



národní
úložiště
šedé
literatury

Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin

Pokorný, Radek
2015

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-180899>

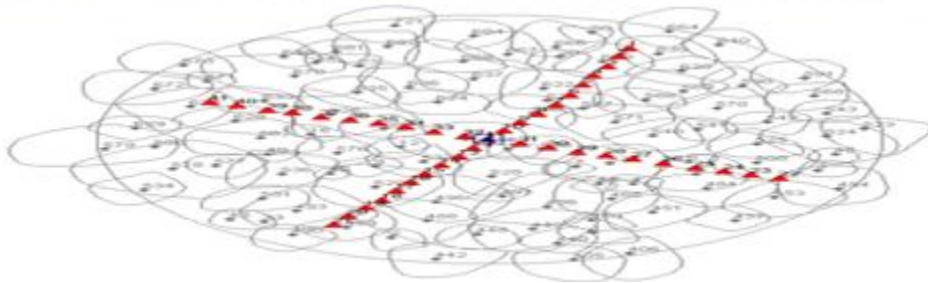
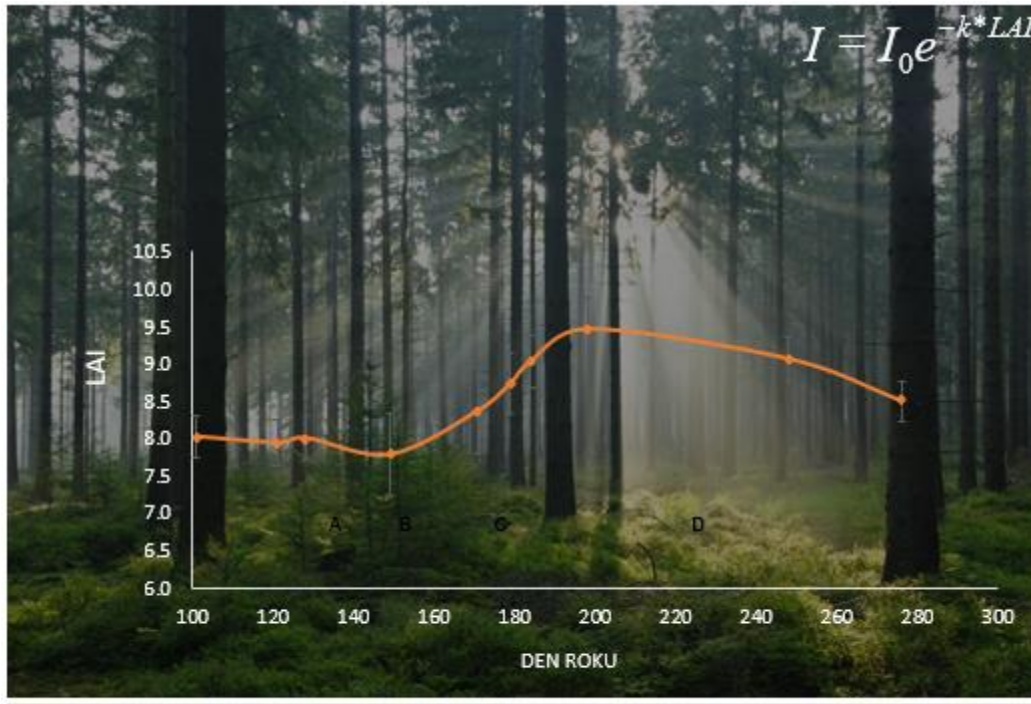
Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 19.04.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní [nusl.cz](http://www.nusl.cz) .

Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin



doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D.

Certifikovaná metodika

©2015

Název: Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin

Autor: doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D.

**Recenzenti: Ing. Ondřej Špulák, Ph.D.
Ing. Martin Pospíšil**

**Vydal: Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.
Bělidla 986/4a, 603 00 Brno
<http://www.czechglobe.cz>**

Tisk: L.V. Print, Uherské Hradiště



Metodika byla vypracována za podpory grantu č. TA 02010945



Technologická agentura
České republiky



Alfa |

*Osvědčení/ Protokol o schválení (certifikaci) metodiky vydalo:
Ministerstvo životního prostředí, Sekce ochrany přírody a krajiny,
Odbor obecné ochrany přírody pod č.j. 87612/ENV/14, dne: 21.1. 2015.*

ISBN 978-80-87902-08-0

Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin

doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D.

CERTIFIKOVANÉ
Metodiky pro praxi

Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.
Brno 2014

Guideline for leaf area index estimation in non-mixed forest tree stands

Abstract

The leaf area index (LAI) quantifies the amount of leaf area bearing by a tree or a whole stand normalized by unit of the crown projected or the whole stand ground area. It is one of the most important structural characteristic of a tree or forest stand due to potential of biomass production or health status evaluation and/or their prediction. The LAI can be estimated using many experimental methods, which can be separated into these groups: (1) direct methods, (2) semi-direct methods, and (3) indirect methods. Even if the LAI is evaluated by indirect methods which are based on the canopy gap-fraction or transmittance of light quantification, obtained values are accurate and widely comparable to other ones estimated by direct methods, which are highly accurate, but laborious and time-consuming. Indirect methods are, comfortable, less time demanding comparing to other methods and user-friendly for practical use in forestry.

For the indirect methods application, optically based instruments are needed. Optical sensors (or just one), evaluated light conditions within the interval of photosynthetically active radiation wavelength or in a specific range of the visible light (to confirm the MONSI and SAEKI (1953) theory), are the main parts of these instruments. However, the parts of different instruments and brief description how to use them for LAI evaluation is commonly described in the instrument's manuals, they missing: description how to assess whether the current conditions for LAI measurement are suitable, how to establish a grid of measurement points in a stand and what corrections to apply etc. in order to obtain the desired value of LAI effectively and accurately. Therefore, this guideline fills the gaps in the information given in the instruction manuals to these instruments.

Keywords: health status, leaf area, light conditions, production potential

Klíčová slova: listová plocha, produkční potenciál, světelné podmínky, zdravotní stav

Adresa autora:

doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D., Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i., Bělidla
986/4a, 603 00 Brno

Obsah

I.	Cíl metodiky	5
II.	Teorie a metody měření LAI	6
1.	Úvod do problematiky	6
2.	Co je to LAI	6
3.	Metody stanovení LAI	7
3.1.	Přímé metody	8
3.2.	Polopřímé metody	9
3.3.	Nepřímé metody	9
3.3.1.	Metody měření intenzity radiace	10
3.3.2.	Metody mezernatosti	12
3.3.3.	Předpoklady k nepřímému stanovení LAI	13
a.	Stanovení LAI v lesních porostech	13
b.	Korekční faktory	15
4.	Maximální a optimální hodnoty LAI	17
III.	Efektivní postup stanovení LAIe v lesních porostech pomocí nepřímých metod	19
a.	Stanovení vhodných podmínek měření	19
b.	Měření na volné ploše	21
c.	Měření v porostu	23
d.	Uspořádání transektů a rozestupové vzdálenosti v porostu	26
e.	Zápis v terénním zápisníku	30
f.	Doporučená oprava extrémních hodnot	30
g.	Přepočet LAIe na LAI	30
h.	Nejvhodnější období pro stanovení LAI	31
IV.	Srovnání novosti postupů	31
V.	Popis uplatnění metodiky	32
VI.	Ekonomické aspekty	32
VII.	Seznam vybrané použité související literatury	33
VIII.	Seznam publikací, které předcházely metodice	34
	Summary	36
	Příloha – seznam použitých zkratk	37

I. Cíl metodiky

Význam listoví, její kvantity a kvality pro život i produkci rostliny je nesporný. Kvantitativním parametrem množství listoví může být její biomasa či ještě lépe plocha povrchu. Listová plocha totiž zaujímá z orgánů rostlinného těla největší plochu povrchu, je v aktivní, nejtěsnější interakci se svým okolím a probíhají v ní klíčové fyziologické procesy spojené s látkovou a energetickou výměnou (fotosyntéza, respirace, transpirace). Hlavní funkcí listoví je jak záchyt sluneční energie, tak výměna plynů- především oxidu uhličitého a vodní páry. Proto je pro řadu ekofyziologických studií, zabývajících se kvantifikací energetické a látkové výměny mezi porostem a atmosférou, fotosyntetickou asimilací (příjemem CO₂) nebo naopak respiračními ztrátami uhlíku, bilancí vody v rostlině nebo v celém ekosystému, a dalšími procesy, nezbytné znát velikost nesené listové plochy. Listová plocha v lesnické praxi může být nejen ukazatelem zdravotního stavu stromu, ale také ukazatelem produkčního potenciálu stromu/ porostu.

V současné době probíhá hodnocení zdravotního stavu (resp. stupně poškození) stromu a potažmo porostu podle míry defoliace. Dle míry defoliace jsou v porostech lesních dřevin vylišena také pásma ohrožení imisemi. Míru defoliace stanoví okulárně skupina vyškolených pracovníků jako procentuální ztrátu listoví vůči 100 % olistěnému jedinci (etalonu), tj. jedinci s maximální hodnotou pokryvnosti listoví neboli indexu listové plochy (LAI; zkratka je z anglického Leaf Area Index). Defoliace a LAI jsou tedy reciprokými parametry (POKORNÝ & STOJNÍČ 2012). Výše zmíněnou zavedenou proceduru stanovení defoliace (VYHL. Č. 78/ 1996 MZE ČR) resp. LAI je však možno více zobjektivizovat použitím vhodné metodiky stanovení LAI.

Cílem předkládané metodiky je nejprve seznámit odborného pracovníka českého či lesníka alespoň ve stručném přehledu s teorií a existujícími metodami stanovení LAI, které jsou popsány především v anglicky psané odborné literatuře. Dále je cílem podrobněji seznámit čtenáře s metodickými postupy, které jsou snadné a přitom dostatečně přesné pro stanovení LAI v praxi, se zvláštním zřetelem na měření v lesních porostech. Takovými postupy jsou tzv. nepřímé metody využívající nejčastěji přístrojů s optickými čidly. Jednotlivé přístroje na trhu mají vždy svůj vlastní manuál s podrobným popisem přístroje, jeho ovládáním a návodem, jak dospět k hodnotě LAI z naměřených dat. Tyto manuály však postrádají přesnější metodický popis jak ohodnotit podmínky měření, jak přesněji postupovat při volbě počtu a uspořádání měřičských stanovišť, jaké použít korekce apod. tak, aby výsledná hodnota LAI byla co nejpřesnější. Hlavním cílem předkládané metodiky je proto tyto chybějící návody poskytnout. Metodika je zaměřena na stanovení LAI nepřímými metodami v nesmíšených porostech, neboť stanovení LAI smíšených porostů vyžaduje zvláštní, náročnější, metodický postup.

Návrh metodiky vychází z dlouholetých zkušeností, úrovně poznání a porovnání několika metod a přístrojů pro stanovení LAI v porostech lesních dřevin (POKORNÝ & OPLUŠTILOVÁ 1999, POKORNÝ & MAREK 2000, POKORNÝ et al. 2001, POKORNÝ 2002, POKORNÝ & TOMÁŠKOVÁ 2007, MARKOVÁ & POKORNÝ 2011) a možnosti aplikace a využití parametru LAI v lesnické praxi například pro ohodnocení zdravotního stavu či optimalizaci produkce biomasy (POKORNÝ et al. 2008, MARKOVÁ et al. 2011, POKORNÝ & STOJNÍČ 2012).

II. Teorie a metody měření LAI

1. Úvod do problematiky

Velikost listové plochy je v porostech lesních dřevin nejčastěji popisována pomocí pokryvnosti listoví, neboli indexu listové plochy (LAI). Četné jsou studie vztahů mezi množstvím neseného listoví a fyziologickými procesy probíhajícími v rostlině, zejména pak ve vztahu k produkci biomasy na teoretické i empirické úrovni, k primární produkci nadzemní biomasy, depozici vzdušných nečistot, evapotranspiraci a vodnímu režimu stanoviště aj. *Odtud vyplývají i zřetelné vazby mezi množstvím nesené listové plochy a produkční, půdoochrannou, vodohospodářskou a zdravotně-hygienickou či klimatickou funkcí lesa.* I opad sehrává důležitou úlohu například při ovlivnění povrchového odtoku srážek, retence nebo tvorby nadložního humusu.

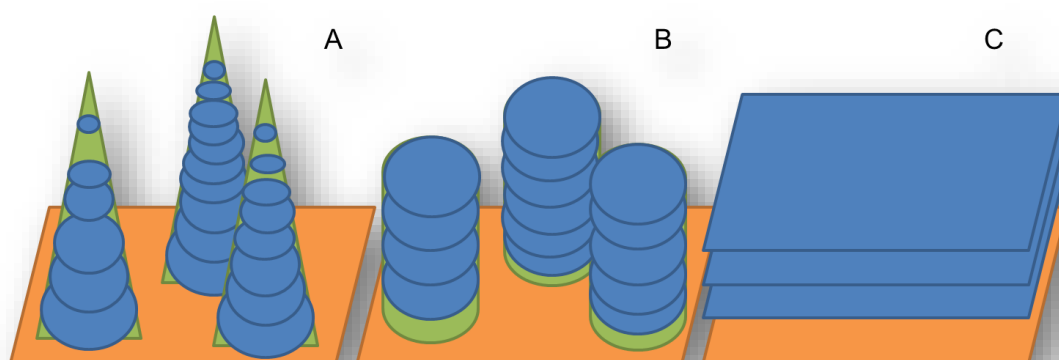
Strukturní parametry korunové vrstvy, mezi nimi zejména listová plocha, hustota listoví (plocha listoví v objemové jednotce koruny stromu nebo korunové vrstvě porostu), prostorová distribuce a orientace listoví, jsou nutné vstupy do řady *růstových a produkčních modelů, radiačních modelů, modelů předpovědi počasí* apod. Obdobné studie by se měly více uplatňovat ve studiích lesnických, ve spojení se studii ekofyziologickými, zabývajícími se produkcí a produkčními možnostmi porostu, optimalizací výchovných zásahů z hlediska jejich intenzity a intervalu (POKORNÝ et al. 2008) apod. Množství resp. hustota listoví v korunové vrstvě výrazně modifikuje radiační podmínky uvnitř porostu a naopak, proto udává i předpoklady pro výskyt a odrůstání přirozené obnovy. Výše zmíněné studie budou nabývat na významu zvláště ve spojení s výrazně se měnícími podmínkami prostředí i stavem a strukturou lesních porostů.

2. Co je to LAI?

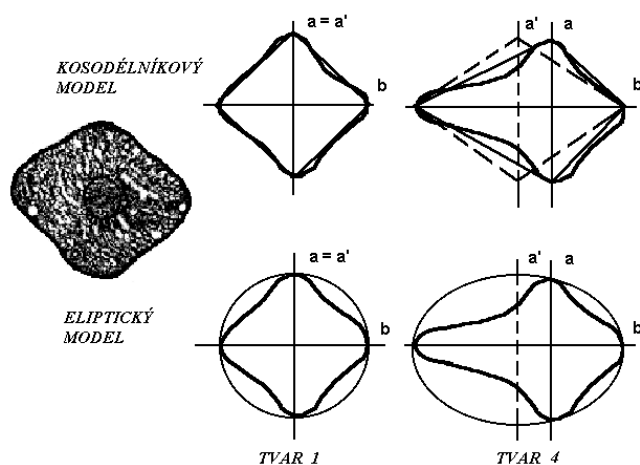
Obecně lze LAI definovat jako *listovou plochu vyskytující se nad určitou jednotkou povrchu půdy*. Použita může být listová plocha 1) *projekční*, daná vertikální (ortogonální) projekcí listové plochy do horizontální roviny, pak se jedná o projekční LAI (LAI_p), nebo 2) *polovina celkové plochy povrchu listů/ jehlic* (tzv. hemi-surface LAI), nebo 3) *celková plocha povrchu jehlic nebo listů* (LAI_t). Nejčastěji je používán LAI dle definice ad. 2). V tomto případě platí pro listnáče (hemi-surface) LAI = LAI_p; resp.: $2 \times \text{LAI}_p = 2 \times \text{LAI} = \text{LAI}_t$, neboť listy jsou v podstatě plochá tělesa. Definice ad. 2) je tak významně vymezena zvláště pro jehličnany, neboť i když platí, že $2 \times \text{LAI}$ (hemi-surface) = LAI_t, neplatí jako u listnáčů LAI = LAI_p. Jehlice jsou totiž tělesa spíše válcovitého tvaru s měnícím se tvarem příčného průřezu (viz Obr. 2). Jednotkovou plochou povrchu půdy, jíž se normalizuje listová plocha, může být celá porostní plocha, plocha zastíněná projekcí jednotlivých korun stromů, anebo plocha příčného průřezu koruny v určité výškové úrovni (Obr. 1). Jednotkou LAI je m².m⁻² nebo ha.ha⁻¹. LAI je tak víceméně *bezrozměrnou veličinou*. Obdobně lze normalizovat plochu povrchu ostatních nadzemních orgánů rostlinného těla, například větví (BAI – Branch Area Index) nebo kmenů (SAI – Stem Area Index). Souhrnně se plocha povrchu všech nadzemních orgánů vegetace normalizovaná plochou povrchu půdy nazývá PAI – plant area index (někdy se užívá VAI – Vegetation Area Index; PAI = LAI + BAI + SAI). Protože bývá listová plocha vyčleňována často zvláště, bývá plocha dřevních částí, tvořících nosnou kostru, označována také souhrnně zvláště jako tzv. skeleton index nebo index povrchu dřevních částí (WAI – Woody Area Index, WAI = BAI + SAI).

