

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA**

**Index listovej plochy a priestorová distribúcia asimilačného
aparátu v poraste buku lesného (*Fagus sylvatica* L.)**

Diplomová práca

2015/2016

Bc. Pavel Haninec

Zadávací list

Prehlásenie

Prehlasujem, že diplomovú prácu na tému *Index listovej plochy a priestorová distribúcia asimilačného aparátu v poraste buku lesného* som vypracoval samostatne a všetky použité pramene a informácie sú uvedené v zozname použitej literatúry. Súhlasím s tým, aby moja práca bola zverejnená v súlade s § 47b Zákona číslo 111/1998 Sb. o vysokých školách v znení neskorších predpisov v súlade s platnou *Smernicou o zverejňovaní vysokoškolských záverečných prác*.

Som si vedomý, že sa na moju prácu vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon a že Mendelova univerzita v Brne má právo na uzavretie licenčnej zmluvy a užitia tejto práce ako školského diela podľa § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Ďalej sa zaväzujem, že pred spísaním licenčnej zmluvy o využití diela inou osobou (subjektom) si vyžiadam písomné stanovisko univerzity o tom, že predmetná licenčná zmluva nie je v rozpore s oprávnenými záujmami univerzity a zaväzujem sa zaplatiť prípadný príspevok na úhradu všetkých nákladov spojených so vznikom diela, a to až do ich skutočnej výšky.

V Brne dňa 8. apríla 2016

.....

Podpis

Venujem túto prácu celej svojej rodine. Najmä:
mojej mame, bez ktorej by som nebol to, čo som,
môjmu otcovi, ktorý mi bude naveky životným vzorom,
môjmu bratovi, ktorý mi bude naveky najbližším človekom.

Fortes fortuna adiuvat

- *Vergílius*

Pod'akovanie

Ďakujem svojmu vedúcemu diplomovej práce doc. Josefovi „Pepovi“ Urbanovi za cenné rady, pripomienky a ústretovosť pri konzultáciách a hlavne za odborný sprievod počas mojich štúdií. Ďalej moje pod'akovanie patrí môjmu konzultantovi Ing. Zdeňkovi Patočkovi a Ing. Kateřině Novosadovej, bez ktorých by som to nikdy nezvládol. V neposlednom rade patrí moja vďaka všetkým mojim kamarátom, ktorý ma celé moje štúdium sprevádzali – ich menný zoznam by bol siahodlhý, dúfam, že sa v týchto riadkoch nájdu. Moja najväčšia vďaka patrí mojej rodine, za podporu a hlavne za bezhraničnú trpezlivosť.

Abstrakt

Jeden z najdôležitejších parametrov určujúcich prienik fotosynteticky aktívnej radiácie (FAR) korunami porastov lesných drevín je index listovej plochy (LAI). V tejto diplomovej práci sme sa zaoberali porovnávaním rozličných, priamych či nepriamych metód stanovenia LAI a vertikálnej distribúcií lístia v korunovej vrstve lesného porastu. Boli použité tri optické metódy, pomocou prístroja LiCor LAI 2200 Plant Canopy Analyser, LaiPen a hemisférických fotografií. Ďalej sme použili prístup určenia LAI pomocou leteckého laserového skenovania. Bol vytvorený alometrický vzťah medzi listovými plochami a obvody vzorkových stromov. Tieto stromy boli zároveň deštrukčne spracované a na ich základe boli vytvorené grafy vertikálneho rozvrstvenia lístia v korunách týchto stromov. Jednotlivé hodnoty nameraného indexu listovej plochy boli v amplitúde od 3,69 m².m⁻² po 11,80 m².m⁻² a v priemere podhodnocovali deštrukčný spôsob o 28,46 %.

Kľúčové slová

Index listovej plochy, vertikálna distribúcia, letecké laserové skenovanie, LiDAR, radiácia hemisférické fotografie

Skratky

| | | |
|-------|---|---|
| LAI | - | leaf area index - index listovej plochy (m ² .m ⁻²) |
| LMA | - | leaf dry mass per area – vysušené lístie na plochu (g.m ⁻²) |
| SLA | - | specific leaf area – špecifická listová plocha (m ² .g ⁻¹) |
| SLT | - | súbor lesných typov |
| LiDAR | - | light detection and ranging |
| LPI | - | LiDAR penetration index |
| LLS | - | letecké laserové skenovanie |
| ALS | - | airborne laser scanning |
| UAV | - | unmanned aerial vehicle (bezpilotné lietadlo) |
| FOV | - | field of view (zorné pole) |
| IOP | - | inner orientation parameter |
| FAR | - | fotosynteticky aktívna radiácia |

Abstract

One of the most important parameters determining penetration of the photosynthetically active radiation (FAR) through the forest canopy is the leaf area index (LAI). In this thesis we concerned with a comparison of direct and indirect approaches of determining LAI and the vertical distribution of LAI in the canopy. There have been used three optical methods, using the device LiCor LAI 2200 Plant Canopy Analyzer, LaiPen and hemispherical photography. Also, we used the method of estimation LAI using airborne laser scanning. There was created allometric relationship between leaf area and the perimeter of the sample trees. These trees were also destructively processed and based on those, there were created the diagrams of the vertical distribution of leaves in the crowns of these trees. The individual values of the measured leaf area index, were in amplitude from $3.69 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ to $11.80 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ and the indirect methods underestimated the direct approach in average of 28.46%.

Key words

Leaf area index, vertical distribution, LiDAR, radiation, hemispheric photography

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod | 10 |
| 2. Cieľ práce | 11 |
| 3. Súčasný stav riešenej problematiky | 12 |
| 3.1. Index listovej plochy (LAI) | 12 |
| 3.2. Využitie LAI a vertikálna distribúcia lístia | 13 |
| 3.3. Metódy merania a stanovenie LAI | 14 |
| 3.3.1. Priame metódy | 14 |
| 3.3.1.1. Techniky determinácie listovej plochy | 15 |
| 3.3.2. Nepriame metódy | 15 |
| 3.3.2.1. Licor LAI 2000 Plant Canopy Analyser | 16 |
| 3.3.2.2. LaiPen LP 100 | 17 |
| 3.3.2.3. Hemisférické fotografie | 18 |
| 3.3.2.4. LiDAR | 19 |
| 3.3.2.5. UAV | 23 |
| 4. Popis výskumných plôch | 27 |
| 4.1. Všeobecný popis plôch | 27 |
| 4.2. Charakteristika výskumných plôch | 27 |
| 5. Metodika | 30 |
| 5.1. Deštrukčná metóda a alometrické vzťahy | 30 |
| 5.2. Prístroj LAI 2200 Plant Canopy Analyser | 31 |
| 5.3. Diaľkový prieskum Zeme | 32 |
| 5.3.1. Letecké laserové skenovanie | 32 |
| 5.3.2. Snímkovanie pomocou UAV | 33 |
| 5.3.3. Spracovanie dát LLS | 34 |
| 5.4. Hemisférické fotografie | 36 |
| 5.5. LaiPen | 36 |
| 6. Výsledky | 38 |
| 6.1. Deštrukčná metóda | 38 |
| 6.2. Porovnanie metód | 40 |
| 6.3. Diaľkový prieskum Zeme | 43 |
| 6.3.1. Lineárny regresný model vzťahu LPI a LAI (Licor 2200 PCA) | 43 |
| 6.3.2. Lineárny regresný model vzťahu LiDAR metrík a LAI (Licor 2200 PCA) | 45 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.3.3. | Lineárny regresný model vzťahu LPI a LAI (SLA) | 46 |
| 6.3.4. | Lineárny regresný model vzťahu LiDAR metrík a LAI (SLA)..... | 47 |
| 6.4. | Vertikálna distribúcia lístia | 49 |
| 7. | Diskusia | 53 |
| 7.1. | Maximálny LAI a porovnanie metód..... | 53 |
| 7.2. | LiDAR..... | 55 |
| 7.3. | UAV | 56 |
| 7.4. | Vertikálna distribúcia lístia | 57 |
| 8. | Záver | 59 |
| 9. | Summary | 61 |
| 10. | Bibliografia | 63 |
| 11. | Zoznam použitých obrázkov a tabuliek..... | 72 |
| 12. | Prílohy | 74 |

1. Úvod

Index listovej plochy (LAI) bol prvý krát definovaný Watsonom v roku 1947 ako celková jednostranná plocha listového pletiva na jednotku povrchu terénu. Podľa tejto definície je LAI bezrozmerná veličina, ktorá charakterizuje korunovú vrstvu lesných porastov s jednotkou $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Množstvo lístia obsiahnutého v korunových vrstvách porastov je jedným zo základných štrukturálnych charakteristík indikujúcich integrovaný účinok mnohých vzájomne pôsobiacich procesov medzi fotosynteticky aktívnou vegetáciou a atmosférou. Listová plocha ovplyvňuje ako nadporastovú, tak aj podporastovú mikroklímu, určuje a kontroluje intercepciu zrážok porastovej klenby, extinkciu žiarenia, fotosyntetickú aktivitu, výmenu vody a uhlíka. Na základe týchto atribútov jeden z hlavných komponentov biogeochemických cyklov v ekosystémoch.

Listová plocha a produkcia lesných porastov sú úzko späté, preto aj akákoľvek zmena indexu listovej plochy (disturbanciou, defoliáciou, prísuškom, mrazom) má za následok ovplyvnenie tvorby biomasy rastlín. Z tohto dôvodu sa index listovej plochy stal jedným z najdôležitejších vstupov a výstupov mnohých ekofyziologických modelov, ako napríklad model čistej primárnej produkcie alebo alokácie biomasy.

LAI lesných porastov je závislý na druhovom zložení, vývojovom štádiu, a sezónnosti. Okrem toho je index listovej plochy podmienený aj prevládajúcimi stanovištnými podmienkami, hospodárskym spôsobom a tvarom. Súčet týchto faktorov v kombinácii s rozdielom v použití hodnotiacej metódy preto môže viesť k veľmi rozdielnym hodnotám LAI ako sa uvádza v relevantnej odbornej literatúre.

Existujú dve hlavné stratégie pre určovanie LAI: priame a nepriame metódy. Priame prístupy k určeniu LAI sú staršie, zložitejšie, avšak o to viac presnejšie. Nepriame metódy sa delia na kontaktné a bezkontaktné. Vo všeobecnosti tieto prístupy odvodzujú LAI nepriamo, z iných jednoduchších stanoviteľných parametrov.

2. Cieľ práce

Pri použití indexu listovej plochy v ekofyziológii, ako jedného z najpodstatnejších parametrov pre modelovanie biomasy či stability lesných porastov je prvoradé jeho čo najpresnejšie stanovenie.

Náš výskum prebiehal v lete roku 2015 na území Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny patriacemu Mendelovej Univerzite v Brne. V prvom rade bolo našou úlohou vyhľadať homogénne a rovnanoveké porasty buku lesného (*Fagus sylvatica* L.). Tieto sme vyhľadali v katastri obci Habrůvka a na nich sme si vytýčili pokusné plochy pre následné stanovenie LAI. Ďalším záväzkom nášho výskumu bolo porovnanie šiestich metód, priamych či nepriamych a tieto prístupy spracovať. Jedna z metód stanovenia LAI bola aplikovaná použitím leteckého laserového skenovania, systému LiDAR. Táto metóda je z našich použitých najnovšia a zároveň najrýchlejšie sa vyvíjajúca. Pomocou tohto prístupu a deštrukčnej metódy bolo naším cieľom okrem stavenia indexu listovej plochy aj pokúsiť sa o kvantifikáciu vertikálnej distribúcie lístia stromov. Prístup pomocou systému LiDAR bolo nutné kalibrovať z referenčnej deštrukčnej metódy vzorkových stromov.

3. Súčasný stav riešenej problematiky

3.1. Index listovej plochy (LAI)

Index listovej plochy je bezrozmerná premenná, ktorá bola prvýkrát definovaná ako celková, jednostranná plocha fotosyntetického pletiva na jednotku pozemnej plochy (Watson, 1947).

Všeobecne je možné LAI popísať ako listovú plochu vyskytujúcu sa nad určitou jednotkou povrchu pôdy. Presná definícia závisí od druhu listovej plochy a od autora k autorovi nie je celkom jednotná. Jednotkou LAI je $m^2 \cdot m^{-2}$. LAI je teda bezrozmerná veličina.

U listnatých stromov s plochými listami, je táto definícia použiteľná, pretože obe strany z listov majú rovnakú plochu. Avšak, ak lístie nie je ploché, ale zvrátené, ohnuté alebo valcované, jednostranná plocha nie je jasne definovateľná. Rovnaký problém existuje pre ihličnaté stromy, pričom ihlice môžu byť cylindrické či polocylindrické (Chen a Black, 1991). Niektorí autori preto navrhli nedeštruktívne metódy merania LAI, aby bolo možné vziať do úvahy nepravidelný tvar ihličia a lístia (Bolstad a Gower 1990; Smith, 1991). Predsa len je v tomto prípade rozhodujúci výber projekčného uhla, pričom vertikálna projekcia nemusí nutne viesť k najvyššej hodnote listovej plochy. V dôsledku toho je LAI definované ako maximálna premietnutá listová plocha na jednotku zemského povrchu (Myneni et al., 1997). V rámci výpočtu celkovej plochy rastlinných prvkov zachytávajúcich radiáciu a na základe výpočtov priemerných priemetných koeficientov niekoľkých konvexných a konkávných objektov s rôznym uhlovým rozložením sa navrhlo, že polovica celkovej plochy zachytávajúcej svetlo na jednotku zemského povrchu by mala byť vhodnejšia definícia LAI pre porasty neplochých listov, než PLA. Stále sú navrhované nové výklady a definície LAI (Jonckheere et al., 2004).

Hodnotenie indexu listovej plochy je dôležité pri mnohých výskumoch interakcie medzi atmosférou a vegetáciou a tento index je určujúcim parametrom v modeloch obehu dusíka a vody (Leblanc, 2001). Okrem indexu listovej plochy sa v lesníctve často využíva vegetačný index VAI (vegetation area index), niekedy označovaný aj ako index rastlinnej plochy PAI (plant area index), ktorý okrem listovej plochy zahŕňa premietnutú plochu všetkých vegetačných súčastí - stonky, drevo (Pavlanda a Pajtík, 2009).

3.2. Využitie LAI a vertikálna distribúcia lístia

Index listovej plochy (LAI, jednostranná listová plocha na jednotku plochy) predstavuje veľkosť výmenného povrchu medzi korunovou vrstvou a atmosférou (Jarvis a Leverenz, 1983). Fluktuácia vody, uhlíkový tok a svetelná intercepcia závisia od veľkosti LAI spolu ovplyvňujú čistú fotosyntézu a produktivitu rastlín (Waring, 1983). Vzťahy medzi LAI a produktivitou boli riadne skúmané naprieč rôznymi lesnými typmi (Jarvis a Leverenz 1983; Leverenz a Hinckley 1990; Bolstad a kol. 2001). Silný vzťah medzi týmito dvoma premennými bol použitý pre odhad produktivity v merítkach jednotlivých stromov (Seymour a Kenefic 2002), porastov (Vose a Allen, 1988) a celej krajiny (Ruimy et al., 1994). Okrem toho je tento vzťah základnou zložkou mnohých rastových a fyziologických modelov (Landsberg 2003; Medlyn et al. 2003). Opierajú sa o zovšeobecnený model vývoja LAI, ktorý naznačuje, že po rôznych disturbanciách, ktoré odstránia časť korunovej vrstvy alebo v mladých porastoch od založenia až do zapojenia koruny sa LAI zvyšuje exponenciálne. (Waring a Running 1998). Tieto idealizované modely vývoja LAI sú bežné v monokultúrach alebo jednovrstevných porastoch, ale nemôžu byť aplikované na zmiešané alebo viacvrstevné porasty, kde najmä dreviny znášajúce tieň ovplyvňujú množstvo a distribúciu olistenia v rôznych vrstvách koruny (Oker - Blom et al., 1989).

Celková produkcia lístia a vertikálna distribúcia LAI sa u porastov menia v závislosti na ich druhovej skladbe, horizontálnej štruktúre a veku (Brown a Parker, 1994; Vose et al., 1995). Svetlomilné druhy neodmysliteľne minimalizujú samotienenie vytvorením niekoľkovrstevných korún s nasadením listov v ostrých uhloch (Horn 1971; Valladares a Niinemets 2007). Svetlo, ktoré nezachytí nadúroveň zložená zo svetlomilných druhov, môže tak prejsť do podúrovne a byť využité vrstvou znášajúcou tieň (Lieffers a Stadt 1994). Pre porovnanie, keď tieň znášajúce dreviny dominujú v úrovňovej etáži, vývoj lístia v podúrovni je limitovaný, pretože úrovňová vrstva zachytí väčšinu dostupného svetla tým že rozvinie hustejšie koruny (Canham et al., 1994). Pokiaľ v úrovňovej etáži prevažujú svetlomilné dreviny, výsledkom najčastejšie býva homogénna a vyrovnaná distribúcia LAI pozdĺž vertikálneho smeru. Na druhú stranu, ak v horných vrstvách prevládajú tieň znášajúce dreviny, veľká väčšina LAI je alokovaná do týchto vrstiev. Tieto kontrastujúce vzorce majú výrazné dopady na dynamiku lesných porastov, sukcesie a všeobecnej produkcie.

3.3. Metódy merania a stanovenie LAI

LAI je možné stanoviť pomocou niekoľkých experimentálnych metód, ktoré podľa prevedenia môžu byť rozdelené do štyroch skupín (Pokorný, 2002):

- priame metódy
- nepriame metódy
- polopriame metódy
- subjektívne – odhadové metódy

Jonckheere et al. (2004) alebo Bequet (2011) uvádzajú len priame a nepriame metódy, pričom nepriame metódy rozdeľujú na kontaktné a bezkontaktné a priame na deštruktívne a nedeštruktívne. Metódy sa líšia najmä v uskutočniteľnosti a časovej náročnosti. Podrobnejší prehľad metód, ktoré sme využili v našej práci, je uvedený v nižších kapitolách.

3.3.1. Priame metódy

Priame metódy sú veľmi presné, ale majú tú nevýhodu, že sú veľmi časovo náročné a pre použitie vo veľkom meradle iba okrajovo uskutočniteľné. Pre ich časovo náročný a prácny charakter a odhliadnuc od ich operačných obmedzení, možno povedať, že stanovenie listovej plochy priamymi metódami nie je zlučiteľné s dlhodobým sledovaním priestorovej a časovej dynamiky vývoja listovej plochy (Chason et al., 1991). Ako uvádza Pokorný (2002), merania pomocou priamych metód môžu zahrňovať plochu, tvar, uhol, rozmery alebo pozíciu jednotlivých orgánov, ale kvantitatívny popis týchto rysov nadzemnej biomasy je veľmi zložitý, lebo nadzemná biomasa je priestorovo aj časovo premenná. Avšak zostáva potreba pre validáciu nepriamych metód, takže priame techniky možno považovať za dôležité, najmä ako kalibračné metódy (Jonckheere et al., 2004).

Index listovej plochy sa môže určiť priamo pomocou deštrukcie, metódou modelových stromov alebo metódou nevyžadujúcou deštruktívny zber. Keď sa listová plocha stanovuje na základe opakovaných priamych meraní na jednotlivých stromoch, sú tieto metódy považované za najpresnejšie (Chen et al. 1997) a z tohto dôvodu sú často implementované ako kalibračné nástroje pre nepriame techniky merania. Bequet (2011) píše o deštruktívnom zbere a následnom meraní všetkých listov ako o metóde, ktorá sa často využíva pri plodinách na

poľnohospodárskych plochách, ale pre využitie v lese je to príliš zdĺhavé, no stále najpresnejšie. Preto lesnícki výskumníci implementovali nové metódy.

3.3.1.1. Techniky determinácie listovej plochy

Po zbere lístia alebo vyprázdnenia opadomerov môže byť listová plocha určená buď planimetricky alebo pomocou gravimetrických techník (Daughtry, 1990). Planimetrický prístup je založený na princípe korelácie medzi individuálnou listovou plochou počtom plošných jednotiek, ktoré sú týmto listom pokryté vo vodorovnej rovine. Pre vykonanie takéhoto merania môže byť list pripevnený na vodorovnú plochu, potom sa môže planimetrom zmerať jeho obvod a tým môžeme následne vypočítať plochu z určeného obvodu. Gravimetrická metóda je najpoužívanejší spôsob určenia listovej plochy pri priamych metódach. Dobre ju opisuje napr. Pokorný (2002), Bréda (2003) alebo Jonckheere et al. (2004). Je to metóda, ktorá udáva vzťah medzi plochou zmiešaného vzorku lístia v pomere k jeho hmotnosti. Pomer čerstvej projekčnej plochy listov k ich suchej hmotnosti sa označuje ako SLA. Jeho prevrátená hodnota sa nazýva LMA, čo sa určuje z čerstvej vzorky odobratej na pokusnej ploche. Hneď ako sa odoberie čerstvá vzorka a na zmeranie jej plochy použijeme jednu z vyššie spomenutých planimetrických metód, tak ju vysušíme v peci pod dobu 48 hodín pri teplote medzi 60 - 80 °C a zvážíme, aby sme mohli vypočítať LMA. V momente, keď je táto veličina známa a poznáme vzťah medzi zelenou listovou plochou a jej hmotnosťou po vysušení, stačí už len ostatné lístie z pokusnej plochy vysušiť a zvážiť.

3.3.2. Nepriame metódy

Sú to metódy, pri ktorých sa dá listová plocha odvodiť a určiť z pozorovania ďalších premenných. Tieto nepriame prístupy sú vo všeobecnosti rýchlejšie, automatizovateľné a vďaka tomu nimi môžeme merať a získavať vzorky na omnoho väčších plochách. Pre tieto výhody a komfort nadobúdajú stále viac na dôležitosť. Jonckheere et al. (2004) zároveň uvádza, že nepriame metódy môžeme rozdeliť na:

- nepriame kontaktné metódy
- nepriame bezkontaktné metódy

Ide o pozemné metódy, ktoré sa využívajú na meranie listovej plochy pod jedným porastom. Na druhej strane existujú metódy, ktorými sa meria zo vzduchu alebo z vesmíru a využívajú sa na veľkých lesných plôch alebo celej krajiny.

Nepriame bezkontaktné metódy

Nepriame bezkontaktné metódy sú založené buď na meraní intenzity radiácie alebo na meraniach medzernatosti. Pri meraniach intenzity radiácie (transmitancie) je žiarenie pri svojom prechode cez korunovú vrstvu oslabované exponenciálne na základe Lambert-Beerovho extinkčného zákona modifikovaného podľa Monsi a Saeki (1953):

$$I = I_0 \cdot \exp - k \text{ LAI} \quad \text{nebo} \quad I = I_0 \cdot \exp (-G\mu d), \quad (1)$$

kde I je intenzita žiarenia v určitej výške korunovej vrstvy alebo pod korunovou vrstvou porastu, I_0 je intenzita žiarenia dopadajúca na porast, \exp je základ prirodzeného logaritmu, k je extinkčný koeficient, LAI (kumulatívna) je celková listová plocha nad úrovňou, pre ktorú sa I stanoví, vzťahnutá na jednotkovú plochu pôdneho povrchu (Larcher, 1988); d je dĺžka dráhy lúča prechádzajúceho korunovou vrstvou, μ je priemerná hustota lístia pozdĺž tejto dráhy a G je priemerná projekcia jednotky lístia.

