

# VÝPOČET INDEXU LISTOVÉ PLOCHY (LAI) V LESNÍCH POROSTECH NA ZÁKLADĚ DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

## ESTIMATION OF LEAF AREA INDEX (LAI) IN FORESTS ON THE BASIS OF AIRBORNE LASER SCANNING IN THE CONDITIONS OF THE CZECH REPUBLIC

TOMÁŠ MIKITA ✉ - ZDENĚK PATOČKA - JAN SABOL

Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav hospodářské úpravy lesa a aplikované geoinformatiky, Zemědělská 3, CZ - 613 00 Brno

✉ e-mail: tomas.mikita@mendelu.cz

### ABSTRACT

Leaf area index (LAI) is one of the most important variable influencing solar beam penetration through the forest canopies. Remote sensing methods offer an opportunity to improve each of these requirements but are typically limited by the necessity for validation using labor intensive and sparsely collected *in situ* measurements. Especially, airborne laser scanning shows viable potentialities for application in LAI estimation. The utility of airborne laser scanning (ALS) data to estimate LAI in complex, forested terrain of the White Carpathians in the southeastern part of the Czech Republic was evaluated. Forty-five hemispherical photos were taken and used to produce ground-based estimates of LAI. In ESRI ArcMap environment, LiDAR penetration index (LPI) from ALS data was calculated. Consequently, photo derived LAI and ALS based LPI were used to develop several regression models describing the dependence of LAI and LPI with  $R^2$  ranging from 0.71 to 0.81. Triplet analysis for data and model quality and least squares method applicability was performed as well.

**Klíčová slova:** LiDAR, solární radiace, hemisférická fotografie, LAI, LPI

**Key words:** LiDAR, solar radiation, hemispherical photography, LAI, LPI

### ÚVOD

Studium produkční aktivity lesních dřevin je nemožné bez znalosti radiačního režimu uvnitř porostů. Radiační režim v lesních porostech vykazuje značnou časovou a prostorovou variabilitu a je modifikován množstvím slunečního záření dopadajícího na porost, optickými vlastnostmi porostu a strukturou porostu (MARKOVÁ 2010).

Množství světla dopadajícího na zemský povrch v lesním prostředí je dáno především zápojem stromového patra, jehož dynamika je určována druhovým složením dřevin a více či méně ovlivňována člověkem ve smyslu hospodaření v lesích. Pro úspěšné modelování růstu vegetace je stěžejní porozumění režimu slunečního záření v lesních porostech a jeho interakce s korunovým zápojem (JENNINGS et al. 1999).

Zápoj lze charakterizovat jako rozhraní mezi atmosférou a půdou, které soustřeďuje atmosférický uhlík do biomasy a uvolňuje kyslík a vodu. Mezi klíčové faktory determinující strukturu zápoje patří vedle uspořádání dřevin, rozdílnosti jejich morfologie a ostatních faktorů též dostupnost světla (SMITH et al. 2008). Mezi nejběžněji používané ekologické indikátory charakterizující strukturu zápoje patří tzv. index listové plochy (LAI). LAI je klíčovou charakteristikou struktury lesa, která slouží jako primární ukazatel pro výměnu hmoty a energie v rámci lesních ekosystémů. Je to bezrozměrná proměnná, jež je charakterizována jako ucelená jednostranná plocha fotosyntetizující tkáň na jednotku půdorysné plochy (WATSON 1947). Jeho definice je platná pouze pro listnaté porosty, a proto MYNENI et al. (1997) definoval LAI jako maximální plochu fotosyntetizující tkáň na jednotku

půdorysné plochy. LAI závisí na druhovém složení porostu, jeho vývojové etapě, převažujících stanovištních faktorech, sezónnosti a způsobu hospodaření v lesích. Jedná se o dynamický parametr, který se mění ze dne na den (obzvláště na jaře a na podzim) a v průběhu let dochází k jeho změnám působením fyzikálních a biologických sil, které formují a mění lesní prostředí. Metody pro zjišťování LAI mohou být rozděleny do dvou kategorií – přímé a nepřímé. Přímé metody obecně používají destruktivní postupy pro odhad celkového počtu listů na stromě a jejich plochu, zatímco nepřímé metody využívají některý z aspektů radiačního režimu uvnitř porostu a odvozují LAI z distribuce světla pod zápojem (JONCKHEERE et al. 2004).

Přímé měření solární radiace a zjišťování charakteristik zápoje je na rozlehlých územích nereálné kvůli počtu měření nutných k vytvoření náležitého distribučního modelu (PIEDALU, GÉGOUT 2008). Pro modelování na úrovni rozsáhlých lesních celků mají mnohem větší využití tzv. nepřímé metody, z nichž největší uplatnění má kromě multispektrálního a hyperspektrálního snímkování také letecké laserové skenování (LLS), které slouží ke sběru velmi přesných 3D dat pro tvorbu digitálních modelů i v územích trvale pokrytých lesními porosty. Systém leteckého laserového skenování (LLS) nebo obecně LiDAR (Light Detection and Ranging) je moderní progresivní metodou dálkového průzkumu Země. Tato metoda umožňuje hromadný sběr velmi přesných výškopisných a polohopisných dat jak o zemském povrchu, tak o objektech, jež se na něm nachází (vegetace, budovy) (MIKITA et al. 2013). Laserový paprsek dopadá na objekt a odráží se od každé plošky objektu, čímž se vytváří posoupnost odrazů od sen-

zorů nejbližších až po nejnižší. Při skenování lesních porostů se pa-prsek může chovat různě. Buďto se odrazí celý zpět od první etáže porostu, nebo se odrazí jen jeho část, přičemž neodražená část pak může pokračovat do nižších etáží. Při odrazu paprsku od první etáže, nejlépe od špiček a povrchu korun stromů, se jedná o tzv. první odraz (first return), avšak mezery v zápoji propadá laserový impuls postupně až k zemskému povrchu a vznikají tak další odrazy. Posledním odrazem (last return) pak rozumíme odraz od samotného zemského povrchu; můžeme tedy získat představu o zemském povrchu pod zápojem a také o nižších etážích porostu. Vzniká tak charakteristický shluk naměřených bodů (mračno bodů), který vstupuje do dalších analýz (ACKERMANN 1999).

