

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav zakládání a péče o lesy

**Index listové plochy solitérů a liniových výsadb dřevin**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016/2017

Tereza Binková

Prohlá-uji, že jsem práci:

*Index listové plochy solitér a liniových výsadeb d evin*

vypracoval/a samostatn a ve-keré poufíté prameny a informace uvádím v seznamu poufíté literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zve ejn na v souladu s § 47b zákona . 111/1998 Sb., o vysokých -kolách a o zm n a dopln ní dal-ích zákon (zákon o vysokých -kolách), ve zn ní pozd j-ích p edpis , a v souladu s platnou Sm rnicí o zve ej ování vysoko-kolských záv re ných prací.

Jsem si v dom/a, že se na moji práci vztahuje zákon . 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brn má právo na uzav ení licen ní smlouvy a ufití této práce jako -kolního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že p ed sepsáním licen ní smlouvy o vyufití díla jinou osobou (subjektem) si vyfládám písemné stanovisko univerzity, že p edm tná licen ní smlouva není v rozporu s oprávn nými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit p ípadný p ísp vek na úhradu náklad spojených se vznikem díla, a to afl do jejich skute né vý-e.

V í í í í í dne í í í í í í í .

## Poděkování

Zde bych ráda poděkovala především své rodině za podporu a pomoc při studiu a dále také vedoucímu mé práce doc. Ing. Radku Pokornému, Ph.D., bez jehož rad a vedení by tato práce nevznikla.

**Autor:** Tereza Binková

**Název bakalářské práce:** Index listové plochy solitérů a liniiových výsadeb d evin

**Title of bachelor thesis:** Leaf area index of solitaires and line plantations

### **Abstrakt**

Bakalářská práce Index listové plochy solitérů a liniiových výsadeb d evin se zabývá zjištěním indexu listové plochy (LAI) u vybraných liniiových společenstev a solitérních stromů přímou a nepřímou metodou. Pro nepřímou metodu zjištění indexu listové plochy byly použity dva přístroje a to: 1) LAI-2000 PCA (LiCor, USA) jako světový standard a 2) LaiPen LP\_100 (PSI, ČR) jako nový obdobný přístroj, který je pro využití v praxi přijatelnější. Jako srovnávací přímá metoda byla využita metoda opadoměr (pop. sběr listů). Cílem práce bylo zhodnotit možnost využití zmíněných přístrojů založených na nepřímých metodách stanovení LAI v případě liniiových společenstev a solitérních stromů v krajině. Z výsledků vyplynulo, že použité nepřímé metody pravděpodobně nejsou pro stanovení LAI u solitérů a liniiových výsadeb d evin vhodné a to především z důvodu velkého vlivu synoptické situace na naměřené hodnoty. Navíc se ukázalo, že ani přímá metoda pomocí opadoměru nedosahuje požadované přesnosti, jelikož množství zachyceného opadu bylo silně ovlivněno sobením v trů. Z těchto závadných důvodů je doporučeno využít pro stanovení LAI u solitérů a liniiových výsadeb d evin jiné přímé, polopřímé i nepřímé metody.

**Klíčová slova:** Index listové plochy, LAI, liniiové společenstvo, opadoměr, solitér

### **Abstract**

Bachelor thesis Leaf area index of solitaires and line plantation deals with the findings of LAI in selected line plantations and solitaires with direct and indirect methods. For indirect method of leaf area index measurement two instruments were used these are: 1) LAI-2000 PCA (LiCor, USA) as a world use standard and 2) LaiPen LP\_100 (PSI, ČR) as a new parallel instrument, which is similar to the one mentioned above, however, more easy to be used in practice. As direct method of comparison method of litter traps was used. The aim of the work was to evaluate if above mentioned instrument based on indirect method are usable to determining LAI of line plantation and solitaires in landscape. The results showed that used indirect methods are probably

not suitable for LAI estimation of solitaires and line plantations mainly because of great influence of synoptic situation. In addition, the selected direct method also does not reach required accuracy, because of influence of wind, which affects the amount of litter in traps. Due to these serious reasons it is recommended to use different direct, semi-direct or indirect methods.

**Keywords:** Leaf area index, LAI, line plantation, litter trap, solitaire

## Obsah

ÚVOD.....	7
CÍL PRÁCE .....	10
1. TEORETICKÁ ÁST .....	11
1.1 ALEJE A SOLITÉRNÍ STROMY V KRAJIN .....	11
1.2 DEFINICE INDEXU LISTOVÉ PLOCHY .....	12
1.3 METODY UR ENÍ INDEXU LISTOVÉ PLOCHY .....	14
1.3.1 P ímé metody .....	14
1.3.2 Polop ímé metody.....	17
1.3.2.1 Alometrické vztahy.....	17
1.3.2.2 Metoda kvadrant ínklinací bod .....	18
1.3.2.3 Langova metoda .....	19
1.3.3 Nep ímé metody .....	20
1.3.3.1 Metoda frakce d r.....	20
1.3.3.2 Vyuffití pozemního laserového skenování .....	24
1.3.3.3 Metoda leteckého laserového skenování .....	25
2. PRAKTICKÁ ÁST .....	27
2.1 VYBRANÉ SOLITÉRY A ALEJE .....	27
2.1.1 Solitéry .....	27
2.1.1.1 Solitér 1 ó Dub letní u obce Dolní T ebonín-Horní T ebonín .....	27
2.1.1.2 Solitér 2 ó Dub zimní u obce Brloh.....	28
2.1.1.3 Solitér 3 ó Lípa velkolistá u obce Brloh .....	29
2.1.1.4 Solitér 4 ó Dub letní u obce V flovatá Plán .....	29
2.1.1.5 Solitér 5 ó Slivo –vestka u obce Kájov-Lazec.....	30
2.1.2 Aleje.....	31
2.1.2.1 Alej 1 ó Topolová alej u obce Vele-ín-Sk ídla .....	31
2.1.2.2 Alej 2 ó Jírovcová alej u obce Bohdalovice-Slavkov .....	33
2.1.2.3 Alej 3 ó Jasanová alej u obce Bohdalovice-statek Bláha.....	33
2.2 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH METOD.....	34
2.3 SYNOPTICKÁ SITUACE.....	35
2.4 METODIKA M ENÍ .....	35
2.5 VÝSLEDKY .....	39
2.6 DISKUZE .....	49
ZÁV R.....	52
SUMMARY .....	54
LITERATURA.....	56
SEZNAM P ÍLOH.....	61

## Úvod

Stromová zele mimo les zaujímá v ČR cca 7,3 % (Cienciala a kol. 2015). Liniová společenstva a solitérní stromy jsou tedy nedílnou součástí naší krajiny a jsou tak pokládány za významné krajinné prvky. Liniová společenstva mají v krajině různou podobu a plní různou úlohu, například zmírňují vodní i vtrnou erozi, čímž pomáhají chránit zemědělský půdní fond nebo tvoří biokoridory propojující biocentra a interakční prvky (ÚSES) a umožňují tak svým prostředím migraci a mnohdy i existenci různých rostlinných a živočišných druhů. Stejně tak solitérní strom může sloužit jako životní prostředí pro různé organismy, čímž zvyšuje ekologickou stabilitu krajiny. Další neméně významnou funkcí liniových společenstev a solitérních stromů je funkce estetická, jelikož i tyto krajinné prvky spoluutvářejí krajinný ráz. Zdravotní stav alejí a solitérních stromů je nutné znát a učit z hlediska plnění jejich funkce v krajině nebo z důvodů bezpečnosti silničního provozu, ochrany obyvatel atd.

Zdravotní stav dřevin nebo jejich jednotlivých orgánů lze hodnotit mnoha různými metodami a postupy a učit z hledisek morfologických, anatomických, fyziologických, bio-chemických nebo bio-fyzikálních, kdy sledujeme vybrané parametry popírající jednotlivé fyziologické procesy v rostlině (fotosyntéza, respirace, transpirace), které odrážejí její zdravotní stav. Příkladem bio-fyzikální metody může být například elektrodiagnostická metoda, která je založena na fotoelektrických prouděch mezi rostoucími stromy a jejich prostředím (Rajda, 1997). Příkladem bio-chemických metod může být stanovení obsahu dusíku, chlorofylu apod. Zdravotní stav rostliny je nutno posuzovat komplexně, nebo nemusí být ve vzájemné relaci v danou chvíli například stav listové plochy.

V současné době se pro hodnocení zdravotního stavu lesních porostů nejvíce využívá jednoduchá morfologická okulární odhadová metoda určení podílu defoliace, která slouží k vylišení stupňů poškození resp. pásem ohrožení lesních porostů (Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 78/1996 Sb., o stanovení pásem ohrožení lesů pod vlivem imisí). Defoliace udává relativní ztrátu asimilačního aparátu vzhledem ke zdravému (stoprocentní listovému) jedinci, který roste v prostředí s obdobnými stanovištními a porostními podmínkami. Přesto, že je odhad procenta defoliace prováděn skupinou zkušených odborníků, je tento postup zatížen subjektivní chybou. Mezi morfologické metody lze zahrnout i zjištění (recipročně k defoliaci) množství neseného asimilačního aparátu (listové, jehličnaté) kvantifikovaného indexem listové plochy (dále

také jako LAI z anglického Leaf Area Index). Ekvivalentem LAI je český termín *ó* pokrývnost listoví. LAI lze stručně definovat jako nesenou listovou plochu stromu i porostu normalizovanou projekční plochou koruny i plochou porostu. Velký potenciál využití tohoto parametru a přístupu k jeho zjištění a ohodnocení zdravotního stavu dřeviny tkví v jednoduchosti a rychlosti jeho stanovení s dostatečnou přesností, nebo jeho hodnoty jsou zjištěny exaktně metodicky daným postupem a přístroji s definovanými vlastnostmi.

Index listové plochy kvantifikuje plochu listoví nesenou dřevinou, nestanovuje však jeho kvalitu. Listoví zaujímá z dřevinných orgánů největší plochu povrchu. Velikost plochy listové dřeviny je až několikrát větší než plocha jejích dřevních částí (Pokorný a Marek, 2000). Listoví je v přímém kontaktu s okolním prostředím. Je centrem fyziologických procesů, jako je fotosyntéza, respirace nebo transpirace (Asner a kol., 2003). Množství listoví odráží spolupůsobení všech faktorů ovlivňujících danou dřevinu. Mezi tyto faktory patří jak mikroklimatické podmínky stanoviště, dostupnost živin v půdě, hydrické poměry stanoviště tak i přítomnost herbivorů (Asner a kol., 2003). LAI je tedy jedním ze způsobů, jak je možné zhodnotit zdravotní stav dřeviny, který se od těchto faktorů odvíjí. Opad (ztráta) listový je mimo ontogenezi dřeva sledkem i složitějšího vlivu různých faktorů, mezi které patří například přítomnost biologických škůdců, kteří svou přítomností narušují vodivá pletiva rostlin, vliv emisí a kyselých dešťů ovlivňujících stanovištní podmínky nebo dlouhodobý vodní deficit způsobený nerovnoměrným rozložením srážek souvisejícím s globální změnou klimatu (Mrkva, 2009).

Zjištění LAI je důležité i v globálním měřítku a to v souvislosti se stavem vegetace a změnou globálního klimatu. Změna klimatu je pravděpodobně způsobena zvýšenou produkcí a vypouštěním tzv. skleníkových plynů do atmosféry. Za hlavního viníka je považován oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), jehož koncentrace v ovzduší v posledních dekádách prudce rostla (University of Michigan, 2016). Dopady klimatické změny v našem prostředí pozorujeme na výskytu klimatických extrémů resp. na odchylkách od dlouhodobých průměrů klimatických charakteristik (např. výskyt vysokých teplot, průsucho, povodňových dešťů, vichřic i orkánů aj.)

V listoví dochází prostřednictvím fotosyntetických procesů, kdy za vstupu  $\text{CO}_2$ , vody a slunečního záření vznikají organické sloučeniny, k fixaci uhlíku. Po opadu listoví je uhlík vázán v půdě, která je také jeho významným uložitelkou (Malhi a kol.



1999). LAI je v současnosti kritickým parametrem modelů vegetačního krytu odpovídajících na globální změnu klimatu (Jonckheere a kol., 2004).

Stejně tak, jako stanovištní podmínky ovlivují množství listový, tak naopak množství listový (a tedy i opadu) ovlivňuje vodní bilanci stanoviště a jeho odtokové poměry, světelné podmínky v nižších úrovních porostu nebo množství organické hmoty v půdě v podobě nadloňního humusu (Pokorný, 2015).

Index listové plochy lze určit různými metodami, které lze dělit do tří základních skupin: 1) přímé metody, 2) polopřímé metody a 3) nepřímé metody. Metoda je volena dle našich preferencí na přesnost, pracnost a rychlost měření, dle požadavků na opakování měření na stejném vzorníku dříve nebo s ohledem na míru zásahu do porostu (Pokorný, 2015). V této práci byly využity dva přístroje využívající metody nepřímé, kdy byl LAI určen pomocí přístrojů LAI-2000 PCA (LiCor, USA) a LaiPen LP\_100 (PSI, ČR), a jedna metoda přímá, kdy stanovení LAI proběhlo pomocí opadoměrů. Nepřímé metody byly vybrány pro jednoduchost a rychlost stanovení hodnot LAI. Díky těmto vlastnostem jsou nepřímé metody vhodné pro zavedení do běžné lesnické praxe. Zatímco přístroj LAI-2000 PCA je považován za světový standard, přístroj LaiPen LP 100 je stále novinkou na trhu. Jeho velkou výhodou je škapesní provedení a cenová dostupnost. Jedním z přínosů této práce je kromě hodnocení LAI soliterních jedinců dříve stromovitého vzrůstu a/nebo jejich liniových společenstev (výsadeb alejí), kterým se zabývá velmi malé množství publikovaných prací, i porovnání výsledků měření těmi přístroji, které byly dosud srovnávány především v lesních porostech.

Vzhledem k tomu, že určení zdravotního stavu pomocí LAI se využívá především v lesních, a často navíc v homogenních, nesmělejších, porostech, spočívá hlavní potenciál této práce v ověření vhodné metodiky zjištění LAI u soliterních stromů a liniových společenstev pomocí v praxi dobře využitelného a dostupného přístroje české výroby.

## Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je nejen shrnutí publikovaných poznatků o indexu listové plochy, metodách jeho určení a popis přístrojů určených k nepřímému stanovení LAI, ale také zhodnocení možnosti jeho využití u solitérních jedinců a alejí (liniových společenstev), vlastní měření pomocí nepřímých metod a následné porovnání přesnosti stanovené hodnoty LAI mezi dvěma přístroji, z nichž jeden je švýcarským standardem a druhý je prakticky upotřebitelnější, s hodnotou získanou přímou metodou pomocí opadoměrů.

## 1. Teoretická část

### 1.1 Aleje a solitérní stromy v krajině

Jak již bylo řečeno v úvodu, liniiová společenstva dřevin a solitérní stromy mají v krajině mnoho různých funkcí. Nejvýznamnějšími z nich jsou zmírňující vodní a vtrněné eroze, zpevnění břehů, zlepšení hygieny flivotního prostředí, zvyšování ekologické stability krajiny a spoluutváření krajinného rázu. Podle funkce a podoby dělíme liniiová společenstva v krajině na aleje (stromořadí), vtrnělá, břehové a doprovodné porosty vodních toků a biokoridory. Liniiová společenstva často plní více ze zmíněných funkcí a tak břehové a doprovodné porosty často bývají biokoridory v ÚSES a podobně. Liniiová společenstva i solitérní stromy pokládáme za ekologicky významné segmenty krajiny a řadíme je tak do kostry ekologické stability území. Zvláštní kategorií solitérních stromů, jejich skupin i stromořadí jsou tzv. špamátne stromy, jež se svou mohutností, vzhledem i jinými ekologickými vlastnostmi vymykají průměru (Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů). Předmětem hodnocení v této práci jsou však solitérní stromy a aleje, které nejsou zařazeny do kategorie špamátne stromů, v rámci liniiových společenstev pak byly méně silně aleje z důvodu jejich snadné dostupnosti a poměrně jednoduché šporostní struktury.

V českých zemích sahá historie vysazování alejí do 16. stol., do období renesance, kdy byly osázeny hráze rybníků a přístupy do letohrádků (M. Hyháňková a kol., 2007). V období baroka (17. a 18. stol.) byly aleje plně využívány jak podél silnic, tak podél významných poutních cest (M. Hyháňková a kol., 2007). Majetní lidé sázeli ulechnilé stromy jako například lípy a duby, naproti tomu chudí lidé sázeli stromy ovocné (Václavová, 2007). Za vlády Marie Terezie a Josefa II. bylo povinností vysazovat kolem cest ovocné stromy, které měli poskytovat kořm i vojákům stín, chránit je před tím, aby je nepřítel upozoroval a na podzim, kdy se vojáci vraceli ze svých cvičení, jim měly poskytnout občerstvení (Václavová, 2007). V 19. stol., kdy dochází k bourání hradeb středověkých měst a jejich expanzi do okolní krajiny, se aleje dostávají i do intravilánu měst (M. Hyháňková a kol., 2007). V současné době je alejím a solitérním stromům přiřkládán menší význam a tak se jejich zastoupení zmenšuje v důsledku neustálého zvyšování nároků člověka na krajinu (stavby a rozšiřování silnic, zvyšování rychlosti provozu na silnicích, intenzifikace zemědělství aj.). Ve státech Evropské unie jsou aleje u dálnic a silnic I. a II. třídy zakázány úplně, současně se zvyšuje požadavek na bezpečnou vzdálenost stromů od vozovky na 4,5 m (SN 73 6101), tak aby stromy

nebyly p ekáfkou silni nímu provozu (M. Hy ha a kol., 2007). P itom práv aleje sloufí k optickému vedení idi , zmír ují pov trností podmínky, jako jsou návaly v tru i sn hu, a chrání p ed osln ním ( SN 73 6101). Zda je tedy tento trend správný, je p edm tem diskuzí.

Vzhledem k tomu, fe se liniová spole enstva a solitérní stromy ásto nacházejí u silnic III. t ídy, u polních cest nebo v intravilánu m st, je d leflité znát jejich zdravotní stav nejen z d vod pln ní jejich funkce v krajin , ale p edev-ím z d vod bezpe nosti provozu i obyvatel. Proto byl pro ú el dal-ího zkoumání vybrán práv index listové plochy, jehofi stanovení je snadné, rychlé a objektivní, jak bylo ov eno v lesních porostech (Pokorný a Marek, 2000). V sou asné dob naproti tomu bohufl neexistuje dostatek údaj , postup m ení a srovnání hodnot LAI pro liniová spole enstva a solitérní stromy. Ú elem této práce je tento nedostatek alespo áste n doplnit.

## 1.2 Definice indexu listové plochy

Index listové plochy je morfologickým parametrem, pomocí kterého m fme stanovit zdravotní stav d evin nebo porost . Jeho hlavní výhodou je, fe stanovení LAI je rychlé, snadné a objektivní. Poprvé byl index listové plochy definován Watsonem (1947) jako celková jednostranná plocha fotosyntetizující tkán na jednotku plochy povrchu kryté p dy. Tuto definici lze bez problém vyuffít u plochých list listnatých d evin, proto fe ob strany listu mají stejnou plochu. V p ípad , fe listy nejsou rovné a ploché, ale svra-t lé, sto ené i ohnuté, není jifi pojem šjednostranná plocha o tak jasný (Jonckheere a kol., 2004). K tomuto problému dochází i u jehli natých d evin. Jehlice se totiž vyzna ují složitým tvarem a m nícím se p í ným pr ezem, který se odvíjí od umíst ní jehlice v rámci koruny a jejího stá í (Homolová a kol., 2013; Pokorný, 2015). Z tohoto d vodu n kte í auto i navrhovali vyuffítvat pro výpo et a srovnání hodnot LAI projek ní listovou plochu, která by zanedbávala nepravidelné tvary list a jehlic. P i ur ování listové plochy tímto zp sobem je rozhodující zvolený projek ní úhel a je nutné mít na pam ti, fe ásto vyuffíváné kolmé promítání do horizontální roviny nezaru uje stanovení skute né i maximální hodnoty LAI (Jonckheere a kol., 2004). Myneni a kol. (1997) definovali LAI jako maximální projek ní plochu listoví na jednotku povrchu. Na druhé stran Lang (1991) a Chen a Black (1992) definují index listové plochy jako polovinu celkové plochy listoví na jednotku povrchu. Tato definice stanovení LAI je pro jehlice p ijateln j-í, nebo je srovnatelná s projek ní plochou plochých list . Významným argumentem také je, fe zatím co projek ní LAI má spí-e fyzikální

význam, stanovení indexu listové plochy na základě zjištění celkové plochy povrchu listovní má vypovídající hodnotu jak ve fyzikálním (zachycení světla) tak i biologickém smyslu (výměna plynů; Jonckheere a kol., 2004). Celková plocha povrchu jehlic a listů se často přepočítává právě z projekční plochy užitím konverzního faktoru, který se pohybuje v rozptýlení od 2 pro ploché listy do 3,14 pro jehlice s kruhovým průřezem (Waring, 1983) a 4 v případě jehlice nabývající tvaru pířímého průřezu (Homolová a kol., 2013).