Metóda medzernatosti, alebo frakcie dier (gap fraction) spočíva v podstate na vyhodnotení pomeru zakrytej alebo nezakrytej časti „podkladu“ listím. Podkladom je obloha alebo pôda. S pravdepodobnosťou záchytu radiácie prechádzajúcej porastom je proporcionálne späť metóda frakcie dier s predchádzajúcou metódou transmisie priameho slnečného žiarenia, podľa (Pokorný, 2002). Autor ďalej uvádza, že v dnešnej dobe sú najpoužívanejšími prístrojmi využívajúce frakciu dier LAI-2000 Plant Canopy Analyser (LiCor, Lincoln, Nebraska, USA) alebo TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies, 3rd Wave Engineering, Kanada).

3.3.2.1. Licor LAI 2000 Plant Canopy Analyser

LAI 2200 (LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) je prenosný prístroj, ktorý nevyžaduje ďalšie spracovanie dát, ale je schopný poskytnúť okamžité určenie LAI, simultánnym meraním difúznej radiácie pomocou svetelného snímača typu fisheye (rybie oko) v piatich

rôznych uhlových pásoch s centrálnym zenitovými uhlami 7° , 23° , 38° , 53° a 68° . Úroveň osvetlenia je meraná a porovnávaná na voľných plochách bez stromov a pod porastom. Okrem toho má prístroj vbudovaný optický filter, ktorý filtruje žiarenie s vlnovými dĺžkami nad 490 nm tak, aby sa minimalizovalo žiarenie rozptýlené v poraste. Tým je dosiahnutý maximálny kontrast (rozdiel) medzi porastovou klenbou a nebom. Pomer týchto dvoch hodnôt udáva priepustnosť súčasne u každého sektoru oblohy. LAI sa potom určuje inverziou Poissonovho rozdelenia porovnávajúceho priepustnosť porastu (Jonckheere et. al., 2004).

Manuál firmy Licor (Licor Inc., 2003) udáva, že výpočty, ktoré sú automaticky odvodené podľa interného softvéru, sú založené na štyroch predpokladoch :

1. zeleň je opticky čierne teleso, ktoré pohlcuje všetko svetlo, ktoré prijíma
2. svetlo blokujúce rastlinné prvky je náhodne rozptýlené pod porastom
3. rastlinné prvky majú rovnaké projekcie, ako jednoduché geometrické konvexné tvary
4. rastlinné prvky sú malé v porovnaní s naskenovanou plochou každého ringu

LAI 2200 je robí všetky výpočty v teréne a ukladá merania a výsledky do pamäte. Firma Licor uvádza pre každé meranie dva druhy čítania. Jeden typ čítania (A) je vykonaný nad porastom (above - canopy reading) a druhý typ (B), pod porastom (below - canopy reading). Obe tieto čítania používajú senzor, vytvorený firmou Licor, LAI – 2050. Meranie začína čítaním A; keď sa načíta aj meranie B, LAI 2000 PCA počíta LAI k najbližšiemu A - čítaniu. Uvádza sa, že ak sú svetelné podmienky konštantné, stačí vykonať len jedno čítanie A. V opačnom prípade je potrebné po niekoľkých B – meraniach, spraviť ďalšie meranie A.

3.3.2.2. LaiPen LP 100

LaiPen LP 100 vypočítava LAI a iné atribúty korunovej štruktúry z merania solárneho žiarenia získaného optickým širokouhlým senzorom. Merania vykonávané nad a pod porastom sa používajú pre stanovenie intercepcie žiarenia korunovej vrstvy v piatich uhloch, z ktorých sa LAI vypočíta za použitia modelu prenosu žiarenia vo vegetatívnych vrstvách.

LaiPen bol navrhnutý vedcami a inžiniermi s cieľom poskytovať užívateľovi rýchle a spoľahlivé výsledky pre užívateľa. Na rozdiel od iných podobných zariadení pre meranie LAI

je LaiPen LP 100 presný takmer počas celého trvania bieleho dňa a pre spoľahlivú nevyžaduje prítomnosť oblačnosti alebo konkrétne uhly slnečných lúčov pre jeho riadne plnenie.

LaiPen LP 100 môže pracovať v dvoch prevádzkových režimoch:

- Múd Single sensor - referenčné meranie sa vykonáva pred, po alebo počas merania s rovnakým prístrojom
- Múd Two sensor - druhý nástroj sa používa pre automatické logovanie referenčného signálu

3.3.2.3. Hemisférické fotografie

Hemisférický objektív bol pôvodne zostrojený Hillom (1924) na získanie obrazu celistvej oblohy pre štúdium formovania oblačnosti. V ekologicky orientovanom výskume lesných drevín a lesov, v niektorých prípadoch tiež v agronomickom výskume, je hemisférická fotografia používaná na stanovenie svetelného žiarenia v ekosystémoch, resp. na štúdium svetelných podmienok pod korunovým zápojom (Canham et al., 1990).

Hemisférické snímkovanie je technika na štúdium korunovej vrstvy pomocou fotografií získaných vďaka pol guľovému (fisheye) objektívu spod porastu (orientované smerom k zenitu) alebo umiestneného nad korunami pri pohľade nadol. Hemisférické fotografovanie poskytuje trvalý záznam, a preto je cenným zdrojom informácií a údajov o polohe, veľkosti, hustoty a distribúcie medzier listového pokrytia. Je schopné zachytiť druhové, priestorové a vekové rozdiely v spojitosti s architektúrou porastu, založenej na útlme svetla a kontraste medzi funkciami v rámci fotografie (obloha proti korunovej vrstve).

Hemisférické fotografie všeobecne poskytujú extrémny uhol pohľadu, všeobecne so 180° zorným poľom. Hemisférické fotografie v zásade poskytujú projekciu poglobule na rovnú plochu (Rich, 1990). Presná povaha projekcie sa líši v závislosti od použitého objektívu. Najjednoduchšia a najčastejšia geometria hemisférickej šošovky je známa ako polárna alebo equiuhlová (Herbert, 1986; Frazer et al., 1997). V dokonalej equiuhlovej projekcii 180° zorného poľa ukazuje výsledný kruhový obraz kompletný prehľad o všetkých smeroch oblohy, so zenitom v strede obrazu a horizontmi na okrajoch. V súčasnej dobe je hemisférická snímka porastového zápoja potenciálne cenovo dostupná a časovo menej náročná technológia, ktorá priamo meria otvorenosť porastového zápoja a nepriamo odvodzuje hodnoty svetelnej úrovne (Bequet, 2011). Uzavretosť porastového zápoja je kľúčovou veličinou lesného prostredia, pozitívne koreluje jednak s fungovaním a procesmi na

úrovni samotného lesného korunového zápoja a tiež silne ovplyvňujúce podmienky prostredia porastovej podúrovne (Brusa a Bunker, 2014).



Obr. č. 1 Hemisférická fotografia porastu (Bequet, 2011)

3.3.2.4. LiDAR

Menej tradičnou technikou určovania LAI patriacou medzi nepriame metódy je meranie pomocou laserového systému LiDAR. Laserová technológia poskytuje relatívne nový nástroj pre vytvorenie jedinečného a komplexného matematického opisu stromovej štruktúry. (Van der Zande et al., 2006). Vlastný princíp LiDARu je možné považovať za veľmi jednoduchý. Celý prístroj obsahuje zdroj laserového žiarenia, optickú sústavu, mechanický prvok, detektor magnetického žiarenia a veľmi presné hodiny. Ako zdroj laserového žiarenia je v súčasnej dobe možné použiť pomerne veľkú škálu rôznych emitov. U výkonných LiDARov sa používajú pevnolátkové lasery rubínové alebo modernejšie *Nd.YAG*. V systémoch nevyžadujúcich vysoký výkon pevnolátkových laserov sa s úspechom používajú lasery diódové, ktoré majú mnoho výhod, jednoduchú možnosť implementácie do systému a vysokú variabilitu na trhu. Použitie konkrétneho typu laseru sa riadi nielen požadovaným výkonom, ale aj požadovanou vlnovou dĺžkou zariadenia (Dolanský, 2004).



Obr. č. 2: Princíp leteckého laserového skenovania (Pavelka et al., 2011)

Konštrukcia LiDARu

Laserové skenery sa skladajú z niekoľkých samostatných mapovacích technológií. Mnohé názvy týchto komponentov sa kvôli komerčnému prostrediu odlišujú, ale pracujú na totožnom základe. Používajú GPS a INS ako navigačný systém, laserovú jednotku a skenovaciu jednotku. Každá z týchto jednotiek sa musí vyznačovať vysokou presnosťou a pred každým meraním musí byť kalibrovaná.

Laserová jednotka

Laserová jednotka (LRF) obsahuje laserový vysielač a prijímač, ktorých optická os je totožná. Základné meranie LiDAR systému je vzdialenosť medzi snímačom a cieľovým povrchom, získané stanovením uplynulého času medzi vyslaním jedného laserového pulzu a reflexným príchodom tohto impulzu (the return signal) na prijímací senzor. Tento interval je definovaný ako "time-of-flight" (Sick, 2003). Vynásobením tohto časového intervalu rýchlosťou svetla (c) a vydelením tohto údaju dvoma získame vzdialenosť medzi snímačom a cieľom (Bachman, 1979). Pri opakovanom meraní vertikálnej vzdialenosti medzi snímačom v lietadle a zemským povrchom pozdĺž transektu bude výsledkom náčrt zemského povrchu s pokrývajúcou vegetáciou. Aj v oblastiach s vysokou hustotou vegetačnej pokrývky, kde sa väčšina meraní odrazí od stromových korún, niektoré merania zachytia podložný povrch terénu, čo poskytuje mapy korunovej pokrývky s vysokou presnosťou. Kľúčové rozdiely medzi LiDAR - senzormi sú spojené s vlnovou dĺžkou, silou, dĺžkou trvania laserového pulzu,

frekvenciou opakovania, veľkosťou lúča, odchýlkou uhla a informáciou zachytenou zvlášť pre každý odraz. Lasery pre pozemné merania majú všeobecne vlnové dĺžky v rozmedzí 900 - 1064 nm, ktoré poskytujú najvyšší odraz od vegetácie. Vo viditeľnej oblasti vlnových dĺžok (380 - 680 nm) je vysoká absorpcia vegetáciou a len malé množstvo energie sa vracia k senzoru. Nevýhodou tohto rozsahu vlnových dĺžok je absorpcia mrakmi. Oblaky ktoré bránia použitiu týchto zariadení počas zatiahnutej oblohy. Výkon lasera a veľkosť otvoru prijímača určujú maximálnu výšku letu, ktorá obmedzuje šírku záberu pre zber dát počas jedného preletu (Wehr a Lohr, 1999). Veľkosť stopy laserového lúča je závislá na výške letu a na divergencii svetelného lúča (Lefsky, 2002). Pri výške letu okolo 500 m nad povrchom je laserová stopa približne 30 cm (Dolanský, 2004).

Skener

Pre vychyľovanie lúča mimo svoju os je v skeneri umiestnené spravidla rotujúce zrkadlo, ktoré lúč vychyľuje v priečnom smere. Posun lúča v pozdĺžnom smere je zaistený vlastným pohybom plošiny (lietadla). Celkový uhol záberu v priečnom smere potom definuje šírku záberu, čiže zorné pole „field of view“ (FOV). V praxi je spravidla FOV 20 - 30°, ale existujú aj systémy s FOV až 70° (Leica Geosystems, 2002). Pri konštrukcii skeneru je možné použiť niekoľko odlišných technológií. Najznámejšie sú: skener s oscilujúcim zrkadlom, skener s rotačným zrkadlom, skener so zväzkom optických vlákien a eliptický skener.

Typy skenerov

Lidarové skenery používané v súčasnej dobe pre 3D mapovanie vegetácie a lesnícky výskum možno rozdeliť buď na *Discrete-return* (DR) alebo *full-waveform* (FW) systémy (Lim et al., 2003). Líšia sa od seba predovšetkým ohľadom na spôsob a rozsah merania. V praxi to má za následok výrazne rozdielny počet meraní vzdialeností zaznamenaných zvlášť pre každý emitovaný laserový pulz, a tak dochádza aj k rozdielom v spracovaní a analýze dát.

Väčšina komerčne dostupných DR skenerov umožňuje niekoľko odrazov (zvyčajne štyri), ktoré sú zaznamenané pre každý laserový pulz. FW senzor meria celý profil vratného signálu na základe odobratých vzoriek v pevných časových intervaloch, s teoreticky neobmedzeným počtom meraní pre každý emitovaný impulz. Pri aplikácii závisí počet zaznamenaných meraní od viacerých faktorov, vrátane hardvéru snímača a počet meraní môže

byť obmedzený na množstvo od niekoľkých desiatok do niekoľkých stoviek. To poskytuje kontinuálny záznam odrazenej energie pre každý vyžiarený laserový impulz (Parrish a Scarpace, 2007).

Kontrolná jednotka

Skener a laserová jednotka vzájomne spolupracujú pomocou kontrolnej (riadiacej) jednotky. Vnútorne hodiny tejto jednotky sú pravidelne synchronizované s hodinami GPS aparátúr pomocou PPS (puls per second) signálu generovaného vnútornými hodinami GPS prijímača. Všetky merané dáta sú previazané s časom vnútorných hodín a ďalej pomocou PPS s GPS časom.

Navigačná jednotka

IMU (Inertial Measurement Unit) využíva dve fyzikálne zákonitosti. V prvom prípade využíva vlastnosti rýchlo rotujúcich telies, ktoré sa tak snažia udržať svoju os rotácie v smere zemskej gravitácie. Druhým fyzikálnym javom je zotrvačnosť telies. Oba javy je možné merať pomocou niekoľkých gyroskopov a akcelerometru. Sústava gyroskopov (jeden je vždy zvislo, ďalšie sú k nemu kolmé) dokáže veľmi presne určiť náklony celého systému vzhľadom k ťažnici. Akcelerometer naopak meria zrýchlenie, čo je funkcia rýchlosti a času. Porovnaním zrýchlenia v čase je možné spätne určiť polohovú zložku letu. Kombináciou oboch prístrojov je teda možné určiť všetkých šesť stupňov voľnosti. Napriek tomu, že súčasné gyroskopy a akcelerometre merajú veľmi presne extrémne malé hodnoty, vplyvom pôsobenia systematických chýb sa bude vypočítaná trajektória letu od skutočnej stále viac odchyľovať a po určitom čase odchýlka prekročí povolené medze. Preto je nutné tieto merania doplniť údajmi z GPS.

GPS

Pre určovanie polohy lietadla v referenčnom systéme je používaná sústava GPS prijímačov s využitím metódy DGPS. Najjednoduchšou formou je kombinácia jednej referenčnej stanice na známom geodetickom bode a jednej stanice na palube lietadla. Ďalšou funkciou GPS na palube lietadla je synchronizácia času všetkých ostatných meracích systémov. Frekvencia merania je spravidla 2 Hz (Dolanský, 2004).

3.3.2.5. UAV

Bezpilotné vzdušné lietadlá (Unmanned aerial vehicle - UAV) sa stávajú stále viac používaným spôsobom pre získavanie dát diaľkového snímania, väčšinou leteckých snímok. V dnešnej dobe sú tieto systémy ľahké a finančne dostupné, vývoj a miniaturizácia senzorov a ich spoľahlivosť umožňujú bezpečnú prevádzku s dobrou úspešnosťou. UAV sa dajú veľmi rýchlo pripraviť na okamžité použitie takmer všade a vždy. Jediné obmedzenia vznikajú v horských polohách a v lesnom prostredí, kde vzniká najväčšie ohrozenie abiotickými činiteľmi, najmä vetrom. Ďalšou prekážkou môže byť dostupnosť a dohľadnosť a problémy s pristávacími miestami a kvalitou GNSS signálu. V neposlednom rade môže vzniknúť obmedzenie spôsobené legislatívou a právnymi nariadeniami, kontrolujúcimi prevádzku bezpilotných lietadiel (Aber, 2010).

UAV design

Existujú rôzne spôsoby a druhy bezpilotných vozidiel schopných prepravovať kamery alebo iné senzory. Aber (2010) uvádza najbežnejšie druhy pre civilné a vedecké účely.

Šarkan

Šarkan, ako platforma pre kameru bola použitá ako jedna z prvých. Je to jeden z najlacnejších možných nosičov UAV, ktoré sa dajú využiť na snímkovanie terénu. Ich najväčšou nevýhodou je nutná prítomnosť vetra (min. $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), malá letová výška a sú limitované rovinným terénom.

Balón

Podľa kategorizácie sa balón či vzducholod' radia do UAV ľahších než vzduch (lighter-than-air). Sú vhodné pre využitie na maloplošných lokalitách, no ich nevýhodou je zlá manipulovateľnosť.

Lietadlo

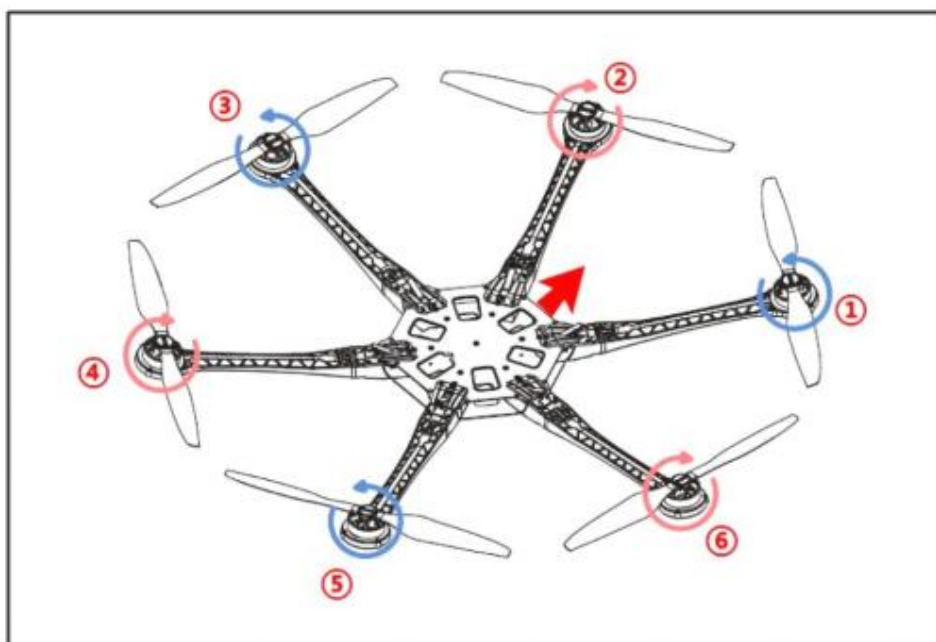
Najčastejšie sa používajú malé, elektricky ovládané modely lietadiel, s rozpätím krídel 2 – 3 metre. Sú ovládané operátorom s diaľkovým ovládaním s asistenciou autopilotného systému.

Vrtuľník

Vrtuľníky, či už v reálnej veľkosti alebo akokoľvek modifikované sa dajú dobre využiť pre získanie leteckých snímok. Ich nevýhodou je ťažká ovládateľnosť, či nákladnosť. Na druhú stranu, ich veľkou výhodou je možnosť „visieť“ vo vzduchu, kedy sa dajú veľmi ľahko a pokojne získať veľmi kvalitné snímky.

Viacrotorové UAV

Zaužívaným názvom je multikopter, či dron. Začiatky siahajú do roku 2004, kedy francúzska firma Parrot SA odštartovala projekt s názvom AR.Drone s cieľom vytvoriť bezpilotný mikro multikopter pre verejný trh, video hry a na vedecké účely. Tento projekt bol prezentovaný na jar v roku 2010, odkedy sa tieto drony aj voľne predávajú (Bristeau, 2011). Tento nosič je teda najmladší z rodiny bezpilotných strojov, no stáva sa čím ďalej tým viac populárnym. Podľa počtu rotorov sa tieto platformy aj nazývajú. Najčastejšie sú to quadrokoptery, hexakoptery, či oktokoptery. Všetky rotory sa nachádzajú v jednej rovine, pričom tu absentuje riadiaca vrtuľa. K navigácii a pohybu do určitého smeru sa využíva prepracovaný systém a regulácia jednotlivých rotorov pomocou riadiacej jednotky na palube UAV. Bez akéhokoľvek príkazu operátora je dron vždy v rovnovážnej, vyváženej polohe. Pri pokyne operátora zahnúť doľava sa zníži ťah dvoch ľavých rotorov a pravé rotory otáčky zvýšia. Celú činnosť koordinuje práve riadiaca jednotka (Aber, 2010).



Obr. č. 3: Princíp letového pohybu hexakopteru (DJI Inovations, 2012)

Navigácia

Autopiloty UAV sú navigované malou palubnou GNSS / INS jednotkou. Hlavnými súčasťami navigačnej jednotky sú gyroskopy pre meranie rotácie a uhlov platformy, senzor tlaku vzduchu, magnetometer a akcelerometer (Böhm, 2010; Aber, 2012). Na pozemnej stanici je naplánovaný let dronu so zadanou dráhou letu, letovou výškou, rýchlosťou a spúšťou. Let prebieha samostatne, plne automatizovane, bezdrôtová komunikácia umožňuje sledovať aktuálnu pozíciu platformy a prispôsobenie letového plánu. Je možný aj poloautomatický mód, či plne manuálny variant, vhodný napríklad pre pristávanie v prípade straty signálu, či iných nečakaných problémov. Let musí prebiehať pod dohľadom kvalifikovaného pilota, ktorý je schopný prevziať priamu kontrolu nad UAV. Dáta z letu sú prenášané do pozemnej stanice v reálnom čase alebo je možné ich získať z pamäte prístroja po dolete.

Kamery a senzory

Vzhľadom k obmedzenej nosnosti a priestoru sú UAV vybavené ľahkými spotrebiteľskými kamerami alebo zrkadlovkami. Poskytujú obrázky vo vysokej kvalite a rozlíšení, ale bývajú často nestabilné kvôli IOP (Inner orientation parameter). Tento problém sa dá vyriešiť, ak sa objektív kamery mechanicky spevní, alebo sa použije šošovka s pevnou ohniskovou vzdialenosťou. Kamera sa spúšťa diaľkovým ovládaním a vyhotovuje snímky

buď vo vopred stanovených intervaloch (napr. každé dve sekundy) alebo na vopred definovaných miestach. Snímky sa zvyčajne ukladajú na SD pamôťovú kartu a dajú sa stiahnuť po lete. Pre vegetačnú analýzu sa používajú ďalšie senzory ako napríklad multi - hyperspektrálne senzory, NIR, či CIR (Nackaerts, 2010; Bendig, 2012; Kelcey, 2012). V posledných rokoch sa v kombinácii s UAV testovali tiež laserové skenery, spektrometre, laserový merač vzdialenosti, či radar (Jaakkola, 2010).

Existuje niekoľko hlavných rozdielov medzi snímkami získanými z nízkych výšok v porovnaní s obrazmi z vyšších polôh (Haala, 2012). Tieto rozdiely vznikajú napríklad kvôli nie vždy systematickej letovej línii spôsobenej vetrom alebo zlou viditeľnosťou. Problémy môžu byť spôsobené aj zlými parametrami externej orientácie (EOP), nestabilnému IOP alebo pre zlé rozlíšenie. Kvôli tomu často zlyhávajú štandardné aero-triangulačné metódy. Pre vyriešenie týchto problémov sú dnes voľne komerčne dostupné rôzne stereoaktické pomôcky.

Existujú rôzne algoritmy prevzaté z počítačovej vizie, ktoré sa používajú pre nízkorozsahovú fotogrammetriu alebo terestriálne fotografovanie (Lowe, 2004; Bryson, 2010). Je možné stanoviť geometriu objektívu fotoaparátu a vypočítať 3D model terénu zo sady prekrývajúcich sa snímok, ako aj orientáciu, skreslenie či svetelné zmeny.