LLS našlo již uplatnění v nejrůznějších aplikacích, jako jsou 3D modely měst a budov, znázorňování nadzemních silových vedení a nadzemních částí produktovodů, zjišťování stavebních a terénních letových překážek, vyhledávání rozsáhlých archeologických objektů, analýzy vegetačního pokryvu, mapování vodních ploch aj. (JEDLIČKA 2009). S rozvojem využívání moderních technologií v lesnictví našel tento způsob sběru dat své místo i zde. Na základě multiplikace odrazů v lesním prostředí je možné odhadnout některé parametry lesních porostů či jednotlivých stromů, např. vylišení korun jednotlivých stromů, detekovat počet stromů v porostu, šířku koruny a její nasazení, šíři zápoje, odhady objemu dřevní hmoty a biomasy či dokonce druhu stromů (NÆSSET 2004; HYYPPÄ et al. 2008; KORPELA et al. 2009). V důsledku snadné dostupnosti dat LLS byly dále použity pro mapování charakteristik zápoje, jako jsou canopy cover, canopy closure, canopy gap fraction či LAI (MORS DORF et al. 2006; KORHONEN et al. 2011; MUSSELMAN et al. 2013).

Na zřeteli je nezbytné mít také druhové složení porostů, které vykazují signifikantní rozdíly v parametrech zápoje, získaných z hemisférických snímků, z čehož plyne různá míra korelace mezi proměnnými. Shoda mezi LAI získaným z dat LLS a LAI zjištěným z hemisférické fotografie je nezvykle vyšší u listnatých porostů než u jehličnatých v práci Riaña et al. (RIAÑO 2004). Jako důvod tohoto zjištění uvádějí autoři faktor hustého seskupení a těsného zápoje u jehličnatých porostů. Přesto souhlasí s tvrzením, stejně jako MORS DORF et al. (2006), že data LLS mohou poskytnout mnohem lepší horizontální vzorkování zápoje než metody terénního průzkumu, jako jsou např. hemisférické fotografie.

KORHONEN et al. (2011) ověřili, že využití dat LLS je velmi vhodnou alternativou pro získávání spolehlivých informací o zápoji pro rozsáhlá zalesněná území. Nicméně pro ověření výsledků a pro empirický odhad zájmových proměnných je nadále potřebné využití dat z pozemních měření. Mezi pozemními metodami je velmi rozšířenou alternativou pro výpočet LAI digitální hemisférická fotografie (CHIANGUCCI, CUTINI 2012).

Hemisférická fotografie umožňuje charakterizovat zápoj prostřednictvím vertikálně orientovaných snímků pořízených fotoaparátem se širokoúhlým objektivem, tzv. rybím okem. Poskytuje trvalý záznam, což z ní činí cenný zdroj informací o pozici, velikosti, hustotě a distribuci mezer v zápoji. Tato metoda je oproti jiným výhodná z hlediska rychlosti, nízké ceny a snadné dostupnosti. I přes své nesporné výhody představuje jejich manuální pořizování a následné zpracování potenciální zdroj chyb (JONCKHEERE et al. 2004).

Na lokalitách pozemních měření pomocí hemisférických snímků byla prokázána úzká korelace LAI s indexy propustnosti odvozených z dat LLS (MORS DORF et al. 2006).

Nepřímé měření indexu listové plochy metodou hemisférických fotografií je založeno na propustnosti solární radiace přes vegetaci. Lze tedy předpokládat, že to samé platí pro propustnost laserových paprsků skeneru přes zápoj porostu. Na základě této premisy lze jednoduše spočítat index propustnosti laserových paprsků (LPI):

$$LPI_{ij} = mG_{ij} / (mG_{ij} + mV_{ij})$$

kde  $mG_{ij}$  představuje počet odrazů laserových paprsků na jednotku plochy terénu a  $mV_{ij}$  reprezentuje počet odrazů na jednotku plochy od vegetace. Indexy  $i$  a  $j$  odkazují na příslušný řádek a sloupec buňky (pixelu) gridu.

Významná lineární korelace mezi LAI, získaným z pozemních měření pomocí hemisférických snímků, a LPI umožňuje využití dat LLS pro plošnou modelaci LAI (BARILOTTI et al. 2006).

Hodnoty LPI jsou v rozmezí od 0 do 1. Hodnoty blíží se 0 vykazují přítomnost husté vegetace, a naopak hodnoty blízké 1 charakterizují otevřený zápoj či zemský povrch (MUSSELMAN et al. 2013).

Cílem této práce je proto statistické ověření využitelnosti dat LLS pro vyhodnocení indexu listové plochy v lesních porostech různé dřevinné skladby v podmínkách České republiky.

## MATERIÁL A METODIKA

Data leteckého laserového skenování použitá v této práci byla naskenována v roce 2011 na katastru obce Hostětín, ležící na úpatí hraničního hřebene Bílých Karpat. Terénní měření bylo provedeno na majetcích vlastníků lesů do 50 ha v režimových obvodech Uherský Brod. Pro tyto porosty jsou zpracovány lesní hospodářské osnovy č. 601804 Brumov s platností od roku 2008 do roku 2017.

Laserové skenování mělo následující charakteristiky:

- použitý skener: Leica ALS50-II
- datum pořízení dat: léto 2011
- výška letu: 1395 m
- průměrná hustota bodů: 4,32 bodů/m<sup>2</sup>.

Metodou analýzy hemisférických snímků byly měřeny porosty s těmito porostními charakteristikami:

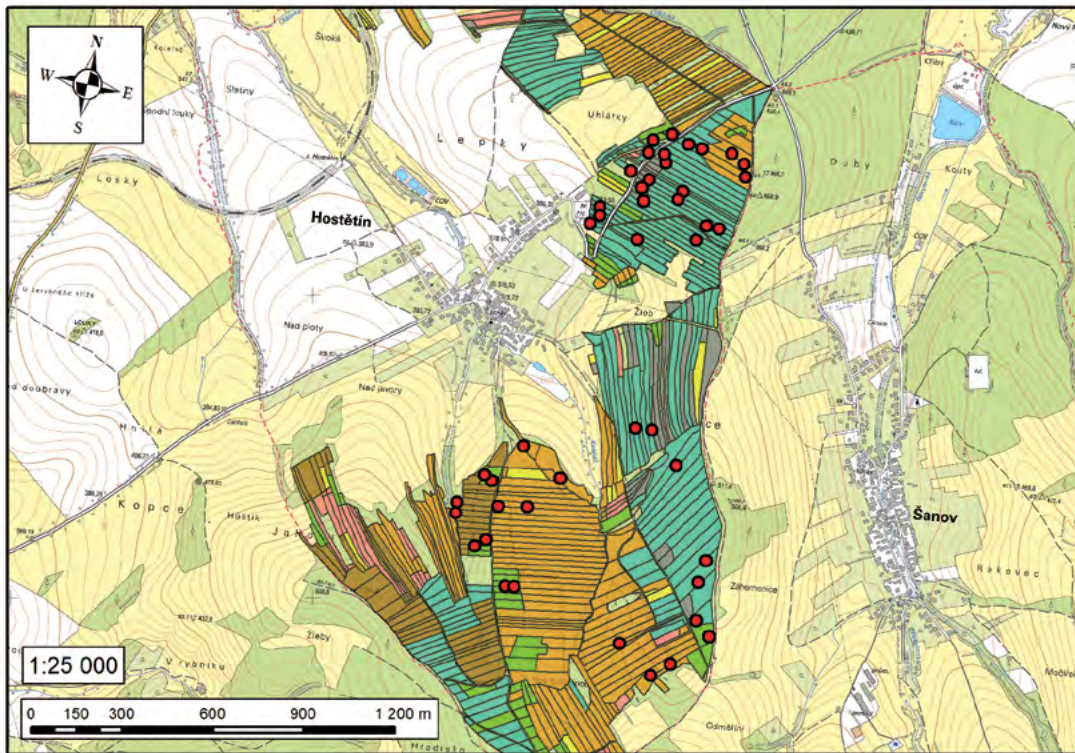
- hospodářský soubor – 45
- porostní typy – bukový (22 ploch), borový (14 ploch), smrkový (5 ploch)
- listnaté ostatní (3 plochy)
- soubory lesních typů – 2H (36 ploch), 3H (5 ploch), 3S (3 plochy)
- věková struktura 45–104 let.