Vzhledem k tomu, že LAI můžeme zjednodušeně definovat jako plochu listovní normalizovanou plochou povrchu, je zřejmé, že jednotkou LAI je  $m^2/m^2$  nebo ha/ha. Jedná se tedy o víceměrnou bezrozměrnou veličinu (Pokorný, 2002). Díky této vlastnosti můžeme index listové plochy analyzovat a srovnávat v různých prostorových měřítkách, od jednotlivých stromů až po biomy (Asner a kol., 2003). Normalizační jednotkovou plochou, ke které LAI vztahujeme, může být jak celá plocha porostu, tak plocha zastíněná projekcí koruny do horizontální roviny nebo plocha průřezu koruny v určité výšce (Pokorný, 2002).

V současné literatuře se index listové plochy nejčastěji objevuje ve čtyřech základních pojetích a to jako: 1) celková plocha listovní (Total LAI, LAIt), 2) polovina celkové plochy listovní (one-sided LAI, hemi-surface LAI nebo jen LAI), 3) kolmá projekční plocha listovní (projected LAI, LAIp) a 4) nakloněná projekční plocha, která bere v úvahu úhel nasazení jehlice/listovní v rámci letorostu (inklinaci, naklonění; Inclined projected LAI). Nejčastěji je LAI stanoven pomocí definice 2 a/nebo 3 (Asner a kol., 2003). Právě nejednotné určení indexu listové plochy komplikuje jeho využití a možnost jeho porovnání (Asner a kol., 2003). Hodnota LAI je navíc závislá nejen na podmínkách prostředí a na druhu dřeviny, ale také na způsobech obhospodávání porostu (Jonckheere a kol., 2004).

Schulze (1982) mluví za to, že se hodnoty LAI budou ve většině biómů (kromě tundry a pouští) pohybovat v rozmezí 3 až 19. Beadle (1993) prezentoval hodnoty pro opadavé lesy mezi 6 a 8, pro jednoleté plodiny hodnoty od 2 do 4. Vysoké hodnoty indexu listové plochy byly zaznamenány v boreálních jehličnatých lesích, kde LAI dosahoval hodnot až 21,6 (Asner a kol., 2003). Asner a kol. (2003) ve své studii uvádí jako nejvyšší naměřenou hodnotu LAI 47,0, která byla naměřena v temperátních stálezelených jehličnatých lesích.

Tak jako existuje více různých definic LAI, které se liší především v určení plochy listů, která bude využita pro jeho výpočet, existuje také mnoho metod jeho stanovení.

## 1.3 Metody určení indexu listové plochy

Index listové plochy můžeme stanovit metodami, které lze rozdělit do tří následujících kategorií: 1) metody přímé, 2) metody polopřímé a 3) metody nepřímé. Výběr metody závisí na požadované přesnosti, pracnosti a rychlosti měření, na možnostech zásahů do porostů, na požadavcích na opakování měření na stejné ploše a také na dostupnosti příslušného vybavení, finančních prostředků aj. (Pokorný, 2000).

### 1.3.1 Přímé metody

Využitím metod přímých lze získat nejpreciznější hodnoty LAI. Tyto metody jsou však pracné, časově náročné a nelze je využít ve velkých měřítkách (Jonckheere a kol., 2004). Dalším nedostatek těchto metod je, že měření zpravidla nelze opakovat na stejném vzorníku dřevin, čímž je znemožněno zachycení vývoje LAI v čase. Přímé metody stanovení LAI uplatujeme spíše u listnatých dřevin (Pokorný, 2002). Pro velkou přesnost měření jsou tyto metody využívány ke kalibraci metod nepřímých (Jonckheere a kol., 2004).

Principem přímých metod je destrukce v tví, části nebo celého stromu popřípadě skupiny stromů a následné odlistění (Pokorný, 2015). Destrukci provádíme buď na části zvoleného stanoviště, za předpokladu, že porost je homogenní, anebo tímž způsobem jednotlivé reprezentativní stromy. V případě, že LAI zjistíme u starých a řídkých porostů, je vhodné využít metodu reprezentativních stromů, která je k lesním porostům etrnější. U stejnových porostů se udává jako dostatečný počet vzorníkových stromů 3 až 5. Při použití této metody je listová plocha měřena pro každý list zvlášť resp. zvlášť pro vybranou skupinu listů / jehlic obdobných parametrů a vlastností a zároveň je zjišťována jejich hmotnost i vertikální rozložení v koruně (Jonckheere a kol., 2004).

Další přímou metodou, kterou můžeme použít v listnatých porostech je metoda opadoměrů. Tato metoda není destruktivní, její princip spoívá ve sběru opadu listů v podzimních měsících do sběrných nádob tzv. opadoměrů. Opadoměry mají předem definované rozměry resp. zachytnou plochu, jsou konstruovány tak, aby umožnily proudění vzduchu za účelem zpomalení rozkladu, jsou proto umístěny v porostu zpravidla nad povrchem půdy (Jonckheere a kol., 2004). Rozmístění může být buď náhodné (McShane a kol., 1993) anebo systematické (Dufrêne a Bréda, 1995). Volba rozmístění se odvíjí od struktury porostu, homogenity, předpokládané převládající rychlosti a směru vtrhu, dostupného počtu sběrných nádob a kapacit na vyhodnocení.

ím v t-í je hustota opadom r v porostu, tím lépe je dosaženo předpokladu, že opad zachycený opadom rem je reprezentativní pro celé stanoviště a stanovení LAI je tedy přesnější (Jonckheere a kol., 2004). Tento postup stanovení LAI je méně náročný, není však použitelný pro porosty stálezelených dřevin, ve kterých podzimní opad listů neodpovídá akumulaci biomasy v průběhu roku, ale je ovlivněn životností listů a klimatickými podmínkami (Chen a kol., 1997). Problém nastává i u dřevin, které dokážou obnovovat asimilační aparát v průběhu roku. Mezi tyto dřeviny patří například topoly. V tomto případě dochází k nadhodnocení hodnoty LAI. Další nevýhodou metody opadom r oproti ostatním přímým metodám je fakt, že při jejím použití nezískáme informaci o vertikálním rozložení listů v koruně (Jonckheere a kol., 2004).

Po sběru listů do opadom r je nutné změřit jeho plochu. Tu můžeme pro jednotlivé listy zjistit pomocí planimetrických nebo gravimetrických technik. Planimetrická metoda je založena na principu závislosti mezi plochou jednotlivého listu a plochou pokrytou tímto listem v horizontální rovině. List je tedy vodorovně připevněn na podložku a pomocí planimetru je změřen jeho průměr a následně vypočtena jeho plocha. Na trhu existuje mnoho planimetrů založených na různých principech měření. Jedním z nich je například snímací planimetr Li-3000 (LieCor, Nebraska), který využívá metodu pravoúhlého promítání. Další přístroj, Li-3100 (LieCor, Nebraska), měří průměr pomocí fluorescenčního zdroje světla a polovodičové snímací kamery. Přenosný snímací planimetr CI-201 (Delta-T devices, Cambridge) kóduje délku listu pomocí kódové tečky. Mimo snímací planimetry existují planimetry založené na systému analyzujícího obrazu videa. Tyto planimetry se skládají z video kamery, digitalizačního rámu, monitoru a počítačového softwaru určeného k analýze dat. Příkladem tohoto planimetru je Decagon Ag Vision System (Decagon devices, Inc, Pullman, USA; Jonckheere a kol., 2004). V současnosti je možné pro stanovení plochy listů a jehlic využít klasické skenery. V případě jehlic, kdy skener neumí ujet horní osvětlení, je ovšem nutné dbát na jejich vhodné rozložení na ploše skeneru, které by mělo být kolmé k snímací hlavě skeneru tak, aby při jejím pohybu byl eliminován vznik stínů, které jsou v procesu dalšího zpracování dat téměř odstranitelné. Z tohoto hlediska je vhodné využít právě skener s horním nasvícením. Tyto skenery jsou však dražší a snímaná plocha je poměrně malá. Vyhodnocení plochy listů se následně vypočítává jako násobek početných pixelů a jejich velikosti, která je závislá na zvoleném stupni rozlišení (dpi).

Gravimetrické metody jsou založeny na poměru mezi hmotnostmi vysušených listů nebo jehlic a jejich plochou. K tomu se využívá takzvaná LMA (Leaf mass per area) nebo SLA (Specific leaf area; Pokorný, 2002). Postup je následující: z listů, které chceme zkoumat, odebereme několik listů nebo jehlic, u kterých pomocí výše zmíněných planimetrických technik, popřípadě pomocí skeneru, zjistíme jejich plochu. Následně vzorek vysušíme při teplotách 80 až 105 °C afdosáhneme konstantní hmotnosti a následně změříme (při nižších teplotách v listech zůstává vázaná voda). Hmotnost vzorku následně podělíme plochou listu a získáme LMA (Jonckheere a kol., 2004) jejíž jednotkou je  $\text{g}/\text{cm}^2$ . SLA je převrácenou hodnotou LMA (Pokorný, 2002). Vzhledem k tomu, že v koruně stromu se nacházejí dva typy listů nebo jehlic (slunné a stinné) s rozdílnými vlastnostmi, je důležité před výběrem listů pro stanovení LMA (SLA) obsah opadomru důkladně promíchat tak, aby ve výsledku byl tento fakt zohledněn (Jonckheere a kol., 2004). Celkovou plochu listů zjistíme tak, že zbytek obsahu opadomru (resp. sebíraného materiálu) vysušíme na konstantní hmotnost a výsledek vynásobíme SLA. LAI získáme jako podíl celkové plochy listů a plochy, ke které LAI vztahujeme, v případě využití metody opadomru je touto plochou záchytná plocha opadomru. Tímto způsobem lze určit SLA a tedy i LAI celého stromu nebo jen jeho části, v terénu, nebo přesně (Pokorný, 2002).

Bohužel ani definování SLA není v literatuře jednotné. Například Norman a Campbell (1989) stanovují SLA jako podíl plochy jehlic a listů ku jejich suché hmotnosti. Vzhledem k tomu, že i po odstranění asimilačních orgánů z rostliny v nich probíhají fyziologické procesy, jako je například respirace, dochází nejen ke ztrátám vody ale i  $\text{CO}_2$  a tím pádem i k úbytku hmotnosti, je nutné vzorky změřit co nejrychleji po odebrání nebo zamezit ztrátám vody uchováním ve zmrazeném stavu i v mikrotenových sáčkách (Norman a Campbell, 1989). Další postupem stanovení SLA je jeho určení pomocí podílu plochy vysušených listů a jehlic ku jejich suché hmotnosti, jak to uvádí například Dean a Long (1986). Při využití tohoto postupu ke stanovení SLA musíme mít ovšem na paměti, že podíl plochy jehlic se může změnit až o 25% (Waring a kol., 1982).

Výhodou přímých metod je to, že lze sledovat nejen plochu listů a jehlic, ale také jejich tvar, úhel jejich nasazení a umístění v rámci koruny (Pokorný, 2002). Jak již bylo zmíněno, přímé metody jsou považovány za nejlepší, přičemž maximální chyba stanovení je asi  $\pm 10\%$  (Těsták a kol., 1966).



A koli je stanovení pomocí p ímých metod nejp esn j-í, jejich pracnost a asová náro nost p edev-ím v neopadavých porostech je limitující. Proto se v praxi dává p ednost polop ímým a nep ímým metodám.

### 1.3.2 Polop ímé metody

Polop ímé metody jsou mén náro né neř metody p ímé, stále v-ak vyřadují p ímý kontakt s rostlinou (Pokorný, 2002). Nap íklad Jonckheere a kol. (2003) adí polop ímé metody do skupiny metod p ímých kontaktních. Mezi nejvýznamn j-í polop ímé metody pat í ur ování LAI pomocí alometrických vztah , Wilsonova (1963) metoda kvadrant inklinací bod nebo Langova (1973) metoda digitálních sou adnic (Pokorný, 2002).

#### 1.3.2.1 Alometrické vztahy

Jednou z polop ímých metod, kterou je mořno stanovit LAI je metoda alometrických vztah , která je zalořena na závislosti mezi nesenou listovou plochou a jinými snadno m ěitelnými zpravidla dendrometrickými veli inami stromu, jako je tlou-ka kmene ve vý etní vý-ě (1,3 m nad patou kmene) nebo na bázi koruny, velikost ěi pr m t koruny nebo plocha aktivní vodivé ásti b le apod. (Pokorný, 2002). Vztah mezi listovou plochou a vodivou ástí b le je zalořen na teorii tzv. pipe-modelu, která íká, ře pro plnohodnotné fungování ur ítého mnořství listoví je pot eba ur ítého mnořství fyziologicky aktivních cév v p íném pr ezu kmene nebo v tve (Dvo řák a kol., 1996). Tento vztah je ovlivn n propustností vodivé ásti b le, gradientem vodního potenciálu v kmeni, délkou kmene, pr m rným deficitem vodní páry v ovzdu-í, pr duchovou vodivostí a dal-ími faktory závislými na teplot (Coyea a Margolis, 1992). Mnořství listoví neseného rostlinou je fyziologicky limitováno vý-kou rostliny, kdy p i dosaření maximální vý-ky stromu se sniřuje objem listoví v d sledku kavitace v cévách (Ryan a kol., 2000). Vyřítí vztah mezi listovou plochou a plochou vodivé ásti b le je u n kterých druh d evin komplikováno nez etelnou hranicí mezi b lí a jádrovým d evem. Tato metoda není vhodná v chrán ěných územích, kde je zásah do porostu nep ípustný (Jonckheere a kol., 2004).

Pro vyřítí alometrických vztah je nutné nejprve tyto vztahy odvodit pouřítím n které z metod p ímých. Dále je také t eba vzít v úvahu fakt, ře po p stebním zásahu v porostu, p i hnojení porostu nebo jen s v kem stromu se dendrometrické veli iny a plocha listoví vyřívá odli-n a je tedy nutné opakovat odvození t chto závislostí pomocí

přímé metody. Velký vliv na vztah mezi dendrometrickými veličinami a plochou listoví mají také podmínky prostředí. Tyto vztahy jsou tedy specifické pro jednotlivé stromy a porosty (Pokorný, 2002).

Vose a kol. (1994) definovali obecnou rovnici pro alometrické vztahy jako:

$$\ln Y = \ln A + b \ln X + \ln E, \quad (1)$$

kde  $Y$  vyjadřuje plochu nebo hmotnost listoví jednotlivého stromu,  $X$  korelující dendrometrickou veličinu, například vodivou plochu kmenu,  $A$  a  $b$  jsou parametry získané z dat,  $E$  znázorňuje nahodilou chybu (Pokorný, 2002). Alometrické rovnice však mohou být jak lineární tak nelineární a závisí na tom, jaká nejvýš závislost byla nalezena uvnitř naměřených dat (Čermák a kol., 1998).

Za nejvýhodnější dendrometrické veličiny pro stanovení LAI pomocí alometrických vztahů jsou považovány plocha vodivé části kmenu a průměr kmene na bázi koruny (Geron a Ruark, 1988). Vyuffitím alometrických vztahů měříme nejen plochu listoví, ale také v tví nebo kmene. Chyba při vyuffití této metody určení LAI se pohybuje mezi 6 a 9 % (Penner a Deblone, 1996). Tato metoda stanovení LAI je díky svému nedestruktivnímu charakteru dobře vyuffitelná v lesních porostech a lze s ní stanovit LAI i pro větší množství zkoumaných stromů (Pokorný, 2002).

### 1.3.2.2 Metoda kvadrant inklinací bod

Další polopřímou metodou, pomocí které lze určit LAI je metoda kvadrant inklinací bod (IPQ – z anglického inclined point-quadrat method) nebo také bodová-dotyková metoda, která je založena na principu přechodu sondy s ostrým hrotem korunovou vrstvou (nebo vrstvou prvního opadu na zemi) a na vyfocení po tomto dotyku listů s hrotem (stanovení tzv. kontaktního úhlu). Sonda je korunou vedena pod určitým inklinací a azimutálním úhlem, přičemž inklinací úhel je úhel mezi osou sondy a vertikálou (Pokorný, 2002). Později byla sonda s ostrým hrotem nahrazena –eterní sondou skládající se ze zdroje světla, fotocely a detektoru zaznamenávajícího odraz světla od listu, který se nacházel v blízkosti sondy (Caldwell a kol., 1983). Na nejvhodnějším inklinací úhlu sondy, s ohledem na tvar a postavení listů, se autoři neshodli a uvádějí tak různé hodnoty, například Ross (1981) uvádí úhel 57,3°, Waren a Wilson (1963) úhel 57,5° a Black a kol. (1991) udávají úhel 62°. Tyto hodnoty inklinací úhlu byly nalezeny modelací průměrné projekce listů rozličného tvaru. Tyto inklinací úhly by měly zabezpečit to, že průměrné kontaktní číslo bude relativně nezávislé na úhlovém postavení listů v koruně (Pokorný, 2002). Práv inklinací úhel

udává vliv struktury koruny na počet dotyků listoví a sondy (Jonckheere a kol., 2004). Index listové plochy lze touto metodou vypočítat podle rovnice Normana a Campbella (1989):

$$LAI = 1,1 * N(57^\circ) \quad (2)$$

kde  $N(57^\circ)$  vyjadřuje počet kontaktů sondy při pronikání do korunové vrstvy pod úhlem  $57^\circ$ . Vhodnějšího stanovení LAI docílíme při opakovaném snícení hrotu sondy ve vegetačním krytu při různých výškových úhlech. Obecnou rovnicí pro výpočet LAI je potom:

$$LAI = N_i / K_i \quad (3)$$

kde  $N_i$  je počet kontaktů mezi listovím a hrotem sondy v určité výšce  $i$  a  $K_i$  je extinkční koeficient ve výšce  $i$  (Jonckheere a kol., 2004).

Díky nedestruktivnímu charakteru této metody není nezbytný předpoklad náhodného rozložení listoví ve vegetačním krytu. Naopak mezi nevýhody této metody patří nutnost velkého počtu prolomení koruny sondou, aby bylo dosaženo spolehlivé přesnosti. Počet měření zpravidla dosahuje alespoň 1000 prolomení. Sběr dat je tedy velmi náročný. Další nevýhodou je, že tato metoda není vhodná pro porosty s korunami vyšími než 1,5m a to z důvodu délky hrotu sondy. Tento problém ovšem je nahrazení hrotu sondy laserovým paprskem (Vanderbilt a kol., 1979), jak je tomu u pozemního laserového skenování. Z těchto důvodů je dnes tato metoda na ústupu.

### 1.3.2.3 Langova metoda

Za zmínku stojí i dnes již málo využívaná Langova metoda. A kolikrát je auto i tuto metodu určení indexu listové plochy považují za metodu primární, zaslouží si být pro svou eleganci a rychlost měření zařazena do metod poloprimárních. Metoda využívá přístroj, který vynalezl právě Lang (Norman a Campbell, 1989). Jedná se o ultrapřesný potenciometr, který zaznamenává úhly pomocí tří ramen a tím umožní měření v kartézské soustavě souřadnic. Díky tomu dostáváme přesné určení jakéhokoli bodu listoví. Pokud zaměříme vhodné množství bodů na daném listu, můžeme přímo určit jeho polohu, azimutální a inklinací úhel a plochu trojúhelníku, který je ohraničen těmi ze zaměřených bodů. Tato metoda je vhodná pro určení struktury korunové vrstvy a pro testování metod nepřímých, jejichž popis následuje (Norman a Campbell, 1989).

### 1.3.3 Nepřímé metody

Nepřímými metodami nazýváme zpravidla metody optické, které jsou založeny na principu zachytu nebo odrazu světla v korunové vrstvě (Pokorný, 2002). Tyto metody jsou často vyvíjeny pro svou nenáročnost a rychlost. Metody rozdělujeme podle čtyř hlavních principů. Prvním z nich je stanovení LAI pomocí transmitance, kdy zjistíme poměr mezi intenzitou slunečního záření procházejícího korunovou vrstvou a intenzitou sluneční radiace dopadající na povrch korun. Další způsob je založen na stanovení pravděpodobnosti zachytu slunečního záření korunovou vrstvou. Tento způsob určení LAI nazýváme metodou frakce d r, popřípadě metodou mezernatosti. Třetí princip, tzv. spektrální metody, jsou založeny na zachytu a odrazu určitých vlnových délek při interakci slunečního záření s korunovou vrstvou. Poslední způsob stanovení LAI nepřímými metodami využívá laserových paprsků, pomocí kterých se vytvoří trojrozměrný obraz korunové vrstvy (Pokorný, 2002).

#### 1.3.3.1 Metoda frakce d r

Tuto metodu lze využít jak v monokulturách a smíšených porostech, tak i u jednotlivých izolovaných stromů avšak nejvhodnější je její využití právě v zapojených stejnorodých porostech. Opět se zde objevuje předpoklad náhodného rozmístění listů v koruně (Norman a Campbell, 1989).

Pro měření frakce d r bylo vyvinuto mnoho přístrojů. Zatím co některé, například Digital Plant Canopy Imager CI 100, MVI (Kucharik a kol., 1997), využívají pro stanovení LAI analytické metody, jiné LAI určují porovnáním hodnot intenzity slunečního záření dopadajícího na korunovou vrstvu a pod korunovou vrstvou. Mezi tyto přístroje patří například Accupar, Demon nebo Licor LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Jonckheere a kol., 2004). Poslední jmenovaný přístroj byl využit i měření dat do této bakalářské práce.