4. Popis výskumných plôch

4.1. Všeobecný popis plôch

Náš výskum a meranie LAI prebiehalo na 6 pokusných plochách, nepravidelne rozmiestnených v bukovom poraste na Školskom lesnom podniku Masarykův les Křtiny na polesí Habrůvka, v poraste číslo 158B3.

Tieto plochy ležia v podoblasti Konická vrchovina. Podľa biografického hľadiska sa týchto šesť plôch radí do provincie stredoeurópskych listnatých lesov, podprovincie hercýnskej, patria do Drahanského bioregiónu (1.52) a číslo PLO je 30, Drahanská vrchovina. Územie je odvodňované prevažne riekou Svitavou, východná časť Ponávkou. Väčšinu územia Konickej vrchoviny tvoria vrstvy morského spodného karbónu – kulmu, ílovitej bridlice, droby a zlepencov. Ako prekrývajúce útvary sa tu vyskytujú jurské vrstvy, ojedinele z éry kriedy – pieskovce a ílovce.

Prevažujúcim pôdnym typom na LHC ŠLP Masarykův les Křtiny je kambizem. Na našich výskumných plochách, ktoré sme si vytýčili sa vyskytuje rendzina kambická.

Čo sa týka drevinnej skladby, naše pokusné plochy boli vložené do porastu, so zastúpením buku lesného (*Fagus sylvatica* L.) 91 %. Na pokusných plochách sa nachádzal len buk.

4.2. Charakteristika výskumných plôch

V tabuľke č. 1 sú uvedené jednotlivé parametre pre pokusné plochy. Jednotlivé údaje pre plochy na školskom lesnom podniku boli čerpané z mapového a informačného serveru patriacemu ŠLP Masarykův les Křtiny (<http://mapserver-slp.mendelu.cz/map.phtml?config=slp>).

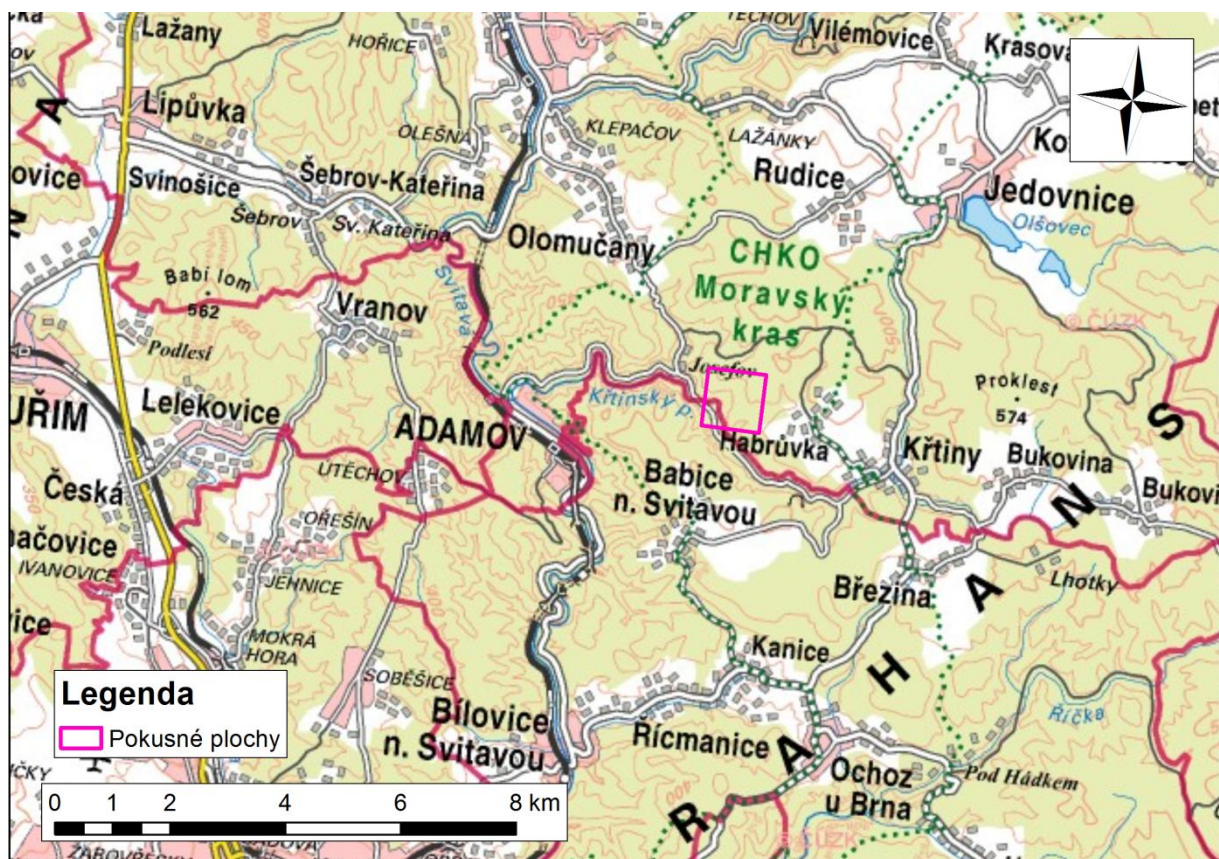
Naše pokusné plochy mali rozlohu 16 m² (4x4m), kde sme vždy po jednom metri vytýčili 25 bodov na spôsob šachovnice. Všetky plochy boli zamerané totálnou stanicou a vnesené do mapy. Plochy č. 1 - 6 sa nachádzali v poraste 158B3, kde je zastúpenie buku (*Fagus sylvatica* L.) 91 %, smrekovca opadavého (*Larix decidua* Mill.) 8 % a dubu zimného (*Quercus petraea* Matt.) 1 %. Priemerná výška porastu je 9 m s priemernou prsnou šírkou 9 cm.

Všetky naše výskumné plochy sa nachádzali vo veľmi veľkej blízkosti, takže prírodné podmienky na nich boli skoro totožné. Dreviny na týchto plochách do seba nijako

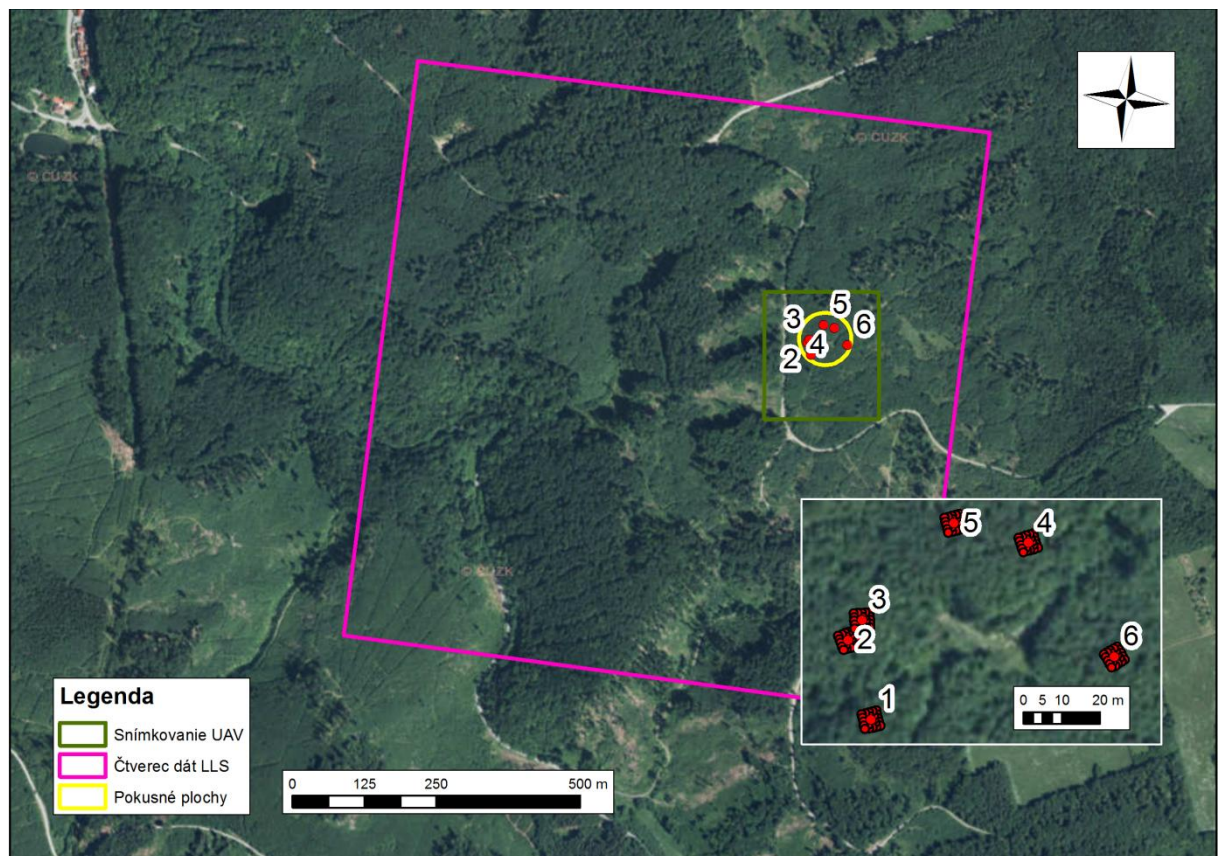
nezasahovali a navzájom sa neovplyvňovali. Na lokalite, kde sa pokusné plochy nachádzali, je priemerná nadmorská výška 455 m n. m. s priemernou ročnou teplotou 7 °C. Sklon plôch bol 5 % s miernou orientáciou na sever, prípadne severozápad.

Tab. č. 1: Charakteristika výskumných plôch

| Atribúty | Pokusné plochy 1 – 6 |
|----------------------------------|------------------------------|
| Vek | 21 |
| Nadmorská výška (m n. m.) | 450 |
| Orientácia svahu | Sever |
| Sklon svahu (%) | 5° – 10° (0 – 10 %) |
| Geologické pomery | kulmské droby |
| Pedologické pomery | rendzina kambická |
| Priemerná teplota (°C) | 7 °C |
| Priemerné zrážky (mm) | 520 |
| SLT | 3H2 |
| Zastúpenie drevín | buk 98% |
| GPS | 49°30'64,9"N 16°70'77,8"E |



Obr. č. 4: Prehľadová mapa plochy



Obr. č. 5: Ortofotografická mapa plochy

5. Metodika

Metodika merania

Centrom nášho snaženia bolo zmeranie listovej plochy na vymedzených 6 areáloch a na zistenie distribúcie lístia na vzorkových stromoch. Na zmeranie LAI sme použili niekoľko metód, či už priamych alebo nepriamych. Použili sme priamu deštrukčnú metódu, optické metódy merania prístrojom LAI 2200 Plant Canopy Analyser, LaiPen a hemisférické fotografovanie a napokon sme použili diaľkové letecké skenovanie a skenovanie pomocou UAV dronu.

5.1. Deštrukčná metóda a alometrické vzťahy

Deštrukčný prístup k stanoveniu LAI a distribúcie lístia v korune vzorkových stromov si vyžaduje isté prípravy. V celom poraste sme zmerali obvody všetkých stromov. Na základe početností širok nameraných stromov sme vybrali 15 referenčných tak, aby boli obvody stromov v poraste rovnomerne zastúpené podľa obvodoých tried. Každý z nich sme rozrezali na metrové sekcie, z ktorých sme okulárnym odhadom nazbierali vzorkové listy pre výpočet SLA a následného LAI pre jednotlivé metrové sekcie stromov.

Listy natrhane na vzorkových stromoch sme bezprostredne po otrhaní pre zachovanie čerstvého stavu nasnímali skenerom, ktorého snímacia plocha zodpovedala formátu A3. Pomocou programu ImageJ (Wayne Rusbant, NIH, Rockville Pike, Maryland, USA) sme zistili presnú veľkosť plochy týchto listov. Všetky tieto listy boli následne sušené po dobu 48 hodín pri teplote 80 °C a následne boli zvažene špeciálnou váhou s presnosťou na tisíce gramu. Zo známej hmotnosti vysušených listov a ich plôch sme vypočítali plošnú hustotu lístia, teda koeficient, medzi plochou čerstvých a hmotnosťou suchých listov pomocou vzťahu:

$$SLA = S_{\xi} \cdot m_v^{-1}, \quad (2)$$

kde SLA je špecifická listová plocha (prepočtový koeficient) v $m^2 \cdot g^{-1}$, S_{ξ} je plocha čerstvých listov a m_v je hmotnosť vysušených listov. Po znalosti SLA, sme tento koeficient aplikovali na ostatné navážky listov z odberových miest. Tieto listy sme museli otrhať

z vetiev a kmeňov a rozdeliť podľa jednotlivých sekcií. Podobne ako pri vzorkových listoch, boli aj tieto listy sušené 48 hodín pri teplote 80 °C a vážené váhou s presnosťou na stotiny gramu. Po zistení údaju o ich hmotnosti vo vysušenom stave sme mohli vypočítať plochu lístia pre jednotlivé segmenty. Z údajov o ploche lístia a obvode jednotlivých vzorkových stromov sa vytvoril alometrický vzťah pomocou regresnej rovnice. Tento vzťah sa napokon aplikoval na stromy nachádzajúce sa priamo v našich pokusných plochách a následne sa vypočítal LAI týchto plôch. Index listovej plochy pre jednotlivé plochy sa vypočítal pomocou softwaru GroGra (Growth Grammar Interpreter).

5.2. Prístroj LAI 2200 Plant Canopy Analyser

Použitie tohto prístroja je podmienené absenciou priameho slnečného žiarenia, a preto boli akékoľvek merania uskutočnené výhradne za difúznej radiácie (obloha zatiahnutá homogénnou oblačnosťou alebo tesne pred východom, či tesne po západe slnka). Pre zjednodušenie práce a urýchlenie merania sme použili LAI 2200 Plant Canopy Analyser (LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) s dvoma snímačmi. Jeden bol pripevnený na statíve vo vodorovnej polohe na voľnej, nezatienenej ploche, vzniknutej po mýtnej ťažbe, kde bol nastavený na automatické meranie radiácie v pol minútových intervaloch. Toto meranie na voľnej ploche zaznamenával prístroj vo výške 180 cm bez použitia reštrikčných krúžkov ako východiskové a na jeho základe porovnával radiáciu pod porastom a počítal index listovej plochy. Následné meranie pod porastom bolo vykonané zvlášť na každom z 25 bodov vytýčených na našich 6 pokusných plochách. LAI bol určovaný inverzným modelom porovnávania transmitancie. Pri meraní bol optický senzor rovnako ako na voľnej ploche vo výške 180 cm aby nedochádzalo k zatieneniu meračom a bez použitia reštrikčných krúžkov.

Dáta boli spracované softwarom FV 2200 (LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA). Pre parametre boli zvolené predvolené nastavenia programu.



Obr. č. 6: LiCor LAI 2200 Plant Canopy Analyser

5.3. Diaľkový prieskum Zeme

5.3.1. Letecké laserové skenovanie

Dáta leteckého laserového skenovania (LLS) použité v tejto práci boli naskenované v dňoch 17. 9. a 18. 9. 2015 v súradnicovom systéme ETRS-89 UTM 33N a v elipsoidických výškach GRS-80.

Parametre leteckého laserového skenovania:

- použitý skener: Leica ALS70-CM (SN7209)
- použité lietadlo: Cessna 206 Turbo stationair OK-EKT
- skenovací uhol: 24°
- skenovací mechanizmus: oscilujúce zrkadlo
- PRF (Pulse Repetition Frequency): 301,8 kHz
- priemerná hustota bodov: 7,8 bodov.m⁻²

Klasifikácia dát LLS prebiehala v nadstavbe TerraSolid Terrascan softwaru Bentley Microstation. Body boli klasifikované pomocou automatických metód do triedy 2 - Ground (terén) a body prvého odrazu do triedy 5 – High Vegetation (vysoká vegetácia).

Poloha všetkých meraní LAI na pokusných plochách bola stabilizovaná kolíkmi a geodeticky zameraná kombináciou globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) a

totálnou stanicou. Dva vrcholy meračskej siete, nad ktorými bol voľný výhľad na oblohu, boli zamerané pomocou GNSS prijímača Topcon Hiper Pro. Tento prijímač využíval družice systémov NAVSTAR GPS, GLONASS a RTK (Real Time Kinematic) korekcie z virtuálnej referenčnej stanice vytvorenej zo siete CZEPOS, pričom pozícia bola určovaná pomocou fixného riešenia ambiguit. Ostatné vrcholy meračskej siete a podrobné body (polohy merania LAI) boli tachymetricky zamerané totálnou stanicou Trimble M3.

5.3.2. Snímkovanie pomocou UAV

Ďalej bolo vykonané snímkovanie pomocou bezpilotnej hexakoptéry DJI F550 s autonómnou riadiacou jednotkou, ktorá bola osadená fotoaparátom Sony NEX-5 na gimbale. Výška letu hexakoptéry bola nastavená na 100 m, let bol riadený autonómne pomocou vopred pripraveného letového plánu, tak aby bolo nasnímkované územie s veľkosťou 200 x 220 m nad pokusnými plochami s dostatočným prekrytím snímok. Pripojenie výslednej série snímok do súradnicového systému bolo realizované pomocou vlíčovacích bodov zameraných GNSS prístrojom Topcon Hiper Pro spôsobom uvedeným vyššie.

Výsledná séria snímok bola fotogrammetricky spracovaná v software Agisoft Photoscan na základe identických bodov a vzniklo mračno bodov s priemernou hustotou 880 bodov.m⁻² a ortofotosnímkok s veľkosťou pixelu 5 cm.

V software ESRI ArcMap bol vytvorený LAS dataset z bodov fotogrammetrického mračna a pomocou nástroja LAS Point Statistics as Raster s parametrom Method = Point count sa vytvorili rastrové súbory, ktoré znázorňujú počet bodov leteckého laserového skenovania na určitej ploche. Tieto rastre boli spracované pre dve veľkosti jedného pixelu: 0,5 a 5,5 metru. Veľkosti boli zvolené na základe skúseností so spracovaním dát LLS, pričom veľkosť pixelu 0,5 bola zvolená na základe priestorového rozostupu medzi jednotlivými meraniami bez ohľadu na uhol záberu optických metód meraní LAI. Do atribútovej tabuľky tohto súboru sa z rastrov pomocou funkcie Extract Multi Value to Points vložili hodnoty z týchto rastrov. Na základe korelačnej matice sa hľadala optimálna kombinácia veľkosti rastru, počtu bodov a výsledkov jednotlivých metód pozemného merania. Nakoľko boli korelácie nízke a štatisticky nevýznamné, nebolo možné vytvoriť korektný regresný model.

Preto bol vyskúšaný druhý postup na základe korelácií s DN hodnotami červeného, zeleného a modrého kanálu. Každý tento kanál bol separátne vložený do ArcMapu. Potom boli vytvorené polygóny hraníc pokusných plôch a buffery polôh jednotlivých meraní s

polomerom 0,5 metra a pomocou zonálnej štatistiky bola v rámci jednotlivých polygónov vypočítaná minimálna DN hodnota, maximálna DN hodnota, rozsah DN hodnôt, smerodajná odchýlka DN hodnôt a súčet DN hodnôt pre každý kanál. Ďalej boli vytvorené korelačné matice medzi vyššie zmienenými štatistickými charakteristikami DN hodnôt pre rôzne veľkosti pixelu a jednotlivými metódami pozemného merania. Korelácie boli nízke a na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ nevýznamné, nebolo preto možné vytvoriť regresný model, ktorý by bol významný.

5.3.3. Spracovanie dát LLS

V programe ESRI Arcmap boli vytvorené datasey leteckého laserového skenovania pomocou nástroja Create LAS Dataset. Prvý dataset obsahoval body triedy 2 – Ground a druhý body triedy 5 – High Vegetation. Pomocou nástroja LAS Point Statistics as Raster s parametrom Method = Point count sme vytvorili rastrové súbory, ktoré znázorňujú počet bodov leteckého laserového skenovania na určitej ploche. Tieto rastre s rôznymi veľkosťami jedného pixelu (napr. 4 m; 5 m, 5,5 m; 6 m; 7 m) boli spracované pre body náležiacie terénu a pre body prvého odrazu.

Pre každú veľkosť pixelu bol v Raster Calculatoru vypočítaný LiDAR Penetration Index podľa nasledujúceho vzorca:

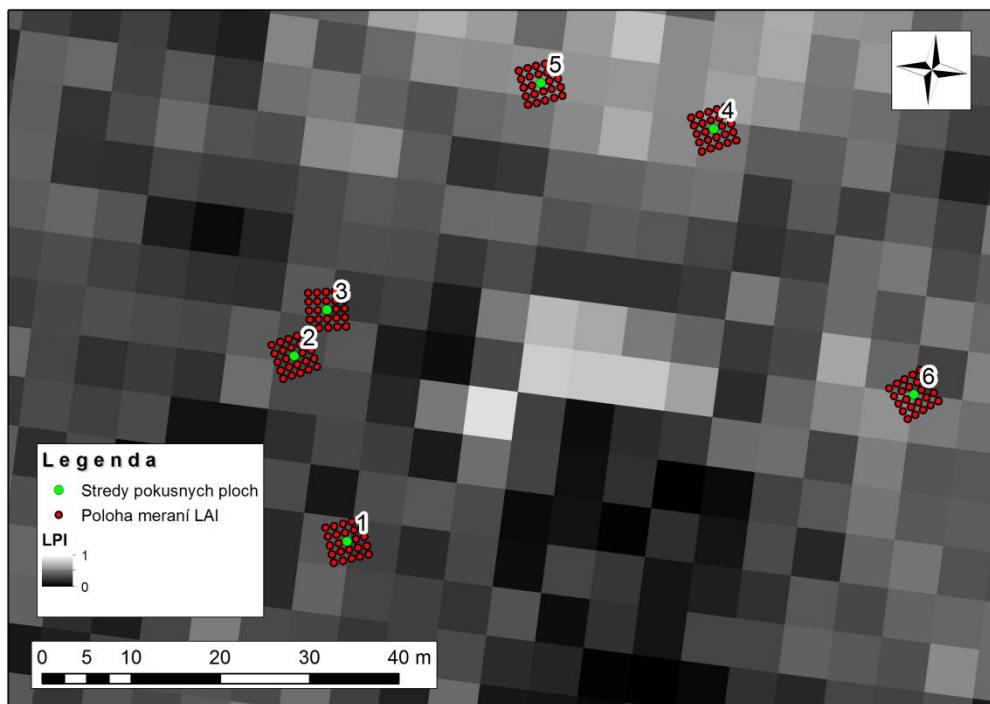
$$LPI_{ij} = \frac{m_{Gij}}{m_{Gij} + m_{Vij}}, \quad (3)$$

kde:

m_{Gij} - počet odrazov laserových lúčov na jednotku plochy digitálneho modelu terénu

m_{Vij} - počet odrazov na jednotku plochy digitálneho modelu povrchu

Indexy i a j odkazujú na príslušný riadok a stĺpec bunky (pixelu) gridu (Musselmann et al., 2013).



Obr. č. 7: Mapa LPI

Ďalej bol pripojený bodový shapefile súbor s presnou polohou jednotlivých pozemných meraní a s presnou polohou stredov pokusných plôch. Do atribútovej tabuľky tohto súboru sa z rastrov pomocou funkcie Extract Multi Value to Points vložili hodnoty LPI. Na základe korelačnej matice sa hľadala optimálna kombinácia veľkostí rastru LPI, výsledkov jednotlivých metód pozemného merania na bodoch zameraných geodeticky a výsledkov metód za celé pokusné plochy. Pre najlepšiu kombináciu bol v software QC Expert vypočítaný regresný model a otestovaný regresný triplet. Výsledná regresná rovnica bola vložená do Raster Calculatoru, čím bola vytvorená mapa plošnej distribúcie LAI.