Pořízeno bylo celkem 45 hemisférických fotografií fotoaparátem Nikon Coolpix 4500 s předsádkou typu rybí oko FC-E8 (obr. 1). Fotografie byly zhotoveny v srpnu roku 2013 v porostech s různým druhovým smíšením a různou věkovou i prostorovou strukturou při zatažené obloze a bezvětrí, jelikož pohyby větví a odlesky Slunce v objektivu snímky zkreslují (obr. 2). Fotoaparát byl umístěn na stativ nastavený na výšku 130 cm od půdního povrchu a vyrovnaný do vodorovné polohy pomocí libely. Fotoaparát na stativu, jehož objektiv směřoval vzhůru, se otočil tak, aby sever zjištěný pomocí buzoly byl umístěn na horní hraně hemisférického snímku. Poté byla zhotovena fotografie zobrazující korunový zápoj o šířce záběru 180°. Poloha fotoaparátu byla přesně zaměřena pomocí GNSS sestavy skládající se z GPS/Glonass přijímače Trimble Pathfinder ProXRT, dvoufrekvenční antény Trimble Zephyr 2 a kontroleru Trimble Nomad 900G s využitím postprocessingových RINEX korekcí.

### Analýza hemisférických fotografií

Hemisférické fotografie byly analyzovány pomocí kombinace freeware softwarů Gap Light Analyzer + SideLook a v softwaru WinScanopy. V programu SideLook byly jednotlivé snímky převedeny na černobílé na základě modrého kanálu dle FRAZER et al. (2001). V Gap Light Analyzeru byla na základě nejkontrastnějšího snímku vymezena ob-





**Obr. 1.**

Lokalizace hemisférických snímků (podkladová data ZM25, Český úřad zeměměřičský a katastrální)

**Fig. 1.**

Locations of hemispherical images (datasource ZM25, Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre)



**Obr. 2.**

Převod barevného hemisférického snímku na snímek s 1bitovou barevnou hloubkou

**Fig. 2.**

Transformation of coloured hemispherical image into 1-bit resolution

last vlastní fotografie a pevně zafixována pro další snímky. Pomocí prahové hodnoty, zjištěné ze softwaru SideLook, byly snímky převedeny na černobílě a vypočítán LAI s různě omezenými zenitovými úhly (LAI 4 Ring = 0°–60°, LAI 5 Ring = 0°–75°) (FRAZER et al. 1999). Dále se snímky vyhodnocovaly v softwaru WinScanopy s tím rozdílem, že prahová hodnota byla zjišťována automaticky a byl počítán LAI 3 Ring (zenitový úhel 0°–45°) metodou LAI-2000. Zároveň se také určoval index listové plochy metodou LAI-2000G se zadáním konkrétních hodnot úhlu.

### Zpracování dat LLS

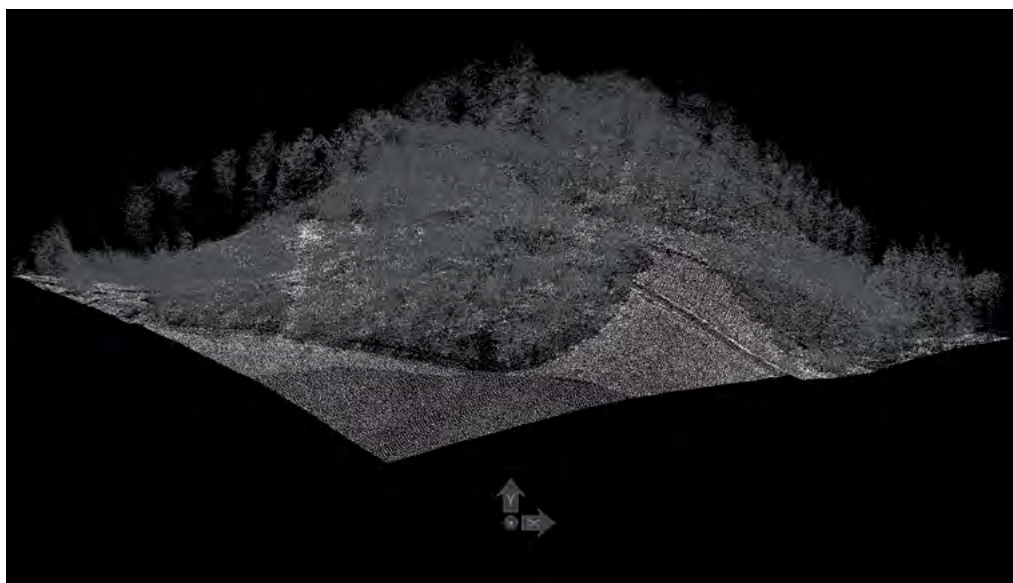
Do programu ESRI ArcMap bylo vloženo mračno (point cloud) z prvního odrazu vyfiltrovaných bodů leteckého laserového skenování, mračno bodů klasifikovaných dle ASPRS jako vysoká vegetace a mračno bodů propadlých na terén. Filtrace a klasifikace těchto bodů byla provedena již dříve v softwaru TerraScan pro Bentley MicroStation (obr. 3). Pomocí nástrojů softwaru ArcMap byly vytvořeny rastry o různé velikosti pixelu (5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 100 m), které znázorňovaly počet bodů LLS na dané velikosti pixelu rastru. Prakticky bylo zjištěno, že nejmenší použitelná velikost pixelu je 15 metrů pro potřeby výpočtu LAI a 10 metrů pro potřeby odhadu zakmenění. Při menší použité velikosti pixelu se na rastru objevovaly prázdné pixely (pixely s hodnotou No-Data). Dále byl připojen bodový shapefile s polohou hemisférických snímků, do jehož atributové tabulky byly extrahovány hodnoty počtu bodů prvního odrazu a počet bodů dopadajících na terén pro různé velikosti pixelu. Následně byl spočten LPI dle výše uvedeného vzorce (viz obr. 4).