Největší problémy spojené s definicí LAI způsobuje často užívaný termín „one-sided“ tj. jednostranný LAI, neboť některými autory je tímto termínem prezentována polovina

celkového (ad 2) jinými projekční LAI (ad 1). U listnatých dřevin toto není problémem, neboť pro ploché tenké listy většiny listnáčů je projekční a jednostranná plocha listu shodná ($LAI_p = LAI$). Celková plocha povrchu je dvojnásobkem projekční plochy. Složitý je tento problém u jehličnatých dřevin, kdy se projekční plocha jehlice s polovinou její celkové plochy povrchu neshoduje díky složitému a měnícímu se tvaru příčného průřezu jehlic mezi dřevinnými druhy i v rámci jednoho druhu (např. STENBERG et al. 1999, HOMOLOVÁ et al. 2013; Obr. 2). Výrazným „modifikačním“ faktorem jsou v tomto ohledu opět světelné podmínky, v nichž se jehlice vyvíjí. Jehlice (list) se na tyto podmínky adaptuje svými morfologickými, anatomickými, chemickými i fyziologickými parametry již v prvním roce života. V literatuře se s ohledem na fyziologické funkce asimilačního aparátu a vztahy listové plochy k faktorům vnějšího prostředí používá častěji LAI vycházející z celkové plochy nebo poloviny celkové plochy povrchu listovní než z plochy projekční.



Obr. 1. Schematické zobrazení indexu listové plochy (LAI) porostu o velikosti $LAI=3$ (C, modře plocha listovní, hnědě plocha porostu), který lze díky „uskupení“ listovní v prostoru korun stanovit jak pro jednotlivé stromy (A, B), tak pro celý porost (C). Při stanovení LAI ve vertikálním profilu koruny jednotlivého stromu lze LAI normalizovat dokonce plochou průmětu koruny v určité výškové úrovni (A), či jen plochou průmětu celé koruny na povrch půdy (B, zeleně). Porostní LAI na rozdíl od korunového vychází z normalizace listové plochy plochou porostu (C).



Obr. 2. Tvar příčného průřezu jehlice smrku ztepilého s přiřazením tvarového kódu (TVAR 1 až TVAR 4) vzhledem k celkovému tvaru a různé poloze os ($a-a'$) při zjednodušení na geometrický tvar elipsy či kosodélníku. Tvar 1- charakteristický pro jehlice z osluněné vrcholové části koruny, 4- pro jehlice ze zastíněné spodní části koruny (převzato z POKORNÝ 2002).

3. Metody stanovení LAI

LAI je možno stanovit některou z mnoha experimentálních metod, které mohou být rozděleny do několika základních skupin: (1) přímé metody, (2) polopřímé metody, a (3) nepřímé metody. Uvést je možno i subjektivní- odhadové metody, ale ty nelze pokládat za vědecké, přesné. Přehled metod uvádí například JONCKHEERE et al. (2004). Rozdíly mezi jednotlivými metodami jsou zejména v dosažené přesnosti výsledku, možnosti opakování měření na stejné skupině stromů, podmínkách měření a rychlosti stanovení hodnot LAI.

3.1. Přímé metody

Přímé metody jsou založené převážně na *destrukci* rostliny, spočívající v odstranění listů z rostliny. Přímá měření mohou kromě zjišťování listové plochy zahrnovat navíc i tvar, úhel nasazení, rozměry nebo pozici jednotlivého orgánu v prostoru koruny či porostu. Kvantitativní popis „geometrických rysů“ nadzemní biomasy, rostlin a jejich orgánů je však složitý, neboť nadzemní biomasa je prostorově a časově velmi proměnná. Získání všech výše zmíněných informací pro každý orgán a jejich kvantifikace jsou pak zhodnoceny statisticky z celého souboru měřených stromů/ vzorků. Protože by bylo vysoce náročné změřit všechny stromy/ orgány stromů v porostu, je nutno se častěji odvolat na reprezentativní rostlinu (nebo jen větev) tj. vzorník, jejíž charakteristiky jsou použity pro rostliny další. Přímému stanovení LAI předchází měření, která jsou prováděna manuálně měřeními sérií jednoduchých parametrů u většího počtu rostlin, a poté dochází teprve k výběru menšího počtu reprezentativních vzorníků- jedinců pro detailní analýzy. Prakticky lze doporučit výběr minimálně tří vzorníkových stromů z každé sociální úrovně tj. podúrovňové, úrovně a nadúrovňové. Větší počet vzorníků lze doporučit k výběru zejm. ze zastoupenějších sociálních tříd, především hlavní úrovně. Pro podrobnější a přesnější analýzu listové plochy s ohledem na vertikální stratifikaci a stáří listoví (jehlic) je vhodné analyzovat listoví v koruně po určitých vrstvách- sekcích. Tyto sekce mohou mít stejnou určitou šířku (např. 1 m), nebo mohou být různě široké a zahrnovat vždy stejný počet přeslenů (např. dva) nebo různé části koruny, v nichž lze očekávat morfologicky, anatomicky, chemicky i fyziologicky odlišné listoví. Takto lze korunu listnáčů i jehličnanů rozdělit jednoduše na slunnou, přechodovou a stinnou část, a to již vizuálně dle tvaru koruny nebo letorostů (POKORNÝ et al. 2004). Přímé metody jsou velice přesné. Jsou vhodné spíše pro listnaté stromy a keře. Pro jehličnany jsou tyto metody velmi pracné a časově náročné. Opakovaná destrukce vybraných vzorníků nebo části porostu je nemožná a nelze sledovat vývoj stanovených parametrů na identickém biologickém materiálu.

Při přímé metodě se využívá parametru SLA (specifická listová plocha, zkratka z anglického „specific leaf area“, jednotkou je $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) nebo SLM (specifická listová hmotnost, zkratka z anglického „specific leaf mass“, jednotkou je $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) pro vybraný vzorek listoví, který je využit jako přepočtení koeficient z hmotnosti listoví celého souboru listoví z něhož byl vzorek odebrán na plochu povrchu listoví.

V případě opadavých stromů je možno ohodnotit také plochu listů opadlých do sběrné nádoby (opadoměru) umístěné pod korunou stromů. Protože však není analyzován čerstvý asimilační aparát, je nutno počítat s redukcí listové plochy vlivem seschnutí a to až o ca 25 %. /V tomto ohledu lze stanovit i konkrétní poměr mezi plochou čerstvého a suchého listoví pro dřeviny daného stanoviště./ *Předností přímých metod je jejich vysoká přesnost, proto slouží často pro vědecké účely jako srovnávací metody ke stanovení indexu listové plochy některou z metod nepřímých či polopřímých nebo pro parametrizaci modelů. Není je však možné doporučit pro lesnickou praxi.*

3.2. Polopřímé metody

Polopřímé metody se liší od přímých menší náročností, avšak vyžadují také fyzický kontakt s listovím a kmeny nebo korunou stromů. Mezi nejznámější polopřímé metody se řadí *alometrické vztahy*. Pomocí těchto vztahů lze ze základních dendrometrických parametrů stromů porostu jako je výčetní tloušťka kmene nebo výška stromu stanovit listovou plochu stromu a následně LAI celého porostu. I zde však platí pro alometrické rovnice obecnější závěr mnoha autorů, a to že tyto vztahy jsou stanovištně specifické a nelze je využít pro kvantifikaci LAI jiného porostu s dostatečnou jistotou a přesností.

3.3. Nepřímé metody

Nepřímé metody stanovení LAI jsou založeny na styku a interakci sluneční radiace se strukturou korunové vrstvy, a jeden parametr (například: procházející množství sluneční radiace korunovou vrstvou, množství odražené sluneční radiace ve vybraných částech spektra aj.) tak může být použit k odhadu druhého (například: hustoty listoví, plochy povrchu listoví, úhlu nasazení listoví) a naopak. Jednoduchým měřením intenzity sluneční radiace tedy můžeme kvantifikovat strukturu korunové vrstvy, je-li k dispozici model odhadující vliv struktury korunové vrstvy na radiaci. Prakticky je v různých metodách využito jak průchodu (transmise) a záchytu (absorbce) určitých vlnových délek záření, tak jeho odrazu (reflektance). Obecněji lze říci, že nepřímé metody stanovení LAI vychází z optických vlastností listů (i dalších složek porostu) a jejich prostorového uspořádání v korunové vrstvě porostu.

Do této sekce metod stanovení LAI se řadí: 1) metoda založená na měření intenzity radiace resp. stanovení transmitance (tj. poměru mezi intenzitou slunečního záření v určité výšce korunové vrstvy k dopadající intenzitě záření na porost), 2) metoda mezernatosti nebo-li frakce dř, založená na míře pravděpodobnosti záchytu sluneční radiace při průchodu korunovou vrstvou resp. hodnocení „prosvětů“ (sunflecks) v korunové vrstvě, 3) spektrální metody, využívající rozdílů v absorpci a odrazu různých vlnových délek záření korunovou vrstvou, a 4) metody laserové, kdy po snímání porostu laserovými paprsky lze vytvořit dokonce trojrozměrný obraz korunové vrstvy i celého porostu. *Tyto metody patří mezi nejefektivnější, nejvhodnější pro sledování dynamiky vývoje LAI*, avšak pro dosažení přesných hodnot LAI jsou nutné jisté korekce. Vyšší míra korekce je nutná zvláště v jehličnatých porostech z důvodu: 1) neopadavosti resp. nemožnosti kvantifikace podílu dřevních částí v porostu, 2) organizace jehlic na několika hierarchicky odlišných úrovních (letorost – větev - přeslen - koruna) a 3) nenabývání plochého tvaru jehlic v příčném průřezu (Obr. 2). Nutno zdůraznit, že i bez dodatečných korekcí je přímá hodnota „efektivního LAI“ (LAI_e) či PAI využitelná v lesnictví. Tato hodnota postačuje například ke kvantifikaci míry stínění mateřského porostu pro potenciální posouzení vhodných podmínek možnosti či odrůstání obnovy, a pokud by byla tato hodnota používána pro struktury porostů věkových tříd, pak by přímo hodnoty LAI_e či PAI byly porovnatelné v rámci věkové kategorie (tj. třídy).

S ohledem na širší uplatnění v biologických, ekologických a lesnických oborech lze jednoznačně doporučit použití nepřímých metod stanovení LAI. Za tímto účelem byla zkonstruována řada přístrojů. Teoretická východiska stanovení a výpočtu LAI těmito přístroji (např. LaiPen LP 100, PSI, ČR; LAI-2000 nebo LAI-2200, Li-Cor, USA; přístrojů typu Ceptometr: AccuPAR LP80, Decagon Devices, USA; SunScan, Dynamax, USA aj.) jsou založena buď na zeslabování sluneční radiace při průchodu korunovou vrstvou, kdy závisí především na hustotě listoví v této vrstvě, nebo na „frakci dř“ tj. mezernatosti v korunové vrstvě jejíž teoretické výpočty vychází z pravděpodobnosti záchytu či průchodu slunečního paprsku korunovou vrstvou (GOWER & NORMAN 1991).

Spektrální a laserové metody využívají pro kvantifikaci listové plochy či získání informace o strukturních parametrech porostu finančně nákladných a příliš sofistikovaných

přístrojů, které nelze běžně využít v lesnické praxi. Tyto přístupy a metody se využívají převážně pro specifické, vědecké účely. Z tohoto důvodu není účelné je podrobněji popisovat.

3.3.1. Metody měření intenzity radiace

Metody měření intenzity radiace jsou založeny na poznání, že záření je při svém průchodu korunovou vrstvou oslabováno exponenciálně na základě Lambert-Beerova extinkčního zákona, pro lesní porosty modifikováno MONSIM a SAEKIM (1953):

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

kde I je intenzita záření v určité výšce korunové vrstvy nebo pod korunovou vrstvou porostu, I_0 je intenzita záření dopadající na porost, \exp je základ přirozeného logaritmu, k je extinkční koeficient, LAI (kumulativní) je celková listová plocha nad úrovní, pro niž se I stanoví, vztažená na jednotkovou plochu půdního povrchu; d je délka dráhy paprsku procházejícího korunovou vrstvou, μ je průměrná hustota listoví podél této dráhy a G je průměrná projekce jednotky listoví (NILSON 1971).

Obě rovnice jsou aplikovatelné pro korunové vrstvy s náhodně rozmístěným listovím. Ve statistických modelech (Poissonův model) je tato náhodnost rozmístění listoví vyjádřena tzv. průměrnou irradiancí (I/I_0) přímého slunečního záření, která může být definována také jako pravděpodobnost zachycení paprsku procházejícího korunovou vrstvou. Zeslabování hustoty zářivého toku v porostu závisí hlavně na délce dráhy paprsku procházejícího korunovou vrstvou, hustotě a orientaci listoví. Je-li hustota listoví horizontálně homogenní μd je rovno $LAI/\cos\theta$, kde LAI je kumulativní index listové plochy a θ je zenitální úhel Slunce. Různá hustota listoví, jako výsledek nakupení listoví v koruně stromu, způsobuje zvýšení průchodu a částečně snížení zachytu FAR (fotosynteticky aktivní radiace) korunovou vrstvou. Parametr G je obecně definován pro ploché listy jako poměr projekce k jednostranné ploše listoví, kdy frakce listoví je promítána do horizontální roviny ve směru dopadajícího záření. G je tedy jednoduchou funkcí úhlové distribuce listoví ke směru projekce (ROSS 1981). Jelikož je listoví jehličnanů nahloučeno v několika hierarchicky uspořádaných úrovních, nemůže být splněna prostorová náhodnost jeho rozmístění. Podrobně tuto problematiku rozvádí například NILSON (1971). Letorosty však již tuto podmínku splňují lépe, takže G je pak definován jako poměr projekční plochy letorostu ku ploše jehlic. Je-li dále hustota listoví μ prezentována na základě celkové plochy listoví, pak G je poměrem plochy siluety letorostu a celkové listové plochy (STAR, např. STENBERG 1996). Je-li hustota listoví prezentována projekční plochou listoví je G poměrem plochy siluety letorostu a projekční listové plochy (SPAR, STENBERG 1996).

Faktory SPAR a STAR tedy slouží zároveň jako korekční faktory eliminující efekt nakupení jehlic na letorostu (viz. kap. IIb). LANG et al. (1985) odvodili integrální závislost mezi strukturou korunové vrstvy a průchodem (transmisí) sluneční radiace matematickou „inverzní“ metodou k získání indexu listové plochy a úhlové distribuce listoví. Metodám založeným na měření průchodu radiace korunovou vrstvou jsou velice blízké metody mezernatosti, přesněji metody frakce děr („canopy gap fraction“), neboť podíl paprsků prošlých (z celkového počtu dopadajících) korunovou vrstvou je přímo úměrná frakci děr (GOWER & NORMAN 1991). Způsoby výpočtu LAI na základě metod měření intenzity radiace i frakce děr (mezernatosti) jsou proto téměř shodné.

Pro měření intenzity radiace procházející korunovou vrstvou porostu je využíváno přístrojů měřících v různých vlnových délkách, většinou pak v oblasti vlnových délek FAR (380-780 nm). FAR je totiž při průchodu korunovou vrstvou porostu pohlcována nejvíce, až

95 %. Ještě výhodnější je pak využít modré části spektra ($< 490 \text{ nm}$), kdy je transmise záření listovím a dalšími nadzemními orgány eliminována na minimum. Základem přístrojů měřících intenzitu radiace je čidlo – nejčastěji fotodioda (např. BPV21, Siemens; LI-191, LI-COR, USA), difuzér omezující vlnovou délku zachycované radiace a multimetr. Fotodioda má oproti fotoodporu výhodu, že má lineární proudový a nelineární napěťový výstup, avšak i ten se dá zlinearizovat připojením odporu vhodné impedance. Mezi přístroje využívající výše zmíněnou metodu ke stanovení LAI patří například Demon (Assembled Electrics, Austrálie), ALAI-02D (Finemech, ČR), LaiPen LP 100 (PSI, ČR), Ceptometer (Decagon, USA), Ceptometer (Finemech, ČR), Line Quantum Sensor (LQS, LI-COR, USA), SunScan (DELTA-T DEVICES Ltd, Anglie) atd.

Aby bylo možné z hodnot transmitancí odvodit ještě další strukturální parametry korunové vrstvy (např. inklinací úhel listoví), je nutné provádět měření pro více zenitálních úhlů záběru čidla. Teoretické výpočty pro stanovení LAI z hodnot transmitancí vychází z následujících rovnic; LAW et al. 2001):

$$\text{LAIe} = - \ln (E_i / E_a) / k, \quad (2)$$

$$\text{LAIe} = [f_b (1 - \cos\theta) - 1] \ln (E_i / E_a) / (0,72 - 0,33 * f_b), \quad (3)$$

kde E_a je dopadající FAR na porost měřená přístrojem s nestíněným senzorem, E_i je dopadající FAR pod korunovou vrstvou, k je extinkční koeficient, θ je zenitální úhel Slunce, f_b reprezentuje frakci přímých paprsků (je získána poměrem $(E_a - E_{ad})/E_a$, kde E_{ad} je FAR dopadající na porost měřená přístrojem se stíněným senzorem proti dopadu přímých paprsků Slunce). Protože koeficienty v rovnici (3) závisí na absorpci záření listovím, mohou se koeficienty měnit v závislosti na druhu dřeviny (cca od $k = 0,5$ do $0,9$).

