

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

**Využití indexu listové plochy pro stanovení míry defoliace
smrkových porostů**

Bakalářská práce

Autor: Marcela Fottrová

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivana Tomášková, Ph.D.

2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Marcela Fottrová

Lesnictví

Název práce

Využití indexu listové plochy pro stanovení míry defoliace smrkových porostů

Název anglicky

Utilization of leaf area index for determining the degree of spruce stands defoliation

Cíle práce

Cílem práce je zpřesnění dosavadního hodnocení defoliace smrkových korun. Doposud využívaná forma okulárního odhadu procenta defoliace dané dřeviny by mohla být nahrazena přístrojovým měřením s využitím fyziologického parametru – indexu listové plochy (LAI). Přístroj Plant Canopy Analyser založený na průniku světla korunovou vrstvou umožňuje s využitím korekčních faktorů stanovit plochu asimilačního aparátu nad 1 m² půdy. Získané hodnoty LAI dané dřeviny jsou pak objektivní a porovnatelné mezi jednotlivými oblastmi.

Metodika

První – teoretická část bakalářské práce – se bude soustředit na popis nedestruktivních metod sběru indexu listové plochy (LAI). Zvláštní pozornost se bude věnovat optické metodě mezernatosti (angl. gap fraction), kterou využívá přístroj Plant Canopy Analyser. Součástí teoretické části bude i přehled korekčních faktorů, které se podílí na zpřesnění výsledné hodnoty LAI. Před vlastním měřením bude provedena rešerše literatury k tématu, které bude zahrnovat příčiny defoliací a jejich vývoj v čase na území České republiky. Druhá praktická část bude obsahovat výsledky z terénních měření. Terénní práce se budou soustředit do vybraných oblastí Krušných hor. Na tomto území budou lokalizovány oblasti s nízkou, střední a vysokou defoliací na základě dostupných mapových podkladů, které pracují s procentuální defoliací korun stanovených odhadem. Výsledkem šetření bude hodnocení míry shody odhadu okulární a přístrojově stanovené defoliace, popsání vztahu mezi LAI a věkem porostu i LAI a procentem defoliace pomocí regresních křivek. Součástí praktické části bude také rozbor příčin defoliací na jednotlivých lokalitách s využitím dostupných meteorologických dat a dat o kvalitě ovzduší včetně pH půdy.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran

Klíčové slovo

smrk, defoliace, index listové plochy, Krušné hory

Doporučené zdroje informací

- Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of experimental botany* 54:2403–2417.
- Dambrine, E., M. Bonneau, J. Ranger, A. D. Mohamed, C. Nys, and F. Gras (1995). Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). In *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Springer, pp. 233–258.
- Chen, J. M. (1996). Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80:135–163.
- Majer, V., P. Kram, and J. B. Shanley (2005). Rapid regional recovery from sulfate and nitrate pollution in streams of the western Czech Republic—comparison to other recovering areas. *Environmental Pollution* 135:17–28.
- Nellemann, C., and T. Frogner (1994). Spatial patterns of spruce defoliation: relation to acid deposition, critical loads, and natural growth conditions in Norway. *Ambio* (United Kingdom).
- Vacek, S., M. Hejman, V. Semelová, J. Remeš, and V. Podrázský (2009). Effect of soil chemical properties on growth, foliation and nutrition of Norway spruce stand affected by yellowing in the Bohemian Forest Mts., Czech Republic. *European journal of forest research* 128:367–375.
- Weiss, M., F. Baret, G. J. Smith, I. Jonckheere, and P. Coppin (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and forest meteorology* 121:37–53.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Ivana Tomášková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2016

prof. Ing. Milan Lstibůrek, MSc, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2018

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Využití indexu listové plochy pro stanovení míry defoliace smrkových porostů vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Ivany Tomáškové, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Ve Vejrtech dne 18. 4. 2018

Marcela Fottrová

Poděkování

Mé poděkování za odborné vedení a za poskytnutí cenných rad při zpracování této práce patří paní doc. Ing. Ivaně Tomáškové, Ph.D. Velké poděkování patří mé rodině, která mě v průběhu studia nemálo podporovala a také mým přátelům.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením míry defoliace ve vztahu s indexem listové plochy u smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst). Měření bylo prováděno v PLO 01 Krušné hory. Krušné hory byly v minulosti velmi zatížené imisemi v důsledku těžkého průmyslu, což mělo značný dopad na lesní ekosystém a odumřelo několik tisíc hektarů lesa. Značná část porostů vykazuje i dnes defoliaci, která se hodnotí okulárně. Nedestruktivní metoda měření indexu listové plochy (LAI) umožňuje hodnocení defoliace bez subjektivního zatížení. Základní hypotéza tedy vychází z předpokladu, že se snižující se hodnotou LAI poroste hodnota defoliace. Tato defoliace pak bude korespondovat s konkrétní hodnotou LAI typickou pro daný porost. Stanovení přesné hodnoty LAI odpovídající stupni defoliace je obtížné s ohledem na poměrně široké rozpětí jednotlivých stupňů označující defoliaci. Hodnota LAI by proto mohla být využívána jako doplněk pro okulární hodnocení defoliace.

Klíčová slova: smrk, defoliace, index listové plochy, Krušné hory

Abstract

This bachelor thesis deals with determination of a rate of defoliation in relation with leaf area index at Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). The measurement was realized in natural forest area Ore Mountains. Ore Mountains were very subjected in immissions in past due the heavy industry and that had great impact on the forest ecosystem and died many thousands of hectares of forest. Even today a significant part of stands shows the defoliation that is evaluated ocularly. Non-destructive method of leaf area index (LAI) determination allows evaluation of defoliation without the subjective impact. So the basic hypothesis says that when LAI decreases the defoliation grows. Than this defoliation corresponds with specific value of LAI that is typical for the given stand. Determination of exact value of LAI that can be compared with grade of defoliation is difficult with respect to relatively wide range of each grade of defoliation. Therefore the value of LAI can be used as a supplement for the ocular method of evaluation of defoliation.

Key words: spruce, defoliation, leaf area index, Ore Mountains

Obsah

Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	8
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod.....	10
2 Cíl práce.....	12
3 Rozbor problematiky.....	13
3.1 Smrk ztepilý (<i>Picea abies</i> (L.) Karst).....	13
3.2 Anatomie listoví.....	14
3.3 Defoliace.....	15
3.3.1 Vývoj defoliace.....	17
3.3.2 Dopad imisí na lesní ekosystém.....	17
3.4 Index listové plochy.....	19
3.4.1 Metody pro stanovení LAI.....	20
3.4.2 Korekční faktory.....	22
3.4.3 Faktory ovlivňující velikost LAI.....	23
3.4.4 Postup pro stanovení LAI.....	25
3.4.5 Nejvhodnější období pro stanovení LAI.....	25
3.5 Charakteristika území.....	26
4 Metodika.....	28
4.1 Terénní práce.....	33
4.2 Zpracování dat.....	35
5 Výsledky.....	36
6 Diskuze.....	38
7 Závěr.....	40
8 Seznam literatury a zdrojů.....	41
8.1 Ostatní zdroje:.....	43

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Seznam obrázků:

Obr. 1. Náčrt příčného průřezu jehlicí

Obr. 2. Závislost LAI na stupni poškození

Seznam tabulek:

Tab. 1. Stupeň poškození jednoho stromu (smrk)

Tab. 2. Korekční faktory a směrodatné odchylky pro vybrané dřeviny - Gower et Norman (1991)

Tab. 3. Popis měřených porostů dle LHP

Tab. 4. Výsledné hodnoty LAI pro dané porosty

Seznam použitých zkratk a symbolů

α	korekční faktor vyjadřující podíl dřevních částí v korunové vrstvě porostu
β	korekční faktor pro úroveň celého porostu
Ω_e	korekční faktor zahrnující překryv všech částí korunové vrstvy na úrovni vyšší než letorost
LAI	index listové plochy, anglicky Leaf Area Index
LAI_e	efektivní index listové plochy, primární produkt optického přístroje
LAI_h	hemi-surface index listové plochy, polovina celkové plochy povrchu jehlice
PCA	přístroj Plant Canopy Analyser
SD	směrodatná odchylka
SPAR	poměr plochy siluety letorostu k projekční ploše jehlic, korekční faktor zohledňující překryv jehlic v rámci letorostu
STAR	poměr plochy siluety letorostu k celkové ploše povrchu jehlic, korekční faktor zohledňující překryv jehlic v rámci letorostu

1 Úvod

Listoví je jedno z nejdůležitějších orgánů porostu, přestože má různé tvary a podoby, plní stále stejné funkce, z těch nejdůležitějších můžeme jmenovat fotosyntézu, transpiraci či jiné metabolické funkce. Pokud nemá porost dostatečné množství listoví, chřadne a odumírá.

Česká republika je z jedné třetiny pokryta lesy, které pro nás mají důležitý význam. V porovnání s ostatními státy Evropy jsme na 20. místě s lesnatostí 34,5 %, podobnou hodnotu lesnatosti má například Chorvatsko, Litva, Bulharsko, Portugalsko nebo Španělsko. Prvenství patří Finsku, jehož území je pokryto ze 73,1% lesy, druhou příčku zaujímá Švédsko (68,4%) a třetí je Slovinsko (62%) (FAO 2015).

Mimo produkční funkce lesa, které se zásadně podílí na naší ekonomice a průmyslu, jsou zde také neméně důležité funkce mimoprodukční, mezi něž patří například funkce půdoochranná, vodohospodářská, ekologická a jiné. Mají-li být tyto funkce zachovány, je třeba monitorovat lesní ekosystémy a jejich zdravotní stav a poškození.

Jedním z ukazatelů poškození lesa je defoliace. Defoliace může být zapříčiněna jak abiotickými, tak biotickými faktory. V minulosti se defoliace určovala zejména okulárně, dnes již na stanovení defoliace existují i jiné metody, které využívají nejrůznějších přístrojů.

V minulosti bylo několik tisíc hektarů lesa České republiky zničeno škodlivými látkami, které vznikaly v důsledku rozvoje průmyslu. Česká republika patří mezi země, které jsou nejvíce zatíženy imisemi. Tyto škodlivé látky mají negativní vliv na lesní ekosystém. Z tohoto důvodu je nutné sledovat lesní ekosystémy a zjišťovat jejich míru poškození, způsobenou abiotickými vlivy.