Stanovení optimální metody výpočtu LAI a LPI pro regresní analýzu bylo provedeno výpočtem korelačních matic. Jedna korelační matice vždy obsahovala jeden způsob výpočtu LAI (software Gap Light Analyzer, metoda LAI 2000, metoda LAI 2000G s úhly záběru omezenými na 30°, 40°, 50°, 60° v softwaru WinScanopy) a všechny velikosti pixelu

rastru LPI. Optimální kombinace výpočtu byla určena vyhledáním nejvyššího Pearsonova korelačního koeficientu ve všech korelačních maticích zároveň. Na základě tohoto koeficientu bylo zjištěno, že nej přesněji byl LAI odhadnut v softwaru WinScanopy při omezení úhlu záběru (FOV = Field of View) na 30° a výpočtem LPI na rastru o velikosti pixelu 15 metrů. Pro tvorbu digitálního modelu povrchu byly u této metody použity všechny body prvního odrazu, nikoliv body klasifikované podle ASPRS do třídy 5 – High Vegetation.

### Porovnání LPI se zakmeněním

Nejprve byla provedena detekce jednotlivých stromů podle jejich vrcholů na základě metody tzv. segmentace inverzního povodí – Inversed Watershed Segmentation (EDSON 2011). Metoda segmentace inverzního povodí je založena na nástrojích hydrologického modelování a vyhledává lokální minima (deprese), která zabraňují odtoku. Pro výpočet bylo nutné vytvořit převrácený rastr (vynásobením hodnotou -1), kde každá koruna stromu představuje bezodtokou propadlinu, jež zároveň vytváří lokální povodí. Výpočtem směru a následně délky odtoku (Flow Direction a Flow Length) byla detekována lokální minima, která představují zmíněné vrcholky stromů. Každému stromu byla přiřazena hodnota LPI pro velikost pixelu 10 m a zároveň rovněž hodnota zakmenění pro daný porost převzatý z hospodářské knihy LHO. Bylo tedy provedeno porovnání hodnoty zakmenění z hospodářské knihy s LPI. Desetimetrový pixel pro tyto účely postačuje, jelikož i přes viditelné prázdné pixely v rastru se podařilo přiřadit ke každému stromu pixel s nenulovou hodnotou. Tato analýza byla provedena pouze pro porosty se zastoupením buku větším než 60%, neboť buk je v zájmovém území nejčetnější dřevinou. K testování rozdílu středních hodnot LiDAR Penetration indexu (LPI) pro jednotlivá zakmenění byla použita jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA (Analysis of Variance). Vyhodnocení bylo provedeno v programu STATISTICA na základě překryvu intervalů spolehlivosti pro střední hodnoty LPI.



**Obr. 3.**  
Zpracování mračna bodů v softwaru TerraScan  
**Fig. 3.**  
LiDAR point cloud processing in TerraScan software



## VÝSLEDKY

Pro výpočet LAI byly vytvořeny celkem 4 regresní modely s různým koeficientem determinace. Do prvního z nich vstupovaly nezávislé proměnné LPI, věk a druh smíšení, avšak na základě odhadu parametrů byla zjištěna statistická nevýznamnost proměnné věk (pravděpodobnost p-hodnota t-testu je totiž větší než hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ , proto přijímáme nulovou hypotézu o tom, že parametr věk je nulový), tudíž bylo dále postupováno bez této proměnné. Byl tedy vytvořen regresní model s dvěma nezávislými proměnnými – LPI a druh smíšení. Tyto parametry byly na základě provedených t-testů vyhodnoceny jako statisticky významné. Dále byl vytvořen model o jedné nezávislé proměnné, jež neuvažuje dřevinnou skladbu porostu. Následně byly vytvořeny další dva modely o jedné nezávislé proměnné (LPI) zvlášť pro jehličnaté a zvlášť pro listnaté porosty. Důležitou součástí regresní analýzy je studium regresního tripletu, tedy hodnocení kvality dat, kvality modelu a kvality metody odhadu (metoda nejmenších čtverců). Z provedených testů nebyly vyvozeny žádné negativní závěry, jež by ovlivnily věrohodnost regresních modelů. Výsledky regresní analýzy pro všechny porosty bez rozlišení druhu znázorňuje tab. 1.

**Tab. 1.**

Statistické charakteristiky regresního modelu, jedna nezávislá proměnná

Statistical parameters of regression model with one independent variable

Vícenásobný korelační koeficient/ Multiple correlation coefficient R	0,8454
Koeficient determinace/ Coefficient of determination R <sup>2</sup>	0,7146
Predikovaný korelační koeficient/ Predictive correlation coefficient R <sub>p</sub>	0,4706
Střední kvadratická chyba predikce/ Mean quadratic error of prediction MEP	0,1164
Akaikeho informační kritérium/ Akaike information criterion	-97,1031

Výsledný regresní model pro všechny porosty bez rozlišení druhu lze popsat rovnicí:

$$LAI = 3,92183724 - 9,7156987 * LPI$$

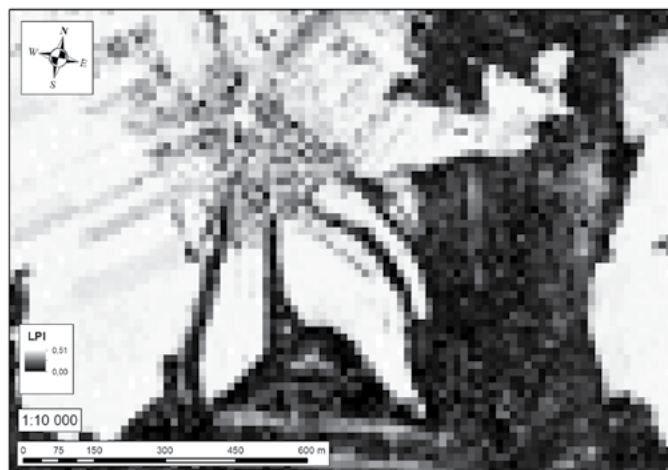
Koeficient determinace R<sup>2</sup> o hodnotě 0,7146 určuje, že výsledný model vysvětluje 71,46 % všech změřených případů (tzv. regresní rabat).

V případě rozlišení druhu porostu na jehličnaté a listnaté dřeviny bylo dosaženo dokonce ještě vyššího regresního rabatu. Regresní model pro jehličnaté porosty je popsán v tab. 2. Parametr LPI byl na základě provedeného t-testu vyhodnocen jako statisticky významný (zamítnuta nulová hypotéza o nulové hodnotě parametru).