Příklad stanovení LAIe z hodnot měření intenzity sluneční radiace (dle LANG et al. 1991; Obr. 3.). V případě homogenních porostů je pro stanovení LAIe třeba provést nejprve výpočet průměrné transmitance (tj podílu intenzity sluneční radiace měřené v porostu a na volné ploše) pro každý transekt a následně výpočet logaritmu průměru; pro nehomogenní porosty je třeba nejprve provést výpočet logaritmu pro jednotlivé měřičské stanoviště a až následně výpočet jejich průměru. Následuje příklad měření ve čtyřech transektech s deseti měřičskými stanovišti v homogenním porostu:

První transekt (podrobněji): Měření reference (R) tj. čtení optickým čidlem na volné ploše se provádí před měřením v porostu (R_1) a po měření v porostu (R_2). Následně je vypočtena průměrná referenční hodnota ($\bar{R} = (R_1 + R_2) / 2$). Transmitance (t) pro jednotlivá měřičská stanoviště z jednotlivých hodnot měření intenzity FAR pod porostem (V) se pro deset měřičských stanovišť počítá jako jednoduchý poměr: $t_1 = V_1 / \bar{R}$, $t_2 = V_2 / \bar{R}$ až $t_{10} = V_{10} / \bar{R}$. Průměrná transmitance se pro první transekt (I) vypočte následovně: $\bar{t}_I = (t_1 + t_2 + \dots + t_{10}) / 10$. Tato hodnota se následně zlogaritmuje: $\ln(\bar{t}_I)$. Obdobně jsou spočteny hodnoty pro druhý: $\ln(\bar{t}_{II})$, třetí: $\ln(\bar{t}_{III})$ a čtvrtý transekt: $\ln(\bar{t}_{IV})$. Z výsledných hodnot logaritmu transmitance pro jednotlivé transekty se spočte průměrná hodnota logaritmu: $\ln(\bar{t}) = (\ln(\bar{t}_I) + \ln(\bar{t}_{II}) + \ln(\bar{t}_{III}) + \ln(\bar{t}_{IV})) / 4$. Tento postup platí pro homogenní porost.

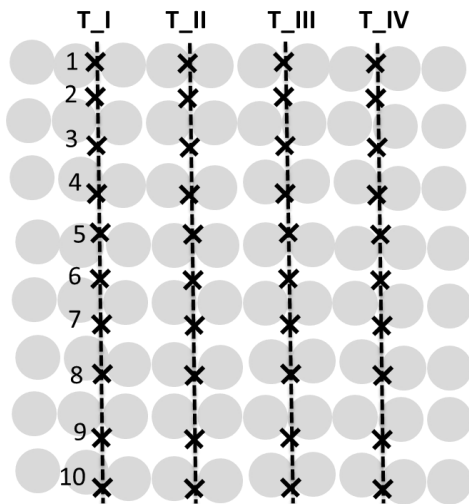
V případě nehomogenního porostu je postup mírně odlišný. Po odvození hodnoty transmitance pro každý měřičský bod v transektu je vypočten nejprve jeho logaritmus a až po té průměrný logaritmus za celý transekt tj. $\ln(t_1) + \ln(t_2) + \dots + \ln(t_{10}) / 10$. Konečně pak průměrná hodnota ze všech transektů ($\bar{\ln T}$).

Dále je postup shodný. Výsledná průměrná hodnota logaritmu může být převedena na hodnotu efektivního LAI (LAIe) jednoduše pomocí upravené rovnice (1) při nejčastějším $k =$

0,5:

$$\text{Nehomogenní: LAIe} = 2 * |\ln t| \text{ nebo Homogenní: LAIe} = 2 * |\ln \bar{t}| \quad (4)$$

Hodnota LAIe musí být dále na správnou hodnotu LAI korigována (viz kap. IIe).



Obr. 3. Schematický náčrt umístění transektů (T_I – IV) v porostu s vyznačením měřičských stanovišť (1 – 10).

3.3.2. Metoda mezernatosti

Metoda mezernatosti, nebo-li „frakce děr“, spočívá v podstatě na vyhodnocení poměru zakryté nebo nezakryté části „podkladu“ listovím. Podkladem může být při pohledu zdola nahoru obloha (při měření čidla ve viditelné části spektra) či při pohledu shora dolů skrze porost půda (při měření čidla v infračervené oblasti, kdy se půda jeví tmavší než listoví). Pravděpodobnost záchytu radiace procházející porostem je proporcionálně spjata metoda frakce děr s předchozí metodou transmise přímého slunečního záření (popisuje inverzní metoda v LANG et al. 1985). Frakci děr lze stanovit jednoduše analýzou hemisférických fotografií korunové vrstvy porostu. Podmínkou je použití hemisférické čočky objektivu (tzv. rybí oko), aby nebyla zkreslena zachycená plocha ve větších úhlech záběru čidla. Šířka záběru hemisférických fotografií je téměř 180°. Fotografie mohou být pořízeny při pohledu od povrchu půdy vzhůru nebo dokonce naopak z úrovně nad porostem dolů skrz vegetaci. Plocha nezakrytá vegetací se stanoví vymezením plochy pozadí na fotografii (půda nebo obloha) uvnitř kruhů, jejichž střed je zároveň středem fotografie. Poloměru každého kruhu odpovídá určitý zenitální úhel. Analýza může být zautomatizována, pokud mezi listovím a pozadím je dostatečný kontrast. Je vhodnější porost fotografovat při zatažené obloze, kdy je světelný odstín listoví na fotografii jednotný. Záleží i na expozici snímků a citlivosti filmu. Také tenké, sluncem prosvícené listy lze na fotografii snadno zaměnit za oblohu - tzv. okrajový efekt. Jinak je možno použít kteréhokoliv komerčně vyráběného fotoaparátu.

Stejně jako předchozí metoda (transmitance, resp. měření intenzity radiace) má i tato metoda problém s nahloučením listoví v rámci letorostů a větví. Bylo tak zjištěno, že listová plocha s malým inklinacním úhlem byla použitím této metody podhodnocena více.

Teoretické základy pravděpodobnosti nezachycení paprsku (frakce děr) při průchodu korunovou vrstvou vychází z rovnice (GOWER & NORMAN, 1991):

$$P(\theta, \phi) = \exp(-G(\theta, \phi) * \mu * S(\theta, \phi)), \quad (5)$$

kde $P(\theta, \phi)$ je pravděpodobnost nezachycení slunečního paprsku korunovou vrstvou tj. frakce děr, θ je zenitální úhel průchodu paprsku (Slunce), ϕ je azimutální úhel průchodu paprsku Slunce, $G(\theta, \phi)$ je projekce listoví vzhledem k (θ, ϕ) , μ je hustota listoví, $S(\theta, \phi)$ je délka dráhy paprsku procházejícího skrze korunovou vrstvu.

Za předpokladu náhodného rozmístění listoví v azimutálním směru může být ϕ z rovnice (5) vypuštěn a efektivní LAI (LAIe) lze pak vypočítat následovně:

$$\text{LAIe} = 2 * \int_0^{\pi/2} \ln [1/P(\theta)] \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (6)$$

V současnosti nejpoužívanějšími přístroji využívající tuto metodu jsou: LAI-2200 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Lincoln, NE) nebo TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies, 3rd Wave Engineering, Kanada), který přesně kvantifikuje množství i velikost „děr“ (tj. nenáhodnost uspořádání listoví), ale ke stanovení LAI musí být použit v kombinaci ještě s jiným optickým přístrojem.

3.3.3. Předpoklady k nepřímému stanovení LAI metodou měření intenzity radiace (transmitance) nebo frakce děr

Základní teoretické předpoklady k nepřímému stanovení LAI metodou měření transmitance nebo frakce děr jsou v podstatě následující:

- průchod (transmise) listovím a odraz (reflektance) FAR (400-700 nm) od listoví je minimální (nevhodnější v tomto ohledu je spektrum modrého světla oblasti FAR kolem 400-500 nm, v němž se listoví jeví jako „zcela černé“ vůči obloze tzn. že transmise těchto vlnových délek je minimální)
- listoví je náhodně rozmístěno v určitém objemu koruny stromu, korunové vrstvě apod.,
- listoví je azimutálně náhodně orientováno,
- elementy listoví (tj. list, letorost) jsou malé v porovnání s plochou záběru senzoru, a vzdálenost senzoru od tohoto nejbližšího elementu (část kmene, větev, letorost, list) je rovna minimálně zhruba čtyř-násobku jeho šířky.

Extrémní odlišnosti od výše zmíněných předpokladů nemohou být ignorovány, neboť mají výrazný vliv na přesnost stanovení LAI.

a. Stanovení LAI v lesních porostech

Stanovení LAI v porostech lesních dřevin je závislé především na druhovém složení a struktuře porostu. Přímé metody stanovení jsou použitelnější v porostech listnatých dřevin, a to z hlediska menší časové náročnosti a jednoduššího stanovení plochy oddělených listů. Využít je navíc možno i hodnocení opadu. Ve stálezelených neopadavých porostech, kde listoví nenabývá plochého tvaru je stanovení listové plochy obtížnější.

S většími obtížemi stanovení LAI nejen u přímých ale i nepřímých metod je možno se setkat v jehličnatých porostech. V **porostech listnatých dřevin** jsou listy rozmístěny víceméně „náhodně“ v souladu s teoretickými úvahami stanovení LAI nepřímou metodou (viz kap. 3.3.3.). I když opravdu náhodná distribuce listoví v prostoru korunové vrstvy je platná

pouze v případě hustých, zapojených porostů. Při poklesu, rozvolnění, zápoje dochází k většímu „nahloučení“ listoví do prostoru jednotlivých korun stromů. Nahloučení pak vede k relativnímu zvýšení průchodu (transmise) slunečního záření skrz korunovou vrstvu v porovnání s náhodnou distribucí listoví, což vede k podhodnocení LAI.

V listnatých porostech lze také jednoduše stanovit podíl plochy dřevních částí v korunové vrstvě k ploše listoví opakovaným stanovením „LAI“ (resp. PAI- plant area index tj. index povrchu vegetace, nebo LAIe- efektivní LAI jako přímý nekorigovaný produkt optického přístroje pro nepřímé ohodnocení LAI) po opadu listoví na konci vegetačního období. Stanovíme-li PAI v průběhu vegetační sezóny a máme-li k dispozici hodnotu tzv. skeleton indexu (SAI + BAI) neboli indexu povrchu dřevních částí (WAI- woody area index) z měření v odlisťném porostu, rozdílem hodnot získáme výslednou hodnotu LAI ($LAI = PAI - (SAI + BAI)$).

V porostech jehličnanů je stanovení LAI ztíženo nenáhodnou distribucí elementů listoví na několika úrovních, a to nahloučením a překryvem jehlic v rámci letorostů, větví, přeslenů a korun stromů, a v podstatě neznámým podílem plochy dřevních částí v korunové vrstvě. Některé přístroje jsou schopny, buď samy nebo v kombinaci s dalšími, stanovit míru nahloučení či vylišit zvlášť podíl plochy dřevních částí v korunové vrstvě (např. přístroj TRAC- Tracing Radiation and Architecture of Canopies nebo přístroj MVI- Multiband Vegetation Imager). Podíl plochy dřevních částí k ploše listoví se liší mezi druhy, někdy i ekotypy jednoho druhu dřeviny navzájem (např. horský smrk je větevnatější) a mění se i s vývojem porostu (NILSON 1999, POKORNÝ- nepublikováno viz níže). Pro konverzi hodnoty PAI resp. LAIe (myšleno jako nekorigovaný produkt optického přístroje) na LAI je nutno použít korekčních faktorů, které korigují podhodnocení LAI na všech výše zmíněných úrovních jehlice - porost. Nejobtížnější je pak stanovení LAI nepřímou metodou porostu smíšeného. V takovém případě je třeba stanovit LAI pro každou porostní složku zvlášť, ať už pro listnaté a jehličnaté dřeviny, tak i pro jednotlivé druhy dřevin.

Díky mnohonásobnému překryvu listoví v korunové vrstvě mnozí autoři uvádějí, že přesné stanovení LAI pomocí optického přístroje je možné pouze do velikosti efektivního LAI (LAIe) porostu cca 6 - 6.5 (např. LAW et al. 2001). V dokonale zapojeném porostu je prostě překryv jednotlivých částí korunové vrstvy tak velký, že listoví nad určitou výškovou úrovní není při pohledu „zdola“ senzorem zachytitelné. To znamená, že frakce děr resp. pravděpodobnost průchodu paprsku korunovou vrstvou se mění zanedbatelně, disproporcionálně, s dalším nárůstem listové plochy v korunové vrstvě. Ještě lépe lze tuto hraniční hodnotu vysvětlit na základě analýzy hodnot transmitance porostu, kdy hodnoty transmitance se vzrůstající ozářeností porostu, v intervalu 0 – 150 $\mu\text{mol.m}^2.\text{s}^{-1}$, hned od počátku prudce (exponenciálně) klesají a poté zůstávají téměř konstantní na velice nízké úrovni (1 – 2 %). Uvádí se, že hodnota 1 – 2 % ozářenosti pod korunovou vrstvou z ozářenosti nad porostem je limitující pro růst listoví a jakékoli rostlinné vegetace. Z fyziologického hlediska tyto nízké hodnoty ozářenosti na bázi korun většiny druhů dřevin zřejmě nemohou udržet kladnou bilanci uhlíku asimilačního aparátu, který tak opadáva, a nový se v tak nízkých radiačních podmínkách nevytváří vůbec.

Jedny z nejvyšších hodnot LAI z našich domácích druhů dřevin dosahují mladé smrkové porosty (spolu s jedlí bělokorou; z introdukovaných pak douglaskou tisolistou). Z jejich dlouhodobého sledování nepřímou metodou v porovnání s přímou a polopřímou metodou (alometrický vztah) však vyplývá, že nepřímá metoda stanovení LAI optickým přístrojem ztrácí rozlišovací schopnost při vyšších hodnotách, a to při LAIe ca 7,9, což vysoce přesahuje optimální hodnoty z hlediska produkce nadzemní biomasy (POKORNÝ et al. 2008). Zdá se tudíž, že nepřímá metoda stanovení LAI pomocí optického přístroje je dostatečná pro praktickou kvantifikaci listové plochy a ohodnocení optimálnosti hodnot LAI porostů lesních dřevin u nás.

b. Korekční faktory

Optické přístroje často podhodnocují hodnotu LAI, zvláště pak v jehličnatých porostech a produkují spíše „efektivní index listové plochy“ (LAI_e) nebo tzv. index siluety letorostu (SSAI) spíše než LAI (POKORNÝ 2002). LAI_e může být definován jednoduše jako násobek $\beta \cdot \text{LAI}$, kde β je korekční faktor - zahrnující překryv elementů listoví na celé úrovni porostu, nebo faktor zahrnující překryv elementů v rámci letorostu při korekci SSAI. V obdobném kontextu je tento korekční faktor označován jako tzv. dispersní koeficient. Hodnota $\beta < 1$ v podstatě znamená, že listoví je v korunové vrstvě nahloucheno, $\beta = 1$ znamená, že listoví je v korunové vrstvě rozmístěno víceméně náhodně, a $\beta > 1$ znamená, že korunová vrstva je řidší (tzn. nezapojená). Potenciální zdroje chyb ve stanovení LAI_e jsou především: (1) nenáhodná distribuce listoví a (2) vliv stínění a překryvu jiných elementů než je listoví. Korekční faktor β tak sestává ze dvou částí odpovídajících výše zmíněným chybám: (1) stínění a překryvu jehlic v rámci letorostu (kvantifikováno poměrem plochy siluety letorostu a plochy jehlic - STAR, SPAR; *např.* STENBERG 1996), a (2) stínění a překryvu v měřítku větším než letorost („element clumping index“ - Ω_E). CHEN (1996) prezentuje změny Ω_E se změnou zenitálního úhlu Slunce. Tento index vzrůstá se zvětšujícím se zenitálním úhlem, protože jehličnaté stromy sestávají z větví uspořádaných do přeslenů v rozdílných výškách. Koruny se tak jeví, při přímém pohledu vzhůru, konsistentní s malými otvory kolem centra, ale jak se zvětšuje úhel pohledu blíže horizontálnímu směru, otvory se objevují níže mezi přesleny a větvemi. Jak získat průměrnou hodnotu Ω_E řeší MILLERŮV teorém (1967), neboť Ω_E není konstantní, a díky malým otvorům v korunové vrstvě dochází k efektu polostínu. Protože jsou jehlice nakupeny především v prostoru korun stromů, kritickými pro výpočet Ω_E jsou právě mezery mezi korunami.

Kromě nakupení jehlic v rámci letorostu (kvantifikováno pomocí SPAR nebo STAR) a překryvu listoví v měřítku větším než letorost (kvantifikováno pomocí Ω_E) má vliv na stanovení hodnoty LAI optickými přístroji i podíl dřevních částí (α). Konečný vztah mezi skutečnou hodnotou LAI porostu a produktem optického přístroje (LAI_e) je pak následující:

$$\text{LAI} = (1 - \alpha) \text{LAI}_e \cdot (\text{STAR} / \Omega_E), \quad (7)$$

kde α je podíl plochy dřevních částí k ploše povrchu všech nadzemních orgánů (woody-total area ratio); při náhodném rozmístění letorostů v korunové vrstvě není nezbytné užití faktoru Ω_E .

