

# Vliv probírkového zásahu na sekvestraci uhlíku a strukturu porostu

DISERTAČNÍ PRÁCE



**Ústav zakládání a pěstění lesů**

Lesnická a dřevařská fakulta Mendelovy univerzity v Brně

 Lesnická  
a dřevařská  
fakulta

Mendelova  
univerzita  
v Brně 

Jan Krejza

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav zakládání a pěstění lesů

VLIV PROBÍRKOVÉHO ZÁSAHU NA SEKVESTRACI UHLÍKU A  
STRUKTURU POROSTU

**DISERTAČNÍ PRÁCE**



Nevím, jak mohou můj život ovlivňovat hvězdy vzdálené miliony kilometrů víc, než stromy a lidé v mé blízkosti. Stromy, jichž se mohu bezprostředně dotýkat a z nichž cítím ohromnou energii - růstové fluidum. Vždyť každoročně - po celý svůj život - mi demonstrují své znovuzrození.

*J. W. Goethe*

## **Poděkování:**

*Tímto bych chtěl především poděkovat mému školiteli doc. Ing. Radku Pokornému, Ph.D za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích, dále pak všem kamarádům a kolegům z Ústavu zakládání a pěstění lesů za cenné rady a pomoc při zpracování této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a všem blízkým za podporu a pomoc po celou dobu studia.*

*Práce byla zpracována za podpory projektu IGA 66/2013 a výzkumného projektu Technologické agentury ČR č. TA02010945 s názvem „ALAI-02DD – nový přístroj pro lesnickou praxi“.*

## Prohlášení:

Část výsledků této práce byla publikována v těchto odborných pracích:

**KREJZA, J.,** SVĚTLÍK, J., POKORNÝ, R., 2015. Spatially explicit basal area growth of Norway spruce. *Trees - Structure and Function* 29 (10), 1545-1558. ISSN: 0931-1890. doi: <http://link.springer.com/journal/468>.

**KREJZA, J.,** POKORNÝ, R., MARKOVÁ, I. 2013. Is allometry for aboveground organ's mass estimation in young Norway spruce stands affected by different type of thinning? *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 61 (6), 1755-1761.

**KREJZA, J.,** ROSÍK, J., 2013. Produkční schopnost smrkových porostů s různou variantou pěstební výchovy. In *SilvaNet-WoodNet 2013*. 1. vyd. Zemědělská 1, Brno, 613 00: Mendelova univerzita v Brně, 2013, s. 49--50. ISBN 978-80-7375-903-2.

SVĚTLÍK, J., **KREJZA, J.,** MENŠÍK, L., POKORNÝ, R., MAZAL P., KULHAVÝ, J. Sekvestrace uhlíku smrkovým porostem (*Picea abies* (L.) Karst.) v oblasti Dražanské vrchoviny, *Zprávy lesnického výzkumu*. (In Press)

POKORNÝ, R., **KREJZA J.,** 2012. Vliv probírky na přírůst biomasy a efektivitu využití sluneční radiace v mladé horské smrčtině. In SANIGA, M. -- KUCBEL, S. -- JALOVÍAR, P. *Pestovanie lesa v strednej Europe*. 1. vyd. Zvolen: TU Zvolen, 2012, s. 201--211. ISBN 978-80-228-2369-2.

*Prohlašuji, že jsem disertační práci „VLIV PROBÍRKOVÉHO ZÁSAHU NA SEKVESTRACI UHLÍKU A STRUKTURU POROSTU“ zpracoval sám a uvedl jsem všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje disertační práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.*

*Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že univerzita má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.*

*Autor kvalifikační práce se dále zavazuje, že před sepsáním licenční smlouvy o využití autorských práv díla s jinou osobou (subjektem) si vyžádá písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuje se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.*

V Brně, dne 11. 1. 2016

.....

Ing. Jan Krejza

**Ing. Jan Krejza**

**Disertační práce:** VLIV PROBÍRKOVÉHO ZÁSAHU NA SEKVESTRACI UHLÍKU A STRUKTURU POROSTU

**Thesis:** THE IMPACT OF THINNING TREATMENT TO CARBON SEQUESTRATION AND FOREST STRUCTURE

#### **ABSTRAKT**

Světové lesy významně přispívají k celkové uhlíkové bilanci, změny příjmu uhlíku lesními ekosystémy mohou působit jako důležitá zpětná vazba na současné zvýšení koncentrace atmosférického oxidu uhličitého. V disertační práci je hodnocen vliv porostní výchovy na parametry porostu, alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy a sekvestraci a obsah uhlíku. Dále je v práci řešen vztah tvaru, velikosti a orientace sociální plochy stromu ke vztahu k růstu jednotlivých stromů. Tyto aspekty jsou hodnocené v mladých smrkových porostech s různým typem porostní výchovy ve vrchovinné a horské oblasti. Výsledky práce prokázaly, že porostní výchova má výrazný vliv na morfologické charakteristiky kmene a koruny stromu, a tím i na stabilitu daného jedince. V práci nebyl prokázán statisticky významný vliv porostní výchovy na alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy. Tato práce dále potvrzuje, že kompetice hraje důležitou roli při odhadu přírůstu stromu. Přírůst stromu je dále ovlivněn tvarem a velikostí sociální plochy a její orientací ke světovým stranám. Výsledky práce ukázaly, že mladá vrchovinná a mladá horská smrčina se významně liší obsahem uhlíku v jednotlivých orgánech stromu a tyto mladé smrkové porosty jsou významným úložištěm uhlíku.

**Klíčová slova:** smrk ztepilý, biomasa, uhlík, přírůst, alometrické vztahy, expanzní faktory, kompetice, sociální plocha, výchova lesních porostů, mechanická stabilita

#### **ABSTRACT**

The world's forests significantly contribute to the overall carbon balance. Changes in carbon uptake by forest ecosystems can be an important feedback on the current increase in the concentration of atmospheric carbon dioxide. This thesis evaluated the effect of thinning on the stand parameters, allometric relationships for estimation of the above ground biomass, carbon content and carbon sequestration. Furthermore, a relationship between the shape, size and orientation of the social area of a particular tree to the growth of the trees was developed. These aspects were evaluated within the spruce pole stands under different types of thinning in the upland and mountain zones. The results of the work showed that thinning had a significant impact on the morphological characteristics of the stem and the tree crown, and thus to the mechanical stability of the certain trees. No significant effects of thinning on the allometric relationships of aboveground biomass estimation were observed. This study also confirmed that competition played an important role for estimation of the tree increment. Increment of the tree was also influenced by the shape and the size of the social area and its orientation to the cardinal points. The results indicated that spruce pole stands growing in uplands and mountains had significantly different carbon content in different organs of the tree and these spruce stands are an important carbon sink.

**KEYWORDS:** carbon, sequestration, Norway spruce, growth, increment, above and below ground biomass, allometric relationships, biomass expansion factors, competition, social area, mechanical stability, forest tending

## Obsah

1.	Úvod a cíl práce .....	1
2.	Teoretická část .....	3
<b>2.1</b>	<b>Rozbor problematiky .....</b>	<b>3</b>
2.1.1	Uhlík v lesních ekosystémech .....	3
2.1.2	Struktura porostu ve vztahu k sekvestraci uhlíku .....	10
2.1.3	Vliv probírky na strukturu porostu a sekvestraci uhlíku.....	15
2.1.4	Způsoby stanovení biomasy jednotlivých stromů a biomasy na úrovni porostu.....	18
3.	Experimentální část .....	23
<b>3.1</b>	<b>Popis lokalit .....</b>	<b>23</b>
3.1.1	Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž .....	23
3.1.2	Výzkumná plocha Rájec-Němčice.....	26
3.1.3	Výzkumné plochy Leopoldka a Salaška (Beskydy, Kněžyně).....	28
<b>3.2</b>	<b>Vliv historie výchovy na parametry porostu a alokaci biomasy.....</b>	<b>32</b>
3.2.1	Úvod .....	32
3.2.2	Materiál a metody .....	33
3.2.3	Výsledky.....	39
3.2.4	Diskuze.....	49
<b>3.3</b>	<b>Ovlivňuje typ probírky alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy? .....</b>	<b>54</b>
3.3.1	Úvod .....	54
3.3.2	Materiál a metody .....	55
3.3.3	Výsledky.....	57
3.3.4	Diskuze.....	62
<b>3.4</b>	<b>Tvar a velikost sociální plochy ke vztahu k růstu jednotlivých stromů.....</b>	<b>65</b>
3.4.1	Úvod .....	65
3.4.2	Metodika .....	67
3.4.3	Výsledky.....	76
3.4.4	Diskuze.....	94
<b>3.5</b>	<b>Vliv typu a intenzity probírkového zásahu na sekvestraci a obsah uhlíku.....</b>	<b>98</b>
3.5.1	Úvod .....	98
3.5.2	Materiál a metody .....	99
3.5.3	Výsledky.....	102
3.5.4	Diskuze.....	118

4.	Závěr a doporučení pro praxi .....	124
4.1	Vliv historie výchovy na parametry porostu a alokaci biomasy .....	124
4.2	Ovlivňuje typ probírky alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy? .....	126
4.3	Tvar a velikost sociální plochy ke vztahu k růstu jednotlivých stromů.....	128
4.4	Vliv typu a intenzity probírkového zásahu na sekvestraci a obsah uhlíku.....	131
5.	Conclusions.....	133
5.1	The effect of thinning history on the stand parameters and biomass allocation.	133
5.2	Is allometry for aboveground organ's mass estimation in young Norway spruce stand affected by different type of thinning?.....	134
5.3	The shape and size of the social area in relationship to the growth of particular tree .....	135
5.4	The impact of thinning type and intensity to carbon content and sequestration	137
6.	Seznam použité literatury .....	139
7.	Přílohy.....	157
7.1	Seznam obrázků .....	157
7.2	Seznam tabulek.....	160

## Seznam vybraných zkratek a symbolů

<b>AA</b>	potenciálně prostorově dostupná plocha stromu
<b>AS</b>	Sociální plocha stromu
<b>AS<sub>(rel.)ik</sub></b>	relativní velikost segmentu sociální plochy
<b>AS<sub>ik</sub></b>	velikost sociální plochy pro jednotlivý sektor <i>k</i> vzorníkového stromu <i>i</i>
<b>BA</b>	výčetní kruhová plocha stromu
<b>BB</b>	biomasy větví
<b>BEFs</b>	expanzní faktory
<b>CI</b>	kompetiční index (Avery a Burkhart 1983)
<b>CI<sub>x</sub></b>	kompetiční index s různými proměnými (DBH, H, CP, BA, CL)
<b>ČSAV</b>	Československá akademie věd
<b>C<sub>p</sub></b>	korunová projekce
<b>C<sub>v</sub></b>	objem koruny
<b>D</b>	tloušťka kmene v blíže specifikované výšce
<b>DBH</b>	výčetní tloušťka kmene ve výšce 1,3 m nad zemí
<b>DBHrel.(i)</b>	relativní hodnota DBH pro daný strom <i>i</i> v rámci výzkumné plochy
<b>D<sub>ij</sub></b>	vzdálenost mezi zájmovým stromem a jeho kompetitorem
<b>D<sub>i max</sub></b>	maximální vážená vzdálenost mezi zájmovým stromem a jeho kompetitorem
<b>D<sub>i min</sub></b>	minimální vážená vzdálenost mezi zájmovým stromem a jeho kompetitorem
<b>EEP</b>	Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž
<b>ESFRI</b>	European Strategy Forum on Research Infrastructures
<b>F<sub>1,3</sub></b>	nepravá výtvarnice kmene
<b>F<sub>c</sub></b>	výtvarnice koruny
<b>FS</b>	řídká varianta smrkového porostu na ploše Experimentální ekologického pracoviště Bílý Kříž
<b>FD</b>	hustá varianta smrkového porostu na ploše Experimentální ekologického pracoviště Bílý Kříž
<b>G<sub>1,3</sub></b>	výčetní kruhová základna porostu
<b>g<sub>1,3</sub></b>	výčetní kruhová plocha stromu
<b>H</b>	výška stromu
<b>H<sub>c</sub></b>	délka živé koruny
<b>I<sub>5 abs.(ij)</sub></b>	absolutní přírůst DBH stromu <i>i</i> na výzkumné ploše <i>j</i> za sledované 5leté období
<b><math>\bar{I}_5</math>(j)</b>	průměrný přírůst DBH za 5leté období na ploše <i>j</i> .
<b>I<sub>5 rel.(i)</sub></b>	relativní hodnota přírůstu DBH za pětileté období
<b>IBP</b>	International Biological Programme
<b>ICOS</b>	Integrated Carbon Observation System
<b>I<sub>k</sub></b>	kompenzační bod fotosyntézy- bod kdy se asimilace vyrovnává respiraci
<b>I<sub>g5</sub></b>	5letý přírůst na výčetní kruhové ploše stromu
<b>I<sub>s</sub></b>	bod saturace fotosyntézy
<b>LAI</b>	index listové plochy



<b>LB</b>	biomasa listoví
<b>L<sub>c</sub></b>	výška nasazení živé koruny
<b>LTER</b>	Long-term Ecological Research
<b>MaB</b>	projekt Člověk a biosféra
<b>MCF</b>	průměrná výtvarnice koruny
<b>MSF</b>	průměrná výtvarnice kmene
<b>Mt</b>	megatuna
<b>MWD</b>	průměrná vážená vzdálenost mezi zájmovým stromem a jeho kompetitory
<b>N</b>	počet stromů na hektar
<b>NTD<sub>6</sub></b>	kompetiční index šesti nejbližších stromů
<b>P</b>	roční úhrn srážek
<b>ppm</b>	počet částic na jeden milion částic (10 <sup>-9</sup> )
<b>RB</b>	biomasa kořenů
<b>S-Z</b>	segmentace sociální plochy ve směru sever-západ
<b>SB</b>	biomasa kmene
<b>SD</b>	směrodatná odchylka
<b>SDI</b>	Index hustoty porostu
<b>SK</b>	štíhlostní koeficient kmene
<b>SK<sub>k</sub></b>	štíhlostní koeficient koruny
<b>SV-SZ</b>	segmentace sociální plochy ve směru severovýchod - severozápad
<b>Ta</b>	průměrná roční teplota vzduchu ve výšce 2 m nad zemí
<b>TA</b>	celková biomasa
<b>TBA</b>	celková nadzemní biomasa
<b>TCRB</b>	celková podzemní biomasa hr. kořenů
<b>TfA</b>	plocha s úrovnovým typem probírky v rámci výzkumné plochy Rájec-Němčice
<b>TfB</b>	plocha se silnou podúrovňovou probírkou v rámci výzkumné plochy Rájec-Němčice
<b>V</b>	objem kmene
<b>WVP</b>	vážené Voroného polygony
<b>Xi basal</b>	výčetní kruhová plocha vzorníkového stromu
<b>Xj basal</b>	výčetní kruhová plocha konkurenčního stromu

## 1. Úvod a cíl práce

Světové lesy významně přispívají k celkové uhlíkové bilanci, změny příjmu uhlíku lesními ekosystémy mohou působit jako důležitá zpětná vazba na současné zvýšení koncentrace atmosférického oxidu uhličitého (MALHI et al., 1999). Proto se v současné době otázka uhlíkové bilance dostává do popředí napříč výzkumnými centry celého světa (SELLERS et al., 1997; BALDOCCHI et al., 2001; ANDREAE et al., 2002).

Lesy pokrývají přibližně jednu třetinu plochy Evropy s velkými rozdíly mezi zeměmi od 71 % ve Finsku až po 1 % na Kypru. Zalesněná plocha v Evropě nepřetržitě roste přibližně o 0,5 miliónu hektarů ročně. V průměru přibližně dvě třetiny růstu objemu lesů v EU se využívají na výroby a energii. Dosud však není zcela zjištěno, jaké hospodářské parametry by měly lesní porosty splňovat, aby byla efektivita zachytu a využití vzdušného uhlíku co největší (MISSON et al., 2003, ERIKSSON, 2006, GARCIA- GONZALO et al., 2007, POHJOLA a VASLSTA, 2007).

Výchovnými zásahy v lesních porostech významně ovlivňujeme porostní mikroklima a růstové podmínky jednotlivých stromů, ale i celého porostu. Vzhledem k výrazným změnám energomateriálních toků v lesním ekosystému, dochází i k modifikacím schopností lesního porostu plnit celospolečenské funkce (ROŽNOVSKÝ a LITSCHMANN, 2003).

V současné době je potřeba zaměřit se v rámci sektoru lesnictví zejména na jeho stabilizaci. S tím úzce souvisí provázanost adaptačních a mitigačních opatření, neboť opatření směřovaná k zamezení plošného hroucení lesních ekosystémů v důsledku klimatické změny jsou zároveň i opatřeními, která stabilizují zásoby uhlíku v lesích, a tím působí proti akceleraci klimatické změny (CIENCIALA, 2011).

Sektor lesnictví a schopnost lesních porostů vázat vzdušný uhlík se dostává do popředí zájmu, obzvláště v současné době, kdy je pořádána konference OSN o klimatické změně v Paříži (21. Konference smluvních stran Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu). Tato pozornost je lesnímu sektoru věnována proto, že tento sektor kromě uvolňování CO<sub>2</sub> dokáže vykazovat i jeho propady. Jak dokazují i výsledky této práce, lesní porost je významným úložištěm uhlíku a může tak hrát významnou úlohu v otázce budoucího vývoje klimatické změny. Tímto se dá očekávat čím dál větší tlak na lesní hospodářství aplikovat takové postupy, které budou mít za výsledek maximalizaci poutání vzdušného uhlíku do lesních ekosystémů.

Předkládaná disertační práce se zabývá tématem vlivu probírkového zásahu na sekvestraci uhlíku a strukturu porostu. Experimentální část práce probíhala v čistých smrkových porostech v oblasti Dražanské vrchoviny a v čistých smrkových porostech horské oblasti Moravskoslezských Beskyd. Práce je zaměřena na několik aspektů týkajících se sekvestrace uhlíku a struktury porostu.

Prvním dílčím cílem práce bylo zhodnocení vlivu historie výchovy na parametry porostu. Hlavním cílem bylo zhodnocení vlivu výchovy porostu na morfologii kmene a koruny a vztah těchto morfologických znaků ke stabilitě porostu. Dále bylo cílem této kapitoly zhodnocení produkce a produkčního potenciálu ploch s odlišnou historií porostní výchovy.

Druhým dílčím cílem práce bylo sestavení a ověření alometrických rovnic pro odhad nadzemní biomasy smrku na plochách s odlišnou porostní výchovou, a to konkrétně na ploše se silnou podúrovňovou probírkou a na ploše s úrovňovou probírkou. Cílem této kapitoly tedy bylo ověření fungování těchto vztahů na plochách s odlišnou výchovou a ověření, zda jsou alometrické vztahy pro odhad nadzemí biomasy ovlivněné dosavadní výchovou porostu.

Třetím dílčím cílem práce bylo vyhodnotit, jak nejbližší okolní prostor daného jedince smrku ovlivňuje jeho růst. Výsledkem této kapitoly by mělo být zhodnocení vlivu kompetice na růst jedinců smrku ztepilého a dále vytvoření modelů pro predikci přírůstu výčetní kruhové základny u jednotlivých stromů. Jeden z cílů je i zhodnocení vztahu mezi velikostí a tvarem sociální plochy a její tvarovou orientací ke světovým stranám a její vztah k růstu jedinců smrku.