Základní optického senzoru tohoto přístroje je  $148^\circ$  v zenitálním úhlu a  $360^\circ$  v azimutálním, a lze jej zastínit proti různými restryktory, eliminujícími například vliv měření jiných předmětů v okolí na výslednou hodnotu LAI (LI-COR, 2009). Tento přístroj měří frakci d r v oblasti modrého světla (vlnové délky 400-490 nm) pomocí koncentrickými kroužky o úhlových výšcích ve směru zenitálním, a to konkrétně v rozptí (pro 1-5 kroužek):  $0-13^\circ$ ,  $16-28^\circ$ ,  $32-43^\circ$ ,  $47-58^\circ$  a  $61-74^\circ$  (Pokorný a Marek, 2000). Pokorný a Marek (2000) měření ve smrkovém porostu zjistili, že v závislosti

na těchto úhlových teních spolu s měřením se poměrem mezi listovou a dlevní plochou dochází k rozdílnému podhodnocování hodnot LAI a to až o 40 %. Zároveň zjistili, že hodnota efektivního LAI (přímý produkt přístroje) roste s klesajícím úhlem zábru senzoru přístroje. Podhodnocení LAI lze tedy nejlépe eliminovat omezením úhlového zábru senzoru odstraněním 4-5 kroužků (tj. úhlového rozpětí senzoru 47°-74° v blízkosti horizontální roviny). Nejlepší hodnoty jsou získány při dosažení dostatečné hustoty měření v úhlovém rozpětí 0-13°, kdy se dostáváme až na 97,5 % přesnosti určení efektivního LAI (Pokorný a Marek, 2000).

Druhý použitý přístroj LaiPen LP 100 (PSI, ČR) funguje na stejném principu, tedy zaznamenává hodnoty slunečního záření v rozmezí vlnových délek 400 až 500 nm. Navíc dokáže dále integrovaným měřidlem zaznamenávat i hodnoty fotosynteticky aktivního záření v rozmezí 400-700 nm. Měřidlo pro stanovení LAI je ukryto ve vnitřku a jeho záběr je 16° v horizontální rovině a 112° v rovině vertikální. Tímto přístrojem lze také měřit intenzitu záření v pěti omezených zenitálních úhlech a to 0°, 16°, 32°, 48° a 64°. Hodnoty jsou zaznamenávány automaticky při dosažení požadované polohy. Přístroj je vybaven integrovanou elektronickou libelou a zvukovou signalizací, která napomáhá dosažení správné polohy přístroje. Při dosažení správné polohy je nastavený a zaznamenaný parametr uložení do paměti přístroje. Pro měření lze využít dva přístroje zároveň, kdy jeden automaticky snímá hodnoty na volné ploše ve zvoleném intervalu, zatímco druhý přístroj zaznamenává hodnoty podkorunových tení. Pro následný výpočet LAI jsou hodnoty spárovány, kdy jsou použity časově integrované průměry referenčních tení (tení na volné ploše; PSI, 2015).

Pro tyto přístroje platí teoretický předpoklad: 1) listové je rovinné těleso, které zachycuje veškeré světlo, které se k němu dostává, 2) objekty, které blokují průchod slunečního záření, jsou v korunové vrstvě rozmístěny náhodně, 3) rostlinné části mají stejnou projekci jako jednoduché geometrické konvexní obrazce a 4) rostlinné části jsou v porovnání s plochou měřidla malé (Pokorný a Marek, 2000; Jonckheere a kol., 2004). V tomto případě odpovídá efektivní LAI zjištěná přístrojem LAI, kdy je korekční faktor, který lze označit za stanovení korekční faktor reflektující jak vzájemný překryv jehlic v rámci letorostu, v tčve, přičeslen tak podíl dlevní v zábru senzoru (Chen a kol., 1991).

Dalším způsobem jak určit LAI pomocí metody frakce dlevní je využití hemisférické fotografie nebo TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies, 3rd Wave

Engineering, Kanada), který pracuje nejen s frakcí  $d_r$  ale také s jejich fyzikálními parametry (Leblanc a kol., 2002; Jonckheere a kol., 2003).

Práv fyzikální rozměry  $d_r$  kvantifikují dopady určitého nenáhodného rozmístění listů v koruně. Index nahluení, který získáme použitím TRAC mžeme využít k přepočtu efektivního LAI na hodnotu LAI. TRAC využívá slunečního paprsku jako sondy a pomocí tří na světlo citlivých senzorů zaznamenává průchod primárního a difuzního světla o vysoké frekvenci korunovou vrstvou (Jonckheere a kol., 2004). Chen a kol. (1997) doporučují tuto metodu využít ke stanovení schématu prostorového rozmístění listů v koruně, zatímco LAI-2000 k určení úhlového rozmístění listů. Pro přesné zhodnocení korunové vrstvy doporučují kombinaci obou těchto přístrojů, kdy efektivní LAI je měřena přístrojem LAI-2000 a následně přepočítána na LAI pomocí indexu nahluení získaného pomocí TRAC.

Teoretické základy využití hemisférické fotografie pro výpočet primární a nepřímé radiace korunovou vrstvou popsal Anderson (1964). Hemisférická fotografie musí být pořízena širokouhlým objektivem, aby nedošlo ke zkreslení plochy ve větších zenitálních úhlech záběru. Úhlová záběra pořízených fotografií je  $180^\circ$ . Fotografie mohou být pořízeny jak pohledem zdola nahoru tak i opačně. V prvním případě je podkladem fotografií obloha, v případě druhém pak spodní povrch (Pokorný, 2002). Kvůli snadnějšímu provedení jsou zpravidla pořízeny fotografie směrem ze zdola nahoru, ovšem v případě, že průměrná výška je nízká a hustě zapojený porost, využívá se opačný přístup. Výhodou fotografování směrem ze shora dolů je lepší prostorová reprezentace porostu se zvyšující se vzdáleností fotoaparátu od korunové vrstvy. Vzdálenost však nikdy nesmí přesáhnout hranici, kdy by jednotlivé části koruny nebyly zřetelné (Jonckheere a kol., 2004).

Frakce  $d_r$  se pak stanoví jako plocha pozadí fotografií v soustředných kruzích o poloměru daných zenitálními úhly, průměrný stěd kruhu je zároveň středem fotografie. V případě, že je mezi listovím a pozadím dostatečný kontrast, lze zjištění plochy automatizovat (Pokorný, 2002). Další výhodou použití tzv. rybího oka je, že lze frakci  $d_r$  stanovit ve všech úhlech pohledu, což zvyšuje přesnost stanovení LAI. Hemisférickou fotografii lze použít i v nepřehledném terénu. Výhodou této metody je, že nám poskytuje trvalý záznam, ze kterého lze určit hustotu, velikost a rozmístění  $d_r$  v rámci koruny. Mžeme tak zachytit stanoviště, druhové i vlnkové rozdílnosti korunové vrstvy. Mnozí autoři, například Chan a kol. (1986), využívají k získání LAI automatické snímání fotografií a převrácený Poissonův model. I při této metodě dochází

k podhodnocování LAI. To může být zapříčineno, kromě již výše zmíněných důvodů, dobou expozice a nastavenou citlivostí.

S nástupem nových moderních a cenově dostupných technologií, jako jsou například filmové skenery nebo kamery, a s výkonnějším počítačovým zázemím jsou tyto digitální technologie stále více využívány k analýze hemisférických fotografií. Jedná se tedy o rychlou, snadnou a dostupnou metodu, jejíž využitelnost je ověřena jak pro boreální lesy (Chen a kol., 1997), evropské opadavé lesy (Dufrêne a Bréda, 1995) i pro smíšené lesy (Comeau a kol., 1998; Jockheere a kol., 2004). Z výzkumu Planchaise a Pontailera (1999), kteří porovnávali výsledky určení frakce dřevní hmoty pomocí LAI-2000 a hemisférickou fotografií vyplývá, že obě tyto metody vedou ke stejnému výsledku. Van Gardingen a kol. (1999) zpevnili stanovení LAI tím, že mezikruží mezi jednotlivými zenitálními úhly rozdělili do menších segmentů. Pro tyto segmenty vypočítaly frakci dřevní hmoty a následně určily průměrný logaritmus pro celé mezikruží. Tento způsob výpočtu redukuje podhodnocování LAI, jak bylo ověřeno přímou metodou, a to z 50 % na 15 % (Jonckheere a kol., 2004).

Aby byl eliminován vliv vztupu na pořízení fotografie, je vhodné fotografii pořízovat rychlostí vztupu nejlépe 1/125 sekundy. Doporučuje se také, aby byl daný vzorek zachycen v různých expozicích. Chen a kol. (1991) má za to, že pokud bude hemisférická fotografie pořízena s vhodnou expozicí, bude stanovení efektivního LAI přesnější než s použitím LAI-2000. Největším problémem je nastavení vhodné hodnoty jasů, aby bylo možné dobře rozeznat listovou plochu od oblohy a vytvořit tak binární obraz. K vyhodnocování hemisférických fotografií bylo vyvinuto mnoho programů, například Hemiview (Delta-T Device), WinSCANOPY (Regent, Rich et al., 1993), které předpokládají, že fotografie byla pořízena s měřítkem a podkladem je tedy obloha. Vzhledem k tomu, že tento postup se skládá z několika dílčích částí, dochází často k akumulaci chyb, které mohou mít ve výsledku zásadní význam (Jonckheere a kol., 2004).

Metoda frakce dřevní hmoty je charakteristická tím, že neodlišuje listoví od ostatních částí korunové vrstvy, jako jsou větve, květy, plody nebo kmen. V tomto případě pak nehovoříme o LAI, ale o VAI (Vegetation area index; Fassnacht et al., 1994), PAI (Plant area index; Neumann et al., 1989) nebo o efektivním LAIe (Chen a Black, 1992). Pro zjištění hodnoty LAI je tedy nutné použít korekční koeficient nebo měření opakovat a zjistit podíl povrchu dřevních částí - WAI (Woody area index) a ten následně odečíst od VAI, PAI nebo LAIe. WAI zjistíme měřením stromu i porostu

v období, kdy je bez listů a průchod světla je oslabován pouze dlevní částí korunové vrstvy (Caldwell a kol., 1983; Caldwell a kol., 1983b).

Pro určení LAI metodou mezernatosti je také důležitý vztah mezi frakcí světla a strukturou koruny nebo porostu, do které je zahrnuta velikost, tvar, rozmístění a orientace rostlinných orgánů (Norman and Campbell, 1989). Tento vztah je odvozený z extinkčních modelů, které spojují LAI a vliv struktury koruny na průchod světla korunovou vrstvou. V případě hemisférické fotografie můžeme frakci světla jako funkci zenitálního úhlu definovat takto (Jonckheer a kol., 2003):

$$T(\theta, \phi) = P_s / (P_s + P_{ns}) \quad (4)$$

kde  $T(\theta, \phi)$  je frakce světla pro oblast vymezenou zenitálním úhlem  $\theta$  a azimutálním úhlem  $\phi$ ,  $P_s$  je počet pixelů zobrazujících oblohu v dané oblasti a  $P_{ns}$  je počet pixelů zobrazujících vegetaci ve stejné oblasti (Jonckheer a kol., 2003).

Extinkční modely popisují pravděpodobnost zachycení světla korunovou vrstvou a pravděpodobnost výskytu prosvitů na spodní hraně korunové vrstvy. V případě, že hledíme do korunové vrstvy ve směru přímých slunečních paprsků, korespondují prosvitů s mezerami v listoví. Předpokládáme-li, že listy jsou v koruně uspořádány náhodně, vyúslováváme ke stanovení frakce světla Poissonův model, který rozděljuje korunovou vrstvu do dostatečně tenkých vrstev tak, že pravděpodobnost kontaktů mezi přicházejícím paprskem a vegetací bude v rámci vrstvy v tiché nezávislosti v porovnání s pravděpodobností, že mezi vegetací a paprskem bude jen jeden dotyk (Jonckheer a kol., 2004). Frakce světla, nebo pravděpodobnost, že paprsek projde vegetací, je dána rovnicí (Neumann a kol., 1989):

$$P_0(\theta) = \exp(-G(\theta, \alpha) * LAI / \mu) \quad (5)$$

kde  $P_0(\theta)$  je frakce světla v zenitálním úhlu  $\theta$ ,  $\phi$  je azimutální úhel listů,  $G(\theta, \alpha)$  je střední projekce plochy listů v rovině kolmé ke slunečním paprskům a nahrazuje  $\cos \theta$ .

Vzhledem k tomu, že v přírodě se s náhodným rozmístěním listů nesebkáváme, je vhodné místo Poissonova modelu nahradit jiným binomiálním modelem (Neumann a kol., 1989).

### 1.3.3.2 Vyúslovití pozemního laserového skenování

Tato moderní metoda vyúslovává pro své měření odraz laserového paprsku od objektů, které se nacházejí v jeho trase. Jedná se o rychlý a přesný způsob stanovení objemu listoví i dlevních částí. Pomocí pozemního laserového skenování můžeme stanovit střední průměr kmene ve výškové tloučce, nadzemní dlevní plochu, frakci světla, index



nahlou ení, efektivní LAI i LAI a je tedy vhodné pro stanovení nejen LAI ale i celkové struktury porostu. Výsledky tohoto měření jsou statisticky identické s výsledky, které byly získány pomocí hemisférické fotografie, která je blíže rozvedena výše. Hlavní výhodou laserového skenování je, že oproti hemisférické fotografii udává přesnější rozměry frakce dřeva. To je dáno tím, že odraz laserového paprsku pocházejícího korunou nám udává jak vzdálenost jednotlivých prvků, tak i jejich tvar. Přístroj přijímá odrazové impulzy v průběhu celé řady azimutálních a zenitálních úhlů. Odrazové impulzy jsou zaznamenávány v řadě, který odpovídá určité vzdálenosti, například v případě přístroje The Echidna Validation Instrument (EVI) se jedná o vzdálenost 7,5 cm. Díky tomu odrazové impulzy vytváří sled hemisférických fotografií, v případě EVI je to až 1975 snímků, z nichž každý poskytuje informace o frakci dřeva v rozsahu 7,5 cm a to až do výšky 135 m (Zhao a kol., 2012). Hlavní výhodou pozemního laserového skenování oproti leteckému, o kterém bude teprve zmínka v následující podkapitole, je v tom, že díky němu lze lépe určit parametry jako je hustota stromů na jednotku plochy a průměr v prvních výšce, které jsou v těsné závislosti s množstvím listoví (Tian, 2011).

### 1.3.3.3 Metoda leteckého laserového skenování

Letecké laserové skenování (LLS nebo také LiDAR z anglického Light Detection and Ranging) je moderní metoda dálkového průzkumu Země, která umožňuje hromadný sběr velkého množství polohopisných a výškopisných přesných dat o zemském povrchu a objektech, které se na něm nachází, jako jsou budovy nebo vegetace (Mikita a kol., 2013). Principem metody LLS je odražení laserového paprsku od objektu. Paprsek se může odrazit buď celý, nebo se odrazí jen část, zatímco zbylá část dále prostupuje korunovou vrstvou (obdobně jako sluneční paprsek). Pokud se paprsek odrazí od vrcholu koruny stromu, hovoříme o tzv. prvním odrazu, v případě že se paprsek odrazí až od zemského povrchu, mluvíme o tzv. posledním odrazu. Výstupem LLS je množství bodů, které je dále analyzováno například pomocí softwaru ESRI ArcMap (Ackermann, 1999; Mikita a kol., 2014). Autoři, jako například Morsdorf a kol. (2006), považují využití LLS oproti hemisférické fotografii za vhodnější způsob snímání porostu v horizontální rovině. Avšak, stále je nutné výsledky měření LLS kontrolovat s pozemními měřeními (Mikita a kol., 2014).

LAI je v lineární závislosti s LPI (index propustnosti laserového paprsku z anglického LiDAR penetration index). Hodnoty LLS lze tedy využít k plošné modelaci LAI (Barilotti a kol., 2006). LPI vypočítáme jako (Mikita a kol., 2014):

$$LPI_{ij} = mG_{ij} / (mG_{ij} + mV_{ij}) \quad (7)$$

kde  $G_{ij}$  představuje počet odraz laserových paprsků na jednotku plochy terénu,  $V_{ij}$  představuje počet odraz laserových paprsků na jednotku plochy od vegetace, indexy  $i$  a  $j$  odkazují na příslušné pixely gridu.

Pro výpočet LAI bylo zjištěno, že minimální použitelná velikost pixelu je 15x15 m. Ve smíšených porostech je pro co nejpreciznější odhad LAI vhodné porost rozdělit do malých fragmentů podle zastoupených dřevin a na tyto segmenty aplikovat regresní modely příslušné dané dřeviny. Také tato metoda podhodnocuje hodnoty LAI, obdobně jako v případě LAI-2000 (Mikita a kol., 2014).

## 2. Praktická část

Po seznámení s problematikou indexu listové plochy a metodami jeho stanovení se praktická část zabývá jifi jednotlivými vybranými solitéry a silni ními alejemi, poufitymi p ístroji, vhodnými podmínkami m ení a také metodikou m ení.

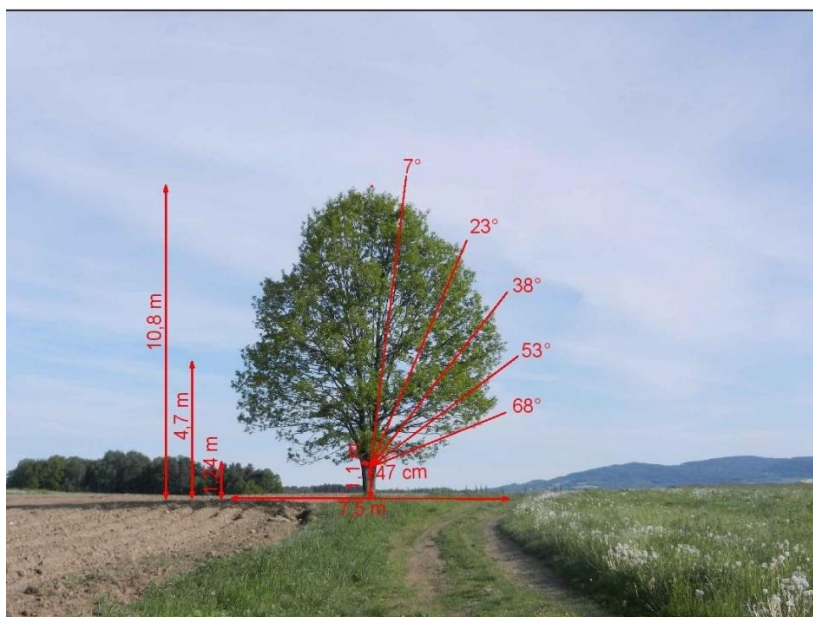
### 2.1 Vybrané solitéry a aleje

Pro ú ely m ení bakalá ské práce bylo vybráno p t solitérních strom a t i silni ní aleje. V-echny solitéry a aleje se nacházejí v okrese eský Krumlov, v Jiho eském kraji (p esné umíst ní vybraných prvk viz p ílohy 1-8). Solitéry se nacházejí v extravilánu na trvalých travních porostech a byly vybírány tak, aby se jejich okolí nevyskytovaly p ekáfky jako stromy, porost í zástavba pro stanovení LAI nep ímými metodami. Vybrané aleje jsou vfdy jedno druhové a š ístěo, cofl znamená, fle mezi jednotlivými stromy aleje se nevyskytují fládné náletové stromy í ke e, které by mohli ovlivnit hodnotu LAI. Aleje lemují silnice II. a III. t ídy a je k nim snadný p ístup.

#### 2.1.1 Solitéry

##### 2.1.1.1 Solitér 1 ó Dub letní u obce Dolní T ebonín-Horní T ebonín

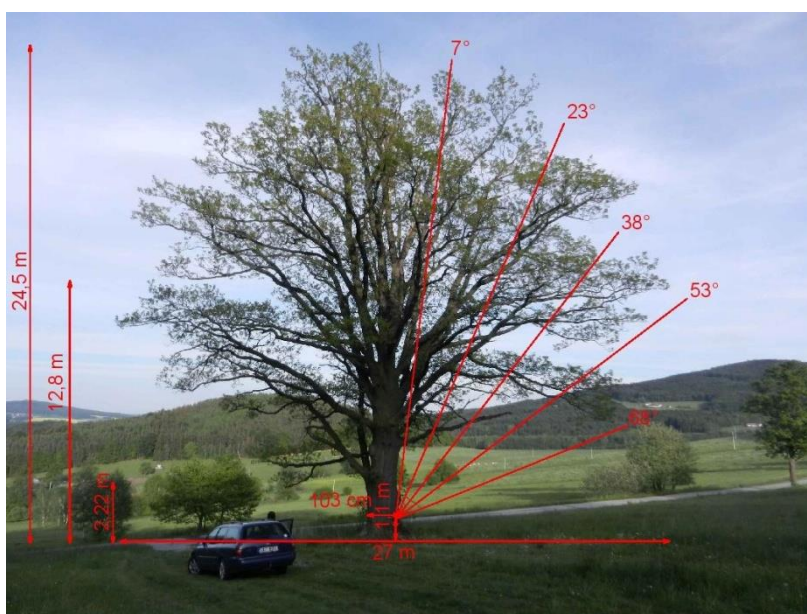
Prvním vybraným solitérem byl dub letní (*Quercus robur* L.), který se nachází u obce Horní T ebonín. Jedná se o strom, který je vysoký 10,8 m, korunu nasazuje v 1,24 m, pr m r koruny je 7,5 m a koruna je pravidelná, nejv t-í pr m r koruny je ve vý-ce 4,7 m, pr m r kmene ve vý etní vý-ce (tedy ve vý-ce 1,3 m od paty kmene) je 47 cm (viz Obr. 1). Solitér se nachází v mírn zvlň ném terénu bez výrazné expozice. Vzdálenost od nejbliž-ího porostu je 40 m (m eno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1).