Korekční faktory zachycující efekt překryvu a stínění jehlic na úrovni letorostu jsou stanoveny většinou jako podíl projekční či celkové plochy povrchu jehlic a jednoduché projekční (SPAR, STAR) nebo prostorové projekční plochy letorostu (SPAR, STAR; STENBERG 1996). SPAR a STAR vychází z jednoduché ortogonální projekce siluety letorostu do horizontální roviny, kdežto SPAR a STAR z průměrné mnoha-úhlové projekce siluety letorostu s různým postavením (úhlu nasazení letorostu v koruně stromu) do horizontální roviny. Získat celkovou plochu povrchu nebo projekční plochu jehlic nebo letorostů z různých úhlů pohledu je ovšem velmi obtížné (HOMOLOVÁ et al. 2013).

Celková plocha povrchu jehlic nebo letorostů je častěji přepočítávána z projekční plochy pomocí tzv. konverzního faktoru. Celková plocha povrchu jehlic je asi 2,6 násobkem projekční plochy. Konverzní faktor se může pohybovat od 2 pro ploché listy do 3,14 pro listy resp. jehlice s kruhovou plochou průřezu nebo až do 4,0 pro jehlice s čtvercovým průřezem (HOMOLOVÁ et al. 2013). Průměrný konverzní faktor pro borovici je ca 3,00; pro douglasku tisolistou 2,32; pro smrk je možno použít hodnoty 2,57 (POKORNÝ 2002) i když HOMOLOVÁ et al. (2013) uvádí hodnoty pro smrk vyšší (ca 2,5 pro stinný a 3,8 pro slunný typ

asimilačního aparátu).

Nejjednodušší korekční faktor zahrnující stínění a překryv jehlic v rámci letorostu je SPAR (plocha siluety letorostu k projekční ploše jehlic), kdy je třeba stanovit pouze ortogonální průmět do horizontální roviny jehlic oddělených od letorostu a ležících v horizontále. GOWER & NORMAN (1991) použili pro přepočítání LAI_e na LAI_p korekční faktor, který je dán podílem projekční plochy jehlic a průměrné projekce letorostu. Na základě porovnání měření LAI optickým přístrojem (LAI-2000, Li-Cor, USA) a přímou metodou oba autoři uvádí pro porosty několika druhů dřevin následující korekční faktory (β) přepočtu LAI_e na LAI (Tab. 1).

Tab. 1.: Korekční faktor (β) přepočtu efektivního LAI (LAI_e) jako produktu optického přístroje na LAI porostu. SD – směrodatná odchylka.

Dřevina	β	SD
<i>Pinus resinosa</i>	1,50	0,41
<i>Pinus strobus</i>	1,67	0,35
<i>Pinus sylvestris</i>	1,47	-
<i>Larix decidua</i>	1,49	0,28
<i>Picea abies</i>	1,60	0,14

Korekční faktor pro smrkový porost byl ověřován prakticky obdobným postupem při uměle prováděné defoliaci porostu, kdy se měnili proporce mezi plochou dřeva (větve a kmeny) a listoví (POKORNÝ & MAREK 2000). Pro smrk je uváděn podíl skeletu ca 10 – 18 % z naměřené hodnoty LAI_e. Z vlastních měření vyplývá, že podíl plochy dřevních částí ku ploše listoví narůstá s věkem porostu, přestože jsou aplikovány probírkové zásahy či dochází k samozreďování porostu, neboť plocha dřevních částí narůstá zatímco listová plocha kolísá kolem rovnovážné hodnoty nebo dokonce se zhoršujícím zdravotním stavem klesá. Podíl indexu plochy dřevních částí (WAI) k LAI tak víceméně postupně narůstal ca od 10 % (ve věku 15 let smrkové monokultury) do 28 % (ve věku 35 let). STENBERG (1996) předpokládá, že klíčovou roli v podhodnocení LAI při měření optickým přístrojem hraje stínění jehlic v rámci letorostu, když jsou proporce plochy povrchu dřevních částí k ploše listoví menší než 12 %. Při pokusu uměle prováděné defoliaci v porostu smrku (POKORNÝ & MAREK 2000), kdy byl porovnáván LAI stanovený nepřímou i přímou metodou, bylo zjištěno, že kritickou „přechodnou“ hranicí chyb z podhodnocení a nadhodnocení LAI je 20 % podílu plochy dřevních částí. (Tohoto podílu je u smrkové monokultury dosaženo ca ve věku 20 let.)

Řada autorů definuje LAI jako polovinu celkové plochy povrchu jehličí normalizovanou jednotkou půdy, proto byla vylepšena korekční metodologie použitím poměru poloviny celkové plochy povrchu jehlic k polovině celkové plochy povrchu letorostu. Korekční faktor β je pak třeba prezentovat jako poměr prostorové projekční plochy letorostu k prostorové projekční ploše jehlic ($\beta = \frac{SSA}{LA}$ anebo $4 \cdot \frac{STAR}{LA}$). Vztah mezi celkovou plochou povrchu a prostorově průměrnou projekční plochou je založen na Cauchyho teorému (LANG 1991). Tento teorém uvádí, že je-li pevné těleso konvexního tvaru promítáno prostorově (tzn. ve všech prostorových směrech) do horizontální roviny, je průměrná projekční plocha rovna 1/4 celkové plochy povrchu tělesa. Předpokládáme-li, že optické přístroje ke stanovení LAI stanoví spíše „SSAI“, pak LAI_e je roven polovině celkové plochy povrchu letorostů. Od tohoto předpokladu a definice LAI lze pak odvodit příslušný korekční faktor. Teoreticky je možno na předpokladech STENBERG (1996) a Cauchyho teorému prokázat závislost mezi korekčním faktorem β a „koeficientem tvaru příčného průřezu“ letorostů a jehlic. Lze tak prokázat, že se korekční faktor bude měnit s výškou a postavením letorostu resp. jehlic v

korunové vrstvě, a proporcemi mezi jednotlivými ročníky letorostů resp. jehlic. Vyjdeme-li z definice LAI ($LAI_t/2$), souvislosti mezi celkovou a projekční plochou povrchu tělesa (tj. jehlice a letorostu), kdy záleží na tvaru příčného průřezu (viz. konverzní koeficient), a předpokladů Cauchyho teorému, lze „prostorový“ korekční faktor β podle STENBERG (1996) zjednodušit (dle POKORNÝ 2002) až na:

$$\beta = SPAR * B / B_n, \quad (8)$$

kde B je koeficient tvaru příčného průřezu letorostu, B_n je koeficient tvaru příčného průřezu jehlicí. Oba koeficienty příčného průřezu lze odvodit z podílu obvodu příčného průřezu jehlice/ letorostu a jejího/jeho maximálního průměru (tj. tloušťky, resp. délky osy b v případě jehlice viz. Obr. 2). V tomto případě výpočtu korekčního faktoru však β stále nezahrnuje Ω_E a α (viz rovnice (7)).

Obecně lze říci, že korekční faktory mohou být odvozeny ze známého tvaru, orientace a pozice každého elementu korunové vrstvy při známém směru a úhlu pohledu (LANG 1991, STENBERG 1996). Praktické stanovení korekčního faktoru je založeno na porovnání přímých a nepřímých metod stanovení LAI (např. GOWER & NORMAN 1991). Existují i optické přístroje, které mohou ze záběru čidla při měření odstranit ostatní elementy korunové vrstvy kromě listoví. Mezi tyto přístroje patří „Tracing Radiation and Architecture of Canopies“ (TRAC, 3rd Wave Engineering, Kanada), nebo „Multiband Vegetation Imager“ (MVI). K separaci listoví a dřevních elementů lze samozřejmě dospět také pomocí pozemního LIDAR skenování.

Obecně lze pro odvození hodnoty LAI z LAI_e v lesnické praxi doporučit ověřené souhrnné korekční faktory na úrovni porostu (Tab. 1.).

4. Maximální a optimální hodnoty LAI

Maximální LAI porostu se nejčastěji odvozuje z modelu vývoje LAI. Model vývoje LAI porostu lze stanovit v podstatě třemi způsoby: (1) opakovaným měřením stejného porostu, (2) měřením porostů různého stáří (tzv. chrono-sekvence), nebo (3) použitím modelu (model bývá většinou odvozen z dat ad 1, 2). Pomocí experimentů (např. přihnojení, závlaha) nebo pozorováním rozdílů v celém gradientu podmínek vnějšího prostředí lze určit faktory limitující maximální LAI porostu/druhu dřeviny. Hodnoty indexu listové plochy porostů lesních dřevin se pohybují v širokém intervalu s ohledem na druhové složení, strukturu, stanovištní podmínky a poškození porostu (např. VOSE et al. 1994, POKORNÝ 2002).

Hodnoty LAI listnatých porostů a světlomilných druhů jehličnatých dřevin dosahují většinou maximálních hodnot 6 - 8. Nejvyšších hodnot dosahují jehličnaté porosty sestávající především z druhů: *douglaska*, *jedle*, *tsuga (jedlovec)* a *smrk* (VOSE et al. 1994). Vyšších hodnot LAI mohou tyto druhy dřevin dosáhnout zejména díky úhlové orientaci větví a jehlic ve směru zenitálním, délce mezipřeslenových sekcí, způsobu větvení apod.. Maximální možnou hodnotu LAI porostu, v závislosti na morfologických parametrech stinných letorostů (konkrétně SPAR), odvodili pro několik druhů dřevin LEVERENZ & HINCKLEY (1990). Nejnižší maximální hodnotu projekčního LAI uvádí pro borovici lesní (3,5), nejvyšší pak pro sekvoji stálezelenou (20). Zde je však třeba podotknout, že hodnoty LAI uváděné autory se po přepočtu, pomocí konverzního faktoru zohledňujícího tvar jehlic, mohou ještě různou měrou zvýšit.

Použitím robustního růstového modelu lze, na základě současných znalostí fyziologických procesů a proměnných (zahrnujících například koncentraci dusíku

v rostlinných pletivech, respiraci pletiv, úroveň tvorby a alokace biomasy aj.), odvodit optimální hodnotu LAI maximalizující produkci porostu. Prakticky je však velice obtížné měřit nebo odvodit tolik požadovaných vstupních parametrů modelu, proto je vhodnější stanovit „rovnovážnou“ hodnotu LAI vzhledem ke stanovištním podmínkám, a to z dat získaných z různých stanovišť. Rovnovážná hodnota LAI je chápána jako víceméně konstantní hodnota, kterou porost dosáhne v určitém stupni vývoje, většinou po jejím mírném poklesu. Obdobně, podle VOSE et al. (1994), lze nalézt v časovém popisu vývoje hodnot LAI, že po dosažení maximální hodnoty LAI porostu index mírně poklesne, především díky limitaci výživy dusíkem. U rychlerostoucích dřevin následně kolísá kolem svého optima (viz rovnovážná hodnota), u pomalurostoucích dřevin mírně poklesne (např. díky kompetici) a poté zůstává téměř konstantní. Porosty rychlerostoucích dřevin mohou přitom této rovnovážné hodnoty dosáhnout poměrně velice brzy. Například, porost rychlerostoucí borovice (*Pinus elliotii*) dosáhne svůj maximální LAI již ve věku 10 - 12 let (VOSE et al. 1994). Pomalu rostoucí dřeviny dosahují rovnovážné hodnoty LAI až mezi 20 - 40 rokem, i později. Zásadní úlohu v tomto případě hraje doba, kdy se začnou navzájem dotýkat koruny stromů (resp. tvořit dokonalý korunový zápoj), což závisí především na hustotě porostu a jeho produktivitě.

Ačkoli porost dosahuje maximálních hodnot LAI, neznamená to, například z hlediska radiačního nasycení fotosyntézy, že je tato hodnota optimální. Z hlediska různé úhlové a prostorové distribuce listoví ve vertikálním profilu korunové vrstvy nemůže dojít zároveň k nasycení fotosyntézy celého souboru listů, naopak světelné křivky jednotlivých listů a následně pak celého porostu se značně liší. Porosty tak sice nemohou nikdy plně využít fotosyntetické kapacity jednotlivých listů, ovšem na druhé straně více-vrstevně uspořádané listy využívají dopadající záření podstatně lépe, než listy rozložené do jedné souvislé vrstvy. Je tomu tak proto, že porosty s vysokou hodnotou LAI mají listy postaveny spíše vertikálně než horizontálně. V tom případě proniká záření i do hlubších vrstev porostu a je rovnoměrněji rozděleno na větší počet listů. Ozáření každého z těchto listů je pochopitelně nízká, což ovšem současně znamená, že využití záření ve fotosyntéze (účinnost fotosyntézy) listů i celého porostu je vysoké (URBAN et al. 2012). U porostů s nízkým LAI (< 3) však nemá postavení listů na využití záření celým porostem velký vliv. U těchto porostů totiž velmi vzrůstá podíl záření, které není listy zachyceno vůbec a dopadá bez využití až na půdní povrch. Při vysokých hodnotách LAI se neobyčejně zvyšuje heterogenita ozáření jednotlivých listů, přičemž spodní listy mohou být i za jasného počasí již velmi blízko kompenzačním hodnotám (intenzita radiace, při níž jsou ztráty uhlíku respirací kompenzovány příjmem uhlíku asimilací).

Optimalizace LAI vzhledem k pozitivní uhlíkové bilanci není náhodná, neboť i opad starších ročníků jehlic je řízen poměrem mezi příjmem uhlíku fotosyntézou a ztrátou uhlíku respirací. Je-li tento poměr kladný, listoví vytrvává na stromě, v opačném případě opadá. Listy vytrvávající na stromě nejsou v tomto ohledu nikdy parazitické.

Druhy dřevin s vysokou hodnotou LAI tak zachytí sice více sluneční radiace než druhy s nízkou hodnotou LAI, ale tuto listovou plochu využívají méně efektivně. To vyplývá například z porovnání efektivity listoví smrku ztepilého a borovice lesní v produkci dřeva. Smrkové porosty dosahují podobný celkový přírůstek jako borové, ačkoli dosahují hodnot LAIe ca 6 zatímco borové porosty jen poloviční (ca 2,5). Znamená to, že objemový přírůstek na jednotku listové plochy tj. efektivita LAI je u borových porostů větší než u smrkových. Tato efektivita LAI vychází z poměru mezi slunným a stinným listovím, lišícím se nejen anatomicky a chemicky, ale především fyziologicky – výkonnostně v procesu asimilace (POKORNÝ et al. 2008).

Na základě výše zmíněných znalostí lze odvodit optimální hodnotu LAIe porostu, která se zřejmě bude pohybovat mezi hodnotami 3 – 6. Například pro smrk ztepilý by se tak

hodnoty optimálního LAI měly po korekci LAI_e pohybovat v rozmezí ca od 4,5 do 9,5. Z praktických měření a optimalizace LAI s ohledem na přírůst nadzemní biomasy či koeficient využití sluneční radiace bylo zjištěno, že se optimální hodnoty LAI smrkového porostu pohybují opravdu kolem hodnoty 9,5 (POKORNÝ et al. 2008, MARKOVÁ et al. 2011). Maximální LAI porostu smrku ztepilého může přitom dosahovat hodnot až 14,7 (LEVERENZ & HINCKLEY 1990). S věkem smrkového porostu jeho hodnota LAI klesá, proto bude klesat i optimální hodnota LAI, a to s největší pravděpodobností k hodnotě kolem středu zmiňovaného intervalu tj. 6 - 7 (POKORNÝ & STOJNIC 2012).

Velikost indexu listové plochy, jeho prostorová a časová variabilita závisí na mnoha faktorech, ať už vnitřních nebo vnějších. V literatuře jsou tyto faktory dostatečně popsány. V podstatě se jedná o faktory ovlivňující v prostorovém měřítku velikost a uspořádání listové plochy, v časovém jeho tvorbu a opad (např. genetické vlastnosti – určující způsob vzniku a vývoje listu, velikost, postavení listu na letorostu atd. daných druhem dřeviny či ekotypem; struktura porostu a dendrometrické parametry hlavních dřevin porostu; klimatické a stanovištní podmínky – světelný režim, vodní režim, dostupnost minerálních živin (zejm. dusíku), teplota, antropogenní ovlivnění stanoviště; sezónní výskyt hmyzích škůdců; množství a intenzita pěstebních zásahů (např. VOSE et al. 1994)

III. Efektivní postup stanovení LAI v lesních porostech pomocí nepřímých metod

Nejefektivnější metodou pro stanovení LAI lesních porostů v praxi je nepřímá metoda založená na měření tansmitance nebo frakce dř, neboť je to metoda rychlá, nedestruktivní, nevyžadující další složitý software na výpočet hodnoty LAI (viz kap. II). Před vlastním stanovením LAI porostu nepřímou metodou, nejčastěji optickým přístrojem, je ovšem důležité zhodnotit stav synoptické situace resp. vhodnost podmínek pro stanovení LAI (kap. III a), nalézt vhodnou velikost volné plochy a zvolit vhodný způsob měření jak na volné ploše, tak v porostu (kap. III b, c).

Při stanovení LAI se jeví stěžejní zvolit správný plán rozmístění měřičských stanovišť (bodů) v porostu tak, aby byla podchycena heterogenita celého porostu.¹ Nákres rozmístění měřičských bodů je proto vhodné, spolu s dalšími parametry při měření v terénu, zaznamenat do zápisníku pro možnost korekce dat či možnosti ověření nebo opakování měření v budoucnosti na víceméně stejných pozicích (viz kap. III d, e, f). Efektivní hodnota LAI může vycházet z jednoduchého vzorce (rovnice č. 4) resp. podílu referenčních a podkorunových čtení optického čidla přístroje. Efektivní hodnotu LAI lze následně korigovat pouze jedním „porostním“ korekčním faktorem na dostatečně přesnou hodnotu LAI (viz kap. III g).