Obzvláště byly poškozené lesy v Krušných horách, kdy hodnoty defoliace porostů patřily k nejvyšším v porovnání s celostátním průměrem. Imise jakožto abiotické vlivy vedou ke snížení odolnosti porostů a tyto jsou dále vystaveny stresu a dalším biotickým vlivům, jako jsou houbové patogeny a hmyzí škůdci (Pokorný et al. 2011).

Tato práce je zaměřena primárně na smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) Karst) a jeho defoliaci v porostech, které se nacházejí v Krušných horách. Pro určování defoliace byla

vybrána nepřímá metoda měření defoliace, a to přístrojem, který využívá tak zvané frakce děr (anglicky gap fraction).

LAI2200C Plant Canopy Analyzer (Li-Cor, USA) je přístroj, který využívá nedestruktivní metodu pro snadné a přesné měření indexu listové plochy (Leaf Area Index – LAI). Index listové plochy je bezrozměrná proměnná charakterizovaná jako ucelená jednostranná plocha fotosyntetizující tkáně na jednotku půdorysné plochy (Mikita et al. 2014). Tento index listové plochy PCA vypočítává z radiačního měření, které je zprostředkované hemisférickou čočkou objektivu, tak zvaným rybím okem. Měření se provádí jak v porostu, tak zároveň mimo něj, kdy optický senzor zachycuje světlo odstupňovaně v pěti různých úhlech, a tak je schopen zahrnout do záběru více elementů.

2 Cíl práce

Cílem práce je zpřesnění dosavadního hodnocení defoliace smrkových korun na základě okulárního hodnocení přesným měřením pomocí indexu listové plochy (LAI). Odhady míry defoliace zkušeným pozorovatelem jsou sice rychlé, ale silně subjektivně zatížené. Přístroj Plant Canopy Analyzer založený na průniku světla korunovou vrstvou umožňuje s využitím korekčních faktorů stanovit plochu asimilačního aparátu nad 1 m² půdy. Získané hodnoty LAI smrkového porostu jsou pak objektivní a porovnatelné mezi jednotlivými oblastmi.

3 Rozbor problematiky

3.1 Smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) Karst)

Smrk ztepilý jako naše nejdůležitější hospodářská dřevina dosahující stáří až 600 let patří do čeledi borovicovité (*Pinaceae*), rod *Picea*. Jedná se o strom, který tvoří sloupovitý kmen se štíhlou pyramidální pravidelně přeslenitou korunou až několik desítek metrů vysoký. Na horských lokalitách mohou vlivem povětrnostních podmínek vnikat i tak zvané vlahkové koruny. Habituálně se liší od jedle bělokoré svými větvemi, které s přibývajícím věkem tíhnou k převisajícímu postavení. Kmen je hladký a kulatý s vyvinutými kořenovými náběhy, jeho borka je barvy hnědé až šedohnědé a v pozdějším věku vykazuje pravidelné kosočtverečné členění. Dřevo je nažloutlé, měkké, lehké, pružné a pevné s drobnými pryskyřičnými kanálky, jádro nelze zřetelně odlišit. Smrk je považován za druh s mělkým kořenovým systémem bez kotevnic kořenů a nejnanežněji tak podléhá bořivým větrům. Nejméně stabilní pak jsou smrkové monokultury na podmáčených půdách a v případě promrznutí půdy dochází ke zlomům. Jehlice jsou na větvích uspořádány spirálovitě, jsou 1-3 cm dlouhé, zašpičatělé, leskle zelené a čtyřhranné. Samčí šištice jsou žlutavě červené umístěné mezi jehlicemi jednoletých prýtů obvykle ve střední a spodní části koruny. Samičí šištice jsou přisedlé, vzpřímené zelené nebo červené umístěné v horních částech koruny. Zralé šišky jsou válcovité, hnědé, nerozpadavé až 16 cm dlouhé, z nich vypadávají tmavě hnědá vejcovitá semena 2-5 mm velká, s blanitým oddělitelným křídlem. Smrk plodí přibližně od 60 let a semenné roky se opakují po 4-5 letech.

Smrk můžeme označit za polostinnou až stinnou dřevinu se střední tolerancí k zástině. Avšak můžeme najít i charakteristiku, která tvrdí, že je smrk světlomilná dřevina, která v mládí snáší zástin. Ekologické optimum smrku je ve výše položených, studených, mrazem ohrožených lokalitách, ale jeho fyziologické optimum leží mimo areál jeho přirozeného rozšíření. Přirozené porosty smrku se na území ČR se vyskytují na stanovištích mírně čerstvých až podmáčených, sucho je tedy limitujícím faktorem pro růst smrku. K vyšším teplotám je smrk citlivější než k nižším. Smrk nemá žádné zvláštní nároky na půdu. Je však velmi citlivý na znečištěné ovzduší

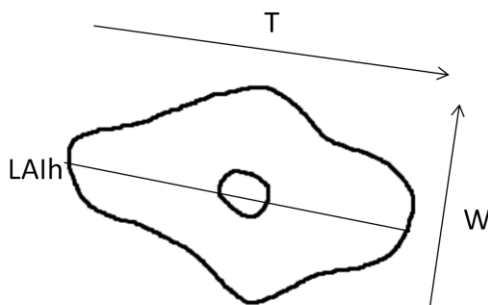
Smrk již vytlačil mnoho původních dřevin ze svých stanovišť a je jedním z nejrozšířenějších druhů. Vyskytuje se v severní, střední a jihovýchodní Evropě. Avšak

ne na všechna stanoviště smrk patří, a tak dochází k rozvoji nejrůznějších chorob a škůdců a dochází tak ke kalamitám významného rozsahu (Musil et al. 2003).

3.2 Anatomie listoví

Na životaschopnosti stromu se velkou částí podílí množství a kvalita neseného listoví. List je vegetativní orgán rostliny a odehrávají se v něm pro rostlinu důležité fyziologické procesy, které souvisí s jeho stavbou. Povrch listu je kryt pokožkou neboli epidermis, která může být jiná na vrchní části listu a na spodní části a může být ještě pokryta tenkou vrstvou kutily. Mezi epidermálními buňkami se nachází průduchy a mohou se vyskytovat i hydatody, které jsou schopné gutace – vylučování vody v kapalném stavu. Pod epidermis se vytváří hypodermis, vnitřní prostor listu vyplňuje mezofyl, vodivý systém je tvořen cévními svazky, v jehlici jsou 1-2 kolaterální cévní svazky (u smrku jeden, u borovice dva) v transfúzním pletivu obklopené endodermis s Casparyho proužky. U jehlic se v mezofylu ještě nacházejí pryskyřičné kanálky, s výjimkou tisu, jedle a jalovce (Tomášková et Kubásek 2016).

Listoví se neustále mění s časem a přizpůsobuje se aktuálním podmínkám prostředí, je schopno upravovat své fyziologické i morfologické znaky. Nejčastěji se tak stává v souvislosti se slunečním zářením, které má pro listy zásadní význam. V porostech smrku ztepilého, kdy všechny jehlice nejsou osvětleny stejnou mírou a vzniká zde prudký vertikální gradient fotosynteticky aktivního záření (FAR), můžeme sledovat velkou variabilitu tvaru jehlic na jednom stromě, tak aby fotosyntéza probíhala co nejefektivněji. Stinné jehlice mají tendenci mít nižší hustotu, jsou zploštělé a tenčí, zatímco osluněné jehlice bývají na průřezu větší a mají kruhovější průřez, což má dopad na rychlost fotosyntézy či vodivost listů (Gebauer et al. 2011).



Obrázek 1. Náčrt příčného průřezu jehlicí, T – tloušťka jehlice, W – šířka jehlice, LAIh – náčrt LAI hemi-surface, polovina plochy jehlice

3.3 Defoliace

Defoliace je jedním z nejdůležitějších ukazatelů zdravotního stavu lesa. Je definována jako relativní ztráta asimilačního aparátu v koruně stromu v porovnání se zdravým stromem, rostoucím ve stejných porostních a stanovištních podmínkách. Vyjádřená je nejčastěji procentuálně, či třídami, které mají určité procentuální rozmezí. Zdravý strom má až 12 ročníků jehlic, ale s narůstajícím poškozením přichází strom o staré ročníky jehlic, čímž se snižuje množství listoví a narůstá defoliace (Křístek 2007).

Defoliace se kvantifikuje v procentech, v praxi pak hodnotitel defoliace vychází z obrazu plně foliovaného stromu (100%), tedy s maximálním indexem listové plochy, poté porovnává tento obraz plně foliovaného stromu s obrazem skutečného stromu v terénu. Výsledky jsou tak založené na subjektivitě, nicméně všichni hodnotitelé jsou školeni společně, to znamená, že všichni využívají stejného obrazu foliovaného stromu, tudíž jejich výsledky by měly být porovnatelné (Pokorný et Stojnič 2012).

Defoliace je reakcí rostliny na nepříznivé podmínky, odehrávající se v lesním ekosystému. Nejčastěji se jedná o znečištěné ovzduší různými škodlivými látkami (například SO_2 , NO_x , Cl, těžké kovy, prachové částice apod.). Oslabené porosty jsou pak napadány dalšími biotickými faktory, jako jsou například houbové patogeny, hmyzí škůdci či zvěř.

Poškození porostů imisemi se určuje stupni poškození, které vychází ze stupňů poškození jednotlivých stromů a právě poškození jednotlivých stromů se určuje dle míry defoliace jednotlivých stromů. Do tohoto hodnocení se však nezahrnuje ztráta listoví vzniklá mechanickým poškozením stromu zapříčiněním například větrem, sněhem či námrazou. Dle vyhlášky Ministerstva zemědělství číslo 78 ze dne 18. 3. 1996 o stanovení pásem ohrožení lesů pod vlivem imisí jsou charakterizovány stupně poškození jednoho stromu v tabulce číslo 1.