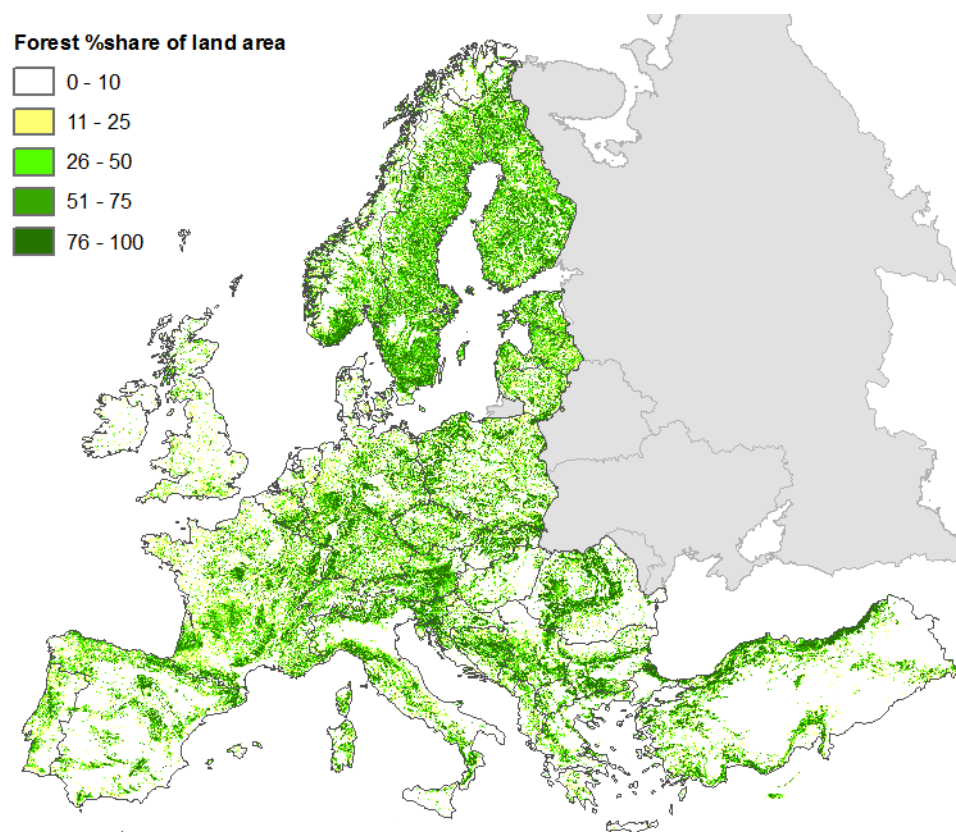
Čtvrtým dílčím cílem práce bylo zhodnotit sekvestraci uhlíku do biomasy mladých smrkových porostů v závislosti na typu a intenzitě probírkového zásahu. Porovnat obsahy uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromu a dále vyhodnotit proporční rozdělení biomasy do jednotlivých orgánů stromu v závislosti na dosavadním způsobu výchovy.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Rozbor problematiky

#### 2.1.1 Uhlík v lesních ekosystémech

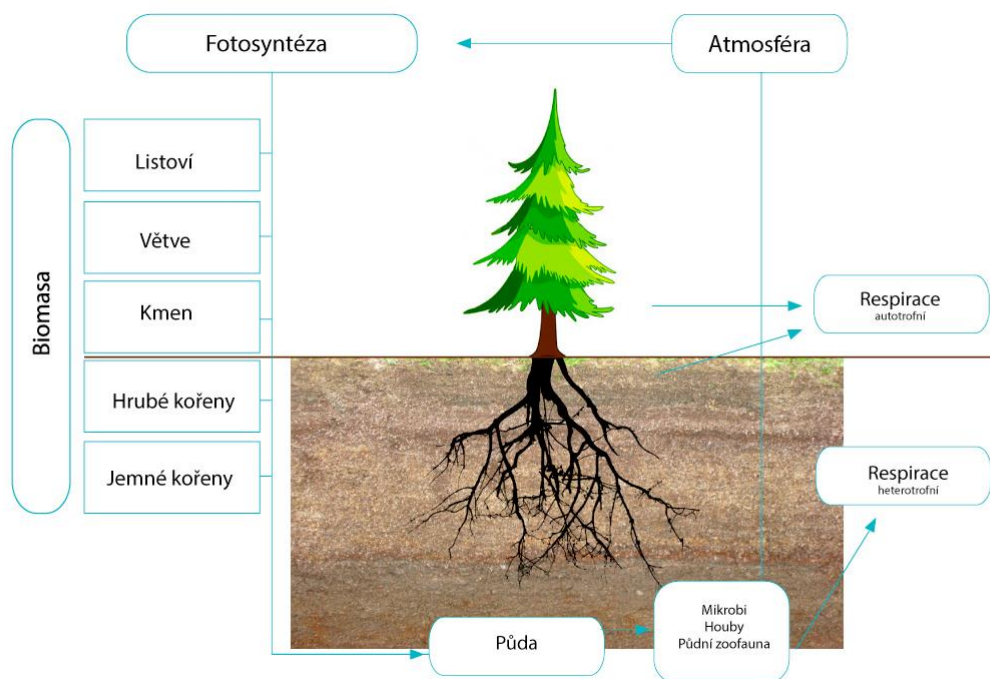
Studium koloběhu uhlíku se do popředí zájmu dostalo ve spojitosti s globální změnou klimatu. Uhlík je hlavní součástí metabolismu zelených rostlin. Kvantifikovat množství uhlíku vyměněného mezi atmosférou a různými ekosystémy, popsat jeho zdroje a propady se snaží řada studií (NABUURS et al., 1997; LAL 2005; SCHULP et al., 2008; DE VRIES a POSCH, 2011; SCHRÖDER a PESCH, 2011; WIESMEIER et al., 2013). Lesy na planetě Zemi pokrývají 42 milionů km<sup>2</sup>, což je 30 % souše. Zároveň jsou zásobárnou 45 % veškerého suchozemského uhlíku a tvoří 50 % čisté primární produkce suchozemských ekosystémů. Z toho vidíme, že lesy hrají v globálním koloběhu uhlíku nezastupitelnou úlohu (OULEHLE, HRUŠKA, 2009). Evropa má celkovou lesní plochu více než 1 miliardu hektarů a průměrnou lesnatost kolem 45 % (Obrázek 1) Lesy v rámci Evropy jsou nerovnoměrně rozloženy, vysoká míra lesnatosti je v severovýchodních zemích a v rámci ekosystémů s vyšší nadmořskou výškou.



Obrázek 1: Lesnatost v rámci Evropy (KEMPENEERS et al., 2011)

Střední Evropa, která zahrnuje Rakousko, Českou republiku, Německo, Maďarsko, Itálii, Polsko, Slovensko, Slovinsko a Ukrajinu, má víc než 52 miliónů ha s lesnatostí 35 %. Lesnatost střední Evropy se tedy blíží globálnímu průměru (FAO, 2010).

V lesních ekosystémech cirkuluje uhlík mezi atmosférou, jednotlivými složkami biomasy a půdou (Obrázek 2).



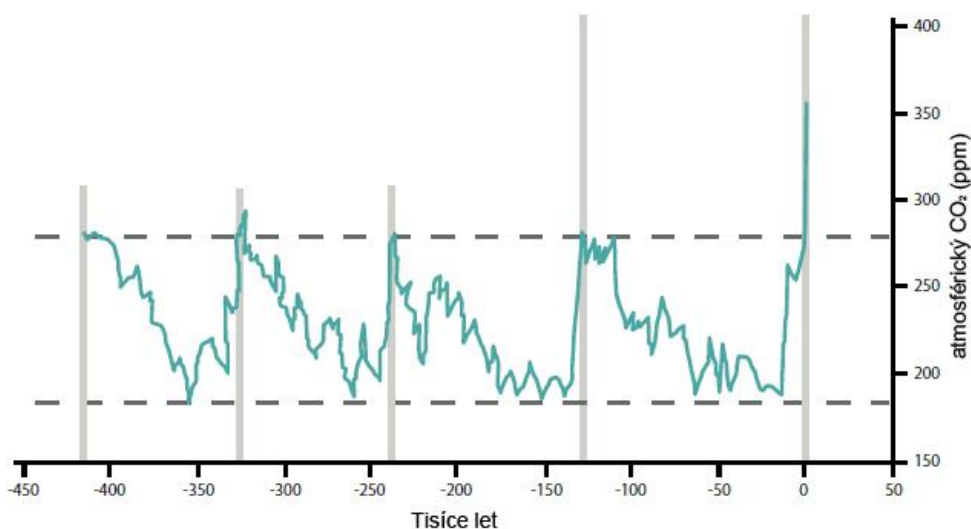
Obrázek 2: Zjednodušené schéma cyklu uhlíku v lesním ekosystému.

Uhlík je asimilován do ekosystému prostřednictvím fotosyntézy a následně alokován v jednotlivých orgánech stromu. Tradičně je výzkum zaměřený na složky nadzemní biomasy (biomasy listoví, větví a kmene) a jejich růst, ale v posledních desetiletích se dostává do popředí i význam podzemní složky biomasy (jemné a hrubé kořeny). V posledních letech bylo prokázáno, že jemné kořeny a s nimi spojené mykorrhizní houby hrají významnou roli z hlediska cyklu uhlíku (GODBOLD et al., 2003, CLEMMENSEN et al., 2013). Živé složky biomasy uvolňují část uhlíku zpět do atmosféry prostřednictvím respirace. Část biomasy vlivem stárnutí odumírá a dostává se do půdního prostředí, kde se tato organická složka rozkládá vlivem dekompozitorů a půdních bakterií, a tím se uvolňuje uhlík zpět do atmosféry. Další část uhlíku je uvolňována z půdy prostřednictvím půdních živočichů a mikroorganismů (Obrázek 2), tato složka je nazývána heterotrofní respirace (LEPPÄLAMMI-KUJANSUU et al., 2014). Biomasa stromů a půdní prostředí lesních ekosystémů jsou tímto významným úložištěm uhlíku v terestrických ekosystémech.

Česká republika má podle poslední Zelené zprávy (MA, 2014) 2 602 395 ha lesní půdy, což v přepočtu na celkovou plochu České republiky znamená lesnatost 33 %. Dřevinnému zastoupení dominují dřeviny jehličnaté se zastoupením 72,5 %. Nejvíce zastoupené dřeviny jsou v pořadí smrk, borovice, buk a dub s procentuálním zastoupením 50,7 %, 16,5 %, 8 % a 7,1 % (MA, 2014). Celková těžba dřeva byla 15,48 mil. m<sup>3</sup> za rok 2014. Celková výše těžby se v posledních letech ustálila okolo této hodnoty a od roku 2000 se stále pohybovala v intervalu od 12,85 mil. m<sup>3</sup> do 16,74 mil. m<sup>3</sup> (2000-2014). Zásoba dřevní biomasy v ČR činí 543 megatun (Mt), což představuje 272 Mt uhlíku. Hlavní část je vázána v nadzemní biomase (91 %) a zbytek v kořenech. Na 1 hektar lesní plochy připadá průměrně 100 tun uhlíku vázaného v nadzemní biomase a 150–200 tun uhlíku v půdě. Celkem je v našich lesních ekosystémech akumulováno 680–820 Mt uhlíku. (OULEHLE, HRUŠKA, 2009). Emise skleníkových plynů (včetně CO<sub>2</sub>) v ČR v roce 2007 činily celkem 150,8 Mt ekvivalentu CO<sub>2</sub>, tj. 41 Mt uhlíku. Srovnáním vyjde, že v biomase stromů a v lesní půdě je vázán téměř dvacetinásobek uhlíku oproti celkovým ročním emisím skleníkových plynů. Vzhledem k tomu, že se plocha lesní půdy neustále zvětšuje, a to hlavně na úkor půdy zemědělské, zásoba uhlíku v rámci sektoru lesnictví roste. Uplatňuje se také vzrůst doby obměny z průměrných 93 let ve třicátých letech 20. století na dnešních 115 let (OULEHLE, HRUŠKA, 2009). Průměrný roční přírůstek lesa přepočtený na 1 ha lesní půdy činil v padesátých letech 3,7 m<sup>3</sup>, dnes je to 6,8 m<sup>3</sup>. Přepočteno na uhlík, meziročně stoupá od padesátých let akumulace uhlíku ve dřevě o 15 kg uhlíku na hektar, z 1,06 t C/ha v roce 1950 na 1,89 t C/ha v roce 2007. Akumulace uhlíku je patrná v celé Evropě (CIAIS et al., 2008). Podíváme-li se na vývoj roční depozice dusíku jako faktoru, který by mohl ovlivňovat produktivitu porostu, depozice prudce stoupla z asi 6 kg N/ha v roce 1950 na 11 kg N/ha v polovině 80. let, a poté v roce 2000 klesla na 8 kg. Nejvíce stoupala produkce biomasy mezi lety 1950 a 1980, kdy každý rok vzrostla akumulace uhlíku o 25 kg C/ha (OULEHLE, HRUŠKA, 2009).

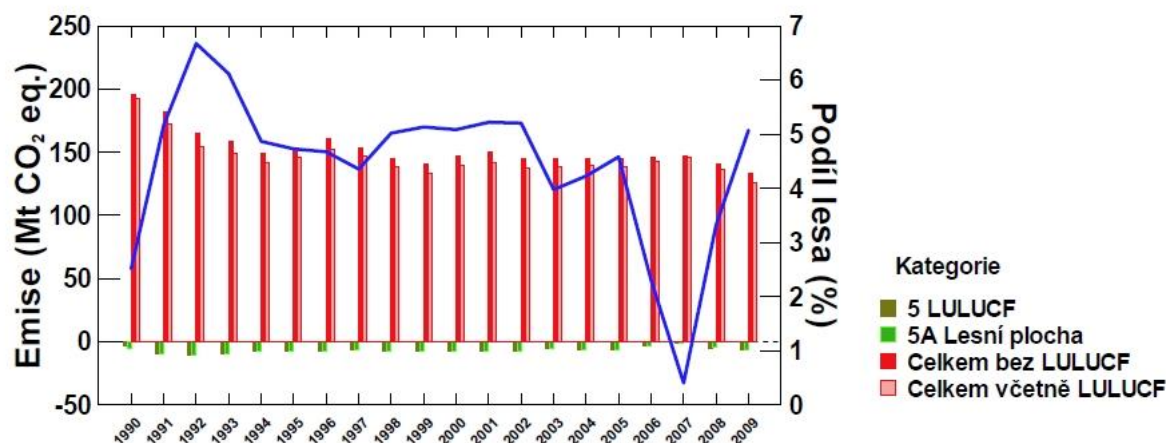
Studium efektivity uhlíkových úložišť je primárním zájmem moderní ekofyziologie rostlin, tj. depoziční kapacity pro atmosférický uhlík jednotlivých typů ekosystémů i celé biosféry. Klíčové je objasnění, jak budou reagovat hlavní fyziologické procesy, které se podílejí na utváření uhlíkové bilance (fotosyntéza, respirace), na měnící se vnější podmínky (MAREK et al., 2011). V boreálních ekosystémech jsou nízká teplota, krátké vegetační období a omezená dostupnost dusíku považovány za limitující faktory pro produkci lesních porostů (LINDER, 1987; KELLOMÄKI et al., 1997; MÄKIPÄÄ et al., 1998). Změny v klimatu, které jsou definovány jako zvýšení teploty, koncentrace CO<sub>2</sub> (Obrázek 3) a změny v prostorovém rozložení srážek (JYLHÄ et al., 2004; CARTER et al., 2005), mohou znamenat vyšší dekompozici organického materiálu (REICH et al., 1992), což může vést k přísunu dostupnosti živin pro stromy. Tyto změny pravděpodobně zvýší produktivitu lesa a povedou ke změně struktury lesních ekosystémů (např. druhového složení), (TALKKARI 1996; KELLOMÄKI et al., 2005; BERGH et al., 2006).

S měnícími se podmínkami a očekávanou změnou klimatu musí přijít i reakce lesního hospodářství a managementu. Dopady změny klimatu na evropské lesy vyžadují změny řízení ke zmírnění nepříznivých účinků (PARRY, 2000), optimální využití zvýšené produkce dřeva (BERGH et al., 2006) a také zvýšení zásob uhlíku v lesním ekosystému (SEELY et al., 2002).



Obrázek 3: Koncentrace atmosférického CO<sup>2</sup> (PETIT et al., 1999).

Z hlediska emisní inventury je zásadní to, jakým způsobem se promítne lesnické hospodaření na stav zásob uhlíku v České republice. Položkami ekosystémové zásoby uhlíku jsou biomasa, odumřelá organická hmota a organická složka půd (CIENCIALA, 2011). V rámci lesního ekosystému je nejpohyblivější právě složka biomasy, jejíž množství každoročně narůstá vlivem přírůstu (fotosyntetická asimilace mínus autotrofní respirace) a klesá vlivem těžebních zásahů, popř. spalováním a přirozenou dekompozicí (CIENCIALA, 2011). V rámci potřeb inventury emisí jsou lesy a krajina součástí sektoru „Využití krajiny, změny ve využití krajiny a lesnictví“ (Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)). Tento sektor je v rámci celé emisní inventury výjimečný, protože zahrnuje nejen emise, ale i propady skleníkových plynů (MAREK et al., 2011). Z údajů nejnovější inventurní zprávy připravené k roku 2014 (CHMI, 2014) vyplývá, že LULUCF se podílí na snížení emisí v průměru o 5,84 % za vykazované období let 1990–2012. Význam lesa v rámci bilance emisí skleníkových plynů je vzhledem k stále velkému množství emisí skleníkových plynů v České republice marginální (Obrázek 4 (CIENCIALA, 2011)). Emisní bilance sektoru LULUCF je nejvýznamněji ovlivňována právě lesy, resp. jejich cíleným obhospodařováním – lesnictvím. Lesy a lesnictví představují významný sink CO<sub>2</sub>. Kromě lesů se na fixaci CO<sub>2</sub> podílí také kategorie trvalých travních porostů, zatímco ostatní územní kategorie představují zdroj emisí skleníkových plynů, tyto emise vznikají především změnou ve využívání území (MAREK et al., 2011).