Inou metódou výpočtu LAI pomocou laserového skenovania bolo využitie tzv. LiDAR metrík, ktoré boli vypočítané v softwari Fusion. Najskôr boli príkazom clipdata vyrezané pokusné plochy z mračna bodov (tvar štvorec, strana 5,5 m) a následne sa vypočítali pomocou príkazu cloudmetrics charakteristiky mračien bodov jednotlivých pokusných plôch. Príkaz cloudmetrics poskytuje 87 charakteristík bodového mračna založených na atribútoch výška bodu a intenzita odrazu. Pomocou korelačných matíc sa hľadali najvyššie závislosti medzi LAI vypočítaným rôznymi metódami pozemného merania a jednotlivými charakteristikami mračna bodov. V software QC Expert boli vytvorené viacrozmerné lineárne regresné modely pre každú taxačnú veličinu tak, že do modelu vstupovala ako nezávislá premenná vždy tá charakteristika bodového mračna, ktorá vykazovala najvyššiu koreláciu s hodnotami LAI určenými pozemne. Potom sa priradila ďalšia charakteristika, ktorá najviac korelovala

s reziduami modelu s prvou nezávislou premennou. Takto sa postupovalo, pokiaľ sa u modelov neprestali zvyšovať koeficienty determinácie a zároveň všetky nezávislé premenné boli významné. U finálnych modelov bol otestovaný regresný triplet.

Pre odhad zásob v jednotlivých porastoch je potrebné vypočítať charakteristiky v celom bodovom mračne. K tomu sa využíva príkaz `gridmetrics`, ktorý vytvorí raster, kde v každom pixeli je informácia o veľkosti hodnoty danej charakteristiky mračna bodov. Zadaním regresných modelov a vstupných rastrov charakteristík bodového mračna do Raster Calculatoru vznikne mapa plošnej distribúcie LAI.

5.4. Hemisférické fotografie

Pre náš účel merania porastového svetla pomocou metódy s použitím hemisférických fotografií bola použitá sústava pozostávajúca z 24 megapixelového fotoaparátu Sony NEX-7 (formát fotografie 6000 x 4000 pixlov), doplneného o širokouhlý objektív FC-E8 (ohnisková vzdialenosť 8 mm) umožňujúci zachytiť zobrazenie v uhle 180 °. Sústava bola doplnená o zariadenie na automatickú detekciu severného magnetického pólu (North Finder) a o diaľkovú spúšť umožňujúcu aktivitu fotoaparátu z väčšej vzdialenosti. Celá sústava bola vložená do samonivelačnej plošiny, kvôli trvalému udržaniu fotoaparátu vo vodorovnej polohe. Hemisférické fotografie boli zostrojené nad každým z 25 kolíkov našich 6 pokusných plôch na základe čoho sa vypočítal index listovej plochy pokusných plôch. Snímky boli vyhodnocované v software WinScanopy s tým, že prahová hodnota bola zisťovaná automaticky a bol počítaný LAI 3 Ring (zenitový uhol 0 - 45°) metódou LAI - 2000. Zároveň bola použitá metóda LAI-2000 so zadaním konkrétnych hodnôt uhlov záberu.

5.5. LaiPen

Podobne ako pri použití prístroja LAI 2200 PCA, funguje LaiPen na podobnom princípe skoro s identickým postupom merania. Prístroj meria hodnotu transmitancie ako pomer ožiarenosti (B_c/R) získanej pod porastom a nad porastom (B_c). Pri meraniach sa svetelných podmienkach je vhodné použiť dva prístroje v páre.

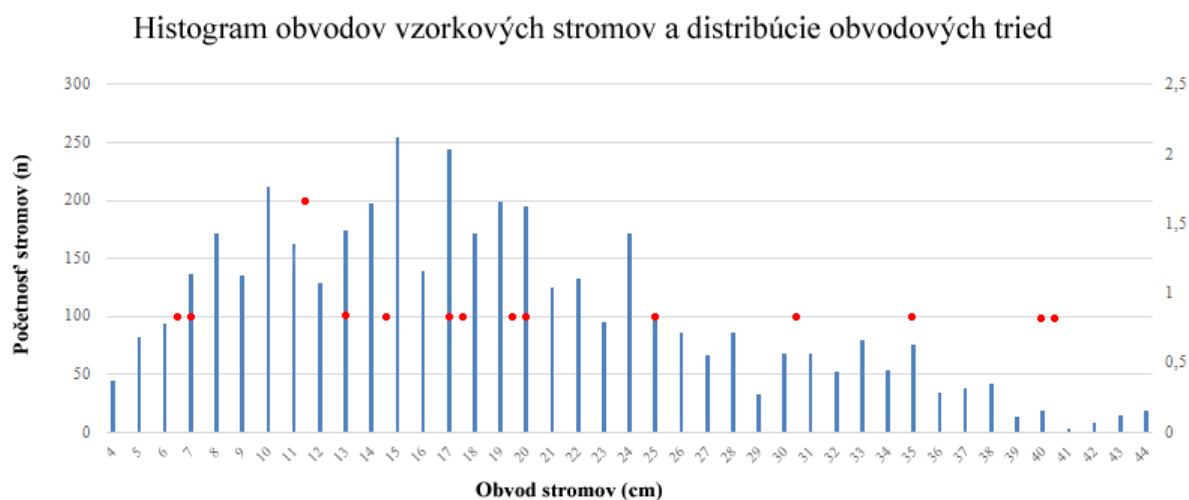
Ako u predchádzajúcich meraní s LAI 2200 PCA sme prístroj použili v páre: jeden na referenčnej voľnej ploche a druhý nad každým vytýčeným kolíkom našich pokusných plôch. Vzhľadom k orientácii a sklonu svahu sme použili orientáciu štrbiny restriktora z východu na

západ. Prístroj musel byť v úplnej vodorovnej polohe, ktorá sa nastavila pomocou gyroskopu zabudovaného v prístroji. Vzhľadom na to, že sme použili meranie v páre, museli sme dodržať časovú zhodu merania.

6. Výsledky

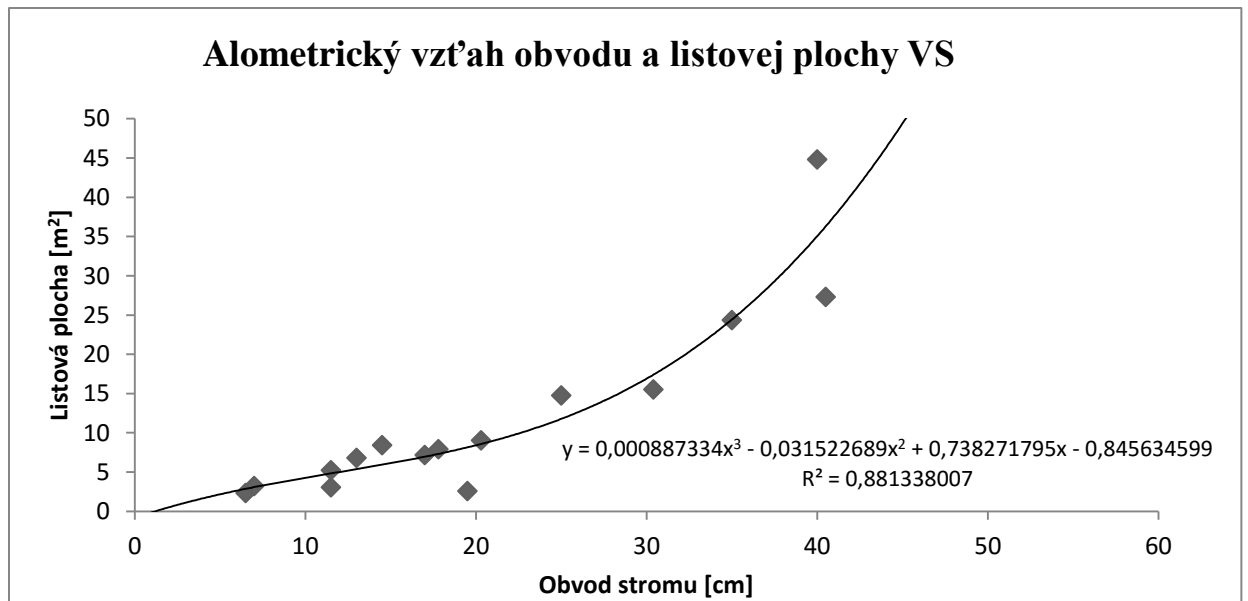
6.1. Deštrukčná metóda

Pre výpočet LAI deštrukčnou metódou bolo použitých podľa kategórií obvodov stromov rovnomerne rozložených 15 vzorkových stromov. Priemerkovaná plocha mala rozlohu 1 hektár. Výsledky zobrazuje obrázok č. 8.



Obr. č. 8: Histogram obvodov vzorkových stromov a distribúcie obvodových tried v poraste

Vďaka nameraným obvodom vzorkových stromov a ich listových plochám sme vypočítali pomer, alometrický vzťah medzi týmito veličinami. Alometrický vzťah medzi obvodom a listovou plochou vzorkových stromov je vyjadrený na obrázku č. 9 regresnou rovnicou. Vzťah $R^2 = 0,8813$ nám naznačuje, že tento model vysvetľuje 88 % variability dát. Jednotlivé obvody a hodnoty listových plôch vzorkových stromov sú vyjadrené v tabuľke číslo 2.



Obr. č. 9: Regresný vzťah LAI a obvodov vzorkových stromov

Tab. č. 2: Hodnoty LAI a obvody vzorkových stromov

| označenie VS | obvod VS (cm) | listová plocha VS [m ²] | modelová list. plocha VS [m ²] | reziduá |
|--------------|---------------|-------------------------------------|--|---------|
| VS1 | 40 | 44,83 | 35,04 | 9,80 |
| VS2 | 30,4 | 15,54 | 17,39 | -1,85 |
| VS3 | 25 | 14,78 | 11,77 | 3,01 |
| VS4 | 19,5 | 2,60 | 8,14 | -5,54 |
| VS5 | 11,5 | 5,25 | 4,83 | 0,42 |
| VS6 | 14,5 | 8,45 | 5,94 | 2,51 |
| VS7 | 40,5 | 27,32 | 36,29 | -8,97 |
| VS8 | 20,3 | 9,05 | 8,57 | 0,48 |
| VS9 | 11,5 | 3,08 | 4,83 | -1,75 |
| VS10 | 6,5 | 2,35 | 2,86 | -0,51 |
| VS11 | 7 | 3,24 | 3,08 | 0,16 |
| VS12 | 13 | 6,82 | 5,37 | 1,45 |
| VS13 | 17 | 7,19 | 6,95 | 0,24 |
| VS14 | 17,8 | 7,93 | 7,31 | 0,62 |
| VS15 | 35 | 24,37 | 24,42 | -0,05 |

6.2. Porovnanie metód

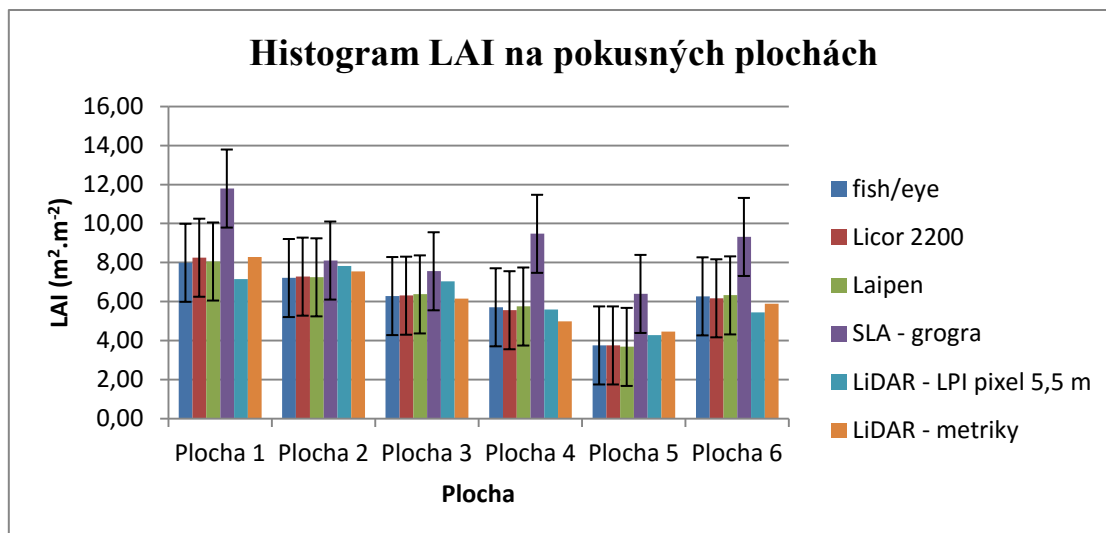
V tabuľke č. 3 sú zobrazené výsledky meraní LAI pomocou metód hemisférických fotografií, prístroja LAI 2200 PCA, LaiPen, deštrukčnej metódy a následného alometrického vzťahu (SLA - grogra) a 2 prístupy s použitím leteckého laserového skenovania (LiDAR - LPI a LiDAR - metriky). Tabuľka číslo 4 a obrázok č. 5 zobrazujú merané výsledky pomocou všetkých týchto metód spolu so smerodajnou odchýlkou. Pri metódach s použitím systému LiDAR sa smerodajná odchýlka nevyskytuje, pretože na zmeranie LAI je vykonané len jedno meranie. Metóda SLA – grogra je v našej práci použitá ako referenčná. Je vidieť, že všetky hodnoty ostatných metód podhodnocovali priamy prístup.

Tab. č. 3: Hodnoty LAI jednotlivých metód ($m^2 \cdot m^{-2}$)

| | fisheye | Licor 2200 | Laipen | SLA - grogra | LiDAR - LPI pixel 5,5 m | LiDAR - metriky |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| Plocha 1 | 8,00 | 8,26 | 8,06 | 11,80 | 7,16 | 8,29 |
| Plocha 2 | 7,22 | 7,29 | 7,25 | 8,11 | 7,83 | 7,55 |
| Plocha 3 | 6,29 | 6,31 | 6,38 | 7,56 | 7,05 | 6,15 |
| Plocha 4 | 5,72 | 5,57 | 5,76 | 9,48 | 5,61 | 4,99 |
| Plocha 5 | 3,76 | 3,76 | 3,69 | 6,40 | 4,28 | 4,47 |
| Plocha 6 | 6,28 | 6,18 | 6,33 | 9,32 | 5,44 | 5,90 |

Tab. č. 4: Hodnoty LAI jednotlivých metód ($m^2 \cdot m^{-2}$), v zátvorkách sú smerodajné odchýlky

| | fisheye | Licor 2200 | Laipen | SLA - grogra | LiDAR - LPI pixel 5,5 m | LiDAR - metriky |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| Plocha 1 | 8,00 (1,53) | 8,26 (1,64) | 8,06 (1,63) | 11,80 (2,25) | 7,16 | 8,29 |
| Plocha 2 | 7,22 (0,66) | 7,29 (0,85) | 7,25 (0,67) | 8,11 (0,74) | 7,83 | 7,55 |
| Plocha 3 | 6,29 (1,16) | 6,31 (1,45) | 6,38 (1,33) | 7,56 (0,69) | 7,05 | 6,15 |
| Plocha 4 | 5,72 (0,72) | 5,57 (0,76) | 5,76 (0,89) | 9,48 (1,18) | 5,61 | 4,99 |
| Plocha 5 | 3,76 (0,54) | 3,76 (0,57) | 3,69 (0,63) | 6,40 (0,91) | 4,28 | 4,47 |
| Plocha 6 | 6,28 (0,98) | 6,18 (1,04) | 6,33 (1,05) | 9,32 (1,45) | 5,44 | 5,90 |



Obr. č. 10: Hodnoty LAI na pokusných plochách so smerodajnými odchýlkami

Rovnako ako je vidieť vyššie, aj tabuľka číslo 5 zobrazuje výsledky meraní. Vedľa výsledkov sa nachádzajú percentuálne hodnoty odchýlok voči metóde SLA – grogra, ktorá je pre nás referenčná.

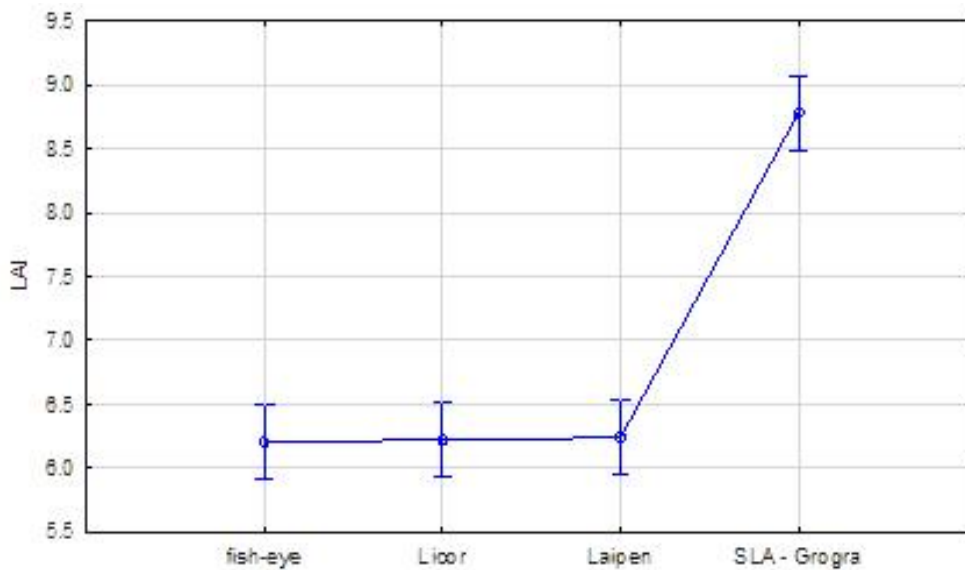
Tab. č. 5: Hodnoty LAI jednotlivých metód ($m^2.m^{-2}$) voči SLA – grogra, v zátvorkách sú odchýlky (%)

| | fisheye | Licor 2200 | Laipen | SLA - grogra | LiDAR - LPI pixel 5,5 m | LiDAR - metriky |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|
| Plocha 1 | 8,00 (-32,25) | 8,26 (-30,04) | 8,06 (-31,69) | 11,80 | 7,16 (-39,32) | 8,29 (-29,75) |
| Plocha 2 | 7,22 (-11,04) | 7,29 (-10,17) | 7,25 (-10,60) | 8,11 | 7,83 (-3,51) | 7,55 (-6,91) |
| Plocha 3 | 6,29 (-16,80) | 6,31 (-16,53) | 6,38 (-15,67) | 7,56 | 7,05 (-6,81) | 6,15 (-18,72) |
| Plocha 4 | 5,72 (-39,72) | 5,57 (-41,30) | 5,76 (-39,29) | 9,48 | 5,61 (-40,93) | 4,99 (-47,42) |
| Plocha 5 | 3,76 (-41,25) | 3,76 (-41,25) | 3,69 (-42,42) | 6,40 | 4,28 (-33,20) | 4,47 (-30,16) |
| Plocha 6 | 6,28 (-32,67) | 6,18 (-33,74) | 6,33 (-32,14) | 9,32 | 5,44 (-41,63) | 5,90 (-36,75) |
| Priemer | 6,21 (-28,95) | 6,23 (-28,84) | 6,24 (-28,64) | 8,78 | 12,45 (-27,57) | 12,44 (-28,28) |

Z výsledkov je zreteľné, že všetky optické metódy podhodnocovali metódu SLA – grogra. Metóda fisheye v priemere o 28,95 %, LiCor 2200 o 28,84 %, Laipen o 28,64 %, LiDAR – LPI o 27,57 % a LiDAR – metriky o 28,28 %. V priemere všetky tieto prístupy podceňovali metódu SLA – grogra o 28,46 %.

ANOVA – jednotlivé merania (25 na jednu plochu)

Pretože je možné pomocou leteckého laserového skenovania vzhľadom k hustote bodov určiť LAI iba na úrovni pokusnej plochy, testovanie analýzy rozptylu (ANOVA – Analysis of Variance) na úrovni jednotlivého merania bolo vykonané len pre terénne meranie.



Obr. č. 11: ANOVA metód na úrovni jednotlivých meraní (25)

Nakoľko je p - hodnota menšia než hladina významnosti $\alpha = 0,05$, nulová hypotéza o zhode stredných hodnôt sa zamietá, čo znamená, že aspoň jedna metóda vykazuje štatisticky významný rozdiel v kvantifikácii listovej plochy. To isté je možné zistiť z grafu, kde sa dá vyčítať, že všetky tri optické metódy vykazujú zhodné výsledky a významne sa odchyľuje len SLA. Je však nutné ešte vykonať post - hoc Scheffeho test pre presné určenie rozdielov stredných hodnôt (Obr. č. 11).

Tab. č. 6 Scheffeho post – hoc test premenných veličín LAI na úrovni jednotlivých meraní

| Grupovacie | fisheye | LiCOR | Laipen | SLA - grogra |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| fisheye | - | 0,999766 | 0,998158 | 0,000000 |
| LiCOR | 0,999766 | - | 0,999769 | 0,000000 |
| Laipen | 0,998158 | 0,999769 | - | 0,000000 |
| SLA - grogra | 0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | - |

Na základe prevedeného Scheffeho testu je možné potvrdiť štatisticky významný rozdiel medzi SLA-grogra a LAI určeného optickými metódami. Hodnoty v tabuľke č. 6 sú vyznačené červenou.

6.3. Diaľkový prieskum Zeme

Regresné modely pre výpočet LAI na základe leteckého laserového skenovania

Na základe regresnej analýzy v softvare QC Expert boli vybrané najvhodnejšie modely pre výpočet LAI na základe LPI a na základe charakteristík bodového mračna vypočítaných v softvare Fusion. Vzhľadom na veľkosť pixlu rastru LPI sa nepodarilo vytvoriť model na základe jednotlivých meraní, k tvorbe regresného modelu bol preto použitý priemerný LAI na plochu. Pretože optické metódy poskytovali podobné výsledky, stačilo vytvoriť model na základe jednej metódy. Ako závislá premenná preto bola vybraná množina hodnôt LAI zmeraná prístrojom LiCor LAI – 2200 PCA.