Tab. 1 Stupeň poškození jednoho stromu (smrk)

Stupeň poškození	Popis poškození	Defoliace koruny v %
0	nepoškozený strom	0
1	slabě poškozený strom	1-25
2	středně poškozený strom	26-50
3	silně poškozený strom	51-75
4	odumírající strom	76-100
5	odumřelý strom	100

Vyhláška 78/1996 dále také definuje dle dynamiky zhoršování zdravotního stavu lesa imisemi pásma ohrožení lesních porostů imisemi:

- a) Pásmo ohrožení A – lesní pozemky s porosty s výrazným imisním zatížením, kde poškození dospělého smrkového porostu se zvýší průměrně o 1 stupeň během pěti let.
- b) Pásmo ohrožení B – lesní pozemky s porosty s výrazným imisním zatížením v příznivějších podmínkách, kde poškození dospělého smrkového porostu se zvýší průměrně o 1 stupeň během šesti až deseti let.
- c) Pásmo ohrožení C - lesní pozemky s porosty s imisním zatížením v příznivějších podmínkách, kde poškození dospělého smrkového porostu se zvýší průměrně o 1 stupeň během 11 až 15 let.
- d) Pásmo ohrožení D - lesní pozemky s porosty s nižším imisním zatížením v příznivějších podmínkách, kde poškození dospělého smrkového porostu se zvýší průměrně o 1 stupeň během 16 až 20 let. Do tohoto pásma se zahrnují i takové lesní pozemky s porosty, kde je vliv imisí patrný, ale dynamiku zhoršování zdravotního stavu lesních porostů zatím nelze přesně definovat.

Příčemž nejvyššími pásmy ohrožení jsou pásma A a B.

3.3.1 Vývoj defoliace

Dle monitoringu lesa v programu ICP Forests v České republice mladší jehličnany (pod 59 let) vykazují v dlouhodobém trendu nižší defoliaci než porosty mladších listnáčů. U starších porostů (nad 59 let) je tomu opačně, starší jehličnany mají vyšší defoliaci než starší listnaté porosty (<http://vulhm.cz>).

Česká republika patří mezi země, které jsou nejvíce zatíženy imisemi. Od roku 1962 do roku 1996 probíhaly na našem území největší kalamity v historii v souvislosti s oxidem siřičitým a jeho vysokou koncentrací v atmosféře (Šrámek et al. 2016). Koncem osmdesátých let došlo k prudkému nárůstu defoliace jehličnatých dřevin u nás. V roce 1996 defoliace stoupla na maximální hodnoty (smrk 33,9, borovice 38,3). Míra defoliace následně pak klesala, avšak od roku 1999 do roku 2009 mírně stoupala (<http://vulhm.cz>). Vzhledem k tomu, že starší jehličnaté porosty jsou náchylnější na defoliaci než starší listnaté porosty, můžeme tak například smrk brát jako dobrý indikátor defoliace. Je však nutné brát v potaz, že porosty reagují na změny v ekosystému s určitým zpožděním.

3.3.2 Dopad imisí na lesní ekosystém

Oxid siřičitý v přímém kontaktu s asimilačními orgány porušuje chlorofyly, což má za následek usychání jehlic a následnou defoliaci (Hruška et al. 2009). Smrk ztepilý, jako dřevina s největším zastoupením u nás – 52%, byl jednou z dřevin, která byla defoliací velmi poškozena.

Nejvíce byly postižené Krušné hory, kde vzniklo až 40 000 ha holin, které byly potřeba zalesnit. Vznikaly tak rozsáhlé porosty náhradních dřevin, kde měl zastoupení především smrk pichlavý, modřín, bříza, jeřáb ptačí a borovice kleč (Šrámek et al. 2016). Více byla zasažena střední a východní část Krušných hor, protože zde převážně vane západní vítr, který v minulosti přinášel imise od jejich zdroje – tepelných elektráren spalující hnědé uhlí (Albrechtová et al. 2017).

Odsířením elektráren vedlo ke snížení imisní zátěže, a tak počátkem 90. let 20. století byl především smrk pichlavý nahrazován cílovými dřevinami. Vzhledem k velké rozloze porostů smrku pichlavého nebyla možná jednorázová přeměna. Smrk pichlavý však začal chřadnout v důsledku napadením houbového patogenu, kloubnatou smrkovou (*Gemmamyces piceae*, Casagr.) a v současné době se jeho porosty rozpadají.

Avšak i přes skutečnost, že nejsou překračovány imisní limity pro ochranu vegetace, lesy nadále chřadnou. Dlouhodobé okyselování půdy má za následek vyplavování bazických kationtů, zejména tedy vápníku a hořčíku, což jsou také nezbytné živiny pro rostliny. Čím více bazických kationtů půda a hornina obsahuje, tím více je na kyseliny půda odolná. Horské oblasti jsou většinou na kyselých a málo mocných půdách, kde ke zvětrávání a následnému uvolňování bazických kationtů dochází velmi pomalu v důsledku trvale nízkých teplot.

Při velkém okyselení půdy dochází k otravám hliníkem, který se sice běžně v půdách vyskytuje a v bazických půdách není rozpustný, avšak v kontaktu s kyselým prostředím se začne rozpouštět a působí jako buněčný jed. Hliník z rostlin vytlačuje především hořčík, stromy pak trpí chlorózou a jehlice žloutnou a opadávají (Hruška et al. 2009).

Vliv lesnictví v problematice okyselování půdy je značný. Pěstování smrkových monokultur a jejich opad okyseluje půdu, zároveň se bazické ionty nemají jak vrátit do koloběhu, protože jsou těžbou úplně vyloučeny z lesního ekosystému.

Vzhledem k vysokému počtu zalesněných imisních holin a nárůstem jejich biomasy, můžeme v budoucnosti počítat s velkými nároky na živiny. Jako prostředek pro zvýšení nedostatku Ca v půdách je využíváno vápnění lesních ekosystémů. Toto opatření však nelze brát za trvalé, stabilního lesního ekosystému se musí dosáhnout hlavně samotnou biologickou cestou, a to zejména změnou hospodaření a samotnou strukturou porostů (Balcar et Kacálek 2016).

Při přeměně porostů v horských oblastech jsou doporučovány prosadby a podsadby, kdy již současný porost příznivě ovlivní růstové prostředí (tlumí klimatické extrémny, chrání půdu před erozí, vysycháním aj.).

3.4 Index listové plochy

Index listové plochy (také Leaf Area Index, zkráceně LAI) je bezrozměrná, dynamická proměnná měnící se v čase. Může být charakterizovaná jako ucelená jednostranná plocha fotosyntetizující tkáň na jednotku půdorysné plochy (Mikita et al. 2014). Tato definice platí zcela jistě pro listnaté stromy, jejichž listy žádným významným způsobem nevystupují do prostoru a jsou souměrné (Jonckheere et al. 2003). Avšak tato definice nebere v potaz jehličnany, jejichž listoví má různé tvary v závislosti na druhu dřeviny a světelných podmínkách (Pokorný 2015). Proto se LAI definuje spíše jako maximální plocha listoví, která se dá promítnout na jednotku plochy půdy (Jonckheere et al. 2003). Jednotkou plochy půdy je myšlena buď celá plocha, kterou porost zaujímá, nebo jen část do které můžeme promítnout koruny daného porostu vyskytující se na této půdě (Pokorný et Marek 2000).

Existuje několik typů LAI:

1. Projekční LAI (LAI_p) – projekční plocha listoví normalizována jednotkou plochy.
2. Hemi-surface LAI – polovina celkové plochy povrchu jehlic či listů na jednotku plochy. Vzhledem k tvaru jehlic, nelze hemi-surface LAI užít rovnocenně v porovnání s listy u listnatých stromů (Rowinski, et Radecki-Pawlik 2015).
3. LAI_t - total - celková plocha povrchu jehlic/listů.
4. Efektivní LAI_e – prvotní produkt optického přístroje.

Nemálo studií bylo zaměřeno na vztahy mezi fyziologickými procesy rostlin a množstvím neseného listoví. Listoví má vliv na produkci nadzemní biomasy, evapotranspiraci, vodnímu režimu stanovišti aj. a z tohoto také vyplývají funkce lesa, na kterých se množství nesené listové plochy podílí, jsou to například funkce produkční, půdoochranné, vodohospodářské, klimatické. A následně i opad listoví sehrává svou roli například při tvorbě humusové vrstvy nebo retence (Pokorný 2015).

3.4.1 Metody pro stanovení LAI

Jedná se o jednu z nejdůležitějších strukturních charakteristik buď samotného stromu, nebo celého porostu kvůli potenciálu produkce biomasy nebo celkového hodnocení zdravotního stavu lesa. Index listové plochy lze stanovit pomocí několika experimentálních metod, které lze rozdělit na metody přímé, polopřímé a nepřímé.

Přímé metody jsou založeny na destrukci rostliny, spočívající v odstranění listů z rostliny. Tyto metody navíc mohou i zahrnovat určení tvaru, úhlu nasazení, rozměrů jednotlivého orgánu aj. Vzhledem k velké náročnosti této metody se vybírají jen reprezentativní jedinci. Doporučuje se výběr tří jedinců – podúrovňový, úrovňový a nadúrovňový. Také je možno u opadavých porostů měřit množství opadaného listoví do měrné nádoby umístěné pod korunami stromů. Je však nutno počítat s redukcí listový v důsledku sesychání až ca 25% (Pokorný 2015).

3.4.1.1 Přímé metody

Přímé metody jsou velmi přesné, avšak hodí se spíše pro listnaté stromy a keře, pro jehličnany jsou velmi pracné a časově náročné. Také je nelze opakovat na stejných vzornících v závislosti na destrukci. Slouží tedy zejména pro vědecké účely, pro lesnickou praxi se nedoporučují. Lze však přímé metody použít jako kalibraci pro metody nepřímé (Dobbretin et Brang 2000).

3.4.1.2 Polopřímé metody

Polopřímé metody nejsou tak náročné jako metody přímé, vyžadují ale také přímý kontakt s listovím a kmeny. Mezi nejznámější polopřímé metody patří alometrické vztahy, kde pomocí základních dendrometrických parametrů stromu, jako je výčetní tloušťka či výška, lze stanovit listovou plochu a následně i LAI celého porostu. Každé stanoviště je však specifické a nelze je využít u každého porostu s dostatečnou přesností.

