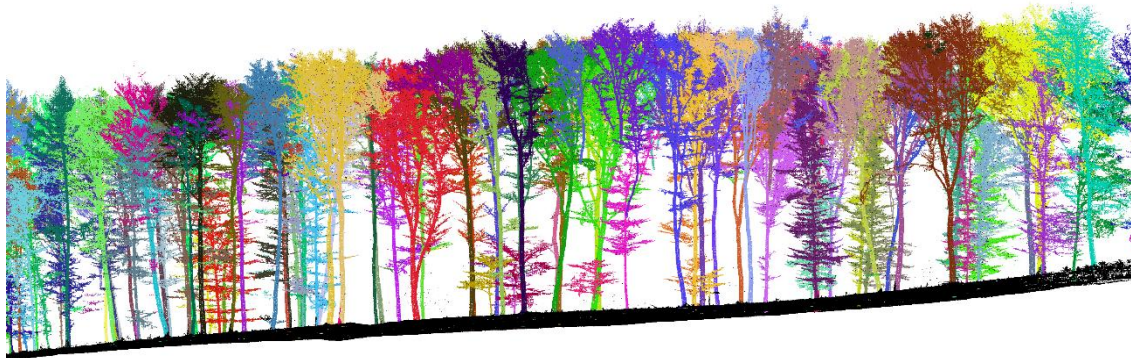
Segmentace:

Klasifikace terénu a segmentace jednotlivých stromů byla realizována v softwaru RayCloudTools, který využívá pokročilé algoritmy pro identifikaci kmenů a separaci vegetace v komplexním lesním prostředí. Pro každý strom byly následně vypočítány parametry jako

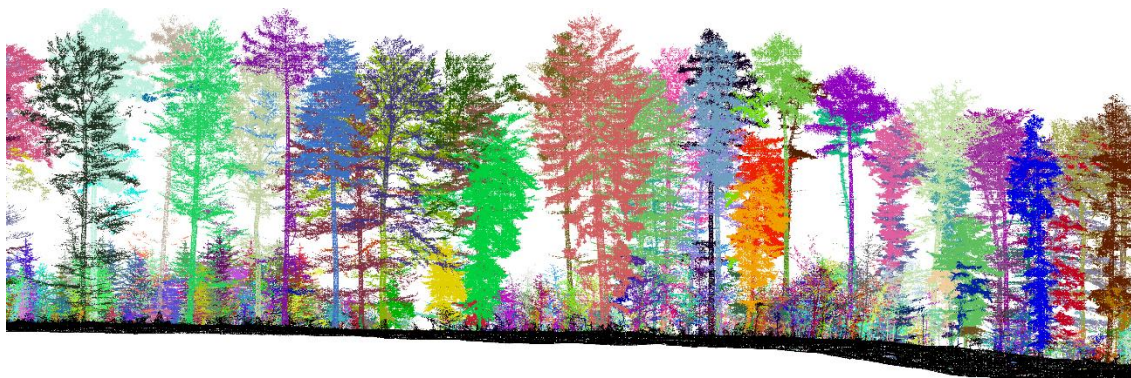
pozice paty kmene, výčetní tloušťka (DBH), výška a QSM modely byly využity pro výpočet objemu hroubí.



Obrázek 1. Plocha LČR – Buchlovice, výřez segmentovaného mračka 100 x 20 m



Obrázek 2. Plocha LČR – LS Křivoklát, výřez segmentovaného mračka 100 x 20 m



Obrázek 3. Plocha ŠLP – Pokojná hora, výřez segmentovaného mračka 100 x 20 m



Obrázek 4. Plocha ŠLP – Klepačov, výřez segmentovaného mračka 100 x 20 m

2.2. Vývoj softwaru 3D Forest: Technologie a architektura

Klíčovým technickým výstupem je rozvoj open-source aplikace 3D Forest, která slouží jako hlavní platforma pro vizualizaci a analýzu. Aplikace je napsána v jazyce C++, což zajišťuje vysokou výpočetní rychlost operací nad mračny bodů. Uživatelské rozhraní je postaveno na frameworku Qt, zatímco pro lineární algebru a geometrické výpočty jsou využity knihovny Eigen, Libigl a Point Cloud Library (PCL).

Datová struktura:

Software využívá hierarchické ukládání metadat ve formátu JSON, který je snadno čitelný pro člověka i stroj a umožňuje efektivní správu projektů s více datovými soubory. Atributy bodů jsou ukládány do samostatných binárních souborů (např.: .IDX, .SEGMENT, .VOXEL, .DESCRIPTOR), což zachovává integritu původních LAS souborů a zrychluje vizualizaci i prostorové dotazy.

Modulární pluginový systém:

Jádro aplikace je navrženo jako rozšiřitelné pomocí zásuvných modulů. Téměř veškerá funkcionality je implementována pomocí nezávislých modulů. Významným rozšířením je 3D-Marteloscop plugin vyvinutý v jazyce Python (framework Streamlit), který byl integrován pomocí techniky Python-binding. Tento modul využívá široce rozšířené knihovny jako pandas, plotly, shapely a numpy pro pokročilé analytické výstupy a interaktivní 2D/3D vizualizace.

Integrace iLand:

Do systému byl jako samostatný modul integrován procesní růstový simulátor iLand. To umožňuje přímo z prostředí 3D Forest simulovat fyziologické procesy (fotosyntézu, vodní bilanci) a predikovat vývoj porostu v horizontu 20–30 let po provedeném pěstebním zásahu.

2.3. Analytické algoritmy a výhody 3D přístupu

Oproti tradičním 2D metodám (Marteloskopům), které stromy vnímají pouze jako body, umožňuje 3D pojetí pracovat s realistickým objemem korun.

Voxelizace korun:

Koruny jsou voxelizovány v rozlišení 0,1 až 1 m, což dovoluje přesný výpočet vertikálních profilů objemu korun a identifikaci uvolněného prostoru.

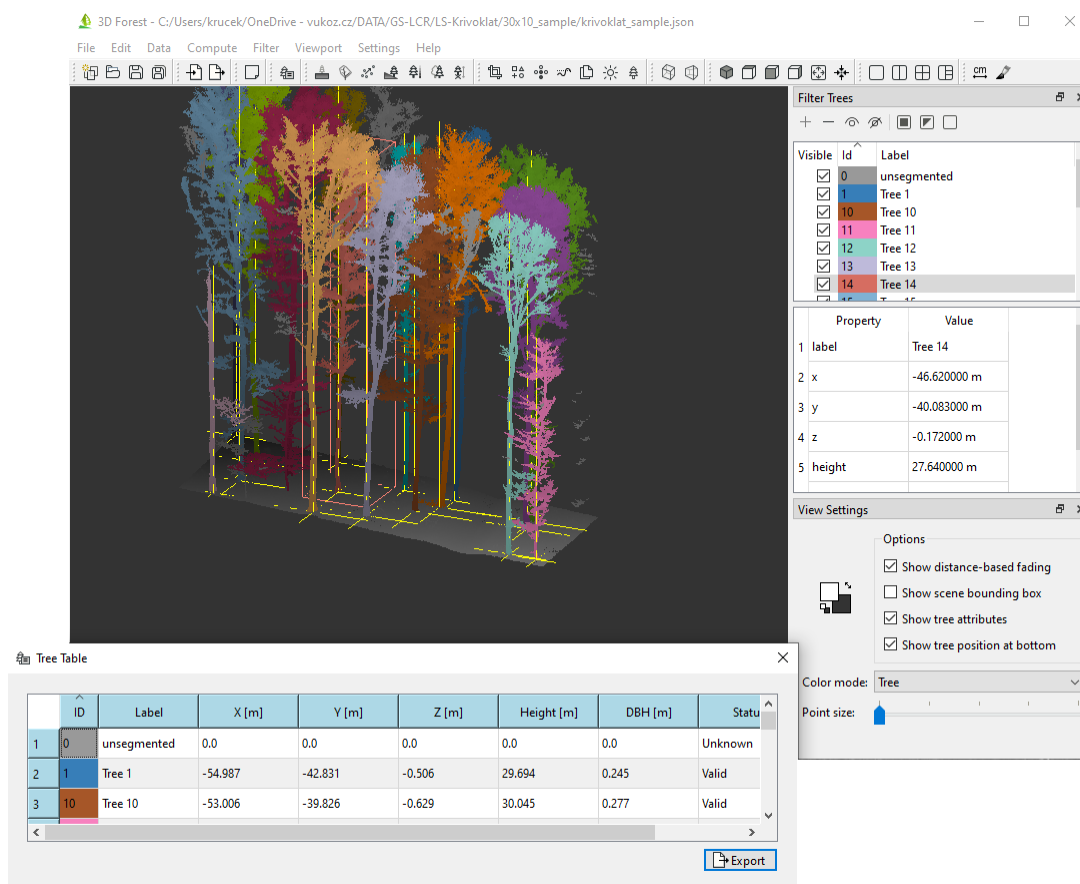
Kompetiční analýza:

Algoritmy počítají sdílený objem korun mezi sousedními stromy, čímž kvantifikují vnitrodruhovou a mezidruhovou konkurenci.

Dostupnost světla:

Pomocí metody ray-tracingu nad voxelizovanou scénou je pro každý strom počítán potenciál dostupného světla (nezastíněný prostor oblohy), což je klíčové pro hodnocení asimilační kapacity po uvolňovacím zásahu.

Výhody: Umožňuje odhad prostorových vztahů mezi korunami, které souvisí se stabilitou porostu a kompeticí o sdílený prostor, a dohad růstových možností jedinců na základě jejich reálného, kvantitativně vyjádřeného sociálního postavení v porostu.



Obrázek 5. Segmentované stromy s vypočtenými základními parametry a atributovou tabulkou v programu 3D Forest.

3. SPLNĚNÍ PLÁNOVANÝCH DÍLČÍCH CÍŮ DLE ZADÁNÍ PROJEKTU

Všechny plánované cíle byly realizovány v rozsahu stanoveném smlouvou v souladu s harmonogramem a požadavky Grantové služby Lesů ČR. Projekt rozšířil koncept tradičních 2D Marteloskopů do plně trojrozměrného prostředí, hlavní cíl projektu tak byl realizován v souladu se zadáním.

3.1. Realizace dílčích výstupů dle Smlouvy o dílo

Plnění cílů probíhalo ve dvou hlavních etapách definovaných smlouvou jako Dílčí výstupy č. I a II:

Dílčí výstup I:

Byly založeny cvičné pěstební plochy (Pokojná hora, Klepačov, Buchlovice, Křivoklát), na kterých proběhl sběr dat pozemním laserovým skenerem. Data byla úspěšně registrována,

georeferencována a segmentována na úroveň terénu a jednotlivých stromů. Byl zahájen vývoj algoritmů pro automatickou segmentaci a výpočet základních parametrů kmenů a korun.

Dílčí výstup II:

V souladu se smlouvou byly vyvinuty a otestovány funkční algoritmy pro vyhodnocování simulovaných pěstebních zásahů ve 3D ve formě softwarového kódu. Byly vytvořeny digitální 3D kopie (digital twins) všech pěstebních ploch. Do systému byl integrován růstový simulátor pro predikci vývoje porostu v horizontu 20–30 let.

3.2. Hodnocení naplnění specifických parametrů

Projekt splnil požadavky na kvantifikaci parametrů, které tradiční 2D metody neumožňují:

- **Atributy stromů a korun:** Systém automatizovaně počítá nejen standardní DBH a výšku, ale i rozměry, objem, plochu, těžiště a výšku nasazení koruny.
- **Analýza korunového prostoru:** Byl implementován výpočet vertikálního rozložení objemu korun a detailní identifikace sdíleného (konkurenčního) korunového prostoru.
- **Světelné podmínky:** Pomocí metody ray-tracingu byl implementován výpočet zastínění, který hodnotí podíl nezastíněného výhledu v 60° kuželu rozvírajícím se od koruny hodnoceného stromu směrem k obloze pro jednotlivé stromy před a po zásahu.

4. POPIS VÝSLEDKŮ PROJEKTU

4.1. Jádro systému 3D Forest

4.1.1. Úloha a postavení 3D Forest v projektu

3D Forest představuje základní softwarovou platformu celého projektu. Jedná se o open-source, multiplatformní desktopovou aplikaci (Windows, Linux, macOS), vyvíjenou v jazyce C++, která slouží k importu, zpracování, vizualizaci a analýze prostorových dat lesních porostů na základě pozemního laserového skenování (TLS). Software je dostupný na: <https://github.com/VUKOZ-OEL/3d-forest>.

V kontextu pěstebních zásahů plní 3D Forest zejména následující funkce:

- vytváří digitální 3D kopii porostu (digitální kopie),
- umožňuje výběr a označení jednotlivých stromů podle pěstebního záměru,
- poskytuje okamžitou prostorovou zpětnou vazbu při návrhu zásahu,

- připravuje datový základ pro následné analytické vyhodnocení v modulu 3D-Marteloscop.

3D Forest je tak nástrojem, ve kterém je simulovaný pěstební zásah navržen a proveden, zatímco jeho důsledky jsou kvantifikovány a interpretovány v navazujícím 2D modulu.

4.1.2. Datový model a práce se stromy

Základní jednotkou systému je jednotlivý strom, reprezentovaný:

- segmentovaným bodovým mračnem,
- souborem odvozených atributů kmene a koruny,
- vazbou na projektový soubor ve formátu JSON.

Každému stromu jsou přiřazeny jak měřené atributy (DBH, výška, poloha), tak odvozené prostorové charakteristiky, zejména:

- objem hroubí,
- objem, plocha a výška nasazení koruny,
- horizontální a vertikální projekce koruny,
- konvexní obal koruny,
- voxelová reprezentace korunového prostoru.

Tento detailní popis stromu umožňuje překročit limity tradičních 2D pěstebních pomůcek a pracovat přímo s prostorovou strukturou porostu.

4.1.3. Tvorba simulovaného pěstebního zásahu v 3D

Tvorba simulovaného pěstebního zásahu v aplikaci 3D Forest probíhá v interaktivním trojrozměrném prostředí a je koncipována tak, aby odpovídala logice běžné pěstební praxe v lese. Uživatel pracuje s digitální 3D kopií porostu, ve které může jednotlivé stromy vybírat, hodnotit a označovat obdobně, jako by postupoval při skutečném zásahu v terénu.

Proces návrhu zásahu je založen na postupném zpřesňování pohledu na porost – od celkového přehledu až po detailní hodnocení jednotlivých stromů – a na kombinaci prostorového vnímání, filtrace dat a práce s atributy stromů.

Inicializace zásahu

Na počátku simulace jsou všechny stromy v porostu nastaveny do výchozího stavu „**Bez zásahu**“. Tento stav představuje neutrální výchozí pozici, kdy žádný strom ještě není uvažován jako cílový ani jako strom určený k odstranění.

Inicializace zásahu vytváří jasnou referenční situaci:

- porost odpovídá reálnému stavu před zásahem,
- nejsou aplikována žádná pěstební rozhodnutí,
- uživatel může zásah navrhopat od začátku bez ovlivnění předchozími volbami.

Tento krok odpovídá terénní situaci, kdy lesník vstupuje do porostu a nejprve jej celkově posuzuje, aniž by zatím činil konkrétní zásahová rozhodnutí.