6.3.1. Lineárny regresný model vzťahu LPI a LAI (Licor 2200 PCA)

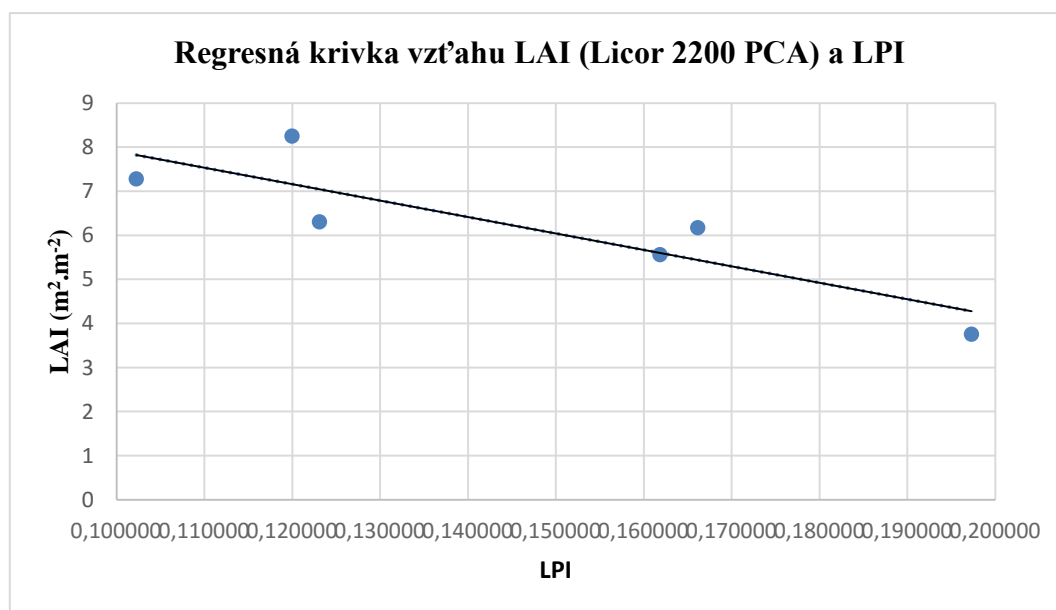
Do regresnej analýzy pre výpočet LAI vstupovala nezávislá premenná LPI a ako závislá premenná množina hodnôt LAI zmeraná prístrojom LAI – 2200 PCA. Výsledný lineárny regresný model vytvorený metódou najmenších štvorcov je popísaný v tab. č. 7 a č. 8.

Tab. č. 7: Štatistické charakteristiky regresného modelu

| | |
|---|--------------|
| Viacnásobný korelačný koeficient R: | 0,871001467 |
| Koeficient determinácie R²: | 0,758643556 |
| Predikovaný korelačný koeficient Rp: | 0,187490797 |
| Stredná kvadratická chyba predikcie MEP: | 1,111710152 |
| Akaikeho informačné kritérium: | -0,489087641 |

Tab. č. 8: Odhady parametrov regresného modelu

| Premenná | Odhad | Smer. odch. | Záver | P- hodnota | Spodná medza | Horná medza |
|------------|-----------|-------------|----------|---------------|-----------------|--------------|
| Abs | 11,64362 | 1,56665572 | Významný | 0,001749 | 7,293890 | 15,99335788 |
| LPI | -37,34365 | 10,5316241 | Významný | 0,023888 | -66,58426 | -8,103040544 |



Obr. č. 12: Regresná krivka vzťahu LPI a LAI

Výsledný regresný model je možné teda popísať ako rovnicu:

$$\text{LAI} = 11,64362413 - 37,34365085 * \text{LPI}$$

Koeficient determinácie R² sa zaokrúhlenou hodnotou 0,76 určuje, že výsledný model vysvetľuje 76 % všetkých zmeraných prípadov (tzv. regresný rabat). Dôležitou súčasťou

regresnej analýzy je štúdium regresného tripletu, teda hodnotenie kvality dát, kvality modelu a kvality metódy odhadu (metóda najmenších štvorcov). V rámci testovania regresného tripletu boli vykonané tieto testy: Fisher - Snedecorov test významnosti modelu, Scottovo kritérium multikolinearity, Cook-Weisbergov test heteroskedasticity, Jarque-Berrův test normality, Waldov test autokorelácie, Durbin-Watsonov test autokorelácie a Znamienkový test reziduií. Na základe týchto testov neboli vyvedené žiadne negatívne závery, ktoré by ovplyvnili vierohodnosť regresných modelov.

6.3.2. Lineárny regresný model vzťahu LiDAR metrík a LAI (Licor 2200 PCA)

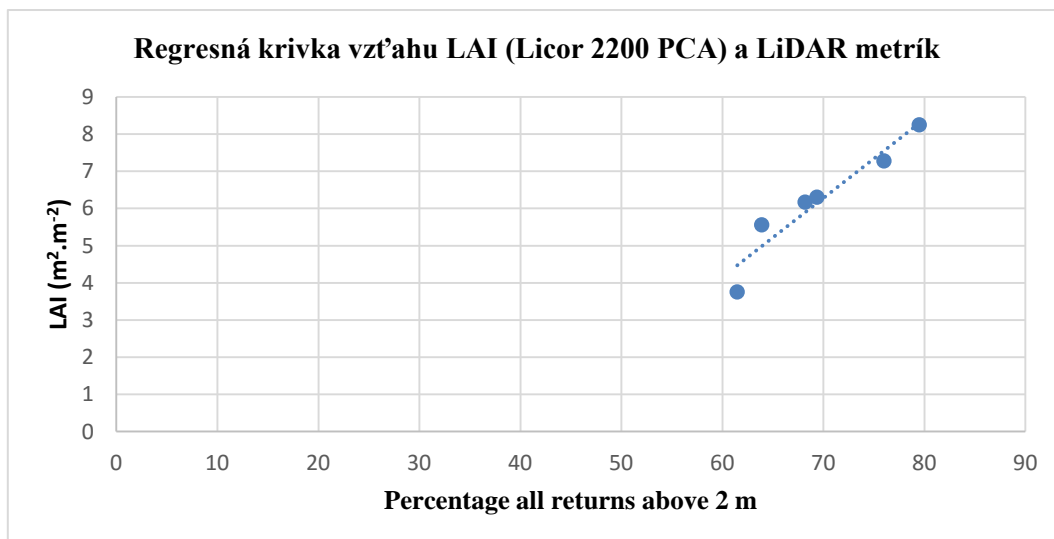
Do regresnej analýzy pre výpočet LAI vstupovala ako nezávislá premenná charakteristika PARA2 (Percentage all returns above 2 m) a ako závislá premenná množina hodnôt LAI zmeraná prístrojom LiCOR LAI – 2200 PCA. Výsledný lineárny regresný model vytvorený metódou najmenších štvorcov je popísaný v tab. č. 9 a č. 10.

Tab. č. 9: Štatistické charakteristiky regresného modelu

| | |
|--|--------------|
| Viacnásobný korelačný koeficient R: | 0,95573158 |
| Koeficient determinácie R² : | 0,913422853 |
| Predikovaný korelačný koeficient Rp : | 0,592072874 |
| Stredná kvadratická chyba predikcia MEP : | 0,452013359 |
| Akaikeho informačné kritérium : | -6,664052147 |

Tab. č. 10: Odhady parametrov regresného modelu

| Premenná | Odhad | Smer.Odch. | Záver | Pravdepod. | Spodná medza | Horná medza |
|-----------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| Abs | 8,552437 | 2,283918 | Významný | 0,02004 | 14,8936132 | -2,211262 |
| PARA2m | 0,211835 | 0,032608 | Významný | 0,002896 | 0,12129919 | 0,3023723 |



Obr. č. 13: Regresná krivka vzťahu LiDAR metriky a LAI (LiCor 2200 PCA)

Výsledný regresný model je možné teda popísať ako rovnicu:

$$\text{LAI} = -8,552437937 + 0,2118357793 * \text{Percentage all returns above 2 m}$$

Koeficient determinácie R^2 o zaokrúhlenej hodnote 0,91 určuje, že výsledný model vysvetľuje 91 % všetkých zmeraných prípadov (tzv. regresný rabat). Ďalej bol testovaný regresný triplet (vid vyššie) a na základe týchto testov neboli vyvedené žiadne negatívne závery, ktoré by ovplyvnili vierohodnosť regresných modelov.

6.3.3. Lineárny regresný model vzťahu LPI a LAI (SLA)

Do regresnej analýzy pre výpočet LAI vstupovala nezávislá premenná LPI a ako závislá premenná množina hodnôt SLA. Výsledný lineárny regresný model vytvorený metódou najmenších štvorcov je popísaný v tab. č. 11 a č. 12.

Tab. č. 11: Štatistické charakteristiky regresného modelu

| | |
|--|-------------|
| Viacnásobný korelačný koeficient R : | 0,362919675 |
| Koeficient determinácie R^2 : | 0,131710691 |
| Predikovaný korelačný koeficient R_p : | 1,481521778 |
| Stredná kvadratická chyba predikcie MEP : | 6,474895104 |
| Akaikeho informačné kritérium : | 9,582801824 |

Tab. č. 12: Odhady parametrov regresného modelu

| Premenná | Odhad | Smer. | | P- hodnota | Spodná medza | Horná medza |
|------------|----------|---------|------------|---------------|-----------------|----------------|
| | | odch. | Záver | | | |
| Abs | 11,53358 | 3,62649 | Významný | 0,03352 | 1,464805 | 21,60235 |
| LPI | -18,9898 | 24,3787 | Nevýznamný | 0,47952 | -86,676 | 48,69646 |

Koeficient determinácie R^2 so zaokrúhlenou hodnotou 0,13 určuje, že výsledný model vysvetľuje 13 % variability dát (tzv. regresní rabat). Ďalej bol testovaný regresný triplet (vid vyššie) a na základe Fisher - Snedecorovho testu bol model vyhodnotený ako nevýznamný, výsledky ostatných testov boli v poriadku.

6.3.4. Lineárny regresný model vzťahu LiDAR metrik a LAI (SLA)

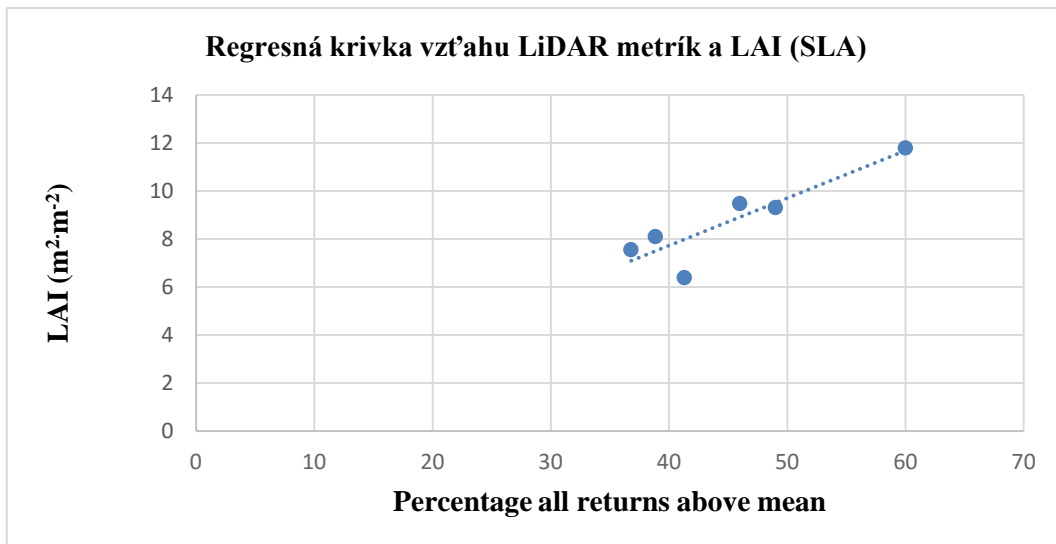
Do regresnej analýzy pre výpočet LAI vstupovala ako nezávislá premenná charakteristika PARAM (Percentage all returns above mean) a ako závislá premenná množina hodnôt SLA. Výsledný lineárny regresní model vytvorený metódou najmenších štvorcov je popísaný v tab. č. 13 a č. 14.

Tab. č. 13: Štatistické charakteristiky regresného modelu

| | |
|--|----------|
| Viacnásobný korelačný koeficient R : | 0,894856 |
| Koeficient determinácie R^2 : | 0,800767 |
| Predikovaný korelačný koeficient R_p : | 0,53648 |
| Stredná kvadratická chyba predikcie MEP : | 0,781342 |
| Akaikého informační kritérium : | -1,24949 |

Tab. č. 14: Odhady parametrov regresného modelu

| Premenná | Odhad | Smer.odch. | Záver | Pravdepod. | Spodná medza | Horná medza |
|--------------|---------|------------|----------|------------|-----------------|----------------|
| PARAM | 0,19377 | 0,007419 | Významný | 1,54E-06 | 0,174707 | 0,21285 |



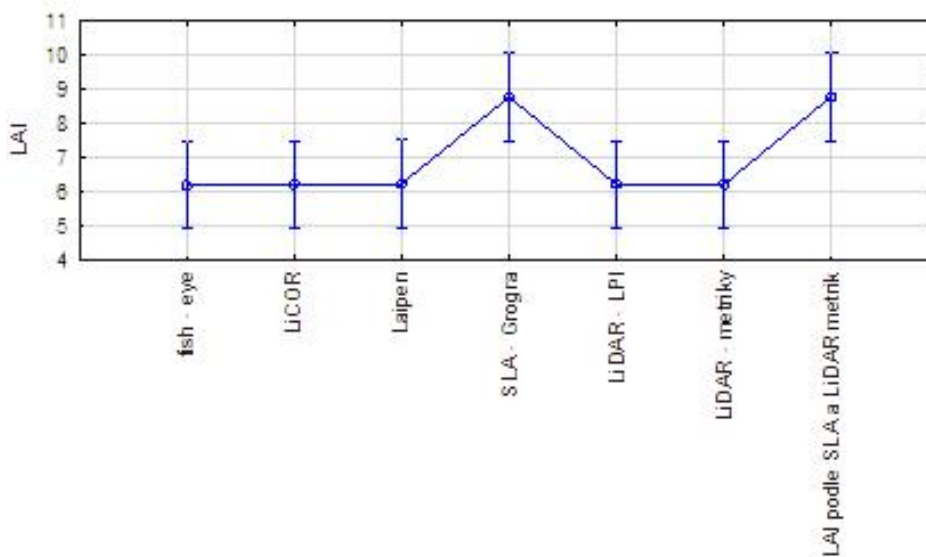
Obr. č. 14: Regresná krivka vzťahu LiDAR metrik a LAI (SLA)

Výsledný regresný model je teda možné popísať ako rovnicu:

$$SLA = 0,193779 * \text{Percentage all returns above mean}$$

Koeficient determinácie R^2 o zaokrúhlenej hodnote 0,80 určuje, že výsledný model vysvetľuje 80 % všetkých zmeraných prípadov (tzv. regresní rabat). Ďalej bol testovaný regresný triplet (vid vyššie) a na základe týchto testov neboli vyvedené žiadne negatívne závery, ktoré by ovplyvnili vierohodnosť regresných modelov.

ANOVA – na úrovni pokusných plôch



Obr. č. 15 ANOVA meraní na úrovni jednotlivých plôch

Scheffeho test je konzervatívny a preto má tendenciu nezamietat' nulovú hypotézu. Na základe Scheffeho testu sa ukázalo, že medzi použitými metódami sa nevyskytuje štatisticky významný rozdiel (tab. č. 15).

Tab. č. 15: Scheffeho post – hoc test premenných veličín LAI na úrovni jednotlivých plôch

| Grupovacie | Fisheye | LiCOR | Laipen | SLA - Grogra | LiDAR - LPI | LiDAR - metriky | LAI podle SLA a LiDAR metrik |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|--------------|-------------|-----------------|------------------------------|
| Fisheye | - | 1,000000 | 1,000000 | 0,251426 | 1,000000 | 1,000000 | 0,249450 |
| LiCOR | 1,000000 | - | 1,000000 | 0,258849 | 1,000000 | 1,000000 | 0,256835 |
| Laipen | 1,000000 | 1,000000 | - | 0,266379 | 1,000000 | 1,000000 | 0,264326 |
| SLA - Grogra | 0,251426 | 0,258849 | 0,266379 | - | 0,258849 | 0,258849 | 1,000000 |
| LiDAR - LPI | 1,000000 | 1,000000 | 1,000000 | 0,258849 | - | 1,000000 | 0,256835 |
| LiDAR - metriky | 1,000000 | 1,000000 | 1,000000 | 0,258849 | 1,000000 | - | 0,256835 |
| LAI podle SLA a LiDAR metrik | 0,249450 | 0,256835 | 0,264326 | 1,000000 | 0,256835 | 0,256835 | - |

6.4. Vertikálna distribúcia lístia

V tabuľkách číslo 16 – 24 sa nachádzajú výsledky meraní vertikálnej distribúcie lístia vzorkových stromov 1 – 9. Zmerané boli jednotlivé plochy lístia v metrových sekciách a následne sa vypočítalo percentuálne zastúpenie listovej plochy.

Z našich vzorkových stromov (VS) je nutné usúdiť, že na ich základe sa nedá vyvodit' žiadny lineárny vzťah. Vzorky č. 9 a 5 majú rovnaký obvod, no úplne iné rozvrstvenie lístia pozdĺž kmeňa, dokonca vzorkové stromy č. 5 je o 3 metre nižší než č. 9. Ešte aj VS 1 a VS 7 sa v obvode líšia o 0,5 cm, vo výške len o 1,3 metra a distribúcia je nekompromisne rozdielna. Môžeme konštatovať, že tretina stromov začína nahadzovať korunu v druhej polovici celého kmeňa, ostatné dve tretiny majú začiatok koruny pod polovicou tela stromov. U nadpolovičnej väčšiny vzorkových stromov môžeme usúdiť, že objem lístia na začiatok koruny je najmenší, následne plynulo prechádza do stredu koruny, kde je alokácia lístia najväčšia a napokon nasleduje ukončenie koruny, čo býva štandardne špička stromu (neplatí pre VS 9), kde je lístia o niečo menej ako na začiatku koruny. Toto tvrdenie napríklad neplatí

pre VS 8 a VS 9, na ktorých je lístie najviac nahromadené na začiatku koruny a pre VS 5, kde je najviac lístia na koncových častiach koruny.

Tab. č. 16: VS č. 1

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 4-5 | 2248,14 | 0,50 |
| 5-6 | 3852,718 | 0,86 |
| 6-7 | 3311,222 | 0,74 |
| 7-8 | 18654,14 | 4,16 |
| 8-9 | 10415,52 | 2,32 |
| 9-10 | 50446,39 | 11,25 |
| 10-11 | 134848,5 | 30,08 |
| 11-12 | 132960,8 | 29,66 |
| 12-13 | 84119,89 | 18,76 |
| 13-14 | 7476,957 | 1,67 |

Tab. č. 21: VS č. 6

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 1-2 | 108,7943 | 0,22 |
| 2-3 | 206,0692 | 0,42 |
| 3-4 | 2805,44 | 5,67 |
| 4-5 | 3090,246 | 6,24 |
| 5-6 | 3987,653 | 8,06 |
| 6-7 | 15797,91 | 31,92 |
| 7-8 | 8581,793 | 17,34 |
| 8-9 | 8434,008 | 17,04 |
| 9-10 | 6487,424 | 13,11 |

Tab. č. 17: VS č. 2

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 7-8 | 2577,79 | 1,57 |
| 8-9 | 27328,36 | 16,59 |
| 9-10 | 50740,64 | 30,81 |
| 10-11 | 69383,48 | 42,13 |
| 11-12 | 14666,26 | 8,91 |

Tab. č. 22: VS č. 7

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 9-10 | 35335,99 | 13,19 |
| 10-11 | 27757,04 | 10,36 |
| 11-12 | 41573,02 | 15,51 |
| 12-13 | 36810,3 | 13,74 |
| 13-14 | 91642,19 | 34,20 |
| 14-15 | 27633,32 | 10,31 |
| 15-16 | 7204,978 | 2,69 |

Tab. č. 18: VS č. 3

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 6-7 | 2519,824 | 1,70 |
| 7-8 | 9662,681 | 6,54 |
| 8-9 | 50494,61 | 34,17 |
| 9-10 | 61038,16 | 41,30 |
| 10-11 | 24078,01 | 16,29 |

Tab. č. 23: VS č. 8

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 6-7 | 8760,691 | 9,88 |
| 7-8 | 51667,46 | 58,26 |
| 8-9 | 28015,96 | 31,59 |
| 9-10 | 236,7876 | 0,27 |

Tab. č. 19: VS č. 4

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 8-9 | 3753,028 | 15,33 |
| 9-10 | 13289,3 | 54,28 |
| 10-11 | 7441,42 | 30,39 |

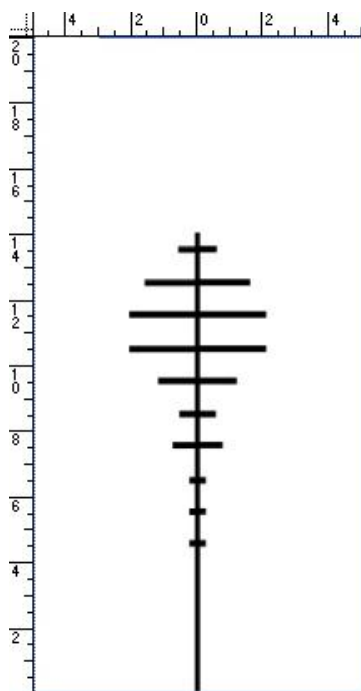
Tab. č. 24: VS č. 9

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 6-7 | 16844,2 | 57,33 |
| 7-8 | 6981,388 | 23,76 |
| 8-9 | 5557,33 | 18,91 |
| 9-10 | 0 | 0,00 |

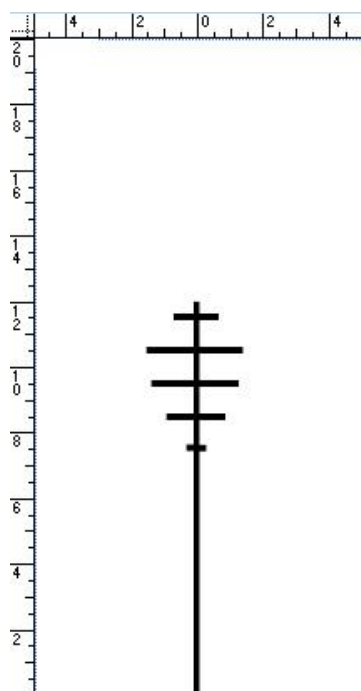
Tab. č. 20 VS č. 5

| sekcia | plocha (cm ²) | podiel (%) |
|--------|---------------------------|------------|
| 3-4 | 8230,784 | 15,68 |
| 4-5 | 7475,164 | 14,24 |
| 5-6 | 32077,33 | 61,10 |
| 6-7 | 4716,759 | 8,98 |

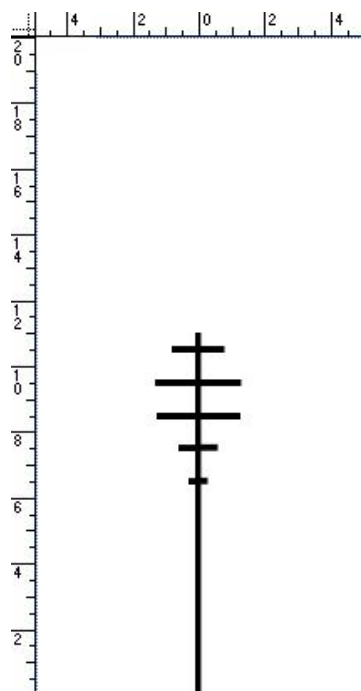
Grafické znázornenie vertikálnej distribúcie listovej plochy je zobrazené na obrázkoch 16 – 24.