3.4.1.3 Nepřímé metody

Nepřímé metody jsou založeny na interakci slunečního záření se strukturou korunové vrstvy, obecněji lze říci, že index listové plochy vychází z optických vlastností listů a jejich prostorového uspořádání v korunové vrstvě porostu. Mezi nepřímé metody patří:

1. Metoda založená na měření intenzity radiace, resp. stanovení transmitance = propustnosti využívající Lambert-Beerův zákon (poměr intenzity propuštěného

slunečního záření korunou a intenzity dopadající záření). Tato metoda počítá s faktem, že jsou listy náhodně distribuovány a velikost jednotlivých listů je malá v porovnání s celým porostem (Bréda 2003). Tato metoda pracuje spíše s průnikem paprsku skrz listoví, kdežto metoda gap fraction počítá s pravděpodobností, že se paprsek listoví nedotkne, dokud nedosáhne referenční úrovně, což ve většině případů bývá země (Weiss et al. 2004).

2. Metoda mezernatosti (také frakce děr, anglicky Gap fraction) je založená na pravděpodobnosti průchodu slunečního záření korunovou vrstvou. Přístroje pracující na základě metody gap fraction srovnávají odlišné intenzity světla naměřené ve stejný čas v porostu a mimo něj (Li-Cor LAI2200 Plant Canopy Analyzer či AccuPAR PAR/LAI Ceptometer LP- 80).

Některé přístroje využívají také gap size distribution a analyzují mezery v koruně (například přístroj pořizující hemisférické fotografie TRAC – Tracking Radiation and Architecture of Canopies) (Jonckheere et al. 2003).

3. Spektrální metody využívající rozdílů v absorpci a odrazu různých vlnových délek záření korunovou vrstvou (Pokorný 2015).

4. Laserové metody jsou metody dálkového průzkumu Země umožňující hromadný sběr výškopisných a polohopisných dat o zemském povrchu a objektech, které na něm nacházejí. Laserové metody jsou založené na posloupnosti odrazů laserového paprsku od daných objektů (Mikita et al. 2014). Tyto metody nabývají nového potenciálu, avšak nejprve potřebují specifickou kalibraci pro danou lokalitu. Zároveň neposkytují vhodné výsledky pro složité porosty s vysokým LAI (Bréda 2003). U dálkového snímání Země vykazují vegetační indexy jehličnatých porostů velké sezónní variace s maximem v létě a minimem v zimě. Sezónní variabilita jehličí závisí na délce života jehlic, což průměrně bývá 4 až 5 let pro každý ročník jehlic, procentuálně tedy 25 až 30%, což je téměř shodná hodnota s odchylkami v přesnosti metod pro měření LAI (Chen 1996).

Největším úskalím nepřímých metod je, že nerozlišují fotosynteticky aktivní listovou tkáň od ostatních částí rostliny, jako jsou větve či kmen. Byly navrženy alternativní pojmy, jako je Vegetation area index – VAI, neboli index rostlinné vegetace, který můžeme chápat jako plochu povrchu nadzemní vegetace, (též k vidění Plant area index – PAI). Z tohoto důvodu se začalo využívat spíše tzv. efektivního LAI k popisu opticky odvozených odhadů LAI. Tato nomenklatura se jeví jako

nejadekvátnější, protože uznává, že přístroje nejsou schopné měřit pouze plochu, kterou zaujímá listový materiál, ale jsou zde zahrnuty i ostatní orgány stromu jako jsou větve, přesleny aj. (Jonckheere et al. 2003).

Nepřímé metody patří mezi nejefektivnější, avšak je zde nutnost užití korekčních faktorů, pro dosažení přesných hodnot LAI. Zvláště tomu je u jehličnatých porostů, kdy se musí vzít v potaz zejména neopadavost porostu a tvar jehlice, jakožto tělesa.

3.4.2 Korekční faktory

Optické přístroje často podhodnocují hodnotu LAI, proto je třeba užít korekčních faktorů. Zvláště pak u jehličnatých porostů, kdy se překrývají jednotlivé letorosty, větve a přesleny a jehlice jsou nahloučené, je stanovení LAI značně ztíženo. Je nutno vylíšit podíl dřevní a listové plochy, toto se však liší jak u jednotlivých druhů, tak u ekotypů.

Z pokusu uměle provedené defoliace smrkového porostu (Pokorný et Marek 2000), kdy byl LAI stanoven přímou i nepřímou metodou, vyplynula kritická hranice chyb z podhodnocení či nadhodnocení LAI je 20% podílu plochy dřevních částí a tohoto podílu je dosaženo u smrkové monokultury ve věku ca 20 let.

Jak již bylo popsáno výše, optické přístroje produkují pouze efektivní LAI (LAI_e) nebo index siluety letorostu (SSAI), proto je třeba užít korekčních faktorů, abychom získali LAI, které může být definováno jako $LAI = \beta \cdot LAI_e$, kde β je korekční faktor. Tento korekční faktor může být označován jako dispersní koeficient a zahrnuje v sobě překryv listoví v rámci celého porostu, kdy hodnota $\beta < 1$ znamená, že je listoví v korunové vrstvě nahloučeno, $\beta = 1$ znamená náhodné rozmístění listoví a $\beta > 1$ znamená nezapojenou, řidší korunovou vrstvu (Pokorný et Marek 2000). Korekční faktor β se skládá ze dvou částí, které také reagují na potenciální zdroje chyb – nenáhodná distribuce listoví, stínění a překryv jiných elementů než je listoví: stínění a překryv jehlic v rámci letorostu (poměr plochy siluety letorostu a plochy jehlic – STAR, SPAR) a stínění a překryv ve větším měřítku než letorost (Ω_e), tento index roste se zvyšujícím se zenitálním úhlem, protože větve jehličnanů rostou v přeslenech v různých výškách. Další vliv na stanovení hodnoty LAI optickým přístrojem má podíl dřevních částí (α). Konečnou hodnotu LAI lze stanovit následujícím vztahem:

$$LAI = (1 - \alpha) LAI_e \cdot (STAR / \Omega_e),$$

kde α je podíl plochy dřevních částí k ploše povrchu všech nadzemních orgánů, při náhodném rozmístění letorostů v korunové vrstvě není nezbytné užití faktoru ΩE .

Korekční faktory, které zachycují efekt stínění a překryv jehlic v rámci letorostu jsou určeny jako podíl projekční či celkové plochy povrchu jehlic a jednoduché projekční (SPAR, STAR) nebo prostorové projekční plochy letorostu (SPAR, STAR).

Plocha jehlic či letorostů je častěji počítána z projekční plochy tzv. konverzním faktorem, jehož hodnota se může pohybovat od 2 v případě plochých listů do 3,14 pro jehlice v s kruhovou plochou na průřezu nebo až do 4 v případě jehlic se čtvercovým průřezem.

Gower a Norman (1991) použili pro přepočítání LAI_e na LAI_p korekční faktor, který je definován podílem projekční plochy jehlic a průměrné projekce letorostu a poté na základě porovnání přímé metody s metodou nepřímou – optickým přístrojem (LAI-2000, Li-Cor) uvedli pro několik druhů dřevin korekční faktory (β) pro přepočítání z LAI_e na LAI. Tyto korekční faktory jsou uvedeny v tabulce 2 a lze je doporučit pro lesnickou praxi.

Tab.2. Korekční faktory a směrodatné odchylky pro vybrané dřeviny - Gower et Norman (1991): β – korekční faktor, 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

3.4.3 Faktory ovlivňující velikost LAI

Nejvyšších hodnot LAI dosahují listnaté porosty a jehličnany jako je jedle, smrk a douglaska, nejnižších hodnot dosahuje borovice. Na základě současných znalostí fyziologických procesů a proměnných jako je například respirace pletiv nebo úroveň tvorby a alokace biomasy lze odvodit optimální hodnotu LAI, která maximalizuje produkci porostu. Toto je však prakticky velmi obtížné, a tak se stanovuje tzv. rovnovážná hodnota LAI v závislosti na stanovištních podmínkách a dřevině, této hodnoty porost dosáhne v určitém stupni vývoje. Všeobecně lze říci, že rovnovážné

hodnoty dřeviny dosáhnou po mírném poklesu z maximálních hodnot. Svoji úlohu hraje doba, kdy se začne tvořit korunový zápoj.

Je známo, že rychle rostoucí dřeviny dosahují maximálního LAI ve věku 10-15 let, zatímco pomalu rostoucí dřeviny až ve věku 20-40 let nebo později. Poté LAI, v případě rychle rostoucích dřevin, kolísá okolo optima nebo pomalu klesá, ale v případě pomalu rostoucích dřevin zůstává dále konstantní. (Pokorný et Stojnič 2012). Albrechtová a kol. (2017) ve své práci tuto hypotézu potvrzuje svým měřením v Krušných horách na smrku ztepilém analýzou digitálních hemisférických fotografií, kdy nejvyšší hodnoty LAI dosahovaly zpravidla nejmladší porosty.

Dosažení maximálního LAI u dřeviny nemusí vždy znamenat, že je tato hodnota naprosto optimální. Z hlediska distribuce listoví, které je velmi prostorově různé ve vertikálním profilu, nedosahují všechny listy stejného ozáření. Avšak listy uspořádané ve více vrstvách využívají dopadající záření lépe než listy v jedné souvislé vrstvě. Porosty s vysokou hodnotou LAI mají vertikálně distribuované listoví, záření tak proniká hlouběji do porostu a je tak rovnoměrněji rozloženo na větší počet listů, i když samozřejmě ozáření každého listu je nízká, tím se však zvyšuje účinnost fotosyntézy. Porosty s nízkým LAI nejsou postavením listů příliš ovlivněné v souvislosti s využitím dopadajícího záření.

Přestože druhy s vysokou hodnotou LAI zachytí více slunečního záření, nevyužívají listovou plochu tak efektivně jako druhy s nízkou hodnotou LAI, což dokazuje porovnání efektivity listoví smrku ztepilého a borovice lesní v souvislosti s produkcí dřeva. Smrk dosahuje podobného celkového přírůstu jako borovice, ačkoliv borovice dosahuje poloviční hodnoty LAI. To znamená, že efektivita LAI je u borovice větší než u smrku.

Velikost LAI závisí na mnoha faktorech, zejména na velikosti a uspořádání listové plochy, tvorbě a opadu listoví, což může být různé v závislosti na genetické vybavenosti dané dřeviny a jejím ekotypem, dále na struktuře porostu, klimatických a stanovištních podmínkách, jako je například vodní režim, dostupnost minerálů, teplota, antropogenní vliv.