Obr. 1: Dub letní u Horního Těbovína s vyznačenými parametry v etn úhl záb ru senzoru pro stanovení LAI nep ímou metodou (zpracováno v programu AutoCAD 2016).

#### 2.1.1.2 Solitér 2 ó Dub zimní u obce Brloh

Druhým vybraným solitérem byl dub zimní (*Quercus petraea* L.) který se nachází u obce Brloh. Strom je vysoký 24,5 m, korunu nasazuje ve vý-ce 2,22 m. Pr m r koruny je 27 m. Koruna je pravidelná a její nej-ir-í místo je ve vý-ce 12,8 m.

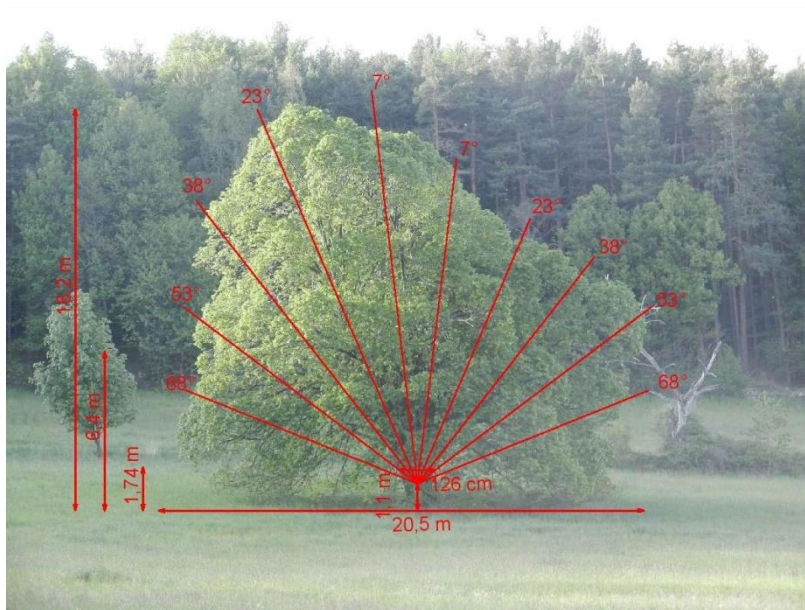


Obr. 2: Dub zimní u obce Brloh s vyznačenými parametry v etn úhl záb ru senzoru pro stanovení LAI nep ímou metodou (zpracováno v programu AutoCAD 2016).

Průměr kmene ve výšce 103 cm (viz Obr. 2). Solitér roste ve východním svahu. Vzdálenost od nejbližšího porostu je 45 m (měřeno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1).

#### 2.1.1.3 Solitér 3 – Lípa velkolistá u obce Brloh

Solitér 3 se rovněž nachází u obce Brloh. Jedná se o lípu velkolistou (*Tilia platyphyllos* L.), která je vysoká 16,2 m. Strom nasazuje korunu ve výšce 1,74 m, průměr nejširší místo koruny je 6,4 m. V kolmém průmětu je koruna pravidelná a její průměr je 20,5 m. Ve vertikálním směru jí koruna pravidelná není a na západní straně je poněkud deformovaná. Průměr kmene ve výšce 126 cm (viz Obr. 3). Lípa se nachází na stejném východním svahu jako předchozí solitér, od kterého je vzdálena 73 m (měřeno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1).

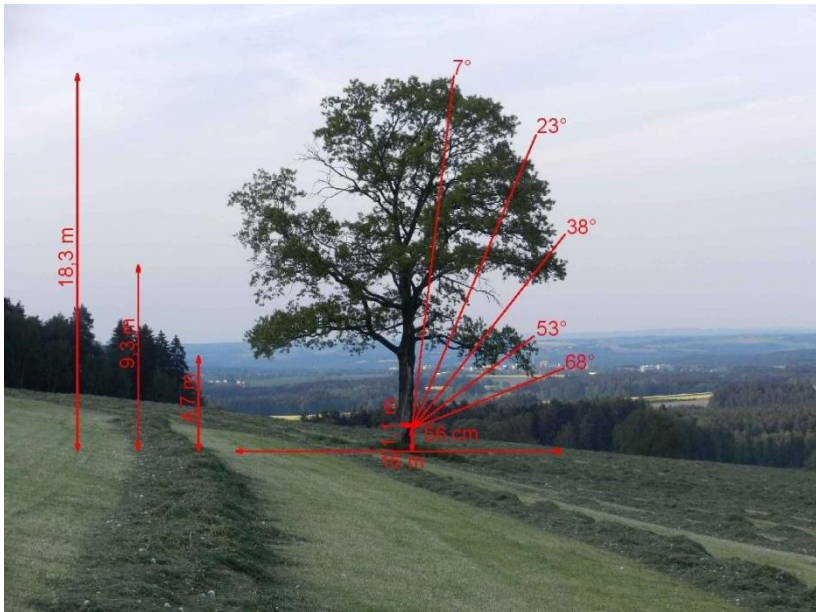


Obr. 3: Lípa velkolistá u Jánského Údolí s vyznačenými parametry v etní úhlů záběru senzoru pro stanovení LAI nepřímou metodou (zpracováno v programu AutoCAD 2016).

#### 2.1.1.4 Solitér 4 – Dub letní u obce Vřovná Plán

čtvrtým vybraným solitérem byl opět dub letní (*Quercus robur* L.), který roste u obce Vřovná Plán. Strom je vysoký 18,3 m, výška nasazení koruny je 8 m. Koruna je pravidelná, v průměru má 16 m a nejširší je ve výšce 9,3 m. Průměr kmene ve výšce

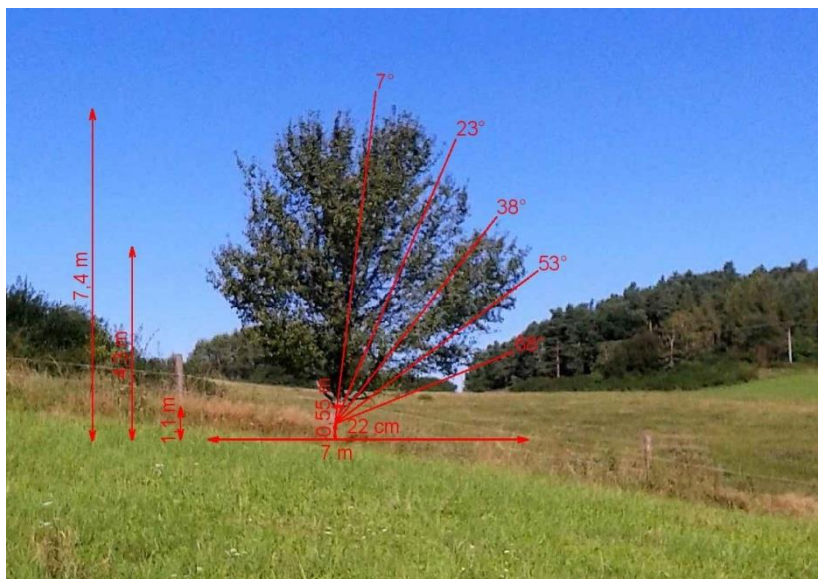
tlouče je 56 cm (viz Obr. 4). Solitér se nachází na východním svahu a od nejbližšího porostu je vzdálen 159 m (měřeno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1).



Obr. 4: Dub letní u Vřelavé Pláně s vyznačenými parametry v etnometrické záběrce senzoru pro stanovení LAI nepřímou metodou (zpracováno v programu AutoCAD 2016).

#### 2.1.1.5 Solitér 5 – Slivoš – vestka u obce Kájov-Lazec

Posledním vybraným solitérem byla slivoš – vestka (*Prunus domestica* L.), která se nachází u části obce Kájov-Lazec. Jedná se o nízký stromek vysoký 7,4 m. Koruna je nasazena velmi nízko a to uflívá 1,1 m. Koruna je pravidelná a nejvíce dosahuje ve výšce 4,3 m. Průměr koruny je 7 m. Průměr kmene pod nasazenou korunou je 22 cm (viz Obr. 5). Strom roste v mírném východním svahu. Od nejbližšího porostu je solitér vzdálen 48 m (měřeno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1).



Obr. 5: Slivo –vestka u osady Lazec s vyzna enými parametry v etn úhl záb ru senzoru pro stanovení LAI nep ímou metodou (zpracováno v programu AutoCAD 2016).

## 2.1.2 Aleje

### 2.1.2.1 Alej 1 ó Topolová alej u obce Vele–ín-Sk ídla

První vybraná alej doprovází silnici III. třídy . 15710 za obcí Sk ídla směrem k Vele–ínskému Nádraží. Alej je dlouhá 278 m (měřeno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1) a je tvořena jedinci topolu černého (*Populus nigra L.*). Stromy jsou vysázeny po obou stranách komunikace. Ve směru od Vele–ína je na pravé straně vysázeno 19 stromů a na straně levé 15 stromů. Průměrná výška stromů je 34,5 m, průměrný rozestup je 6,9 m. Na silnici ústní polní cesta, v tomto místě stromy chybí. Stromy nasazují koruny v průměrné výšce 7,5 m a průměr koruny je rovněž 7,5 m (viz Obr. 6). Průměr kmenů ve výšce 1,3 m je 92 cm. Průměrná vzdálenost mezi stromy je zhruba 7 m. Koruny sousedních i protilehlých stromů se prolínají. V tomto případě byl LAI měřen uprostřed komunikace (viz Obr. 7).



Obr. 6: Boční pohled na topolovou alej u vsi Skřídla s vyznačením parametrů aleje (zpracováno v programu AutoCAD 2016).



Obr. 7: Vnitřní pohled na topolovou alej u vsi Skřídla v etn vyznačením parametrů trasy měření a směru měření LAI pomocí nepřímé metody (zpracováno v programu AutoCAD 2016).



### 2.1.2.2 Alej 2 ó Jírovcová alej u obce Bohdalovice-Slavkov

Druhá m ěná alej se nachází takt ěfl u silnice III. t ědy . 15911 za vsí Slavkov sm rem na Bohdalovice. Jedná se o alej jírovce ma ěalu (*Aesculus hippocastanum* L.). Jedná se o jednostrannou alej a m ění tedy bylo provedeno po trase ťmezi kmeny ě. Ve zm ěn ěm sm ru se alej nachází na lev ě stran ě komunikace. Alej je dlouhá 152 m a tvo ě jí 13 jedinc ě jírovce ma ěalu (m ěno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1). Rozestupy mezi jednotlivými stromy jsou v pr ě m ru 11,7 m, pr ě m rn ě vý-ka strom ě je 14,3 m. Koruna je nasazena v pr ě m rn ě vý-ce 1,9 m a její pr ě m r je 9,3 m. Pr ě m r kmen ě ve vý etn ě vý-ce je 37 cm (viz Obr. 8). I v této aleji se nachází velká mezera a to mezi dev ětým a des ětým stromem ve sm ru od Slavkova. Tato mezera je velká zhruba 12 m. Alej lefl ě v jihov ěchodn ěm svahu.



Obr. 8: Bo ěn ě pohled na alej jírovce ma ěalu ve sm ru ke Slavkovu v etn ě vyzna ěn ěch parametru (zpracov ěno v programu AutoCAD 2016).

### 2.1.2.3 Alej 3 ó Jasanov ě alej u obce Bohdalovice-statek Bl ěha

Posledn ě vybran ě alej lemuj e silnici II. t ědy ěslo 162. Op ět se jedn ě o jednostrannou alej, kter ě se ve sm ru V t ěn ě ó Sv t ělk nachází na prav ě stran ě vozovky a byla rovn ěfl m ěna po trase ťmezi kmeny ě. Jedn ě se o v ěsadbu jasanu ztepil ěho (*Fraxinus excelsior* L.). Pro ś ěel této pr ěce byla m ěna její ěst o d ělce 252 m, kter ě je ohran ěna ke i (m ěno pomocí softwaru ESRI ArcGIS ArcMap 10.4.1). Stromy v aleji jsou vysok ě v pr ě m ru 14,5 m, rozestupy mezi jednotlivými stromy jsou v pr ě m ru 12 m. Koruny strom ě jsou nasazeny ve vý-ce 1,75 m a pr ě m r korun ě je 8,6 m. Koruny strom ě se neprol ěn ěj. Pr ě m r kmen ě ve vý etn ě vý-ce je 44 cm (viz Obr. 9). Alej je v ěs ězena v z ěpadn ě orientovan ěm svahu.



Obr. 9: Boční pohled na alej jasanu ztepilého ve směru na Sv tlík v etn vyznačených parametru (zpracováno v programu AutoCAD 2016).

## 2.2 Porovnání vybraných metod

Index listové plochy byl u vybraných a výše popsaných solitérů a alejových společenstev stanovován těmi různými způsoby. Využity byly dvě metody nepřímé a jedna metoda přímá. Jako přímá metoda, která je dostatečně přesná a v porovnání s přímou destrukcí méně pracná, byla vybrána metoda opademů. V případě nepřímých metod byly vybrány přístroje LAI-2000 PCA (LiCor, USA) a LaiPen LP 100 (PSI, R). Oba přístroje pracují na stejném principu, oba měří transmitanci světla pod korunovou vrstvou a zjištěnou hodnotu porovnávají s hodnotou naměřenou na volné ploše, tedy na ploše, kde je plné osvětlení. Oba přístroje měří transmitanci v prvních úhlových záběrech, LaiPen může také měřit pouze ve vertikálním úhlu. Tyto přístroje se liší konstrukcí měření. Zatímco LAI 2000 PCA má azimutální rozsah měření 360°, který je možné omezovat pomocí restriktoru, měřidlo přístroje LaiPen je ukryto ve třech, která rozsah měření značně omezuje a nelze ji měřit. Tento fakt může být však výhodný především pro měření v porostech, kdy pro měření na volné ploše je dostatečně lesní prasek. Pro správné výsledky měření je nutné, aby byla úhlová osvětlení shodná a přesná v daných úhlech. U přístroje LAI 2000 PCA je toto zajištěno libelou, která se nachází na měřícím rameni, u přístroje LaiPen je elektronická libela zabudována v přístroji, který zaznamenává hodnoty pouze v případě, že se nachází v požadované poloze ( $\pm 5^\circ$ ). Vhodná poloha je označena také na displeji souadnicemi a doprovázena specifickým zvukovým signálem, zesilujícím se při přiblížení správné pozici, při níž je pak hodnota automaticky zapsána. Před každým použitím přístroje

LaiPen je však nutné jej kalibrovat jak ve vertikálním tak horizontálním směru. Jak již bylo zmíněno, oba přístroje pracují na stejném principu měření transmitance, a proto oba přístroje vyjadřují vhodné aktuální povětrnostní podmínky resp. synoptickou situaci.

### 2.3 Synoptická situace

Velmi podstatnou podmínkou měření je vhodná synoptická situace. Vhodná synoptická situace je taková, kdy jsou světelné podmínky stabilní a v atmosféře se nachází spíše difuzní než přímočaré záření, které se více odráží a způsobuje podhodnocení LAI také tím, že dochází k tzv. efektu polostínu na okrajích listů, které jsou pak při pohledu zdola nezetelné. Výrazný vliv na odraz záření má také přítomnost kapek vody na povrchu listů nebo smáčené kmeny a větve dřev. Za vhodnou synoptickou situaci je považován stav rovnoměrně zatažené oblohy nebo naopak jasné oblohy za východu i západu slunce, kdy sluneční kotouč nezasahuje do záběru senzoru. V případě proměnlivé oblačnosti je nezbytné, aby stabilní synoptická situace trvala alespoň po dobu jedné série měření, tedy tak aby nadkorunové a podkorunové měření bylo zaznamenáno za stejných podmínek. V případě, že vyuffíváme párové měření tj. dva přístroje LaiPen, je tento problém zčásti eliminován, je však nutné, aby oba přístroje LaiPen byly časově synchronizovány pomocí softwaru FluorPen připojením k PC. (Pokorný, 2015). Tyto povětrnostní podmínky byly při měření přesně dodržovány.

### 2.4 Metodika měření

Terénní sběr dat probíhal od dubna minulého roku (2016) do března letošního roku (2017). Jednalo se především o výběr alejí a solitérů, měření přístroji nepřímo metodou v letních měsících, kdy probíhalo stanovení PAI, instalace opadoměrů, výběr opadoměrů a sběr listů a měření přístroji nepřímo metodou v období, kdy byly dřeviny bez listů a kdy bylo možné stanovit WAI. Měření přístroji nepřímo metodou bylo nutné opakovat z důvodu, že v letních měsících dochází ke stanovení PAI respektive tzv. efektivního LAI a pro určení LAI je nutné od efektivního LAI u listnatých dřevin odečíst plochu dřevní části WAI. O všech těchto částech terénních prací byl veden podrobný terénní deník. Kromě označení měřených solitérů a alejí a dat výkon jednotlivých částí prací byly zaznamenávány i údaje o synoptické situaci, o přesných časech měření nebo o parametrech stromů a alejí.

Aleje a solitéry pro účely této bakalářské práce byly vybírány v okrese Český Krumlov v průběhu dubna a května minulého roku (2016). Solitéry byly vybírány tak,

aby jejich růst nebyl ovlivněn jinými konkurenty a aby písmení nepřímými metodami byly eliminovány pěstálky (porost, jiné stromy, zástavba). Z praktického hlediska byly vybrány stromy se snadnou dostupností a dobrým přístupem pod korunu stromu. Z důvodu sběru listů v podzimních měsících bylo dbáno také na to, aby se nenacházely na orné půdě, jejíž obdělání by mohlo jejich sběr znemožnit. U alejí bylo také dbáno na dostupnost, druhovou jednotu a čistotu a také na jejich délku. Délka alejí byla měřena v programu ArcGis od společnosti ESRI. Dalšími důležitými měřenými parametry byl obvod stromu, ze kterého byl následně vypočítán průměr, vzdálenost mezi stromy a průměr koruny. Tyto parametry byly měřeny pomocí pásma. K měření výšky stromu a výšky nasazení jejich koruny a výšky nejvyššího místa koruny byl použit výškoměr (402 DELTA, Haglöf).

Letní měření pomocí přístrojů LAI-2000 PCA a LaiPen LP100 probíhalo od 21. 6. 2016 do 23. 8. 2016. V tomto období je stanovování LAI vhodné především z důvodu, že listy jsou již plně vyvinuty a ještě nedochází k jejich sesychání. Vzhledem k tomu, že léto 2016 bylo v okrese Český Krumlov srážkově příznivé, průměrný úhrn srážek překonal dlouholetý průměr téměř dvakrát (HMÚ, 2017), se tento předpoklad vyplnil. Měření solitérů a alejí probíhalo odděleně. Solitéry byly měřeny oběma přístroji třikrát ze čtyř stran vždy v poloze severovýchod a jihovýchod. Na začátku a na konci této série proběhlo referenční měření, tedy měření na volné ploše, dle kterého přístroj následně počítá transmitanci. Měření na volné ploše probíhalo vždy se sluncem v zádech a v takové vzdálenosti, aby solitérův alej nemohli hodnotu nijak ovlivnit.

Idlo měřidla se při měření LaiPenem se pohybovalo ve vzdálenosti cca 110 až 150 cm od povrchu, podle polohy přístroje při měřeném úhlu, u LAI-2000 PCA to bylo vždy kolem 150 cm. To neplatí pro solitérní stromy, kdy měření probíhalo v necelém metru od povrchu. Při měření pod korunou bylo také dbáno na to, aby vzdálenost měřidla od nejbližšího objektu byla minimálně čtyřnásobek jeho tloušťky (v souladu s metodikou Pokorný, 2015). Vzdálenost měřidla od kmene stromu byla zhruba 40 cm. Kmen nezasahoval do záběru měřidla, neboť rukojeť přístroje LaiPen byla vždy kolmá k ose kmene. Záběr měřidla přístroje LAI-2000 PCA byl vždy omezen restriktorem o velikosti 90°. Toto omezení také eliminovalo vliv měřidla a kmene stromu na výslednou hodnotu efektivního LAI.