Volba barevného schématu

Jedním z prvních kroků při práci v 3D Forest je volba vhodného barevného schématu zobrazení stromů. Barevné rozlišení slouží jako základní orientační nástroj a výrazně ovlivňuje způsob, jakým uživatel porost vnímá.

Stromy mohou být obarveny podle:

- dřeviny, což umožňuje rychlé zhodnocení druhové skladby,
- volby zásahu, tedy podle toho, zda je strom ponechán, označen jako cílový, nebo určen k odstranění.
- Náhodná barva pro jednotlivé stromy

Barevné schéma lze v průběhu práce libovolně přepínat. Uživatel tak může plynule přecházet mezi pohledem zaměřeným na druhovou skladbu a pohledem zaměřeným na vlastní pěstební rozhodnutí. Mimo to jsou v softwaru přítomny další volby pro zobrazení, které však nejsou relevantní z pohledu provádění simulovaného pěstebního zásahu a slouží pro zpracování surových dat. Jedná se o možnosti obarvující body na základě jejich vlastností jako: intenzita odrazu laserového paprsku, počet a pořadí odrazu paprsku, klasifikace bodu, deskriptor (reprezentuje geometrické vlastnosti v okolí bodu), případně normalizovaná výška nad terénem.

Filtrace porostu

Filtrace porostu představuje nástroj pro zpřehlednění dat a pro soustředění se pouze na relevantní část porostu. V hustých a strukturálně složitých porostech je filtrace nezbytná pro smysluplné rozhodování.

Uživatel může filtrovat stromy zejména podle:

- dřeviny
- výškové úrovně
- tloušťkových tříd
- prostorového výřezu porostu

Filtrace umožňuje například:

- pracovat pouze s jednou dřevinou ve smíšeném porostu
- zaměřit se pouze na horní etáž
- dočasně skrýt podúroveň při posuzování stability hlavního patra
- soustředit se na konkrétní část plochy

Filtrace nemění vlastní data porostu, ale pouze způsob jejich zobrazení. Uživatel tak může porost analyzovat po částech, aniž by ztratil přehled o celkové struktuře.

Vyvolání oken jednotlivých filtrů je možné z menu *Filter*, přičemž relevantní filtry pro tvorbu simulovaného zásahu jsou:

- Area – filtr zájmové oblasti pomocí posuvníků
- Management status – umožňuje filtrovat stromy podle Volby zásahu a měnit Volbu zásahu pro aktuálně vybrané stromy.
- Species – umožňuje zobrazit pouze vybrané dřeviny

Orientace v prostoru a práce se scénou

Prostorová orientace je zásadní součástí práce ve 3D Forest. Uživatel může scénu libovolně:

- otáčet
- přibližovat a oddalovat
- měnit výšku pohledu
- přepínat mezi pohledem shora, z boku a perspektivním pohledem
- rozdělit vizualizační část na více pohledů pro okamžitý přehled (např. detail z boku a v druhé části okna pohled z hora)

Tyto nástroje umožňují hodnotit porost z různých úhlů a lépe vnímat:

- vertikální strukturu porostu,
- vzájemné postavení korun,
- konkurenční vztahy mezi sousedními stromy.

Možnost plynulého natáčení scény je klíčová zejména při posuzování korunového prostoru a při rozhodování o uvolnění cílových stromů.

Výběr stromů k zásahu

Samotný výběr stromů k zásahu probíhá interaktivně a může být realizován několika způsoby, které lze libovolně kombinovat:

- **Přímým výběrem ve 3D nebo 2D pohledu**, kdy uživatel označuje konkrétní strom na základě jeho polohy, velikosti a vztahu k okolí. Samotný výběr stromu probíhá pomocí dvojklíku levým tlačítkem myši. Vícenásobný výběr je možný při podržení klávesy Ctrl.
- **Výběrem v atributové tabulce**, která umožňuje pracovat s větším počtem stromů najednou na základě jejich vlastností. Výběr probíhá označováním řádků vybraných stromů levým tlačítkem myši. Vícenásobný výběr je možný při podržení klávesy Ctrl, případně Ctrl + Shift pro výběr sekvence stromů.

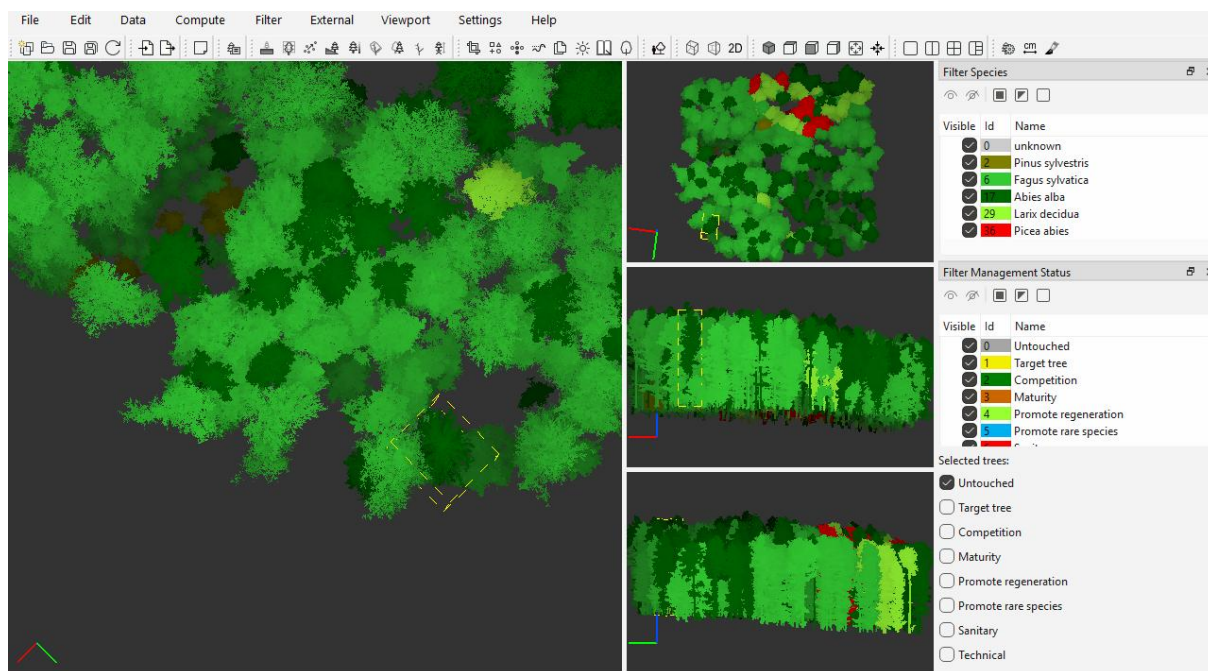
Označení vybraných stromů pak probíhá použitím příslušného zaškrťovacího pole v podokně *Filter Management Status* nebo pomocí menu vyvolaného kliknutím pravým tlačítkem myši na vybraný strom v atributové tabulce a následně zvolením patřičné volby v menu *Set Management Status*.

Zobrazení a práce s atributy stromů

Každý strom v porostu je v aplikaci popsán souborem atributů:

- výčetní tloušťka
- kruhová výčetní základna
- objem hroubí s kůrou
- výška stromu
- výška těžiště koruny
- objem a povrch koruny
- plocha vertikální a horizontální projekce koruny
- excentricita koruny
- štíhlostní koeficient
- zápoj stromu

Tyto atributy slouží uživateli jako podklad pro pěstební rozhodnutí a umožňují porovnávat jednotlivé stromy mezi sebou. Kombinace vizuálního posouzení a práce s atributy výrazně zvyšuje objektivitu zásahu.



Obrázek 6. Výřez hlavního okna programu 3D Forest se zapnutým rozdělením vizualizační části na více panelů a zobrazenými podokny pro filtrování. Mračna jednotlivých stromů jsou obarvena podle dřeviny, strom vybraný k označení v zásahu je zvýrazněn pomocí bounding boxu.

Označení stromů pěstební kategorií

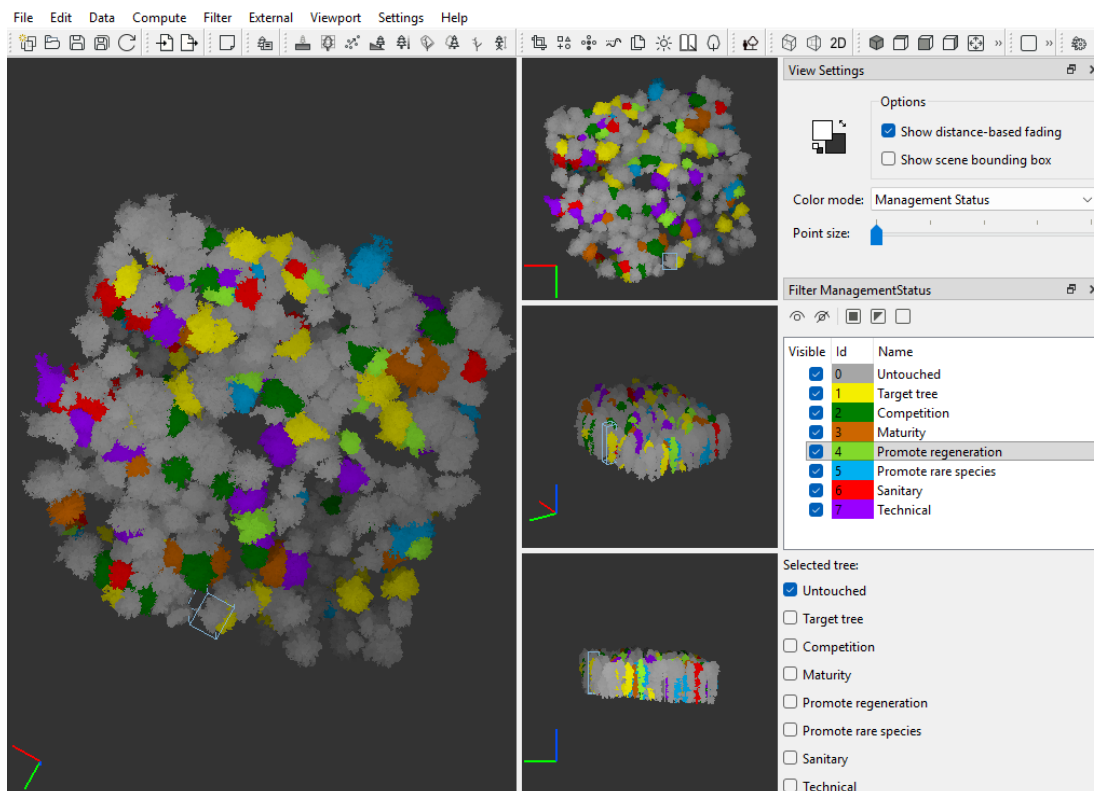
Vybrané stromy jsou následně označeny pěstební kategorií, která vyjadřuje důvod jejich ponechání nebo odstranění. Kategoriemi jsou:

- **Cílový strom** – strom ponechaný jako perspektivní jedinec, který je nositelem budoucí funkce porostu z hlediska produkčního, ekologického nebo stabilizačního. U cílových stromů je cílem zásahu dlouhodobé uvolnění korunového prostoru, podpora vitality a zajištění stabilního růstu/zvýšeného přírůstu.
- **Zralost** – stromy odstraňované z důvodu dosažení cílového stavu z hlediska tloušťky, výšky nebo fáze vývoje. Tyto stromy již dále nepřispívají k naplnění pěstební cíle porostu a jejich odstranění umožňuje uvolnění prostoru pro mladší nebo perspektivnější jedince.
- **Konkurence** – stromy odstraňované z důvodu silného konkurenčního tlaku na cílové nebo perspektivní stromy. Jedná se zejména o jedince, jejichž koruny významně omezují růstový prostor sousedních stromů a negativně ovlivňují jejich vitalitu a stabilitu.
- **Bez zásahu** – výchozí, neutrální kategorie, která je přiřazena všem stromům na počátku simulace zásahu. Stromy v této kategorii nejsou v daném okamžiku

považovány ani za cílové, ani za stromy určené k odstranění a slouží jako referenční základ pro návrh zásahu.

- **Technický zásah** – stromy odstraňované z provozních nebo bezpečnostních důvodů, které přímo nesouvisejí s pěstebním cílem porostu. Může se jednat například o stromy překážející přibližování dříví, ohrožující bezpečnost práce nebo o jedince s technickými vadami.
- **Uvolnění vzácných druhů** – stromy odstraňované za účelem podpory a uvolnění vzácných, ohrožených nebo jinak cenných dřevin. Cílem je snížení konkurenčního tlaku na tyto jedince a vytvoření vhodných podmínek pro jejich růst, vitalitu a dlouhodobé přežití v porostu.
- **Uvolnění obnovy** – stromy odstraňované za účelem vytvoření světelných a prostorových podmínek pro přirozenou obnovu nebo podsadby. Kategorie se uplatňuje zejména při přestavbách porostů a při podpoře smíšené a věkově diferencované struktury.
- **Zdravotní výběr** – stromy odstraňované z důvodu zhoršeného zdravotního stavu, poškození nebo snížené vitality. Odstranění těchto jedinců přispívá ke zvýšení stability porostu a ke snížení rizika šíření škodlivých činitelů.

Označení stromu pěstební kategorií představuje explicitní formulaci pěstebního rozhodnutí. Tyto informace jsou následně využívány při vyhodnocení zásahu v modulu 3D-Marteloscop.



Obrázek 7. Zobrazení stavu porostu s barevným odlišením stromů podle jejich výběru v zásahu.

Kontrola zásahu a iterace

Jakmile jsou stromy označeny, uživatel okamžitě vidí porost ve stavu po zásahu. To umožňuje:

- vizuální kontrolu rovnoměrnosti zásahu,
- posouzení uvolnění cílových stromů,
- identifikaci míst s nedostatečným nebo nadměrným zásahem.

Proces návrhu zásahu je iterativní – uživatel se může kdykoliv vrátit, změnit rozhodnutí, upravit výběr stromů a znovu porost vyhodnotit.

4.1.4. Význam 3D vizualizace pro pěstební rozhodování

3D zobrazení umožňuje hodnotit aspekty, které nejsou v terénu ani ve 2D mapách snadno postižitelné:

- prostorové rozložení korun a jejich překryv,
- vertikální diferenciaci porostu,
- vztah cílových stromů k okolní konkurenci,
- důsledky zásahu na úrovni korunového patra.

4.2. Modul 3D-Marteloscop – vyhodnocení simulovaného zásahu

Tato kapitola poskytuje systematický popis jednotlivých stránek uživatelského rozhraní 2D modulu 3D-Marteloscop aplikace 3D Forest. Modul je implementován v programovacím jazyce Python (verze 3.x) a je postaven na frameworku Streamlit. Slouží jako analytický nástroj pro vizualizaci, vyhodnocení a simulaci hospodářských zásahů v lesních porostech s využitím detailní databáze jednotlivých stromů. Pro každou stránku jsou popsány klíčové prvky grafického uživatelského rozhraní, jejich funkce a zamýšlené využití v procesu hodnocení simulovaných pěstebních zásahů.