¹ Toto uspořádání měřičských bodů může být náhodné, v pravidelné měřičské síti pokrývající celou plochu porostu, v transektu, několika transektech nebo vycházet z kombinace těchto možností s ohledem na heterogenitu struktury měřené korunové vrstvy. Pro praxi lze doporučit měření v pravidelné síti či transektech, kdy je rozmístění jednotlivých měřičských bodů v porostu nejsnazší a není nutné je pevně fixovat.

a. Stanovení vhodných podmínek měření

Stanovení LAI přístroji s optickým čidlem je závislé na „synoptické“ situaci. Synoptická situace vyjadřuje aktuální stav optických vlastností atmosféry, je charakterizována jak oblačností, tak typem resp. proporcí přímého a difúzního slunečního záření, intenzitou záření, výskytem mlhy aj. Tomuto je třeba přizpůsobit nastavení citlivosti přístroje (např. nastavení clony, expozice při použití fotoaparátu, rozsahu měřených hodnot aj.). Toto nastavení musí být shodné minimálně pro jednu sérii měření tj. na volné ploše a pod porostem, ve kterém se LAI stanovuje (např. v jednom transektu, podrobněji dále).

Vhodné podmínky pro měření tedy nastávají nejčastěji za stabilní synoptické situace (tj. rovnoměrně zatažené oblohy, nebo jasné oblohy při svítání či západu Slunce), kdy není povrch korun osvětlen přímou sluneční radiací. Přímé paprsky totiž kromě zvýšeného odrazu od povrchu vegetace způsobují tzv. efekt polostínu (v angličtině „penumbra effect“). Při osvětlení přímými slunečními paprsky je okraj listoví při pohledu „zdola“ nezřetelný a velikost objektu se tak zdánlivě zmenšuje. Díky tomuto efektu dochází k výraznému podhodnocení hodnot LAI porostu. Přímé sluneční paprsky se také mnohem více odrážejí od povrchu vegetace a to zvláště je-li povrch vegetace smáčen vodou (respektive kdy na listoví a letorostech ulpívají kapky vody, jsou vlhké povrchy kmenů apod.). Za těchto podmínek dochází vlivem odrazu také k výraznému podhodnocení LAI. Přímé záření se může odrazet i od nejbližších částí přístroje vlastního optického čidla (např. restriktoru, tj. úhlového omezovače záběru čidla, jak ve směru azimutálním tak zenitálním) a ovlivňovat čtenou hodnotu intenzity světla. V takovém případě je možno tento vliv odstranit tak, že přístroj s čidlem je při měření držen operátorem (měřičem) takovým způsobem, že je optický senzor stíněn osobou operátora- měřiče stojícím zády ke Slunci. Přitom je ovšem opět nutné dodržet stejnou polohu přístroje resp. stínění čidla měřičem shodně alespoň pro jednu sérii měření tj. na volné ploše a pod porostem.²

Vhodné podmínky pro měření optickými přístroji za jasné oblohy při svítání či stmívání jsou vcelku dobře hodnotitelné okulárně. Optické přístroje v těchto podmínkách zaznamenávají pozvolný vzestup či pokles hodnot intenzity dopadajícího záření. Nejvhodnější podmínky jsou tak omezeny pouze rozsahem možných měřených hodnot a citlivostí čidla přístroje. Obtížné je naproti tomu okulárně odhadnout rovnoměrnost zatažené oblohy. Oblačnost je často kupovitá a pohybuje se po obloze různou rychlostí. V tomto případě je lidské oko nedokonalým orgánem, neboť má tendenci se poměrně rychle přizpůsobovat, a pozorovatel má tak sklon podhodnocovat nerovnoměrnost světelných podmínek. K ohodnocení světelných podmínek pro měření za zatažené oblohy je proto vhodné využít přímo přístroje ke stanovení LAI. Z vlastních zkušeností, měření a porovnání dat získaných různými optickými přístroji za různých „světelných“ podmínek, je možné doporučit provést před vlastním začátkem hodnocení LAIe porostu kontrolní měření kolísání hodnot intenzity dopadající sluneční radiace na volné ploše po dobu ca 1 až 2 minut. Pokud je pozorována

² Některé starší přístroje pro nepřímé stanovení LAI, principiálně založeny na pravděpodobnosti průchodu paprsku korunovou vrstvou porostu, bylo třeba mít v průběhu měření neustále namířeny na sluneční kotouč. Toto bylo nejen velmi obtížné dodržet při pochůzce v terénu mezi měřičskými body, ale především neřídká nemožné, především tehdy kdy byl sluneční kotouč krytý vegetací. Princip neustálého záměru na Slunce je také méně vhodný proto, že měření je ovlivněno prosvěty (v angličtině „sunflecks“), které jsou „rozmístěny“ pod korunovou vrstvou (na povrchu půdy resp. ve výšce měření senzorem) nejen s ohledem na strukturu porostu- množství listoví, ale také s ohledem na expozici, sklon terénu a především polohou Slunce na obloze. Proto bylo třeba tímto typem přístrojů měřit alespoň ve tři různé časové intervaly (polohy Slunce) v průběhu dne. Stanovení LAI porostu tak bylo i časově náročné. Navíc tato měření byla zatížena chybami- podhodnocením LAI, z důvodů zmíněných výše (odrazivost, penumbra efekt).

vysoká variabilita měřených hodnot, resp. rozdíl mezi maximální a minimální zaznamenanou hodnotou je větší než ca 25 % z maximální naměřené hodnoty, není smysluplné vůbec započít a pokračovat ve vlastním stanovení LAI porostu při měření jedním přístrojem. Při měření dvěma (v páru) či více přístroji je možné tyto nedostatky vysoké variability měřených hodnot v čase výrazně eliminovat. Důležité je ovšem sjednotit čas na všech používaných přístrojích tak, aby měřily současně a nastavit vhodný časový interval pro záznam hodnot na volné ploše. Platí, že čím jsou podmínky méně stabilní (vyšší kolísání hodnot v čase při „kontrolním“ měření) je nutno zaznamenávat hodnoty s vyšší frekvencí (v řádu desítek sekund až několika minut) a volnou plochu nalézt pokud možno co nejbližše hodnocenému porostu. Při větších rozdílech hodnot „kontrolního“ měření na volné ploše, například o více než 50 % v průběhu jedné minuty, se snižují možnosti přesnějšího stanovení hodnot LAIe porostu i při vysoké frekvenci čtení na volné ploše (v řádu desítek sekund). To lze ověřit několikerým opakováním stanovení LAI porostu ve stejné měřičské síti stejným postupem (opakování sérií měření). Výsledkem bude vysoká variabilita (chyba stanovení) získaných hodnot LAIe.

Na základě zkušeností lze doporučit, aby časový interval mezi referenčními čteními čidla na volné ploše při měření v sérii (tj. jednom transektu či měřičské síti) za podmínek stabilní synoptické situace byl maximálně 15 – 20 minut; pokud zaznamenané při kontrolním měření variabilitu blízkou 25 % maximální měřené hodnoty, pak je vhodné dodržet maximální časový interval ještě kratší ca 5 - 10 minut mezi referenčními čteními.

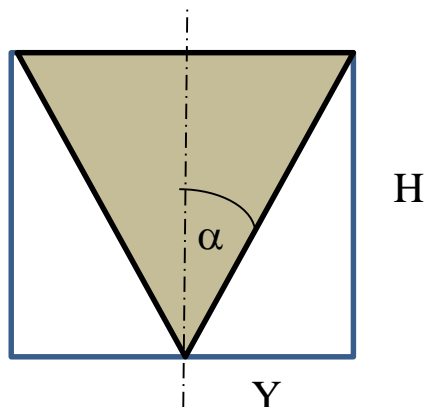
b. Měření na volné ploše

Pokud je možné dostat se na volné ploše nad porost či blízké objekty resp. nestíní-li či nezasahuje do záběru senzoru žádný objekt, není problém tuto tzv. referenční hodnotu odečíst. V běžném lese je však obtížné najít vhodnou volnou plochu. Vhodnou, znamená s ohledem na velikost případně orientaci volné plochy, neboť stejnou orientaci senzoru bychom měli zachovat i pro „pod-korunová“ čtení a také respektovat polohu Slunce a možnost ovlivnění výsledku stanovené hodnoty LAI. Za tímto účelem bývá umožněno u optických přístrojů nastavit- měnit velikost záběru čidla, a to jak v zenitálním úhlu záběru tak v azimutálním. Prakticky k tomu dochází buď přímo úpravou fyzické části přístroje (hardware) omezovače-restriktoru, nebo k tomuto může docházet až při zpracování dat v PC vhodným programem (software). Některé přístroje umožňují obojí (např. LAI-2200 PCA, Li-Cor, USA). Některé přístroje mají naopak poměrně malý úhlový záběr čidla, čímž je eliminován problém nalezení vhodně velké volné plochy a zároveň mají dostatečně přizpůsobenu citlivost (např. LaiPen LP100, PSI, ČR). Typ či velikost restriktoru resp. úhlový záběr čidla není volen jen s ohledem na parametry volné plochy, ale také na parametry porostu a nutnost držení přístroje měřičem v určité poloze při měření pod korunami stromů.

Například v porostu s nízko nasazenými korunami je třeba pro kvantifikaci LAI měřit pod nimi, a proto je třeba ze záběru optického čidla odstranit záběr samotného měřiče. Vzdálenost čidla od nejbližšího elementu- nadzemní části rostlin, rostlinného orgánu, je minimálně čtyřnásobkem tloušťky či šířky daného elementu (viz kap.3.3.3.). Odstranění měřiče lze provést použitím vhodného restriktoru nebo měřením ve stejné pozici měřič-senzor i na volné ploše. V řídkých mladých až středně-věkých porostech, zvláště u jehličnatých dřevin, je vhodné omezit záběr čidla v úhlech blízkých horizontu. Jehličnaté porosty (smrku, jedle, modřínu, borovice v mládí, aj.) mají totiž jehličí nahloučeno na několika odlišných prostorových úrovních, čímž vznikají velké mezery mezi přesleny ve spodních partiích korun a při záběru čidla v nízkých úhlech nad horizontem by docházelo k většímu podhodnocení LAI. Omezení záběru čidla v úhlech blízkých horizontu je vhodné i z důvodu potřeby nalezení volné plochy větších rozměrů (podrobněji viz níže). Použití restriktoru či jiného

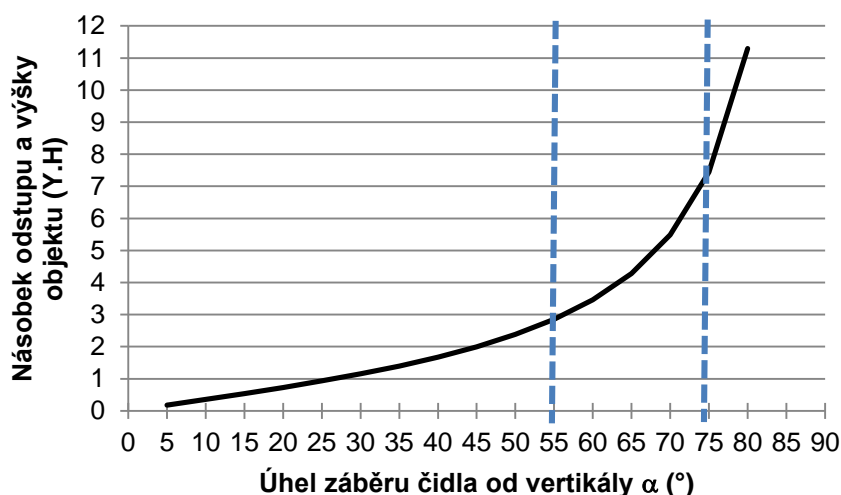
omezení záběru čidla lze provést také za účelem kvantifikace LAI pro různé samostatné části koruny stromu či korunové vrstvy porostu.

Velikost volné plochy a použití vhodného restriktoru (či jiné úpravy záběru čidla) lze odvodit z velikosti úhlového záběru čidla. Nejvhodnější východisko poskytuje známá velikost úhlu záběru čidla přístroje od vertikály v zenitální orientaci a odhad výšky nejbližších objektů (stromů, terénu, budov aj.). K odhadu potřeby velikosti volné plochy lze tedy použít základní goniometrickou funkci tg: $Y = H \cdot \tan \alpha$, kde Y - je potřebná vzdálenost od nejbližšího objektu (tak aby nezasahoval do záběru čidla), H - je výška objektu, α - je úhel záběru čidla ve směru od vertikály (Obr. 4). Odhad velikosti volné plochy s ohledem na záběr čidla lze samozřejmě provést také poměrově (Obr. 5).



Obr. 4. Schematické znázornění úhlového záběru optického čidla (šedá plocha), α - úhel záběru, H - výška nejbližšího objektu, Y - horizontální vzdálenost měřiče od objektu.

Čím větší je úhel záběru ve směru od vertikály, tím větší je třeba odstup od objektů (Obr. 5.). Na druhou stranu, čím vzdálenější je objekt tím menší je jeho vliv na měřenou hodnotu resp. plochu záběru. Za dostačující odstup i při maximálním záběru čidla (tj. 180°) je možné považovat sedminásobek výšky nejbližšího objektu. Při optimálním záběru čidla tj. ca 114° (tj. $\alpha = 57^\circ$) je dostačující odstup ca trojnásobku výšky nejbližšího objektu (Obr. 5). Při měření v terénu je třeba zohlednit jeho členitost a sklonitost.



Obr. 5. Závislost velikosti odstupu (Y) měřiče od nejbližšího objektu v násobcích výšky objektu (H) při různém úhlovém záběru optického čidla ve směru od vertikály. Čárkovaná čára označuje dostatečný odstup při často maximálních úhlových záběrech čidla.

c. Měření v porostu

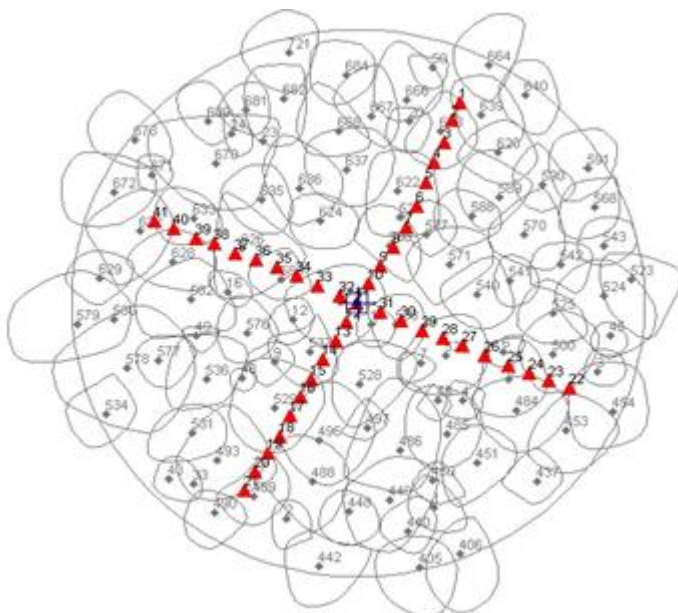
Pro měření v porostu je zásadní zvolit vhodný počet a uspořádání měřických stanovišť. V podstatě je jejich počet a uspořádání voleno v závislosti na strukturních parametrech porostu, zejména hustotě porostu, velikosti a výšce nasazení korun a tzv. rozrůzněnosti porostu. Rozrůzněností je chápána pravidelnost rozmístění jednotlivých stromů po porostní ploše, respektive rozmístění korun jednotlivých stromů a jejich rozvolnění - dotyk – překryv (zápoj), který se hodnotí okulárně. V zásadě je možno zvolit uspořádání měřických stanovišť v různě husté síti nebo počtu tzv. transektů s jistým (vždy shodným) rozestupem jednotlivých měřických stanovišť (WEISS et al. 2004). Transektem je chápána linie – přímá čára, poníž se pohybuje měřič při „průchodu“ porostem. Je samozřejmé, že jak počet transektů, tak velikost sítě měřických bodů by měl/a být v takovém počtu resp. hustotě, aby byla zachycena variabilita – rozrůzněnost porostu. Při opakovaném měření v jedné nebo více růstových sezónách je vhodné jednotlivá měřická stanoviště v terénu fixovat tj. trvaleji přesně vyznačit (např. kolíky). V jiném případě je dostačující vyznačit pouze začátek a konec transektu nebo koncové body (rohy) měřické sítě. Při jednorázovém stanovení LAI porostu v terénu není nutné měřická stanoviště vyznačovat. Postačí si pouze vést běžný záznam o označení (umístění) porostu v terénu či mapě s náčrtem uspořádání transektů a/nebo rozestupem měřických bodů (v síti). Stejně tak není nutné při jednorázovém stanovení LAI porostu přesně vyměřovat rozstup mezi měřickými stanovišti, ale postačující je zachovat pouze shodný rozstup (například počtem stejných kroků).