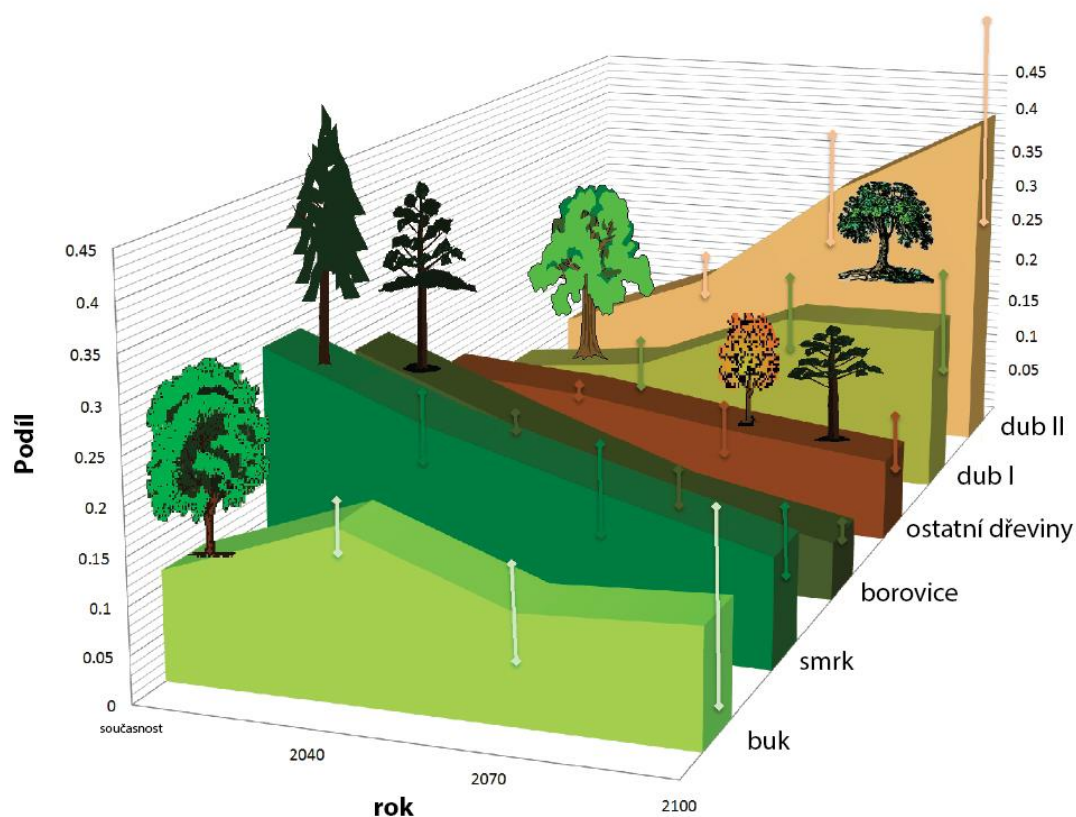
Obrázek 4: Vykazované emise skleníkových plynů (sloupce, osa y vlevo) pro emisní kategorie uvedené legendou napravo. Modrá linie (osa y vpravo) zobrazuje relativní podíl propadů (navázaného množství) skleníkových plynů v kategorii lesní plocha vzhledem k celkovým emisím (zdroj CIENCIALA, 2011).

Pro lesnické hospodaření jsou otázky postupujících změn klimatu a dalších faktorů ovlivňujících růstové prostředí velmi významné. V zemské atmosféře dochází ke zvyšování koncentrace plynů, vyvolávajících skleníkový efekt. Koncentrace oxidu uhličitého na počátku průmyslové revoluce kolem roku 1700 činila 280 ppm (ppm – počet částic na jeden milion částic ( $10^{-9}$ )), (BUČEK a KOPECKÁ, 2001), současná hodnota koncentrace  $\text{CO}_2$  je 398 ppm, kterou uvádí observatoř Mauna Loa na Hawaji. BENGTTSSON (1997) uvádí, že zvýšení koncentrace skleníkových plynů v atmosféře způsobí globální oteplení o 1,9 °C a v období 1990–2100 lze očekávat celkové oteplení o 3,5 °C. Tato změna bude mít zásadní vliv na složení dřevinné vegetace ČR. Tuto změnu popisují BUČEK a KOPECKÁ (2001) na příkladu trendu v posunu vegetačních stupňů. Jejich výsledky uvádějí, že v roce 2030 bude v ČR nejrozšířenější území s podmínkami 1. dubového vegetačního stupně, které bude zaujímat takřka třetinu plochy (29 %) oproti současným 3,46 %. Plocha území s podmínkami 2. bukodubového stupně se zvýší ze současných 12,06 % na 17,11 % a plocha území s podmínkami 3. dubobukového stupně vzroste z 18,11 % na 27,40 %. Rozsah území v současné době v ČR nejrozšířenějšího 4. bukového vegetačního stupně klesne v roce 2030 na polovinu, ze současných 43,07 % na 20,07 %. Velmi výrazně poklesne rozsah území s podmínkami 5. jedlobukového stupně, ze současných 19,52 % na 4,77 % v roce 2030. Plocha 6. smrkojedlobukového, 7. smrkového a 8. klečového vegetačního stupně se sníží ze současných 3,68 % území ČR na 1,22 %. Klimatické podmínky výskytu biocenóz 5. vegetačního stupně a vyšších horských vegetačních stupňů zůstanou podle regionálního scénáře v roce 2030 zachovány pouze v nejvyšších hraničních pohořích, v Čechách v Krušných horách, Slavkovském lese, Českém lese, na Šumavě, v Novohradských horách, v Krkonoších, Jizerských a Orlických horách a na Kralickém



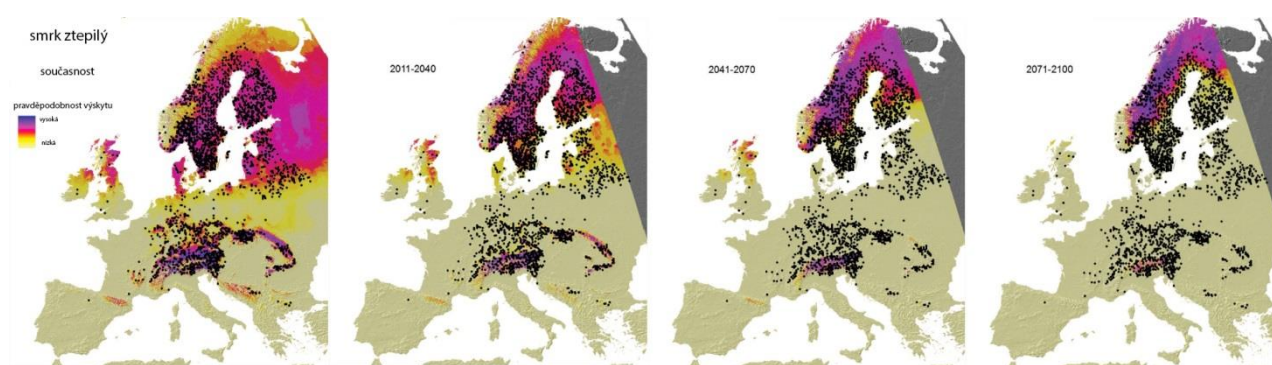
Sněžníku, na Moravě jen v Hrubém Jeseníku a v Moravskoslezských Beskydech (BUČEK a KOPECKÁ 2001).

Očekává se, že klimatická změna silně ovlivní i druhové složení lesů v rámci celé Evropy (THUILLER et al., 2008, THUILLER et al., 2011, HANEWINKEL et al., 2013). HANEWINKEL et al., (2013) uvádí, že tato změna bude mít i vážné ekonomické důsledky v lesnictví. Jejich model ukazuje změnu zastoupení jednotlivých dřevin v rámci Evropy (Obrázek 5). Dále uvádí, že 34 % evropských podmínek bude vhodných pouze pro středomořský typ dubového lesa s nízkou ekonomickou návratností pro vlastníka a v dřevařském průmyslu a zároveň dojde ke snížení ukládání uhlíku.



Obrázek 5: Modelová změna zastoupení hlavních dřevin v rámci Evropy v období od současnosti až po rok 2100 (HANEWINKEL et al., 2013).

THUILLER (2007) odhaduje, že každý 1 °C změny teploty bude mít za následek posun jednotlivých společenstev na Zemi o 160 km. Tento fakt je možné demonstrovat na příkladu posunu společenstev smrku ztepilého, který uvádějí HANEWINKEL et al., (2013). Obrázek 6 uvádí posun smrku ztepilého v závislosti na současném tempu globální změny od současnosti až do roku 2100. Zde je zobrazen posun smrku z centrální části Evropy do států severní části Evropy. Za relativně krátké časové období (kratší perioda než je doba obmýtl smrku v ČR), prakticky nebudou vhodné podmínky pro pěstování smrku ve střední Evropě.



Obrázek 6: Posun společenstev smrku ztepilého na základě současného tempa chodu globální klimatické změny. Žlutá barva značí místa s nízkou pravděpodobností výskytu smrku ztepilého, fialová barva naopak značí místa, kde bude pravděpodobnost výskytu smrku vysoká (HANEWINKEL et al., 2013).

Důsledky prognózovaných trendů změn vegetační stupňovitosti lze dokumentovat i na změně podmínek pro pěstování smrku ztepilého v České republice, v současné době nejrozšířenější dřeviny lesů ČR (MA, 2014). BUČEK a KOPECKÁ (2004) uvádějí, že se podíl ploch lesní půdy s klimatickými podmínkami zcela nevhodnými pro pěstování smrku (1. a 2. vegetační stupeň) podle regionálního scénáře v ČR zvýší ze současných 6,25 % na 31,65 % v roce 2030. Podíl ploch lesní půdy s málo příznivými podmínkami pro pěstování smrku (3. vegetační stupeň) vzroste ze současných 14,27 % na 28,32 %. Podíl ploch lesní půdy s příznivými podmínkami pro pěstování smrku (4. vegetační stupeň) klesne ze současných 41,95 % na 26,85 % a podíl ploch s velmi příznivými klimatickými podmínkami (5.-7. vegetační stupeň) se sníží ze současných 37,17 % na 13,17 % plochy lesní půdy v roce 2030. V současné době stále hojně vysazovaná dřevina smrk nebude v roce 2030 ani v 1/5 svého obmýtí. Výsledky modelování změn vegetační stupňovitosti charakterizovali BUČEK a KOPECKÁ (2004) takto:

- v územích, kde podle scénáře budou v roce 2030 zcela nevhodné klimatické podmínky pro pěstování smrku, je z hlediska principu předběžné opatrnosti lépe neuvažovat se smrkem ztepilým jako s hlavní porostotvornou dřevinou;
- v územích s málo vhodnými klimatickými podmínkami v roce 2030 lze smrk pěstovat pouze jako příměs, především na plochách ovlivněných přídatnou vodou;
- v územích, kde v roce 2030 zůstanou dobré klimatické podmínky, je možné podíl smrku v nově zakládaných porostech zvýšit, ale ani zde by neměl smrk být jedinou hlavní porostotvornou dřevinou;
- hlavní porostotvornou dřevinou může smrk zůstat v územích, kde budou podle scénáře velmi dobré klimatické podmínky.

Je až alarmující, že prognózované předpovědi klimatických podmínek předpokládají výskyt smrku ztepilého v podmínkách ČR pouze v horských polohách. Tyto prognózy jsou na dobu kratší, než je u nás průměrná doba obmýtlí a dosud nepřišla adekvátní reakce lesního hospodářství na stále více se projevující klimatickou změnu.

### 2.1.2 Struktura porostu ve vztahu k sekvestraci uhlíku

Porostní struktura je označení pro uspořádání porostu po stránce druhové (smíšení dřevin), věkové (stejnověkost, nestejnověkost), prostorové (ve směru horizontálním nebo vertikálním), sociální (podle zastoupení stromových tříd) apod. V širokém smyslu jde vlastně o způsob rozložení organické hmoty v nadzemním prostoru, který porost zaujímá (VYSKOT *et al.*, 1971). Porostní struktura má velký význam produkční. Na jejích vlastnostech závisí často zcela zřetelně kvantum výroby organické hmoty za určitou dobu. Z toho důvodu je porostní skladba důležitá i pro volbu pěstební techniky. Pěstebními opářeními lze totiž působit na vlastnosti struktury přímo (regulací počtu stromů nebo úpravou habitu stromů) a nepřímo změnou podmínek, které vznikly po regulaci počtu stromů nebo zásahem do ekotopu (VYSKOT *et al.*, 1971).

Růstové procesy v lesních porostech nelze vnímat pouze jako jednoduchý součet uniformních stromů – jedinců. Naopak, jsou společenstvem stromových jedinců, jejichž rozmanitou vnější podobu utvářely vnitřní vlastnosti a vnější vlivy. Výsledek tohoto vzájemného působení se nápadně projevuje společenstevní diferenciací, která je podkladem začleňování stromů stejného sociálního postavení do stromových tříd (ASSMANN, 1968).

Sociální diference, typická přinejmenším pro porosty, které vyrostly v hustém, rovnoměrném zápoji bez lidského zásahu (pěstebních zásahů), je především výsledkem neúspěšného boje o světlo a životní prostor. Jakmile jednotlivé stromy v tomto boji podléhají, znamená to pro ně sestup do nižší sociální vrstvy, až nakonec uhynou. Tento boj na straně druhé přináší přirozené členění a rozvrstvení porostu a znamená zároveň pomoc a existenční ochranu pro jednotlivé stromy v rámci pevné porostní struktury. Ale i v uměle založených porostech, které ovlivňuje člověk, pozorujeme, že předrůstavé stromy se silně vyvinutými korunami vynikají nad svými sousedy, ovládajícími zase další sousední stromy ještě menší výšky se slaběji vyvinutou korunou. Pro sociální postavení, které se projevuje postavením ke světlu a sousedním stromům, je v podstatě směrodatná výška stromu; protože čím vyšší je strom v poměru ke svým sousedům, tím víc světla má k dispozici. Vyvinutost koruny je přitom často souběžná se společenstevním postavením a s patřičnou relativní výškou stromu. Koruna je v podstatě bojovým prostředkem stromu. Velká koruna znamená vysokou přírůstavost pro strom a zároveň odejmutí příslušného množství světla sousedům (KANTOLA A MÄKELÄ, 2004).

V růstově shodně uzpůsobených porostech, ve kterých přirozený vylučovací proces trval delší dobu a kde se neprováděly intenzivnější probírkové zásahy, můžeme předpokládat širokou shodu mezi společenstevním postavením a vyvinutostí koruny na jedné straně a přirůstavostí na straně druhé. Při velkém výchozím počtu stromů v porostech stejného vzrůstu (věku) existuje totiž vysoká pravděpodobnost, že stromy, které ve vylučovacím zápase zvítězily, mají i největší růstovou energii (PULKKINEN a PÖYKKÖ, 1990).

Z probírkových pokusů známe případy, kdy velmi brzy vybraní a opětovně uvolňovaní „nadějní jedinci“ nakonec nesplnili očekávání. Není také možné podceňovat význam náhodného zvýhodnění. A to především v důsledku náhodného vypadnutí sousedních stromů na úkor měnící se dispozice určitého jedince vůči patologickým vlivům atd. (ASSMANN, 1968).

Ve stejnověkových porostech, zvláště pokud se v nich vykonávaly silnější probírky, je účelné odděleně zachytit a uvažovat tři klasifikační momenty: sociální postavení podle výšky a vyvinutost koruny podle asimilačního výkonu, tvaru a vyvinutosti koruny; a nakonec je žádoucí samostatné hodnocení stupně uvolnění koruny (ASSMANN, 1968).

Každý strom v porostu má k dispozici určitý růstový prostor (PRETZSCH, 2009). Pokud odhlédneme od nedostatečně probádaných poměrů v kořenovém prostoru, je dole růstový prostor ohraničený povrchem půdy (ASSMANN, 1968). Pokud není strom zastíněn vyššími jedinci, není růstový prostor směrem nahoru nějak omezený. O to tísnivější je však ohraničení ze stran bezprostředně sousedních stromů. V porostech, kde se neprováděly probírky, se okraje korun těsně dotýkají všech okolních korun (PULKKINEN a PÖYKKÖ, 1990). Ale i při takovémto těsném spojení sousedních korun existují ještě početné mezery v korunové klenbě, jak se můžeme pohledem přesvědčit. Pokud omaleně rozdělíme porostní prostor nevyplněný korunami mezi příslušné sousední stromy, dostaneme růstový prostor jednotlivých stromů. Průmět tohoto růstového prostoru do vodorovné polohy je růstová plocha. Neboli, zjednodušeně řečeno platí, že růstová plocha stromu je půdorys jeho koruny (cloněná plocha) plus podíl z necloněné porostní plochy. Poměr růstové plochy a cloněné plochy se označuje jako stupeň uvolnění. Cloněnou plochu jednotlivého stromu v zapojeném porostu je možné pokládat za přibližně úměrnou růstovému prostoru anebo růstové ploše, kterou má strom k dispozici (ASSMANN, 1968).

Sociální postavení stromu ovlivňuje jeho produkci i skrze poměr slunného a stinného listoví – zastíněné podúrovňové smrky a buky potřebují na vyprodukování stejného objemového přírůstu kmene dvojnásobnou váhu listoví než dobře osluněné úrovňové stromy (LARCHER, 2003). Osluněná část koruny také ovlivňuje výsledek asimilace více, než stíněná část. Až 60 % celkového toku energie je zachycováno v úrovni po výšku zápoje. Znamená to, že aktivním povrchem není ani tak korunový, jako vrcholový prostor. V prostoru od horní částí stíněné koruny stromu znamená proto každý decimetr výšky, o který koruna některého stromu přesahuje stromy okolní, velký přírůstek energie (ASSMANN, 1968).

Pokud bychom chtěli určit nejúčelnější a pro tvorbu přírůstu nejpříznivější tvar a velikost koruny, je nejlepší produkci jednotlivých stromů vztahovat na příslušnou plochu korunového pláště, a to buď na plochu celé koruny, nebo ještě lépe, na plochu osluněné části koruny. Při nejběžnějších tvarech koruny vzroste objem koruny jejím zvětšením vždy relativně více než povrch nebo plocha jejího pláště (PRETZSCH, 2009).

Vývoj počtu stromů odráží neustálý proces vylučování, který probíhá po celou dobu existence porostu, od mlaziny až po starý porost. Stálým jevem je hynutí stromů, které podlehly v boji o světlo a životní prostor a dostaly se na spodní hranici sociální stupnice. První ztráty způsobují především biotičtí a abiotičtí činitelé, zatímco po zapojení mlazin se zmenšuje počet jedinců především v důsledku konkurence. Počet stromů na lepších stanovištích klesá rychleji; tedy porosty určité dřeviny, například smrku, mají v daném věku na horších stanovištích vyšší počet kmenů. Včasným odstraněním netvárných jedinců se zvyšuje podíl tvárných jedinců s lepší kvalitou kmene. Další přírůst dřeva se zlepšenou kvalitou dřeva se tak může vytvořit v podobě hodnotnějšího dřeva a průměrná kvalita celkové produkce se může zvýšit. Dalším prostředkem zvyšování hodnotové produkce spočívá v uvolňování korun stromů s nekvalitnějším kmenem, jejichž kvalitativně-hodnotový přírůst se tak zvýší. Lze proto hovořit o záměrném, individuálním zvětšování tloušťky nejtvárnějších stromů (ASSMANN, 1968).

Z pohledu ekonomiky lesního hospodářství jsou nejdůležitějšími porostními charakteristikami lesních porostů počet stromů na jednotku plochy a jejich dimenze. Počet stromů a jejich hmotnost zároveň určují porostní zásobu. Z pohledu ekofyziologického jsou nejdůležitějšími charakteristikami lesního porostu údaje o jejich listoví, protože je to právě listoví, které plní úlohu primární styčné plochy mezi stromem a atmosférickým prostředím; a dále jejich kořeny, neboť ty jsou styčnou plochou mezi rostlinným organismem a půdou. Porosty se skládají z populací stromů, které lze charakterizovat jejich výškovou a tloušťkovou distribucí. Stromy se skládají z hlavních strukturních komponent, a to z kmenů, větví a hrubých kořenů, které zároveň určují architektoniku celého porostu. Funkčními komponenty jsou naopak listoví, bělové dřevo a jemné kořeny, přičemž tyto komponenty mnohem více odrážejí podmínky prostředí (LANDSBERK a SANDS, 2011).

Homogenní společenstva stromů jsou typická pro stejnověké a stejnorodé porosty. Jejich dynamika je v takovém případě predikovatelná, a proto se tímto směrem orientují přístupy v oblasti modelování, ať již v otázce produkce lesa, sekvestrace uhlíků, či otázek ohledně globální změny klimatu (CHROUST, 1997, WIRTH et al., 2004, PRETZSCH, 2009). Všechny tyto otázky jsou totiž mnohem hůře predikovatelné v případě nesterjnověkých, smíšených porostů.