Grafické uživatelské rozhraní modulu 3D-Marteloscop je koncipováno jako dvoupanelové. Levá část obsahuje navigační panel, zatímco pravá slouží k zobrazování výsledků, grafů a map souvisejících se simulovaným zásahem. Stránky v navigačním panelu jsou členěny do následujících sekcí:

- **Hlavní** – stránka *Info & ovládání*
- **Základní výsledky** – stránky *Souhrn*, *Intenzita*, *Mapa plochy*, *Heatmapy*, *Statistiky stromů*
- **Rozšířené výsledky** – stránky *Vyplnění prostoru*, *Prostorová konkurence*, *Dostupnost světla*
- **Simulace růstu** – stránka *Predikce*
- **Nastavení** – stránky *Přidat atributy*

Rozložení ovládacích a vizualizačních prvků na jednotlivých stránkách je navrženo jednotně, případně s obdobnou strukturou tam, kde to podporuje přehlednost a uživatelskou orientaci. Všechny grafy jsou interaktivní a dynamicky reagují na změny uživatelských filtrů, zejména na výběr průměru kmene (DBH), výšky stromu, barevného schématu (dle dřeviny nebo označení stromu v rámci zásahu) a na stav porostu (před a po zásahu). V případech, kdy není k dispozici explicitní filtr pro dřevinu, lze jednotlivé kategorie (dřeviny, typ zásahu) selektivně zobrazovat přímo prostřednictvím legendy grafu.

Zobrazení jednotlivých komponent je optimalizováno pro monitory s úhlopříčkou $\geq 19''$. Na zařízeních s menší úhlopříčkou může docházet ke změně rozložení některých ovládacích prvků (např. jejich vertikálnímu řazení namísto horizontálního), přičemž funkčnost modulu zůstává plně zachována.

Modul 3D-Marteloscop představuje analytickou a hodnoticí nadstavbu nad jádrem aplikace 3D Forest. Zatímco samotný návrh pěstebního zásahu probíhá v plně trojrozměrném

prostředí, 3D-Marteloscop umožňuje jeho systematické, kvantitativní a reprodukovatelné vyhodnocení. Aplikace je realizována jako samostatný 2D analytický modul úzce provázaný s projektovým souborem ve formátu JSON, který slouží jako společný datový nosič mezi aplikacemi 3D Forest a 3D-Marteloscop. Pro ukládání uživatelských zásahů a externích proměnných je využívána databáze SQLite.

4.2.1. Stránka „Info & ovládání“

Stránka slouží jako úvodní a řídicí rozhraní modulu 3D-Marteloscop. Nejedná se o analytickou stránku v užším smyslu, ale o centrální místo, kde uživatel pracuje s projektem jako celkem a odkud řídí průběh vyhodnocení simulovaného pěstebního zásahu.

Na stránce jsou zobrazeny základní informace o hodnocené ploše a o aktuálním stavu simulovaného zásahu, zejména:

- identifikace plochy a základní popis porostu
- stav projektu z hlediska načtených dat a aktivního scénáře zásahu

Součástí stránky jsou rovněž ovládací prvky umožňující načítání, správu a export dat, které tvoří vstup pro všechny ostatní analytické stránky modulu.

Ovládání a filtrace

Stránka *Info & ovládání* poskytuje uživateli nástroje pro:

- aktivaci demonstračního nebo referenčního scénáře zásahu
- uložení zásahu do databáze, případně jeho vymazání
- export výsledků vyhodnocení do souborů pro další zpracování

Ovládací prvky jsou navrženy tak, aby bylo možné rychle přecházet mezi různými variantami zásahu bez nutnosti opakovaného nastavování celého projektu. Veškeré změny provedené na této stránce se okamžitě promítají do všech ostatních částí modulu a ovlivňují zobrazované výsledky.

Pěstební význam a interpretace

Možnost přepínání mezi jednotlivými variantami zásahu představuje nástroj pro jejich systematické porovnání a věcnou interpretaci. Uživatel není nucen hodnotit každou variantu izolovaně, ale může je sledovat ve vzájemném kontextu a přímo porovnávat jejich strukturální i funkční důsledky.

Přepínání zásahů umožňuje rozlišit varianty se stejnou intenzitou podle tradičních porostních ukazatelů (např. snížení počtu stromů, kruhové základny či zásoby), avšak s odlišným dopadem na reálnou strukturu porostu. Uživatel může sledovat, zda zásah mění pouze kvantitativní parametry, nebo zda skutečně ovlivňuje prostorové uspořádání korun, vertikální diferenciaci, míru sdíleného prostoru mezi stromy či zástin jednotlivých vrstvách.

Funkce přepínání přenáší uživateli okamžitou zpětnou vazbu o důsledcích jeho rozhodnutí.

Umožňuje například porovnat:

- rovnoměrně rozptýlený zásah s prostorově koncentrovaným zásahem,
- variantu zaměřenou na redukci počtu stromů s variantou cíleně uvolňující perspektivní jedince,
- zásah podporující horní etáž s variantou směřující k vytvoření vícevrstevné struktury,
- okamžitý strukturální efekt s jeho dlouhodobým vývojem v predikci.

Z pěstebního hlediska je významná zejména možnost odlišit formálně podobné zásahy od variant, které mají rozdílný biologický účinek. Přepínání variant umožňuje objektivně posoudit, zda bylo dosaženo skutečného uvolnění růstového prostoru cílových stromů, zda se změnilы světelné podmínky v žádoucím směru a zda zásah podporuje stabilitu a budoucí vývoj porostu.

Ve výukovém kontextu představuje tato funkce nástroj pro rozvoj odborného úsudku. Uživatel může navrhnout více alternativ řešení, následně je systematicky porovnat a analyzovat jejich důsledky. Proces rozhodování se tak stává transparentním, opakovatelným a doložitelným. Přepínání zásahů umožňuje hledat variantu, která nejlépe odpovídá stanovenému pěstebnímu cíli, a současně podporuje pochopení vztahu mezi strukturou porostu a výsledkem zásahu.

V širším kontextu představuje tato funkce krok směrem k datově podloženému rozhodování v lesním hospodářství. Uživatel má možnost opřít své rozhodnutí nejen o zkušenost a vizuální dojem, ale také o prostorově explicitní analýzu důsledků jednotlivých variant.

Hlavní

Info & ovládání

Základní výsledky

Souhrn

Intenzita

Mapa plochy

Heatmapy

Statistiky stromů

Rozšířené výsledky

Vyplnění prostoru

Prostorová konkurence

Dostupnost světla

Simulace růstu

Predikce

Nastavení

Přidat atributy

Jazyk

Angličtina

Čeština

Pokojná hora

Přehled:

- Typ lesa: Submontane beech – silver fir stand
- Počet stromů: 574
- Zásoba dříví: 338.3 m³
- Rozloha: 1 ha
- Nadmořská výška: 490 m
- Srážky: 660 mm/year
- Průměrná teplota: 6.6 °C
- Založeno: 2023
- Poloha: Czech Republic/South Moravia
- Vlastník: Mendel University Brno
- Lidarová data sebrána v: 2024

Výběr existujícího zásahu

Příklady zásahů:

Pokojná hora - modelový zásah (Id: 3)

Načíst příklad

Uložit aktuální zásah

Název zásahu

Zadej název zásahu...

Uložit zásah do projektu

Smazat vybraný zásah

Ovládání projektu:

Exportovat výsledky

Nápověda:

Obrázek 8. Ilustrační výřez stránky Info & ovládání

4.2.2. Stránka „Souhrn“

Stránka *Souhrn* poskytuje základní souhrnné vyhodnocení porostu a simulovaného pěstebního zásahu z hlediska tradičních porostních charakteristik. Jedná se o výchozí analytickou stránku, která shrnuje základní parametry porostu ve stavu před zásahem a po zásahu. Umožňuje tak jejich přímé porovnání různých stavů porostu.

Zobrazené charakteristiky zahrnují:

- počet stromů
- objem hroubí
- výčetní kruhovou základnu
- zápoj porostu
- zkamenění porostu (pokud je relevantní pro plochu)

Výsledky jsou členěny podle dřevin a dále rozděleny do tloušťkových a výškových tříd. Grafické výstupy umožňují přehledné porovnání stavu porostu před zásahem, stavu porostu po zásahu a objemu či počtu stromů odstraněných v rámci simulovaného zásahu.

Ovládání a filtrace

Uživatel může na stránce Souhrn:

- volit sledovanou charakteristiku
- přepínat mezi zobrazením stavu porostu před a po zásahu,
- filtrovat stromy podle dřevin nebo volby zásahu pomocí interaktivní legendy

Změny nastavení se okamžitě promítají do grafických výstupů. Uživatel tak může snadno porovnávat různé části porostu a zaměřit analýzu na konkrétní dřevinu nebo velikostní kategorii stromů.

Pěstební význam a interpretace

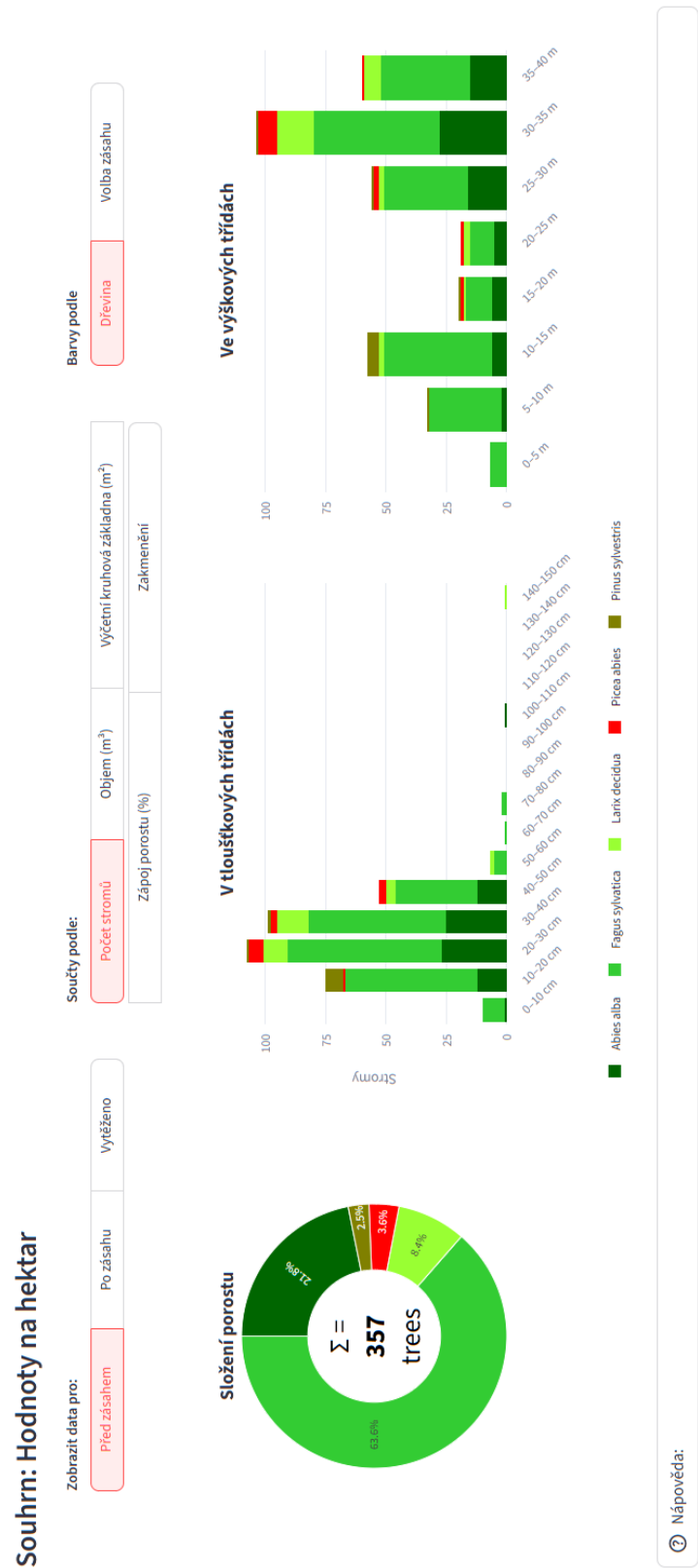
Stránka Souhrn představuje základní bilanční pohled na pěstební zásah a odpovídá tradičnímu lesnickému vyhodnocení prováděnému v provozní praxi. Umožňuje rychle posoudit celkovou sílu zásahu a jeho dopad na základní porostní parametry.

Z pěstebního hlediska slouží stránka zejména k:

- ověření, zda zásah odpovídá zamýšlenému typu výchovy,
- kontrole rozsahu zásahu z hlediska zachování stability porostu,
- posouzení změny druhové skladby v důsledku zásahu.

Souhrn poskytuje referenční rámec pro interpretaci všech dalších analytických výstupů modulu. Zatímco další stránky se zaměřují na prostorové, korunové a konkurenční aspekty, Souhrn umožňuje zasadit tyto výsledky do kontextu klasických porostních ukazatelů, které jsou běžně používány v lesnické praxi.

Ve vazbě na stránku Intenzita umožňuje stránka Souhrn rozlišit mezi bilančním dopadem zásahu a jeho biologickým účinkem, a tím podporuje kvalifikované pěstební rozhodování a interpretaci výsledků simulovaného zásahu.



4.2.3. Stránka „Intenzita“

Stránka zobrazuje intenzitu simulovaného pěstebního zásahu vyjádřenou pomocí několika komplementárních porostních a stromových charakteristik. Na rozdíl od souhrnného přehledu v části Souhrn je zde intenzita zásahu interpretována cíleně z hlediska zásahového účinku, nikoli pouze jako bilanční údaj.

Zobrazené výstupy vyjadřují intenzitu zásahu podle:

- počtu stromů
- výčetní kruhové základny
- objemu hroubí
- objemu korun

Výsledky jsou prezentovány ve formě přehledných grafů, které umožňují porovnávat podíl odstraněné části porostu vůči celkovému stavu před zásahem. Intenzita může být členěna podle dřevin a pěstebních kategorií stromů. V případě rozčlenění podle dřeviny je pak intenzita výběru pro jednotlivé dřeviny vykreslena jako skládaný graf, kde je celková intenzita výběru dané dřeviny vykreslena na ose x v procentech, pole je dále barevně rozděleno podle toho, jaké kategorie zásahu byly aplikovány. V opačné případě, kdy uživatel zvolí vykreslení podle Volby zásahu jsou pro jednotlivé kategorie vyneseny na ose x sumární čísla a jejich pole dále rozděleny podle dřevin na které byly aplikovány. Stránka zobrazuje graf pro celkovou intenzitu, kde je jako referenční hodnota pro výpočet brána suma za celý porost před zásahem. A dále graf pro intenzitu výběru v kategorii kde je jako referenční hodnota brána suma hodnot v dané skupině před zásahem. V případě rozčlenění podle Volby zásahu tato referenční hodnota neexistuje, graf tedy zobrazuje, jaká Volba zásahu byla aplikována na jednotlivé dřeviny.