V případě alejí probíhalo měření odděleně. Aleje byly procházeny po třech, pět a jedenácti krocích, a to vždy ve stejném směru (zpravidla z kopce dolů), při změně výchozího místa bylo označeno. Vzhledem k tomu, že alej 1 u obce Skádky je vysázena po obou

stranách a stromy jsou natolik vzrostlé, že se koruny nad silnicí prolínají, byla měřena po stedu silnice. Zbylé dvě jednoádrové aleje byly měřeny v trase mezi kmeny, protože koruny nad komunikací nezasahovali. V případě přístroje LAI-2000 PCA bylo vždy na začátku a na konci podkorunového měření provedeno referenční měření na volné ploše. V případě měření přístrojem LaiPen LP 100 byly použity dva tyto přístroje. Jeden, referenční, byl umístěn na stativu ve svislé poloze na volné ploše, kde snímal hodnoty v intervalu 30 s. Úhlová rovina přístroje byla orientována tak, aby se v jejím dohledu nenacházela žádná překážka a aby byla kolmo ke slunečnímu kotouči v případě východu a západu slunce. Druhý přístroj byl vyuffit k podkorunovému měření transmitance. Aby data z těchto dvou přístrojů použitých při měření byla kompatibilní, bylo nutné dbát na přesné časové seřazení. To bylo před každým měřením kontrolováno pomocí příslušného softwaru v PC. Na rozdíl od měření solitér bylo v aleji vyuffito pouze vertikálního úhlu měření. Vzhledem k tomu, že úzká úhlová rovina omezuje rozsah záběru idla, bylo zvoleno alej měřit po těchto, pět a jedenácti krocích s různou orientací úhlové roviny, která byla buď kolmá na alej, ve směru aleje nebo úhelně na alej. Díky tomuto postupu získáme z přístroje LaiPen LP100 informace obdobného rozsahu jako z LAI-2000 PCA, jehož 360° záběr idla byl oproti omezen 90° restriktorem. V případě trasy mezi kmeny byla u obou přístrojů dodržována vhodná vzdálenost od kmenů tak, aby nezasahovali do výsledků měření. U přístroje LaiPen bylo nadto dbáno zejména na to, aby úhlová rovina nebyla nikdy orientována směrem ke slunci, protože tato skutečnost by mohla výslednou hodnotu LAI značně podhodnotit. Stejně jako u solitérů platí, že nejbližší objekt je minimálně ve vzdálenosti rovnající se čtyřnásobku jeho tloušťky. Měření přístroji nepřímé metody pro určení WAI probíhalo za stejných podmínek jako měření letní, a to v termínu od 10. 3. 2017 do 12. 3. 2017, kdy se na daných stanovištích již nevyskytovala sněhová pokrývka, která by ovlivňovala odraz světla a tím i konečnou hodnotu LAI. Zároveň v tomto období nebyly ještě rozpuštěné pupeny a poasí bylo relativně stabilní. Z těchto důvodů bylo toto období pro stanovení WAI vhodné. Naměřená data byla následně zpracována v softwarech příslušných jednotlivým přístrojům (FV2200 pro přístroj LAI-2000 PCA a FluorPen pro přístroj LaiPen LP 100) a pomocí programu Excel ze sady MS Office a statisticky vyhodnocena v programu STATISTICA. Do statistického hodnocení byla zahrnuta i data nepřímé metody.

Přímá metoda byla realizována pomocí opadoměrů u alejí a sběrů listů u solitérů. Opadoměry byly v tomto případě tvercové pytle o záchytné ploše 80x80 cm. V každé aleji byly umístěny tři opadoměry, v případě aleje 1 u obce Skřidla byly umístěny dva

opadom ry na každé straně aleje. Jejich rozmístění bylo náhodné, aby korespondovalo s určitou náhodností měření pomocí stroji (3, 5 a 11 kroků). Opadom ry byly umístěny v linii aleje mezi dva sousední stromy. Při umístění opadom r bylo nutné dbát na to, aby jejich plocha nebyla zdeformována a měla stále čtvercový tvar daných rozměrů. Další důležitou podmínkou umístění opadom r bylo, aby byly nad zemí a to z důvodu, aby dešťová voda mohla odtékat a nedocházelo tak ke znehodnocování obsahu. Aby byly tyto požadavky naplněny, byly opadom ry vystuženy po dvou protilehlých stranách dřevěnými tyčemi a v aleji zavěšeny provazy mezi dva sousední stromy (viz Obr. 10 a Obr. 11). U aleje 3 byly opadom ry z důvodu velkého provozu na silnici a velkého vřetru ukotveny roxory. Umístění opadom r bylo povoleno Správou a údržbou silnic Jihozápadního kraje a příslušnými obcemi. Opadom ry byly vybaveny informačními tabulkami se základními údaji o jejich účelu.



Obr. 10: Ukázka instalace opadom ru.

Obr. 11: Umístění opadom r v aleji.

Opadom ry byly instalovány od 28. 8. 2016 do 1. 9. 2016 a vybírány a odváženy 19. a 20. 11. 2016. Toto období pokrylo celý opad listí. Při instalaci opadom r bylo ze stromů zbraných částí aleje odebráno prvních listů z každé aleje, které byly uchovány v mikrotenových sáčkách a pokud možno nejblíže možnému přiležitosti byly naskenovány, aby se zjistila jejich šerstvá plocha. Následně byly usušeny a opět naskenovány. Tentokrát pro účely porovnání velikosti suché a šerstvé plochy resp. stanovení poměru seschnutí. Poté byly listy dovezeny do Brna do laboratoře a vysušeny (při 80°C, po dobu 48h) na konstantní hmotnost. Ze zjištěných šerstvých ploch a suché hmotnosti byl stanoven SLA koeficient, který byl použit při výpočtu LAI. Při výběru opadom r byly odstraněny semena a plody, které by znehodnocovaly výsledek LAI. Listy byly z jednotlivých opadom r umístěny do papírových tašek, přesušeny fénem a následně dovezeny do brněnské laboratoře a vysušeny na konstantní hmotnost, která

byla použita při výpočtu LAI. Při výpočtu bylo nutné výsledky z opadom r normalizovat na plochu 1 m<sup>2</sup>.

U solitér byla situace poměrně snadná. Nebyly zde instalovány opadom ry, ale listí bylo v termínu 26. až 27. 11. 2016 sbíráno ze země. Listí bylo sbíráno ze dvou světových stran, z východu a západu, proto aby byl eliminován vliv případného nafoukní listí z jedné strany na druhou na konečné hodnoty LAI. Velikost plochy, ze které byly listy sbírány, byla vždy 50 x 100 cm. Zbýlý postup byl již obdobný jako u alejí. Na konci léta bylo odebráno pět vzorkových listů, které byly naskenovány a vysušeny, získal se z nich koeficient SLA a sebírané listy byly taktéž vysušeny na konstantní hmotnost, která byla použita při výpočtu.

Bohužel, v části příčné metody se nepodařilo získat všechna potřebná data a to z důvodů, že jeden z opadom r v aleji 1 u obce Skřídla byl odcizen a u solitéru 4 ve Vřbovém Pláni došlo ke konzumaci listů ovce.

## 2.5 Výsledky

Po naměření hodnot přístroji vyuffivajícími příčné metody a po sběru opadu z opadom r a ze země a jeho zpracování výše popsaným způsobem, proběhlo zpracování získaných dat. Zpracování probíhalo v počítačové prostředí pomocí programu příslušných použitých přístrojů, v Excelu od MS Office a ke konečnému statistickému vyhodnocení byl použit statistický program STATISTICA.

V případě opadom r byla získána následující data: plocha pět prvních listů (vzorkových listů) pro každý solitér a alej, plocha pět suchých listů pro každý solitér a alej, hmotnost vysušených vzorkových listů pro každý solitér a alej, hmotnost vysušených obsahů opadom r u alejí a hmotnost vysušeného opadu sebíraného ze země u solitérů, při emf v každé aleji byly nainstalovány 4 opadom ry (z nichž u aleje 1 byl jeden opadom r odcizen) a u solitérů byl sběr proveden vždy z východní a západní strany (v případě solitéru 4 nebyl sběr proveden).

Plocha suchých listů byla zjištěna ke stanovení redukce listové plochy po vysušení. Redukce byla vypočítána jako podíl plochy listů v prvním a suchém stavu. Z výsledků vyplývá, že změna plochy byla u vzorkových listů solitérů a alejí velmi podobná (od 1,01 do 1,12) při emf nejvíce změna plochy byla zaznamenána u aleje 2 (jírovec malý) a aleje 3 (jasan ztepilý), kdy plocha prvních vzorkových listů byla 1,12 krát větší, než plocha listů suchých.

LAI byl v případě opadom r vypočítán následujícím způsobem:

$$\text{Solitéry} \quad \left( \left( \frac{S_c}{m_{vz}} \right) * m_o \right) / 10000 * 2 \quad (8)$$

$$\text{Alejí} \quad \left( \left( \frac{S_c}{m_{vz}} \right) * m_o \right) / 10000 * 1,5625 \quad (9)$$

kde  $S_c$  znázorňuje plochu vzorníkových listů solitérů a alejí,  $m_{vz}$  představuje hmotnost vysušených vzorníkových listů solitérů a alejí a  $m_o$  je hmotnost vysušeného opadu z opadomů u alejí nebo posbíraného opadu u solitérů. V rovnicích je zahrnuta i normalizace na 1 m<sup>2</sup>.

Hodnoty výpočteného LAI u solitérů se pohybovaly v rozmezí od 1,27 (solitér 5-slivo –vestka) do 4,9 (solitér 3- lípa velkolistá). V případě solitérů 1 (dub letní), 3 (lípa velkolistá) a 5 (slivo –vestka) byly získány v této hodnoty z východní strany. V případě alejí byly nejlepší výsledky dosaženy u topolové aleje 1, u které je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou LAI pouze 0,44. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny v jírovcové aleji 2 a to od 6,13 do 6,96. U zbylých dvou alejí byly hodnoty nižší, u topolové aleje 1 se hodnoty pohybovaly od 3,88 do 4,32 a u jasanové aleje 3 se hodnoty pohybovaly od 1,8 do 4,25.

Pro výpočet LAI z hodnot naměřených pomocí přístroje LAI-2000 PCA byl použit program FV 2200. Výpočet LAI je v tomto programu automatizovaný. Před jeho použitím bylo nutné data upravit v textovém editoru tak, aby označení nadkorunová a podkorunová tení byla v souladu s měřeními a dále bylo nutno vytvořit zvláštní soubory pro zhodnocení stanovení LAI solitérů dle světových stran. Následně bylo ve výše zmíněném programu vypočítáno PAI z letního měření a WAI ze zimního měření. Mezi vypočítávanými hodnotami byly kromě PAI a WAI vybrána také jejich směrová odchylka, DIFN, MTA a jeho směrová odchylka. V případě hodnot podkorunových tení, které byly vyřazeny u nadkorunových tení (zpravidla odrazem světla od okolního prostředí a také mezerami v alejích) byla v programu zvolena možnost jejich přiblížení k jedné. Při výpočtu hodnot WAI a PAI byla použita lineární interpolace nadkorunových tení. Hodnoty byly počítány pro aleje po 3, 5 a 11 krocích a u solitérů pro solitéry jako celek a také dle světových stran. WAI a PAI bylo vypočítáno jak pro všechny úhly záběru senzoru, tak pro jednotlivé úhlové výseky. Dále bylo také počítáno s postupným odstraňováním jednotlivých úhlových záběrů od nejhorizontálnějšího úhlu záběru. Výpočtené hodnoty byly převedeny do programu Excel, ve kterém proběhl výpočet LAI a to tak, že od PAI byl odečten příslušný WAI.

Dle očekávání byly nejnižší hodnoty nalezeny v 5. a 4. úhlovém záběru, do nichž částí korunám nezasahují. Z toho vyplývá, že hodnoty získané využitím všech úhlů záběru jsou podhodnocené. Dále se také ukázalo, že s dalším postupným



odstraněním jednotlivých úhlových zábrů se zvyšuje hodnota LAI. Zajímavým postřehem také je, že hodnoty vypočtené s využitím pouze druhého úhlového zábrů jsou shodné s hodnotami získanými pomocí prvního a druhého úhlového zábrů. Vliv vzdálenosti mezi měřicími stanovišti resp. počet kroků mezi jednotlivými podkorunovými teními nebyl zaznamenán.

V případě solitérů byly největší hodnoty naměřeny u solitéru 3 (lípa velkolistá) a naopak nejmenší u solitéru 5 (slivořevka). Tento výsledek byl vzhledem k architektuře korun a podle vizuálního odhadu očekávaný. V případě solitérů 1, 2 a 3 je zřejmý vliv zapadajícího slunce, a pokud bylo šlechtěno za horizontem. Nejvíce vypovídající hodnoty byly tedy naměřeny u solitérů 4 (dub letní) a 5 (slivořevka), které byly měřeny při rovinně zataženém obloze. Změny vyplívá, že u solitéru 4 i 5 je největší akumulace listů na západní straně a u solitéru 5 nejmenší na východní straně.

V případě přístroje LaiPen byla data exportována pomocí programu FluorPen.exe. Výpočet pak probíhal v prostředí programu Excel. Výpočet byl proveden pro jednotlivé aleje opět po 3, 5 a 11 krocích, v případě solitérů byly hodnoty počítány pro strom jako celek a dále také dle světových stran. Výpočet byl proveden pro všechny úhlové tení a pak také s postupným odstraněním jednotlivých úhlových zábrů od nejhorizontálnějšího úhlu. V případě solitéru 1 byly hodnoty LAI vypočítány i pro jednotlivé kruhové výškové. Stejně jako v případě výpočtu dat přístroje LAI-2000 PCA bylo nejprve vypočítáno PAI z měření v průběhu vegetační sezóny a poté WAI z měření, které proběhlo po opadu listů. Pro získání LAI byly tyto dvě hodnoty od sebe odečteny.

Po exportu dat do programu Excel byla nejprve spočítána transmitance a to jako podíl podkorunového a nadkorunového tení. Pro výpočet LAI respektive PAI a WAI byly použity dva přístupy a to dle Langa pro homogenní a nehomogenní porosty (Lang, 1991). Při homogenním způsobu se postupovalo následovně: byl vypočítán aritmetický průměr transmitancí pro daný solitér (alej, světovou stranu apod.), tento průměr byl zlogaritmován přirozeným logaritmem a výsledná hodnota PAI nebo WAI byla vypočítána jako dvojnásobek absolutní hodnoty logaritmu. V případě výpočtu pro nehomogenní porosty byly spočítány přirozené logaritmy všech transmitancí a z těchto hodnot byl vypočítán aritmetický průměr pro jednotlivý solitér (alej, světovou stranu). Výsledná hodnota PAI a WAI byla vypočítána opět jako dvojnásobek absolutní hodnoty průměru přirozeného logaritmu. U alejí byla navíc počítána i směrodatná odchylka, která byla vypočítána jako směrodatná odchylka zlogaritmovaných transmitancí aleje a

výsledná hodnota byla získána opět jako dvojnásobek absolutní hodnoty a tentokrát směrodatné odchylky.

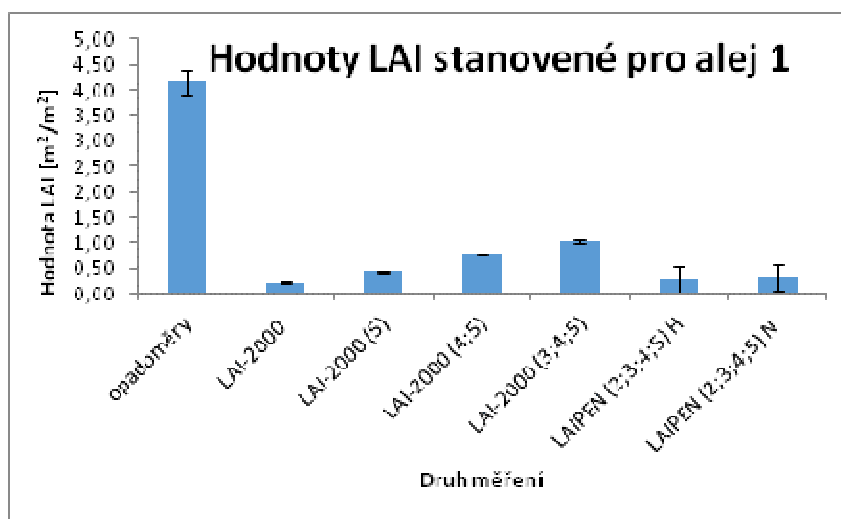
U zde byl potvrzen velký vliv synoptické situace. U všech alejí bylo minimálně jedno (aleje 2) a v některých (aleje 1 a 3) měření ovlivněny slunečními zářeními. U topolové aleje 1 se jednalo o kolmá a šikmá měření, u jírovcové aleje 2 o měření ve směru a u jasanové aleje 3 o měření šikmá a ve směru. U solitérů 1 a 3 byly pozorovány nejnižší hodnoty ze západu a vzhledem k tomu, že byly měřeny při západu slunce, je působení synoptické situace zřejmé. Dalším dokladem významnosti synoptické situace je porovnání dvou měření u solitéru 2 (dub zimní), kdy první bylo pořízeno při západu slunce a druhé při rovnoměrně zataženém obloze. Zatímco v prvním případě byla maximální hodnota LAI při odstranění 3., 4. a 5. úhlového záběru 0,57 u nehomogenního způsobu výpočtu LAI, v případě druhém tato hodnota dosahovala 5,77. Ob tyto nejnižší hodnoty byly naměřeny na severní straně. Nejnižší hodnota byla u prvního měření naměřena dle očekávání na západní straně, u druhého měření na straně jižní, při čemž hodnota získaná ze západní strany předčila hodnoty naměřené jak z jižní tak z východní strany.

Ani při měření přístrojem LaiPen LP 100 nebyl u alejí zaznamenán vliv po tu krok mezi podkorunovými teními na výslednou hodnotu LAI. Z výsledků se jako použitelná jeví forma výpočtu pro aleje jeví postup pro nehomogenní porosty, u kterého byly v 82 % získány vyšší hodnoty, než při použití výpočtu pro homogenní porosty, a které se zároveň více přiblížily hodnotám primární metody. U jasanové aleje 3 byl rozdíl hodnoty LAI vypočítané pro homogenní a nehomogenní porosty dokonce 7,94. Ve zbylých případech se rozdíl pohyboval od -0,08 do 3,95, při čemž střední hodnota rozdílu byla 0,91. V případě solitérů byly výsledky homogenního a nehomogenního způsobu výpočtu vyrovnány. Nehomogenní způsob dosahoval vyšších hodnot v 76 %, při čemž se hodnoty rozdílu mezi těmito dvěma způsoby pohybovaly v rozmezí -0,55 až 1,03 a jeho střední hodnota byla 0,18.

Poté, co byla vyhodnocena data jednotlivých způsobů měření indexu listové plochy, proběhlo jejich vzájemné porovnání. Porovnávány byly především hodnoty záběru bez 4. a 5. úhlového kroužku u LAI-2000 PCA, stejné úhlové rozpětí bylo použito i u přístroje LaiPen v případě solitérů. V případě alejí byly u LaiPen porovnávány hodnoty nejvertikálnějšího úhlu záběru.

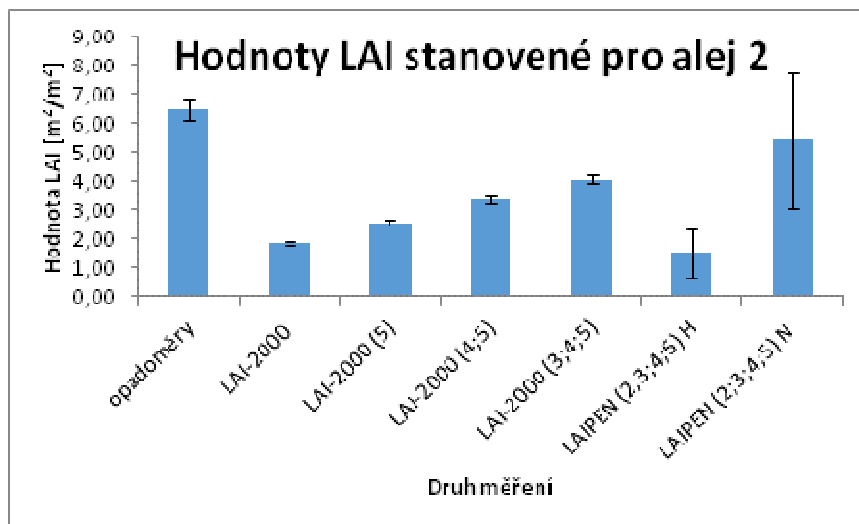
Pro srovnání jednotlivých výsledků měření alejí, byly v případě přístroje LaiPen vybrány směry měření, které byly nejméně ovlivněny slunečními zářeními. U topolové

aleje 1 byl vybrán směr rovnoběžný s podélnou osou aleje, u jírovcové aleje 2 byl zvolen směr kolmo na podélnou osu aleje a u jasanové aleje 3 byl vybrán směr kolmo na podélnou osu aleje. Vzhledem k tomu, že jednotlivé postupy měření nevykazovaly žádný specifický trend, byly pro porovnání využity aritmetické průměry jednotlivých typů měření (tzn. průměry měření po 3, 5 a 11 krocích a průměry hodnot 1-4 (3 opadoměr). Ve všech těchto případech byly dosaženy nejvyšší hodnoty u metody opadoměr. Naopak nejnižší hodnoty byly získány z LaiPenů výpočtem LAI pro homogenní porosty. Hodnoty získané měřením pomocí přístroje LAI-2000 PCA se při odstranění 4. a 5. úhlového záběru pohybují mezi hodnotami získanými homogenním a nehomogenním způsobem výpočtu LAI (viz Obr 12-14).