**Tab. 2.**

Statistické charakteristiky regresního modelu pro jehličnaté porosty  
Statistical parameters of regression model for coniferous forest stands

Vícenásobný korelační koeficient R/ Multiple correlation coefficient R	0,8995
Koeficient determinace R <sup>2</sup> / Coefficient of determination R <sup>2</sup>	0,8091
Predikovaný korelační koeficient R <sub>p</sub> / Predictive correlation coefficient R <sub>p</sub>	0,5615
Střední kvadratická chyba predikce MEP/ Mean quadratic error of prediction MEP	0,1146
Akaikeho informační kritérium/ Akaike information criterion	-39,8826



**Obr. 4.**

Detail rastru LPI

**Fig. 4.**

Detail of LPI raster

Výsledný regresní model pro jehličnaté porosty lze tedy popsat jako rovnicí:

$$LAI = 4,034458319 - 12,78013817 * LPI$$

Koeficient determinace R<sup>2</sup> o hodnotě 0,8091 určuje, že výsledný model vysvětluje 80,91 % všech změřených případů.

Regresní model pro listnaté porosty je popsán v tab. 3. Parametr LPI byl na základě provedeného t-testu vyhodnocen opět jako statisticky významný (zamítnuta nulová hypotéza o nulové hodnotě parametru).

**Tab. 3.**

Statistické charakteristiky regresního modelu pro listnaté porosty  
Statistical parameters of regression model for deciduous forest stands

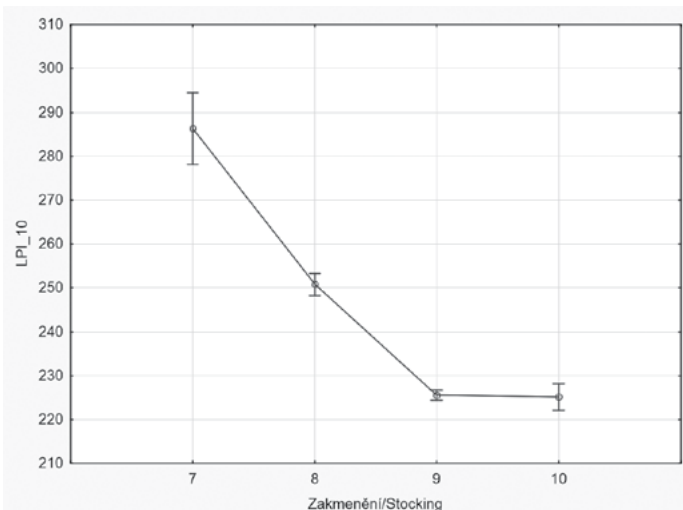
Vícenásobný korelační koeficient R/ Multiple correlation coefficient R	0,8658
Koeficient determinace R <sup>2</sup> / Coefficient of determination R <sup>2</sup>	0,7496
Predikovaný korelační koeficient R <sub>p</sub> / Predictive correlation coefficient R <sub>p</sub>	0,5119
Střední kvadratická chyba predikce MEP/ Mean quadratic error of prediction MEP	0,0856
Akaikeho informační kritérium/ Akaike information criterion	-65,8134

Výsledný regresní model lze tedy popsat jako rovnicí:

$$LAI = 3,904957099 - 8,473049207 * LPI$$

Koeficient determinace R<sup>2</sup> o hodnotě 0,749604 určuje, že výsledný model vysvětluje 74,96 % všech změřených případů.

Z grafického vyhodnocení intervalů spolehlivosti pomocí analýzy variance v programu STATISTICA pro jednotlivá zakmenění v porostech s převahou buku (obr. 5) vyplývá, že existuje statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami LPI, které jsou přiřazeny k nižším stupňům zakmenění (intervaly spolehlivosti se nepřekrývají). Podle LPI naopak není možné od sebe odlišit stupně zakmenění 9 a 10.



**Obr. 5.** Grafické znázornění 95% intervalů spolehlivosti LPI pro stupně zakmenění v bukových porostech

**Fig. 5.** Graphical visualization of 95% LPI confidence intervals for stocking levels in beech forest stands

## DISKUSE

Na základě všech provedených analýz bylo zjištěno, že k úspěšnému a co nejpřesnějšímu výpočtu indexu listové plochy je nejdůležitější použít co nejmenší rastr. Zároveň by se však v něm mělo vyskytovat minimální množství prázdných pixelů. Nejmenší vyhovující velikost jednoho pixelu byla v tomto případě 15 m × 15 m. Při analýze hemisférických snímků bylo třeba omezit co nejvíce úhel záběru plochy použité k výpočtu indexu listové plochy, a to až na 30°. Lokálně snížená hodnota LAI daná porostní světlinou nebo místy prořídilým porostem se při průměrování snímku příliš velkého území neprojeví, ale laser touto světlinou, respektive prořídilým porostem bez problémů pronikne, a to se projeví vyšší hodnotou LPI pro danou plochu. Podobně argumentuje i MUSSELMAN et al. (2013).

Byly vytvořeny čtyři regresní modely s různým koeficientem determinace (0,71–0,81). Lze říci, že nejvhodnějším modelem je paradoxně model s nejmenším regresním rabatem (regresní model o jedné neznámé), jelikož je u něj nejvíce omezena subjektivita rozhodování při rozdělování snímků do skupin podle smíšení. Dřevinné smíšení se však ukázalo jako významný parametr, a proto by bylo vhodné v dalších studiích provést více měření s odstupňovanou mírou smíšení. K co nejpřesnějšímu odhadu LAI ve smíšených porostech je optimální, a to buď na základě vegetačních indexů nebo tvaru mračna bodů leteckého laserového skenování, rozdělit smíšený porost na co nejmenší fragmenty podle dřevin a aplikovat regresní model, specifický pro danou dřevinu, na konkrétní segment. Pozemní verifikaci těchto modelů je pak potřeba provádět pouze v monokulturách.

BARILOTTI et al. (2006) vytvořil regresní model pro výpočet LAI s koeficientem determinace 0,89. Provedl však měření jen na 25 transektech, z toho šest transektů bylo v listnatých porostech. Patnáct transektů mělo výměru 400 m<sup>2</sup>, což je srovnatelné s úhlem záběru hemisférického snímku 42° (zenitový úhel 0°–21°). Dva transekty měly výměru 1000 m<sup>2</sup> a tři transekty 10 000 m<sup>2</sup>. Teoreticky je možné říci, že kdyby BARILOTTI et al. (2006) provedl 45 měření jako v této práci, regresní rabat by klesl. Zároveň však uvádí, že s nízkým počtem bodů koeficient determinace klesá, stále je však poměrně vysoký (0,61). K terénnímu měření nepoužil metodu počítačové analýzy hemisférických snímků, ale měření pomocí přístroje LiCor LAI-2000 Plant

Canopy Analyzer. Také se rovněž ve své práci nezmiňuje o provedení analýzy regresního tripletu, proto se lze domnívat, že regresní modely vytvořené v této práci jsou vhodnější i přes obecně nižší koeficienty determinace.