Celková velikost měřické sítě či počet a orientace transektů musí být volen stanovištně specificky tak, aby byly podchyceny všechny „řidké“ i „husté“ části porostu rovnoměrně. V rovinatém terénu a/nebo při velmi vysoké heterogenitě zápoje porostu, kdy nejsme schopni s jistotou rovnoměrně podchytit tuto vysokou variabilitu porostu použitím transektů (viz příklady Obr. 3 a 7-12) volíme uspořádání měřických bodů v pravidelné, zpravidla hustší měřické síti. Obvyklý **počet transektů** dostačujících pro umístění v homogenním porostu je 1-3. Jejich počet je však třeba navyšovat s velikostí a rozrůzněností porostu. Při velkém počtu transektů (ca 7 a více) je účelnější použít měřickou síť, alespoň v nejvíce odlišných částech porostu. Opět je třeba volit plošnou rovnoměrnost zastoupení jednotlivých odlišných částí porostu pro stanovení celkového LAI porostu. U velmi heterogenního porostu ve své podstatě hodnotíme LAI pro každou výrazně odlišnou část porostu odděleně s ohledem na její plošný podíl v porostu a výsledná hodnota LAI je váženým průměrem.

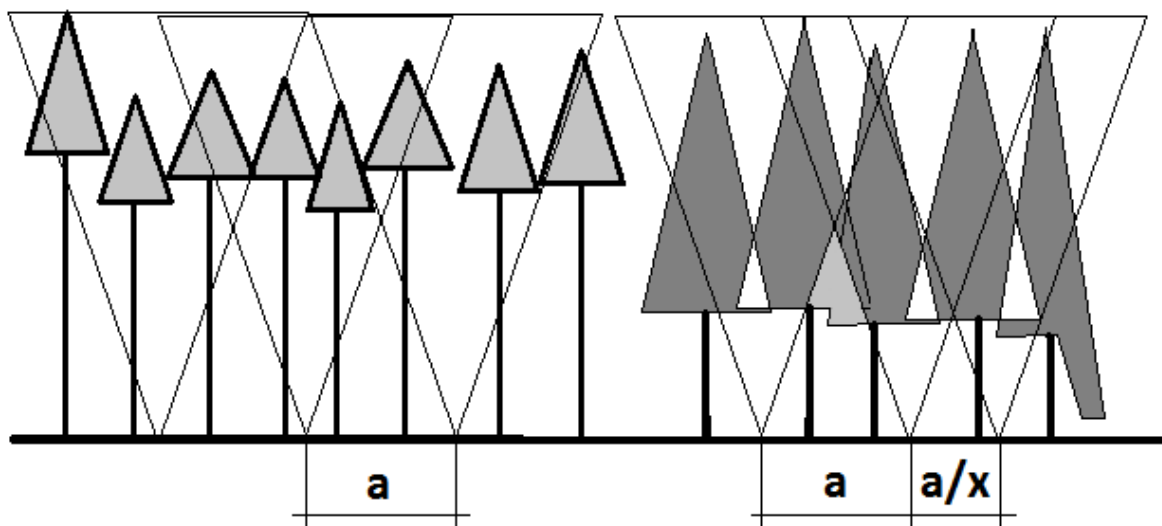
Orientace transektů je volena s ohledem na sklonitost a orientaci svahu a rozmístění stromů po porostní ploše. Je vhodné volit orientaci transektů tak, abychom při pochůzce v linii nechodili přímo po spádnicí (tj. ze svahu či do svahu), neboť nebudeme schopni dodržet (bez fixace – označení měřických stanovišť v terénu) rovnoměrný rozstup mezi jednotlivými měřickými stanovišti. /Měřič má obvykle tendenci zkracovat krok při chůzi do kopce a prodlužovat při chůzi z kopce./ Vhodné je se pohybovat víceméně po vrstevnici či jen mírně napříč vrstevnicemi. Dále je třeba si při měření ve svažitém terénu uvědomit, jakou část porostu bude zabírat čidlo optického senzoru. V azimutální výšce záběru čidla budou zhruba dvě čtvrtiny celkové plochy záběru při měření ve svažitém terénu zaujímat výrazně odlišnou část porostu, a to jedna horní část korun (ve směru ze svahu dolů) a jedna spodní část korun, kmenů případně dokonce i část terénu (ve směru do svahu nad měřičem). Významnější vliv na přesnost stanovení hodnoty LAI má samozřejmě chybný záběr terénu. Eliminovat lze tento vliv použitím restriktoru o dostatečné velikosti omezení úhlového záběru v azimutálním směru, či omezením úhlového záběru čidla ve směru zenitálním tak, aby byl záběr terénu zcela vyloučen.

Z hlediska struktury porostu a volby orientace transektů je důležitá ne/pravidelnost

rozmístění stromů po porostní ploše. Pokud byl porost založen uměle řadovou výsadbou nebo v určitém geometrickém sponu, pak je tato pravidelnost rozmístění dřevin v porostu často zaznamatelná i po několika prvních probírkových zásazích do poměrně vysokého věku porostu - ca 40 i více let. Zápoj je v takovém případě velmi odlišný v řadách, kde je přehoustlý, a v mezi-řadách, kde je nedokonalý (rozvolněný, dočasně přerušovaný). Při volbě měření v transektech jsou jednotlivá měřičská stanoviště uspořádána v přímce, tudíž by se mohlo stát, a s ohledem na snadnou průchodnost porostem k tomu měřič podvědomě směřuje, že budou tyto transekty umístěny pouze v mezi-řadách, nebo pouze v řidších částech mezi-sponu apod. Tím by docházelo k výraznému podhodnocení LAI porostu. Transekty je proto nutno orientovat kolmo či šikmo (pod úhlem do ca 45°) na řady vysázených stromů. Ve svahu probíhá řadová výsadba nejčastěji po spádnici, tudíž není orientace transektu s ohledem na výsadbu stromů a zároveň terénní podmínky (pohyb měřiče v transektu po vrstevnici) v rozporu (viz výše). Transekty lze volit v porostu navzájem rovnoběžně s určitým pravidelným rozstupem (vhodné zvláště ve svažitém terénu) nebo uspořádaných do kříže výjimečně i do hvězdice (v rovinatém terénu, Obr. 6). Rovnoběžné uspořádání transektů je nejvhodnější. Naopak, při uspořádání do vícečetné hvězdice je třeba si uvědomit, že větší váhu v celkové hodnotě LAI bude mít ta část porostu, kde dochází ke křížení transektů. Přesto je to vhodné uspořádání v případě plošně malých porostů (ca do rozměrů 25 m x 25m) v rovinatém terénu. Rozstup mezi jednotlivými transektu i měřičskými body (stanovišti) je volen s ohledem na rozrůzněnost porostu, velikost korun resp. výšku stromů porostu a úhlový záběr čidla optického přístroje pro stanovení LAIe (Obr. 7).



Obr. 6. Vhodné umístění transektů s měřičskými stanovišti (červené trojúhelníky) v homogenní zkusné ploše (porostu) s vyznačením projekcí jednotlivých korun. Umístění transektů do kříže či hvězdice je možné pouze u porostů nacházejících se v rovinatém terénu.



Obr. 7. Schematické znázornění volby rozestupu mezi měřičskými stanovišti či transektu s ohledem na záběr čidla (konstantní), hustotu porostu a hloubku zavětvení korun. a - vhodná rozestupová vzdálenost v případě porostu zobrazeném vlevo, a/x - rozestupová vzdálenost vhodná pro porost zobrazený vpravo. Při rozestupu a v porostu s níže nasazenými korunami (vpravo) není čidlem zachycena část korun (světle šedě), kde dochází dokonce k překryvu korun (zvýrazněno bíle).

Při stejném úhlovém záběru čidla optického přístroje je totiž s ohledem na délku a výšku nasazení korun nutno modifikovat rozestupovou vzdálenost mezi transektu (v případě velmi heterogenního porostu) či měřičskými body tak, aby byly v záběru čidla zachyceny celé koruny stromů. Proto je při hlouběji zavětvených korunách vhodné volit rozestupovou vzdálenost kratší (a/x) než při vysoko nasazených korunách (a ; Obr. 7.). Při stejné rozestupové vzdálenosti (a) by v případě porostu s nízko-nasazenými korunami nebyla čidlem zachycena část korun, kde se dokonce koruny překrývají, a docházelo by tak k podhodnocení LAI. Přesnou rozestupovou vzdálenost mezi transektu či měřičskými body (a) lze odvodit ze známé velikosti úhlového záběru čidla a výšky nasazení korun využitím jednoduchých goniometrických funkcí (Obr. 7.).

V homogenním porostu není nutné, aby překryv záběrů čidla byl natolik vysoký, aby byly zachyceny všechny koruny stromů porostu. Platí, že čím vyšší je homogenita porostu, tím větší může být rozestup mezi transektu. V rámci transektu je však nutné, aby byly zachyceny všechny koruny stromů! Proto je rozestup mezi transektu větší, než je rozestup mezi měřičskými stanovišti v rámci transektu. V homogenním porostu není pak také nutné při stanovení LAI optickým čidlem volit příliš hustou síť měřičských stanovišť. Hustota měřičské sítě či rozestup měřičských stanovišť v rámci transektu by měl být takový, jako je nejmenší rozestup mezi stromy při zřetelném řadovém uspořádání (rozdílný zápoj v řadách a mezi-řadách). Například v monokultuře smrku založeném ve sponu 1 m x 2 m, bude optimální hustota sítě 1 m x 1 m resp. rozestup mezi měřičskými stanovišti v transektu 1 m (POKORNÝ & MAREK 2001). Ve starším nesmíšeném porostu, kde není patrné geometrické uspořádání z výsadby, nebo vzniklém přirozenou obnovou, je možné rozestup mezi měřičskými stanovišti v transektu či hustotu měřičské sítě odhadnout ze vzájemného rozestupu mezi stromy a velikosti projekce korun. Je třeba přitom sledovat především frekvenci menších rozestupových vzdáleností nebo nejmenší poloměr projekce korun.³ Tato vzdálenost by měla

³ V případě dvojáku či porostů vzniklých pařezovou výmladností lze považovat dvoják nebo několik jedinců jednoho „trsu“ za jeden strom.

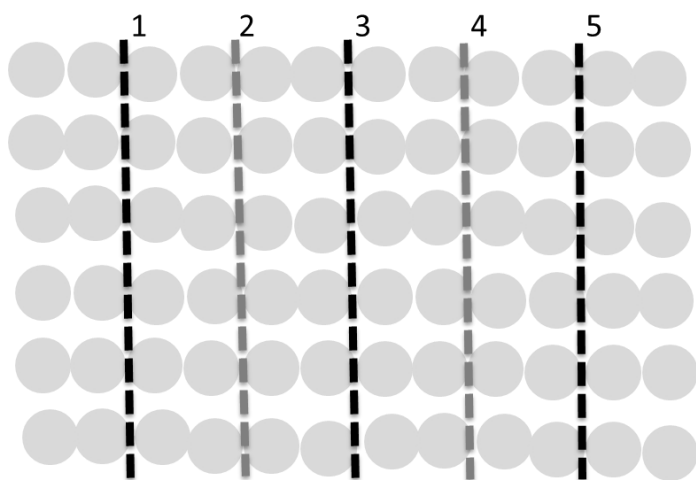
být rozestupovou i mezi měřičskými stanovišti (nejčastěji ca 3 - 5 m). **Počet měřičských stanovišť v transektu** se nejčastěji pohybuje mezi 5 a 15 (LANG 1991). Přesný algoritmus výpočtu pro stanovení počtu transektů či vzdálenosti mezi měřičskými body (WEISS et al. 2004) není nutno v praxi používat, neboť výpočet by měl vycházet z dokonalého popisu porostu, který nebývá dostupný. Časová náročnost takového přesného výpočtu by byla navíc vysoká, neboť závisí na mnoha strukturálních parametrech porostu, terénních podmínkách a omezení úhlového záběru čidla.

Lze však opět provést „**kontrolní měření**“, tentokrát **pod porostem**. Měřič se při tomto měření pohybuje s čidlem v transektu s velmi malými rozestupovými vzdálenostmi mezi potenciálními měřičskými stanovišti (v řádu dm - m) a sleduje variabilitu zaznamenávaných hodnot optického čidla. Platí obdobně jako u dříve zmíněného, že s nižší variabilitou hodnot může být rozestupová vzdálenost větší (s ohledem na velikost korun dospělých stromů lze doporučit maximálně ca 5 - 7 m). Při vysoké variabilitě, je třeba sledovat, ve kterých vzdálenostních pozicích čidla dochází k větším změnám (ca o více než 50 %) zaznamenané hodnoty. Rozestupovou vzdálenost lze pak doporučit jako poloviční vzdálenost mezi vzdálenostmi pozic, při nichž došlo k opětovné výraznější změně zaznamenaných hodnot.

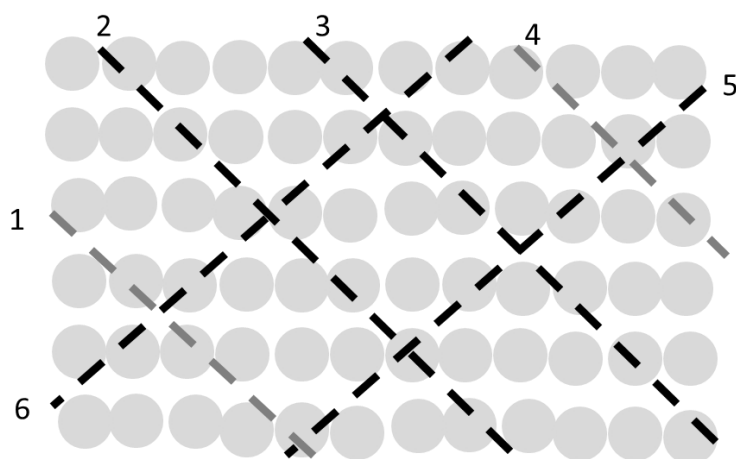
Umístění transektů, vzdálenost jednotlivých bodů či hustotu sítě měřičských stanovišť lze poměrně úspěšně zvolit na základě okulárního posouzení struktury porostu. K adekvátnímu posouzení stavu porostu a volbě metodiky měření slouží následující modelové porostní situace.

d. Uspořádání transektů a rozestupové vzdálenosti v porostu

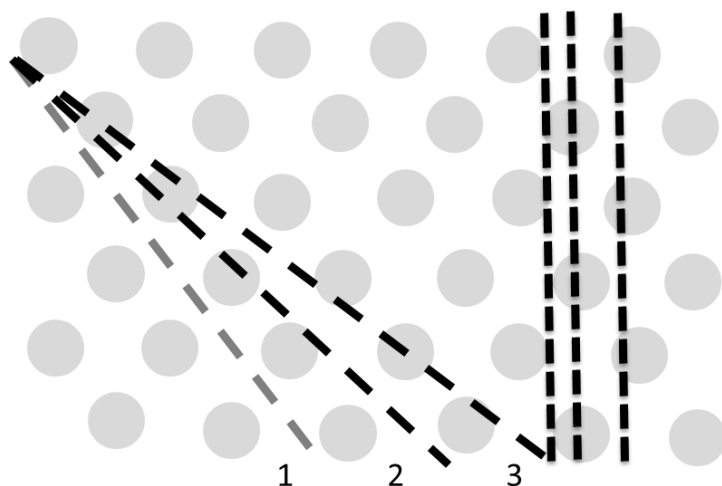
Mladé nesmíšené porosty resp. monokultury se vyznačují dominancí jednoho druhu dřeviny. Vznikají nejčastěji založením či umělou obnovou, a to manuální či strojovou výsadbou sazenic ve čtvercovém, obdélníkovém nebo trojúhelníkovém sponu. V takto založených monokulturách pak vzniká a poměrně dlouhou dobu vytrvá vysoká heterogenita zápoje (do tvorby dokonalého korunového zápoje, anebo alespoň do prvního schematického zásahu). Heterogenita spočívá v tom, že v řadách dochází velmi brzy k přehoustnutí zápoje zatímco v meziřadách je zápoj stále přerušen. Ačkoli jsou tyto porosty ve středním a vyšším věku homogenní, zhruba v prvních 20 letech vývoje tomu tak není a je nutno věnovat zvláštní pozornost na rozmístění měřičských bodů v kultuře či porostu zmíněné struktury (Obr. 8 – 10).



Obr. 8. Náčrt optimálního umístění jednotlivých transektů v monokultuře založené řadovou výsadbou (tj. v obdélníkovém sponu). Transekty probíhají kolmo na řady. Rozestup mezi měřičskými stanovišti v rámci transektu je minimálně shodný jako vzdálenost sousedních stromů v řadě. V případě vysoké homogenity porostu je dostatečný i menší počet transektů, proto je možné transekty č. 2 a č. 4. dokonce vynechat



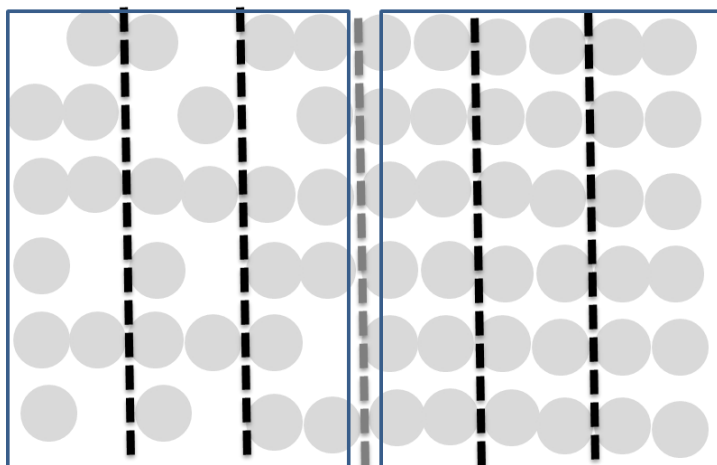
Obr. 9. Náčrt optimálního umístění jednotlivých transektů v monokultuře založené řadovou výsadbou (tj. s rozmístěním stromů v obdélníkovém sponu). Transekty probíhají šikmo na řady (úhel dle viz příklad 2). Rozestup mezi měřičskými stanovišti v rámci transektu je shodný jako vzdálenost sousedních stromů v řadě. V případě dostatečné homogenity porostu je možno vynechat transekty č. 1 a č. 4.