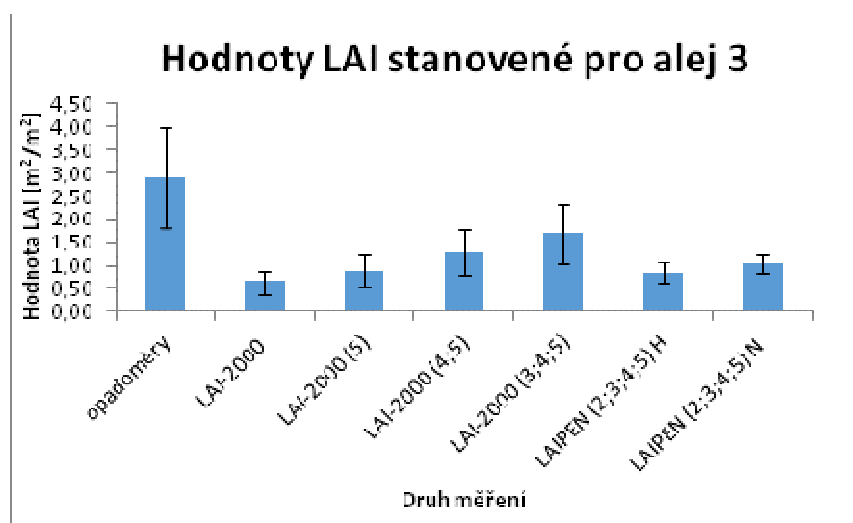
Obr. 12: Grafické znázornění naměřených a vypočtených hodnot LAI a jejich směrovatných odchylek u topolové aleje 1 pomocí přístrojů LAI-2000 PCA, LaiPen a metodou opadoměr. V případě přístroje LaiPen jsou znázorněny výsledky způsobu výpočtu jak pro homogenní (H) tak pro nehomogenní (N) porosty, v případě přístroje LAI-2000 PCA je znázorněn vliv rozptýlení úhlového záběru idla na výslednou hodnotu LAI, kdy hodnoty v závorce uvádí pořadí odstraněného kroužku i polohy (u LaiPen) vertikálního směru úhlového záběru.

Ze statistického vyhodnocení vyplývá, že hodnoty získané pomocí opadoměr se statisticky liší od všech dále měřených hodnot. Zbývající naměřené hodnoty LAI nejsou statisticky rozdílné ( $P > 0,05$ ).



Obr. 13: Grafické znázornění naměřených a vypočtených hodnot LAI a jejich smrodatných odchylek jírovcové aleje 2 získaných za pomoci přístrojů LAI-2000 PCA (znázorněny jsou opět hodnoty pro rozdílné úhlové rozpětí idla, písmenl ísla v závorkách uvádí po adí odstraněného kroufku), LaiPen (opět jsou znázorněny výsledky jak homogenního (H) tak nehomogenního (N) způsobu výpočtu) a metodou opadoměry.

U této aleje jsou statisticky shodné pouze výsledky dat z LaiPenů získané výpočtem pro homogenní porosty a hodnoty z měření LAI-2000 PCA za použití všech úhlů záběru. Ostatní hodnoty se od sebe navzájem statisticky liší ( $P < 0,05$ ).



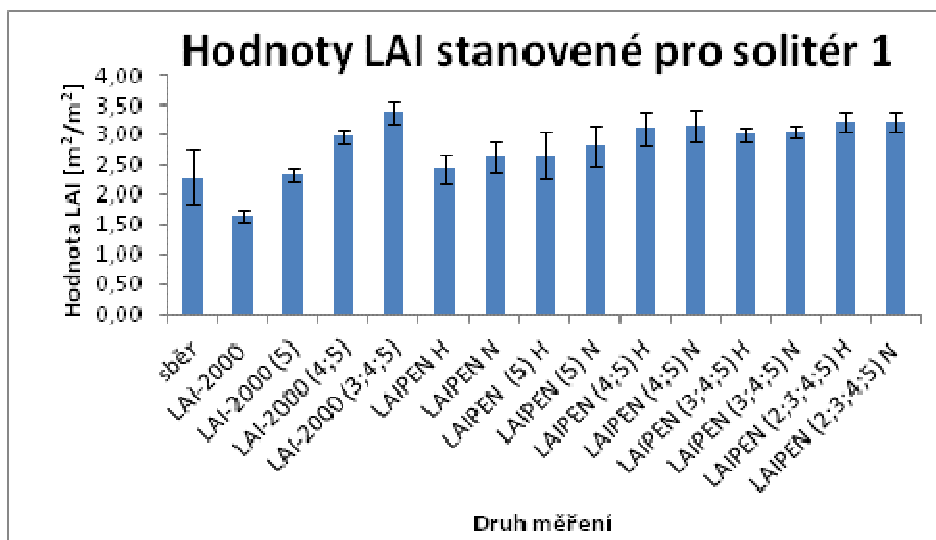
Obr. 14: Grafické znázornění naměřených a vypočtených hodnot LAI a jejich smrodatných odchylek jasanové aleje 3. Použití přístroje bylo opět LAI-2000 PCA

(znázorněny jsou opět hodnoty pro rozdílné úhlové rozpětí idla, pí emfl ísla v závorkách uvádí po adí odstraněného kroufku), LaiPen (s využitím homogenního (H) i nehomogenního (N) způsobu výpočtu) a metoda opadom r .

U této aleje se opět statisticky významně liší výsledky metody opadom r od všech ostatních hodnot. Liší se také výsledky získané pomocí LAI-2000 PCA s využitím všech úhlů záběru a s hodnotou získanou po odstranění 4. a 5. úhlového kroufku. Ostatní hodnoty (tedy hodnoty získané pomocí LaiPen a hodnoty získané z LAI-2000 PCA bez 5. úhlového záběru (kroufku) se statisticky neodlišují od hodnot získaných pomocí LAI-2000 PCA s využitím všech úhlů záběru a s hodnotou získanou po odstranění 4. a 5. úhlového kroufku ( $P < 0,05$ ).

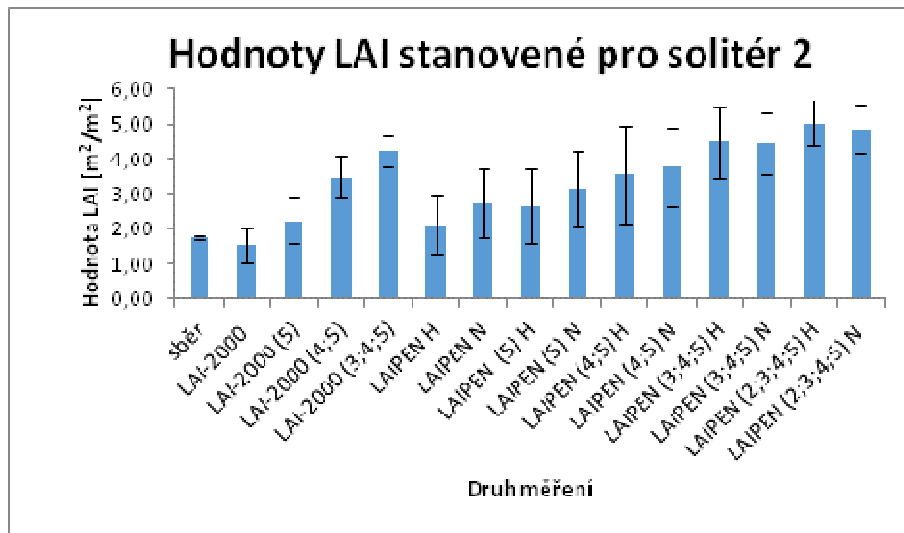
Ze statistického zpracování vyplývá, že mezi hodnotami získanými jednotlivými způsoby stanovení LAI se nenachází žádná závislost.

U solitérů byly opět porovnávány především hodnoty získané po odstranění 5. a 4. úhlového záběru senzoru a to jak u přístroje LAI-2000 PCA tak u přístroje LaiPen. V případě solitérů, které byly směrem k západu slunce, byly hodnoty ovlivněny slunečním zářením (tedy hodnoty západní) odstraněny. Porovnávány byly opět aritmetické průměry reprezentativních hodnot. Naměřené hodnoty byly porovnávány s hodnotami získanými průměrnou metodou a to sberem listů ze země z východní a západní strany, pí emfl u solitéru 4 tento sběr neprobíhl. Zde bylo nejvyšších hodnot dosaženo ve většině případů (60 %) nehomogenním způsobem výpočtu LAI a naopak nejnižší hodnoty byly výsledkem průměrné metody sběru listů ze země. Podrobnější zhodnocení výsledků jednotlivých způsobů měření je uvedeno v následujících grafech (viz obr. 15-17)



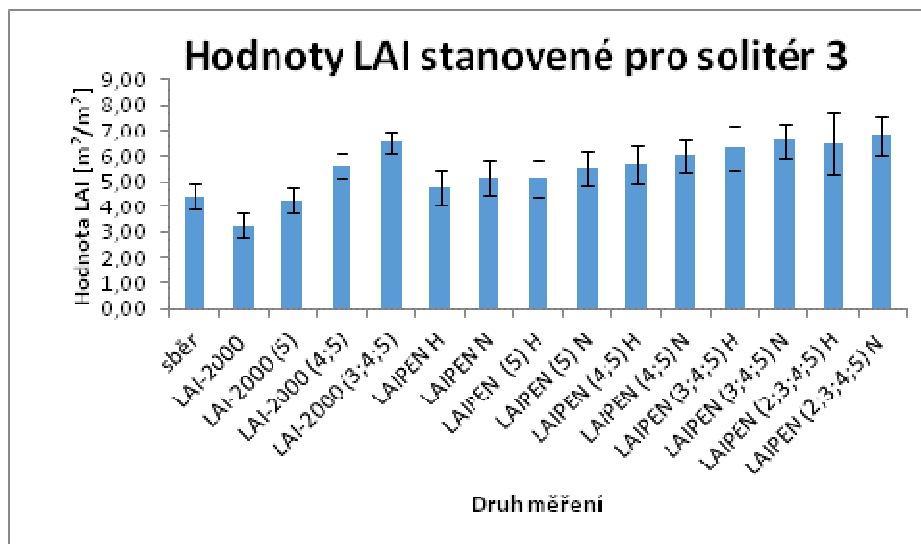
Obr. 15: Grafické znázornění výsledných reprezentativních hodnot LAI solitéru 1 (dub letní) získaných využitím přístrojů LAI-2000 PCA, LaiPen a sběrem listů ze země. U obou přístrojů jsou znázorněny hodnoty pro jednotlivá úhlová rozpětí s postupným odstraňováním kroufků záběru idla. Po adí odstraňovaných kroufků záběru idla je uvedeno v závorkách. U přístroje LaiPen jsou uvedeny hodnoty získané jak společně pro homogenní (H) tak pro nehomogenní (N) zprůsoby výpočtu.

Ze statistického zpracování je zřejmé, že hodnota získaná přístrojem LAI-2000 PCA za použití všech úhlových záběrů je statisticky významně nižší ( $P < 0,05$ ) a liší se od všech ostatních naměřených hodnot. Hodnoty získané z LAI-2000 PCA s odstraněním 5. kroufků jsou shodné s hodnotami získanými přímou metodou opadoměr a liší se od hodnot získaných LAI-2000 PCA bez 4. a 5. kroufků a bez 3., 4. a 5. kroufků a od hodnot získaných LaiPenem ve stejném úhlovém rozpětí pomocí obou způsobů výpočtu. Tyto hodnoty nejsou statisticky významně rozdílné. Hodnoty LAI získané LaiPenem bez pouze 5. kroufků a se všemi kroufků jsou taktéž bez statisticky významného rozdílu a zároveň se statisticky neodlišují od všech ostatních naměřených hodnot kromě měření LAI-2000 PCA s využitím celého úhlového rozpětí ( $P < 0,05$ ).



Obr. 16: Grafické znázornění hodnot LAI pro solitér 2 (dub zimní). V grafu jsou opřít hodnoty získané přístroji LAI-2000 PCA a LaiPen a to pro úhlové rozpětí všech kroufků a pro rozpětí s postupným odstraňováním jednotlivých kroufků zábřu idla, přičemž pořadí odstraňovaných kroufků zábřu je uvedeno v závorkách, a hodnoty přímé metody. U přístroje LaiPen jsou znázorněny výsledky výpočtu pro homogenní (H) a nehomogenní (N) porosty.

V tomto případě se hodnota získaná přístrojem LAI-2000 PCA s využitím kompletního zábřu idla statisticky liší od ostatních naměřených hodnot mimo hodnotu získanou přímou metodou sběru listů ze země, která je zároveň shodná s hodnotami přístroje LAI-2000 PCA s odstraněním 5. kroufku a přístroje LaiPen s využitím všech úhlů zábřu s využitím homogenního způsobu výpočtu. Bez statisticky prokazatelných rozdílů jsou hodnoty získané oběma přístroji při odstranění 4. a 5. kroufku, hodnoty získané homogenním a nehomogenním způsobem výpočtu při odstranění 3., 4. a 5. kroufku zábřu u přístroje LaiPen ( $P > 0,05$ ).



Obr. 17: Grafické znázornění hodnot LAI které byly vypočítány pro solitér 3 (lípa velkolistá). V grafu jsou znázorněny hodnoty získané přístroji LAI-2000 PCA a LaiPen a to pro úhlové rozptýlení všech kroufků záběru a pro rozptýlení s postupným odstraňováním jednotlivých kroufků záběru idla, přičemž pořadí odstraňovaných kroufků záběru je uvedeno v závorkách, a hodnoty průměrné metody. U přístroje LaiPen jsou znázorněny výsledky výpočtu pro homogenní (H) a nehomogenní (N) porosty.

U tohoto solitéru se hodnota získaná průměrnou metodou statisticky liší ode všech ostatních vypočítaných hodnot ( $P < 0,05$ ). Naopak, statisticky nevýznamné rozdíly v hodnotách jsou výsledkem použití průměrné metody a přístroje LAI-2000 PCA bez 5. kroufku; hodnoty získané nehomogenním způsobem výpočtu u přístroje LaiPen při využití všech úhlů záběru a hodnoty získané homogenním způsobem výpočtu u přístroje LaiPen, kdy byl 5. kroufek záběru odstraněn; hodnoty získané homogenním způsobem výpočtu při odstranění 4. a 5. kroufku záběru, hodnoty získané nehomogenním způsobem výpočtu při odstranění 5. kroufku u přístroje LaiPen a hodnoty přístroje LAI-2000 při odstranění 4. a 5. kroufku záběru idla a konečně hodnoty získané přístrojem LAI-2000 PCA při odstranění 3., 4. a 5. kroufku záběru a hodnoty získané homogenním i nehomogenním způsobem výpočtu u přístroje LaiPen při odstranění (2.,) 3., 4. a 5. kroufku záběru ( $P < 0,05$ ).

Z tohoto grafu vyplývá, že neexistuje statisticky významný rozdíl mezi měřeními přístrojem LAI-2000 PCA a sběrem listů ze země. Dále je ze statistického zpracování zřejmé, že se statisticky prokazatelně neodlišují měření přístrojem LaiPen a LAI-2000 PCA při odstranění 4. a 5. kroufku záběru idla (to platí pro homogenní i nehomogenní způsob výpočtu). Dále je také možné říci, že neexistuje statisticky významný rozdíl v



hodnotách měření přístrojem LAI-2000 PCA s odstraněným 3., 4. a 5. kroučkem zábrusníidla a mezi hodnotami získanými homogenním způsobem výpočtu z dat přístroje LaiPen měření bez 2., 3., 4. a 5. kroučku zábrusu (to platí pro všechny solitéry).

## 2.6 Diskuze

V rámci bakalářské práce byly vyhodnoceny výsledky měření LAI u tří alejí a pět solitérních stromů.

Rozmístění opadoměrů bylo náhodné (McShane a kol., 1993), tak aby odpovídalo náhodným podmínkám při využití nepřímé metody.

Ze získaných výsledků byl patrný vliv vtrhu na výslednou hodnotu LAI. V případě solitérů byly ve všech případech zjištěny větší hodnoty LAI na východní straně než na straně západní, což může být důsledkem převládajících západních vtrhů. Nejvyšší hodnoty v rámci alejí byly zjištěny u jírovcové aleje (aleje 2). Důvodem je zejména nízké nasazení korun a jejich velká kompaktnost, především však vhodné umístění aleje v závětrném svahu. Důsledkem působení vtrhu je pravděpodobně velký rozdíl hodnot mezi jednotlivými opadoměry u jasanové aleje (aleje 3), kdy LAI z opadoměru v horní části aleje ovlivněným větrem dosahovalo hodnoty jen 1,8, zatímco LAI získané zpracováním opadu z opadoměru umístěného v dolní části aleje méně ovlivněným větrem dosahovalo hodnoty 4,25. Zatímco u alejí byly nejvyšší hodnoty dosahovány pomocí opadoměru, v případě solitérů byly hodnoty získané přímou metodou naopak nejnižší. Vysvětlením této skutečnosti by mohlo být to, že zatímco u alejí byly listy v opadoměru štrvale zachyceny, v případě sběru ze země byly listy po opadu dále rozfoukávány do okolí. Z toho plyne, že hodnota LAI získaná pomocí sběru listů ze země je méně přesná než hodnota získaná z opadoměru. Z výsledků a z vizuálního zhodnocení situace při sběru opadoměru je také zřejmé, že přímá metoda opadoměru i sběru listů ze země má tendenci celkovou hodnotu LAI spíše podhodnocovat. Podhodnocení (i nadhodnocení jednotlivých stran) viz vyšší hodnoty z východní strany) je dáno působením vtrhu. Z tohoto důvodu se tato přímá metoda neukazuje jako vhodná pro zjištění LAI u alejí a solitérů, protože ty jsou působením vtrhu vystaveny těmto vlivům. Pro získání přesnějších výsledků by bylo nutné v alejích instalovat větší množství opadoměru a umístění je nenáhodně s ohledem na terén a vliv vtrhu.

Vzhledem k tomu, že oba použité přístroje (LAI-2000 PCA a LaiPen LP 100) jsou založeny na stejném principu měření, byly u nich zaznamenány i obdobné skutečnosti. Při hodnocení výsledků u solitérů se potvrdil předpoklad, který prezentovali již

Pokorný a Marek (2000), a to ten, že hodnoty 5. a 4. úhlového záběru senzoru (blízko horizontu) u obou použitých přístrojů značně podhodnocují skutečnou hodnotu LAI. Tento poznatek odpovídá i vizuálnímu hodnocení solitérů, kdy je patrné, že koruny solitérů do 4. a 5. úhlového záběru téměř nezasahují (s výjimkou solitéru 3; viz obr. 1-5).

Jako velice významný faktor se ukázala synoptická situace. Až u poloviny měření LAI v lesních porostech je za vhodné synoptické situace považován mimo jiné bezmráčný západ či východ slunce (Pokorný, 2015), zde se tento předpoklad nepotvrdil. Stanovení LAI solitérů a alejí je významně ovlivněno slunečním zářením, a když je slunce ještě (ufl) za horizontem. Tento fakt byl potvrzen u všech alejí i u těch z pět solitérů, které byly měřeny při západu slunce. U solitérů byly v těchto případech měřeny nejnižší hodnoty vždy ze západní strany, a když při opětovném měření solitéru 2 za rovnoměrně zatažené oblohy převládala západní hodnota jak hodnotu východní tak i jižní a hodnoty druhého měření byly výrazně nižší než hodnoty prvního měření. Z těchto poznatků vyplývá, že za vhodné synoptické situace lze pro stanovení LAI solitérů nepřímou metodou, když probíhá měření v několika směrech světových stran (azimutálních), považovat pouze rovnoměrně zataženou oblohu.

Pro získání hodnot LAI z dat naměřených přístrojem LaiPen byly vyuffity dva způsoby výpočtu dle Langa a to pro homogenní a nehomogenní porosty (Lang, 1991). Tyto způsoby výpočtu se lišily a to především v případě alejí, kde střední hodnota rozdílu dosahovala 0,91 s tím, že pravděpodobně výsledky byly získány výpočtem pro nehomogenní porosty (hodnoty získané tímto způsobem dosahovaly v 82% vyšších hodnot a tím pádem se více blížili hodnotám získaným prostřednictvím přímé metody, které byly v tomto případě považovány za nejlepší výsledek, a když byly zjevně také podhodnoceny). U solitérů byla střední hodnota rozdílu výsledků získaných homogenním a nehomogenním způsobem menší a to 0,18. Byla zde také zaznamenána shoda mezi výsledky homogenního způsobu výpočtu a výsledky získanými z měření přístrojem LAI-2000 PCA. Pokud střední hodnoty rozdílu u solitérů a alejí lze vysvětlit v rámci homogenity v rámci solitéru. Můžeme tak usuzovat, že u alejí je vhodné výpočet pro nehomogenní porosty zatímco u pravidelných solitérů je možné využít způsob výpočtu pro homogenní porosty.