MUSSELMAN et al. (2013) vytvořil regresní model o koeficientu determinace 0,64. Provedl 24 měření LAI pomocí analýzy hemisférických fotografií. Uvádí, že je výhodnější provést vícenásobný přelet se skenerem nad porostem. MUSSELMAN et al. (2013) použil výpočet LPI za pomoci filtrace rastrů. Výše uvedeného koeficientu determinace se mu podařilo dosáhnout po aplikaci kruhového filtru o poloměru 35 m, neuvažuje však s omezením velikosti zenitového úhlu použitého pro výpočet LAI, jelikož vyhodnocování prováděl v programu Gap Light Analyzer, kde tato možnost neexistuje. Je pouze možné manuálně vymezit oblast vlastní hemisférické fotografie, a tím zenitový úhel zúžit.

KWAK et al. (2007) vytvořil rovnice závislosti LAI a LPI pro tři dřeviny. Koeficientu determinace 0,73 dosáhl u dřeviny *Larix leptolepis* Sieb. et Zucc., u dřeviny *Quercus spp.* a *Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc. dosáhl koeficientu determinace 0,81. Zároveň použil i tzv. Laser Intercept Index (LII), který se dá vypočítat podle vzorce:

$$LII = N_{(high+mid)}/N_{all} = 1 - (N_{gnd} + N_{low})/N_{all}$$

kde  $N_{(high+mid)}$  je součet odrazů od vysoké a střední vegetace,  $N_{gnd}$  je počet bodů na terénu,  $N_{low}$  je počet odrazů od vysoké vegetace a  $N_{all}$  je součet všech odrazů na dané ploše.

Pomocí tohoto indexu dosáhl KWAK et al. (2007) poměrně vysokých koeficientů determinace (0,85–0,88). Tento index totiž neztrácí původní informaci o počtu všech bodů transformací do rastru a zároveň umožňuje normalizaci zkrácené místní variace množství bodů. KWAK et al. (2007) nepoužil k měření LAI analýzu hemisférických fotografií, ale přístroj AccuPAR-80 Linear PAR/LAI Ceptometer, který může samozřejmě poskytovat odlišné výsledky. Měření prováděl na deseti zkusných plochách, kdy jedna plocha měla výměru 400 m<sup>2</sup>.

ZHAO a POPESCU (2009) provedli porovnání výpočtu LAI na základě dat leteckého laserového skenování a dat projektu ESA GLOBCARBON, které zobrazují informace o LAI získané ze satelitního měření v letech 1999 až 2002 (ESA 2006). Pomocí indexu LPM (Laser Penetration Metrics – obdoba LPI) dokázali vysvětlit regresním modelem 84 % variability dat. Pokusili se provést výpočet LAI také pomocí indexu HRM (Height-related Metrics), ale index LPM se ukázal jako spolehlivější. V porovnání s multispektrálními snímky z družice MODIS vychází letecké laserové skenování jako lepší zdroj dat, ale v současné době je ještě nemožné vyvinout model LAI z leteckého laserového skenování bez referenčního pozemního měření. Při mapování indexu listové plochy pomocí leteckého laserového skenování je třeba v dalších studiích dbát na vyšší přesnost *in situ* měření LAI a pomocí něho kalibrovat modely z LLS, které zas mohou dále sloužit jako zpřesňující pro výpočty založené na satelitních multispektrálních snímcích. Měření prováděli na 53 plochách, z toho 14 ploch bylo se smíšeným porostem, zbývajících 39 ploch tvořily plochy borovice kadidlové (*Pinus taeda* L.).

PELUZZI et al. (2012) vytvořil regresní model pro smíšené lesy ve Virginii, který vysvětloval 69 % variability LAI. Pokud však zkombinoval model s daty radarové interferometrie, dosáhl koeficientu determinace 0,77.

Je samozřejmě možné namítnout, že 45 měření nepostačuje k vytvoření modelu, ale i přesto je v této práci použito více měření LAI, respektive více ploch než u třech autorů zmíněných výše (BARILOTTI et al. 2006; KWAK et al. 2007; MUSSELMAN et al. 2013) a podobný počet ploch jako u ZHAO, POPESCU (2009). Pokud by byl použitý počet ploch nedostačující, projevilo by se to při testování regresního tripletu například autokorelací reziduí nebo heteroskedasticitou. Je však vhodné provést co nejvíce měření, neboť výsledný model pak lépe charakterizuje prostorovou variabilitu LAI.

Významný vliv na korelaci mezi LPI a LAI má přesnost určení polohy každého snímku. Krajně nevhodné je měření pomocí GNSS bez korekce z pozemních stanic. Minimálně je nutné použít GNSS přijímač s garantovanou submetrovou a lepší přesností. Použitý GPS/Glonass/SBAS přijímač Trimble Pathfinder ProXRT disponuje dle specifikací decimetrovou přesností v reálném čase nebo postprocessingově. V lesních porostech je to kvůli nižší viditelnosti satelitů přes koruny stromů o něco méně, ale vzhledem ke zvolené velikosti pixelu pro výpočet LPI (15 m × 15 m) je i přesnost řádově okolo 1 metru zcela dostačující.

Možné chyby při měření LAI mohly být způsobeny použitým fotoaparátem Nikon Coolpix 4500, který byl uveden na trh již v roce 2002. Tento fotoaparát disponuje rozlišením pouze 4 megapixely a v porovnání se současnými digitálními APS-C a full-frame zrcadlovkami i malým dynamickým rozsahem čipu. Vznikají tak snáže tzv. přepaly, což jsou bílé oblasti na snímku, které neobsahují kresbu, již není možné získat ani postprocessingovou úpravou expozice pomocí histogramu v některém ze softwarů na úpravu fotografií. Právě hemisférické snímky korunového zápoje mají obrovský dynamický rozsah, proto by bylo vhodnější použít nejlépe nějakou full-frame digitální zrcadlovku. Určitým řešením by mohla být také záměrná podexpozice snímku o několik expozičních stupňů (WAGNER 1998; ZHANG et al. 2005), u modernějších fotoaparátů také úprava rozložení hodnot jasů podle histogramu ze surového (RAW) formátu (BECKSCHÄFER et al. 2013). Celkově mohou být výsledky měření LAI touto metodou podhodnoceny, a to především u Jehličnatých porostů. Někteří autoři LAI určený optickými metodami nazývají jako „efektivní index listové plochy“ (LAI<sub>e</sub>- effective LAI) (BLACK et al. 1991; CHEN et al. 1991), který neopravuje nenáhodnou distribuci listů a započítává i nelistové prvky (např. větve). Tento index je možné na LAI přepočítat podle vzorce LAI<sub>e</sub>=β\*LAI<sub>e</sub>, kde β je korekční faktor odlišný pro různé druhy dřevin. GOWER, NORMAN (1991) uvádějí faktory 1,60 a 1,49 pro smrk a modřín. Pro buk se tento korekční faktor nepoužívá. Podhodnocení výsledků je vysoce pravděpodobné, jelikož bylo dosaženo indexů listové plochy v intervalu od 1,71 do 4,38, ale v lesních porostech LAI běžně nabývá hodnot kolem 6–7 a ve smrkových mlazínách i přes 20 (POKORNÝ 2002). Podle LEEUWEN et al. (2013) je ale pro účely modelování radiace na bázi Beer-Lambertova zákona efektivní LAI vhodnější než LAI reálný.