Distribuce biomasy mezi kmenem, větvemi a kořeny je důležitá z toho důvodu, že ovlivňuje potenciál růstu (listoví a kořeny), stabilitu (kmen a hrubé kořeny) i ekonomická hlediska produkce (kmen) (LANDSBERK a SANDS 2011).

Porostní zápoj je formován korunami stromů. Architektonika porostního zápoje je určena vertikálním a horizontálním uspořádáním listoví v rámci samotného prostoru zápoje. To, spolu s indexem listové plochy, určuje, kolik fotosynteticky aktivní radiace je zachyceno porostním zápojem a tím pádem výši fotosyntetické produkce korunového zápoje (POKORNÝ et al., 2008).

Konkurence mezi jedinci narůstá úměrně tomu, jak narůstá jejich počet, a také úměrně s růstem stromů; tedy nároky na dostupnost zdrojů narůstají souběžně s vývojem lesního porostu (PRETZSCH, 2009). Z toho plyne, že zvláště ve stejnověkových a stejnorodých porostech klesá počet jedinců v důsledku mortality způsobené nárůstem kompetice. Mortalita samotná může být čistě náhodná, nebo-li na dimenzi nezávislá a způsobená rozličnými stresovými faktory prostředí; nebo na dimenzi závislá a způsobená přímou kompeticí jedinců o zdroje v porostech s vysokou hustotou (LANDSBERK A SANDS, 2011).

Obecné schéma obnovy lesního porostu po rozsáhlé disturbanci, stejně jako po obnovním zásahu, je vznik přirozené obnovy vyznačující se vysokou populační hustotou mladých jedinců a jejich vysokým stupněm kompetice o světlo, vodu, živiny. Někteří jedinci rostou rychle a získají dominantní postavení, jiní, v důsledku redukce světla či přístupu k půdním zdrojům, rostou pomaleji a jsou náchylnější k uhynutí v důsledku celé řady příčin. V případě stejnorodých porostů, typicky uměle založených, je počáteční kompetice mezi mladými jedinci stejného druhu, při jejich vysoké hustotě, velmi vysoká, jelikož jedinci téhož druhu se orientují na čerpání stejných zdrojů (GREIS a KELLOMÄKI, 1981). V takových případech se dynamika dané populace jedinců stejného druhu vyvíjí zřetelně predikovatelným způsobem. Naopak ve smíšených porostech je takováto dynamika vývoje mnohem složitější a výrazně hůře predikovatelná (Pretzsch, 2009), neboť závisí na konkrétní porostní směsi a vzájemné interakci zastoupených dřevinných druhů, umocněná navíc věkem jedinců (stejně jako případnou dynamikou porostních mezer v případě přirozené obnovy v porostních mezerách dospělých porostů). Mortalita jedinců v důsledku hustoty, tedy autoredukce, nastupuje po uzavření zápoje jedinci (PULKKINEN a PÖYKKÖ, 1990). Lze ji vyjádřit regresními modely závislosti počtu jedinců jednak na průměrné biomase kmene jedinců, dále na porostní kruhové základně a pak také na střední výčetní tloušťce jedinců. Přičemž jsou-li všechny tři uvedené veličiny nezávisle proměnnými veličinami ( $x$ ) a počet jedinců závisle proměnnou veličinou ( $y$ ), pak s nárůstem nezávisle proměnných klesá hodnota závisle proměnné, tedy počet jedinců na hektar. (LANDSBERK a SANDS, 2011).

Sekvestrace uhlíku v lesních porostech je ovlivněna mnoha hledisky, jež lze účinně ovlivňovat pěstebními přístupy; patří mezi ně především volba délky obmýetí (HARMON a MARKS, 2002, KAIPAINEN et al., 2004); dále prostřednictvím ovlivnění sekvestrace uhlíku v samotných stromech i půdě lesního porostu; různá je také sekvestrace uhlíku v těženém dříví v důsledku jeho kvality i kvantity (KAIPAINEN et al., 2004). Prodloužení délky obmýetí je lesnickým opatřením, prostřednictvím kterého mohou jednotlivé země naplnit závazky o

snížení emise skleníkových plynů, vyplývající z přijetí Kjótského protokolu, konkrétně z článku 3.4. Ačkoliv zvýšení sekvestrace uhlíku v lesních porostech prostřednictvím prodloužení délky obmýetí je zjevné, může v takovém případě dojít v některých případech k nepatrnému snížení sekvestrace uhlíku v půdě, jak to v případě borových porostů v Německu a Finsku prokázal KAIPAINEN et al. (2004). Nicméně, jak vyplývá z poznatků SEELYHO et al. (2002), půda je relativně dlouhodobým a stabilním uložištěm (deponiím) uhlíku vykazujícím pouze minimální a dlouhodobé odezvy na hospodářská opatření. Naopak v otázce sekvestrace v biomase stromů a jejich opadu dochází k značným fluktuacím v závislosti na hospodářských (těžebních) cyklech. Podíl celkového uhlíku uloženého v půdě se snižuje se snižující se těžební intenzitou (tj. například v případě nárůstu délky obmýetí), zatímco objem uhlíku v opadu je zhruba stejný napříč rozličnými scénáři. Zatímco v případě obsahu uhlíku v půdě při simulaci 300 let dlouhé periody hospodářského lesa (porostní skladby smrk, topol, borovice) dochází k setrvalému poklesu objemu uhlíku vázaného v půdě, v případě přirozeného disturbančního scénáře dojde za stejné období k navýšení objemu uhlíku vázaného v půdě.

KARJALAINEN (1996) sice dospěl ke zjištění vyšší sekvestrace uhlíku v přirozených lesích oproti obhospodařovaným lesním porostům boreálních lesů, nicméně poukazuje na skutečnost, že při započtení uhlíku vázaného ve dřevěných výrobcích dochází k navýšení celkové sekvestrace v rozmezí 12–55 %, což v konkrétních číslech může představovat 45–214 Mg C/ha za 150 let délky simulace, a to v závislosti na druhové porostní směsi, scénáři vývoje klimatu atd. Nejvyšší emitace C v rámci zpětného toku C do atmosféry je v rámci hospodářských lesů z opadu (36–47 % celkového toku), z vegetace (22–32 %), z půdního organického materiálu (25–30 %), zatímco emise z výrobního procesu a spálení vyřazených dřevěných produktů odstavuje pouze 1–6 % celkového toku C zpět do atmosféry.

### 2.1.3 Vliv probírky na strukturu porostu a sekvestraci uhlíku

Úloha lesů ke zmírnění změny klimatu a produkci dřeva současně s ukládáním uhlíku mohou změnit cíle lesního hospodaření v budoucnu. Vedení zásahu s měnícím se environmentálním prostředím musí být realizováno v závislosti na stavu lesních porostů a struktuře lesa (ALAM, 2008). Probírka je v hospodářském smyslu nástrojem zvyšování výtěže dřeva z jednotky porostní plochy, jejího výhodného časového a proporcionálního rozložení (KORPEL, 1991). Probírka je pěstební opatření realizované výhradně formou těžby, při které se na základě cílevědomého výběru (stanovených kritérií) v růstové fázi tyčkovin, tyčovin a tenkých kmenovin odstraňují z porostu stromy nežádoucích vlastností nebo stromy, které překážejí nejlepším (nejnadějnějším porostním složkám), tak aby se zlepšilo druhové složení, růst, kvalita, stabilita porostu nebo některé další funkčně důležité vlastnosti porostu (KONŠEL, 1931). Dřívější a/nebo intenzivnější výchovné zásahy by mohly být účinnými opatřeními pro zvýšení zachytu CO<sub>2</sub> v rámci měnícího se klimatu (HALL, 2008; NUUTINEN et al., 2006; HEIKKILÄ et al., 2007).

Lesy mohou být důležitou složkou zmírnění klimatické změny prostřednictvím vázání atmosférického uhlíku do lesního ekosystému. Sekvestrace uhlíku se může stát jednou z hlavních služeb, které nám bude les poskytovat. V tomto případě budou pracovníci lesního hospodářství čelit otázce optimalizace pěstebních postupů k produkci dřeva a sekvestraci uhlíku (POHJOLA a VALSTA, 2007).

Simulační studie ukazují, že porosty bez výchovných opatření jsou větším sinkem uhlíku oproti porostům vychovávaných (COOPER, 1983; HARMON et al., 1990). KARJALAINEN (1996) uvádí, že při porovnání porostů vychovávaných a nevychovávaných lépe vychází porosty nevychovávané z pohledu sekvestrace uhlíku, ale pouze v časovém horizontu jednoho obmýtí. Sekvestrace uhlíku za delší časové období a na rozsáhlém území vede ke ztrátám uhlíku respirací a rozkladem odumřelé hmoty v půdě a tím může překročit zachycení uhlíku vegetací a může vést k negativní bilanci uhlíku ve vyspělých porostech bez zásahu. Zatímco hospodářsky pěstované lesní porosty mohou ukládat uhlík po delší časové období (KARJALAINEN, 1996). Dalším aspektem tohoto tvrzení je navazující využití dřeva, zda i nadále bude tato surovina sloužit jako sink uhlíku, či bude využita způsobem, který navrátí uložený uhlík zpět do atmosféry (KARJALAINEN, 1996A). Používání dřeva jako obnovitelného zdroje materiálu namísto výrobků z fosilních paliv vede ke zvyšování zásoby vázaného uhlíku a je důležitým aspektem v kontextu zmírnění skleníkového efektu (DIXON et al., 1991; BURSCHEL et al., 1993). Několik studií se zabývalo tématem využití lesa a následného využití dřevní hmoty jako obnovitelného materiálu (BURSCHEL et al., 1993; TURNER et al., 1993; BINKLEY a VAN KOOTEN, 1994; NABUURS a MOHREN, 1995).

Při výchovných zásazích - probírkách - se zvyšuje množství následně vytěženého dřeva z porostů, přičemž celková produkce zbývajících porostu obvykle poklesne. Obecně je redukcí počtu stromů (i v nevychovávaných porostech) ovlivněna zbývajících porostní složka



zprostředkovaně ovlivněním jejich nejbližšího okolí. V klimatických oblastech, kde rozklad organické hmoty postupuje pomalu, probírky mohou např. urychlit cyklus návratu živin do půdy (lepší prohřátí půdy) a tím zpět ke stromům, které zůstaly po probírce. Při přirozeném vývoji smíšeného porostu dochází v důsledku konkurence ke snižování počtu stromů i ke změnám v zastoupení jednotlivých dřevin. Zároveň se porost může podílet na proměnách vlastností ekotopu v závislosti na své struktuře i dřevinném složení (KULHAVÝ, 2003).

Výchova porostu probírkami se projevuje typickými změnami v rozložení tloušťek a výšek stromu a v rozdělení počtu stromů a zásoby dle tloušťkových stupňů hlavního porostu i v rozčlenění COP (celková objemová produkce) a také v kvalitě produkce. Zřetelně lze výchovou ovlivnit tloušťkový přírůst. Změny v tloušťkovém růstu závisí na probírkami regulovaném postavení stromu v porostu, tvaru a velikosti koruny. Druh a intenzita probírky také ovlivňují tvar zbylých stromů, neboť čím více je strom uvolněn, tím více se tloušťkový přírůst soustřeďuje na kmen při bázi koruny (ASSMANN, 1968).

Kruhová základna, jako jednoznačné měřítko intenzity probírek, umožňuje zjistit jasné vztahy mezi stupněm probírky a přírůstem. Lze rozlišit maximální kruhovou základnu porostu, kterou se rozumí stanovištně nejvyšší možná kruhová základna živých stromů na hektar; optimální kruhovou základnu, jejíž dodržování zabezpečuje nejvyšší možný přírůst v daném přírůstovém období; kritickou kruhovou základnu, při které se dosáhne právě ještě 95 % maximálního přírůstu (ASSMANN, 1968). Je-li hustota porostu vyšší než je výnosově pojaté optimum, pak snižování hustoty, resp. zvětšování růstové plochy stromů vede ke zvyšování přírůstu jak jednotlivých stromů, tak i porostu. Pokud by však snižování hustoty porostu pokračovalo za výnosové optimum, pak by rozhodně docházelo ke ztrátám na porostním přírůstu. Assmannova teorie vychází z předpokladu zákonité závislosti objemového přírůstu porostu na výčetní kruhové základně (ASSMANN, 1968). Růst střední tloušťky s věkem porostu je podmíněn živností stanoviště a je výrazně ovlivněn druhem a intenzitou probírkových zásahů. Zvětšení hodnoty střední tloušťky je dáno nejen tloušťkovým růstem, ale také tím, že jsou z porostu často odstraněny slabší stromy, které tuto hodnotu negativně ovlivňují. Výškový růst je jen málo ovlivnitelný výchovnými zásahy, zvláště ve středním a vyšším věku porostu (KULHAVÝ, 2003). Cílem regulace prostorové úpravy porostů je dosažení určitého, pokud možno pravidelného rozmístění stromů (ve stejnověkových lesích), aby byla vytvořena vhodná horizontální i vertikální struktura porostů. Při spojení regulace počtu stromů s regulací jejich horizontálního rozmístění je nejvhodnějším ukazatelem růstová plocha stromů, charakterizující areál, který má k dispozici jeden strom (SMITH, 1997).

Výzkum vzájemných vztahů mezi porostem a složkami jeho prostředí (světlo, teplota, srážky, vodní režim, půda) má dlouhou tradici. V současné době jsou v pěstování lesa využívány výsledky výzkumu z oblasti ekologie lesa s použitím mnoha moderních metod,

založených na dílčích studiích, při nichž se zkoumá např. vodní provoz stromů, koloběh živin v lesních ekosystémech a změny světelného režimu v porostech v souvislosti s výchovnými zásahy (KULHAVÝ, 2003). Výchovné zásahy ovlivňují akumulaci, přeměny a mineralizaci organického opadu dvojitým způsobem, pomíneme-li vliv na dřevinnou skladbu porostů. Prvním z těchto dvou faktorů je množství opadu v porostech s různou kvalitou a hustotou zápoje (BINKLEY, 1986; KLIMO 1990; NOVÁK a SLODIČÁK 2004). Lze předpokládat, že v intenzivněji vychovávaných porostech přechodně klesá množství opadu, neboť dochází k růstu korun a akumulaci biomasy ve dřevě větví a kmenů a stejně tak je docíleno nižšího opadu v porostech se slabším zápojem (WRIGHT, 1957).

Druhý faktor představuje změnu mikroklimatických podmínek v přízemní vrstvě, které mohou být v řidších porostech příznivější pro mineralizaci dříve akumulované organické hmoty. Vlivem výchovných zásahů na mikroklimatické podmínky ve smrkových monokulturách se zabýval PODRÁZSKÝ A NOVÁK (2005). Výchovné zásahy většinou znamenají zlepšení podmínek pro humifikaci a mineralizaci a zlepšují se vlhkostní i teplotní podmínky.

ELIZONDO et al. (2006) prokázali, že posílení sekvestrace uhlíku v lesním ekosystému může být dosaženo, aniž by došlo ke snížení dřevní produkce, a to i při současných podmínkách klimatu a při rozličných hospodářských přístupech. Význam výchovy porostů skrze uplatňování probírek umožňuje v důsledku zvýšení celkové produkce porostu i zvýšení celkové sekvestrace uhlíku; přičemž obojí může být zlepšením probírek porostů vyšší, než jak je toho dnes dosahováno při uplatňování současné porostní výchovy v boreálních lesích. Toto zvýšení podle autora nastane bez ohledu na konkrétní dřevinu, stejně jako bez ohledu na scénář vývoje klimatu.

## 2.1.4 Způsoby stanovení biomasy jednotlivých stromů a biomasy na úrovni porostu

Z pohledu stanovení vlastní zásoby uhlíku v lesním ekosystému je nutná znalost celkové biomasy od jednotlivých stromů až po celé lesní komplexy. Měření a hodnocení nadzemní biomasy stromu (kmene, větví, listoví a kořenů) hraje klíčovou roli při hospodaření s lesními zdroji. Odhady zásob biomasy jsou nutné pro hodnocení: a. zásob a toků několika biogeochemických prvků, b. množství primární produkce lesů, jako alternativa k fosilním palivům (BROWN, 1997; CHAVE et al, 2005; RICHARDSON et al, 2002). V každém případě je nutné, aby kvantifikace biomasy byla co nejefektivnější a aby byl nalezen poměr mezi kvalitou odhadu biomasy a nutností měření jejích jednotlivých složek. Kvantifikace biomasy je prováděna na základě destrukce jedinců, anebo následně pomocí modelů, které vznikly právě z destrukčních analýz a jsou založené na jednoduše měřitelných taxačních charakteristikách stromu ve vztahu k celkové biomase či biomase jednotlivých orgánů stromu. V současné době se pro kvantifikaci biomasy používají dva přístupy: I. odvození biomasy na základě alometrických vztahů a II. pomocí expanzních faktorů.

### 2.1.4.1 Alometrické vztahy

Alometrický vztah kvantifikuje biomasu na základě znalosti vztahu mezi celkovou biomasou jedince (případně biomasou jednotlivého orgánu stromu) a snadno měřitelnou charakteristikou jedince (GOULD, 1966). Tyto vztahy vycházejí z ontogenetického vývoje jedince, tj. např. z existujícího vztahu mezi tloušťkou jedince a jeho výškou, mezi výškou a velikostí koruny a tloušťkou a nadzemní biomasou (KING, 1996; BOHLMAN a O'BRIEN, 2006; DIETZE et al., 2008). V případě alometrických vztahů se stanovuje celková biomasa (biomasa jednotlivého orgánu stromu) na základě znalosti vztahu mezi hmotností biomasy a výčetní tloušťkou stromu či výškou stromu (MAREK et al. 2011). Dále mohou být použité veličiny jako například parametry koruny stromu, věk a parametry stanoviště. Alometrický vztah v dané lokalitě má největší vypovídací schopnost v případě, že tento vztah byl odvozen přímo v dané lokalitě, a proto jsou tyto vztahy často nazývané „*site specific*“. Pro smrkové porosty v podmínkách České republiky se jedná především o práce ČERNÉHO (1990), POKORNÉHO a TOMÁŠKOVÉ (2007), MARKOVÉ a POKORNÉHO (2010) a KREJZY et al. (2013). Pokud pro danou lokalitu neexistují lokální alometrické rovnice, kvantifikace biomasy se provádí pomocí obecných modelů. Pro smrk ztepilý je nejvhodnějším zdrojem práce autorů WIRTH et al. (2004), který zahrnuje reprezentativní soubor experimentálních údajů o smrku pěstovaném a rostoucím v podmínkách středoevropského regionu (MAREK et al. 2011). Práce WIRTHA et al. (2004) uvádí rovnice pro stanovení biomasy jednotlivých orgánů stromu (jehlic, větví, suchých větví, kmene a kořenů) od nejjednodušších rovnic, které obsahují pouze jednu nezávislou proměnou (výčetní tloušťku) až po rovnice, kam vstupují parametry jako například výška stromu, délka koruny, věk stromu a nadmořská výška. MAREK et al. (2011) vidí

nevýhodu tohoto modelu v tom, že autor neuvádí rovnici pro celkovou biomasu, ale pouze biomasu pro jednotlivé orgány stromu. Odvození celkové biomasy je pak na základě součtu biomasy jednotlivých komponent, což vede ke zvyšování nejistot, které se navíc musí kvantifikovat se zohledněním možné korelace komponentů biomasy podle patřičných vztahů propagace chyb (KETTERINGS et al., 2001, MAREK et al., 2011). Výsledkem všech alometrických rovnic je kvantifikace biomasy v hmotnostních jednotkách. Je zde značný rozdíl oproti klasickému lesnímu hospodářství, kde se kvantifikuje pouze hroubí ( $m^3$ ). K této jednotce lze nejbližší analogicky přirovnat biomasu kmene, i když pomocí alometrických vztahů dochází ke kvantifikaci hmotnosti celého kmene, tedy i části, která se v případě lesního hospodářství nepočítá do položky hroubí. Pomocí alometrických rovnic se nekvantifikuje jenom biomasa kmene, ale i další orgány stromu, které již z pohledu lesního hospodářství nehrají tak významnou roli, i když je jejich zásoba v lesních porostech značná. Jedná se především o biomasu listoví, větví, suchých větví a kořenů. Znalost celkového množství biomasy ve všech orgánech stromu je důležitá z mnoha faktorů, které již byly zmíněny v úvodu této kapitoly.