Z výsledků je patrné, že metodu opadoměr je nutné při využití u alejí ani solitérních dle svého rozhodnutí. Vzhledem k tomu, že pro využití jiné přímé metody je potřeba šásáhnout do dle viny, a to platí i pro využití alometrických vztahů, bylo by účelné

nahradiť ji například metodou kvadrant inklinací bod se zaměřím na rozbor opadu nebo metodou mrak (ermák, 1990). Nabízí se také myšlenka využití alometrických vztah převzatých z druhov shodných porost. Tento způsob může být také zatížen chybou a to především proto, že solitérní stromy mají jiné proporce, především plně rozvinutou korunu. V případě nepřímé metody založené na průchodu světla korunovou vrstvou se potýkáme s různými faktory. Mezi nejvýznamnější z nich patří zmíněná synoptická situace, lze ale uvažovat, že i okolní prostředí zde ovlivňuje hodnoty LAI daleko více než v porostu (například odraz slunečního záření od vozovky). To může ztěžovat zjištění LAI v praxi. Například, čekání na vhodnou synoptickou situaci může mít v praxi limitující účinek. V případě hodnocení LAI u solitéru a alejových společenstev se jeví jako vhodná alternativa například metoda pozemního laserového skenování.

## Závěr

Jak již napovídá název bakalářské práce, tématem byl index listové plochy a možnosti jeho stanovení u solitér a liniových výsadeb dřevin. V teoretické části byla zmíněna stručná historie vysazování alejí v České republice a dále byly popsány funkce liniových výsadeb dřevin a solitér v krajině s důrazem především na jejich ekologickou stabilizaci a estetickou funkci. Následně byl již představen index listové plochy v etnografických pohledech různých autorů na jeho stanovení, přičemž jako nevhodnější se jevila definice celkového nebo poloviny celkového povrchu listoví, jež má vypovídající hodnotu jak ve fyzikálním tak fyziologickém ohledu. Tyto hodnoty jsou také prezentovány v práci. Je samozřejmé, že pro stanovení LAI existuje mnoho různých metod, které jsou dle své podstaty členěny do tří základních skupin metod přímých, polopřímých a nepřímých.

Pro praktické stanovení indexu listové plochy a jeho následné porovnání byly v této práci vybrány časově méně náročné metody s možností dosažení dostatečně přesných výsledků. Pro získání hodnot LAI byly využity dva přístroje využívající nepřímou metodu určení LAI a jedna metoda přímá, kdy byl index listové plochy vypočítán na základě množství opadu zachyceného opadoměrny nebo na množství opadu sesbíraného ze země plochou definované plochy.

Přímé metody jsou považovány za nejpřesnější způsob určení LAI, a proto jsou využívány ke kalibraci metod nepřímých (Jonckheere a kol., 2004). Z nepřímých metod byla vybrána metoda opadoměrem také především proto, že nevyžaduje přímou destrukci dřeviny nebo její části, která by byla v tomto případě nepřípustná.

Nepřímé metody byly zastoupeny dvěma obdobnými přístroji a to přístrojem LAI-2000 PCA, který je považován za světový standard a přístrojem LaiPen LP 100, který je poměrně nový, cenově dostupný a pravděpodobně lépe použitelný v praxi. Jedná se o přístroje využívající optické měření a porovnávající intenzitu světla pod korunovou vrstvou a intenzitu světla dopadajícího na povrch korunové vrstvy.

Poté, co bylo pomocí přístrojů nepřímé metody stanoven v průběhu vegetační sezóny přímé a plněolistné PAI (index povrchu vegetace) a po opadu listoví WAI (index povrchu dřevní části) proběhl export dat a následný výpočet LAI jako rozdílu PAI a WAI, a jeho vyhodnocení pomocí PC programu příslušných datým přístrojem.

Ze získaných výsledků vyplynulo, že vybrané metody, a to jak přímé tak nepřímé, nejsou pro stanovení LAI u solitér a liniových výsadeb dřevin zcela vhodné za jistých

podmínek a/nebo je nutno je dále testovat. Limitujícím faktorem jejich využití jsou povětrnostní podmínky v případě metody opadoměrů a sběru listů, u nepřímo měřené metody se jedná především o synoptickou situaci tedy o velký vliv slunečního záření na naměřené hodnoty. Je tedy nasnadě, především pro stanovení indexu listové plochy u solitérů a liniových výsadeb dále je vhodné využít a dále testovat i jiné polopřímé i nepřímé metody jako například pozemní laserové skenování, metoda kvadrantů inklinací bodů nebo metoda mraků.

## Summary

This thesis deals with the findings of LAI in selected line plantation and solitaires, which are important part of our landscape and which carry out many different functions (for example ecological function, stabilizing function or aesthetic function). Whereas solitaires and line plantation are often situated near roads or even in the built-up area, it is required to know their health condition. One way, how to determine their health condition is to use the Leaf area index (LAI), which quantify the amount of bearing foliage by the tree. It is a unitless variable, which is most commonly defined as half of total area of foliage normalized by a unit of ground area. LAI can be determined by many ways, we divide it into three categories. These are: 1) direct methods, 2) semi-direct methods and 3) indirect methods. The list of the methods and its principles are listed in the text of this thesis. The aim of this work was to find out if it is possible to use the selected direct and indirect methods in order to measure LAI of solitaires and line plantations.

Method of litter traps was selected as a direct method. For indirect methods two parallel instruments were chosen. They are based on comparison of radiation intensity above and under the canopy. These were LAI-2000 PCA and LaiPen LP 100. While the first one is considered to be a World standard, the second one is still new to the market. For LAI measurement five solitaires and three road alleys were selected. Measurement by the instruments of the indirect method were made twice, first one in the summer, when the plant area index (PAI) was estimated and second one in winter, when the woody area index (WAI) was estimated. The LAI was calculated as a difference between PAI and WAI. Solitaires were measured three times from each cardinal side and alleys were walked by three, five and eleven steps. It was needed to take the reference value at the beginning and at the end of the measurement. The exception was the measurement of alleys by the LaiPen, when two of these instruments (dual measurement) were used. Litter traps were installed just in the alleys (4 littertraps in each alley). They were installed from August to November, so they covered the whole period of leaf fall. The collection of the foliage from the ground in cases of solitaires also took place in November. Leaves were collected from east and from the west direction in the area of 0,5 m<sup>2</sup>.

When the data were retrieved, they were processed in PC (programmes Excel, STATISTICA, FluorPen and LAI-2200 were used). The results showed that these

chosen methods are not suitable for determining the Leaf area index for solitaire and line plantations, due to wind and inappropriate synoptic situation, although there is some consistency between the values obtained by the used instruments. It has also been shown that even the chosen direct method using litter traps is probably not suitable for LAI determination in these cases due to wind. Therefore, limiting factors of using these methods is weather conditions, when the direct method results are heavily influenced by wind, and the results of the indirect method are affected by inconsistent sky conditions. For these reasons, it is appropriate to use more litter traps with specific design of distribution reflecting wind direction and crown size and tree positions in a field, or also other methods to determine LAI of solitaires and line tree plantations, such as inclined point-quadrat method, ground laser scanning or cloud method should be tested.

## Literatura

- Ackermann F. 1999. Airborne laser scanning present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (1): 646-67.
- Anderson, M. C., 1964. Studies of the woodland light climate, I, The photographic computation of light condition. *J. Ecol.*, 52: 27-41.
- Barilotti A., Turco S., Alberti G. 2006. LAI determination in forestry ecosystem by lidar data analysis. In: International workshop 3D remote sensing in forestry. 14th-15th Feb. 2006, BOKU, Wien. Wien, BOKU: 2486252.
- Beadle, C. L., 1993. Growth analysis. In D. O. Hall et al. (eds.), *Photosynthesis and Production in a Changing Environment: a Field and Laboratory Manual*. Chapman and Hall, London, pp. 36-46.
- Black, T. A., Chen, J. M., Lee, X., Sagar, R. M., 1991. Characteristics of short-wave and long-wave irradiances under a Douglas-fir forest stand. - *Can. J. Forest. Res.*, 21: 1020-1028.
- Caldwell, M.M., Dean, T.J., Nowak, R.S., Dzurec, R.S., Richards, J.H., 1983a. Bunchgrass architecture, light interception and water-use efficiency: Assessment by fiber optic point quadrants and gas exchange. *Oecologia* 59: 178-184.
- Caldwell, M. M., Harris, G. W., Dzurec, R.S., 1983b. A fiber optic point quadrant system for improved accuracy in vegetation sampling. *Oecologia* 59: 417-418.
- Comeau, P. G., Gendron, F., Letchford, T. A., 1998. Comparison of Several Methods for Estimating Light Under a Paper Birch Mixed wood Stand. *Can. J. For. Res.*, 28 (12): 1843-1850.
- Coyea, M.R., Margolis, H.A., 1992. Factors affecting the relationship between sapwood area and leaf area of balsam fir. *Can. J. For. Res.* 22: 1684-1693.
- ermák, J., 1990. Field measurement of vertical and radial leaf distribution in large broadleaf trees by the shadow technique - a manual. University of Agriculture and Forestry, Brno, Czech Republic.
- ermák, J., Riguzzi, F., Ceulemans, R., 1998. Scaling up from the individual tree to the stand level in Scots pine. I. Needle distribution, overall crown and root geometry. *Ann. Sci. Forest.* 55: 63-88.
- HMÚ, 2017. M sí ní data pro eské Bud jovice, [Online] citováno dne 14. března 2017. Dostupné na World Wide Web: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data#>.
- SN 73 6101: Projektování silnic a dálnic, 2004.



Dean, T.J., Long, J.N., 1986. Variation in sapwood area ó tree area relations within two stands of lodgepole pine. *For. Sci.* 32: 749-758.

Dufrêne, E., Bréda, N., 1995. Estimation of Deciduous Forest Leaf-Area Index Using Direct and Indirect Methods. *Oecologia*, 104: 156-162.

Dvořák, V., Opluštilová, M., Janoušek, D., 1996. Relation between leaf biomass and annual ring sapwood of Norway spruce according to needle age-class. *Can. J. For. Res.* 26: 1822-1827.

Fassnacht, K. S., Gower, S. T., Norman, J.M., McMurtree, R.E., 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agric. For. Meteorol.*, 71: 183-207.

Geron C. D., Ruark, G. A., 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Can. J. Forest. Res.* 18 (10): 1298-1304.

Hyšpa, M., a kol., 2007, *Stromy v krajině a ve městech: jejich význam a ochrana*. České Budějovice, Sdružení Calla, 27. s.

Homolová, I., 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.

Chan, S. S., McCreight, R. W., Walstad, J. D., Spies, T. A., 1986. Evaluating forest cover with computerized analysis of fisheye photographs. *Forest Sci.*, 32: 1085-1091.

Chen, J. M., Black, T. A., Adams, R. S., 1991. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of forest stand. *Agt. Forest Meteorol.* 56:129-143.

Chen, J. M., Black, T. A., 1992. Defining Leaf-Area Index for Non-Flat Leaves. *Plant Cell. Environ.*, 15: 421-429.

Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., Plummer, S., 1997. Leaf Area Index of Boreal Forests: Theory, Techniques, and Measurements. *J. Geophys. Res. ó Atmos.*, 102: 29429-29443.

Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 19635.

Kucharik C. J., Norman J. M., Murdock L. M., Gower S. T. 1997. Characterizing canopy nonrandomness with a multiband vegetation imager (MVI). *Journal of geophysical research*, 24: 29455-29473.

Lang, A.R.G., 1973. Leaf orientation of a cotton plant. *Agric. For. Meteorol.* 11: 37-51.

- Lang, A. R. G., 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agric. For. Meteorol.* 41: 179-186.
- 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. *Agr. Forest Meteorol.* 55:191-212.
- Lang, A.R.G., McMurtrie, R.E. and Benson, M.L., 1991. Validity of surface area indices of *Pinus Radiata* estimated from transmittance of the sun's beam. *Agric. For. Meteorol.*, 57: 157-170.
- Leblanc, S. G., Chen, J. M., Kwong, M., 2002. Tracing Radiation and Architecture of Canopies. TRAC MANUAL Version 2.1.3, Natural resources Canada, 25 s.
- LI-COR, 1992. LAI-2000 Plant Canopy Analyser. Instruction manual. LICOR, Lincoln, Nebraska, US, 174 s.
- LI-COR, 2009. Instruction manual. LAI-2200 Plant canopy analyzer, LICOR, Lincoln, Nebraska, US, 211 s.
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D., Jarvis, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell Environ.* 22: 715-740.
- McShane, M.C., Carlile, D. W., Hinds, W. T., 1993. The effect of collector size on forest litter-fall collection and analysis. *Can. J. Forest Res.*, 13: 1037-1042.
- Mikita, T., Klimánek, M., Cibulka M. 2013. Hodnocení metod interpolace dat leteckého laserového skenování pro detekci stromů a měření jejich výšek. *Zprávy lesnického výzkumu*, 58 (2): 99-106.
- Mikita, T., Patočka, Z., Sabol, J. 2014. Výpočet indexu listové plochy (LAI) v lesních porostech na základě dat leteckého laserového skenování v podmínkách České republiky. *Zprávy lesnického výzkumu*, 59, 2014 (4): 234-242.
- Morsdorf F., Kotz B., Meier E., Itten K.I., Allgower B. 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104 (1): 50-61.
- Mrkva, R., 2009. Jak zabránit zhoršování zdravotního stavu našich lesů. *Lesnická práce*. 5: 13-15.
- Myneni, R.B., Nemani, R.R., Running, S.W., 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE T. Geosci. Remote*, 35: 1380-1393.
- Neumann, H. H., Den Hartog, G. D., Shaw, R. H., 1989. Leaf-Area Measurements Based on Hemispheric Photographs and Leaf-Litter Collection in a Deciduous Forest During Autumn Leaf-Fall. *Agric. For. Meteorol.*, 45: 325-345.

- Norman, J. M., Campbell, G. S., 1989. Canopy structure. In: Pearcy, R.W., Ehleringer, J., Mooney, H.A., Rundel, P.W., Plant Physiological Ecology. Field Methods and Instrumentation: 301-325. Chapman and Hall, London.
- Planchais, I., Pontailler, J.-Y., 1999. Validity of leaf areas and angles estimated in a beech forest from analysis of gap frequencies, using hemispherical photographs and a plant canopy analyser. *Ann. For. Sci.*, 56: 1-10.
- Pokorný, R. 2002. Index listové plochy v porostech lesních dřevin. Doktorská disertační práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 135 s.
- Pokorný, R., 2015, Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin. Brno, Centrum výzkumu globální změny AV ČR, 38 s.
- 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.
- PSI, 2015. LaiPen LP 100. Manual and User Guide. PSI, Drásov, Czech Republic, 41 s.
- Rajda, V., 1997. Zjištění vitality stromů: Elektrodiagnostika- výkonná metoda hodnocení zdravotního stavu stromů a lesů. *Lesnická práce*. 1/97: 8-10.
- Riaño D., Valladares F., Condés S., Chuevico E. 2004. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (3-4): 269-275.
- Ross, J., 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk, The Hague, 391 s.
- Ryan, M. G., Bond, B. J., Law, B. E., Hubbard, R. M., Woodruff, D., Cienciala, E., Kucera, J., 2000. Transpiration and whole-tree conductance in ponderosa pine trees of different heights. *Oecologia*, 124: 553-560.
- Schulze, E. D., 1982. Plant life forms and their carbon, water, and nutrient relations. IN *Encyclopedia of Plant Physiology*, New Series, Vol. 12B. Springer-Verlag, Berlin, pp. 615-676.
- Česták, Z., Šatný, J., Četlík, I., Květ, J., Nečas, J., Smetánková, M., Slavík, B., Janáček, J., Voznenskiy, V.L., Bartoň, J., Avratová, 1966. *Metody studia fotosyntetické produkce rostlin*. Academia Praha, 394 s.
- University of Michigan, The global carbon cycle [online] citováno 16. 4. 2017. Dostupné na World Wide Web: [http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/king/carbon\\_cycle/carbon\\_cycle.html](http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/king/carbon_cycle/carbon_cycle.html).
- Václavová, L., 2007, Aleje jako součást naší krajiny, 28 min.

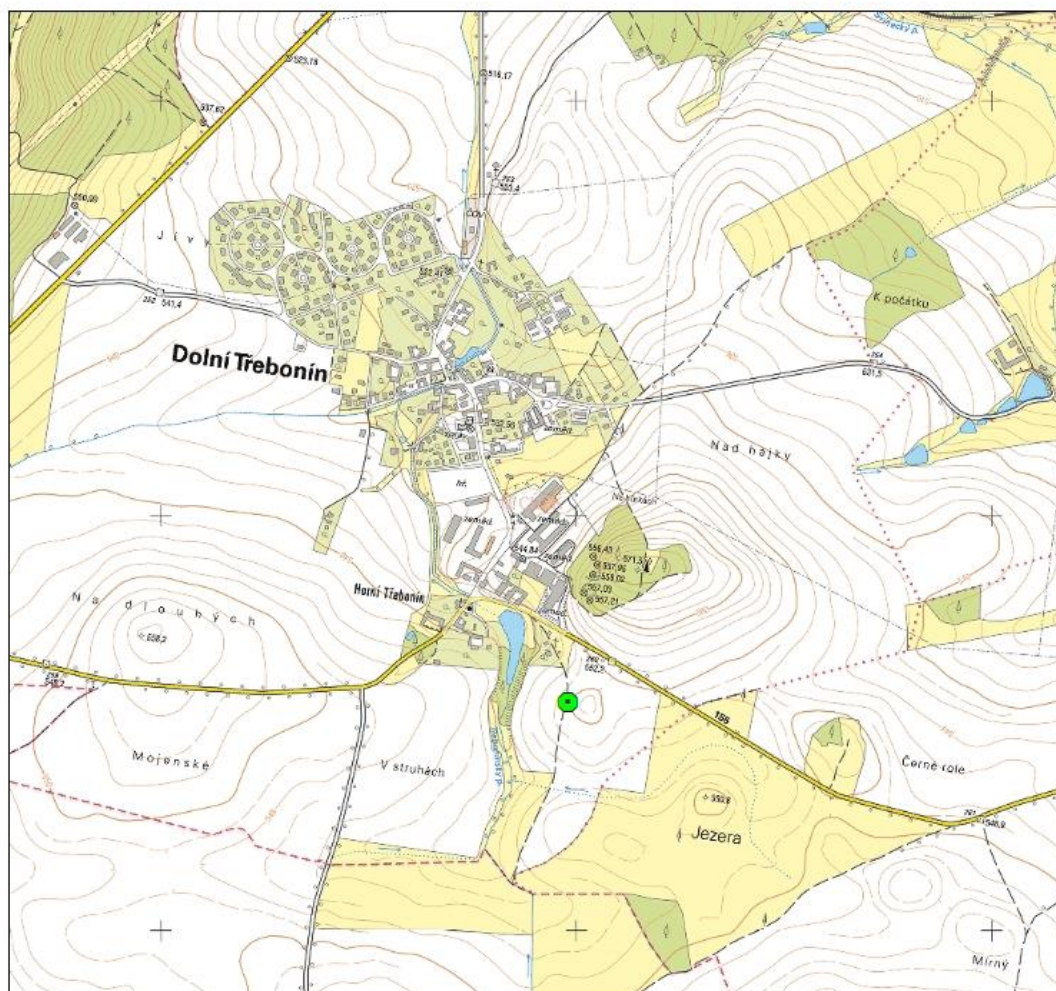
- Vanderbilt, V. C., Bauer, M. E., Siva, L. F., 1979. Prediction of solar irradiance distribution in a beat canopy using a laser technique. *Agric. Meteorol.*, 20: 147-160.
- van Gardingen, P. R., Jackson, G. E., Hernandez-Daumas, S., Russell, G., Sharp, L., 1999. Leaf Area Index Estimates Obtained for Clumped Canopies Using Hemispherical Photography. *Agric. For. Meteorol.*; 94: 243-257.
- 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.
- Vyhlá-ka Ministerstva zem d lství . 78/1996 Sb., o stanovení pásem ohrožení les pod vlivem imisí.
- Waren Wilson, J., 1963. Errors resulting from thickness of point quadrants. *Aust. J. Bot.* 11: 178-188.
- Waring, R. H., 1983. Estimation forest growth and efficiency in relation to canopy leaf area. *Adv. Ecol. Res.* 13: 327-354.
- 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.
- Watson, D. J., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.*, 11 (1): 41-76.
- Welles, J. M., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, 5:31-43.
- Zákon . 114/1992 Sb., o ochran p írody a krajiny, ve zn ní pozd j-ích p edpis .
- Zhao, F. a kol., 2012. Measuring gap fraction, element clumping index and LAI in Sierra Forest stands using a full-waveform ground-based lidar. *Remote Sensing of Environment*. 125 (2012): 73-79.