Ovládání a filtrace

Uživatel může na stránce volit:

- charakteristiku, podle které je intenzita zásahu hodnocena
- rozlišení výsledků podle dřevin
- rozlišení podle volby zásahu stromů
- filtrovat data pomocí výčetní tloušťky a výšky pro které je intenzita počítána

Všechny změny nastavení se okamžitě promítají do grafických výstupů, což umožňuje rychlé porovnávání různých variant zásahu.

Pěstební význam a interpretace

Stránka Intenzita umožňuje hodnotit pěstební zásah z více hledisek a poskytuje komplexní obraz jeho skutečné síly a účinku. Z pěstebního hlediska je důležitá zejména možnost hodnotit intenzitu zásahu nejen podle tradičních ukazatelů, ale také podle charakteristik spojených s korunami stromů.

Hodnocení intenzity podle objemu korun umožňuje lépe vystihnout, do jaké míry byl porost skutečně uvolněn z hlediska růstového prostoru. Tento přístup je obzvláště významný u porostů obhospodařovaných přírodě blízkým způsobem, kde cílem zásahu není primárně snížení zásoby, ale regulace konkurenčních vztahů a světelných podmínek.

Stránka Intenzita tak slouží jako nástroj pro:

- kontrolu souladu zásahu s modelem hospodaření,
- porovnávání různých variant zásahu,
- optimalizaci zásahu směrem k podpoře cílových stromů
- optimalizaci zásahu s ohledem na adaptaci stromů na klimatickou změnu.

Ve vazbě na další analytické stránky modulu umožňuje Intenzita zasadit výsledky do širšího kontextu prostorové struktury porostu a biologických účinků zásahu, a tím podporuje kvalifikované pěstební rozhodování.



Obrázek 10. Ilustrační výřez stránky Intenzita

4.2.4. Stránka „Mapa plochy“

Stránka zobrazuje půdorysnou stromovou mapu porostu, ve které je každý strom reprezentován symbolem umístěným v poloze paty kmene. Mapové zobrazení poskytuje přehled o prostorovém rozmístění jednotlivých jedinců v porostu a o jejich výběru v rámci simulovaného zásahu.

Stromy jsou v mapě vizuálně rozlišeny pomocí:

- barevného kódování podle dřeviny nebo volby zásahu
- velikosti symbolu odpovídající zvolené stromové charakteristice (např. tloušťka, výška, objem)

Mapa může být doplněna o projekce jednotlivých korun, pro intuitivní rozčlenění plochy je na podkladu vykreslena čtvercová síť 10 x 10 m. Atributy jednotlivých stromů se zobrazují v popisku po najetí myši.

Ovládání a filtrace

Uživatel může mapu interaktivně ovládat:

- přiblížení a oddálení zobrazení
- posunu mapového výřezu
- výběru jednotlivých stromů nebo skupin stromů kliknutím
- reset nastavení
- full-screen zobrazení
- uložení mapy do jpg formátu

Dále je možné nastavovat:

- způsob barevného rozlišení stromů (dřeviny, volba zásahu)
- filtraci stromů podle dřevin
- filtraci podle tloušťkových a výškových tříd
- zobrazení stavu porostu před zásahem nebo po zásahu

Dále je možné volit podle jakého atributu stromů má být škálována velikost bodů, horní a dolní mez škálování. Barevné zobrazení pozic stromů a projekcí korun je nezávislé a může tak být odlišeno.

Pěstební význam a interpretace

Stránka představuje základní nástroj pro **prostorovou orientaci v porostu** a pro kontrolu prostorové logiky simulovaného pěstebního zásahu. Z pěstebního hlediska umožňuje

hodnotit, zda zásah respektuje přirozenou strukturu porostu a prostorové vztahy mezi jednotlivými stromy.

Pomocí mapového zobrazení může uživatel:

- posoudit (ne)rovnoměrnost rozmístění zásahu v ploše
- identifikovat skupin(k)y odstraněných nebo ponechaných stromů
- kontrolovat, jak jsou cílové stromy distribuovány v prostoru a zda jsou dostatečně uvolněny
- hodnotit jakým způsobem mění lesník kompetiční vztahy porostu po provedení navrženého zásahu
- hodnotit návaznost zásahu na terénní a porostní podmínky

Mapa umožňuje propojit individuální pěstební rozhodnutí na úrovni jednotlivých stromů s celkovou prostorovou strukturou porostu. Slouží tak jako nástroj pro ověření, že zásah není pouze statisticky vyhovující, ale že dává smysl i z hlediska prostorové organizace porostu, stability a dlouhodobého vývoje.

Ve spojení s analytickými stránkami Heatmapy a Prostorová konkurence poskytuje stránka Map základní rámec pro komplexní hodnocení pěstebního zásahu v prostoru a podporuje kvalifikované rozhodování o jeho případné úpravě nebo optimalizaci.



4.2.5. Stránka „Heatmapy“

Stránka *Heatmapy* zobrazuje prostorové rozložení vybraných charakteristik porostu ve formě tematických rastrových map. Porost je v půdorysném pohledu rozdělen na pravidelnou prostorovou síť s rozlišením 1 m, přičemž každé buňce je přiřazena hodnota zvolené charakteristiky odvozená z atributů jednotlivých stromů v jejím okolí.

Zobrazované charakteristiky zahrnují zejména:

- výčetní tloušťka
- kruhová výčetní základna
- objem hroubí s kůrou
- výška stromu
- výška těžiště koruny
- objem a povrch koruny
- plocha vertikální a horizontální projekce koruny
- excentricita koruny
- štíhlostní koeficient

Barevná škála vyjadřuje relativní intenzitu dané charakteristiky v prostoru porostu a umožňuje snadnou identifikaci oblastí s vyšší či nižší koncentrací sledované hodnoty. Mapy lze zobrazovat pro stav porostu před zásahem, po zásahu nebo pouze pro odstraněné stromy, čímž je možné přímo porovnávat prostorový dopad pěstebního zásahu.

Ovládání a filtrace

Uživatel volí, která charakteristika má být zobrazena, a dále může nastavovat:

- filtr stromů podle dřevin
- filtr podle tloušťkových a výškových tříd
- kombinovat zobrazení rastru se zobrazením pozic jednotlivých stromů obarvenými dle dřeviny nebo volby zásahu

Mapové zobrazení umožňuje plynulé přiblížení a posun, takže je možné přecházet mezi celkovým pohledem na plochu a detailním hodnocením jednotlivých částí porostu. Všechny změny nastavení se okamžitě promítají do zobrazené mapy, což umožňuje rychlé porovnávání různých variant a scénářů.

Pěstební význam a interpretace

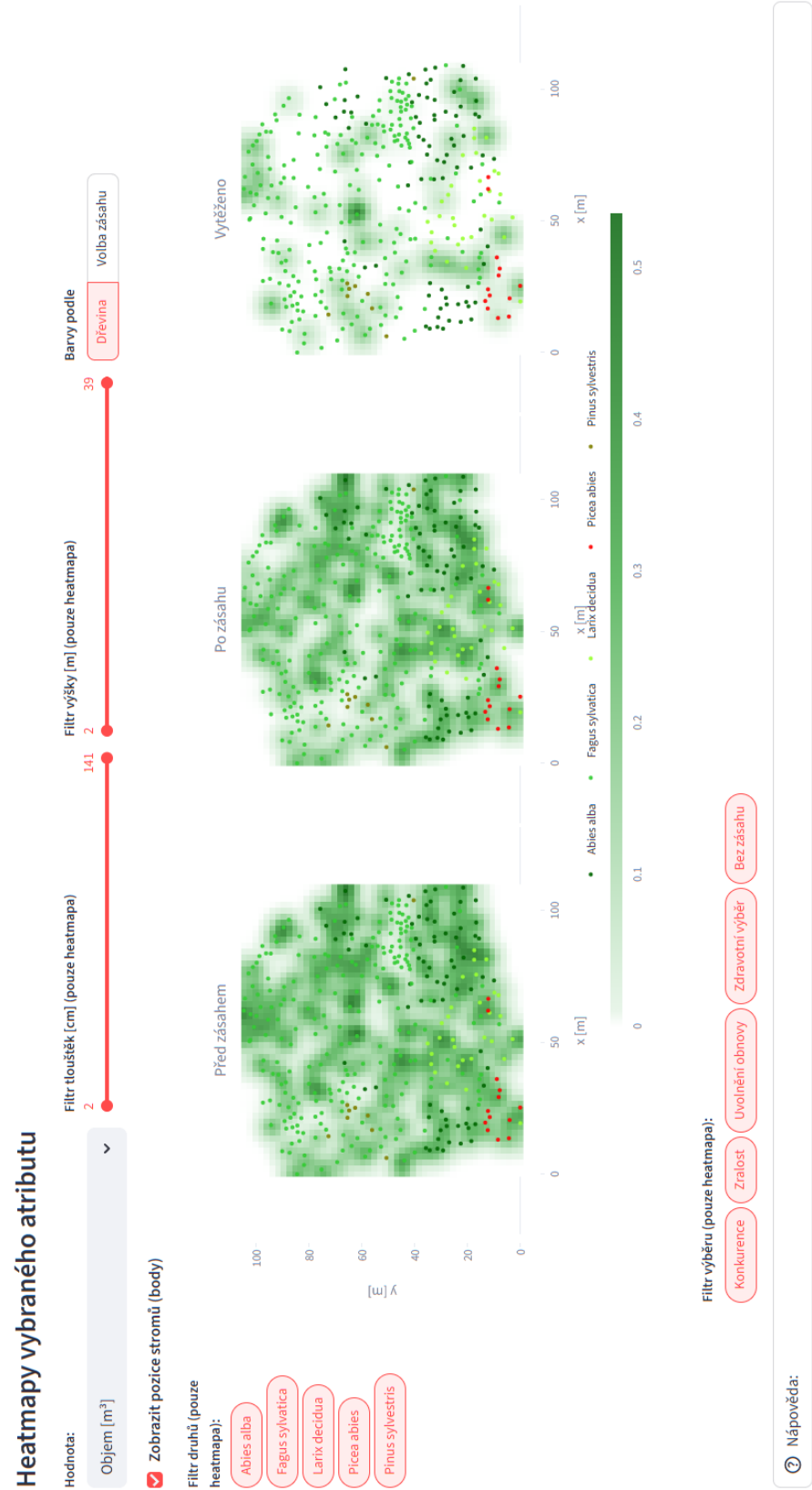
Stránka umožňuje hodnotit pěstební zásah z hlediska horizontální prostorové struktury porostu a její změny v důsledku zásahu. Na rozdíl od souhrnných porostních ukazatelů poskytuje detailní informaci o tom, kde v prostoru porostu k těmto změnám dochází.

Z pěstebního hlediska je možné pomocí heatmap:

- identifikovat místa s intenzivním nebo naopak velmi slabým zásahem
- posoudit prostorovou variabilitu uvolnění porostu v horizontálním směru
- analyzovat vznik a prostorovou distribuci porostních mezer (gapů)
- hodnotit mozaikovitost textury porostu, která je žádoucí u přírodě blízkých modelů hospodaření
- posoudit dostatečnost míry uvolnění stromů s ohledem na tvar a objem korun, jako klíčové predispozice pro optimalizaci přírůstu a adaptaci porostu na klimatickou změnu

Zvláštní význam má zobrazení charakteristik spojených s korunami stromů. Mapy objemu a plochy korun umožňují posoudit zásah z hlediska funkčního uvolnění korunového prostoru, nikoli pouze podle odstraněné hmoty. Uživatel tak může lépe vyhodnotit, zda byl zásah skutečně účinný z pohledu podpory cílových stromů, jejich růstového potenciálu a vytvoření podmínek pro přirozenou obnovu porostu.

Ve vazbě na stránku Mapa plochy poskytují heatmapy nástroj pro přesnou lokalizaci problémových míst v porostu a pro následnou optimalizaci návrhu pěstebního zásahu.



Obrázek 12. Ilustrační výřez stránky Heatmapy

4.2.6. Stránka „Statistiky stromů“

Stránka poskytuje detailní statistický přehled atributů jednotlivých stromů a jejich rozdělení v rámci porostu. Zobrazení je zaměřeno na porovnání ponechaných a odstraněných jedinců a na posouzení rozdílů mezi jednotlivými dřevinami a pěstebními kategoriemi.

Zobrazované charakteristiky zahrnují:

- počet stromů
- výčetní tloušťku
- kruhová výčetní základnu
- objem hroubí s kůrou
- výška stromů
- výška těžiště koruny
- objem a povrch koruny
- plocha vertikální a horizontální projekce koruny
- excentricita koruny
- štíhlostní koeficient
- zápoj stromu

Výsledky jsou prezentovány formou statistických grafů, které umožňují porovnávat rozdělení hodnot:

- ve stavu porostu před zásahem,
- ve stavu porostu po zásahu,
- pro stromy odstraněné v rámci simulovaného zásahu.

Grafické zobrazení je navrženo tak, aby umožňovalo rychlou orientaci v datech, ale současně poskytovalo dostatečný detail pro odbornou interpretaci.

Ovládání a filtrace

Uživatel volí, která charakteristika má být zobrazena, a může dále nastavovat:

- filtraci stromů podle dřevin,
- filtraci podle tloušťkových tříd,
- filtraci podle výškových tříd,
- způsob třídění výsledků podle volby zásahu stromů.

Grafy reagují na všechny změny nastavení v reálném čase. Uživatel tak může plynule přecházet mezi různými pohledy na data, porovnávat jednotlivé skupiny stromů a soustředit se pouze na relevantní část porostu. Počet stromů v jednotlivých kategoriích/třídách je

zobrazován pomocí skládaných sloupcových grafů. Všechny ostatní proměnné jsou pak zobrazovány pomocí houslových grafů pro jednotlivé kategorie které tak ilustrují rozdělení dané proměnné v porostu.

Pěstební význam a interpretace

Stránka Statistiky stromů představuje nástroj pro kontrolu kvality i kvantity pěstebního výběru stromů. Umožňuje objektivně posoudit, jaké typy jedinců byly v rámci zásahu odstraněny a jaké byly ponechány.

Z pěstebního hlediska stránka odpovídá na otázky:

- zda byly odstraňovány především konkurenční, tvarově nebo zdravotně nežádoucí stromy
- zda byly ponechány a dostatečně přiměřeně uvolněny perspektivní a stabilní cílové stromy
- zda zásah směřuje k požadované/optimalizované tloušťkové a výškové struktuře porostu
- omezení analýzy na vybrané tloušťkové nebo výškové třídy

Analýza charakteristik korun má zvláštní význam při hodnocení ekofyziologické účinnosti zásahu. Porovnání objemu a plochy korun ponechaných a odstraněných stromů umožňuje posoudit jaké tvary stromů jsou převážně ponechány v porostu.

Stránka *Statistiky stromů* tak poskytuje podklad pro ex post vyhodnocení pěstebního rozhodnutí a umožňuje identifikovat případné systematické chyby v selekci stromů, které by nebyly patrné pouze ze souhrnných porostních charakteristik.



Obrázek 13. Ilustrační výřez stránky Statistiky stromů

4.2.7. Stránka „Vyplnění prostoru“

Stránka zobrazuje vertikální rozložení objemu korun v porostu a jeho změnu v důsledku simulovaného pěstebního zásahu. Základním výstupem je rozdělení objemu korun do výškových vrstev nad terénem, které umožňuje detailní analýzu vertikální struktury porostu.