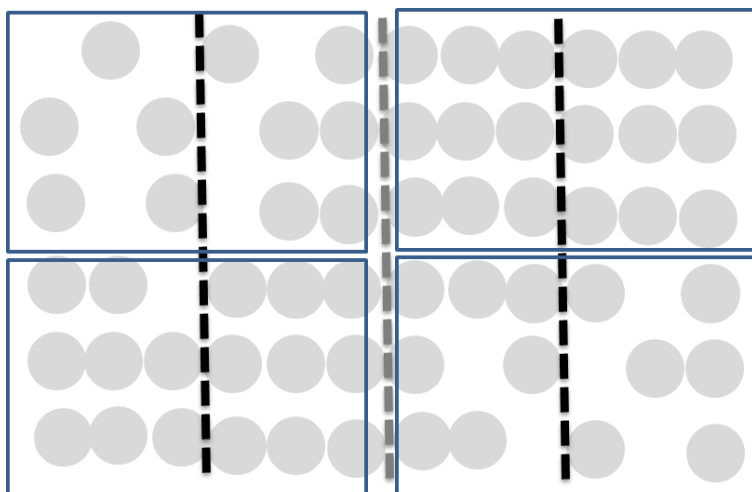
Obr. 10. Náčrt optimálního umístění jednotlivých transektů v monokultuře založené výsadbou (s rozmístěním stromů) v trojúhelníkovém sponu. Při volbě umístění transektů šikmo na řady je s ohledem na prostorové rozmístění stromů vhodný transekt č. 2 a 3. Transekt č. 1 je umístěn nevhodně v meziřadě. Při transektu kolmo umístěném na řady je třeba zohlednit snadnost průchodu měřiče porostem.*

V nesmíšených porostech založených výsadbou dochází často během prvních několika let po výsadbě, ale i během vývoje porostu a v době zralosti k poškození, odumírání jednotlivých stromů nebo celých skupin a dochází tak ke zvyšování heterogenity porostu resp. výskytu **porostních skupin rozdílné struktury**. I v takovém případě je třeba zohlednit strukturu celého porostu a volit umístění měřičských stanovišť tak, aby byly všechny tyto

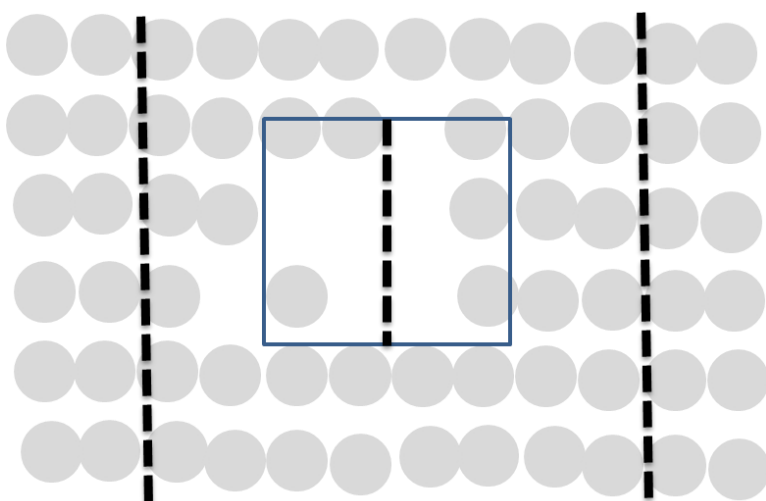
části podchyceny poměrově (Obr. 11 - 14).



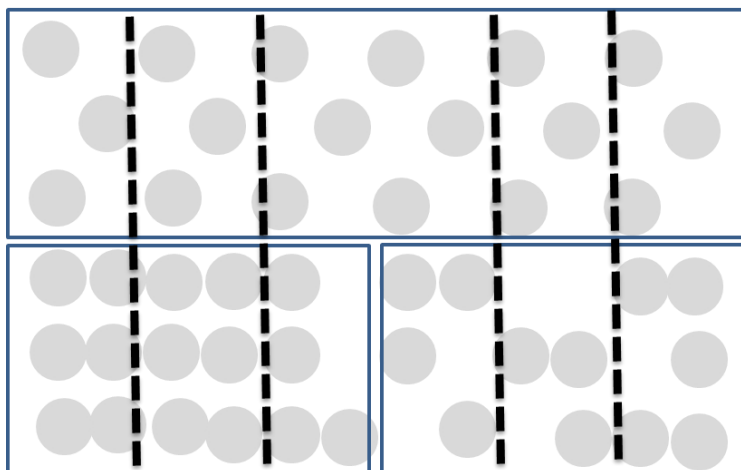
Obr. 11. Náčrt optimálního umístění jednotlivých transektů v monokultuře založené řadovou výsadbou se dvěma výrazně odlišnými částmi. Transekty probíhají kolmo na řady. V každé části je umístěn stejný počet transektů (měřičských stanovišť). Není nutné měřit navíc v transektu mezi těmito částmi porostu (transekt vyznačen šedě), neboť obě části jsou zastoupeny rovnoměrně.



Obr. 12. Náčrt optimálního umístění jednotlivých transektů se čtyřmi výrazně odlišnými částmi porostu. Transekty probíhají kolmo na řady. V každé části je umístěn stejný počet transektů a měřičských stanovišť. V transektu vyznačeném šedě opět není nutno měřit, neboť všechny části jsou pokryty měřičskými body rovnoměrně.



Obr. 13. Náčrt optimálního umístění transektů v monokultuře založené řadovou výsadbou se dvěma výrazně odlišnými částmi. Transekty probíhají kolmo na řady. V odlišných částech je umístěn různý počet transektů (měřičských stanovišť) v důsledku plošného zastoupení. Střední krátký transekt reprezentuje řídkou část porostu (plošně zaujímající ca 1/6 plochy porostu).



Obr. 14. Náčrt optimálního umístění transektů v monokultuře založené řadovou výsadbou se třemi výrazně odlišnými částmi reprezentujícími 50 %, 25 % a 25 % rozlohy plochy. V odlišných částech je umístěn různý počet transektů (měřičských stanovišť) v závislosti na plošném zastoupení.

Po aplikaci několika výchovných zásahů i vlivem přirozeného zředění lze v **dospělém porostu** s víceméně náhodným rozmístěním stromů po ploše volit umístění měřičských stanovišť obdobně jako ve výše zmíněných případech s ohledem na homogenitu zápoje. V dospělém porostu tak volíme jeden nebo několik transektů umístěných po vrstevnicích pro zachování stejné rozestupové vzdálenosti tak, aby byla záběrem čidla podchycena reprezentativní část porostu (Obr. 7). Transekty není vhodné umisťovat do okrajových částí porostu, kde je homogenita porostu narušena výskytem vtroušených dřevin nebo vlivem bočního světla výskytem keřovité vegetace. Platí, že čím výše jsou nasazeny koruny stromů a homogenita porostu je vyšší, je možno volit větší rozestupovou vzdálenost mezi jednotlivými měřičskými stanovišti v transektu (viz kap. III). Pokud se při průchodu porostem a potřebě dodržení pravidelnosti rozmístění bodů měřičské sítě stane, že bod vyjde přímo nebo do těsné blízkosti kmene, nebo do pomístně se vyskytujícího neproniknutelného podrostu, pak je třeba udělat úkrok (či několik) stranou kolmo na osu transektu, postoupit vpřed o vzdálenost mezi měřičskými body a stejným počtem úkroků se následně vrátit zpět na správnou pozici v transektu.

e. Zápis v terénním zápisníku

Náčrty konkrétní porostní situace by měly být samozřejmou součástí terénního zápisníku (Obr. 8 – 14). Dalšími údaji zaznamenanými v zápisníku by kromě výše uvedené identifikace porostu, orientace a polohy porostu, druhu dřeviny, mělo být také datum a čas/y měření, stručné zhodnocení počasí (synoptické situace, např. rovnoměrně zatažená obloha, oblačno, nízká pomalu se pohybující oblačnost apod.), orientace restriktoru (s ohledem na světové strany popř. terén), označení jednotlivých transektů a další případné údaje např. o čase kdy došlo k jakékoli změně, hodnotách, chybách apod. V tomto kontextu je třeba také zmínit, že při měření jedním optickým senzorem je třeba zohlednit časovou náročnost vůči rozvrženému počtu měřičských stanovišť v transektu/ síti a vzdálenosti mezi porostem a volnou plochou. Je nanejvýš vhodné zapisovat časový údaj pro každou referenční hodnotu, zvláště mezi počáteční a koncovou referenční hodnotou jednotlivého transektu. Při vlastním měření optickým přístrojem je také někdy třeba zohlednit reakční čas mezi reakcí čidla na změnu světelných podmínek při pohybu v porostu, reakční dobu mezi zobrazením hodnoty a jejím zápisem do paměti přístroje. Při vlastním měření je tedy po uvodorovnění čidla či fixaci

v určité poloze tuto časovou prodlevu zohlednit a v pozici setrvat až do ustálení hodnoty či zápisu hodnoty do paměti přístroje.

f. Doporučená oprava extrémních hodnot

Při měření v porostu je možné s ohledem na uvedené situace (Obr. 12 - 14), že v rozvolněných částech porostu nebo porostních mezerách je vlivem odrazu naměřena hodnota čtení optickým čidlem vyšší než na volné ploše resp. nad porostem. Mnohé softwary tyto hodnoty vyhodnocují jako chybu a automaticky ji vyřazují z výpočtu LAIe (např. C2000.exe, Li-Cor, USA). Toto je však závažnou chybou! Dochází tak k výraznému nadhodnocení LAI. Porostní mezera se v porostu reálně vyskytuje, a ač by neměla být zaznamenaná hodnota vyšší než referenční, měla by být s vysokou pravděpodobností zaznamenaná opravdu vysoká hodnota. Nelze tedy tuto „chybnou“ hodnotu zcela vyloučit, ale je třeba ji nahradit hodnotou, která je o něco málo nižší, než je hodnota referenční (ca o 1 – 2 %).

g. Přepočítání LAIe na LAI

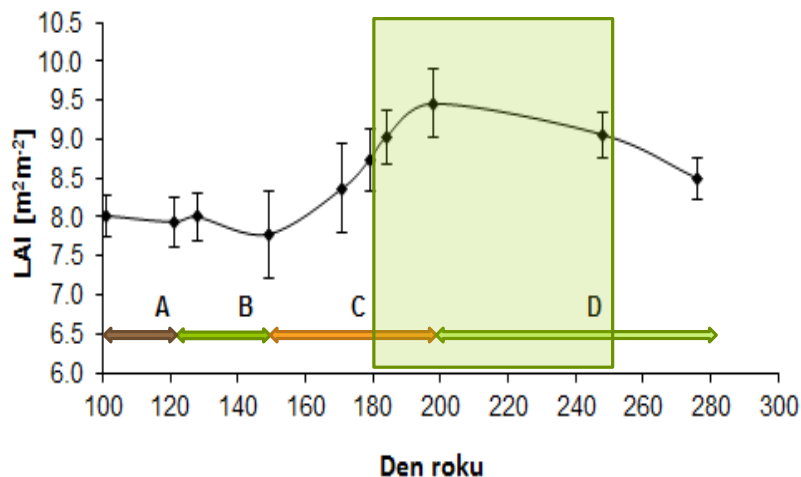
Z měření na volné ploše a v porostu lze dle teoretických předpokladů při měření optickými přístroji, kvantifikovat podíl frakce dřer či stanovit hodnotu transmitance a následně odvodit hodnotu efektivního LAI (LAIe). Tu je třeba dále korigovat na skutečnou hodnotu LAI, a to nejjednodušeji **u jehličnanů násobením** „porostním“ korekčním faktorem, zatímco **u listnáčů odečtem** podílu povrchu dřevních částí (tzv skeleton indexu- SI nebo woody area indexu- WAI). SI či WAI je stanoven obdobným způsobem jako LAIe, avšak při odlistěném stavu vegetace.

Výsledná hodnota LAI je pak v nehomogenním porostu jednoduchým průměrem nebo plošně váženým průměrem hodnot LAI stanovených pro jednotlivé homogennější části porostu.

h. Nejvhodnější období pro stanovení LAI

Hodnota LAI porostu se mění a vyvíjí významně nejen se zvyšujícím věkem porostu, ale i v průběhu jedné růstové sezóny (Obr. 15). Větší dynamiku lze v tomto ohledu sledovat u listnatých dřevin (včetně modřínu), které nahrazují veškerý svůj asimilační aparát na rozdíl od jehličnanů. K nejdynamičtějším změnám dochází obecně záhy po vyrašení pupenů, kdy se rozvíjí nové listy a rozrůstají letorosty. Zhruba ve druhé polovině července tento přírůstek vrcholí a LAI stromu/ porostu dosahuje maximálních hodnot v dané růstové sezóně. Ačkoliv již v tomto období začíná i žloutnutí jehlic (především v prostoru korunového jádra) neopadávají a LAI porostu se po dobu asi dvou měsíců mění nevýznamně (jen mírně klesá). Na podzim dochází opět k výraznějšímu poklesu LAI u listnáčů, zatímco jehličnany ztrácí jehlice více spíše až v zimním období. Jarní nárůst LAI je v listnatých porostech zpravidla rychlejší než jeho pokles na podzim, mladé porosty vykazují větší dynamiku nárůstu LAI než starší, avšak starší porosty naopak rychleji ztrácejí listoví na podzim. Z hlediska expozice

dochází rychleji k nárůstu LAI v porostech exponovaných ke Slunci, zatímco opad je u těchto porostů také rychlejší ve srovnání s porosty na neexponovaných svazích (v zástínu).



Obr. 15. Vývoj indexu listové plochy (LAI) smrkového porostu (35 let) v průběhu vybrané růstové sezóny. Tu lze rozdělit na následující období: A- období vegetačního klidu, B- období rašení pupenů, C- období intenzivního nárůstu LAI až po dosažení jeho maxima, D- období senescence. Zelený rámeček vyznačuje nejvhodnější období pro stanovení LAI porostu.

Z popsané dynamiky vývoje LAI porostu vyplývá, že nejvhodnější období pro stanovení LAI porostů z hlediska porovnání více porostů mezi sebou navzájem i z hlediska získání hodnoty charakterizující porost v dané růstové sezóně je jeho maximální hodnota LAI, kterou porosty u nás dosahují od druhé poloviny až konce července do poloviny až konce září.

IV. Srovnání novosti postupů

Z popsané problematiky stanovení LAI v porostech lesních dřevin (kap. II) vyplývá, že pro praktické využití jsou nejvhodnější nepřímé metody stanovení LAI pomocí optických přístrojů. Tyto přístroje jsou prodávány včetně manuálů popisujících vlastní přístroj a postup stanovení LAI jednotlivého stromu/rostliny či celého porostu. Tyto manuály však postrádají podrobnější informace. Metodické postupy prezentované v této metodice zefektivní a urychlí postup stanovení LAI v terénu a zpřesní dosažený výsledek, a to zhodnocením vhodných podmínek měření (kap. IIIa), stanovením vhodné velikosti a způsobu měření na volné ploše (kap. IIIb), vhodným postupem měření v porostu (IIIc) a optimální volbou usprádaní a orientací transektů včetně rozestupových vzdáleností mezi měřičskými stanovišti (kap. IIIc, d) atd.

V. Popis uplatnění metodiky

Metodika by měla sloužit především odborným pracovníkům, jejichž obor se dotýká či je postaven na biologických, ekofyziologických a lesnických studiích apod., v nichž je třeba kvantifikovat množství listové plochy jednotlivých rostlin nebo jejich porostů.

Listová plocha je v řadě odborných studií a modelech (mechanických, strukturních, fyziologických, růstových, dendrologických, ekologických, klimatických apod.) nezbytným vstupním parametrem. Navíc probíhá hodnocení zdravotního stavu (resp. stupně poškození) stromu/ porostu podle míry defoliace, což je reciprokový parametr LAI. Dle postupující

defoliace jsou v porostech lesních dřevin vylišena také pásma ohrožení imisemi (VYHL. Č. 78/1996 MZE ČR). V lesnické praxi může být LAI nejen ukazatelem zdravotního stavu stromu, ale napovídá také o produkčním potenciálu stromu/ porostu aj.

VI. Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty využití této metodiky lze odvodit pro její uživatele (hodnotitele listové plochy lesních porostů), odborné pracovníky, správce lesů a pro lesní hospodářství: 1) z volby vhodné metody stanovení LAI resp. ze srovnání náročnosti stanovení LAI nepřímou, polopřímou a přímou metodou, 2) ze srovnání náročnosti stanovení LAI porostu a/nebo defoliace stromu/ porostu, 3) z přínosů využití získané hodnoty LAI porostu pro lesnicko-hospodářské plánování.