## Seznam p íloh

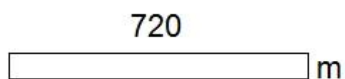
- P íloha . 1: Situa ní umíst ní solitéru 1
- P íloha . 2: Situa ní umíst ní solitéru 2
- P íloha . 3: Situa ní umíst ní solitéru 3
- P íloha . 4: Situa ní umíst ní solitéru 4
- P íloha . 5: Situa ní umíst ní solitéru 5
- P íloha . 6: Situa ní umíst ní aleje 1
- P íloha . 7: Situa ní umíst ní aleje 2
- P íloha . 8: Situa ní umíst ní aleje 3

Příloha . 1: Situace umístění solitéru 1

## Solitér 1 – Dub letní u obce Dolní Třebonín-Horní Třebonín



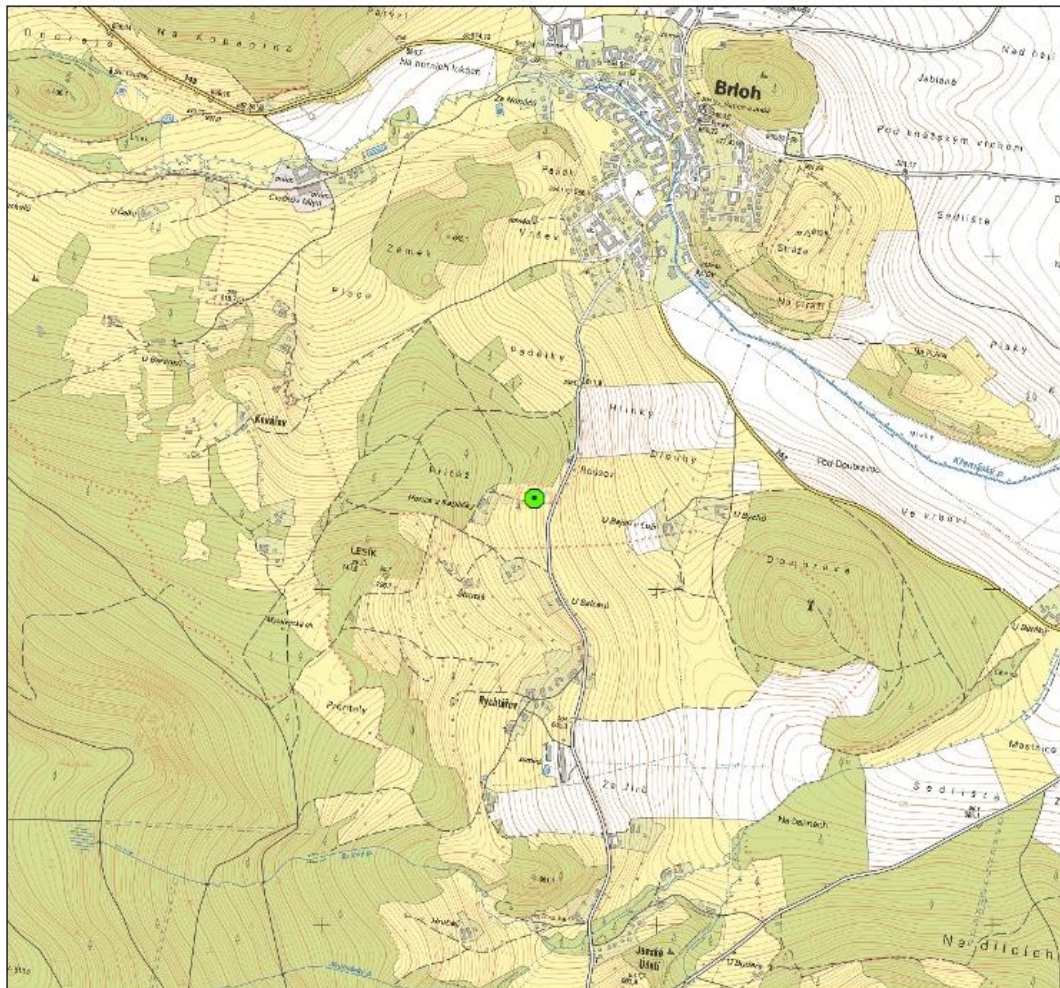
● Solitér 1



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

Příloha . 2: Situace umístění solitéru 2

## Solitér 2 – Dub zimní u obce Brloh



● Solitér 2

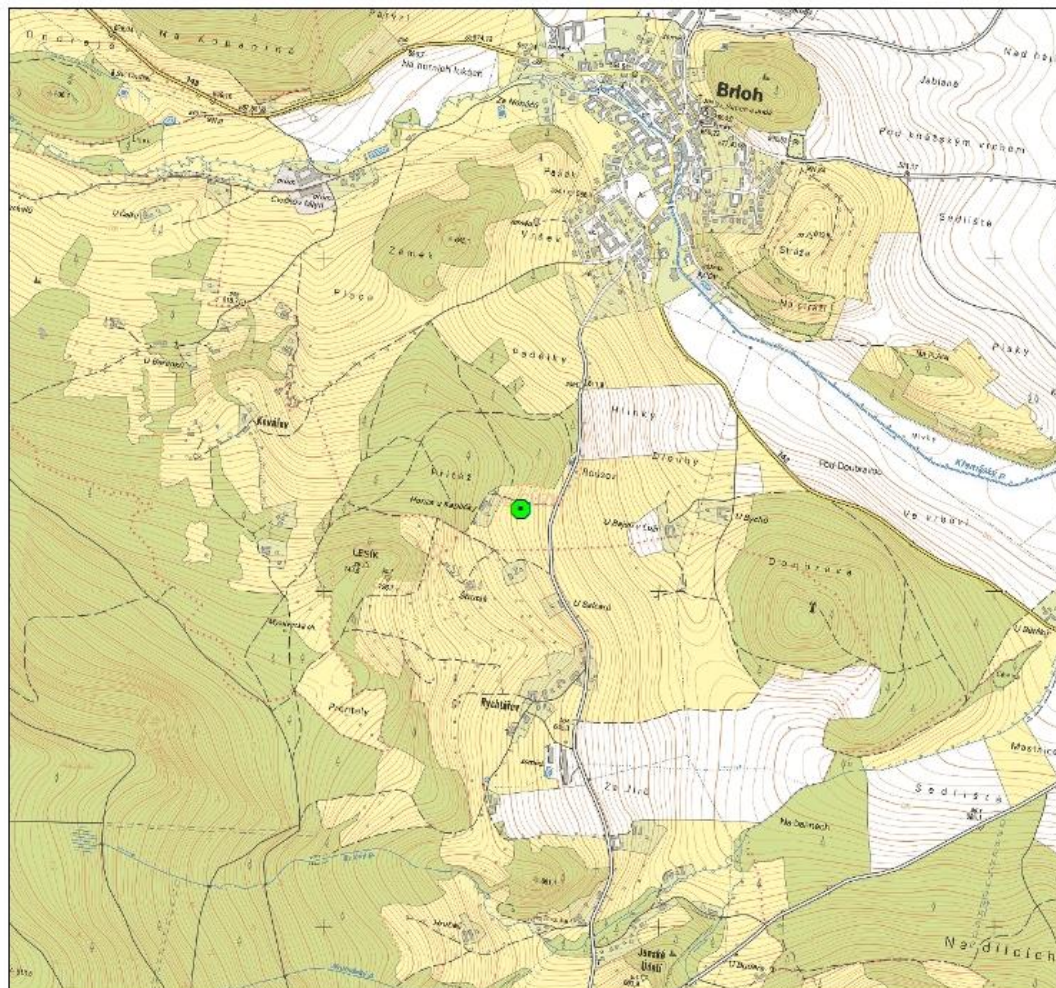
890  
m



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

Příloha 3: Situace umístění solitéru 3

## Solitér 3 – Lípa velkolistá u obce Brloh



● Solitér 3

890  
m

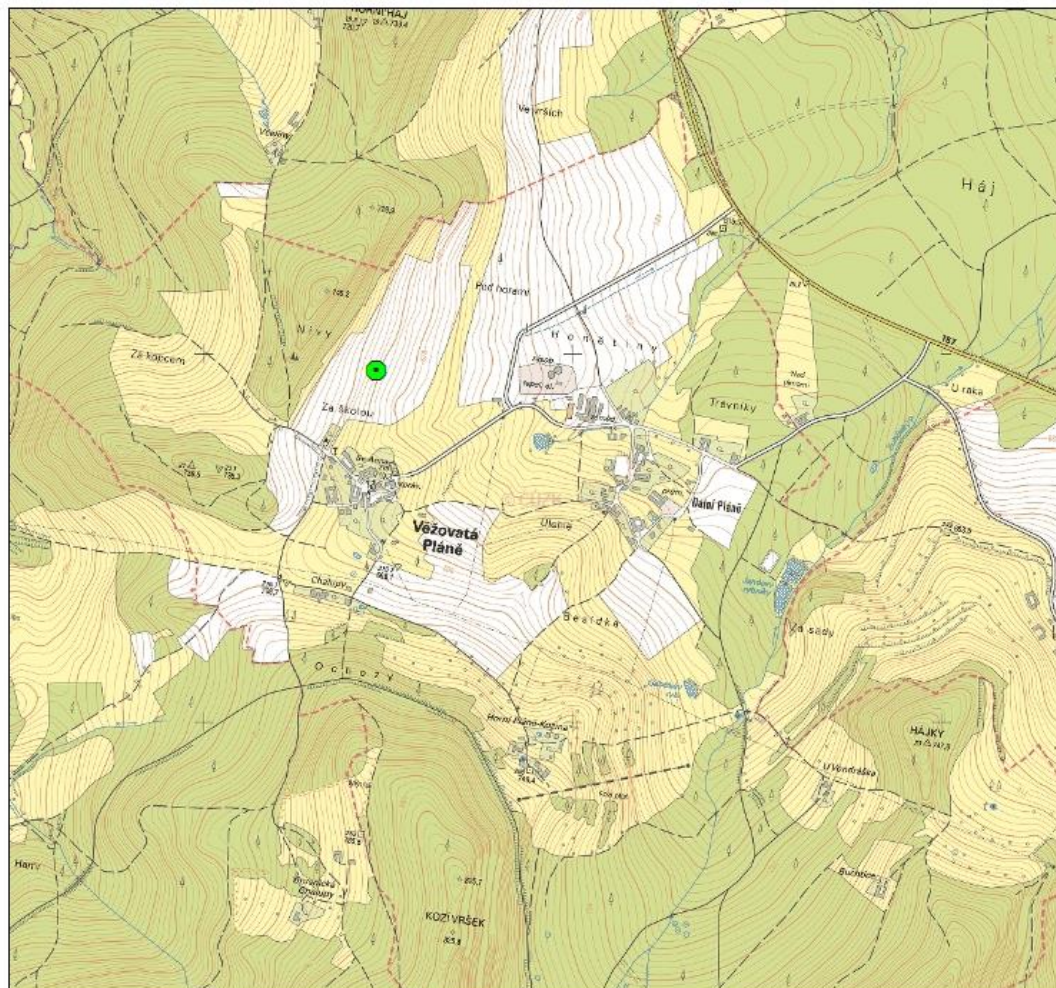


Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

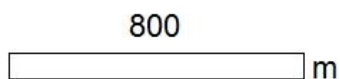


Příloha . 4: Situace umístění solitéru 4

## Solitér 4 – Dub letní u obce Věžovatá Pláně



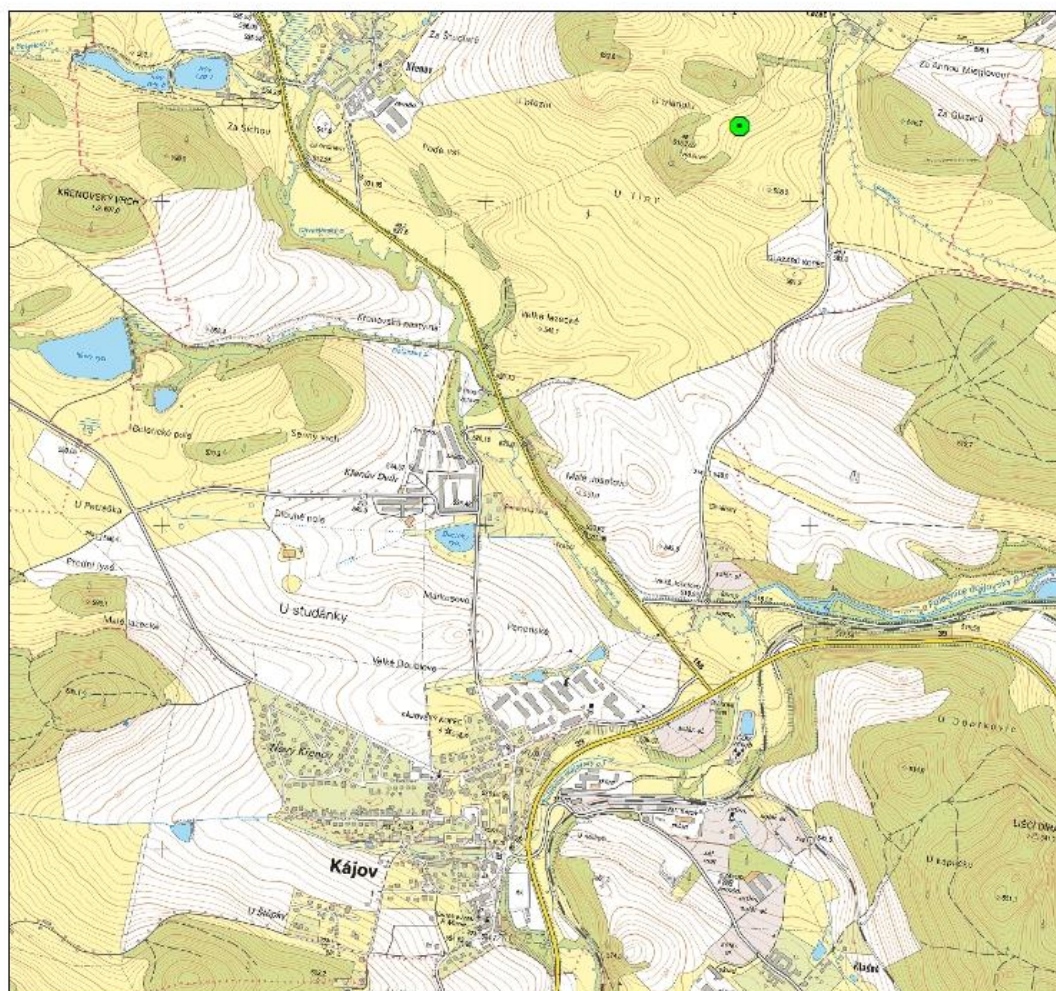
● Solitér 4



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

Příloha . 5: Situace umístění solitéru 5

## Solitér 5 – Slivoň švestka u obce Kájov-Lazec



● Solitér 5

920  
m



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

Příloha . 6: Situace umístění aleje 1

## Aleje 1 – Topolová alej u obce Velešín-Skřídla



 Aleje 1

790

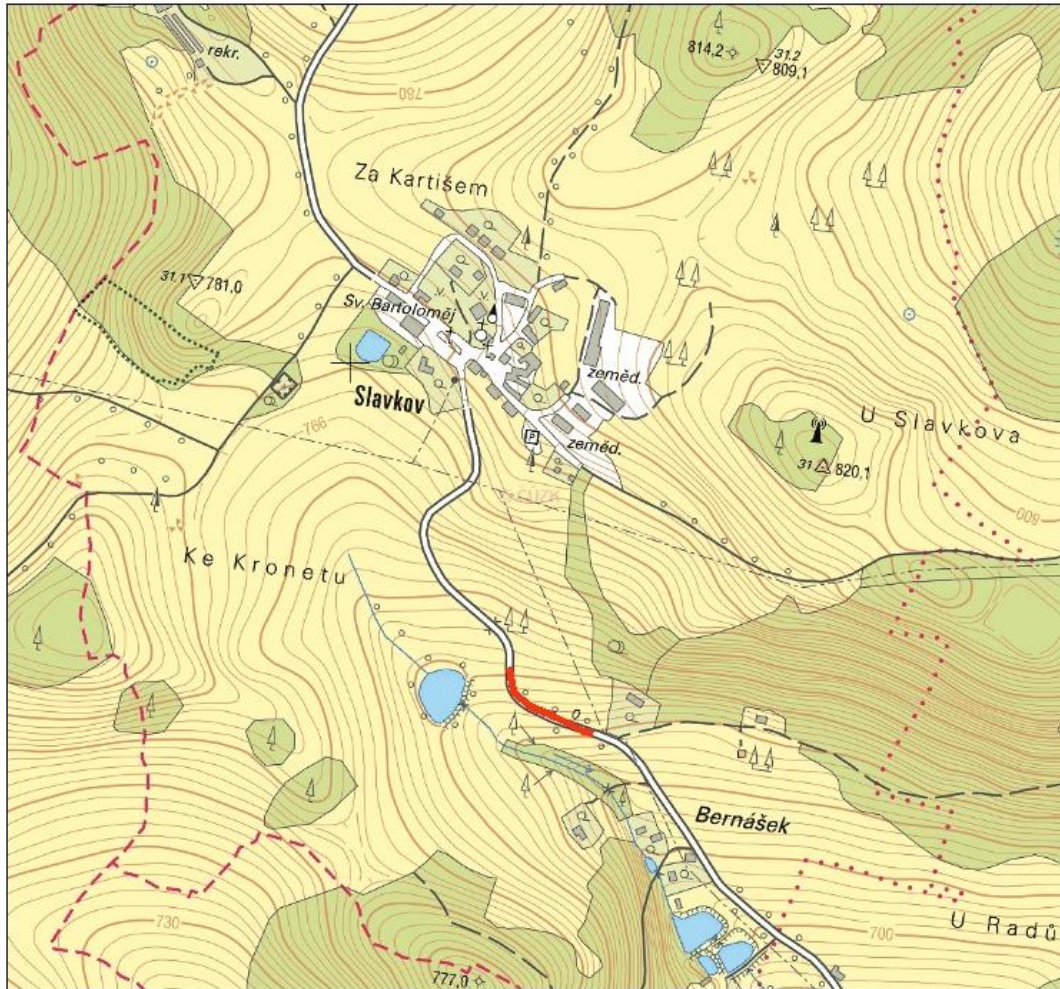
 m



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

Příloha . 7: Situace umístění aleje 2

## Jírovcová alej u obce Bohdalovice-Slavkov



— Alej 2

380

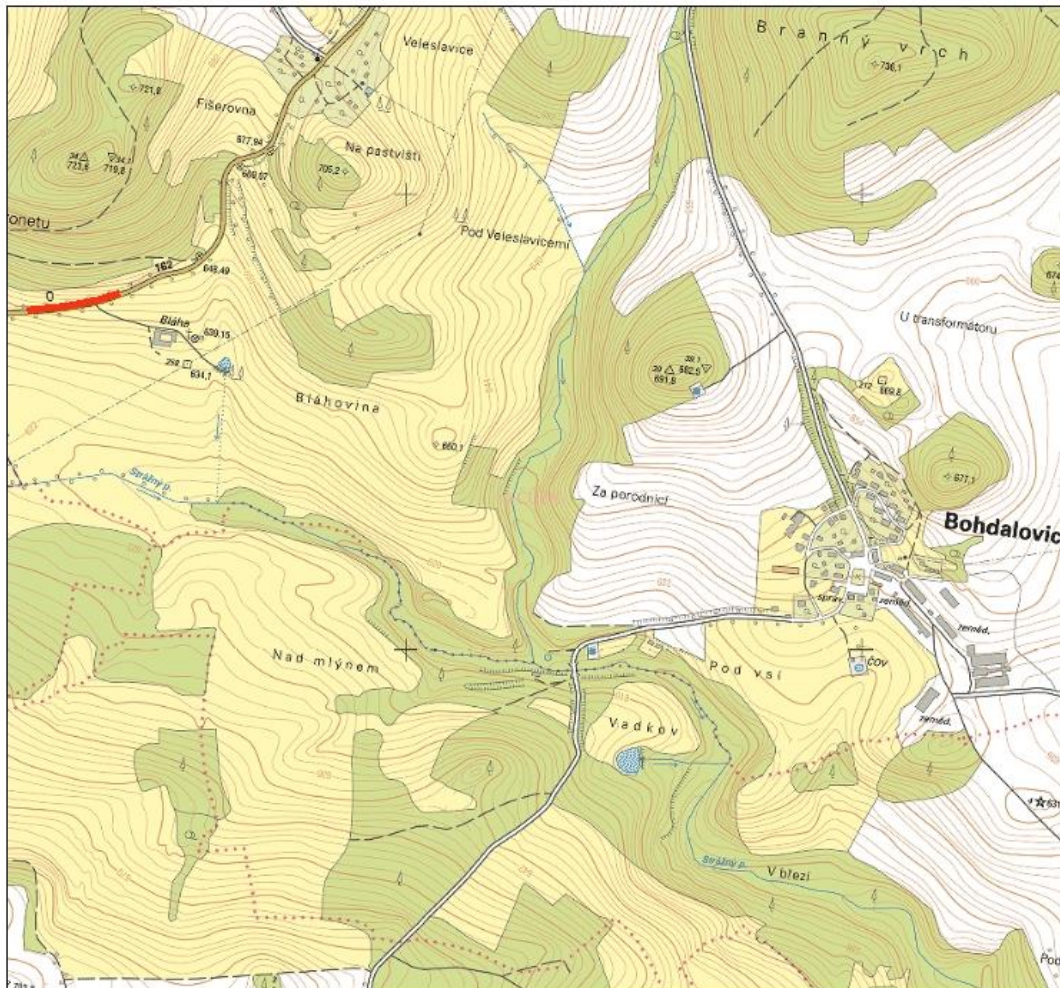
m



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK

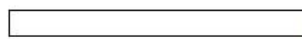
Příloha . 8: Situace umístění aleje 3

## Jasanová alej u obce Bohdalovice-statek Bláha



 Alej 3

650

 m



Zpracovala Tereza Binková, 2017  
Zdroj ZM10: WMS CUZK