Zobrazení je realizováno formou grafů, které vyjadřují:

- celkový objem korun v jednotlivých výškových hladinách
- rozdělení objemu korun podle dřevin
- rozdělení objemu korun podle volby zásahu
- filtraci podle tloušťkových tříd a výškových tříd

Výsledky jsou vždy prezentovány odděleně pro stav porostu před zásahem a po zásahu, což umožňuje přímé porovnání změn vertikální struktury porostu způsobených pěstebním zásahem.

Ovládání a filtrace

Uživatel může na stránce nastavovat zobrazení podle dřeviny a/nebo volby zásahu. Změny nastavení se okamžitě promítají do grafického výstupu.

Pěstební význam a interpretace

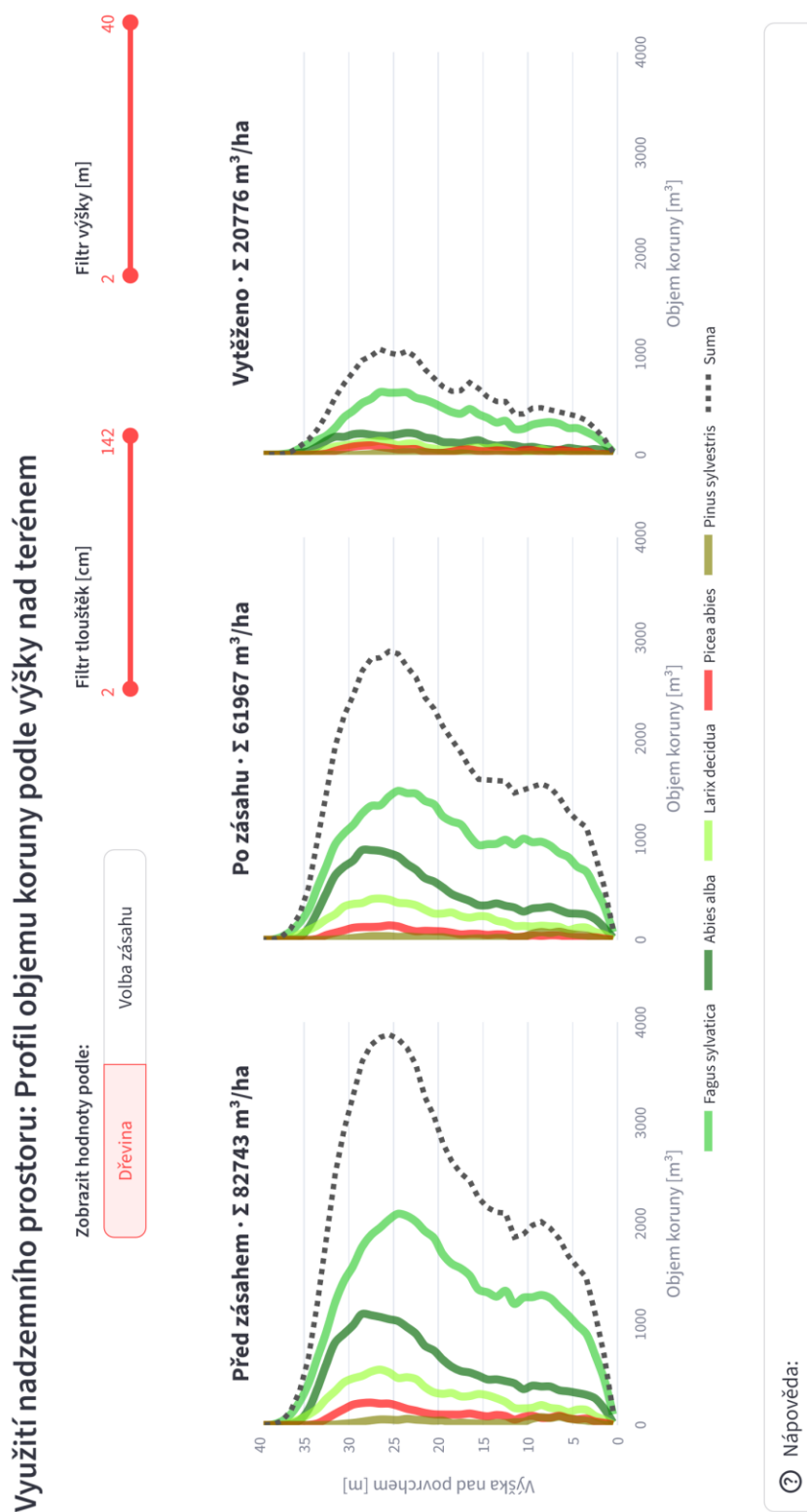
Stránka Vyplnění prostoru poskytuje informaci o vertikální struktuře porostu a o tom, jak pěstební zásah ovlivnil rozložení korunového prostoru v jednotlivých výškových úrovních.

Z pěstebního hlediska umožňuje:

- vyhodnotit práci s korunami stromů různých kategorií, druhů dřevin s různými nároky na světlo
- vyhodnotit změnu zastoupení korun v horním, středním a spodním patře porostu
- identifikovat, zda zásah vedl k žádoucímu prosvětlení porostu, nebo zda naopak došlo k nadměrnému narušení hlavní porostní úrovně

Analýza rozložení objemu korun v jednotlivých výškových vrstvách umožňuje hodnotit zásah z hlediska funkčního využití celého prostoru porostu, nikoli pouze na základě počtu nebo objemu odstraněných stromů, resp. jejich kmenů. To je klíčové zejména u porostů obhospodařovaných některým z modelů přírodě blízkého pěstování lesů, kde je regulace světelných podmínek, podpora stability a maximálního využití celého vertikálního růstového prostoru velmi důležitou součástí pěstebních zásahů.

Ve spojení s ostatními analytickými stránkami modulu umožňuje stránka komplexně posoudit, zda zásah směřuje k požadované vertikální diferenciaci porostu a zda podporuje dlouhodobou vitalitu, přírůst a stabilitu ponechaných jedinců.



Obrázek 14. Ilustrační výřez stránky Vyplnění prostoru

4.2.8. Stránka „Prostorová konkurence“

Stránka zobrazuje míru prostorové konkurence mezi jednotlivými stromy, vyjádřenou prostřednictvím sdíleného korunového prostoru. Základním hodnoceným ukazatelem je objem korunového prostoru, který je současně obsazován více stromy a který tak představuje přímý projev konkurenčního tlaku.

Výstupy jsou prezentovány formou grafů, které znázorňují:

- celkový objem sdíleného korunového prostoru v porostu
- rozdělení sdíleného prostoru mezi jednotlivé dřeviny
- podíl vnitrodruhové a mezidruhové konkurence
- srovnání míry konkurence před a po simulovaném pěstebním zásahu

Zobrazení umožňuje rozlišovat konkurenci působící na ponechané stromy a konkurenci odstraněnou v důsledku zásahu, čímž je možné přímo hodnotit účinnost zásahu z hlediska redukce konkurenčního tlaku.

Ovládání a filtrace

Uživatel může na stránce nastavovat:

- zobrazení stavu porostu před zásahem nebo po zásahu
- filtraci stromů podle dřevin
- filtraci podle volby zásahu
- zaměření analýzy na vnitrodruhovou nebo mezidruhovou konkurenci
- omezení analýzy na vybrané tloušťkové nebo výškové třídy

Změny nastavení se okamžitě promítají do zobrazených grafů, což umožňuje rychlé porovnávání různých variant zásahu a soustředění analýzy na konkrétní kategorii stromů nebo typ konkurenčních vztahů.

Pěstební význam a interpretace

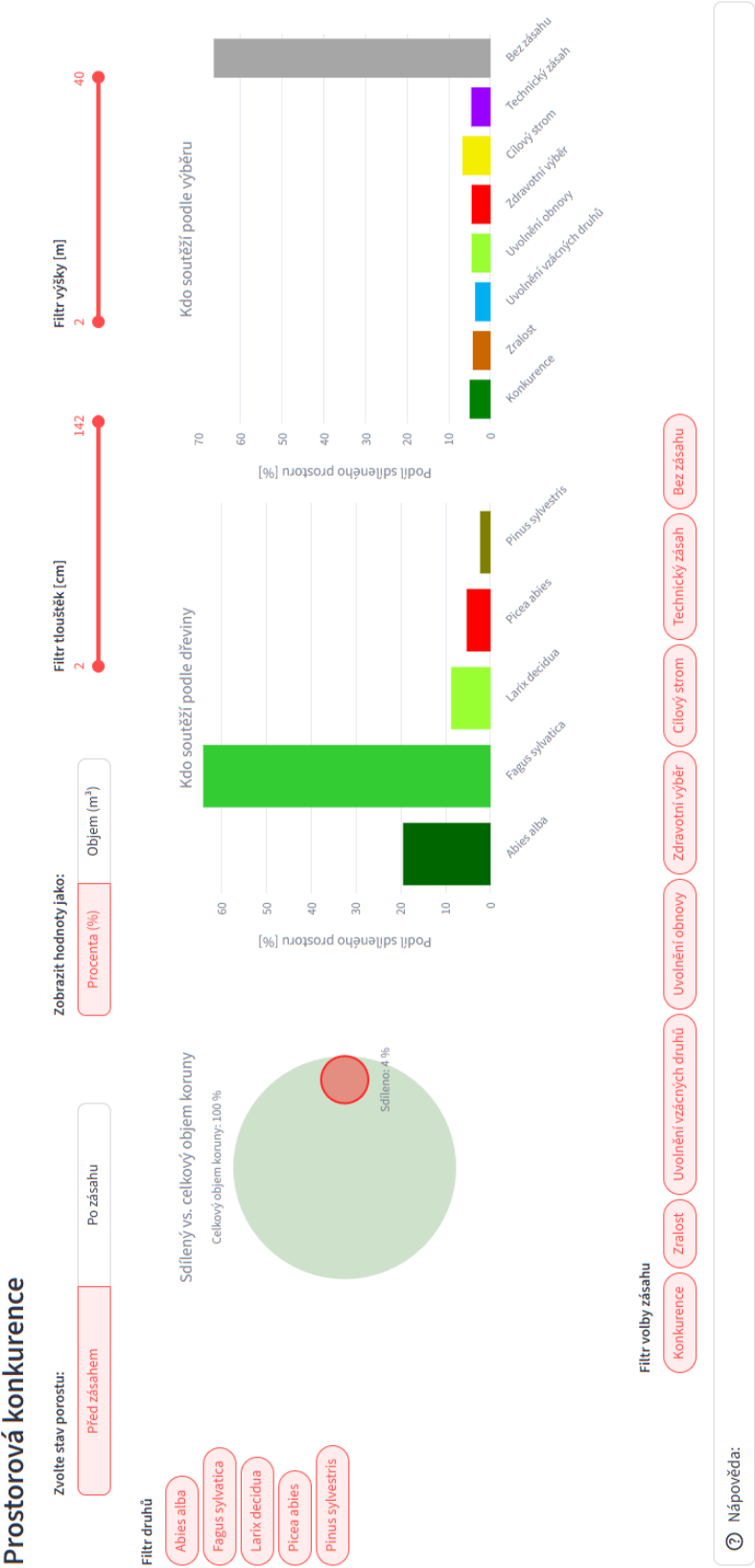
Stránka Prostorová konkurence poskytuje přímou kvantifikaci konkurenčního tlaku v porostu, který je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících růst, vitalitu a stabilitu stromů. Na rozdíl od tradičních ukazatelů založených na vzdálenosti kmenů jednotlivých stromů nebo jejich výčetní tloušťce vychází toto hodnocení z reálného překryvu korunového prostoru.

Z pěstebního hlediska umožňuje stránka:

- posoudit, zda zásah skutečně vedl ke snížení korunové konkurence u cílových stromů, tedy k míře limitování funkce asimilačního aparátu stromů jako zdroje přírůstu dřeva,
- vyhodnotit, zda byla konkurence odstraněna cíleně a správně, nebo zda přetrvává v klíčových výškových patrech porostu,
- rozlišit vliv vnitrodruhové a mezidruhové konkurence na strukturu porostu i s ohledem na rozdílné nároky na světlo u mezidruhové konkurence.

Zvláštní význam má možnost hodnotit změnu sdíleného korunového prostoru u ponechaných stromů. Tím lze objektivně doložit, zda pěstební zásah vedl k reálnému uvolnění růstového prostoru, nebo zda se jednalo pouze o formální snížení počtu stromů bez významného biologického účinku.

Ve spojení se stránkami Vyplnění prostoru a Heatmapy umožňuje stránka Prostorová konkurence komplexně hodnotit zásah z hlediska prostorové struktury porostu a vzájemných vztahů mezi jednotlivými jedinci. Stránka tak poskytuje důležitý podklad pro optimalizaci zásahu směrem k podpoře stability, vitality a dlouhodobé produkční i mimoprodukční funkce porostu.



Obrázek 15. Ilustrační výřez stránky Prostorová konkurence.

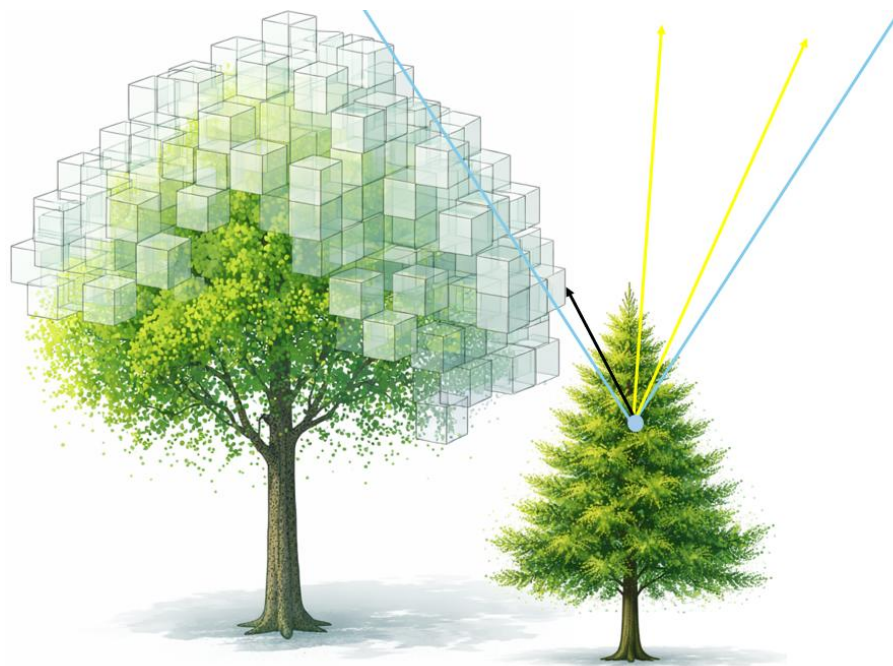
4.2.9. Stránka „Dostupnost světla“

Stránka zobrazuje míru otevřenosti porostu směrem k obloze, vyjádřenou pomocí ukazatele Dostupnost světla. Tento ukazatel popisuje podíl viditelné oblohy z určitého bodu v prostoru porostu a slouží jako aproximace potenciální dostupnosti přímého i difuzního světla. Hodnoty dostupného světla jsou vypočteny pomocí ray-tracingu nad voxelovou strukturou, jako fokální bod pro každý strom je brána xy souřadnice centroidu koruny umístěná na ose z do $2/3$ výšky koruny. To odpovídá klasickému přístupu hodnocení funkční koruny daného stromu. Do fokálního bodu je pak umístěn vrchol obráceného kužele s vrcholovým úhlem 60° . Z vrcholu kužele pak probíhá vysílání a sledování jednotlivých paprsků (5000 paprsků na strom), směry jednotlivých paprsků jsou generovány náhodně s uniformním rozdělením v kuželu.