3.4.4 Postup pro stanovení LAI

Nejefektivnější metodou pro stanovení LAI je nepřímá metoda založená na měření transmitance a frakce dřer, protože tyto metody jsou nedestruktivní a rychlé. Před samotným měřením je potřeba naplánovat praktický postup měření daného porostu, tzn. rozmístění měřičských bodů, které může být náhodné, v pravidelné síti, rozdělené na transekty s ohledem na heterogenitu porostu. Dále je třeba si toto rozmístění zaznamenat, aby bylo možné měření ověřit či zopakovat a stanovit nejvhodnější korekční faktor.

Při výběru transektů v porostu je nutné brát v potaz jeho aktuální stav: věk porostu, jakým způsobem byl založen, jak byl vychováván. Při měření ve smrkové monokultuře je porost heterogenní do ca 20 let. Sazenice jsou sázeny v určitém sponu (čtvercovém, obdélníkovém či trojúhelníkovém), v řadách dochází k přehoustnutí porostu, v meziřadách je zápoj porušen. Postupným stárnutím porostu dochází k odumírání jedinců či celých skupin a dochází tak ke zvyšování heterogenity porostu. Je třeba všechny heterogenní části porostu zachytit v transektech měření.

V dospělém porostu, který se výchovou a přirozeným zředěním stal homogenní, volíme několik transektů umístěných po vrstevnici tak, aby byla zachycena reprezentativní část porostu. Není vhodné umisťovat transekty do okrajových částí porostu, kde může být tato homogenita narušena jinými vtroušenými dřevinami. Čím větší homogenita a nasazení korun, tím větší je možné zvolit rozestupovou vzdálenost mezi stanovišti v transektu (Pokorný 2015).

3.4.5 Nejvhodnější období pro stanovení LAI

Hodnota LAI se nemění jen v průběhu celého věku porostu, ale také v průběhu jedné růstové sezony. Velké rozdíly můžeme pozorovat mezi listnatými porosty (a modřínou) a porosty jehličnatými, kdy u listnatých porostů dochází k největšímu úbytku listoví na podzim, kdežto jehlice, tedy spíše jejich část, opadávají spíše na zimu. K nejdynamičtějším změnám pak dochází v období rašení pupenů, kdy se celkově rozrůstají letorosty a vytváří se nové listoví. Toto vrcholí zhruba ve 2. polovině července a LAI celého porostu dosahuje svého maxima v rámci jedné růstové sezóny. Nejvhodnější období pro stanovení LAI pak spadá na druhou polovinu července až zhruba do konce září.

3.5 Charakteristika území

Krušné hory jako přírodní lesní oblast 01 jsou kerné pohoří tvořené především krystalickými břidlicemi a žulovými tělesy. Konkrétněji v okolí města Vejprty, kde byla prováděna měření, se vyskytují svory a ruly. Krušné hory jako oblast se táhnou od severovýchodu na jihozápad, tato oblast je dlouhá asi 130 km a na české straně široká 6-19 km. Oblast v okolí Klínovce zde dosahuje nejvyššího nadmořských výšek, průměrná nadmořská výška je 1000 m. Lesnatost v Krušných horách činí ca 63%.

Krušné hory jsou významným rozvodím mezi ČR a SRN, díky vysokému spádu a trvalé vodnatosti byly toky využívány jako zdroje energie k pohonu strojů menších provozoven (papírny, hamry apod.). Drobnější vodní toky jen málokdy vysychají díky rašelinným a glejovým půdám na náhorních plošinách. Průměrné roční srážky činí ca 700 mm a průměrná roční teplota 6°C. Délka vegetačního období činí ca 140 dní. Vyskytují se zde často teplotní inverze v terénních sníženinách a uzavřených údolích, kdy za jasného počasí se v noci vzduch rychle ochlazuje, stéká do údolí a vytlačuje tím vzduch teplý. Teplotní inverze je zřetelná například v porovnání dvou klimatických stanic, z nichž jedna se nachází ve Vejprtech (780 m) a druhá v blízkosti Přísečnice (790 m). Mezi těmito stanicemi je výškový rozdíl 10 metrů, ale průměrný teplotní rozdíl odpovídá 80 výškovým metrům, jelikož stanice Přísečnice leží v kotlinové sníženině. Nejvýraznější inverzní situace mezi těmito stanicemi spadají na říjen, listopad, prosinec a leden.

Můžeme jmenovat několik abiotických činitelů, kteří ovlivňují porosty. Nejškodlivějším abiotickým činitelem je vítr, který v kombinaci s námrazou a sněhem způsobuje až dvě třetiny nahodilé těžby. Dalším aspektem, který velice ohrožuje vegetaci, jsou pozdní mrazy, se kterými je nutno v Krušných horách počítat prakticky každý měsíc. Z biotických činitelů můžeme jmenovat hmyzí škůdce, jejichž stav není nijak ohrožující a houbové patogeny zejména kloubnatku smrkovou. Významnými škodlivými elementem je přemnožená jelení zvěř, která okusy a loupáním ničí porosty (<http://uhul.cz> – OPRL).

V Krušných horách se v minulosti těžily rudy, zejména železo, měď, stříbro, olovo – Měděnec, Cínovec, Kovářská a ve 20. století na Jáchymovsku také uran. Dále významnou surovinou pro těžbu bylo hnědé uhlí těžené v podkrušnohorských pánvích a keramické jíly. V souvislosti s výskytem hnědé uhlí byly vystavěny elektrárny, které

dále uhlí zpracovávaly za vzniku tepelné a elektrické energie. Dále je velmi rozvinut chemický průmysl soustředěn v Litvínově (Chemopetrol) a Ústí nad Labem (Setuza, Spolchemie). Z tohoto je patrné, že v minulosti byl na území Krušných hor velmi vyvinut těžký průmysl, který měl na ekosystém silný dopad.

4 Metodika

Přístroj LAI 2200C Plant Canopy Analyzer (Li-Cor, USA) se sestává z jedné konzole, která slouží k ovládání zařízení, ukládání a přenosu dat do počítače. Další nedílnou součástí jsou dva optické senzory, jejichž objektivy obsahují přesné optické komponenty, včetně elektronických a optických filtrů a světelných přijímačů. Dvou optických senzorů je zapotřebí, pokud současně probíhá měření v porostu a mimo porost na otevřené, ničím neblokované obloze. Optické senzory využívají hemisférické čočky.

Na optické senzory se umisťují speciální krytky – restriční kroužky, které slouží k omezení azimutálního zorného pole optického senzoru, kdy je nezbytné eliminovat část tohoto zorného pole, jako je například měřič.

PCA lze použít jak v souvislém porostu, tak u solitérních jedinců, kdy jsou jiné metody nepoužitelné. Aby byla měření co nejpřesnější, používá se přístroj těsně před východem či západem slunce, kdy je rozptýlená sluneční radiace.

LAI2200C je přístroj, který je velmi citlivý na všechny objekty blokuující průchod světla v jeho záběru. Z tohoto důvodu vznikly další výrazy v souvislosti s nepřímým měřením LAI, a to PAI (Plant Area Index) a VAI (Vegetation Area Index), které zahrnují nefotosynteticky aktivní orgány rostliny.

Množství fotosynteticky aktivního materiálu lze odvodit z měření – jak rychle je oslabená radiace, prochází-li skrz listoví. Měřením této oslabené radiace v několika zenitových úhlech lze také získat informace o orientaci listoví. LAI2200C měří toto oslabení difúzního záření v pěti různých zenitových úhlech. Rozdělení do pěti zenitových úhlů zajišťuje pět soustředných kruhů, uspořádaných okolo hemisférické čočky optického senzoru. Oba optické senzory jsou opatřeny libelou pro dosažení vodorovné polohy. Pokud je čočka ve vodorovné poloze, první prstenec snímá obraz, který je přímo nad ním, pátý prstenec měří radiaci se středem 68° zenitového úhlu.

Při měření pracuje přístroj minimálně s deseti čísly, pět jich pochází z měření pod vegetací z pěti soustředných kruhů nacházejících se okolo čočky (B), dalších pět pochází ze senzoru, který je mimo vegetaci (A), kdy v obou případech je senzor namířen vzhůru k obloze. Finálních pět hodnot propustnosti porostu jsou vypočteny vydělením odpovídajících si párů (B/A). Například pokud první senzor čte hodnotu 50

(bez jednotek, které v tuto chvíli vynecháme) mimo porost a 5 v porostu, pak propustnost v tomto úhlu je $5:50=0,1$. Z propustnosti ve všech pěti úhlech vypočítává LAI2200C index listové plochy a orientaci listoví. V praxi se pak provádí obvykle řada snímků v porostu pro zlepšení prostorového průměru (spatial average).

Existují základní předpoklady, které musí být splněny, aby bylo možné přesně vypočítat hustotu a orientaci listoví. Rozsah, v jakém jsou tyto předpoklady porušeny, ovlivní přesnost měření a následně i výpočty. Hlavní předpoklady přibližně v pořadí významu jsou:

1. Především se vychází z toho, že listoví je černé a měření pod porostem nezahrnuje žádné odražené (reflected) světlo nebo světlo, které listovím prochází (transmitted). Optický filtr uvnitř zařízení zabraňuje vstupu slunečního záření s vlnovou délkou nad 490 nm, neboť v této části spektra je spektrum obvykle listovím málo odráženo.

2. Listoví je náhodně rozmístěno v rámci specifických tvarů, které habitus rostliny vytváří. Tyto tvary nabývají charakteru rovnoběžných linií (v případě řad zemědělských plodin) nebo jednotlivých elipsoidů (izolované stromy nebo keře).

3. Listoví tvoří malé elementy ve srovnání s plochou koncentrického kruhu odpovídající danému zenitálnímu úhlu. Vzdálenost mezi senzorem a nejbližším listem by měla být nejméně čtyřnásobek šířky listu.

4. Listoví vykazuje náhodnou orientaci ve všech azimutech. Nezáleží tedy na inklinacním úhlu listoví, pokud není listové nahloučené do jednoho směru světové strany. Tento předpoklad pozbývá na důležitosti v případě, že měříme ve více směrech nebo bez restričních kroužků.