Velké množství alometrických rovnic bylo publikováno pro stanovení biomasy pro dřevinné druhy a lesní porosty Severní Ameriky a Evropy (JENKINS et al., 2003; ZIANIS a MENCUCCINI, 2004; ZIANIS et al., 2005; FEHRMANN a KLEIN, 2006; NÁVAR, 2009). Pro potřeby této práce byl sestaven přehled alometrických vztahů pro smrk ztepilý v evropských podmínkách (Tabulka 1). V tabulce je uveden přehled, kolik modelů daná práce obsahuje pro odvození biomasy jednotlivých orgánů stromu, dále je v přehledu uvedena lokalita, kde byly alometrické vztahy sestaveny, rozmezí tlouštěk a věku, pro které je daný model odvozen. Je zde citována zdrojová publikace, ve které byl daný model publikován a v níž se dá najít matematický tvar modelů včetně jejich parametrů.

Pro další hlavní dřeviny v Evropě byl publikován přehled alometrických vztahů v práci ZIANISE et al. (2005).

Tabulka 1: Přehled používaných alometrických vztahů pro odvození biomasy jednotlivých orgánů stromu pro smrk ztepilý z oblasti Evropy (zahrnutý studie z 9 evropských států). Použité zkratky značí: M – počet modelů a DBH – tloušťka stromu ve výčetní výšce. Zvýrazněné modely jsou modely z území České republiky.

Orgán stromu		Wirth et al. (2004)	Marklund (1987)	Marklund (1988)	Johansson (1999)	Černý (1990)	Lehtonen (2005)	Drexhage, Gruber (1999)	Snorrason et al. (2006)	Pokorný, Tomášková (2007)	Marková, Pokorný (2010)	Ingerslev, Hallbäcken (1999)	Mund et al. (2002)	Bolte et al. (2004)	Konopka et al. (2015)	Hochbichler et al. (2006)
Jehlice	M	6	3	4	3	2	1			2	2	1	3		2	2
	Lokalita	Evropa	Švédsko	Švédsko	Švédsko	ČR	Finsko			ČR	ČR	Dánsko	Německo		Slovensko	Rakousko
	Rozpětí DBH	1,8-67,6	0,3-63,4	0-50	4,9-29,8	10,5-47,2	-			4-14	10-22	-	7,6-40		1-16	9,2-43,2
	Rozpějí věk	13-157	8-186	-	17-54	57-106	34-159			16	32	59	16-142		12,16	10-63
Větve	M	4	3	4	3	2			1	2	2	1	1		2	2
	Země	Evropa	Švédsko	Švédsko	Švédsko	ČR			Island	ČR	ČR	Dánsko	Německo		Slovensko	Rakousko
	Rozpětí DBH	1,8-67,6	0,3-63,4	0-50	4,9-29,8	10,5-47,2			2,7-27,9	4-14	10-22	-	7,6-40		1-16	9,2-43,2
	Rozpějí věk	13-157	8-186		17-54	57-106			-	16	32	59	16-142		12,16	10-63
Suché větve	M	4	3	4		2						1				
	Země	Evropa	Švédsko	Švédsko		ČR						Dánsko				
	Rozpětí DBH	3,5-52,8	0,3-63,4	0-50		10,5-47,2						-				
	Rozpějí věk	15-148	8-186	-		57-106						59				
Kmen	M	3	3	3	3	2			1	2	2	1	6		4	
	Země	Evropa	Švédsko	Švédsko	Švédsko	ČR			Island	ČR	ČR	Dánsko	Německo		Slovensko	
	Rozpětí DBH	3,5-52,8	0,3-63,4	0-50	4,9-29,8	10,5-47,2			2,7-27,9	4-14	10-22	-	7,6-40		1-16	
	Rozpějí věk	13-148	8-186	-	17-54	57-106			-	16	32	59	16-142		12,16	
Kořeny	M	4		9				1					3	2	2	
	Země	Evropa		Švédsko				Německo					Německo	Německo	Slovensko	
	Rozpětí DBH	5,1-52,8		0-50				5,0 - 25,0					7,6-40	16-74	1-16	
	Rozpějí věk	-		-				10-40					16-142	44-114	12,16	

#### 2.1.4.2 Expanzní faktory (BEFs)

Expanzní faktory (BEFs – Biomass expansion factors) se používají ke kvantifikaci celkové biomasy od úrovně stromu až na úroveň jednotlivých regionů či států. Zásoba hroubí se konverguje na množství biomasy od jednotlivých orgánů stromu až po celkovou biomasu (MAREK et al., 2011). Tento postup kvantifikace biomasy byl vyvinut pro odhad biomasy lesních porostů v národním měřítku a pro kvantifikaci množství vázaného uhlíku v lesních ekosystémech pro účely národních zpráv o inventarizaci emisí skleníkových plynů (IPCC 2006). Obecně lze BEFs vyjádřit jako:

$$BEF_s = \frac{W_i}{V} \quad (1)$$

Kde  $W_i$  představuje biomasu jednotlivých orgánů, nebo celkovou nadzemní biomasu stromu a  $V$  objem kmene.

Konstrukce expanzních faktorů je postup založený na dendrometrických údajích jednotlivých stromů, znalosti alometrických rovnic dané lokality a objemových rovnicích. Pomocí alometrických rovnic se vypočítá celková zásoba biomasy (nebo biomasa určitého orgánu stromu), dále se pomocí objemových rovnic stanoví objem hroubí a po dosazení do rovnice č. 1 se vypočítá expanzní faktor pro daný typ lesního porostu. Příkladem takto sestavených BEFs je práce LEHTONENA et al., (2007) v podmínkách České republiky. MAREK et al., (2011) uvádí, že nasazení expanzních faktorů bude vždy představovat výraznější zdroj nejistot, než je tomu při přímém využití měřených dendrometrických údajů jednotlivých stromů a aplikaci alometrických rovnic. LEHTONEN et al. 2007, kteří se zabývali studiem nejistot při konstrukci věkově závislých BEFs pro smrk, k tomu dodávají, že nejistota BEFs je závislá na vztahu mezi zdrojovými chybami. Tu lze snížit použitím robustnějších biometrických a objemových rovnic a lepším využitím existujících údajů (MAREK et al., 2011). Přehled publikovaných BEFs je uveden v tabulce 2 pro smrk ztepilý v evropských podmínkách. V tabulce je uvedena země, ve které byly BEFs sestaveny, interval, ve kterém se pohybovala hodnota BEFs, a věkové rozpětí, pro které byly BEFs sestaveny. V tabulce je dále uvedena zdrojová publikace, kde byly hodnoty BEFs publikovány.

Tabulka 2: Hodnoty expanzních faktorů (BEFs) pro smrk ztepilý, které byly publikovány pro evropské podmínky.

	LEHTONEN et al. 2007	LEHTONEN et al. 2005	LEVY et al. 2004	CIENCIALA et al. 2006	PETERSON et al. 2012 <sup>*</sup>
Lokalita	ČR	Finsko	Velká Británie	ČR	Švédsko
BEFs	0,48-0,68	0,78-0,86	0,52-0,68	0,58-1,2	0,46-0,76
Rozpětí Věk	32-143	10-140	15-60	15-150	-

<sup>\*</sup> byly publikovány hodnoty BEFs pro dovození tun CO<sub>2</sub> a pro potřebu této práce byla tato hodnota přepočítána na tuny suché biomasy

Pro stanovení celkové biomasy jednotlivých stromů, lesních porostů či celých regionů je nutná jejich inventarizace. K inventarizacím jednotlivých stromů, konkrétní lokality či menšího území lze přistupovat klasickou inventarizací lesa, při níž jsou zjišťovány dendrometrické charakteristiky všech jedinců na ploše. Základními dendrometrickými veličinami jsou druh dřeviny, výčetní tloušťka, výška stromu a věk. Pomocí těchto zjištěných veličin lze pomocí výše zmíněných metod odvodit zásobu biomasy. V takovém případě je nej přesnější metodou odvození biomasy pomocí lokálních alometrických rovnic (ČIHÁK et al., 2012). V případě inventarizace lesů na úrovni státu se inventarizace provádí pomocí statistického šetření v pravidelné síti zkusných ploch. Jedná se o Národní inventarizaci lesů, která je zakotvena v zákoně o lesích č. 289/1995 Sb. Nařízením prvního cyklu Národní inventarizace lesů schválila vláda ČR nařízením č. 193/2000 Sb., druhého cyklu nařízením č. 247/2009 Sb. Systém inventarizace lesů je založen na navazujících měřeních v určitých časových intervalech na stejných plochách. Řada opakovaných a vzájemně provázaných šetření je základem pro stanovení a ověření trendu vývoje porostních zásob, trendu přírůstu dřevní hmoty a ověření trendu nárůstu či poklesu těžeb v návaznosti na jejich reálnou únosnou výši (ÚHUL, 2003). Použití lokálních alometrických rovnic pro odvození biomasy na úrovni státu by mohlo být zatíženo závažnou chybou (JENKINS et al., 2003). Pro stanovení biomasy na národní úrovni se používají právě expanzní faktory, nebo obecné alometrické rovnice, které byly popsány výše v této kapitole.

### 3. Experimentální část

V rámci experimentální části práce věnované studiu vlivu probírkového zásahu na sekvestraci uhlíku a strukturu porostu bylo provedeno několik experimentů ke zjištění:

- A) vlivu historie výchovy na parametry porostu a alokaci biomasy,
- B) zda ovlivňuje typ probírky alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy,
- C) jak ovlivňuje tvar a velikost sociální plochy růst jednotlivých stromů,
- D) vlivu typu a intenzity probírkového zásahu na sekvestraci a obsah uhlíku.

Tyto experimenty a měření byly prováděny na vědeckých výzkumných plochách Experimentálního ekologického pracoviště (dále jen EEP) Bílý Kříž, dále na ploše Rájec-Němčice patřící k síti výzkumných ploch Czech LTER (Long-term Ecological Research) a na trvalých výzkumných plochách nacházejících se na vrchu Kněhyně v Moravskoslezských Beskydech. Z důvodu realizace experimentů na těchto výzkumných plochách a jejich prolínání v rámci experimentů se jeví jako praktické uvést jejich souhrnný popis a v jednotlivých kapitolách se na tento popis odvolávat. Upřesňující popis lokalit, který se týká pouze daného experimentu, je vždy uveden až v příslušné kapitole.

#### 3.1 Popis lokalit

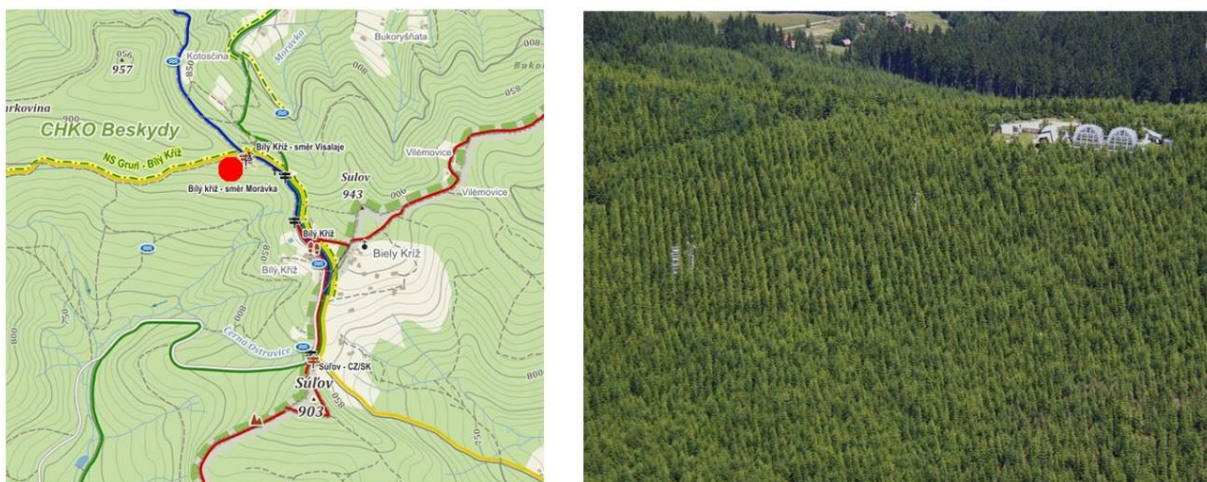
##### 3.1.1 Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž

EEP Bílý Kříž bylo založeno v roce 1986 v rámci projektu „komplexní výzkum vlivu imisí na lesní hospodářství Beskyd“ a to původně jako klimatologická stanice umístěná v lesním prostředí. Zakládajícími členy projektu byly: LF VŠZ Brno, Lesprojekt, ČHMU, Ústav systematické a ekologické biologie ČSAV (dnes Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.), Ústav ekologie průmyslové krajiny ČSAV a Severomoravské státní lesy. Jednou z myšlenek projektu byl i výzkum ochranných opatření intenzivní pěstební činnosti, jako nástroje ke zvýšení stability a rezistence horských smrkových porostů proti vlivu vzdušných škodlivin. Tato myšlenka byla důvodem pro zapojení tehdejší ekofyziologické skupiny oddělení výzkumu lesních ekosystémů Ústavu systematické a ekologické biologie ČSAV. Pro tyto účely byl shledán vhodný právě Bílý Kříž.

Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž se nachází v oblasti Moravskoslezských Beskyd (Obrázek 7) a je součástí evropské infrastruktury ICOS (Integrated Carbon Observation System) začleněného do mezinárodní výzkumné infrastruktury ESFRI (European



Strategy Forum on Research Infrastructures). Jeho poloha je dána zeměpisnými souřadnicemi 49°30'9.393" s.z.š. a 18°32'19.286" v.z.d.



Obrázek 7: Poloha Experimentálního ekologického pracoviště Bílý Kříž a letecký pohled na volnou smrkovou plochu EEP.

Nadmořská výška EEP je 908 m n. m. Geologické podloží tvoří flyšové vrstvy s převahou godulského pískovce, na kterých se vytvořila písčitohlinitá až hlinitopísčité lesní půda s podílem skeletu 30–40 %. Na sledovaném území EEP byl určen půdní typ podzol modální s hloubkou půdy 60–80 cm. Průměrná roční teplota vzduchu je 4,9 °C, průměrná roční relativní vlhkost vzduchu je 80 %, roční úhrn srážek je 1100 mm a počet dní se sněhovou pokrývkou je 160. Klimaticky se jedná o oblast mírně chladnou, vlhkou a srážkově bohatou (normálové období 1901–1950). Za několik posledních let (1998 – 2011) se průměrná roční teplota zvýšila na 6,8 °C a roční úhrn srážek stoupl na průměrných 1293 mm, podrobné hodnoty pro jednotlivé roky jsou uvedeny v [tabulce 3](#).

Z hlediska znečištění ovzduší leží EEP v oblasti s mírným imisním zatížením. Průměrná roční koncentrace SO<sub>2</sub> je 20 až 26 µg.m<sup>-3</sup>. Podrobnější popis klimatických charakteristik uvádí práce [KRATOCHVÍLOVÉ et al., \(1989\)](#), [ŠALANSKÉ \(1999\)](#) a [MARKOVÉ et al., \(2013\)](#). Z výzkumných ploch na EEP Bílý Kříž se tato práce věnuje výzkumu na volné smrkové ploše.

Tabulka 3: Průměrná roční teplota vzduchu ve výšce 2 m nad zemí ( $T_a$ ) a roční úhrn srážek ( $P$ ) v letech 1998–2011 na klimatologické stanici Bílý Kříž ( $\pm$  směrodatná odchylka) MARKOVÁ et al., (2013).

KLIMATOLOGICKÁ STANICE (Bílý Kříž)		
Rok	$T_a$ [°C]	$P$ [mm]
1998	5,3	1328
1999	5,9	1199
2000	8,5	1431
2001	7,3	1609
2002	8,5	1277
2003	6,4	1032
2004	7,3	1202
2005	4,8	1579
2006	5,9	1573
2007	6,7	1508
2008	7,9	1149
2009	7,0	930
2010	6,0	1297
2011	7,3	987
Ø 1998-2011	$6,8 \pm 1,1$	$1293 \pm 217$

### 3.1.1.1 Volná smrková plocha lokality EEP Bílý Kříž

Zkoumaná smrková monokultura o celkové výměře 6,5 ha byla založena umělou řadovou výsadbou jako porost druhé generace na původní pastvině čtyřletými sazenicemi smrku ve sponu 2 x 1 m v r. 1981. Z hlediska typologie spadá tento porost do HS 551 a lesní typ je zjištěn jako 5S1 (*Svěží jedlová bučina štávelová s kapradinami*). V roce 1995 byly v této monokultuře vybrány dvě plochy o velikosti 0,25 ha, kdy podúrovňovým až úrovňovým probírkovým zásahem byla odlišena plocha řídká – FS od husté – FD (bez zásahu). Ve FD byla hustota porostu  $2664 \text{ ks}\cdot\text{ha}^{-1}$ , v FS dosahovala hustota porostu  $2392 \text{ ks}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Na jaře r. 2001 byla provedena úrovňová probírka na ploše FS s redukcí hustoty porostu na  $1848 \text{ ks}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Při redukcí  $540 \text{ ks}\cdot\text{ha}^{-1}$  tak intenzita zásahu dosahovala 22 % v redukcí hustoty porostu. Po zimním období 2005/2006 došlo vlivem těžkého sněhu, námrazy a větru k zředění plochy FD a hustoty porostních ploch se téměř vyrovnaly a do současné doby mají téměř shodnou hustotu porostu (FD  $1520 \text{ ks}\cdot\text{ha}^{-1}$ , FS  $1488 \text{ ks}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Podrobný vývoj hustoty obou porostů a vývoj indexu listové plochy (LAI) je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4: Vývoj porostní hustoty a indexu listové plochy (LAI) na výzkumných plochách FS a FD v období 1999-2011 LAI byl stanoven nepřímou metodou (LAI-2000, PCA, Li-Cor, USA). V závorce u parametru LAI je uvedena směrodatná odchylka sezónního maxima.