Výsledky jsou prezentovány formou grafů a souhrnných přehledů, které znázorňují:

- rozdělení hodnot Dostupnosti světla pro jednotlivé kategori
- srovnání hodnot před a po simulovaném pěstebním zásahu
- rozdělení hodnot podle dřevin a pěstebních kategorií
- rozdíly v dostupnosti světla mezi ponechanými a odstraněnými stromy

Hodnoty jsou vždy vztahovány k aktuálnímu stavu porostu a umožňují přímé porovnání světelných podmínek před a po zásahu.



Obrázek 16. Nákres ilustruje výpočet indexu dostupného světla kde modrou barvou je vyznačen kužel v rámci kterého probíhá výpočet, žlutě jsou paprsky které nekolidují s žádným voxellem, černě je paprsek kolidující s voxellem reprezentující korunu sousedního stromu

Ovládání a filtrace

Uživatel může na stránce nastavovat:

- zobrazení stavu porostu před zásahem nebo po zásahu,
- filtraci stromů podle dřevin,
- filtraci podle volby zásahu
- omezení analýzy na vybrané tloušťkové nebo výškové třídy.

Změny nastavení se okamžitě promítají do zobrazených výstupů, což umožňuje rychlé porovnávání různých skupin stromů a cílenou analýzu světelných podmínek v porostu.

Pěstební význam a interpretace

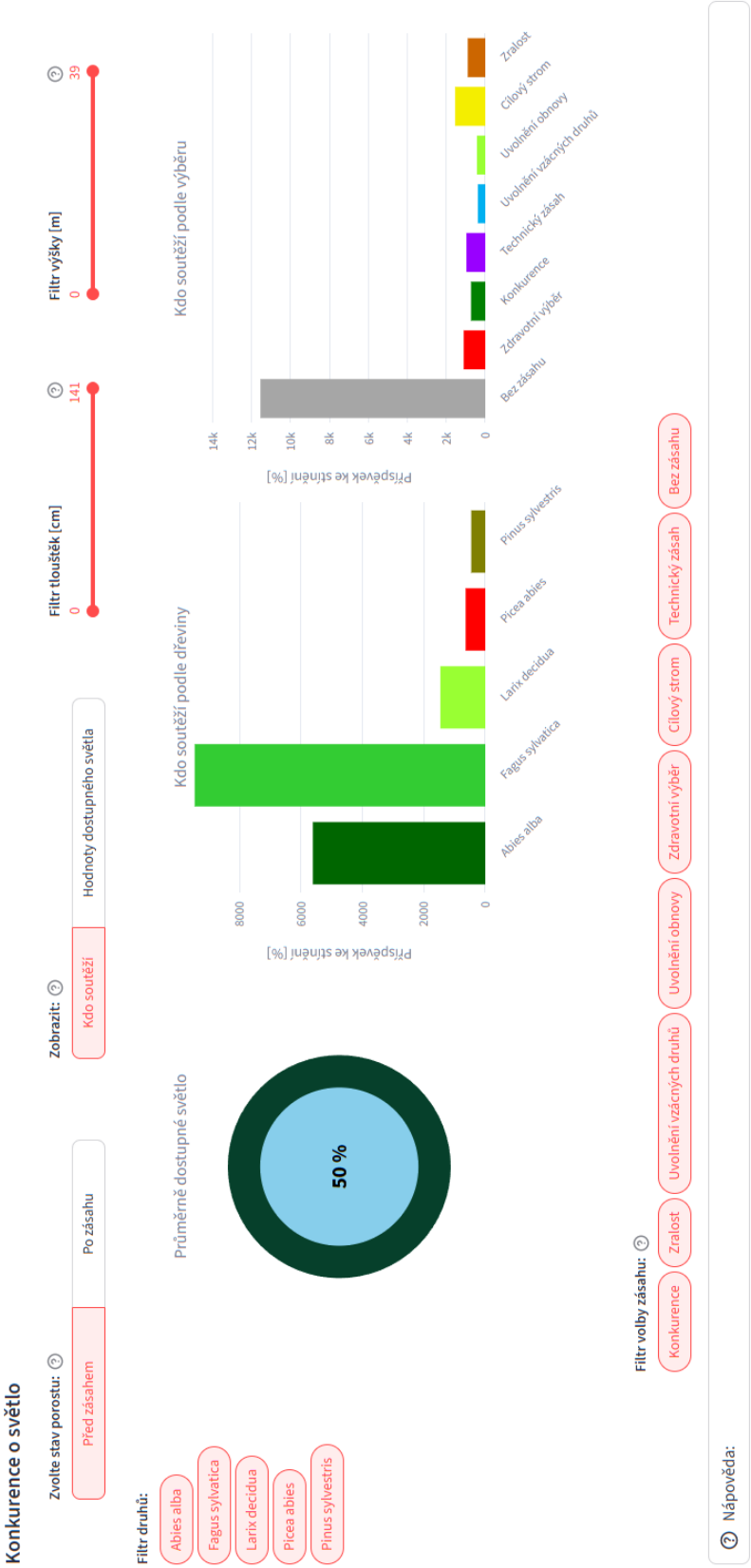
Stránka Dostupnost světla poskytuje klíčovou informaci o světelných podmínkách v porostu a o tom, jak byly tyto podmínky ovlivněny pěstebním zásahem. Dostupnost světla je jedním z hlavních faktorů určujících růstovou dynamiku, vitalitu a stabilitu stromů, zejména u cílových jedinců.

Z pěstebního hlediska umožňuje tato stránka:

- posoudit, zda zásah vedl k dostatečnému prosvětlení korun cílových stromů,
- vyhodnotit rozdíly v dostupnosti světla pro jednotlivé dřeviny a jejich jedince s ohledem na jejich postavení v porostu,
- identifikovat kohorty/kategorie stromů, které i po zásahu zůstávají v podmínkách silného zastínění,
- posoudit vhodnost zásahu z hlediska podpory přirozené obnovy.

Zvláštní význam má možnost hodnotit změnu hodnot Dostupnost světla u ponechaných stromů. Tím lze objektivně doložit, zda zásah vedl ke skutečnému zlepšení světelných podmínek, nebo zda došlo pouze k formálnímu snížení počtu stromů bez odpovídajícího biologického účinku.

Ve spojení se stránkami Vyplnění prostoru a Prostorová konkurence poskytuje Dostupnost světla komplexní pohled na vztah mezi strukturou korunového prostoru, konkurenčním tlakem a světelným režimem porostu. Stránka tak představuje nástroj pro hodnocení pěstebního zásahu z hlediska růstového potenciálu, stability a dlouhodobé vitality porostu.



4.2.10. Stránka „Predikce“

Stránka Predikce slouží k dlouhodobému vyhodnocení simulovaného pěstebního zásahu pomocí růstového modelu iLand. Umožňuje kvantifikovat očekávaný vývoj porostu v čase na základě aktuální struktury porostu po zásahu a zvolených simulačních parametrů. Stránka představuje přechod od statického hodnocení zásahu k jeho dynamickému posouzení z hlediska budoucí produkce a stability porostu.

Simulace je realizována jako vícenásobná (Monte Carlo) simulace růstu, která zohledňuje stochastické procesy včetně mortality a přirozené obnovy. Výsledky jsou agregovány a prezentovány ve formě intervalových charakteristik, které vyjadřují nejistotu a variabilitu budoucího vývoje porostu. Základním hodnoceným výstupem je vývoj objemu živé dřevní hmoty v čase, a to:

- podle jednotlivých dřevin,
- podle pěstební volby zásahu (cílové, ponechané),
- za celý porost jako celek.

Ovládání a nastavení simulace

Horní část stránky obsahuje ovládací prvky umožňující konfiguraci a spuštění simulace růstu. Uživatel může nastavovat zejména:

- délku simulačního období (v letech)
- počet opakování simulace (replikací), který určuje míru statistického vyhlazení výsledků, zároveň ale zvyšuje výpočetní náročnost
- zahrnutí mortality stromů do simulace
- zahrnutí přirozené obnovy porostu

Simulace je spuštěna explicitním uživatelským pokynem a její průběh je vizuálně indikován pomocí stavového ukazatele. Po dokončení výpočtu jsou výsledky automaticky načteny a uloženy do pracovního kontextu aplikace, odkud jsou dále využívány pro grafické vyhodnocení. Veškeré výpočty jsou prováděny externím simulačním modelem iLand, přičemž aplikace 3D-Marteloscop zajišťuje:

- přípravu vstupních dat na základě aktuální struktury porostu,
- opakované spuštění simulace,
- agregaci a statistické zpracování výstupů.

Detailní popis parametrizace modelu se nachází v kapitole 4.3 Parametrizace modelu iLand.

Grafické výstupy

Výsledky simulace jsou prezentovány pomocí vějířových grafů, které zobrazují vývoj objemu dřevní hmoty v čase včetně vyjádření nejistoty. Každý graf obsahuje:

- medián simulovaného vývoje,
- intervaly variability (pro. 25–75 % a 5–95 % kvantil),

barevné rozlišení podle zvolené klasifikace.

Zobrazeny jsou dva základní pohledy:

- vývoj objemu podle dřevin,
- vývoj objemu podle volby zásahu.

Grafy umožňují přímé porovnání vývoje cílových stromů, ostatních ponechaných jedinců a celkového porostu. Díky intervalovému zobrazení je možné posoudit nejen očekávaný trend, ale i míru nejistoty spojenou s budoucím vývojem.

Pěstební význam a interpretace

Stránka Predikce poskytuje podklad pro dlouhodobé pěstební rozhodování. Umožňuje hodnotit pěstební zásah nikoli pouze z hlediska jeho okamžitého dopadu, ale především z pohledu budoucího vývoje porostu. Z pěstebního hlediska umožňuje stránka:

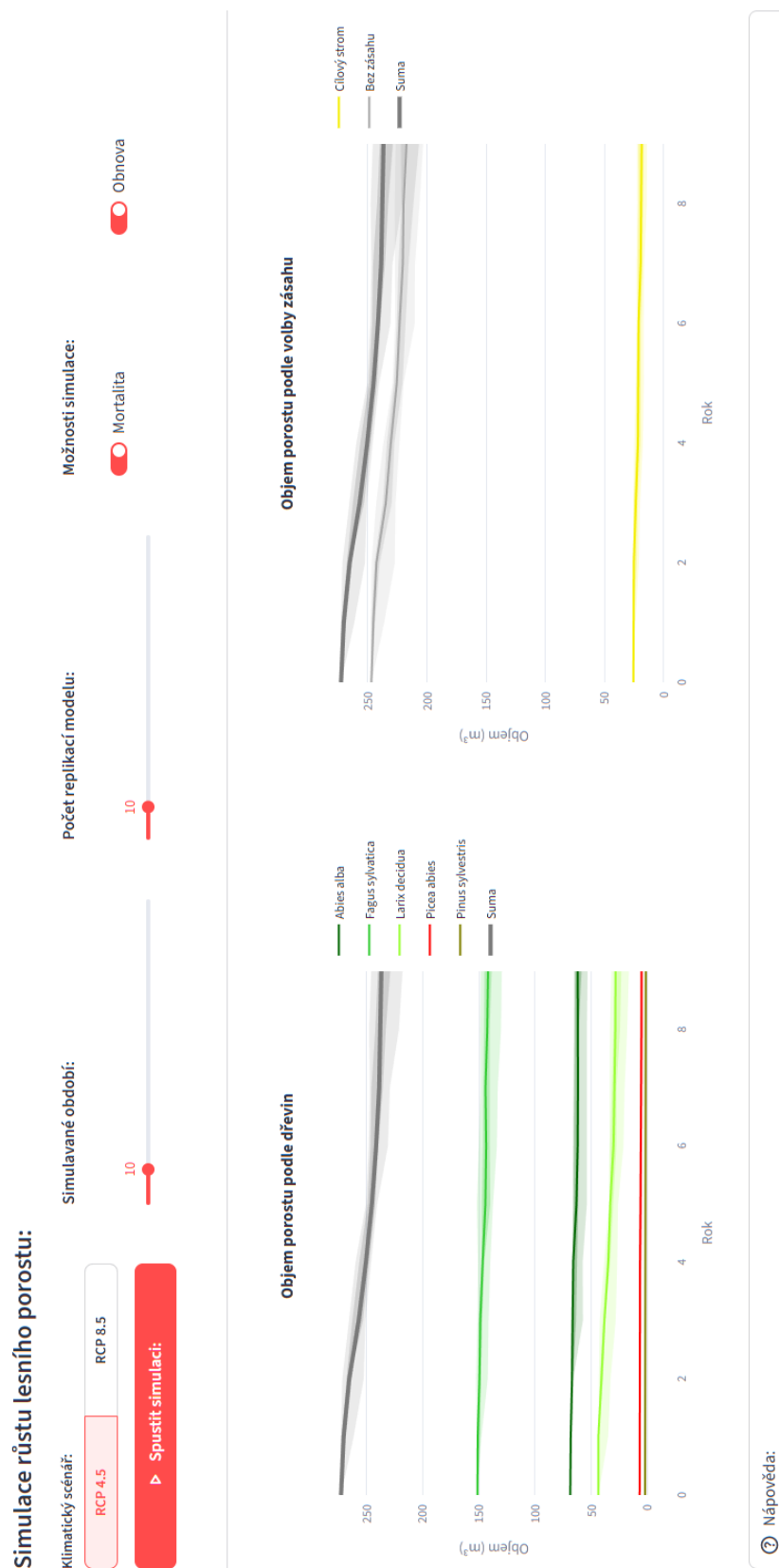
- posoudit, zda zásah podporuje dlouhodobý růst objemu cílových stromů,
- porovnat růstový potenciál jednotlivých dřevin po zásahu,
- vyhodnotit stabilitu porostu a riziko vývoje při započtení mortality,
- analyzovat vliv zásahu na budoucí produkční potenciál porostu.

Zvláštní význam má možnost porovnávat vývoj celkového objemu porostu s vývojem objemu cílových stromů. Tím lze identifikovat zásahy, které sice vedou k dočasnému snížení zásoby, ale dlouhodobě podporují produkci a stabilitu porostu.

Intervalové zobrazení výsledků reflektuje přirozenou nejistotu spojenou s růstem porostu a umožňuje realistickou interpretaci výsledků. Uživatel tak není veden k jedinému deterministickému scénáři, ale získává představu o možném rozpětí budoucího vývoje.