Zjištěné závislosti jsou platné buďto v měřítku jednotlivých výzkumných ploch, či na regionální úrovni. Některé modely jsou ovlivňovány vegetační sezónností (olistění stromů) a některé platí pouze pro specifické porostní typy (PIROTTI 2011). Regresní modely zde publikované dosahují obdobného regresního rabatu, jako modely jiných autorů. Jiná práce zabývající se výpočtem radiace nebo LAI z leteckého laserového skenování nebyla na území ČR nikdy publikována. Pro praktické využití, například pro plánování výchovných zásahů s ohledem na přirozenou obnovu hospodářských dřevin, bude samozřejmě nutné provést více měření a zaměřit se primárně na mýtní porosty s homogenní strukturou.

Při porovnání zakmenění v LHO s LPI bylo nejprve předpokládáno, že bude existovat přímá závislost mezi hodnotou LPI a stupněm zakmenění, proto byla provedena zonální statistika polygonů všech porostů v LHO Brumov, která počítala průměrné LPI v každém z polygonů. Zakmenění je však závislé na hmotnatosti a počtu stromů. Předpoklad, že zakmenění bude možné počítat podle množství prŮniku světla porostními světlinami, se však neprokázal.

Snížené zakmenění většinou vzniká výchovným zásahem, clonnou sečí, případně nahodilou těžbou. Listnáče na uvolněný okolní prostor reagují tak, že jej obsadí svými větvemi a zvětšují úhel větvení – košatí (DEBELJAK, MLINŠEK 1998). Větve již pak nerostou v tak silném zápoji a skrz koruny těchto stromů proniká světlo (laser) snáže. A naopak silný kmen, který může zvyšovat stupeň zakmenění, brání prŮniku světla, a tím pádem i laseru. Jakmile proto byla zvolena metoda detekce stromů pomocí segmentace inverzního povodí a k těmto stromům se

přidala hodnota LPI vypočítaná na ploše 100 m<sup>2</sup>, dosáhlo se statisticky významného rozdílu mezi jednotlivými stupni zakmenění. Pouze mezi zakmeněním 9 a 10 se neprokázal žádný signifikantní rozdíl, a to pravděpodobně proto, že stupeň 9 se od plného zakmenění často odlišuje jen nižší hmotnatostí. U Jehličnanů se tato premisa neprokázala, na uvolněný prostor totiž reagují jen zvýšením přírůstu. Zjišťování sníženého zakmenění pomocí LLS může mít význam například v environmentální kriminalistice při kontrole dodržování lesního zákona.

## ZÁVĚR

Byly vytvořeny čtyři různé regresní modely pro výpočet indexu listové plochy na bázi dat leteckého laserového skenování. Výpočtu modelů předcházelo terénní měření LAI pomocí hemisférických snímků. Celkem bylo pořízeno 45 hemisférických fotografií, které byly zpracovávány v softwarech Gap Light Analyzer + SideLook a WinScanopy. Nejvyšší korelaci s daty leteckého laserového skenování nejlépe zajistí úhel záběru omezený až na 30°. Z tohoto důvodu je vhodnější použít komerční software WinScanopy, který umožňuje úhel záběru omezit zadáním konkrétního úhlu.

Jako referenční veličina pro výpočet LAI byl vybrán tzv. LiDAR penetration index (LPI), studující prŮnik laserového paprsku přes zápoj lesního porostu. Optimální korelaci s LAI pro úhel záběru 30° poskytl rastr LPI o velikosti pixelu 15 m. Regresní modely závislosti LAI na LPI byly vypočítány v softwaru QC Expert. Do prvního modelu s koeficientem determinace 0,75 vstupují dvě nezávislé proměnné: LPI a druh dřeviny. Druhý model s koeficientem determinace 0,71 a jednou nezávislou proměnnou neuvažuje dřevinné složení porostu, má nejnižší potenciální chybovost způsobenou nesprávně zařazenou dřevinou skladbou a je zřejmě pro dané použití nevhodnější, jelikož zájmová plocha má nerovnoměrné dřevinné složení. Dále byly vytvořeny dílčí modely pro Jehličnaté a listnaté porosty s regresním rabatem 81 %, respektive 75 %.

Veškeré provedené výpočty lze zautomatizovat a navzájem řetězit v prostředí ModelBuilder pro ArcGIS, případně je aplikovat do geoprocessingových nástrojů, např. pro optimalizaci těžeb. Na základě modelů solární radiace lze rozhodnout o optimálním tvaru holých sečí z hlediska jejich radiačního režimu a vhodnosti pro zalesnění určitou dřevinou. Zároveň je možné v případě podrostního hospodářského způsobu určit intenzitu fázi clonných sečí k zajištění optimálních světelných podmínek pro následný porost. V neposlední řadě lze podle LiDAR Penetration Indexu stanovit naléhavost a intenzitu výchovných zásahů.

Přestože nebyla zjištěna zcela přímá závislost mezi LPI a zakmeněním porostu, z výsledků vyplývá, že pomocí LPI je možné minimálně identifikovat snížené zakmenění lesních porostů.

## Poděkování:

V textu jsou publikovány výsledky, které vznikly za podpory z projektu Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně IGA 84/13 „Dynamika přirozené obnovy v ekologických podmínkách porostních mezer na příkladu ŠLP Křtiny“.

## LITERATURA

- ACKERMANN F. 1999. Airborne laser scanning present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (1): 64–67.
- BARILOTTI A., TURCO S., ALBERTI G. 2006. LAI determination in forestry ecosystem by lidar data analysis. In: International workshop 3D remote sensing in forestry. 14<sup>th</sup>–15<sup>th</sup> Feb. 2006, BOKU, Wien. Wien, BOKU: 248–252.