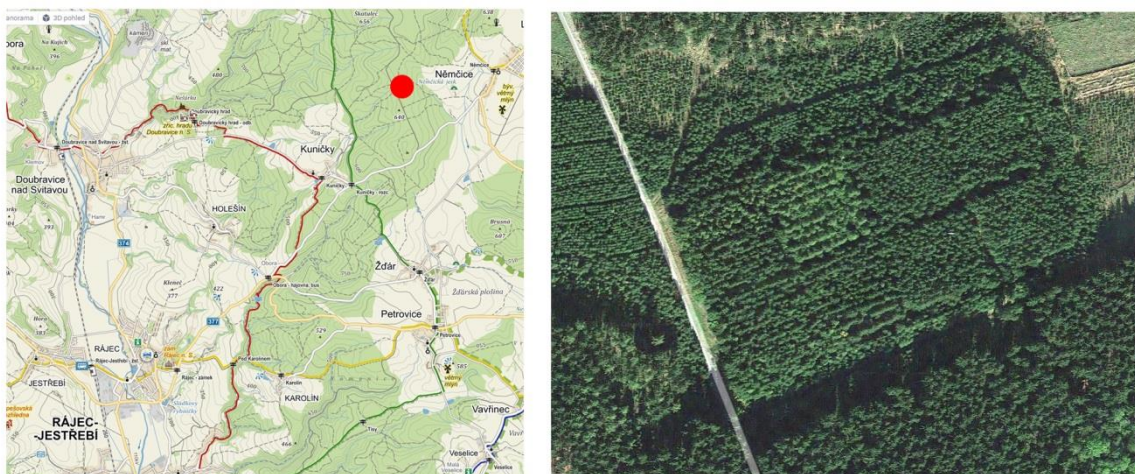
	Index listové plochy (sezónní max.) (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )		Hustota porostu (ks.ha <sup>-1</sup> )	
	FD	FS	FD	FS
1999	10,84 (0,46)	7,95 (0,33)	2664	2392
2000	11,06 (0,32)	8,22 (0,39)	2656**	2388**
2001	11,54 (0,16)	6,71 (0,18)	2612**	1848*
2002	11,68 (0,15)	7,69 (0,19)	2492**	1836**
2003	12,64 (0,16)	9,14( 0,16)	2484**	1836
2004	12,44 (0,13)	9,58 (0,16)	2088**	1668*
2005	11,82 (0,11)	10,01 (0,12)	2076**	1664**
2006	8,02 (0,12)		1908**	1580**
2007	8,57 (0,18)		1552**	1508**
2008	9,53 (0,27)		1540**	1500**
2009	9,61 (0,13)		1540	1492**
2010	10,15 (0,36)		1524**	1488**
2011	10,24 (0,22)		1520**	1488

\*Probírkový zásah \*\*redukce stromů po nahodilé těžbě

### 3.1.2 Výzkumná plocha Rájec-Němčice

Výzkumná plocha Rájec-Němčice byla založena roku 1968 Ústavem ekologie lesa (Mendelova univerzita v Brně), v souvislosti s řešením mezinárodního biologického programu UNESCO (IBP – International Biological Programme) a mezinárodního programu UNESCO Člověk a biosféra (MaB). Cílem projektu IBP a MaB v letech 1976–1990 s názvem „Ekologické důsledky intenzivní hospodářské činnosti člověka v čistých smrkových porostech na stanovištích středních nadmořských výšek" bylo analyzovat strukturu, funkci, produkci a produktivitu druhotných smrččin vrchovinné oblasti a hodnotit stabilitu, ochranu a ekologické důsledky intenzivní holosečné obnovy lesa.

Plocha se nachází v přírodní lesní oblasti 30 – Drahanská vrchovina (Drahanský bioregion, 1.52) asi 1 km západně od obce Němčice v České republice (Obrázek 8). Cílem současného výzkumu je posoudit možnosti obnovy lesa v dané oblasti s ohledem na optimalizaci hospodářských postupů při uplatňování zásad trvale udržitelného hospodaření v lesích při transformaci neboli přeměně smrkových monokultur na lesy bližší přírodě. V současnosti je výzkum zaměřen na: (i) studium mezoklimatu a porostního mikroklimatu, (ii) hodnocení vláhové bilance, (iii) fenologie lesních dřevin, (iv) studium biogeochemických koloběhů (uhlík, dusík, síra), (v) studium dekompozičních a půdních procesů, (vi) hodnocení biodiverzity ve vztahu k adaptabilitě lesních porostů na účinky předpokládané klimatické změny (CZ LITER, 2015).

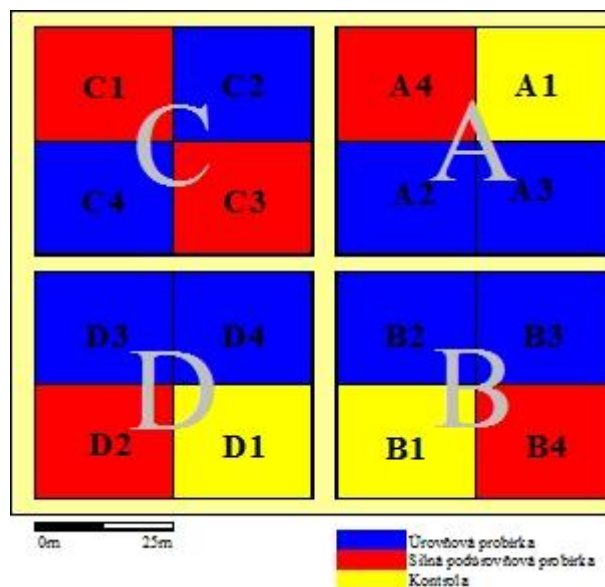


Obrázek 8: Poloha výzkumné stanice Rájec-Němčice (vlevo) a letecký snímek probírkových ploch (vpravo).

Přesná poloha je dána zeměpisnými souřadnicemi  $49^{\circ}26'44.374''$  s.z.š a  $16^{\circ}41'49.651''$  v.z.d. Geologické podloží výzkumné stanice je kyselý granodiorit, na kterém se nachází kambizem modální oligotrofní (KAmd') s moderovou formou povrchového humusu (NĚMEČEK et al., 2001). Nadmořská výška se pohybuje v rozmezí 610 – 625 m n. m. Průměrná roční teplota vzduchu je  $6,5^{\circ}\text{C}$  a průměrná roční suma srážek 717 mm za období 1959-2000 (HADAŠ, 2002).

### 3.1.2.1 Výzkumná plocha probírkových zásahů

Porost smrku ztepilého (*Picea abies* [L.] Karst.) byl založen umělou výsadbou na holé ploše po vytěžení původního dospělého smrkového porostu. Dle typologického systému ÚHUL je porost klasifikován jako 5S1 (*Svěží jedlová bučina štavelová s kapradinami*). Porost byl rozčleněn na 4 kvadranty (A, B, C, D) o rozloze 50 x 50 m, které jsou oddělené 10m ochrannými pásy. Dále byl každý kvadrant rozdělen na další 4 kvadranty o rozloze 25 x 25 m (A1 – A4, B1 – B4, C1 – C4, D1 – D4). Rozložení kvadrantů a typů probírek je znázorněno na obrázku 9. Výsadba byla provedena na jaře roku 1979 3letými sazenicemi smrku ztepilého ve sponu 2x1m.



Obrázek 9: Prostorové rozmístění kvadrantů se smrkovými porosty, ve kterých jsou prováděny různé varianty pěstební výchovy.

Do této práce byla vybrána plocha D4, která reprezentuje úrovňovou probírku (TfA) a plocha C3, která odpovídá silné podúrovňové probírce (TfB). Porostní charakteristiky těchto ploch jsou uvedeny v tabulce 5. Tyto plochy byly vybrány, protože nejlépe reprezentovaly daný typ výchovného zásahu.

Tabulka 5: Porostní charakteristiky vybraných ploch z probírkových zásahů. (DBH - výčetní tloušťka ve výšce 1,3 m, H - výška porostu, G<sub>1,3</sub> – výčetní kruhová základna porostu, TA - celková biomasa.

Plocha	Typ probírky	Věk porostu/stromu k roku 2014	Porostní hustota N.ha <sup>-1</sup>	DBH [cm]	H [m]	G <sub>1,3</sub> [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	TA [t.ha <sup>-1</sup> ]
D4	úrovňová probírka (TfA)	36/39	1808	14,76	14,70	36,21	231,26
C3	silná podúrovňová probírka (TfB)		2032	15,00	16,60	43,78	274,44

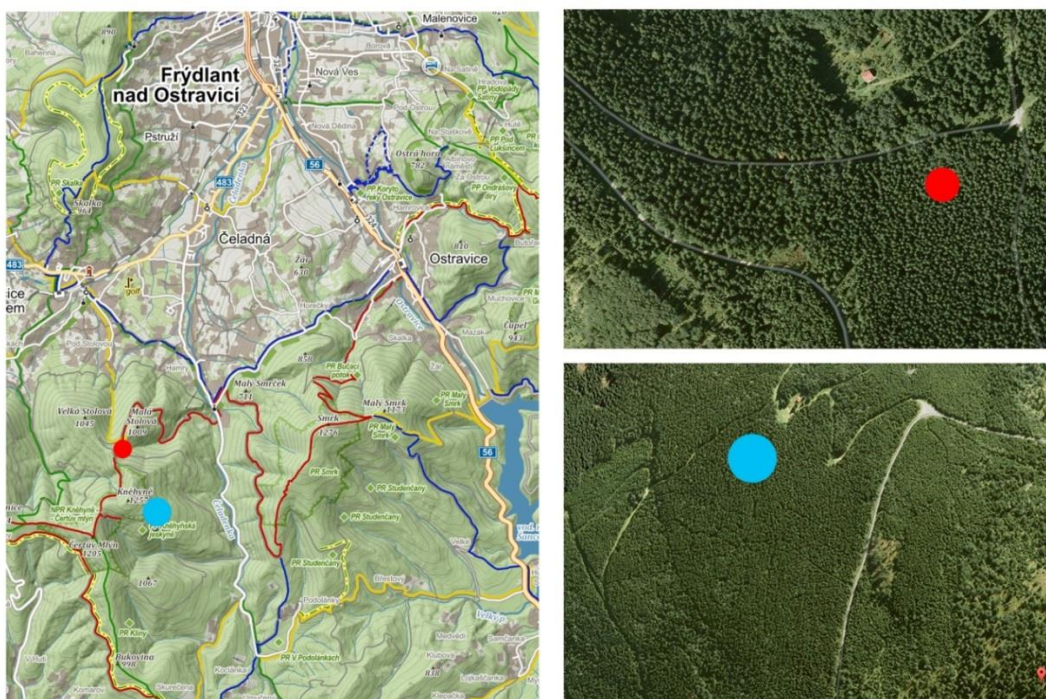
### 3.1.3 Výzkumné plochy Leopoldka a Salaška (Beskydy, Kněhyně)

Výzkumné plochy se nacházejí v Moravskoslezských Beskydách v oblasti vrchu Kněhyně (Obrázek 10), se zeměpisnými souřadnicemi 49°29'44.669" s.z.š a 18°18'45.665" v.z.d. Poloha výzkumných ploch reprezentuje z ekologických a hospodářských pohledů vysoké polohy Beskyd. Plochy jsou umístěny v nadmořské výšce 900 – 1040 m n. m. v přechodovém pásmu mezi jedlobukovým a smrkobukovým lesním vegetačním stupněm.

Z hlediska edafických kategorií se jedná především o kategorie S, popřípadě A a F, v pásmu imisního ohrožení B.

Tabulka 6: Základní charakteristika výzkumných ploch z oblasti Beskyd (plocha 1. a 2. – Leopoldka, plochy 3. – 5. Salaška, Moravskoslezské Beskydy, vrch Kněhyně).

	Porost	Nadmořská výška [m n.m.]	Orientace a sklon svahu	Lesní typ	Věk (v r. 2012)	Plocha [ha]
<b>1.</b>						
<b>2.</b>	535 D7	980 - 1010	SSZ / 30 - 35 °	6A3 6F1	79 89	0,24 0,21
<b>3.</b>	549D6				66	0,20
<b>4.</b>	549D6	1070 - 1075	Z / 10 °	6S1	66	0,19
<b>5.</b>	547 A7				71	0,19



Obrázek 10: Poloha výzkumných ploch Salaška (modré označení) a ploch Leopoldka (červené označení).

Výzkum na těchto plochách navazuje na práci Tesaře a Dobrovolného (2011), ve kterých byla věnována pozornost růstu uměle založených smrkových porostů v podmínkách znečištěného ovzduší s různým způsobem výchovy.

### 3.1.3.1 Lokalita Leopoldka

Lokalita Leopoldka je rozdělena na dvě srovnávací smrkové plochy (Plocha 1. a 2.), které byly experimentálně odlišeny v průběhu roku 1987. Zřetelně se lišily zakmeněním a tloušťkovým rozvrstvením porostu. Takové rozdíly nemohly být způsobeny věkovým rozdílem 10 let, byly zřejmě vyvolány vývojem po různě silném sněhovém polomu, který se dostavil někdy okolo r. 1975. I přeživší stromy nesou dnes stopy dřívějšího lámání korun sněhem, v některých případech i opakovaným (TESAŘ a HORČIČKA, 1997).

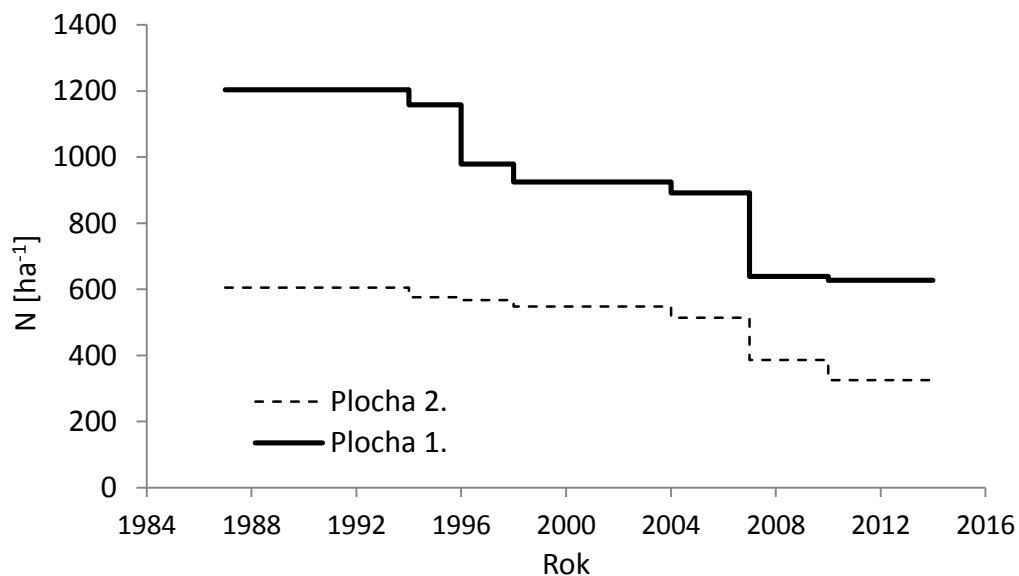
Základní porostní charakteristiky výzkumných ploch jsou uvedeny v [tabulce 6](#). Na [obrázku 11](#) je uveden vývoj porostní hustoty pro výzkumnou plochu 1. a 2.

### 3.1.3.2 Lokalita Salaška

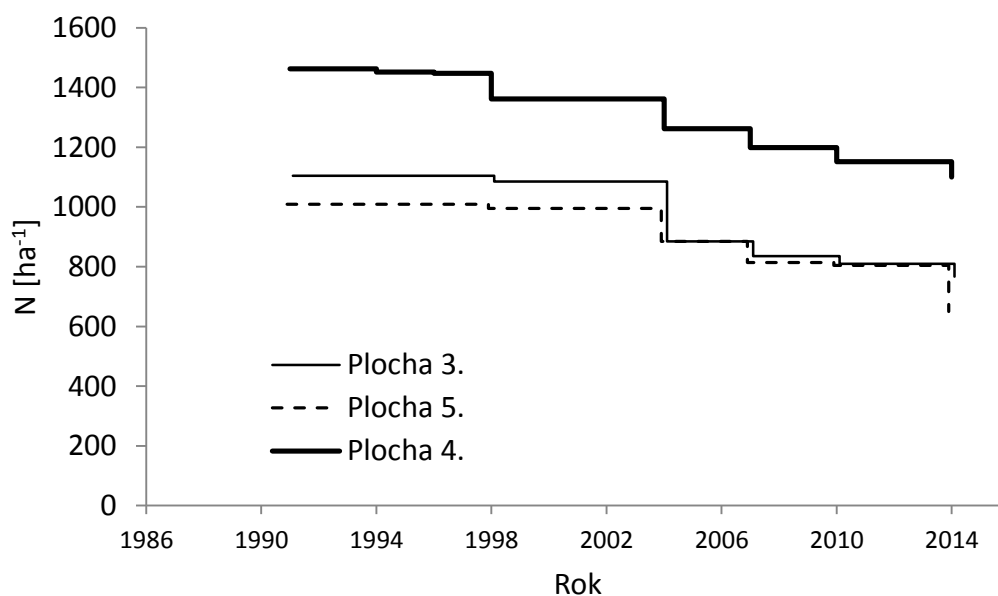
V lokalitě Salaška se nachází trojce probírkových ploch v tyčovině (Plocha 3., 4., 5.). Před založením pokusu byly v roce 1987 vytěženy souše a byla uskutečněna slabá probírka, běžná v tehdejší praxi. Odlišné probírkové metody byly aplikovány v roce 1989 s přihlédnutím k výchozímu stavu. Základní porostní charakteristiky jsou uvedené v [tabulce 7](#). Vývoj porostní hustoty z lokality Salaška je zobrazen na [obrázku 12](#).

Tabulka 7: Základní porostní charakteristiky výzkumných ploch z lokality Beskyd (Kněhyně) z roku 2012 (DBH - výčetní tloušťka ve výšce 1,3 m, H - výška porostu,  $G_{1,3}$  – výčetní kruhová základna porostu).

Plocha	DBH [cm]		H [m]		$G_{1,3}$ [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]
	Průměr	± SD	Průměr	± SD	
1.	28,9	4,46	19,1	1,33	43,52
2.	42,5	7,62	23,7	3,51	47,91
3.	28,2	4,61	19,6	2,07	49,47
4.	23,9	6,30	19,2	1,91	69,36
5.	30,8	5,24	20,4	1,26	50,07



Obrázek 11: Vývoj hustoty porostů v lokalitě Leopoldka (Výzkumná plocha 1. a 2.), (TESAŘ a DOBROVOLNÝ, 2011 aktualizováno na současný stav porostů).



Obrázek 12: Vývoj porostní hustoty v lokalitě Salaška (výzkumná plocha 3., 4., a 5.), (TESAŘ a DOBROVOLNÝ, 2011 aktualizováno na současný stav porostů).