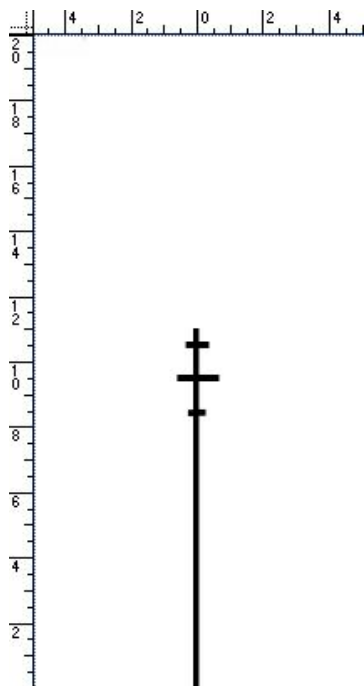
Obr. č. 16: VS 1



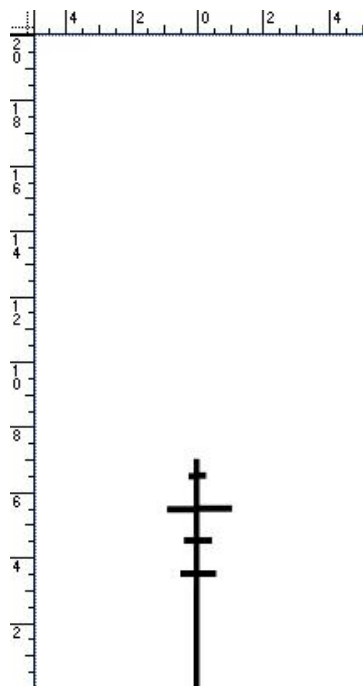
Obr. č. 17: VS 2



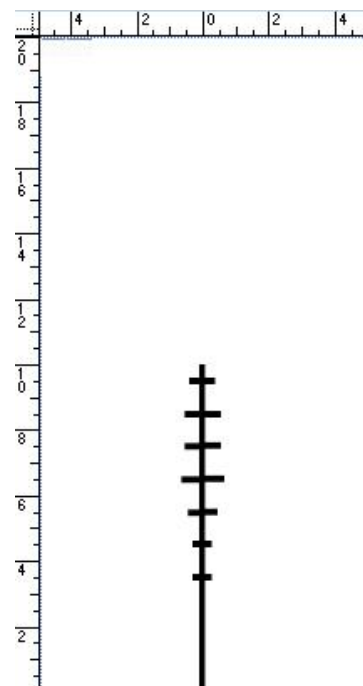
Obr. č. 18: VS 3



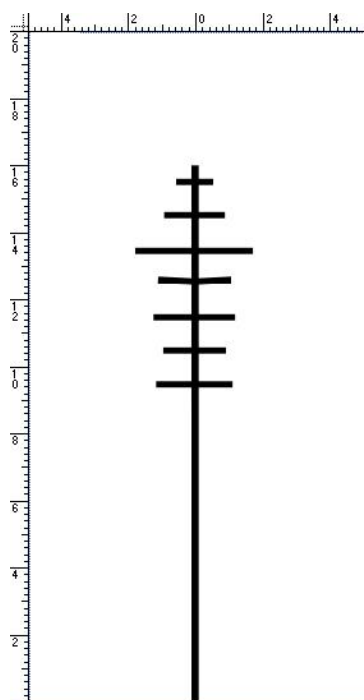
Obr. č. 19: VS 4



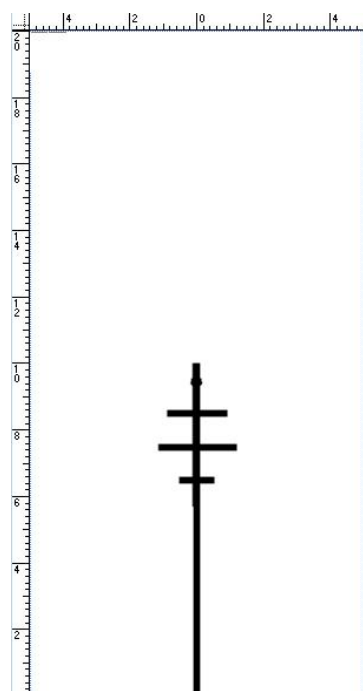
Obr. č. 20: VS 5



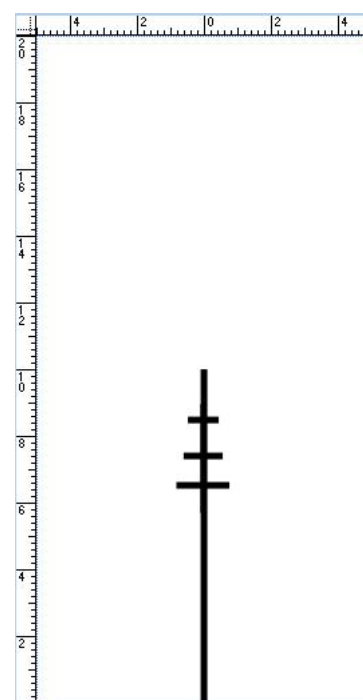
Obr. č. 21: VS 6



Obr. č. 22: VS 7



Obr. č. 23: VS 8



Obr. č. 24: VS 9

Matematický model medzi rozdelením lístia v korunách stromov nebolo možné určiť na takto malej vzorke. Aj stromy s podobným obvodom majú distribúciu LAI diametrálne rozličnú. Bolo by potrebné nazbierať dáta z viac jedincov, ktoré rastú v rovnakých podmienkach.

7. Diskusia

7.1. Maximálny LAI a porovnanie metód

V našich podmienkach, na našich pokusných plochách bola amplitúda LAI rozličná podľa použitej metódy. Prístupy k zisťovaniu LAI optickými nepriamymi metódami boli veľmi podobné. Pre prístup s použitím hemisférických fotografií sa pohybovali hodnoty LAI v rozmedzí $3,76 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ až $8 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Pre LiCor 2200 PCA boli namerané hodnoty v rozpätí $3,76 - 8,26 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ a pre LaiPen $3,69 - 8,06 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Použitie systému LiDAR bolo možné dvoma spôsobmi, a to buď rozdelením snímky na pixle s veľkosťou $5,5 \text{ m}$ alebo pomocou metrik. Meranie LiDAR pixelovým spôsobom malo amplitúdu hodnôt od $4,28 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ po $7,83 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ a pomocou spôsobu s použitím metrik $4,47 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ až $8,29 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Nami stanovená referenčná metóda pomocou alometrického vzťahu listovej plochy a obvodov vzorkových stromov vyplývala z deštrukčnej metódy. Rozsah hodnôt pre tento prístup bol $6,40 - 11,80 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

V publikácii od Bréda (2003) sú porovnané maximálne hodnoty LAI s opadomermi pomocou zariadenia LAI 2000 PCA, ktorý je tomu nami použitému (LAI 2200 PCA) veľmi podobný s opadomermi. Merania prebiehali vo veľmi podobných podmienkach na siedmich pokusných plochách s čistým zastúpením buku vo vekovom rozmedzí od 21 do 88 rokov. Pre naše merania sú ideálne dve pokusné plochy s vekom 21 a 25 rokov. Na mladšej ploche bola hodnota LAI získaná opadomermi (priama metóda) $5,9 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, čo je dobre porovnateľné pre použitie priamej metódy najmä s našou plochou číslo 5. Najvyššia hodnota pri našom výskume priamou metódou bola dosiahnutá na ploche č. 1, $11,80 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Tieto rozdiely sú spôsobené najmä použitou metódou, kedy dochádza k rozdielu medzi deštrukčným spôsobom a následným vyvedením alometrického vzťahu oproti použitiu opadomero. Výsledky získané prístrojom LAI 2000 PCA v autorkinej práci boli od $4,2$ až $5,2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, čo je podobné našim výsledkom. Rozdielnosť výsledkov môže byť zapríčinená aj hustotou porastu, pričom v našich porastoch je hustota 2850 jedincov/ha, no bohužiaľ v tejto publikácii nie je táto informácia uvedená. Podobná je aj odchýlka priamych a nepriamych metód, kedy LAI 2200 PCA podhodnocuje priamy prístup v priemere o 32% . V našej práci je odchýlka tohto prístupu $28,84 \%$, pričom nepriama metóda podhodnocuje priamu a celkové priemerné podhodnotenie nepriamych spôsobov oproti deštrukčnému spôsobu bolo $28,46 \%$. Hodnoty LAI pre metódu LAI 2200 PCA, hemisférických fotografií a opadomero stanovila

Mussche (2011) v rozpätí od 3,68 až po 5,08 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ pre porast so zastúpením buku 50 %. Najvyššiu hodnotu dosahovali práve opadomery. Tieto hodnoty sú oproti našim nižšie, niekedy až o polovicu. Táto skutočnosť je spôsobená tým, že v zime pred meraním tejto výskumníčky bola vykonaná prebierka s neznámou intenzitou, no zápoj sa ňou stal otvorenejší. Podhodnotenie hemisférických fotografií bolo 27,55 % a systému LAI 2200 PCA 21,65 % oproti opadomerom. Napriek rozličnému priamemu prístupu je podhodnotenie blízke nami dosiahnutému. Priemerné podhodnocovanie LAI 2200 PCA oproti opadomerom stanovil Cutini et al. (1998) na 29,57 %, čo je s našim rozdielom priamych a nepriamych prístupov dokonale zlučiteľné aj napriek rozdielnej aplikácii direktívnej metódy. S použitím opadomerov namerali hodnoty v rozmedzí 6,29 – 7,40 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Prístrojom LAI 2200 PCA namerali hodnoty 4,04 až 5,80 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Tieto výsledky sú výborne porovnateľné, na niektorých pokusných plochách (plocha č. 4) až totožné. Rozdiel medzi priamymi metódami je spôsobený rozdielnym prevedením priameho prístupu. Skoro totožné prírodné podmienky sa vyskytovali v mojej bakalárskej práci (Haninec, 2013). Rozdiel bol akurát v hustote porastu (3500 jedincov na hektár) a vo veku porastu (17 rokov). Hodnota LAI dosiahnutá pomocou LAI 2200 PCA bola 5,06 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ a pomocou opadomerov 5,64 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, čo bol zároveň maximálny nameraný LAI na tejto ploche. Tieto hodnoty sú dobre zrovnateľné s našou plochou číslo 4. Podhodnotenie voči opadomerom bolo len 11,0 %, pričom na našej ploche podhodnotil LAI 2200 PCA priamu metódu až o 41,30 %. Tieto rozdiely v odchýlke sú spôsobené najmä odlišnosťami v použitých priamych metódach. V tejto práci z roku 2013 bola použitá ešte ihlicová metóda (needle method), ktorá vykazuje oproti opadomerom štatisticky významný rozdiel a podhodnocuje opadomery o viac ako 40,00 % a v jednom prípade dokonca nadhodnocuje o 13,00 %. Takáto anomália sa v našom výskume nevyskytla. Alometrické vzťahy biomasy a listovej plochy buku zobrazoval Bartelink (1997). Rozmedzie výsledkov LAI v tejto práci sa pohybovali od 5,5 po 7,2 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Na tieto hodnoty bola použitá deštrukčná metóda, rovnako ako v našom výskume. Tieto hodnoty sú podobné ako na našich plochách číslo 3 a 5. Rozdiely na ostatných plochách môžu byť spôsobené napríklad hustotou, či homogenitou porastu, ktorá bohužiaľ nie je bližšie špecifikovaná. Hodnoty sa môžu líšiť aj kvôli veľkosti pokusných plôch, kde autor použil plochy s rozlohou 250 až 1000 m^2 . Zároveň aj počet vzorkových stromov bol vyšší (81), čím mohol eventuálne dosiahnuť väčšiu presnosť. Iná listová plocha, okrem týchto faktorov, mohla byť zapríčinená aj iným SLA, kedy v jeho práci dosahoval priemer 172 $\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. My sme dosahovali hodnotu 228 $\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, čo automaticky spôsobuje vyššiu hodnotu indexu plochy listovej.

Hodnoty LAI 2000 PCA stanovuje na 5,3 – 5,9 m².m⁻² Soudani (2006) vo svojej práci na stanoviskách buku s hustotou 3400 jedincov.ha⁻¹. Tieto hodnoty sú výborne porovnateľné s našimi skoro na všetkých plochách.

7.2. LiDAR

Boli vytvorené tri regresné modely s koeficientmi determinácie od 0,76 do 0,91, pričom vyššie koeficienty dosahovali modely obsahujúce LiDAR metriky ako nezávislé premenné. Pre výpočet LAI na základe SLA bol vytvorený model na základe LPI s koeficientom determinácie len 0,13.

Najvýznamnejší vplyv na úspešnosť vytvorenia regresných modelov mala použitá veľkosť pixlu rastrov, čo potvrdzuje aj Mikita et al. (2014). Na základe korelačnej analýzy medzi metódami výpočtu LAI a rôznym rozlíšením rastru LPI indexu bol vybraný raster s rozlíšením 5,5 m. Zároveň boli vyrezané štvorcové pokusné plochy s rovnakou veľkosťou z mračna bodov. Tieto vyrezané mračná bodov potom slúžili pre výpočet LiDAR metrik v softwari Fusion. Vzhľadom k hustote bodového mračna nebolo možné vytvoriť raster s vyšším rozlíšením, ako 4 m. Pri vyššom rozlíšení sa totiž v rastru vyskytovalo príliš mnoho prázdnych pixlov, pretože na menšej ploche pixlov už nemusel na terén prepadnúť ani jeden bod. Napr. Mikita et al. (2014) mohol použiť raster s najmenšou veľkosťou pixlu 15 m, pretože mal k dispozícii dáta LLS o hustote iba 4,32 bodov.m⁻². Riaño et al. (2014) uvádzajú, že predikcia LAI je všeobecne lepšia v listnatých než ihličnatých porastoch. Barilotti et al. (2006) vytvorili regresný model pre výpočet LAI s koeficientom determinácie 0,89, pričom terénne meranie realizovali iba nepriamou metódou pomocou prístroja LiCOR LAI 2200 PCA, ale merania vykonali na plochách: 15 transektov s výmerou 400 m², 2 transekty o výmere 1000 m² a 3 transekty o výmere 10 000 m². Regresný model s koeficientom determinácie 0,64 vytvoril Musselman et al. (2013), ktorý vykonal 24 meraní LAI pomocou analýzy hemisférických fotografií. Uvádza, že je výhodnejšie spraviť viacnásobný prelet so skenerom nad porastom, s požadovanou vyššou hustotou bodového mračna, ktorá je zmienená vyššie. Kwak et al. (2007) vytvorili rovnice závislosti LAI a LPI pre tri dreviny. Koeficient determinácie 0,73 dosiahol u dreviny *Larix leptolepis* Sieb. et Zucc., u drevín *Quercus spp.* a *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. dosiahol koeficient determinácie 0,81. Tiež použil iný index než LPI (LII – Laser Interception Index), kvôli čomu dosiahol vyššie koeficienty determinácie (0,85 – 0,88). Pre referenčné terénne meranie využil prístroj

AccuPAR 80 Linear PAR/LAI Ceptometer. Peduzzi et al. (2012) vytvoril regresný model pre zmiešané lesy v Virgínii, ktorý vysvetľoval 69% variability LAI. V kombinácii s dátami radarovej interferometrie vytvoril model s koeficientom determinácie 0,77. Odhad LAI z dát LLS v porastoch postihnutých defoliáciou a nim vytvorené modely mali veľmi vysoké koeficienty determinácie od 0.92 do 0.94 (Solberg, 2010). Vyššia hodnota mohla súvisieť s menším vzájomným prekrytím sa listov a s lepšou priepustnosťou laserového lúča porastom. Letecké laserové skenovanie veľmi dobre koreluje s hemisférickými snímkami (koeficient determinácie 0,82), čo sa dá vzťahovať na všetky optické metódy všeobecne (Alonzo et al., 2015).

Vypočítané modely sú platné len na regionálnej úrovni, prípadne na úrovni podobných lesných porastov, tzn. porastov s podobnou drevinnou skladbou a vekom. To isté uvádza aj Pirotti (2011). Regresné modely tu publikované dosahujú obdobný regresný rabat, ako modely iných autorov. Žiadny autor sa však nepokúšal z dát LLS počítať LAI na základe SLA, všetci použili ako závislú premennú LAI vypočítaný na základe nepriamych metód. V budúcnosti by bolo vhodné overiť vytvorené regresné modely v tejto práci v ďalšom terénnom meraní.

7.3. UAV

Vypočítať LAI pomocou snímkovania vo viditeľnom spektre fotoaparátom neseným UAV sa ukázalo ako nemožné a to obomi použitými spôsobmi. Prvý spôsob založený na fotogrammetrickom mračne bodov nevedol k požadovaným výsledkom najmä z dôvodu toho, že počet bodov tohto mračna nijak nekorešponduje s hustotou vegetácie. Software Agisoft Photoscan totiž bod vytvorí na mieste, ktoré vyhodnotí ako identické na dvoch alebo viacerých snímkach. Na rozdiel od leteckého laserového skenovania sa body nevytvárajú aj vo vnútri koruny, ale len na jej povrchu. Vertikálna variabilita LAI mladého bukového porastu je však vysoká.

Druhý spôsob založený na analýze DN hodnôt červeného, zeleného a modrého kanálu neposkytoval požadované výsledky predovšetkým z dôvodu vysokej vertikálnej variability LAI. V budúcnosti bude vykonané snímkovanie bezpilotným hexakopterom DJI Spreading Wings, ktorý umožňuje niesť dva fotoaparáty, z nich jeden snímkuje vo viditeľnom a druhý v infračervenom spektre.

Potom by bolo možné spočítať NDVI (normalizovaný diferenční vegetační index) podľa nasledujúceho vzorca:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (4)$$

kde NIR je spektrálna odrazivosť v infračervenom spektre a RED je spektrálna odrazivosť v červenom spektre (Rouse et al., 1973). Pomocou tohto indexu by mali byť dosiahnuté o niečo lepšie výsledky, napriek tomu je však otázkou, či budú dostačujúce a to znovu z dôvodu veľkej vertikálnej variability LAI. Jediným spoľahlivým riešením by preto bolo využiť UAV ako nosiče pre laserový skener alebo radar InSAR (Interferometric synthetic aperture radar).

Letecké laserové skenovanie predstavuje veľmi vhodnú technológiu pre plošné mapovanie distribúcie LAI, čo potvrdzujú mnohé staršie štúdie (napr. Riaño et al., 2004; Barilotti et al., 2006; Kwak et al., 2007; Solberg, 2010; Korhonen et al., 2011; Peduzzi et al., 2012; Musselman, 2013; Mikita et al., 2014; Alonzo et al., 2015).

7.4. Vertikálna distribúcia lístia

Z našich vzorkových stromov (VS) je nutné usúdiť, že na ich základe sa nedá vyvodit' žiadny lineárny vzťah. Na to, aby sa pomocou systému LiDAR dala stanoviť vertikálna distribúcia porastov, či dokonca celých lesných celkov, musí byť toto meranie doplnené práve o below – canopy (podporastové) meranie, z ktorého sa vyvodí príslušný lineárny vzťah, ktorý tento systém berie ako referenčnú „odrazovú plochu“ a následne je schopný zmerať a zobraziť túto distribúciu. Aby sa tento lineárny vzťah dal odvodiť, bolo by nutné zmerať niekoľkonásobne väčší počet vzorových stromov deštrukčnou metódou ako napríklad Bartelink (1997), ktorý síce použil 81 vzorových stromov, no bohužiaľ nehodnotil rozvrstvenie lístia, ale alometrické vzťahy biomasy. V našej práci nie je tento počet splnený a preto nie je možné vytvoriť presný matematický vzťah vertikálnej roviny lístia v korunách stromov. Pri použití podobného počtu vzorkových stromov v dospelom poraste sa nepodarilo vytvoriť konzistentný matematický vzor (Hedman, 1988). O niečo jednoduchšia je problematika vertikálnej distribúcie lístia v ihličnatých porastoch (Vose, 2005). Po spracovaní vhodného počtu vzorkových stromov prišiel na matematický vzťah, no tento sa diametrálne líšil na 4 plochách. Sám uvádza, že v tejto problematike pri zmiešaných alebo dokonca čisto listnatých porastoch vzniká veľký problém tohto stanovenia, a to kvôli veľkej rozdielnosti

rastu, či schopnosti drevín znášať tieň a tým meniť tvary svojej koruny. Tieto početné rozdiely zamedzujúce vytvoreniu vhodného modelu a vyžadujúce si väčší počet vzorkových stromov sú spôsobené špecifikami rastu jednotlivých jedincov, nakoľko každý jedinec rastie v iných podmienkach čo sa týka svetla, tepla, vlahy a vlhkosti, či sklonu svahu. Rovnako aj Nelson (2015), ktorý vytvoril niekoľko modelov vertikálnej distribúcie LAI nie pre špecifickú drevinu, ale pre porast (pokusnú plochu) ako celok, zobrazuje krivky LAI po 20 cm segmentoch zmiešaných porastov na pokusných plochách do veku 7 rokov. Najväčšie problémy určenia presného modelu pre tieň znášajúce drvinu pripisuje práve týmto svetelnostným nárokom a konkurenciou o prísun svetla.

Buk je drevena znášajúca silné zatienenie, čo môže mať za následok, že aj čisté bučiny majú niekoľko vrstiev, pretože aj potlačení jedinci vydržia dlho v poraste. Preto aj na priaznivých stanoviskách má buk tendenciu vytlačovať väčšinu ostatných drevín, čo má za následok vznik čistých bučín. Množstvo dopadajúceho žiarenia má zásadný vplyv na rýchlosť fotosyntézy. V podmienkach konštantnej koncentrácie CO², v ktorých je sa mení iba hodnota fotosynteticky aktívnej radiácie (FAR), dochádza so zvyšujúcim sa FAR k zrýchleniu asimilácie (Brooks et al., 1994; Holišová et al., 2012). Marek et al. (2011) uvádzajú, že s nízkou intenzitou dopadajúceho žiarenia, nižšie ako 250 μmol (fotónov m⁻².s⁻¹), dochádza k limitácii fotosyntézy množstvom dopadajúceho svetla. Priestorové usporiadanie rastlinného porastu alebo koruny drevín ovplyvňuje prenikanie svetla k listom. Na základe odlišného ožiarenia sa vytvárajú štruktúry prispôbosené danej intenzite dopadajúceho svetla, rozlišujeme tienisté a slnečné listy. Za prirodzených podmienok sa množstvo dopadajúceho svetla líši naprieč porastom a väčšina listov v korunách stromov, je vystavená premenlivej intenzite dopadajúceho žiarenia (Urban et al., 2007). Štruktúra listov je vytváraná v závislosti na podmienkach ožiarenia. Všeobecne môžeme v listoch pozorovať jednu až tri vrstvy palisádového parenchýmu, tienisté listy mávajú len jednu vrstvu. Listy rastúce v podmienkach s veľkým ožiarením majú bunky palisádového parenchýmu vyššie (Slaton et al., 2002). Celková mocnosť slnečných listov dosahuje vyššie hodnoty než listov rastúcich v tienistých podmienkach (Ziegenhagen et al., 1995). Rovnako tak dochádza pri vyššom ožiarení k zväčšeniu listovej plochy. Hmotnosť pigmentov vzťahnutá na hmotnosť listu sa výrazne mení s typom listia, pre slnečné listy dosahuje nižšie hodnoty, než pre tienisté (Uemura et al., 2000). Z toho vyplýva, že aj SLA tienistých listov je väčšie. To možno vysvetliť tým, že slnečné listy mávajú spravidla vyššiu mocnosť (Ziegenhagen et al., 1995) a celkovú vyššiu hmotnosť sušiny na jednotku plochy liste ako listy tienisté (Niinemets et al., 2010).