Ač je kvantifikace LAI přímou metodou přesná, je náročnost dosažení výsledné hodnoty LAI vycházející z terénní pochůzky, výběru vzorníků, destrukce vzorníků nebo jejich částí, laboratorního zpracování vzorků a zpracování dat velmi vysoká (např. POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ 2007).⁴ U listnatých porostů je časová náročnost stanovení LAI přímou metodou méně náročná než u jehličnatých, i když počet vzorníků by měl být vyšší.⁵ Časová a energetická náročnost použití přímé metody stanovení LAI ve srovnání s nepřímou je na základě vlastních zkušeností (viz uvedené příklady v pozn.) minimálně ca 170 krát (pro listnatý porost) až 260 krát (pro jehličnatý porost) vyšší než při použití nepřímé metody.

Náklady na technické vybavení umožňující provádět stanovení LAI přímými a nepřímými metodami vyplývají z nutného materiálně-technického vybavení. Pro nepřímou metodu stanovení LAI je to kromě PC pro zpracování dat pouze optický přístroj, jehož cena se může pohybovat od ca 40 tis. Kč (vč DPH) pro jeden z prakticky upotřebitelných a nejlevnějších přístrojů nově uváděných na trh (LaiPen LP100, PSI, ČR) po ca 240 tis. Kč (vč DPH) pro jeden z nejnovějších a nejpoužívanějších ve vědecké komunitě (LAI 2200 PCA, Li-Cor, USA). Pro přímou metodu je to kromě PC pro zpracování dat alespoň jedna sušárna vzorků rostlinného původu, jeden skener pro stanovení plochy listoví s dostatečnou přesností (alespoň 300 dpi, velikost skenovaného okna A4), jedna laboratorní váha s dostatečnou přesností (alespoň 1g), dostatečný počet papírových sáčků popř. pytlů pro uchovávání vzorků a ostatní drobný materiál (nůžky, pilka, pinzety, popisovače aj.). S vyšším stářím a homogenitou porostu je k přímému stanovení LAI, resp. destrukci, třeba menšího počtu vzorníků (minimálně však lze doporučit právě 9 vzorníků, tzn. 3 vzorníky z každé sociální třídy, tj. stromy podúrovňové, úrovňové a nadúrovňové), avšak k očekávanému snížení

⁴ Například pro hektarový smrkový porost II. věkové třídy (resp. 9 vzorníkových stromů) může činit časová náročnost práce až ca 14 dní pro tři pracovníky (tj. 240 človeko-hodin, při fiktivní odměně pracovníka pro snadnost kalkulace 100 Kč/ hod celkem 24.000 Kč). Technicky i spotřebou energie na sušení (pro daný příklad odhadově: 2 sušárny se spotřebou 2kWh, doba sušení celkem 5 dnů, tj. celkem 480 kWh, při ceně elektřiny 4,50 Kč/kWh) a vážení vzorků, zpracování dat apod. (zanedbáno) by pro stejný příklad smrkového porostu činily náklady ca 2.160 Kč. Nepřímou metodou lze přitom s dostatečnou přesností stanovit hodnotu LAI stejného porostu do 1 hodiny jedním pracovníkem při zanedbatelné spotřebě energie (tj. celkem ca 100 Kč).

⁵ V mladém nesmíšeném listnatém porostu na základě zkušeností (jednodušší odběr vzorků, jednodušší stanovení projekční plochy listoví aj.) je to odborným odhadem jen ca 150 človeko-hodin (tj. 15.000 Kč). Spotřeba energie ve srovnání s jehličnatým porostem bude při stejném počtu vzorků obdobná. Se stářím porostu časová i technická náročnost (odběr vzorků z vyšších stojících stromů, odběr silnějších často strukturně bohatších větví, popř. nutnost kácení apod.) na stanovení LAI porostu stoupá.

nákladů se vzrůstajícím věkem porostu nedochází, neboť přibudou náklady na použití leze, vysokozdvížené plošiny či náklady na kácení stromů větších dimenzí. Protože náklady na zavedení přímé nebo nepřímé metody stanovení LAI závisí převážně na kvalitě pořizovaných přístrojů aj. nelze je přesně srovnávat.

Jednoduchá kvantifikace listové plochy porostů lesních dřevin nepřímou metodou pomocí optického přístroje jednotnou metodikou umožňuje dále zhodnotit zdravotní stav porostů, bez nutnosti školení zvláštních skupin pracovníků pro odhad defoliace. V manuálech prodáváných optických přístrojů jsou většinou uvedeny parametry a popis přístroje a pouze zevrubné pokyny ke stanovení hodnot LAI. K ujednocení postupů stanovení LAI optickými přístroji, eliminaci chyb a doplnění informací chybějících ve zmíněných manuálech přispívá právě prezentovaná metodika. Uživatel metodiky stanovující LAI porostu optickým přístrojem tak není nucen navštěvovat speciální školení. Stanovení LAI porostu oproti stanovení defoliace porostu okulárním odhadem je kromě objektivit také časově méně náročné (ca 2 až 3 krát). Ekonomický přínos metodiky se tedy v tomto ohledu opět odvíjí od snížení časové náročnosti pro získání hodnot LAI vůči defoliaci porostu a času na proškolení pracovníka resp. jeho seznámení s metodikou.

Ekonomické přínosy z využití prezentované metodiky pro stanovení hodnoty LAI nesmíšených porostů nepřímou metodou pomocí optického přístroje je pro lesní hospodářství, lesnicko-hospodářské plánování apod. závislé od konkrétních případů uplatnění a využití získaných hodnot LAI např. pro odhad potenciální produkce dřevní hmoty, plánování těžeb a výchovných zásahů v souvislosti s optimalizací hodnot LAI porostů pro tvorbu nadzemní biomasy atd.⁶ Kvantifikace listové plochy je významná také například pro odhad množství opadu, tvorbu humusu a jeho forem, koloběhu živin v lesních ekosystémech, pro plánování melioračních opatření půd apod.

VII. Seznam vybrané použité související literatury

- Homolová, L., Lukeš, P., Malenovský, Z., Lhotáková, Z., Kaplan, V., & Hanuš, J. (2013). Measurement methods and variability assessment of the Norway spruce total leaf area: implications for remote sensing. *Trees*, 27 (1): 111–121.
- Chen, J. M. (1996). Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agric. For. Meteorol.*, 80: 135-163.
- Lang, A.R.G., Zueqin, X., Norman, J.M. (1985). Crop structure and the penetration of direct sunlight. *Agric. For. Meteorol.*, 35: 83-101.
- Lang, A.R.G. (1991). Application of some Cauchy's theorems to estimation of surface area of leaves, needles and branches of plants and light transmittance. *Agric. For. Meteorol.*, 55: 191-212.
- Law, B.E., Van Tuyl, S., Cescatti, A., Baldocchi, D.D. (2001). Estimation of leaf area index in open-canopy ponderosa pine forests at different successional stages and management regimes in Oregon. *Agric. For. Meteorol.*, 108: 1-14.
- Leverenz, J.W., Hinckley, T.M. (1990). Shoot structure, leaf area index and productivity of evergreen conifer stands. *Tree Physiol.* 6: 135-144.
- Miller, J.B. (1967). A formula for average foliage density. *Aust. J. Bot.* 15: 141-144.

⁶ Na příkladu provedené studie v horské smrčíně II. věkové třídy (POKORNÝ et al. 2008) lze odvodit, že optimalizací hodnoty LAI probírkovým zásahem lze docílit zvýšení produkce nadzemní biomasy porostu až o ca 3 t.ha⁻¹ rok⁻¹.

- Monsi, M., Saeki, T. (1953). Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. *Japanese J. Bot.*, 14: 22-52.
- Nilson, T. (1971). A theoretical analysis of the frequency of the gaps in plant stands. *Agric. For. Meteorol.*, 8: 25-38.
- Nilson, T. (1999). Inversion gap frequency data in forest stands. *Agric. For. Meteorol.*, 98-99: 437-448.
- Gower, S.T., Norman J.M. (1991). Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaved plantations. *Ecology*, 72: 1896-1900.
- 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. *Agric. For. Meteorol.*, 121(1-2), 19–35.
- Stenberg, P. (1996). Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifer. *Agric. For. Meteorol.*, 79: 1-8.
- Stenberg, P., Kangas, T., Smolander, H., Linder, S. (1999). Shoot structure, canopy openness, and light interception in Norway spruce. *Plant Cell Environ.* 22: 1133-1142.
- Urban O., Klem K., Ač A., Havránková K., Holišová P., Navrátil M., Zitová M., Kozlová K., Pokorný R., Šprtová M., Tomášková I., Špunda V., Grace J. (2012). Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO₂ uptake within a spruce canopy. *Functional Ecology*, 26 (1): 46-55.
- Vose, J.M., Dougherty, P.M., Long, J.N., Smith, F.W., Gholz, H.L., Curran, P.J. (1994). Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. V: Gholz, H.L., Linder, S., McMurtrie, R.E. (Editors). Environmental constraints on the structure and productivity of pine forest ecosystems: a comparative analysis. *Ecological Bulletin* 43: 102-114, Copenhagen.
- Waring, R.H., Schroder, P.E., Oren, R. (1982). Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. J. For. Res.* 12: 556-560
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. *Agric. For. Meteorol.*, 121 (1-2), 37–53.

VIII. Seznam publikací, které předcházely metodice

- Pokorný, R., Opluštilová, M. (1999). Leaf area index and its development in selected spruce and beech stands in the Ore Mountains. *Journal of Forest Science*, 45 (4): 192-196 (dedikace: EC APOS)
- Pokorný, R., Marek, M.V. (2000). Test of accuracy of LAI estimation by LAI-2000 under artificially changed leaf to wood area proportions. *Biologia Plantarum*. 43 (4): 537-544 (dedikace: 522/96/1106 a 205/99/1561 GA ČR)
- Pokorný, R., Šalanská, P, Janouš, D., Pavelka, M. (2001). ALAI-02D – a new instrument in forest practice. *Journal of Forest Science* 47: 164-169 (dedikace: S6087005 GA AV, 526/00/0485 GA ČR)
- Pokorný, R. (2002). Index listové plochy v porostech lesních dřevin. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, 136 pp.
- Pokorný, R., Tomášková, I. (2007). Allometric relationships for surface area and dry mass of Norway spruce aboveground organs. *Journal of Forest Science* 53 (12): 548-554 (dedikace: SP/2d1/93/07 MŽP)

- Pokorný, R., Tomášková, I., Havránková, K. (2008). Temporal variation and efficiency of LAI in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research* 127 (5): 359-367 (dedikace: SP/2d1/93/07 MŽP, 2B06068 MŠMT)
- Marková I., Pokorný R. (2011). Allometric relationships for the estimation of dry mass of aboveground organs in young highland Norway spruce stand. *Acta Universitatis Agriculturae et silviculturae Mendeliana Brunensis* LIX (6): 217-223 (dedikace: SP/2d1/70/08 MŽP, OC09006 MŠMT COST)
- Marková I., Pokorný R., Marek M.V. (2011). Norway spruce stands solar radiation transformation into produced biomass – the effect of stand density. *Journal of Forest Science* 57 (6): 233-241 (dedikace: SP/2d1/70/08 MŽP, MSM 6215648902 MŠMT, OPVaVPI CZ.1.05/1.1.00/02.0073)
- Pokorný, R., Stojnič S. (2012). Leaf area index of Norway spruce stands in relation to age and defoliation. *Beskydy* 5 (2): 1-8 (dedikace: TA02010945 TA ČR, COST act. FP0903, OPVaVPI CZ.1.05/1.1.00/02.0073)

Summary

Presented guideline “Leaf area index (LAI) estimation in non-mixed forest tree stands” consists of two main parts. The first part is devoted to the theory of LAI estimation, the second one to the effective operating procedure for LAI estimation in a forest practice. Therefore, the theoretical part introduces: definitions of LAI coming from differences among projected, hemi-surface and total leaf area indexes, the methods of LAI estimation as well as procedures of LAI estimation in coniferous and broad-leaved tree stands, correction factors for recalculation of effective LAI values (as products of optical instruments) to the true LAI, and maximal and optimal LAI values of forest stands. The second part of guideline focuses on the methodological approach for effective LAI estimation by an optical instrument. These kinds of instruments, their parts, and brief instruction how to obtain the effective LAI values by them are commonly described in their manuals, but an information about appropriate sky/canopy conditions for measurements, an appropriate information about free area for reference values or so called “above canopy” readings, and an information about the best arrangement of measurement points within the stand are missing. Therefore, these topics are presented and highlighted in the methodological part, which comes from long-time experience of the author with the LAI estimation by various instruments (e.g. *LAI-2000* and *LAI-2200*, Li-COR, USA; *SunSCAN*, Dynamax, USA; *Ceptometer*, Decagon Devices, USA; *TRAC*, the 3rdWaveEngineering, Canada; *Fish-eye* photography + *WinSCANOPY*, Regent Instruments Inc. Kanada, *ALAI-02D* and *ALAI-03D*, CzechGlobe, PSI, CR) in many forest stands.

The methodological part focuses on an indirect method application of the LAI estimation from the practical point of view, as this method is based mostly on the application of optical instruments. It is quite simple, easy and fast approach how to obtain the LAI value with a sufficient accuracy. The optical sensors evaluating light conditions within the spectral range of photosynthetically active radiation (PhAR) or in a narrow specific range of light (to confirm the theory of MONSI and SAEKI (1953)) are the main parts of these instruments. Unfortunately, the most of these instruments are quite expensive and thus not widely used in a forest practice. In the Czech Republic, we have developed (*ALAI-02D*; POKORNÝ et al. 2001), and we are currently developing a new instrument (*LaiPen LP100*; under the project of the Technological Agency of the Czech Republic No. TA02010945) of low price, available for the LAI value as well as the PhAR intensity estimation and thus worldwide usable in a forest practice. Presented guideline can be helpful for foresters, biologists and scientists to estimate LAI values of non-mixed forest stand by such optical instruments and fulfill the gaps in the information presented in overall available instruction manuals.

Příloha – seznam použitých zkratk

- α - korekční faktor vyjadřující podíl dřevních částí v korunové vrstvě porostu vůči listoví
- β - korekční faktor (pro úroveň celého porostu)
- Ω_E - korekční faktor zahrnující překryv všech částí korunové vrstvy na úrovni vyšší než letorost
- BAI - index povrchu větví (definován jako polovina celkové plochy povrchu větví normalizovaná jednotkou povrchu půdy), zkratka z angl. Branch Area Index
- FAR - fotosynteticky aktivní radiace (ca 400 – 700 nm)
- LAI - index listové plochy, pokryvnost listoví (definován jako polovina celkové plochy listů/ jehlic normalizovaná jednotkou povrchu půdy), zkratka z angl. Leaf Area Index
- LAI_e - efektivní index listové plochy, primární (nekorigovaný) produkt optického přístroje
- LAI_p - projekční index listové plochy (definován jako projekční plocha listů/jehlic normalizovaná jednotkou půdy)
- LAI_t - celkový index listové plochy (celková plocha povrchu listů/ jehlic normalizovaná jednotkou půdy)
- PAI - index povrchu vegetace (definován jako polovina celkové plochy povrchů všech nadzemních orgánů vegetace normalizovaná jednotkou půdy; PAI = VAI), zkratka z angl. Plant Area Index
- R - referenční hodnota (hodnota měřená optickým přístrojem na volné ploše, či nad porostem)
- SAI - index povrchu kmenů (definován jako polovina celkové plochy povrchu kmenů normalizovaná jednotkou povrchu půdy), zkratka z angl. Stem Area Index
- SI - index povrchu dřevních částí (definován jako polovina celkové plochy povrchu kmenů a větví normalizovaná jednotkou povrchu půdy; SI = WAI), zkratka z angl. Skeleton Index
- SLA - specifická listová plocha (poměr mezi projekční plochou čerstvých listů/ jehlic a jejich suchou hmotností; jednotka: cm².g⁻¹)
- SMA - specifická hmotnost listoví (převrácená hodnota SLA; jednotka: g.cm⁻²)
- SPAR - poměr plochy siluety letorostu k projekční ploše jehlic (slouží jako korekční faktor zohledňující překryv jehlic v rámci letorostu)
- SSA - plocha siluety letorostu (projekční plocha letorostu při ortogonálním průmětu do horizontální roviny, resp. půdorys letorostu), zkratka z angl. Shoot Silhouette Area
- SSA - plocha siluety letorostu při prostorové projekci letorostu do horizontální roviny
- STAR - poměr plochy siluety letorostu k celkové ploše povrchu jehlic (slouží jako korekční faktor zohledňující překryv jehlic v rámci letorostu)
- STAR - poměr plochy prostorové projekce siluety letorostu k celkové ploše povrchu jehlic (slouží jako korekční faktor zohledňující překryv jehlic v rámci letorostu)
- T, t - transmitance (podíl sluneční radiace procházející porostem vůči radiaci dopadající na porost)
- VAI - index povrchu vegetace (definován jako polovina celkové plochy povrchů všech nadzemních orgánů vegetace normalizovaná jednotkou půdy; PAI = VAI), zkratka z angl. Vegetation Area Index
- WAI - index povrchu dřevních částí (definován jako polovina celkové plochy povrchu kmenů a větví normalizovaná jednotkou povrchu půdy; SI = WAI), zkratka z angl. Woody Area Index

Předkládá:

Doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D.

Brno, 2014

Dedikace – Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu Technologické agentury ČR č. TA 02010945 s názvem „ALAI-02DD- nový přístroj pro lesnickou praxi“