## 3.2 Vliv historie výchovy na parametry porostu a alokaci biomasy

### 3.2.1 Úvod

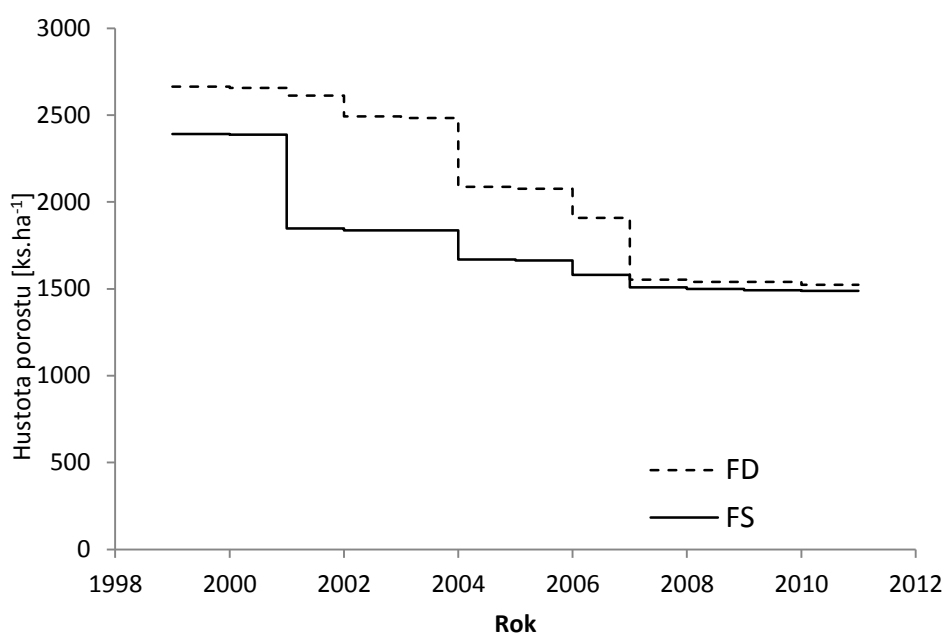
Regulace porostní hustoty je hlavním nástrojem při ovlivňování růstu stromů a kvality dřeva. Podúrovňová probírka může zvýšit podíl cenných výřezů v porostu, ale obvykle nezvyšuje celkový přírůst na jednotku plochy (CARBONNIER, 1967; ASSMANN, 1968; HASENAUER et al., 1997; ZEIDE, 2001). Několik studií ukázalo, že přírůst na porostní plochu neklesá s klesající porostní hustotou v širokém rozsahu snížení porostní hustoty u mnoha druhů dřevin (HAMILTON, 1981; HORNE et al., 1986). To znamená, že v případě podúrovňové probírky je přírůst více fixován do jedinců větších dimenzí oproti menším a porost s nižší hustotou je schopen produkovat stejný objemový přírůst na jednotku plochy. K dosažení maximálního přírůstu na jednotku plochy a zároveň největšího podílu cenných výřezů musí být věnována značná pozornost intenzitě, frekvenci a typů probírkového zásahu.

Pravidelné silné kalamity abiotickými činiteli (např. orkán Kyrill v lednu 2007, vichřice Emma v březnu 2008) způsobily silné ekonomické ztráty v českém lesnictví. Zimní bouře jsou často v kombinaci se sněhem nebo ledem. Z těchto důvodů je věnována velká pozornost rozvoji pěstebních opatření proti vzniku škod právě abiotickými činiteli za účelem zvýšení stability smrkových monokultur (ABETZ, 1975; KRAMER a SPELLMANN, 1980 BRÜCHERT et al., 2000). Ze studií v České republice je to především práce SLODIČÁKA a NOVÁKA (2007). Zlepšení stability porostů bylo na základě zaměření se na problémy stability jednotlivých stromů namísto stability porostu. Pozornost se věnuje tomu, jak pěstebními zásahy ovlivnit morfologické charakteristiky stromu jako jsou výška a tvar kmene, výška nasazení koruny, velikost a tvar koruny a rozložení kořenového systému. Stabilita jednotlivých stromů proti abiotickým činitelům je úzce spjatá s tvarem kmene a charakteristikou koruny (PERSSON, 1972; PETTY a WORRELL, 1981; PETTY a SWAIN, 1985; VALINGER et al., 1993). Tyto vlastnosti jsou velmi variabilní a tato variabilita je značně ovlivnitelná porostní výchovou (BRÜCHERT et al., 2000).

Tato kapitola pojednává o morfologických vlastnostech (tvar a velikost koruny, tvar kmene) jednotlivých stromů v závislosti na historii porostní výchovy a jejich vlivu na produkci biomasy a stabilitu porostu.

### 3.2.2 Materiál a metody

Výzkum probíhal na experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž, a to konkrétně ve volné smrkové ploše lokality EEP Bílý Kříž. V roce 1995 byly v této monokultuře vybrány dvě plochy o velikosti 0,25 ha, kde byla podúrovňovým až úroňovým zásahem odlišena plocha řídká – FS od husté – FD (bez zásahu). Podrobný popis těchto ploch je uveden v kapitole popisu lokalit (viz 3.1.1.1 Volná smrková plocha lokality EEP Bílý Kříž). Vývoj porostní hustoty v jednotlivých plochách znázorňuje [obrázek 13](#).



Obrázek 13: Vývoj porostní hustoty v ploše FS a FD.

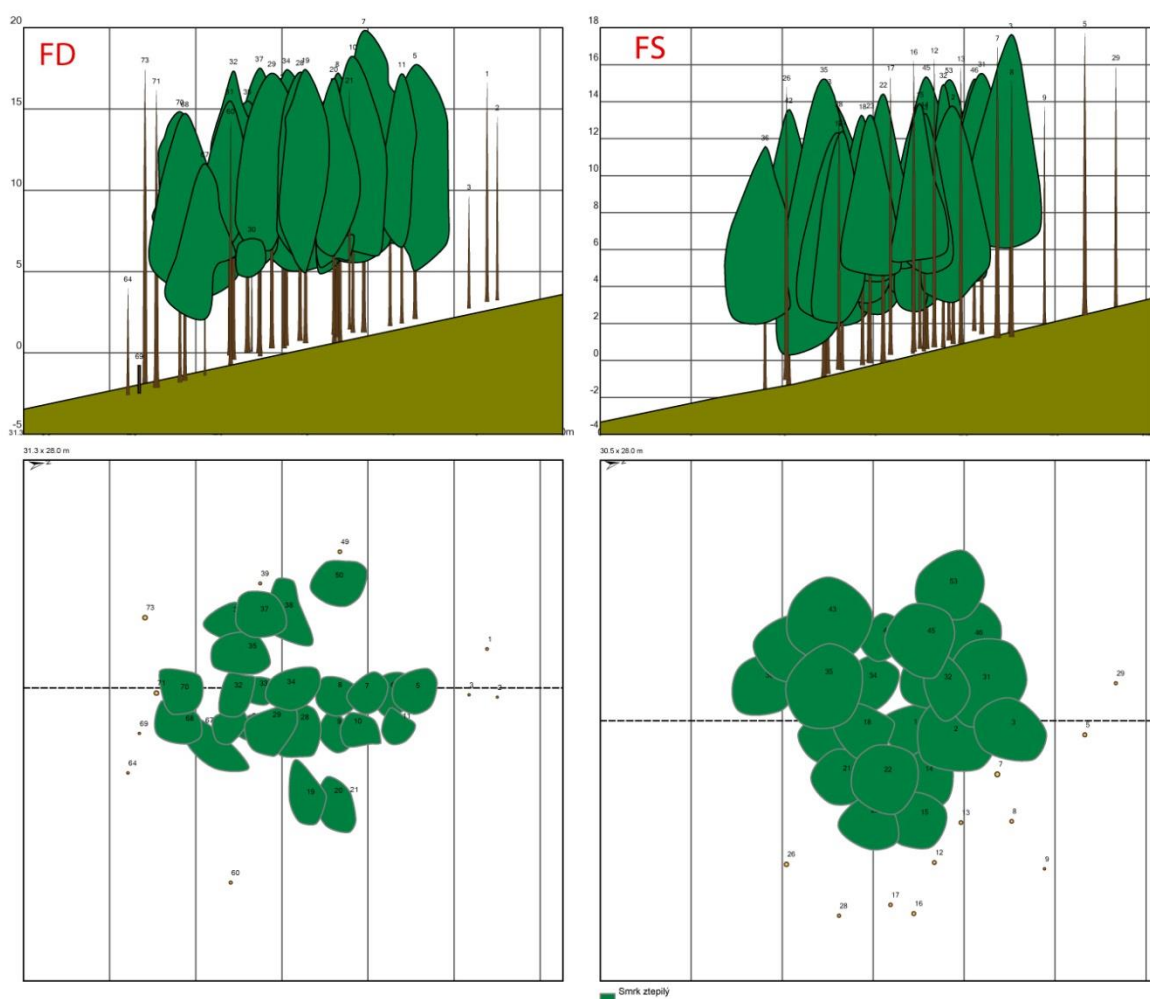
Podrobnou dendrometrickou charakteristiku studovaných ploch FS a FD uvádí [tabulka 10](#). Dendrometrické charakteristiky stromů byly zjišťovány pravidelnými inventarizacemi vždy na konci vegetační sezóny. Výčetní tloušťka ve výšce 1,3 m (DBH) byla vypočtena z měření obvodu u všech stromů na ploše. Výškové charakteristiky jako je výška stromu (H) a výška nasazení živé koruny (Lc) byly měřeny výškoměrem Vertex (Haglöf Sweden AB).

Index listové plochy (LAI) byl měřen na každé z ploch nepřímou metodou pomocí přístroje LAI-2000 PCA (Li-Cor, USA) v síti 49 měřičských stanovišť s rozestupem 1m x 1m, a to v ca 14denním intervalu v průběhu všech růstových sezón. Od roku 2006 bylo LAI měřeno na jediném transektu, který nerozlišoval plochy FS a FD. Důvodem byla takřka sjednocená porostní hustota obou ploch.

V roce 2011 byla do FS i do FD vložena podrobnější výzkumná inventarizační plocha. Podrobná výzkumná plocha má charakter inventarizační plochy z národní inventarizace lesů.

Každá inventarizační plocha má rozlohu 500 m<sup>2</sup> a skládá se ze dvou pomyslných, různě velkých, soustředných inventarizačních kruhů, ve kterých probíhá vlastní měření a sběr dat. Na vnitřním kruhu o poloměru 7 m jsou měřeny stromy od výčetní tloušťky 7 cm a na celé inventarizační ploše jsou měřeny stromy s výčetní tloušťkou od 12 cm. Na vnitřním kruhu jsou dále měřeny korunové projekce, výška nasazení koruny, velikost koruny, počet pařezů a mrtvé dřevo. Dále byly na ploše FS a FD vytyčeny transekty, na kterých jsou měřeny kmenové a korunové profily tak, aby byla zachycena variabilita na výzkumné ploše (Obrázek 14).

Zaměření a podrobné měření na těchto plochách bylo provedeno technologií Field-Map, skládající se z elektronického kompasu (MapStar, Laser Technology, Inc., USA), terénního počítače se softwarem Field-Map verze 12 (IFER, Česká republika) a laserového dálkoměru (Impulse, Laser Technology, Inc., USA) se záměrným dalekohledem Meopta (Meopta - optika, s.r.o., Česká republika), který umožňuje vzdálené efektivní měření tloušťek v libovolné výšce v rámci kmenového profilu (IFER, Česká republika).



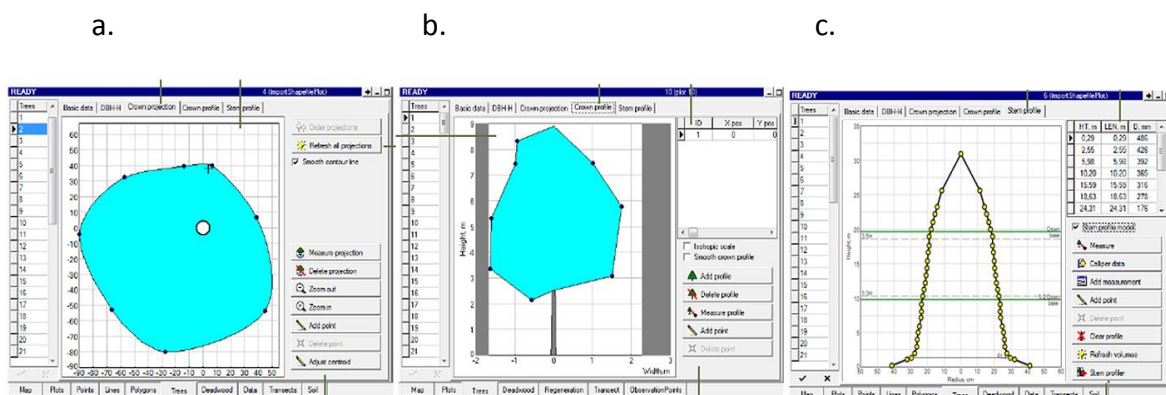
Obrázek 14: Schéma zaměření vzorníkových stromů z ploch FS a FD.

## Měření kmenových profilů

Měření kmenových profilů proběhlo na vzorníkových stromech v rámci podrobné inventarizační plochy. Výběr vzorníkových stromů byl zvolen tak, aby vzorníkové stromy reprezentovaly celou tloušťkovou strukturu porostu ( $n=22$  (FS);  $n=20$  (FD)). K měření byla využita nedestruktivní metoda měření kmenových profilů technologií Field-Map. Celá sestava Field-Map byla umístěna na tripodu, který poskytoval pevnou oporu při odečítání tlouštěk. Sestava byla vždy umístěna na místo, z kterého byl výhled na větší část průběhu kmene vzorníku. V první fázi měření bylo nutné určit polohu přístroje vůči vzorníkovému stromu. Měření tloušťkového profilu bylo zahájeno změřením třech tlouštěk v definované výšce, a to 0,3 m, 1,3 m a 2 m nad zemí. Tyto tři tloušťky byly měřeny obvodovým pásmem. Dále pak byly měřeny tloušťky pomocí technologie Field-Map v intervalu 1,5–2 m až do místa, ve kterém se dala tloušťka kmene spolehlivě odečíst. Výš byly tloušťky měřeny v případě viditelnosti kmene, a to v obvykle větším, blíže nespecifikovaném intervalu. Metodika měření tvaru kmene se opírá o metodický postup, který popisují ČERNÝ a PAŘEZ (2005).

## Měření korunových projekcí a tvaru koruny

Zaměření tvaru a velikosti korun vzorníkových stromů probíhalo ve dvou fázích. První fází bylo zaměření horizontální projekce koruny. Pomocník s výtyčkou kopíroval lomové body svíslého průmětu koruny a pomocí technologie Field-Map byly zachyceny jednotlivé body průmětu koruny. V rámci horizontální projekce bylo vždy změřeno minimálně šest bodů. Druhou fází v měření korunové vrstvy vzorníkových stromů bylo zaměření korunového profilu. Měření korunového profilu bylo provedeno ze dvou na sebe kolmých směrů (ČERNÝ et al., 2006). Pro zaměření korunového profilu bylo vždy zaměřeno minimálně deset bodů po obvodu celého korunového profilu. Na obrázku 15 je znázorněno zaměření korunové projekce a korunového a kmenového profilu.



Obrázek 15: Znázornění zaměření korunové projekce (a.), korunového profilu (b.) a kmenového profilu (c.).

### Tvar kmene a koruny

Pro analýzu tvaru kmene byla využita nepravá výtvarnice ( $F_{1,3}$ ). Rovnici pro výpočet nepravé výtvarnice uvádí [rovnice č. 2](#); z nepravé výtvarnice pro každý vzorníkový strom byla vypočítána průměrná nepravá výtvarnice pro výzkumnou plochu (MSF).

$$F_{1,3} = \frac{V}{g_{1,3} \times H} \quad (2).$$

Kde  $V$  je skutečný objem kmene vzorníku,  $g_{1,3}$  je kruhová průřezová plocha vzorníku ve výšce 1,3 m a  $H$  je výška jedince.

Pro analýzu tvaru koruny byla vypočítána výtvarnice koruny jednotlivých vzorníků ( $F_c$ ) podle [rovnice 3](#). Z jednotlivých  $F_c$ , byla vypočítána průměrná výtvarnice koruny pro výzkumnou plochu (MCF).

$$F_c = \frac{C_v}{C_p \times H_c} \quad (3)$$

Kde  $C_v$  je skutečný objem koruny,  $C_p$  je korunová projekce a  $H_c$  je délka koruny.

Dále byl pro vyhodnocení tvaru koruny vypočítán korunový poměr ( $SK_k$ ). Korunový poměr byl vypočítán jako poměr délky živé koruny ( $H_c$ ) k šířce koruny. Pro vyhodnocení stability stromu proti ohrožení abiotickými činiteli byl vypočítán štíhlostní koeficient kmene ( $SK$ ). Štíhlostní koeficient kmene byl vypočítán jako poměr mezi výškou ( $H$ ) a výčetní tloušťkou ( $DBH$ )

### *Stanovení biomasy (jehlice, větve, kmen a kořeny)*

Pro stanovení biomasy orgánů stromu (jehlic, větví a kmene) byly použity stanovištně specifické alometrické rovnice z lokality Bílý Kříž, které publikoval [POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ \(2007\)](#). Pro odvození biomasy kořenů byly převzaty rovnice od [Drexhage a Gruber \(1999\)](#). Parametry a tvary rovnic udává [tabulka 8](#).

Tabulka 8: Alometrické rovnice použité pro stanovení biomasy jehlic (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB).

Frakce	Použitý model	Zdroj
Jehlice	$LB = 0,0623 \text{ DBH}^2$	POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ (2007)
Větve	$BB = 0,0568 \text{ DBH}^2$	POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ (2007)
Kmen	$SB = 0,04 \text{ DBH}^2,4696$	POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ (2007)
Kořeny	$RB = 0,02 \text{ DBH}^2,36$	DREXHAGE a GRUBER (1999)

### Výskyt zlomu kmene

V roce 2011 proběhlo vyhodnocení výskytu zlomů kmene na podrobné inventarizační ploše. Ke klasifikaci zlomu kmene byla využita klasifikace IUFRO. Zlom je přelomení kmene vlivem větru, sněhu, námrazy, ledovky, zemními a sněhovými lavinami, půdními sesuvy i antropogenními vlivy. Klasifikaci typů zlomů uvádí [tabulka 9](#) s ohledem na výšku, ve které ke zlomu došlo (HOLDER et al., 2006).

Tabulka 9: Klasifikace výskytu zlomu kmene (HOLDER et al., 2006).

Označení	Popis
Bez zlomu	Strom <u>není zlomem poškozen</u> .
Vrcholový zlom	<u>Vrškový zlom</u> : ke zlomení kmene došlo v horní třetině koruny, suchý vrchol, není-li vytvořen náhradní vrchol.
Korunový zlom	<u>Korunový zlom</u> : ke zlomení kmene došlo ve zbývajících dvou třetinách živé koruny; z celé koruny zbývají obvykle jen větve ze dvou až tří nejspodnějších živých přeslenů.
Kmenový zlom	<u>Kmenový zlom</u> : ke zlomení kmene došlo pod živou korunou.
Ohnutí stromu	<u>Ohnutí stromu</u> (včetně výrazného naklonění stromu) - tj. vrchol koruny je více než 1/4 výšky stromu odchýlen od paty kmene

### Statistické vyhodnocení

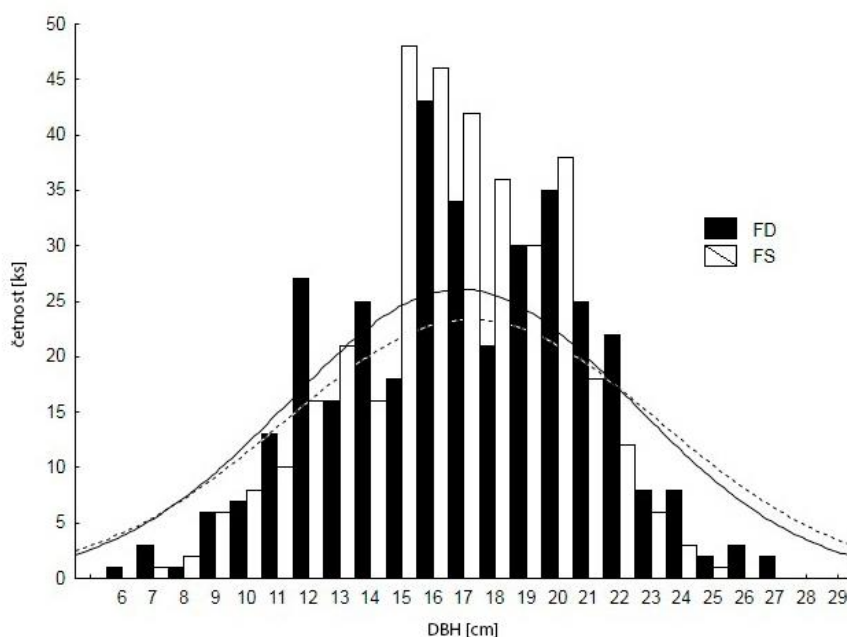
Statistické vyhodnocení dat bylo provedeno v programu Statistica 10 (StatSoft). Pro porovnání vlivu historie výchovy na parametry porostu a alokaci biomasy bylo použito statistického testování shody středních hodnot na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  a u vybraných charakteristik byl zkonstruován regresní model. Popisná statistika a sestavení regresních modelů bylo provedeno v programu MS EXCEL.