Avšak žádný skutečný porost neodpovídá přesně těmto předpokladům. Listoví není nikdy náhodně rostlé, většinou jsou listy shlukovány podél větví a kmenů a určitě nemají černou barvu. Mnoho druhů je heliotropních, což porušuje předpoklad azimutální náhodnosti. Mnoho porostů lze považovat za náhodné a živé listoví má relativně nízkou propustnost a odrazivost radiace pod 490 nm. Chyby vyrovnání mohou být běžné, například když jsou listy seskupeny podél kmene (zvyšující se propustnost světla), ale jsou uspořádány tak, aby minimalizovaly překrývání (snižující se propustnost). Některé porosty porušují tyto předpoklady v rozsahu, který vyžaduje větší pozornost a posouzení. Měření jehličnatých porostů s vysokým stupněm uspořádání

může s sebou přinášet velké chyby. LAI2200C je velmi citlivý na malé relativní rozdíly v některých případech může být nezbytné kalibrovat přístroj přímým měřením, aby bylo dosaženo vysoké absolutní přesnosti.

Aby byla přesnost vysoká, musí se dodržovat jisté pokyny při měření. Měření se provádí jak v porostu (B), tak mimo porost (A) a aby byla tato data použitelná, je potřeba je provádět jak časově, tak prostorově současně nebo bezprostředně po sobě. V některých porostech je tento požadavek neuskutečnitelný pouze s jedním optickým senzorem, proto jsou zapotřebí využít oba tyto senzory. Musíme dbát na to, aby restriční kroužky zakrývaly stejnou část čočky na obou senzorech.

Senzor, který měří mimo porost (A), lze nastavit buď na automatické měření, kdy se nastaví začátek, konec a interval snímání, nebo lze manuálně zaznamenávat hodnotu, jímž je senzor opatřen. Měření mimo porost by mělo být na volné ploše, která je široká jako sedminásobek výšky měřeného porostu, pokud je užito restričního kroužku, který omezuje pohled objektivu na 180°. Pokud se užije restričních kroužků, které omezují záběr objektivu na 90° či 45°, stačí 3,5 násobný rozsah volné plochy.

Při sběru B dat v porostu je rozložit měření do jednoho či více transektů, záleží hlavně na výšce porostu. Počet měření v porostu můžeme vypočítat takto:

$$A = f\pi H^2$$

Kde A je rozloha reprezentační plochy v m², f je pohled frakce – dle užití restričního kroužku, 0,75 odpovídá 270°, 0,5 – 180°, 0,25 – 90° a 0,125 – 45°, H je výška porostu v metrech.

Avšak homogenní porost si vyžaduje méně měření než porost heterogenní.

Při měření je potřeba užít restričních kroužků, zejména pokud chceme eliminovat měřiče, tak uijeme 270° kroužek, ale pokud si je měřič jistý, že při měření bude vždy zaujímat stejnou polohu v zorném poli objektivu (že bude blokovat stále stejnou část zorného pole objektivu), není nutné použít žádný restriční kroužek. Obecně platí, že každý objekt, který současně zakrývá stejnou část čočky čtení v porostu a mimo porost, neovlivní výpočet LAI. Důvodů proč využívat restriční kroužek je několik: eliminace přímého slunečního záření, eliminace operátora, v případě, že radiace není rovnoměrná,

pokud jsou v porostu významné mezery nebo shluky stromů, chceme-li zmenšit velikost požadované zkoumané plochy.

Na oba senzory, pro měření v porostu a mimo něj, umisťujeme stejné restriční kroužky, které musí být orientovány stejným směrem. Po celou dobu měření musí být restriční kroužek na stejném místě, při jakémkoliv otočení může dojít k odchylce v měření.

Teoreticky by B měření mělo mít vždy nižší hodnoty než měření A, prakticky však může hodnota B měření překročit hodnotu A měření v některém z následujících důvodů: změna oblačnosti na obloze, chyba operátora v měření, provádění B měření za jasného slunečního záření. Čtení B pak můžeme označit za chybná, pokud jeden či více soustředných kruhů okolo čočky vykazuje vyšší hodnotu než hodnoty přidružených soustředných kruhů pro čtení A.

Nejlepší podmínky pro měření v závislosti na stavu oblohy jsou dány jasnou a čistou oblohou bez mraků, alespoň v části, které snímá senzor, se sluncem pod obzorem, to znamená buď za soumraku nebo před rozbřeskem, nebo slunce zakryté vhodným mrakem. Jako dobré podmínky můžeme označit jasnou modrou oblohu s menšími mraky během probíhajícího dne, v tomto případě se dobře měří zejména vysoké porosty, přímé sluneční záření zvyšuje rozptylové chyby, to však může být zmírněno korekcí tohoto rozptylu. Ostatní podmínky, jako například rozbitá oblačnost či neuniformní mraky, mohou být problematickým faktorem a je nutno při tomto stavu počasí měřit opatrně tak, aby obě měření zachytila stejný stav oblohy ve stejný čas. V tomto případě je vhodnější užít oba senzory (měření A a B) současně s nastaveným automatickým měřením na A měření.

Měření může probíhat i v případě je-li slunce vysoko za předpokladu, že je slunce v záběru senzoru zakryté restričním kroužkem či jsou měření dále upravena pro chybu rozptylu (scattering). Zatímco mraky mohou způsobit chybu náhodnou, chyba rozptylu představuje chybu systematickou. Tato chyba může být eliminována dalším měřením v době sběru dat.

Jeden za základních předpokladů LAI2200C je, že listy absorbují veškeré záření pro senzor viditelné (390-490 nm), avšak verze software FV2200 umožňuje tento předpoklad vynechat a poskytnout mechanismus pro korekci měření, které je přenášeno

a odražené listovím. Tato korekce by se měla užít pro data naměřená na přímém slunci, protože v tu chvíli jsou chyby rozptylu nejvyšší.

Je možné měřit i v dešti, ale kapky ulpívající na listoví značně zkreslí výsledky a nelze udržovat čočku senzoru stále suchou bez kapek, tudíž měření v dešti se nedoporučuje.

4.1 Terénní práce

Měření byla prováděna na území České republiky, v PLO 01 Krušné hory, v okolí města Vejprty v červenci roku 2016 a květnu roku 2017. Všechna měření probíhala na území patřící státnímu podniku Lesy České republiky, konkrétně území spadající pod lesní správu Klášterce nad Ohří. Samotnému měření předcházelo nahlédnutí do hospodářských knih platných do 31. 12. 2018, kde byly vytipovány smrkové porosty s mírou defoliace od 0-40%. Rozhodující byl jak věk, zastoupení smrku v porostu, tak míra defoliace uvedená v hospodářské knize, kdy byly vytipované porosty zaznamenány do porostní mapy a následně jejich vhodnost subjektivně zhodnocena přímo na místě, neboť vzhledem k platnosti LHP určité porosty mohly být již smýcené. Popis jednotlivých porostů je uveden v tabulce 3.

Tab. 3. Popis měřených porostů dle LHP: 7P1 kyselá jedlová smrčina, 6K1 kyselá smrková bučina, 6S4 svěží smrková bučina, 7K1 kyselá buková smrčina, stupeň poškození 1 – 20%, stupeň poškození 2 – 30%, stupeň poškození 3 – 40%, pásmo ohrožení imisemi A + B definované jako nejvyšší pásma ohrožení.

Popis měřených porostů dle LHP platný od 1. 1. 2009 do 31. 12. 2018								
Porost	Zakměnění	LVS	Lesní typ	Věk	Zastoupení dřevin	Plocha v ha	Pásmo ohrožení imisemi	Stupeň poškození
155B7	7	6	7P1	64	SM 100%	1,95	B	2
155A11	7	6	6K1	110	SM 100%	0,16	A	2
156A13	7	6	6K1	128	SM 100%	0,41	B	2
156B9b	8	6	6K1	83	SM 100%	0,47	B	3
156B9a	7	6	6K1	90	SM 100%	0,85	B	3
157A6	8	6	6S4	53	SM 70%/ KL 15%/ JR 15%	0,85	B	1
164A7	7	6	6K1	65	SM 100%	1,38	B	2
165A5	8	6	7P1	50	SM 90%/ MD 5%/ JR 5%	4,76	A	2
167B5	9	7	7K1	45	SM 90%/ JR 10%	1,15	A	2
245A5a	7	7	7K1	48	SM 90%/ JR 10%	5,4	A	2
246B9	6	6	6K1	81	SM 100%	0,19	B	3
246B9b	6	6	6K1	81	SM 100%	0,15	B	1

Při měření byly vždy využívány oba optické senzory, jeden nastavený na automatické snímání, který byl nastaven s frekvencí 10 vteřin a snímal oblohu mimo

porost a druhý využit při průchodu porostem, kdy byla manuálně zaznamenána hodnota v přibližně stejném intervalu. Zejména byl kladen důraz na počasí a denní dobu v závislosti na dopadu slunečních paprsků. Měření bylo prováděno před západem slunce, kdy sluneční paprsky přímo nedopadaly na čočku objektivu optického senzoru. Při každém měření bylo využito restričních kroužků k eliminaci měřiče. Oba optické senzory měly nasazený restriční kroužek ve stejném směru a při měření byly orientovány oba senzory stejným směrem. Každé měření bylo prováděno na rovinatém terénu a pomocí libely bylo dbáno na vodorovné zajištění optických senzorů.

V každém porostu byla nejdříve posouzena velikost a poté struktura a následně vytvořeny transekty či měřičská stanoviště tak, aby byly nejlépe zachyceny všechny odlišnosti poměrově vůči velikosti porostu.

Jak je patrné z tabulky číslo 3, z velké většiny se jedná o kyselé lesní typy. Lesní typ 6K kyselá smrková bučina rozšířená na chudých podložích vrchovin a nižších horských stupňů od 650 do 900 m. n. m, půda čerstvě vlhká, středně hluboká, ohrožení sněhem a větrem střední. Lesní typ 7K kyselá buková smrčina, rozšířena na středních a horních částí svahů, půda vlhkostně příznivá, propustná, ohrožení silně sněhem, značně větrem, vlhkem, nedostatkem tepla drsné klima a kyselé podloží podmiňují chudou druhovou skladbu. Jen jeden porost byl zařazen dle LHP do lesního typu 6S svěží smrková bučina rozšířená na horní i dolní části svahů, hřebenech, úžlabinách, ve vrchovinách i horských polohách na různém podloží, půda je hluboká čerstvě vlhká, propustná, avšak v Krušných horách ochuzená, ohrožení je značné větrem a sněhem. Na tomto lesním typu byl stupeň poškození pouze 1. Lesní typ 7P kyselá jedlová smrčina rozšířena v horských oblastech a vrchovinách, půda hluboká jílovotopísčitá až jílovitohlinitá, těžce propustná, ohrožení silně větrem, sněhem, zamokřením, buření (Plíva 1987).