8. Záver

Okrem existencie indexu listovej plochy ako parametru vstupujúceho do mnohých ekofyzilogických modelov, je možné ho chápať aj ako kvantifikátor olistenia lesných porastov. Prínosom tejto práce je porovnanie siedmich rôznych metód, ktoré sa líšia použitím, či princípom merania. Ukázalo sa, že všetky nepriame prístupy k stanoveniu LAI podhodnocovali priamu metódu vyplývajúcu z deštrukčnej metódy a následného vyvodenia alometrického vzťahu medzi obvodom vzorkových stromov a ich SLA. Metódy stavenia LAI s použitím hemisférických fotografií, spracovaných v programe WinScanopy, prístroja LiCor LAI 2200 Plant Canopy Analyser, ktorého výsledky boli spracované v programe FV 2200 a prístroja LaiPen podhodnocovali priamu metódu navzájom štatisticky nevýznamne, ba dokonca skoro totožne, priemerne o 28,73 %.

Na určovanie LAI z dát leteckého laserového skenovania bol použitý tzv. LiDAR penetration index a LiDAR metriky, ktoré boli vypočítané v software Fusion. Následne boli vytvorené regresné modely pre výpočet LAI. Týmto modelom predchádzalo terénne meranie a pre vytvorenie týchto modelov bola použitá deštrukčná metóda a LAI 2200 PCA, ktoré boli použité ako závislé premenné. Regresný model vzťahu LPI a LAI 2200 PCA a vzťahu LiDAR metrik a LAI 2200 vykazovali koeficienty determinácie 0,76 a 0,91. Vzhľadom na nízku koreláciu medzi LPI a deštrukčnou metódou nebolo možné vytvoriť model, ktorý by bol štatisticky významný. Vzťah medzi LiDAR metrikami a deštrukčnou metódou ukázal koeficient determinácie 0,80. Tieto dva spôsoby určovania, podobne ako terénne optické metódy, podhodnocovali priamy prístup o 27,57 % (LPI) a o 28,28 % (LiDAR metriky). Využitie LLS spolu s terénnym meraním sa ukázalo ako veľmi efektívne s použitím následnej korekcie.

Vypočítať LAI pomocou snímkovania vo viditeľnom spektre fotoaparátom neseným UAV sa ukázalo ako nemožné a to dvoma spôsobmi. Prvý spôsob založený na fotogrammetrickom mračne bodov nevedol k požadovaným výsledkom najmä z dôvodu toho, že počet bodov tohto mračna nijak nekorešponduje s hustotou vegetácie. Druhý spôsob založený na analýze DN hodnôt červeného, zeleného a modrého kanálu neposkytoval požadované výsledky predovšetkým práve z dôvodu vysokej vertikálnej variability LAI. Jediným spoľahlivým riešením by preto bolo využiť UAV ako nosiče napríklad pre laserový skener.

Pre vzorkové stromy sa vytvorili jednotlivé modely, ukazujúce vertikálnu distribúciu LAI v jednotlivých metrových sekciách. Nebolo však možné vytvoriť všeobecný matematický model, pretože variabilita vertikálnej distribúcie LAI je tak vysoká, že by bolo nutné zvoliť niekoľkonásobne väčší počet stromov. Pre zobrazenie zvislého rozvrstvenia lístia v porastoch s použitím leteckého laserového skenovania je nutné vykonať terénne meranie na veľmi veľkom počte jedincov. Výsledky tohto merania systém LiDAR následne používa ako referenčnú hodnotu.

Prístupy stanovenia LAI pomocou LLS sú najnovšie, no najrýchlejšie sa vyvíjajúce. V budúcnosti sa bude dať diaľkové meranie LAI použiť na hodnotenie zdravotného stavu lesných porastov v dôsledku defoliácie drevín vykonať veľmi jednoducho, pomocou krátkych preletov. Pri každoročnom, alebo minimálne periodickom meraní LAI leteckým spôsobom by bolo možné stanovovať aj časy vstupov do porastov za účelom výchovných ťažieb.

9. Summary

In addition to the existence of the leaf area index as a parameter entering into the many ecophysiological models, it can be understood as a quantifier of the forest canopy. The contribution of this work is to compare seven different methods which differ on the measurement principle. It was found that all indirect approaches of estimation the leaf area index underestimated the direct method, which was derivated from the destructive methods and subsequent allometric relationship between the leaf area and the peripemetr of the sample trees. Methods of estimating LAI using hemispherical photography, processed in the WinScanopy software, device LiCor LAI 2200 Plant Canopy Analyzer, the results of which were processed in the FV 2200 program the device LaiPen underestimated direct method not significantly, even almost identical in average of 28.73% .

For the LAI determination from the airborne laser scanning data was used LiDAR penetration index and LiDAR metrics that were calculated in the Fusion software. Subsequently there have been created regression models to calculate LAI. These models were preceded by the terrestrial measurements and for the creation of these models there have been used destructive method and the approach using a LAI 2200 PCA device, which were used as dependent variables. Regression models of the relationship between the LPI and LAI 2200 PCA and the between the LiDAR metrics and LAI 2200 PCA showed determination coefficients of 0.76 and 0.91. Because of the low correlation between the destruction method and the LPI it was not possible to create a model that was statistically significant. The relationship between LiDAR metrics and destruction method showed a coefficient of determination 0.80. These two ways of determining, like terrestrial optical methods, underestimated the direct access of 27.57% (LPI) and 28.28% (LiDAR metrics). Using airborne laser scanning with a cooperation of terrestrial measurements has proved to be very effective with the use of a subsequent correction.

Calculating LAI using the image in the visible spectrum by camera carried by the UAV has proved impossible in two ways. The first method is based on photogrammetric point cloud and has not led to the desired results mainly due to fact that the number of points of the cloud did not correspond with the density of vegetation. The second method was based on analysis of the DN values of red, green and blue channels and it did not provide the desired results mainly just because of the high vertical variability of LAI. The only reliable solution would be to use the UAV as carriers for the laser scanner.

For sample trees the models showing the vertical distribution of LAI per meter sections have been created. However, it was not possible to establish a general mathematical model, since the variability of the vertical distribution of LAI was so high that it would be necessary to select a greater number of sample trees. To view the vertical distribution of leaves in the stands using airborne laser scanning is necessary to perform the terrestrial measurements of a very large number of individuals. The results of this measurement LiDAR system then uses as a benchmark.

LAI determination set out by ALS is the newest but fastest developing. In the future, it will be capable to use the remote LAI measurement to assess the health status due to defoliation of forests done very simply by short flights. By using ALS measurements of LAI yearly or at least periodically we should be able to determine the times of the accessions to the forest stands for the purpose of thinning or felling.

10. Bibliografia

ABER, J.S., MARZLOFF, I., RIES, J.B., 2010. Small-Format Aerial Photography Principles, techniques and geoscience applications. Amsterdam, Elsevier Science, 268 s.

ALONZO, M., BOOKHAGEN, B., MCFADDEN, J. P., SUN, A., ROBERTS, D. R. 2015. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry. *Remote Sensing of Environment*, 162, 141-153

BACHMAN, C.G., 1979. Laser Radar Systems and Techniques. Norwood (MA): Artech House.

BARILOTTI, A., TURCO, S., ALBERTI, G. 2006. LAI determination in forestry ecosystem by lidar data analysis. In: International workshop 3D remote sensing in forestry. 14th–15th Feb. 2006, BOKU, Wien. Wien, BOKU: 248–252.

BENDIG, J., BOLTEN, A., BARETH, G. 2012. Introducing a low-cost mini-UAV for thermaland multispectral-imaging, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1, pp. 345-349.

BOLSTAD, P.V., GOWER, S.T., 1990. Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree Physiol.* 7, s. 115–124.

BOLSTAD, P.V., VOSE, J.M., MCNULTY, S.G. 2001. Forest productivity, leaf area, and terrain in southern Appalachian deciduous forests. *For Sci* 47:419–427.

BÖHM, B. et al., 2010. ANDROMEDA. Anwendung Drohnen-basierter Luftbilder - Mosaikierung, Entzerrung und Datenauswertung; Abschlussbericht des Verbundforschungsprojekts. Hrsg.: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Geoinformatik, Geohydrologie und Modellierung, Jena, Germany.

BRÉDA, N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. Exp. Bot.* 54, s. 2403 – 2417.

BROOKS, J. R., HINCKLEY, T. M., SPRUGEL, D. G., 1994. Acclimation responses of mature abies amabilis sun foliage to shading. *Oecologia* 100(3): 316-324.

BRISTEAU, P., CALLOU, F., VISSIERE, D., PETIT, N., et al., 2011. The navigation and control technology inside the AR Drone micro UAV. In: 18th IFAC World Congress, Milano, Italy. pp. 1477–1484.

BROWN, M.J., Parker, G.G., 1994. Canopy light transmittance in a chronosequence of mixed-species deciduous forests. *Can J For Res* 24:1694–1703.

BRUSA, A., BUNKER, D., 2014. Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195: 102-107.

BRYSON, M., REID, A., RAMOS, F., SUKKARIEH, S., 2010. Airborne vision-based mapping and classification of large farmland environments. *Journal of Field Robotics*, 27, pp. 632–655.

CANHAM, C.D., DENSLOW, J.S., PLATT, W.J., RUNKLE, J.R., SPIES, T.A., WHITE, P.S., 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Can J For Res* 20:620–631.

CUTINI, A., MATTEUCCI, G., MUGNOZZA, G.S., 1998. Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI-2000 in deciduous forests. *Forest Ecol. Manag.* 105, s. 55–65.

DAUGHTRY, C.S.T., 1990. Direct measurements of canopy structure. *Remote Sens. Rev.* 5, s. 45–60.

DOLANSKÝ T., 2004. Lidary a letecké skenování. Ústí nad Labem, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, 100 s.

DUFRENE, E., BRÉDA, N.J.J., 1995. Estimation of deciduous forest leaf-area index using direct and indirect methods. *Oecologia* 104, s. 156–162.

FRAZER, G.W., TROFYMOW, J.A., LERTZMAN, K.P., 1997. A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. Information Report BC-X-373. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC.

HAALA, N., ROTHERMEL, M., 2012. Dense multiple stereo matching of highly overlapping UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX, Part B1, pp. 387-392.

HANINEC, P., 2013. Porovnanie rôznych prístupov k stanoveniu indexu listovej plochy. Bakalárska práca.

HEDMAN, C., W., Binkley, D., 1988, Canopy profiles of some Piedmont hardwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 1090–1093.

HERBERT, T.J., 1986. Calibration of fisheye lenses by inversion of area projections. *Appl. Optics* 25, 1875–1876.

HORN, H.S. 1971. *The adaptive geometry of trees*. Princeton University Press, Princeton

CHASON, J.W., BALDOCCHI, D.D., HUSTON, M.A., 1991. Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf-area. *Agric. For. Meteorol.* 57, s.107–128.

CHEN, J.M., BLACK, T.A., 1991. Measuring leaf-area index of plant canopies with branch architecture. *Agric. For. Meteorol.* 57, s. 1–12.

CHEN, J.M., RICH, P.M., GOWER, S.T., NORMAN, J.M., PLUMMER, S., 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102, s. 17-21.

JAAKOLA, A., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., KUKKO, A., YU, X., KAARTINEN, H., LETHOMÄKI, M., LIN, Y., 2011. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 65, pp. 514–522.

JARVIS, P.G., LEVERENZ, J.W., 1983. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: Lange OS, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (eds) *Physiological plant ecology* IV. Springer, Berlin, pp 233–280.

JONCKHEERE, I., 2004. Consistent determination of leaf area index and quantification of foliage distribution in forest canopies based on digital hemispherical photography. *Dissertationes de Agricultura. Katholieke Universiteit Leuven*, s. 239.

KELCEY, J., Lucieer, A., 2012. Sensor correction and radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX, Part B1, pp. 393-398.

KORHONEN, L., KORPELA, I., HEISKANEN, J., MALTAMO, M. 2011. Airborne discrete-return LiDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 115 (4): 1065–1080.

KWAK, D. A., LEE, W. K., CHO, H. K. 2007. Estimation of LAI using LiDAR remote sensing in forest. In: Rönnholm, P. et al. (eds.): *Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilviLaser*

LANDSBERG, J., 2003. Physiology in forest models: history and the future. *For Biom Model Inf Sci* 1:49–63.

LEBLANC, S.G., FERNANDES, R. CHEN, J.M., 2002. Recent advancements in optical field leaf area index, foliage heterogeneity, and foliage angular distribution measurements, *IGARSS02*

LEFSKY, M.A. et al., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience* 52, 19–30.

LEICA, 2007. Leica ALS50-II Airborne Laser Scanner [online] citováno dne 15. 3. 2012, Leica Geosystems AG, Informační brožura. 4 s. Dostupné na WWW: <http://www.geodis.cz>

LEVERENZ, J., HINCKLEY, T., 1990. Shoot structure, leaf area index and productivity of evergreen conifer stands. *Tree Physiol.* 6:135–149.

LIEFFERS, V.J., STADT, K.J., 1994. Growth of understorey *Picea glauca*, *Calamagrostis canadensis*, and *Epilobium angustifolium* in relation to overstorey light transmission. *Can J For Res* 24:1193–1198.

LIM, K., TREITZ, P., WULDER, M., ST. ONGE, B., FLOOD, M., 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27, 88 – 106.

LOWE, D.G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60, No. 2, pp. 91-110.

MAREK, M. V. et al. 2011. Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. Vyd. 1. Praha : Academia.

MEDLYN, B., BARRET, D., LANDSBERG, J., SANDS, P., CLEMENT, R., 2003. Conversion of canopy intercepted radiation to photosynthate: a review of modelling approaches for regional scales. *Funct Plant Biol* 30:153–169.

MIKITA, T., PATOČKA, Z., SABOL, J. Výpočet indexu listové plochy (LAI) v lesních porostech na základě dat leteckého laserového skenování v podmínkách České republiky. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2014. sv. 59, č. 4, s. 234--242. ISSN 0322-9688. URL: <Http://www.vulhm.cz/sites/File/ZLV/fulltext/364.pdf>

MONSI, M., SAEKI, T., 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.*, 14: 22-52.

MORSDORF, F., KOTZ, B., MEIER, E., ITTEN, K. I., ALLGOWER, B. 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104 (1): 50–61.

MUSSELMAN, K. N., MARGULIS, S. A., NOAH, P. M. 2013. Estimation of solar direct beam transmittance of conifer canopies from airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 136: 402–415.

MUSSCHE, S., SAMSON, R., NACHTERGALE, L., DE SCHRIJVER, A., LEMEUR, R., LUST, N. 2001. A comparison of optical and direct methods for monitoring the seasonal dynamics of leaf area index in deciduous forests. *Silva Fennica* 35, s. 373-384.

MYNEN, R.B., NEMANI, R.R., RUNNING, S.W., 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE T. Geosci. Remote* 35, s. 1380–1393.

NACKAERTS, K., DELAURE, B., EVERAERTS, J., MICHELS, B., HOLMLUND, C., MÄKYNEN, J., SAARI, B. 2010. Evaluation of a lightweight UAS-prototype for hyperspectral imaging. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.

NELSON, A., S., et al., 2015. Effects of species composition, management intensity, and shade tolerance on vertical distribution of leaf area index in juvenile stands in Maine, USA. *European Journal of Forest Research* 134.2 (2015): 281-291.

NIINEMETS, U., 2010. A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research* 25(4): 693-714.

OKER-BLOM, P., PUKKALA, T., KUULUVAINEN, T. 1989. Relationship between radiation interception and photosynthesis in forest canopies: effect of stand structure and latitude. *Ecol Model* 49:73–87.

PARRISH, C.E.; SCARPACE, F.L., 2011. Investigation of Full Waveform Lidar Data for Detection and Recognition of Vertical Objects. In Proceedings of ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, FL, USA, 7–11.

PAVELKA K., FALTÝNOVÁ, M., ŘEZNÍČEK, J., PIKHARTOVÁ, L., SOUKUP, T., ŠUSTERA, J., VOHRADSKÝ, T., 2011. Možnosti monitorování stavu a změn v okolí hlavních komunikací metodami dálkového průzkumu Země a laserového skenování a jejich využití pro realizaci udržitelného rozvoje dopravy. Praha, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 194 s.

PAVLENDÁ, P., PAJTÍK, J., 2009. Monitoring lesov Slovenska. Správa za Forest Focus a ČMS Lesy za rok 2008. Zvolen, NLC-LVÚ, s. 113.

PEDUZZI, A., WYNNE, R. H., THOMAS, V. A., NELSON, R. F., REIS, J. J., SANDORF, M. 2012. Combined use of airborne lidar and DBInSAR data to estimate LAI in temperate mixed forests. *Remote Sensing*, 4 (6): 1758–1780.

PIROTTI, F., 2011. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. *iForest*, 4 (3): 100–106. DOI: 10.3832/ifor0562-004

POKORNÝ, R., 2002. Index listové plochy v porostech lesních dřevin. Dizertačná práca. Brno. MZLU v Brně. s. 135.

RIANO D., VALIADARES, F., CONDÉS, S., CHUEVICO, E., 2004. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (3-4): 269–275.

RICH, P.M., 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sens. Rev.* 5, 13–29.

ROUSE, J. W., R. H. HAAS, SCHELL J., A., DEERING, D., W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309- 317.

RUIMY, A., SAUGIER, B., DEDIEU, G., 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *J Geophys Res Atmos* 99:5263–5283.

SEYMOUR, R.S., KENEFIC, L.S., 2002. Influence of age on growth efficiency of *Tsuga canadensis* and *Picea rubens* trees in mixed-species, multiaged northern conifer stands. *Can J For Res* 32:2032–2042.

SICK, A.G., 2003. Technical Description LMS200. <http://www.sick.de>

SLATON, M. R., SMITH, W. K., 2002. Mesophyll architecture and cell exposure to intercellular air space in alpine, desert, and forest species. *International Journal of Plant Sciences* 163(6): 937-948.

SOLBERG, S. 2010. Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables. *Int. J. Remote Sens.*, 31(5):1227-1244.

SOUDANI, K., FRANCOIS, C., LE MAIRE, G., LE DANTEC, V., DUFRENE, E. 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment*, 102, 161–175.

UEMURA, A., ISHIDA, A., NAKANO, T., TERASHIMA, I., TANABE, H., MATSUMOTO, Y., 2000. Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. *Tree Physiology* 20(14): 945-951.

URBAN, O., KOSVANCOVA, M., Marek, M. V., LICHTENHALTER, H. K., 2007. Induction of photosynthesis and importance of limitations during the induction phase in sun and shade leaves of five ecologically contrasting tree species from the temperate zone. *Tree Physiology* 27(8): 1207-1215.

VALLADARES, F., NIINEMETS, U., 2007. The architecture of plant crowns: from design rules to light capture and performance. New York, pp 101–149.

VAN DER ZANDE, D., HOET W., JONCKHEERE, I., VAN AARDT J., COPPIN, P., 2006. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. *Agricultural and Forest Meteorology* 141, s. 147-160.

VOSE, J.M., ALLEN, H.L., 1988. Leaf area, stemwood growth, and nutrition relationships in loblolly pine. *For Sci* 34:547–563.

WARING, R. 1983. Estimating forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Adv Ecol Res* 13:327–354.

WATSON, D.J., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.* 11, s. 41–76.

SMITH, F.W., SAMPSON, D.A., LONG, J.N., 1991. Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. *For. Sci.* 37, s. 1682–1688.

WEHR, A., LOHR, U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 68–82.

ZIEGENHAGEN, B., KAUSCH, W., 1995. Productivity of young shaded oaks (*quercus-robur* l) as corresponding to shoot morphology and leaf anatomy. *Forest Ecology and Management* 72(2-3): 97-108.

11. Zoznam použitých obrázkov a tabuliek

Tabuľky

Tab. č. 1: Charakteristika výskumných plôch

Tab. č. 2: Hodnoty LAI a obvody vzorkových stromov

Tab. č. 3: Hodnoty LAI jednotlivých metód ($m^2 \cdot m^{-2}$)

Tab. č. 4: Hodnoty LAI jednotlivých metód ($m^2 \cdot m^{-2}$), v zátvorkách sú smerodajné odchýlky

Tab. č. 5: Hodnoty LAI jednotlivých metód ($m^2 \cdot m^{-2}$) voči SLA – grogra, v zátvorkách sú odchýlky (%)

Tab. č. 6: Scheffeho post – hoc test premenných veličín LAI na úrovni jednotlivých meraní

Tab. č. 7: Štatistické charakteristiky regresného modelu

Tab. č. 8: Odhady parametrov regresného modelu

Tab. č. 9: Štatistické charakteristiky regresného modelu

Tab. č. 10: Odhady parametrov regresného modelu

Tab. č. 11: Štatistické charakteristiky regresného modelu

Tab. č. 12: Odhady parametrov regresného modelu

Tab. č. 13: Štatistické charakteristiky regresného modelu

Tab. č. 14: Odhady parametrov regresného modelu

Tab. č. 15: Scheffeho post – hoc test premenných veličín LAI na úrovni jednotlivých

Obrázky

Obr. č. 1: Hemisférická fotografia porastu (Bequet, 2011)

Obr. č. 2: Princíp leteckého laserového skenovania (Pavelka et al., 2011)

Obr. č. 3: Princíp letového pohybu hexakopteru (DJI Inovations, 2012)

Obr. č. 4: Prehľadová mapa plochy

Obr. č. 5: Ortofotografická mapa plochy

Obr. č. 6: LiCor LAI 2200 Plant Canopy Analyser

Obr. č. 7: Mapa LPI

Obr. č. 8: Histogram obvodov vzorkových stromov a distribúcie obvodových tried v poraste

Obr. č. 9: Regresný vzťah LAI a obvodov vzorkových stromov

Obr. č. 10: Hodnoty LAI na pokusných plochách so smerodajnými odchýlkami

Obr. č. 11: ANOVA metód na úrovni jednotlivých meraní (25)

Obr. č. 12: Regresná krivka vzťahu LPI a LAI

Obr. č. 13: Regresná krivka vzťahu LiDAR metriky a LAI

Obr. č. 14: Regresná krivka vzťahu LiDAR metrik a LAI (SLA)

Obr. č. 15: ANOVA meraní na úrovni jednotlivých plôch

Obr. č. 16 – 24: Vzorkové stromy 1 - 9

12. Prílohy

Príloha č. 1 Výsledky vzorkových stromov

Príloha č. 2 Výsledky jednotlivých meraní LAI na plochách ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)