- BECKSCHÄFER P., SEIDEL D., KLEINN C., XU J. 2013. On the exposure of hemispherical photographs. *iForest*, 6: 228–237. DOI: 10.3832/ifer0957-006
- BLACK T.A., CHEN J.M., LEE X., SAGAR R.M. 1991. Characteristics of short-wave and long-wave irradiances under a Douglas-fir forest stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 21: 1020–1028.
- DEBELJAK M., MLINŠEK D. 1998. Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) und ihr Reaktionsvermögen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 149 (2): 71–86.
- EDSON C.B. 2011. Light detection and ranging (LiDAR): What we can and cannot see in the forest for the trees. Dissertation. Oregon State University. Proquest, UMI Dissertation Publishing: 277 s.
- ESA. 2006. Satellite portrait of global plant growth will aid climate research. [online]. [cit. 2014-01-10]. Dostupné na World Wide Web: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Satellite\\_portrait\\_of\\_global\\_plant\\_growth\\_will\\_aid\\_climate\\_research](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Satellite_portrait_of_global_plant_growth_will_aid_climate_research)
- FRAZER G.W., CANHAM C.D., LERTZMAN K.P. 1999. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users' manual and program documentation. New York, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia; Millbrook, Institute of Ecosystem Studies: 36 s.
- FRAZER G.W., FOURNIER R.A., TROFYMOV J.A., HALL R.J. 2001. A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 249–263.
- GOWER S.T., NORMAN J.M. 1991. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaved plantations. *Ecology*, 72: 1896–1900.
- HYYPÄ J., HYYPÄ H., LECKEE D., GOUGEON F., YU X., MALTAMO M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1339–1366.
- CHEN J.M., BLACK T.A., ADAMS R.S. 1991. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56: 129–143.
- CHIANUCCI F., CUTINI A. 2012. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities. *iForest*, 5 (6): 290–295. DOI: 10.3832/ifer0775-005
- JEDLIČKA K. 2009. Accuracy of surface models acquired from different sources – important information for geomorphological research. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 9 (1): 17–28.
- JENNINGS S.B., BROWN N.D., SHEIL D. 1999. Assessing forest canopies and understorey illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72 (1): 59–73.
- JONCKHEERE I., FLECK S., NACKAERTS K., MUYS B., COPPIN P., WEISS M., BARET F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 19–35.
- 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.
- KORPELA I., KOSKINEN M., VASANDER H. 2009. Airborne small-footprint discrete-return LiDAR data in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation, and habitats. *Forest Ecology and Management*, 258: 1549–1566.
- 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 2007. Espoo, 12-14 Sept. 2007. ISPRS Working Group: 248–252. Dostupné na World Wide Web: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final\\_papers/Kwak\\_2007.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/final_papers/Kwak_2007.pdf)
- LEEUWEN M. VAN, COOPS N.C., HILKER T., WULDER M.A., NEWHAM G.J., CULVENOR D.S. 2013. Automated reconstruction of tree and canopy structure for modeling the internal canopy radiation regime. *Remote Sensing of Environment*, 136: 286–300.
- MARKOVÁ I. 2010. Radiační režim v lesních porostech. Habilitační práce. Brno, Mendelova univerzita.
- MIKITA, T., KLIMÁNEK, M., CIBULKA M. 2013. Hodnocení metod interpolace dat leteckého laserového skenování pro detekci stromů a měření jejich výšek. *Zprávy lesnického výzkumu*, 58 (2): 99–106.
- MORSDFORD 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.
- MYNENI R.B., NEMANI R.R., RUNNING S.W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 35 (6): 1380–1393.
- NÆSSET E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 164–179.
- 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.
- PIEDALU C., GÉGOUT J. 2008. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (11): 1696–1700.
- 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/ifer0562-004
- POKORNÝ R. 2002. Index listové plochy v porostech lesních dřevin. Diplomová práce. Brno, MZLU v Brně: 135 s.
- RIAÑO D., VALLADARES 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.
- SMITH K.J., KEETON W.S., TWERY M.J., TOBI D.R. 2008. Understorey plant responses to uneven-aged forestry alternatives in northern hardwood–conifer forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 38 (6): 1303–1318.
- WAGNER S. 1998. Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90: 103–117.
- 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. *Annals of Botany*, 11: 41–76.
- ZHANG Y., CHEN J.M., MILLER J.R. 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133 (1–4): 166–181.
- ZHAO K., POPESCU S. 2009. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA. *Remote Sensing of Environment*, 113: 1628–1645.



## ESTIMATION OF LEAF AREA INDEX (LAI) IN FORESTS ON THE BASIS OF AIRBORNE LASER SCANNING IN THE CONDITIONS OF THE CZECH REPUBLIC

### SUMMARY

In the past years, airborne laser scanning has been established as a valuable tool for forest structural analyses. Algorithms for the derivation of properties such as tree height, biomass and basal area have been implemented and evaluated on various study sites using ALS data. Our aim was to show the potential of ALS data for the derivation of LAI in conditions of the Czech Republic.

Four different regression models for LAI estimation based on ALS data were created. Beforehand, hemispherical photography was chosen as a reference method of *in situ* LAI determination (Fig. 1). Forty-five hemispherical photographs were taken in complex, forested terrain of the White Carpathians in the southeaster part of the Czech Republic, and used to produce ground-based estimates of LAI (Fig. 2). Two different types of software were employed to process hemispherical photos. One of those was freeware licensed Gap Light Analyzer, and the other was commercial software WinScanopy, whose functionality appeared more suitable for our purpose. It can reduce the field of view (FOV) by entering a specific angle. FOV can be limited also in Gap Light Analyzer by specifying image area, but there is a strong underestimation of LAI.

As a reference value for the LAI calculation LiDAR penetration index (LPI) was selected, studying the penetration of the laser beam through the forest canopy (Fig. 3). For defining LPI, rasters with different pixel sizes were calculated, using geoprocessing tools in ESRI ArcGIS (Fig. 4).

Therefore, the FOV in WinScanopy was limited to 30° for its highest correlation with LiDAR penetration index (LPI) raster with pixel size of 15 m.

Consequently, regression models of LAI dependence on LPI were calculated in software QC Expert. The first model with two independent variables (LPI and tree species) has a coefficient of determination of 0.75. The second model with a coefficient of determination of 0.71 and one independent variable (tree species composition excluded) has the lowest potential errors caused by the incorrect classification of tree species composition (Tab. 1). This model is most likely the best suited for a given application, because tree species composition is not uniform in this research area. Sub-models for coniferous and deciduous forests were developed with regression rebate 81% and 75% (Tab. 2; Tab. 3).

It was proved that the LPI can be used to estimate stocking of deciduous forest stands. It was not possible to differentiate stocking level 9 from 10 (Fig. 5).