Ve vazbě na ostatní analytické stránky modulu stránka doplňuje strukturální hodnocení o modelovaný vývoj porostu po simulovaném pěstebním zásahu. Zatímco předchozí stránky se zaměřují na okamžitý strukturální a prostorový efekt zásahu, stránka Predikce umožňuje ověřit, zda tyto změny vedou k žádoucímu dlouhodobému vývoji porostu z hlediska produkce, stability a vitality. Z toho lze dovozovat i závěry typu, že určitý pěstební

zásah byl příliš slabý a nevede k růstu zásoby živých stromů, tj. kompetiční mortalita je srovnatelná s přírůstem zůstávajících stromů.



Obrázek 18. Ilustrační výřez stránky *Predikce*.

4.2.11. Stránka „Přidat atributy“

Stránka Přidat atributy slouží k rozšíření databáze stromů o uživatelsky definované atributy, které nejsou součástí standardní datové struktury aplikace 3D Forest. Umožňuje tak propojit výsledky terénních šetření, externích hodnocení nebo expertních klasifikací s prostorovými a analytickými výstupy modulu 3D-Marteloscop.

Stránka má převážně technicko-datový charakter a neslouží přímo k analytickému vyhodnocení zásahu, ale vytváří předpoklady pro jeho rozšířenou interpretaci na navazujících analytických stránkách, zejména na stránce Statistiky stromů.

Uživatelské atributy jsou ukládány do projektové databáze ve formátu SQLite a jsou trvale vázány na jednoznačné identifikátory jednotlivých stromů. Po jejich importu jsou tyto atributy automaticky dostupné napříč celým modulem. Stránka rovněž umožňuje přepočítat index dostupného světla s jiným rozlišením voxelové scény v případě potřeby.

Import uživatelských atributů

Základní funkcí stránky je import uživatelských atributů ze souboru ve formátu CSV. Importovaný soubor musí obsahovat:

- jednoznačný identifikátor stromu
- jeden nebo více sloupců představujících uživatelské atributy
- Při nahrání souboru je automaticky provedena kontrola validity dat, která ověřuje: shodu identifikátorů stromů s aktuálním projektem,
- konzistenci struktury vstupního souboru,
- detekci nových atributů obsažených v souboru.

Pokud importovaný soubor obsahuje atributy, které již v projektu existují, je uživatel na tuto skutečnost explicitně upozorněn a je vyžadováno potvrzení jejich přepsání. Tento mechanismus zabraňuje nechtěné ztrátě již uložených dat a podporuje transparentní práci s více datovými verzemi.

Po úspěšném importu jsou uživatelské atributy okamžitě dostupné v pracovním kontextu aplikace a mohou být využity v dalších analytických částech modulu.

Správa a odstraňování atributů

Stránka dále umožňuje správu již existujících uživatelských atributů. Uživatel může:

- zobrazit seznam všech aktuálně uložených uživatelských atributů
- vybrat jeden nebo více atributů k odstranění

- trvale je odebrat z projektové databáze

Odstranění atributů se projeví okamžitě ve všech navazujících analytických výstupech. Datová konzistence projektu je zajištěna automatickým obnovením interního přehledu uživatelských atributů po každé změně.

Vazba na analytické stránky

Uživatelské atributy importované prostřednictvím této stránky lze plně využít na analytické stránce **Statistiky stromů**, kde je možné je zobrazovat a vyhodnocovat stejným způsobem jako standardní stromové charakteristiky.

Obrázek 19. Ilustrační výřez stránky Přidat atributy

4.3. Parametrizace modelu iLand

Růstová simulace realizovaná v rámci modulu 3D-Marteloscop je založena na procesně orientovaném ekofyziologickém modelu iLand. Model simuluje růst, mortalitu a regeneraci stromů na základě interakcí mezi strukturou porostu, klimatickými podmínkami, půdními vlastnostmi a druhově specifickými fyziologickými parametry. Vstupní parametry simulace jsou připravovány automatizovaným workflow, které propojuje data z aplikace 3D Forest s externím simulačním prostředím iLand.

Základní vstupní parametry simulace

Mezi klíčové vstupní parametry růstového simulátoru iLand patří:

- zeměpisné souřadnice plochy
- iniciální rok simulace
- zvolený klimatický scénář
- soubor popisující aktuální porostní strukturu (pozice stromů, výčetní tloušťky, dřevina, výška stromu)

Zeměpisné souřadnice plochy představují klíčový vstup pro prostorově explicitní odvození klimatických a půdních charakteristik, které ovlivňují růstové procesy v modelu.

Iniciální rok simulace

Iniciální rok simulace je implicitně nastaven na rok 2025. Toto nastavení reflektuje skutečnost, že terénní data o porostní struktuře byla získána v roce 2024. Rok 2025 tak představuje první plný vegetační rok po provedeném pěstebním zásahu a po sběru dat.

Ve výstupních datech modelu je iniciální rok označen hodnotou 0, přičemž následující roky simulace jsou číslovány chronologicky od 0 do x , kde x odpovídá délce simulačního období.

Tento přístup umožňuje:

- přímé porovnání simulovaného vývoje s aktuálním stavem porostu,
- jednoznačnou interpretaci relativních změn v čase,
- flexibilní nastavení délky simulace bez vazby na konkrétní kalendářní rok.

Klimatická data a klimatické scénáře

Na základě zadaných zeměpisných souřadnic jsou pro simulaci extrahována klimatická data odpovídající vybranému scénáři vývoje budoucího klimatu. Použity jsou dva standardní scénáře:

- RCP 4.5 – realistický scénář stabilizace emisí,
- RCP 8.5 – pesimistický scénář pokračujícího nárůstu emisí.

Pro simulaci jsou využívána denní klimatická data pro období 2025–2125, zahrnující:

- minimální a maximální denní teploty,
- průměrnou solární radiaci,
- sytostní doplněk – deficit tlaku vodní páry,
- průměrné srážky.

Jako zdroj klimatických dat byl zvolen globální klimatický model MPI-ESM1-2-LR (Gutjahr et al., 2019), který v rámci databáze CMIP6 (*IS-ENES3 C4I-Search*) splňuje dvě zásadní podmínky:

1. obsahuje všechny klimatické proměnné požadované modelem iLand,
2. vykazuje nejvyšší shodu s teplotně-srážkovým režimem střední Evropy (Craigmile & Guttorp, 2023).

Klimatická data jsou následně převedena do databázového formátu SQLite, který je nativně podporován modelem iLand a umožňuje efektivní práci s dlouhodobými časovými řadami.

Koncentrace CO₂ je nastavena na konstantní hodnotu 340 ppm, která odpovídá referenčním podmínkám střední Evropy.

Půdní data

Půdní charakteristiky jsou odvozeny rovněž na základě zeměpisných souřadnic plochy. Použita jsou data z databáze JRC (Ballabio et al., 2016), konkrétně:

- podíl jílové frakce,
- podíl prachové frakce,
- podíl písčité frakce,
- podíl štěrku.

Tyto údaje slouží k parametrizaci půdní textury, která ovlivňuje:

- dostupnost vody,
- retenční schopnost půdy,
- rychlost mineralizace,
- růstové limity jednotlivých dřevin.

Kalibrační soubor a fyziologické parametry dřevin

Na základě výše uvedených vstupů je vytvořen kalibrační soubor simulace, který obsahuje:

- odkazy na databázi klimatických dat,
- zdrojový soubor s pozicemi a parametry jednotlivých stromů,
- implementovaná data půdní textury.

Fyziologické vlastnosti jednotlivých dřevin nejsou v rámci workflow explicitně upravovány, ale jsou převzaty z interní databáze modelu iLand. Tyto parametry vycházejí z rozsáhlé literární rešerše a experimentálních studií (Thom et al., 2024) a zahrnují:

- fotosyntetickou kapacitu,
- vodní bilanci,
- reakci na stresové faktory,
- růstové strategie jednotlivých dřevin.

Světelné podmínky na úrovni porostu jsou modelovány pomocí tzv. Light Influence Patterns (LIP), které popisují prostorové rozložení světla v závislosti na tvaru a rozměrech korun jednotlivých dřevin (viz *The iLand Book*).

Nastavení okrajových podmínek a zjednodušení modelu

S ohledem na zaměření simulace na jednohektarovou plochu nejsou v současném workflow využívány submoduly modelu iLand zaměřené na:

- disturbance (kůrovec, vítr, požáry),

- aktivní managementové zásahy.

Simulace je koncipována jako růstová predikce porostu po provedeném zásahu, nikoli jako scénář opakovaného hospodářského ovlivňování. Pro omezení okrajových efektů při výpočtu dostupnosti solárního záření je plocha v modelu replikována, přičemž se předpokládá existence identického porostu v bezprostředním okolí zájmové plochy. Replikované plochy jsou v rámci modelu využívány i jako zdroj semen při generování zmlazení. Z toho vyplývá omezení kdy se na ploše mohou zmlazovat pouze dřeviny které tam již jsou přítomné.

Všechna výše uvedená nastavení jsou v případě potřeby plně modifikovatelná a mohou být do workflow simulace doplněna nebo rozšířena.

Monte Carlo simulace a interpretace výsledků

Simulace je standardně prováděna pomocí 30 opakování modelu (počet lze upravit). Spojením výsledků jednotlivých běhů je získán robustní odhad vývoje porostu, který umožňuje:

- kvantifikovat nejistotu budoucího vývoje,
- odhadnout pravděpodobnost mortality jednotlivých stromů,
- vyhodnotit variabilitu přírůstu na úrovni porostu.

Pokud například konkrétní strom odumře v 80 ze 100 běhů modelu, lze u něj očekávat vysokou pravděpodobnost mortality v daném simulačním období. Tento přístup umožňuje přejít od deterministického hodnocení k pravděpodobnostní interpretaci růstových procesů.

Simulace je implicitně prováděna pro třicetileté období, přičemž délku simulace lze flexibilně upravit podle potřeb analýzy. Výsledky jsou následně využity pro tvorbu intervalových grafických výstupů, které jsou prezentovány na stránce Predikce modulu 3D-Marteloscop.

4.4. Struktura dat pěstebních ploch

Datový model systému 3D Forest a navazujícího analytického modulu 3D-Marteloscop je navržen jako vícevrstvá datová architektura s jasně definovanými odpovědnostmi jednotlivých vrstev. Základním návrhovým principem je striktní oddělení konfiguračních metadat, primárních stromových dat a odvozených analytických a uživatelských atributů.

Každá pěstební plocha je reprezentována datovými artefakty:

- projektový soubor (JSON) – statická konfigurační vrstva,
- relační databáze (SQLite) – dynamická datová vrstva.
- Vlastní 3D data (LAS) a doprovodné soubory

Tato kombinace umožňuje efektivní práci s rozsáhlými datovými objemy při zachování přenositelnosti, verzovatelnosti a zpětné kompatibility projektů.

Projektový soubor (JSON)

Projektový soubor ve formátu JSON plní roli centrálního konfiguračního manifestu projektu, který zahrnuje:

- jednoznačný identifikátor projektu,
- metadata lokality (název, popis, časové značky),
- odkazy na zdrojová TLS data (LAS soubory),
- globální nastavení filtrů a výchozích parametrů.
- inicializaci projektu v aplikaci 3D Forest,
- identifikaci datového kontextu v modulu 3D-Marteloscop,

Z hlediska návrhu je JSON považován za neměnný nebo málo měněný artefakt. O změny v tomto souboru se stará primárně software při uložení projektu. Externí úpravy jsou možné ale nedoporučované.

Databáze SQLite

Databáze SQLite představuje hlavní úložiště stromově orientovaných dat a je optimalizována pro rychlé čtení, filtrování a agregaci. Databáze je generována automatizovaným workflow na základě výstupů TLS zpracování a následně rozšiřována v průběhu práce uživatele.

Základní entitou databáze je strom který slouží jako primární klíč napříč většinou tabulek a datových vrstev systému.

Databázové schéma lze logicky rozdělit do následujících skupin:

Tabulka „tree“

Obsahuje minimální množinu atributů nezbytných pro validaci dat importovaných uživatelem, obsahuje sloupce:

- id (INT, primární klíč),
- label (TEXT) – jméno las souboru
- species (TEXT) - latinský název dřeviny

Tato tabulka představuje referenční bod, který může být v případě potřeby modifikován pro permanentní ukládání dalších dat vázaných na potencionální změny v 3D-Marteloscop pluginu bez nutnosti provádět extenzivní zásahy do samotného jádra programu.

Tabulka „stocking_reference“

Obsahuje tabulkovou zásobu na hektar pro jednotlivé dřeviny, obsahuje sloupce:

- species (TEXT) – latinský název dřeviny
- ref_volume (REAL) – objem v m³/ha

Tabulka „tree_usr_attr“

Tabulka slouží pro ukládání uživatelem importovaných atributů jednotlivých stromů, obsahuje sloupce:

- tree_id (INT, cizí klíč, odkazuje na *tree.id*)
- attribute (TEXT, vlastní klíč) – jméno atributu
- value (REAL) – hodnota atributu pro daný strom

Unikátnost záznamu je na úrovni kombinace *tree_id* – *attribute*.

Tabulka „managements“

Spolu s tabulkou *management_values* slouží pro ukládání modelových a uživatelských zásahů v projektu. Tabulka managements drží jméno uloženého zásahu a jeho interní id, sloupce:

- mgmt_id (INT, primární klíč)
- label (TEXT) – jméno zásahu zadané uživatelem

Tabulka „management_values“

Drží informace o Výběru stromu v daném zásahu, obsahuje sloupce:

- tree_id (INT, cizí klíč, odkazuje na *tree.id*)
- mgmt_id (INT, cizí klíč, odkazuje na *managements.mgmt_id*)
- value (TEXT) – status stromu v daném zásahu

Unikátnost záznamu je na úrovni kombinace *tree_id* – *mgmt_id*.

Datová integrace v analytickém modulu

Modul 3D-Marteloscop pracuje jak s projektovým JSON souborem tak i databází SQLite. Projektový JSON je využíván při inicializaci a není dále dotazován v průběhu práce s 3D-Marteloscop modulem. Oproti tomu SQLite databáze reflektuje změny provedené uživatelem v průběhu práce s modulem.

Veškeré analytické operace (filtrace, agregace, statistiky, vizualizace) jsou realizovány nad datovým modelem stromů. Tento přístup umožňuje:

- jednotnou filtraci napříč stránkami aplikace,
- okamžitou propagaci změn uživatelských atributů,
- synchronizaci mapového a statistického pohledu.

Uživatelské atributy jsou v analytickém modulu považovány za plnohodnotné atributy které jsou explicitně podporovány pro vizualizaci pomocí houslových grafů na stránce Statistiky stromů což umožňuje detailní analýzu jejich rozdělení a variability.

Datový tok směrem k růstové simulaci iLand

Export dat do růstového simulátoru iLand je realizován jako řízení datového podmnožinového výřezu z databáze SQLite. Do simulace vstupují pouze stromy které se v porostu nachází po provedení simulovaného zásahu, tedy byly označeny jako cílový strom případně ponechány bez zásahu. Simulátoru jsou předávány následující atributy nezbytné pro růstový model:

- id stromu
- souřadnice (x,y)
- výčetní tloušťka
- výška
- dřevina

Technické shrnutí

Navržená datová architektura:

- implementuje jasné oddělení odpovědností jednotlivých datových vrstev,
- minimalizuje redundanci dat,
- umožňuje vysokou výpočetní efektivitu analytických operací,
- podporuje bezpečné rozšiřování datového modelu.