4.2 Zpracování dat

Optický senzor umístěný mimo porost ve funkci automatického snímání byl odpojen od konzole, zatímco senzor, který snímal v porostu, byl připojen pomocí kabelu. Následně se musela data z odpojeného senzoru vždy přenést do konzole.

Aby data mohla být zpracována, musela se z konzole pomocí USB přenést do počítače, kde byla v podobě textového souboru. Data se vložila do programu FV2200, který je dostupný na internetových stránkách Li-Coru.

Samotná konzole nejdříve pracuje s tak zvaným old LAI, který si sama vyhodnotí ihned po měření pouze s jedním optickým senzorem napojeným na konzoli – v tomto případě optický senzor snímající porost, tudíž je to pouze hodnota z měření (B) bez měření mimo porost (A). Old LAI nijak nekoresponduje se skutečností, neboť nemůže být vypočítána propustnost neboli transmitance, která se vypočte jako poměr intenzity propuštěného záření a intenzity dopadajícího záření.

Více směrodatný je efektivní LAI, který nám vyhodnotí program FV2200 spárováním hodnot A a B ve vztahu B/A . Při vyhodnocování dat v programu jsou z výsledku vyjmuta data pro 4. a 5. úhlový pohled senzoru, čímž se pohled senzoru zúží a jsou eliminovány možné nedostatky a tímto i následné chyby v měření (měřič, kmen, apod.). S efektivním LAI je potřeba dále pracovat, neboť v tomto LAI není započítán překryv jehlic a letorostů, tudíž je nutná korekce za pomoci korekčního faktoru. Bylo využito korekčního faktoru s hodnotou 1,6 pro smrk z tabulky 1, kterou sestavili Gower a Norman (1991). Tímto přepočtem je dosaženo hemi-surface LAI jako finální hodnoty LAI.

Každý z porostů měl přiřazený stupeň poškození z LHP, kdy stupeň 1 určuje defoliaci do 20%, stupeň 2 do 30% a stupeň 3 do 40%. Z LAIh byl následně vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka jako statistické veličiny pro každý stupeň poškození.

5 Výsledky

Zkoumanou veličinou byl index listové plochy (LAIh), jehož hodnoty ke každému porostu jsou v tabulce 4. V tabulce jsou také průměrné hodnoty a směrodatné odchylky LAI pro každý stupeň poškození.

Tab. 4. Výsledné hodnoty LAI pro dané porosty: LAIe – efektivní index listové plochy, LAIh – hemi-surface index listové plochy

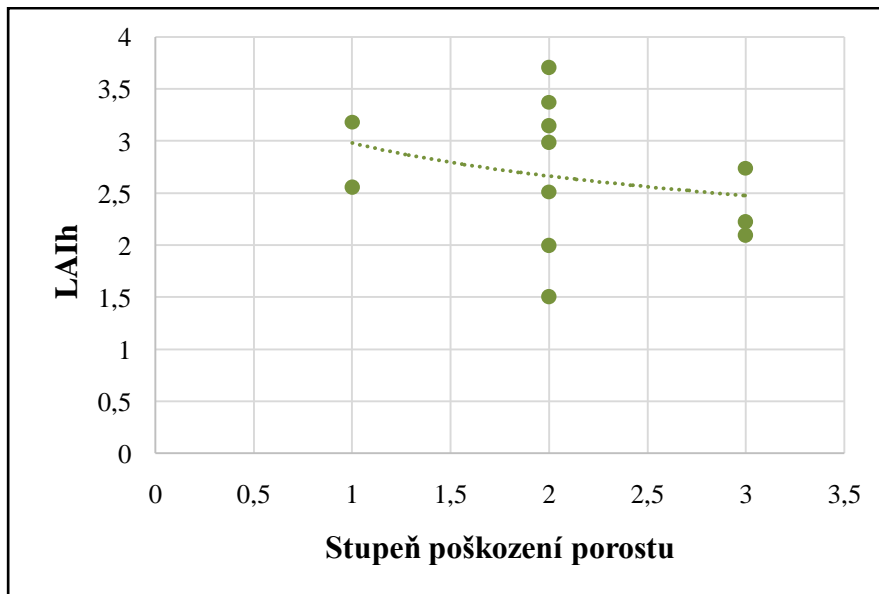
Porost	Old LAI	LAIe	LAIh	Stupeň poškození	Průměr (LAIh)	Směrodatná odchylka (LAIh)
155B7	0,76	0,94	1,50	2	Stupeň poškození 1 (20%)	Stupeň poškození 1 (20%)
156A13	1,39	2,32	3,71	2	2,87	0,44
157A6	0,93	1,6	2,56	1	Stupeň poškození 2 (30%)	Stupeň poškození 2 (30%)
164A7	1,12	2,11	3,38	2	2,75	0,79
165A5	1,11	1,57	2,51	2	Stupeň poškození 3 (40%)	Stupeň poškození 3 (40%)
167B5	0,9	1,25	2,00	2	2,42	0,46
245A5a	1,12	1,97	3,15	2		
246B9	1,29	1,84	2,94	3		
155A11	1,15	1,87	2,99	2		
156B9b	0,96	1,31	2,10	3		
156B9a	0,84	1,39	2,22	3		
246B9b	1,22	1,99	3,18	1		

Průměrné LAI pro stupeň poškození 1 je 2,872, pro stupeň 2 je to 2,750, což je o 0,122 méně než u prvního stupně a poškození pro stupeň 3 má LAI průměrné hodnoty 2,421, což je o 0,329 méně než u stupně 2.

Z aritmetických průměrů pro každé stupně poškození je patrný pokles LAI. Při zvýšení defoliace ze stupně poškození 1 na stupeň poškození 3 se průměrně LAIh zmenší o 0,451.

Porost 155B7 má nejnižší hodnotu LAI, ale vzhledem k jeho zakmenění zde došlo pravděpodobně k chybě při měření, kdy měření A mimo porost nebylo prováděno na dostatečné velké ploše a došlo zde k zastínění částí porostu.

Nejvyšší hodnotu LAI má porost 156A13, což je zároveň nejstarší naměřený porost. LAI u smrku, jako dřeviny s relativně rychlým růstem, dosahuje maxima okolo 20 let věku a následně pomalu klesá.



Obr. 2 Závislost LAI na stupni poškození: LAIh – hemi-surface index listové plochy, Stupeň poškození 1 defoliace do 20%, 2 defoliace do 30%, 3 defoliace do 40%.

Z grafu 1 je patrné, že s postupující defoliací klesá hodnota LAI, potvrdila se hypotéza, že se snižujícím se indexem listové plochy se zvyšuje stupeň poškození.

6 Diskuze

Toto téma práce bylo vybráno především s ohledem na Krušné hory, které byly několik let výrazně imisně zatíženy. Imisní zatížení mělo za následek odumření několika tisíc hektarů zdravého lesa během relativně krátké doby a pozůstatky po imisním zatížení si lesní ekosystém Krušných hor s sebou nese do dnes.

Avšak Solberg a kol. (2015) ve své práci tvrdí, že ačkoliv existuje všeobecné přesvědčení o tom, že znečištění ovzduší v Evropě způsobovalo odumírání lesních porostů, zdá se, že tomu tak úplně není. Uvádí, že klimatické podmínky, zejména tedy sucho, ovlivňují lesní porosty daleko více. V Evropě byl v polovině 80. let vytvořen rozsáhlý program monitorování lesů jako odpověď na účinky znečištěného ovzduší. Nicméně spojitost znečištěného ovzduší s rozsáhlým odumíráním lesních porostů byla v té době těžce zpochybněna, nebyl totiž nalezen žádný vztah mezi znečištěním ovzduší a defoliací. Odumírání lesních porostů dává ve spojitost zejména se suchem (porost nejen, že ztrácí listoví, ale i trpí nedostatkem K, Mg, je snížena schopnost růstu, odumírají kořeny) a nezvykle teplými zimami (Solberg et al. 2015).

Možným krokem jak zabránit defoliaci porostu je vápnění. Vápnění bylo velmi potřebné v minulosti a na určitých stanovištích trvá do dnes, neboť se zvyšuje kyselost půdy a jsou vyplavovány bazické kationty, nedostatek hořčíku a vápníku má za následek žloutnutí porostů. Vápněním se půdě dodávají tyto prvky a kladně tak působí na asimilační pletiva v jehlicích smrku (Fiala et al. 2017). Porosty, kterým je dodáván hořčík, jsou odolnější vůči negativním vlivům na lesní ekosystém v dlouhodobém časovém horizontu (Vacek et al. 2009).

S výrazným poklesem imisí se kvalita prostředí zlepšila, ale defoliace je na lesních porostech patrná do dnes, neboť ztráta asimilačního aparátu je komplexní záležitostí. Zlepšení zdravotního stavu je podmíněno kvalitou půdního prostředí, které má i přes usilovné snahy s vápněním stále daleko k optimu. pH půdy je na řadě lokalit v Krušných horách pod hodnotou 4, což je hranice, kdy se vyplavuje hliník a železo, které má na rostliny účinky jako jed. Dřeviny jsou tak neustále vystaveny stresu z nadbytku těžkých kovů a naopak nedostatku bazických iontů. K tomuto stresu se připojují trvale nepříznivé podmínky.

Jedním z největších úskalí je přemnožená zvěř, jejíž okusy, ohryzy a loupání ničí všechny mladé porosty. Dochází zde však ke střetu zájmů ochrany porostů a

myslivočeských zřízení. Měla by se však uvést v praxi některá opatření, která by rekonstrukci porostů měla umožnit: zvýšit plán lovu, aby se dosáhlo stavů zvěře blízko normovaným stavům, důsledně kontrolovat a řídit způsob dokrmování zvěře, doplnit síť přezimovacích objektů. Prozatím ale je smrk ztepilý jako jediná dřevina nejodolnější, protože nejlépe zvládá stresová stanoviště.