Príloha č. 3 Mapa LAI podľa LPI

Príloha č. 4 Mapa LAI podľa metrik

Príloha č. 1 Výsledky vzorkových stromov

| Strom | Sekcia | % | Rozlíšenie DPI | Rozmery skenu | Rozmery skenu | Plocha skenu | Plocha listia | Váha skenu (kg) | SLA (cm ² .g ⁻²) | Váha celková vreca | Plocha listia celkom | Váha celková pytle | Plocha listia celkom |
|------------|--------------|------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|--------------------|---|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| VS1 | 4-5 | 19,8 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 126,71 | 0,434 | 291,97 | 7,7 | 2248,14 |
| VS1 | 5-6 | 24,4 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 156,15 | 0,535 | 291,87 | 13,2 | 3852,72 |
| VS1 | 6-7 | 33,4 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 213,75 | 0,794 | 269,21 | 12,3 | 3311,22 |
| VS1 | 7-8 | 33,1 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 211,83 | 0,578 | 366,49 | 50,9 | 18654,14 |
| VS1 | 8-9 | 34,8 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 222,71 | 0,727 | 306,34 | 34 | 10415,52 |
| VS1 | 9-10 | 55,5 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 355,18 | 1,537 | 231,09 | 218,3 | 50446,39 |
| VS1 | 10-11 | 43,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 279,03 | 1,693 | 164,81 | 818,2 | 134848,53 |
| VS1 | 11-12 | 56,3 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 360,30 | 2,754 | 130,83 | 1016,3 | 132960,79 |
| VS1 | 12-13 | 48,1 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 307,82 | 2,533 | 121,53 | 692,2 | 84119,89 |
| VS1 | 13-14 | 53,7 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 343,66 | 3,461 | 99,30 | 75,3 | 7476,96 |
| VS2 | 7-8 | 28,4 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 181,75 | 0,557 | 326,30 | 7,9 | 2577,79 |
| VS2 | 8-9 | 35,4 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 226,55 | 0,858 | 264,04 | 103,5 | 27328,36 |
| VS2 | 9-10 | 45,2 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 289,26 | 1,273 | 227,23 | 223,3 | 50740,64 |
| VS2 | 10-11 | 49,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 319,34 | 2,102 | 151,92 | 456,7 | 69383,48 |
| VS2 | 11-12 | 32,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 210,55 | 1,984 | 106,12 | 138,2 | 14666,26 |
| VS3 | 6-7 | 60,2 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 385,26 | 1,269 | 303,59 | 8,3 | 2519,82 |
| VS3 | 7-8 | 41,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 268,15 | 1,024 | 261,86 | 36,9 | 9662,68 |
| VS3 | 8-9 | 33,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 215,03 | 1,071 | 200,77 | 251,5 | 50494,61 |
| VS3 | 9-10 | 38,8 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 248,31 | 2,08 | 119,38 | 511,3 | 61038,16 |
| VS3 | 10-11 | 44,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 287,34 | 2,456 | 117,00 | 205,8 | 24078,01 |
| VS4 | 8-9 | 35,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 227,83 | 0,947 | 240,58 | 15,6 | 3753,03 |
| VS4 | 9-10 | 41,5 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 265,59 | 1,329 | 199,84 | 66,5 | 13289,30 |
| VS4 | 10-11 | 34,4 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 220,15 | 1,423 | 154,71 | 48,1 | 7441,42 |
| VS5 | 3-4 | 58,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 375,02 | 1,335 | 280,91 | 29,3 | 8230,78 |
| VS5 | 4-5 | 40,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 259,83 | 1,008 | 257,76 | 29 | 7475,16 |
| VS5 | 5-6 | 58 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 371,18 | 1,539 | 241,18 | 133 | 32077,33 |
| VS5 | 6-7 | 33,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 215,03 | 0,93 | 231,21 | 20,4 | 4716,76 |

| Strom | Sekcia | % | Rozlíšenie DPI | Rozmery skenu | Rozmery skenu | Plocha skenu | Plocha listia 2 | Váha skenu (kg) | SLA (cm ² .g ⁻²) | Váha celková vreca | Plocha listia celkom | Váha celková pytle | Plocha listia celkom |
|------------|--------------|------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|---|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| VS6 | 1-2 | 17 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 108,79 | 0,301 | 361,44 | 0,301 | 108,79 |
| VS6 | 2-3 | 32,2 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 206,07 | 0,603 | 341,74 | 0,603 | 206,07 |
| VS6 | 3-4 | 42,2 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 270,07 | 0,799 | 338,00 | 8,3 | 2805,44 |
| VS6 | 4-5 | 25,1 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 160,63 | 0,525 | 305,96 | 10,1 | 3090,25 |
| VS6 | 5-6 | 46,8 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 299,50 | 1,044 | 286,88 | 13,9 | 3987,65 |
| VS6 | 6-7 | 59,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 383,34 | 1,354 | 283,12 | 55,8 | 15797,91 |
| VS6 | 7-8 | 46,7 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 298,86 | 1,097 | 272,44 | 31,5 | 8581,79 |
| VS6 | 8-9 | 32,5 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 207,99 | 0,836 | 248,79 | 33,9 | 8434,01 |
| VS6 | 9-10 | 34,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 221,43 | 0,983 | 225,26 | 28,8 | 6487,42 |
| VS7 | 9-10 | 59,2 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 378,86 | 1,664 | 227,68 | 155,2 | 35335,99 |
| VS7 | 10-11 | 53,5 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 342,38 | 2,018 | 169,66 | 163,6 | 27757,04 |
| VS7 | 11-12 | 44,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 287,34 | 2,077 | 138,35 | 300,5 | 41573,02 |
| VS7 | 12-13 | 45,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 291,82 | 2,789 | 104,63 | 351,8 | 36810,30 |
| VS7 | 13-14 | 30,3 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 193,91 | 1,96 | 98,93 | 926,3 | 91642,19 |
| VS7 | 14-15 | 38,8 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 248,31 | 2,844 | 87,31 | 316,5 | 27633,32 |
| VS7 | 15-16 | 21 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 134,39 | 1,703 | 78,92 | 91,3 | 7204,98 |
| VS8 | 6-7 | 58,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 376,94 | 1,308 | 288,18 | 30,4 | 8760,69 |
| VS8 | 7-8 | 53,4 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 341,74 | 1,178 | 290,10 | 178,1 | 51667,46 |
| VS8 | 8-9 | 50,3 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 321,90 | 1,55 | 207,68 | 134,9 | 28015,96 |
| VS8 | 9-10 | 37 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 236,79 | 1,678 | 141,11 | 1,678 | 236,79 |
| VS9 | 4-5 | 43,8 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 280,31 | 2,027 | 138,29 | | 0,00 |
| VS9 | 5-6 | 60,7 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 388,46 | 1,386 | 280,27 | | 0,00 |
| VS9 | 6-7 | 53,5 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 342,38 | 1,37 | 249,91 | 67,4 | 16844,20 |
| VS9 | 7-8 | 50,6 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 323,82 | 1,257 | 257,62 | 27,1 | 6981,39 |
| VS9 | 8-9 | 45,9 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 293,74 | 1,073 | 273,76 | 20,3 | 5557,33 |
| VS9 | 9-10 | 29,3 | 300 | 2550 | 3501 | 215,90 | 296,42 | 63996,65 | 187,51 | 0,813 | 230,64 | | 0,00 |

Príloha č. 2 Výsledky LAI jednotlivých meraní na plochách (m².m⁻²)

| Plocha 1 | | | | |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------|---------------------|
| | fisheye | Licor 2200 | Laipen | SLA - grogra |
| 1 | 7,53 | 8,13 | 7,16 | 11,12 |
| 2 | 5,87 | 5,69 | 5,69 | 8,67 |
| 3 | 8,17 | 8,90 | 9,15 | 12,06 |
| 4 | 7,36 | 7,43 | 7,43 | 10,86 |
| 5 | 6,44 | 7,02 | 7,02 | 9,50 |
| 6 | 6,15 | 6,40 | 5,91 | 9,08 |
| 7 | 8,17 | 8,82 | 8,58 | 12,06 |
| 8 | 7,07 | 7,71 | 6,58 | 10,44 |
| 9 | 6,47 | 6,47 | 7,25 | 9,55 |
| 10 | 9,23 | 9,78 | 9,14 | 13,63 |
| 11 | 6,82 | 7,23 | 7,03 | 10,08 |
| 12 | 6,19 | 6,44 | 6,19 | 9,14 |
| 13 | 6,15 | 6,28 | 5,66 | 9,08 |
| 14 | 6,54 | 7,13 | 7,00 | 9,66 |
| 15 | 8,24 | 7,74 | 8,16 | 12,16 |
| 16 | 9,19 | 8,64 | 8,83 | 13,57 |
| 17 | 7,96 | 7,48 | 8,75 | 11,75 |
| 18 | 10,01 | 10,31 | 9,21 | 14,77 |
| 19 | 9,05 | 8,15 | 8,96 | 13,36 |
| 20 | 7,96 | 8,43 | 7,40 | 11,75 |
| 21 | 8,38 | 8,88 | 8,38 | 12,37 |
| 22 | 8,77 | 9,47 | 8,86 | 12,95 |
| 23 | 10,64 | 10,32 | 11,71 | 15,71 |
| 24 | 10,25 | 11,49 | 9,84 | 15,14 |
| 25 | 11,21 | 11,99 | 11,66 | 16,55 |

| Plocha 2 | | | | |
|-----------------|----------------|-------------------|---------------|---------------------|
| | fisheye | Licor 2200 | Lainen | SLA - grogra |
| 1 | 8,34 | 8,01 | 8,34 | 9,37 |
| 2 | 7,86 | 8,49 | 8,10 | 8,83 |
| 3 | 7,77 | 8,08 | 7,07 | 8,73 |
| 4 | 6,75 | 6,95 | 6,82 | 7,59 |
| 5 | 6,69 | 6,22 | 6,15 | 7,52 |
| 6 | 6,99 | 7,62 | 7,06 | 7,86 |
| 7 | 6,60 | 7,26 | 7,39 | 7,42 |
| 8 | 6,90 | 6,49 | 7,24 | 7,75 |
| 9 | 6,15 | 5,41 | 6,33 | 6,91 |
| 10 | 7,50 | 6,90 | 7,72 | 8,43 |
| 11 | 7,95 | 8,90 | 7,55 | 8,93 |
| 12 | 6,54 | 7,00 | 6,80 | 7,35 |
| 13 | 7,47 | 8,37 | 6,95 | 8,40 |
| 14 | 7,95 | 7,95 | 8,27 | 8,93 |
| 15 | 6,60 | 6,14 | 7,33 | 7,42 |
| 16 | 6,81 | 6,33 | 6,81 | 7,65 |
| 17 | 7,53 | 7,38 | 7,08 | 8,46 |
| 18 | 6,36 | 6,93 | 7,00 | 7,15 |
| 19 | 6,24 | 6,80 | 5,80 | 7,01 |
| 20 | 7,20 | 7,42 | 7,27 | 8,09 |
| 21 | 7,14 | 6,85 | 7,64 | 8,02 |
| 22 | 8,61 | 8,44 | 8,61 | 9,68 |
| 23 | 7,44 | 6,92 | 6,99 | 8,36 |
| 24 | 7,53 | 7,60 | 7,15 | 8,46 |
| 25 | 7,41 | 7,63 | 7,78 | 8,33 |

Plocha 3

| | <u>fisheve</u> | <u>Licor 2200</u> | <u>Laipen</u> | <u>SLA - grogra</u> |
|-----------|----------------|-------------------|---------------|---------------------|
| 1 | 6.14 | 5.53 | 6.51 | 8.74 |
| 2 | 9.01 | 9.73 | 9.01 | 8.24 |
| 3 | 4.67 | 4.67 | 4.76 | 8.15 |
| 4 | 5.20 | 5.72 | 5.36 | 7.08 |
| 5 | 7.03 | 7.10 | 7.87 | 7.01 |
| 6 | 7.91 | 8.23 | 7.67 | 7.33 |
| 7 | 7.99 | 8.63 | 8.87 | 6.92 |
| 8 | 7.19 | 7.69 | 7.91 | 7.23 |
| 9 | 4.83 | 4.30 | 4.39 | 6.45 |
| 10 | 5.20 | 4.63 | 5.00 | 7.86 |
| 11 | 3.84 | 3.38 | 4.30 | 8.33 |
| 12 | 6.28 | 6.03 | 6.21 | 6.86 |
| 13 | 6.20 | 6.01 | 6.20 | 7.83 |
| 14 | 6.92 | 6.85 | 7.68 | 8.33 |
| 15 | 7.13 | 6.92 | 6.42 | 6.92 |
| 16 | 6.12 | 6.79 | 6.12 | 7.14 |
| 17 | 6.46 | 6.53 | 6.85 | 7.89 |
| 18 | 7.13 | 7.78 | 7.78 | 6.67 |
| 19 | 5.69 | 6.25 | 5.17 | 6.54 |
| 20 | 6.28 | 6.03 | 5.71 | 7.55 |
| 21 | 6.30 | 7.00 | 6.30 | 7.48 |
| 22 | 6.95 | 6.39 | 6.88 | 9.03 |
| 23 | 5.55 | 4.89 | 5.89 | 7.80 |
| 24 | 5.04 | 4.94 | 4.94 | 7.89 |
| 25 | 6.14 | 5.71 | 5.59 | 7.77 |

Plocha 4

| | <u>fisheve</u> | <u>Licor 2200</u> | <u>Laipen</u> | <u>SLA - grogra</u> |
|-----------|----------------|-------------------|---------------|---------------------|
| 1 | 5.14 | 4.93 | 4.68 | 8.53 |
| 2 | 5.30 | 5.46 | 5.51 | 8.79 |
| 3 | 6.53 | 5.75 | 7.25 | 10.84 |
| 4 | 6.78 | 5.97 | 7.32 | 11.25 |
| 5 | 6.51 | 7.23 | 6.38 | 10.81 |
| 6 | 5.66 | 5.20 | 6.17 | 9.39 |
| 7 | 6.58 | 6.18 | 6.84 | 10.92 |
| 8 | 6.26 | 6.39 | 6.83 | 10.40 |
| 9 | 5.84 | 5.14 | 5.84 | 9.69 |
| 10 | 5.81 | 5.17 | 5.99 | 9.65 |
| 11 | 6.80 | 7.41 | 6.67 | 11.29 |
| 12 | 5.03 | 5.38 | 4.73 | 8.35 |
| 13 | 5.88 | 5.59 | 6.41 | 9.76 |
| 14 | 6.62 | 6.09 | 6.22 | 10.99 |
| 15 | 5.21 | 5.10 | 4.84 | 8.64 |
| 16 | 5.14 | 4.99 | 5.60 | 8.53 |
| 17 | 6.04 | 5.74 | 6.04 | 10.02 |
| 18 | 5.61 | 5.44 | 5.33 | 9.32 |
| 19 | 5.90 | 6.02 | 5.19 | 9.80 |
| 20 | 5.54 | 5.60 | 6.04 | 9.20 |
| 21 | 4.53 | 5.03 | 4.67 | 7.53 |
| 22 | 5.41 | 5.03 | 5.63 | 8.98 |
| 23 | 4.71 | 4.15 | 4.20 | 7.83 |
| 24 | 5.84 | 5.84 | 5.14 | 9.69 |
| 25 | 4.15 | 4.28 | 4.32 | 6.89 |

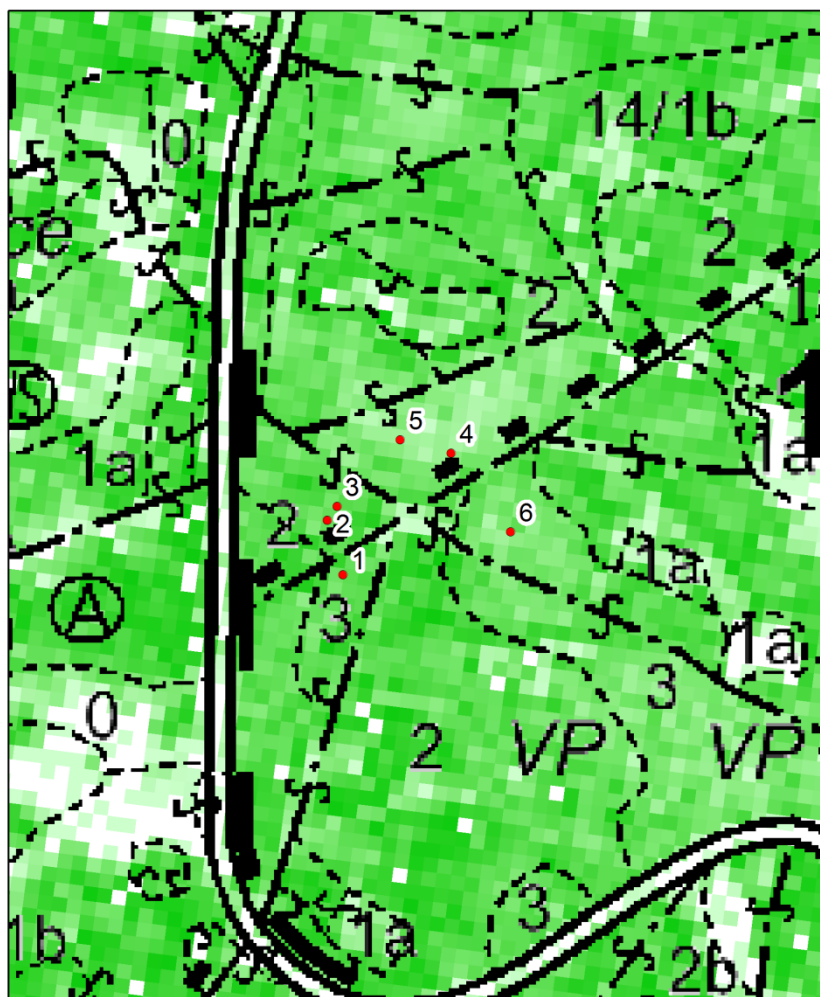
Plocha 5

| | <u>fisheve</u> | <u>Licor 2200</u> | <u>Laipe</u> | <u>SLA - grogra</u> |
|-----------|----------------|-------------------|--------------|---------------------|
| 1 | 3.68 | 3.49 | 3.90 | 6.26 |
| 2 | 3.87 | 3.60 | 3.53 | 6.60 |
| 3 | 3.06 | 2.69 | 3.43 | 5.21 |
| 4 | 4.06 | 4.34 | 3.89 | 6.90 |
| 5 | 4.16 | 4.08 | 3.74 | 7.08 |
| 6 | 3.72 | 3.39 | 4.13 | 6.34 |
| 7 | 3.99 | 4.07 | 4.43 | 6.80 |
| 8 | 3.99 | 3.76 | 3.52 | 6.80 |
| 9 | 2.40 | 2.54 | 2.56 | 4.08 |
| 10 | 2.92 | 3.25 | 2.87 | 4.98 |
| 11 | 3.74 | 4.08 | 3.78 | 6.36 |
| 12 | 3.78 | 3.52 | 3.33 | 6.44 |
| 13 | 3.92 | 4.39 | 4.35 | 6.67 |
| 14 | 3.86 | 3.67 | 3.55 | 6.57 |
| 15 | 3.29 | 3.22 | 2.99 | 5.59 |
| 16 | 4.31 | 4.23 | 3.84 | 7.34 |
| 17 | 4.24 | 4.66 | 4.24 | 7.21 |
| 18 | 4.03 | 4.35 | 3.70 | 6.85 |
| 19 | 3.74 | 3.55 | 3.96 | 6.36 |
| 20 | 4.03 | 4.03 | 3.66 | 6.85 |
| 21 | 3.95 | 3.99 | 3.91 | 6.72 |
| 22 | 4.28 | 4.07 | 4.07 | 7.29 |
| 23 | 4.85 | 4.71 | 5.39 | 8.26 |
| 24 | 3.06 | 3.31 | 2.72 | 5.21 |
| 25 | 3.02 | 3.02 | 2.68 | 5.13 |

Plocha 6

| | <u>fisheve</u> | <u>Licor 2200</u> | <u>Laipe</u> | <u>SLA - grogra</u> |
|-----------|----------------|-------------------|--------------|---------------------|
| 1 | 5.08 | 5.03 | 4.57 | 7.54 |
| 2 | 6.05 | 6.42 | 6.66 | 8.99 |
| 3 | 6.46 | 5.69 | 6.66 | 9.60 |
| 4 | 5.39 | 4.96 | 5.01 | 8.00 |
| 5 | 5.75 | 5.29 | 6.32 | 8.53 |
| 6 | 4.64 | 4.74 | 4.97 | 6.89 |
| 7 | 5.21 | 5.41 | 4.95 | 7.73 |
| 8 | 5.28 | 5.34 | 5.44 | 7.84 |
| 9 | 4.90 | 4.31 | 4.90 | 7.27 |
| 10 | 6.10 | 6.41 | 6.29 | 9.06 |
| 11 | 6.54 | 6.47 | 6.61 | 9.71 |
| 12 | 6.62 | 6.75 | 6.48 | 9.82 |
| 13 | 7.75 | 6.97 | 7.90 | 11.50 |
| 14 | 7.39 | 6.57 | 6.50 | 10.97 |
| 15 | 7.18 | 6.53 | 6.46 | 10.66 |
| 16 | 7.72 | 7.87 | 7.03 | 11.46 |
| 17 | 7.51 | 7.74 | 8.34 | 11.16 |
| 18 | 8.08 | 8.08 | 8.48 | 12.00 |
| 19 | 7.31 | 8.19 | 7.75 | 10.85 |
| 20 | 6.36 | 6.42 | 6.30 | 9.44 |
| 21 | 6.18 | 5.62 | 6.43 | 9.18 |
| 22 | 5.90 | 5.78 | 5.96 | 8.76 |
| 23 | 5.85 | 6.14 | 6.37 | 8.68 |
| 24 | 5.41 | 5.57 | 6.06 | 8.04 |
| 25 | 6.21 | 6.08 | 5.65 | 9.22 |

Príloha č. LAI podľa LPI



Legenda

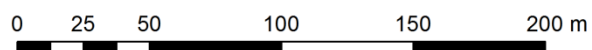
• Stredy pokusných plôch

LAI

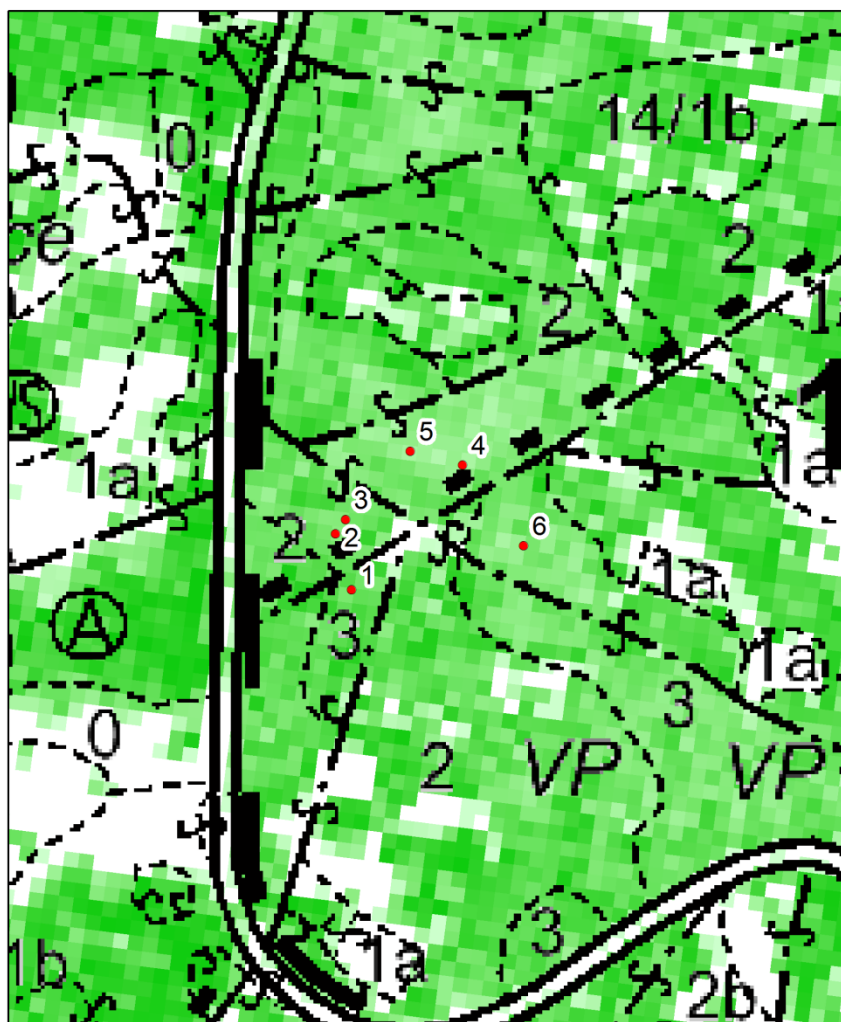
Value
12
0



1:2 000



Príloha č. LAI podľa LiDAR metrik



Legenda

• Stredy pokusných plôch

LAI

Value



1:2 000