Z hlediska návrhu softwaru představuje tento přístup robustní základ pro další integraci externích modelů, rozšíření analytických algoritmů a dlouhodobé provozní využití systému v rámci datově řízeného lesnického managementu.

5. UPLATNĚNÍ VÝSLEDKŮ VÝZKUMU V PRAXI, ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Výstupy projektu představují technologické rozšíření stávajících metod hodnocení v oblasti lesnického vzdělávání a operativního plánování. Realizovaný 3D pěstební trenažér umožňuje transformaci dosavadních tréninkových ploch typu Marteloscope z omezeného 2D zobrazení do plně realistického 3D prostředí.

5.1. Možnosti uplatnění výstupů projektu v praxi

Vyvinutá metodika je doplněna o prototypové softwarové nástroje (jádro 3D Forest a plugin 3D-Marteloskop), které sloužily k její implementaci, testování a demonstraci. Metodika jako taková je určena pro široké spektrum uživatelů napříč lesnickým sektorem.

Lesy České republiky, s. p.: Metodika je určena pro podporu rozhodování odborného personálu při volbě intenzity a struktury výchovných zásahů v porostech adaptovaných na klimatickou změnu.

Vzdělávací instituce: Lesnické fakulty, střední lesnické školy a školní lesní podniky (např. ŠLP Křtiny) mohou výstupy projektu využít jako interaktivní pomůcku pro výuku pěstování lesa, která studentům poskytuje okamžitou zpětnou vazbu o dopadech jejich volby na strukturu porostu.

Odborná veřejnost aj.: Organizace jako Pro Silva Bohemica mohou systém využít k propagaci a nácviku přírodě blízkých forem hospodaření, které kladou důraz na individuální stabilitu a prostorové uspořádání stromů.

5.2. Diskuse nad výsledky a význam technologie LiDAR

Realizovaný projekt prokázal, že přechod od tradičního 2D hodnocení porostu k plnohodnotné 3D reprezentaci rozšiřuje možnosti interpretace pěstebních zásahů. Zatímco klasické marteloskopické plochy pracují se zobrazením stromů jako bodů doplněných o základní atributy (DBH, výška, objem), 3D přístup umožňuje hodnotit skutečné prostorové uspořádání korun, jejich překryv, vertikální diferenciaci a reálné využití růstového prostoru.

Přínos 1: Objektivizace korunového prostoru

Koruna je základním funkčním orgánem stromu a nositelem produkčního potenciálu. V běžné praxi je však její hodnocení převážně vizuální a subjektivní. Implementace technologie laserového skenování a následná voxelová analýza umožňují:

- kvantifikovat objem a plochu koruny
- určit výšku nasazení a těžiště koruny
- vyhodnotit vertikální rozložení korunového prostoru v porostu
- identifikovat skutečný překryv korun sousedních stromů

Tím dochází k významnému posunu od odhadu k měřitelnému vyhodnocení. Pěstební zásah již není hodnocen pouze podle snížení zásoby nebo kruhové základny, ale podle skutečného uvolnění asimilačního aparátu cílových stromů.

Přínos 2: Kvantifikace konkurence mezi stromy

Tradiční hodnocení konkurence vychází zejména z tloušťky stromu a vzdálenosti kmenů. 3D přístup umožňuje analyzovat konkurenci přímo na úrovni překryvu korunového prostoru.

Výpočet sdíleného objemu korun:

- umožňuje rozlišit vnitrodruhovou a mezidruhovou konkurenci
- kvantifikuje reálný tlak působící na cílové stromy
- umožňuje objektivně doložit účinnost zásahu z hlediska snížení konkurenčního zatížení

Z praktického hlediska to znamená, že lze jednoznačně doložit, zda zásah skutečně uvolnil cílové stromy, nebo zda došlo pouze k odstranění jedinců s malým biologickým významem.

Přínos 3: Hodnocení světelných podmínek

Dostupnost světla představuje jeden z klíčových faktorů růstu, stability a vitality stromů. Implementace ray-tracingového výpočtu dostupnosti světla umožňuje:

- porovnat světelné podmínky před a po zásahu
- identifikovat jedince zůstávající i po zásahu v silném zastínění
- hodnotit zásah z pohledu podpory přirozené obnovy

Tento přístup je významný zejména u porostů obhospodařovaných přírodě blízkými postupy, kde je regulace světelných poměrů důležitým nástrojem řízení struktury.

Přínos 4: Vertikální struktura porostu

3D analýza umožňuje hodnotit porost nejen horizontálně, ale i vertikálně. Rozložení objemu korun ve výškových vrstvách poskytuje informace o:

- míře zapojení horní, střední a spodní etáže
- změnách textury porostu po zásahu
- vzniku a distribuci porostních mezer

Tento pohled je v tradičních 2D systémech prakticky nedosažitelný a přináší nový nástroj pro plánování strukturálně diferencovaného hospodaření.

Přínos 5: Okamžitá zpětná vazba při výuce a školení

Praktickým přínosem projektu je možnost okamžitého vyhodnocení zásahu. Uživatel může:

- navrhnout zásah ve 3D prostředí
- ihned zobrazit jeho strukturální důsledky
- analyzovat změny konkurence, světelných podmínek a korunového prostoru
- případně zásah iterativně upravit

Lesník získává možnost vidět důsledky svého rozhodnutí ještě před realizací zásahu v terénu.

Přínos 6: Propojení statického hodnocení s dynamickou simulací

Integrace růstového modelu iLand rozšiřuje 3D hodnocení o dlouhodobý pohled. Zásah lze posuzovat nejen podle okamžité změny struktury, ale i podle očekávaného vývoje porostu v horizontu několika desetiletí.

To umožňuje:

- porovnávat varianty zásahu z hlediska budoucí produkce
- hodnotit stabilitu porostu při započtení mortality
- podporovat rozhodování orientované na dlouhodobý vývoj

Strategický význam pro LČR

Z pohledu Lesů České republiky představuje 3D přístup možnost využití moderních prostorových dat v rámci stávajících postupů. Technologie LiDAR umožňuje:

- objektivizovat rozhodovací procesy
- sjednotit metodiku hodnocení zásahů

- podpořit odborné školení prostřednictvím názorné analýzy variant zásahu
- systematicky dokumentovat a porovnávat varianty pěstebních postupů

V kontextu klimatické změny, zvýšené nejistoty vývoje porostů a tlaku na stabilitu a adaptabilitu lesních ekosystémů představuje možnost prostorově explicitního hodnocení zásahů významný nástroj podpory rozhodování.

Shrnutí diskuse

Projekt prokázal, že využití technologie TLS a následná 3D analýza zásahů nepředstavují pouze vizuální modernizaci tradičních marteloskopů, ale metodický posun v hodnocení pěstebních opatření. Přidaná hodnota spočívá zejména v:

- kvantifikaci korunového prostoru,
- objektivizaci konkurence,
- hodnocení světelných podmínek,
- analýze vertikální struktury porostu,
- propojení okamžitého hodnocení s dlouhodobou simulací vývoje.

3D přístup tak rozšiřuje tradiční porostní ukazatele o prostorové a funkční dimenze, které jsou pro současné lesnictví klíčové.

5.3. Závěry a doporučení pro další postup

5.3.1. Rozšíření a údržba sítě ploch:

Aby měl vyvíjený výukový a tréninkový systém širší a dlouhodobě uplatnitelný charakter, je nezbytné systematicky rozšiřovat síť referenčních ploch o porosty s rozdílnou druhovou skladbou, prostorovou a věkovou strukturou a stanovištními podmínkami. Zastoupeny by měly být nejenom tradiční, strukturně jednodušší porosty jako jsou bukové nebo smrkové monokultury, dubové porosty nížinných oblastí, horské smíšené porosty, ale také strukturně a texturně diferencované porosty v převodu na některý z nepasečných modelů hospodaření. Trénink je třeba provádět na porostech v různých fázích přestavby. Každý z porostních typů vyžaduje odlišný přístup k pěstebním opatřením – z hlediska výuky i každodenní praxe není pěstebně srovnatelná například úrovněvá probírka jednovrstevného smrkového porostu a cílený výběr perspektivních jedinců ve dvouvrstvé nebo víceetážové bučině.

Rozšíření sítě ploch významně přispěje k větší pestrosti tréninkových scénářů a umožní studentům i odborným uživatelům z praxe pracovat s širokým spektrem reálných pěstebních

situací. Současně je však nutné počítat s tím, že laserová data představují časově podmíněný záznam struktury porostu. Pro zachování vypovídací hodnoty 3D modelů a pro možnost sledování dlouhodobého vývoje porostů je proto žádoucí pravidelná aktualizace laserového skenování vybraných ploch, zejména po provedení významných pěstebních zásahů nebo v delších časových intervalech.

Systematická obnova a aktualizace dat umožní nejen zachovat aktuálnost výukového materiálu, ale také rozšířit využití systému směrem k hodnocení dynamiky porostní struktury, porovnávání různých zásahových variant v čase a postupnému propojování simulovaných zásahů s modely růstu a vývoje lesa.

5.3.2. Kontinuální rozvoj softwaru:

Z hlediska uživatelské dostupnosti je v budoucnu vhodné převést desktopový 3D Forest na webovou aplikaci – navázat na architekturu používanou ve webovém pluginu 3D-Marteloscop, který je již připraven na provoz v cloudu. Webová platforma umožní jednodušší nasazení v lesnických organizacích, sdílení dat a automatické aktualizace algoritmů, aniž by uživatelé museli instalovat lokální software. Zároveň by tak byl umožněn velice jednoduchý přístup širší odborné veřejnosti. Další prioritou je integrace s mobilní aplikací ForDiL: tento projekt (Forest Digital Learning) vyvíjí digitální nástroj pro samostatné vzdělávání v kontinuálním lesním hospodaření. ForDiL umožní lesníkům a studentům trénovat pěstební zásahy na reálných marteloskopických plochách, které mají pořád nezastupitelné místo a jeho mobilní rozhraní je navrženo pro samostatný trénink. Integrace s 3D Forest/3D-Marteloscop by umožnila import terénních zásahů z ForDiL do 3D modelu a naopak sdílet virtuální scénáře do mobilní aplikace, čímž by se posílila vazba mezi terénní praxí a digitálním výukovým prostředím.

6. PUBLICITA PROJEKTU

Z hlediska publikačních aktivit je na jaro/léto 2026 plánována publikace výsledků projektu jako článek s pracovním názvem „*Digital Marteloscopes: From LiDAR to 3D Forest Digital Twins and their applications in Silvicultural Training*“ očekává se zaslání např. do časopisu *Forest Ecology and Management, Forests*, atp.

Projekt bude dále prezentován na mezinárodní konferenci ForestSat 2026 (Gainesville, Florida) kde byl zaslaný abstrakt (viz. níže) přijat k orální prezentaci.

Abstrakt:

From 2D to 3D: Transforming Marteloscope Training through Digital Forest

Authors: Martin Krůček, Václav Bubník, Kamil Král

Objectives

Training in silviculture and forest management has long relied on 2D Marteloscope plots, where students and professionals practice silvicultural interventions. Such systems, while effective for basic exercises, cannot capture key aspects of forest structure such as crown geometry, vertical stratification, and spatial competition. This project aims to introduce a fully three-dimensional (3D) digital-twin methodology into forest education. The objective is to extend the traditional Marteloscope training plots into the 3D domain, allowing users to interact with realistic forest models derived from terrestrial laser scanning (TLS) and to visualize the spatial consequences of different management decisions.

Methods

High-resolution TLS data were collected on three existing Marteloscope training plots, and one plot was newly established. The scanning campaigns, conducted under leaf-off conditions with a Leica RTC360, produced dense point clouds subsequently co-registered, georeferenced, and segmented into terrain and individual trees. Quantitative Structural Models (QSMs) were generated to reconstruct individual stems and crowns, from which morphological and volumetric parameters were extracted. The functionality of the existing open-source software *3D Forest* was extended, allowing users to carry out silvicultural interventions in a virtual environment. The system supports voxel-based analysis of the canopy layer and available light and allows real-time visualization of simulated management actions. The existing model of forest landscape dynamics (*iLand*) was integrated in order to allow users to assess the influence of performed silvicultural interventions on simulated forest

growth. There is also an option to import training interventions performed in the field using a mobile app, making it a bridge between forest modeling and interactive teaching.

Results

The first project phase resulted in four Marteloscope plots fully transformed into 3D models of training stands. Individual trees are now represented by geometrically accurate QSMs, enabling detailed measurement of their morphological attributes and spatial relationships. In the second phase of the project, the functionality of the existing software was extended to allow users to create simulated silvicultural interventions and visualize their results. Simulated thinnings demonstrate how 3D representations reveal patterns that are invisible in 2D and sometimes even challenging to assess in the field: overlapping crowns, canopy gaps, and space-use dynamics and distribution. The output of this project effectively combines modern 3D data and its analytical possibilities with traditional in-field education, integrating them into digital training platforms. This allows forestry students and practitioners to “walk through” and analyze management scenarios in an immersive, data-driven environment, as well as to observe field management in more detail and assess its influence on future forest development.

Significance

By transforming flat, map-based Marteloscope exercises into realistic 3D virtual forests, this project redefines how silvicultural principles are taught and evaluated. It enables learners to perceive forest structure volumetrically, linking quantitative parameters—such as canopy volume, crown plasticity, and spatial competition—to management decisions. The resulting methodology not only enhances the scientific precision of silvicultural training but also promotes active, experiential learning aligned with modern digital forestry concepts.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Ballabio, C., Panagos, P., & Monatanarella, L. (2016). *Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database*. *Geoderma*, 261, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.006>

Craigmile, P. F. & Guttorp, P. (2023). *Comparing CMIP6 climate model simulations of annual global mean temperatures to a new combined data product*. *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002468. <https://doi.org/10.1029/2022EA002468>

Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H. & Stössel, A. (2019). *Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP)*. *Geoscientific Model Development*, 12, 3241–3281. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>

Lowe, T. D., & Stepanas, K. (2021). *RayCloudTools: A Concise Interface for Analysis and Manipulation of Ray Clouds*. *IEEE Access*, 9, 79712–79724. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3084954>

Raunonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., & Lewis, P. (2013). *Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data*. *Remote Sensing*, 5(2), 491–520. <https://doi.org/10.3390/rs5020491>

Seidl, R. & Rammer, W. (eds.) (2024). *The iLand Book: A guide to the iLand individual-based forest landscape and disturbance model*. iLand Project. Dostupné online: <https://iland-model.org/iland-book/>

Thom, D., Rammer, W., Albrich, K., Braziunas, K. H., Dobor, L., Dollinger, C., Hansen, W. D., Harvey, B. J., Hlásny, T., Hoecker, T. J., Honkaniemi, J., Keeton, W. S., Kobayashi, Y., Kruszká, S. S., Mori, A., Morris, J. E., Peters-Collae, S., Ratajczak, Z., Simensen, T., ... Seidl, R. (2024). *Parameters of 150 temperate and boreal tree species and provenances for an individual-based forest landscape and disturbance model*. *Data in Brief*, 55, 110662. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110662>