Mimo zvěř jsou dalšími ohrožujícími činiteli vítr a sníh, vzhledem k lesním vegetačním stupňům, kde se měřené porosty nacházejí. Stejnověké smrkové monokultury jsou nestabilní a v šestém a sedmém stupni jsou velmi náchylné k poškození. Mělo by se tedy uchýlit k takovým hospodářským opatřením, které omezí tyto činitele na minimum – vhodné výchovné a obnovní zásahy.

Určitá změna v hospodaření v Krušných horách stojí za zvážení, a to přejít ze smrkových monokultur na lesy smíšené vzhledem k množství chorob, na které smrk trpí. Avšak při přeměně porostů musí být zohledněno několik aspektů; parametry současného porostu, růstové podmínky, kategorie lesa, cílová druhová skladba a ekonomická stránka hospodaření.

Albrechtová a kol. (2017) provedla měření indexu listové plochy v Krušných horách pomocí analýzy digitálních hemisférických fotografií u smrku ztepilého, kdy se hodnoty LAI pohybovaly v rozmezí od 4 do 6,5. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo zpravidla u velmi mladých porostů smrku a toto tvrzení odpovídá i závěrům získaných ve studii autory Pokorný a Stojnič (2012). Pokud však tyto hodnoty srovnáme s naměřenými hodnotami v této práci, zjistíme, že se LAI pohybuje poměrně nízko, v rozmezí od 1,5 do 3,7. Běžně se hodnoty LAI pohybují od 5 do 10, u velmi mladých porostů do 30 let až 11 (Pokorný et al. 2007). Nízké hodnoty mohly být dány nízkými hodnotami měření na volné ploše, která byla v řadě případů mírně zastíněna okolním porostem.

Pro hodnotu LAI je klíčové období v rámci roku i pro jehličnaté dřeviny, které si asimilační aparát ponechávají. Obvykle LAI dosahuje nízkých hodnot na začátku sezony, v červenci dosahuje vrcholu a poté v souvislosti s přísuškou klesá. Avšak z časových důvodů nebylo možné změřit vše v jeden měsíc.

7 Závěr

Krušné hory jakožto přírodní lesní oblast byly velmi postiženy imisemi a jejich dopad je znatelný v lesním ekosystému do dnes. Přestože jsou dnes všechny imise pod limitem, porosty nadále chřadnou v závislosti na depozici bazických kationtů v půdě. Téměř všechny měřené porosty se vyskytují na kyselých půdách a v šestém a sedmém lesním vegetačním stupni. Smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) Karst), který ačkoliv je odolný jako dřevina, reaguje na tyto depozice žloutnutím jehlic a následnou defoliací a dále trpí pod vlivy větru a sněhu. Leaf Area Index se projevil jako dobrý ukazatel zdravotního stavu lesa.

LAI byl porovnáván se stupněm poškození daným LHP. V naměřených porostech s rostoucí defoliací klesala hodnota LAI. Tímto byla hypotéza potvrzena, nepřímé metody hodnocení LAI lze pro hodnocení defoliace využít. Ale vzhledem k vysoké směrodatné odchylce a širokým intervalům pro jednotlivé stupně poškození nelze LAI propojit s procentuální hodnotou defoliace.

8 Seznam literatury a zdrojů

ALBRECHTOVÁ J., KUPKOVÁ L., CAMPBELL P. K. E. (eds.): Hodnocení stavu smrkových porostů. - Případové studie sledování vývoje fyziologického stavu smrkových porostů v Krušných horách v letech 1998 - 2013. *Geographica - Česká geografická společnost*, 2017, ss. 401, ISBN: ISBN 978-80-905642-9-9

BALCAR, V., KACÁLEK D. Přeměny náhradních porostů smrku pichlavého. *Lesnická práce: časopis pro lesnicko-dřevařskou vědu a praxi*. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2016, **95**(8), 12-13. ISSN 0322-9254.

BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* [online]. 2003, 54(392), 2403-2417 [cit. 2018-04-04]. DOI: 10.1093/jxb/erg263. ISSN 1460-2431. Dostupné z: <https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/erg263>

DOBBERTIN M., P. BRANG. Crown defoliation improves tree mortality models. *Forest Ecology and Management* [online]. 2000, 271-284 [cit. 2018-04-04].

FERKL, J. Lesnické hospodaření v imisní oblasti Krušných hor. *Lesnická práce: časopis pro lesnicko-dřevařskou vědu a praxi*. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2016, **95**(8), 9-11. ISSN 0322-9254.

FIALA, P., REININGER D., SAMEK T. Chemizmus půdního prostředí a jehlic smrku ztepilého (*Picea abies* /L./ Karst.) ve vápněných a kontrolních porostech Krušných hor. *Zprávy lesnického výzkumu: vědecký recenzovaný časopis*. Praha - Zbraslav nad Vltavou: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti Jíloviště-Strnady, 2017, **62**(1), 23-32. ISSN 0322-9688.

GEBAUER R., VOLAŘÍK D., URBAN J., BØRJA I., NAGY N. E., ELDHUSET T. D., KROKENE P. Effect of thinning on anatomical adaptations of Norway spruce needles. *Oxford University Press*. 2011

GOWER, S. T., NORMAN J. M. (1991). Rapid estimation of leaf area index in conifer and broadleaved plantations. *Ecology*, 72: 1896-1900.

HRUŠKA J., OULEHLE F., KRÁM P., SKOŘEPOVÁ I. Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy, 2. Vliv depozic síry a dusíku na půdy a lesy. *Živa – rozhled v oboru veškeré přírody*. AV ČR Praha 1, 2009 (3), 141-144

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.

JONCKHEERE I., FLECK S., NACKAERTS K., MUYS B., COPPIN P., WEISS M. a BARET F. Review of methods for in situ leaf area index determination. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2004, 121(1-2), 19-35 [cit. 2018-04-04]. DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.08.027. ISSN 01681923. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192303001643>

KŘÍSTEK Š. Ochrana lesů. Metodika. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, pobočka Frýdek-Místek, 2007

MIKITA T., PATOČKA Z., SABOL J. Výpočet indexu listové plochy (LAI) v lesních porostech na základě dat leteckého laserového skenování v podmínkách České republiky. *Zprávy lesnického výzkumu: vědecký recenzovaný časopis*. Praha - Zbraslav nad Vltavou: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti Jíloviště-Strnady, 2014, 59(4), 234-242. ISSN 0322-9688.

MUSIL I., HAMERNÍK J., LEUGNEROVÁ G. *Lesnická dendrologie 1: jehličnaté dřeviny: přehled nahosemenných (i výtrusných) dřevin*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2002. ISBN 80-213-0992-x.

POKORNÝ, R. *Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin*. Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR, c2015. ISBN 978-80-87902-08-0.

POKORNÝ, R., MAREK M. V. *Biologia Plantarum* [online]. 43(4), 537-544 [cit. 2018-04-04]. DOI: 10.1023/A:1002862611176. ISSN 00063134. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1002862611176>

POKORNÝ, R., STOJNIC 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)

POKORNÝ, R., TOMÁŠKOVÁ I., HAVRÁNKOVÁ K. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research* [online]. 2008, 127(5), 359-367 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1007/s10342-008-0212-z. ISSN 1612-4669. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10342-008-0212-z>

POKORNÝ R., ŠPLÍCHALOVÁ L. Srovnání rekonstrukce vybraných porostů náhradních dřevin v Krušných horách clonnou sečí a holosečí. *Proceedings of Central European Silviculture*. 2011, 69-80

ROWIŃSKI, P., RADECKI-PAWLIK A., ed. *Rivers – Physical, Fluvial and Environmental Processes* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [cit. 2018-04-05]. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences. ISBN 978-3-319-17718-2.

SOLBERG S., AAMLID D., TVEITO O. E., LYSTAD S. Increased needlefall and defoliation in Norway spruce induced by warm and dry weather. *Boreal Environment Research* 20: 335–349. 2015. ISSN 1797-2469 (online)

ŠRÁMEK, V., LIŠKA J., HAVRÁNEK F. Současný stav lesních porostů Krušných hor. *Lesnická práce: časopis pro lesnicko-dřevařskou vědu a praxi*. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2016, **95**(8), 6-8. ISSN 0322-9254.

TOMÁŠKOVÁ, I., KUBÁSEK J. *Fyziologie lesních dřevin I.: fyziologie, produkce a stresy rostlin*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin, 2016. ISBN:978-80-213-2608-8.

VACEK, S., HEJCMAN M., SEMELOVÁ V., REMEŠ J., PODRÁZSKÝ V. Effect of soil chemical properties on growth, foliation and nutrition of Norway spruce stand affected by yellowing in the Bohemian Forest Mts., Czech Republic. *European Journal of Forest Research* [online]. 2009, **128**(4), 367-375 [cit. 2018-04-08]. DOI: 10.1007/s10342-009-0272-8. ISSN 1612-4669. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10342-009-0272-8>

WEISS, M., BARET F., SMITH G. J., JONCKHEERE I. a COPPIN P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2004, 121(1-2), 37-53 [cit. 2018-04-04]. DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.08.001. ISSN 01681923. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192303001631>

8.1 Ostatní zdroje:

LI-COR. 2015: LAI-2200C Plant Canopy Analyzer Instruction Manual. LI-COR, Lincoln Nebraska. 258.

Oblastní plán rozvoje lesů – Lesní oblast 01 Krušné hory [online] [cit. 2018-04-08] dostupné z: http://www.uhul.cz/images/ke_stazeni/oprl_oblasti/OPRL-LO01-Krusne_hory.pdf

Typologický klasifikační systém UHÚL – PLÍVA Karel 1987 [online] [cit. 2018-04-08] dostupné z:

http://www.uhul.cz/images/typologie/Typologicky_klasifikacni_system_UHUL_Pliva_1987.pdf

Vývoj defoliace u jehličnanů a listnáčů [online] [cit. 2018-04-08] dostupné z: http://www.vulhm.cz/msl_uroven1

HEMERY, G., Plant a tree for every year of your life. *The New Sylva*, Bloomsbury Publishing, 2014 <https://gabrielhemery.com/plant-a-tree-for-every-year-of-your-life/>