Tabulka 10: Základní dendrometrické charakteristiky výzkumných ploch FS a FD v období 1999–2011. ( $\pm$  SD – směrodatná odchylka).

Charakteristika	Plocha	Rok													
		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Věk porostu / věk stromů	[rok]	<b>FD</b>	18/22	19/23	20/24	21/25	22/26	23/27	24/28	25/29	26/30	27/31	28/32	29/33	30/34
		<b>FS</b>													
Mediánová výška porostu (H)	[m]	<b>FD</b>	8,00	8,60	9,20	9,90	10,50	11,30	12,00	13,00	13,40	13,75	14,30	14,80	15,65
		<b>FS</b>	7,00	7,60	8,50	9,30	9,90	10,60	11,30	12,00	12,40	12,80	13,30	13,90	14,60
Průměrná výška nasazení živé koruny (L <sub>c</sub> )	[m]	<b>FD</b>	0,80	1,00	1,30	1,50	1,90	2,20	2,50	3,10	3,25	3,43	3,93	4,38	4,95
		( $\pm$ SD)	0,22	0,28	0,34	0,40	0,46	0,52	0,58	0,64	0,70	0,70	0,90	0,90	0,90
		<b>FS</b>	0,50	0,50	0,80	0,90	0,90	1,10	1,50	2,00	2,29	2,66	3,09	3,51	3,90
		( $\pm$ SD)	0,20	0,20	0,20	0,22	0,24	0,29	0,38	0,47	0,60	0,60	0,70	0,90	0,90
Průměrná tloušťka ve výšce 1.3m (DBH)	[cm]	<b>FD</b>	9,50	10,10	10,80	11,50	12,00	13,00	13,50	14,10	14,95	15,61	16,13	16,60	17,12
		( $\pm$ SD)	1,76	1,96	2,16	2,36	2,56	2,76	2,96	3,16	3,38	3,53	3,76	3,94	4,17
		<b>FS</b>	8,50	9,10	10,20	11,00	11,70	12,60	13,30	14,00	14,57	15,30	15,89	16,37	16,94
		( $\pm$ SD)	2,16	2,26	2,36	2,46	2,57	2,67	2,77	3,00	2,88	3,00	3,16	3,29	3,44
Výčetní kruhová základna porostu (G <sub>1.3</sub> )	[m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	20,29	22,87	25,34	27,55	29,92	29,20	31,47	31,44	28,64	30,97	33,14	34,79	37,00
		<b>FS</b>	14,50	16,62	16,01	18,29	20,60	21,69	24,09	25,29	26,11	28,62	30,69	32,53	34,84

### 3.2.3 Výsledky

Tloušťkovou strukturu výzkumných ploch FS a FD uvádí [obrázek 16](#). Z přiloženého histogramu vyplývá, že v ploše FS je větší zastoupení tlouštěk kolem střední hodnoty. U plochy FD je naopak zaznamenána větší variabilita v rámci tloušťkové struktury.



Obrázek 16: Četnost stromů dle tloušťkových tříd pro plochu FS a FD.

Analýzy tvaru kmene a koruny byly provedeny na vzorníkových stromech v rámci podrobných inventarizačních ploch FS a FD. [Tabulka 11](#) uvádí vybrané charakteristiky těchto vzorníkových stromů včetně statistického porovnání na shodu středních hodnot při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Z výsledků vyplývá, že nebyl prokázán statisticky významný rozdíl u tloušťky vzorníkových stromů ( $P=0,9530$ ). U dalších charakteristik (objem kmene ( $V$ ), korunová projekce ( $C_p$ ), objem koruny ( $C_v$ ), korunový poměr ( $SK_k$ ), výška stromu ( $H$ ) a nasazení živé koruny ( $L_c$ )) byl prokázán statisticky významný rozdíl mezi plochami FS a FD. Průměrný objem kmene byl větší u plochy FD, a to v průměru o ca 19 % oproti ploše FS. Další významný rozdíl byl zaznamenán ve velikosti korunové projekce, kde u plochy FS stromy dosahovaly víc než dvojnásobné velikosti korunové projekce oproti ploše FD. Rozdíl ve velikosti objemu koruny byl prokázán jako signifikantní, i když leží na samé hranici statistické významnosti a činil 16,5 % ve prospěch plochy FS. Korunový poměr byl vyšší o ca 42 % u



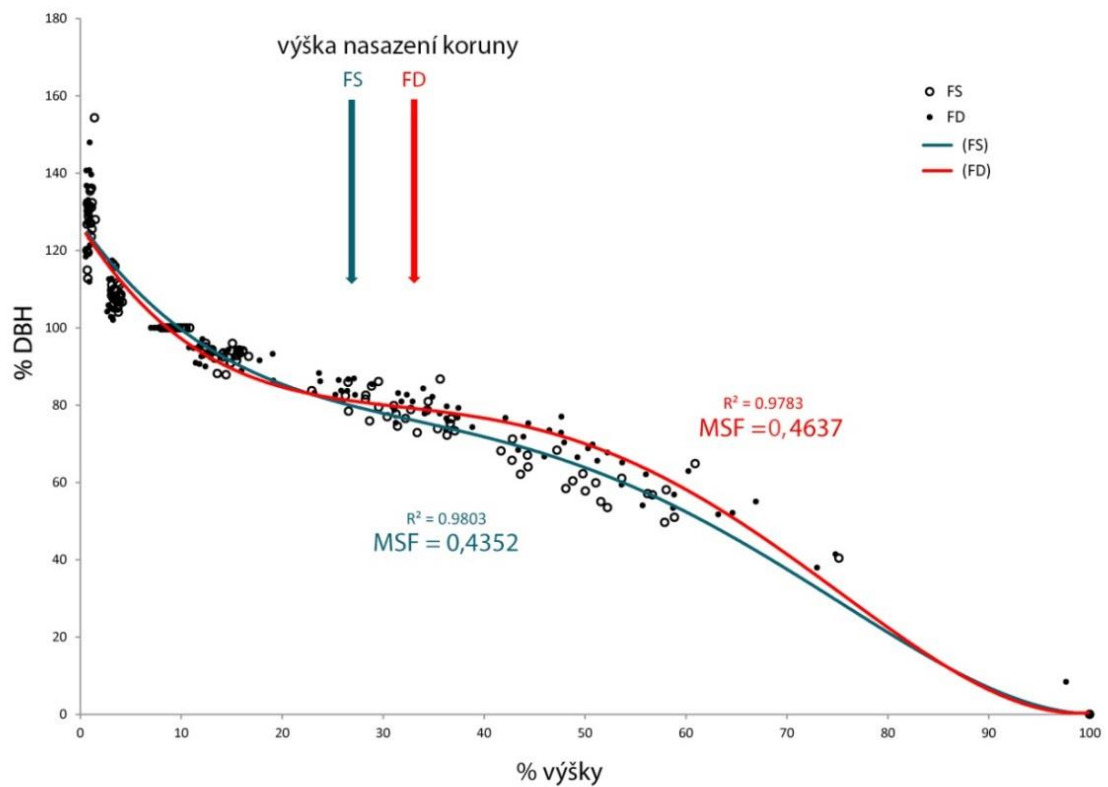
plochy FD a tento rozdíl byl prokázán jako statisticky významný rozdíl (což dokládá – úzké štíhlé koruny ve FD a širší, rozložitější koruny v FS). Významné statistické rozdíly byly zaznamenány i ve výšce stromů, kde rozdíl činil ca 13 %, a v parametru nasazení živé koruny stromu, kde byl tento rozdíl ca 41 % mezi výzkumnými plochami.

Tabulka 11: Vybrané charakteristiky vzorníkových stromů z plochy FS (n=22) a FD (n=20).

Plocha	Charakteristika	Objem kmene (V)	Korunová projekce (C <sub>p</sub> )	Objem koruny (C <sub>v</sub> )	Korunový poměr (SK <sub>k</sub> )	DBH (DBH)	Výška stromu (H)	Nasazení živé koruny (L <sub>c</sub> )
		[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]		[mm]	[m]	[m]
<b>FS</b>	Průměr	0,16	10,00	53,39	5,27	176,09	13,99	3,81
	(± SD)	0,06	2,59	20,70	0,85	29,25	0,96	1,04
<b>FD</b>	Průměr	0,19	4,92	45,83	7,51	175,76	15,75	5,39
	(± SD)	0,09	1,41	23,35	1,44	35,61	1,38	1,06
	hodnota P*	0,009016	0,000000	0,049576	0,000000	0,953019	0,000000	0,000000

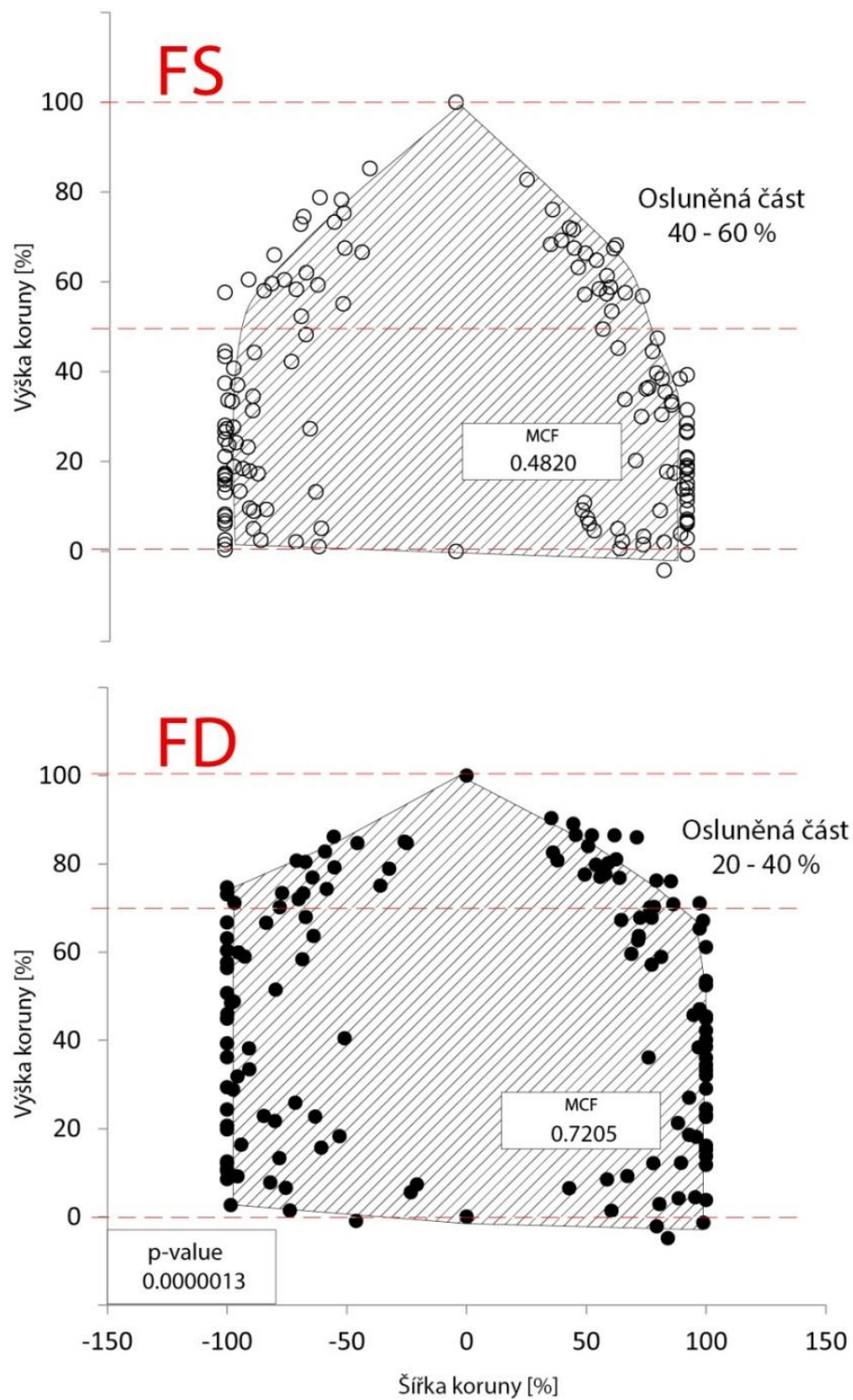
\* $\alpha = 0,05$

Tvar kmene vzorníkových stromů je zobrazen na [obrázku 17](#). Průměrná výtvarnice kmene (MSF) byla 0,44 (± SD 0,04) pro plochu FS a 0,46 (± SD 0,03) pro plochu FD. Statistický test na shodu středních hodnot potvrdil statisticky významný rozdíl ve tvaru kmene mezi plochami FS a FD (P=0,0069). Na [obrázku 17](#) je dále zobrazené místo nasazení živé koruny, kde je u tvaru kmene znát největší rozdíl právě od tohoto místa.



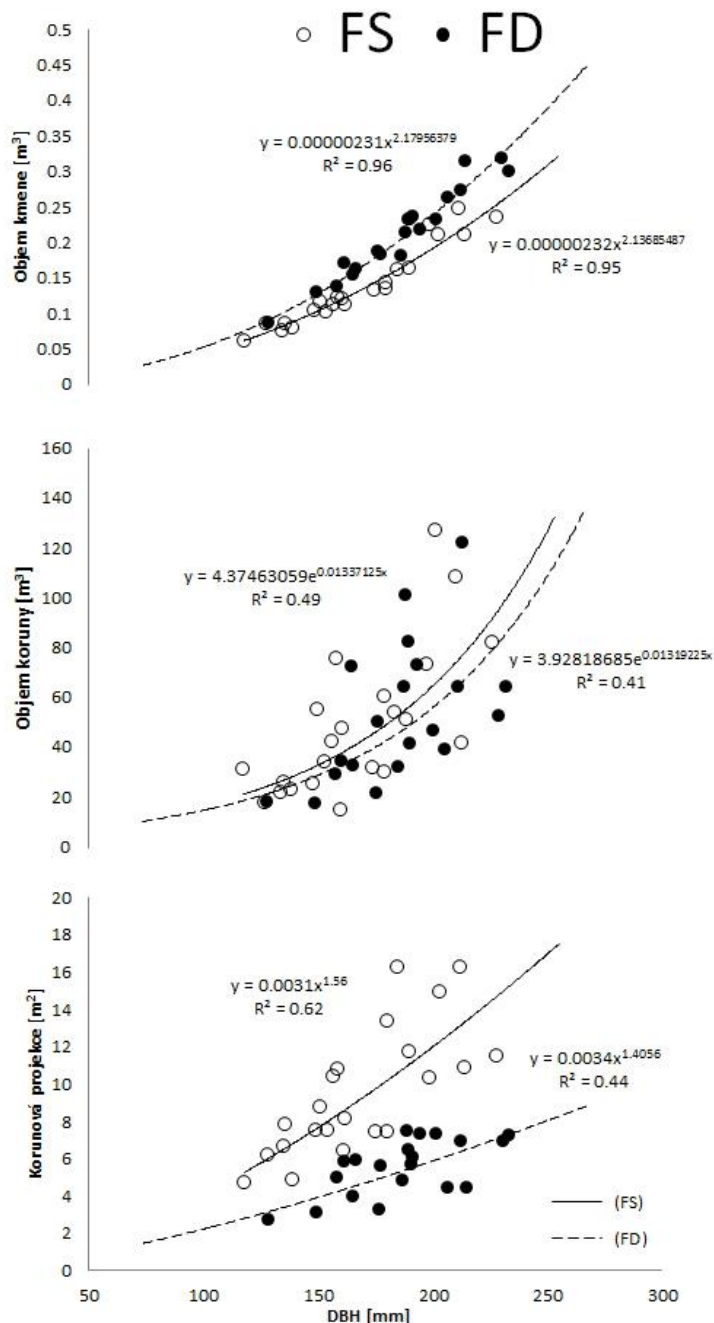
Obrázek 17: Tvar kmene pro plochy FS a FD.

Relativizovaný tvar koruny vzorníkových stromů z plochy FS a FD je znázorněn na [obrázku 18](#). Pro porovnání tvaru korun byly vypočítány výtvarnice koruny pro jednotlivé vzorníkové stromy. Průměrná hodnota výtvarnice koruny (MCF) byla 0,4820 ( $\pm$  SD 0,11) pro plochu FS a 0,7205 ( $\pm$  SD 0,14) pro plochu FD. Test na shodu středních hodnot potvrdil statisticky významný rozdíl ve tvaru korun ( $P=0,0000$ ). Na obrázku je dále zvýrazněno, do jaké výšky koruny sahá osluněná část koruny. Osluněná část koruny v případě plochy FS tvoří 40–60 % z výšky koruny, oproti tomu u vzorníkových stromů z plochy FD je tato osluněná část pouze 20–40 %.



Obrázek 18: Relativizovaný tvar koruny vzorníkových stromů na ploše FS a FD. MCF je průměrná výtvarnice koruny.

Byly sestaveny regresní modely pro vztah objemu kmene, objemu koruny a korunové projekce ve vztahu k DBH (Obrázek 19). Regresní model pro vztah DBH a objemu kmene dosahoval hodnot koeficientu determinace 0,96 pro plochu FD a 0,95 pro plochu FS. Jak již



bylo popsáno výše, v ploše FD bylo dosaženo vyššího objemu kmene než u plochy FS při stejné hodnotě DBH.

Rozdíl ve velikosti objemu koruny ve vztahu k DBH nebyl tak výrazný oproti korunové projekci. Koeficient determinace pro vztah DBH a objemu koruny byl 0,49 pro plochu FS a 0,41 pro plochu FD. O něco vyšších hodnot koeficientu determinace bylo dosaženo u vztahu DBH a korunové projekce, kde koeficient determinace dosahoval hodnot 0,62 u FS a 0,44 u FD.

Výsledky potvrzují, že stromy v ploše FD byly schopny vytvořit kmeny o větším objemu s menší korunou než v případě plochy FS.

Obrázek 19: Regresní vztah mezi DBH a objemem kmene, DBH a objemem koruny a DBH s korunovou projekcí. U všech vztahů je uvedena regresní rovnice a koeficient determinace.

Vývoj přírůstu a zásoby biomasy pro jednotlivé plochy uvádí [tabulka 12](#). Zásoba biomasy je odvozená pomocí alometrických rovnic a přírůst biomasy je vypočítán na základě pravidelných inventarizací dendrometrických parametrů vždy na konci vegetační sezony.

Tabulka 12: Vývoj zásoby biomasy a její přírůst pro jednotlivé orgány z období 1999–2011 pro plochu FS a FD.

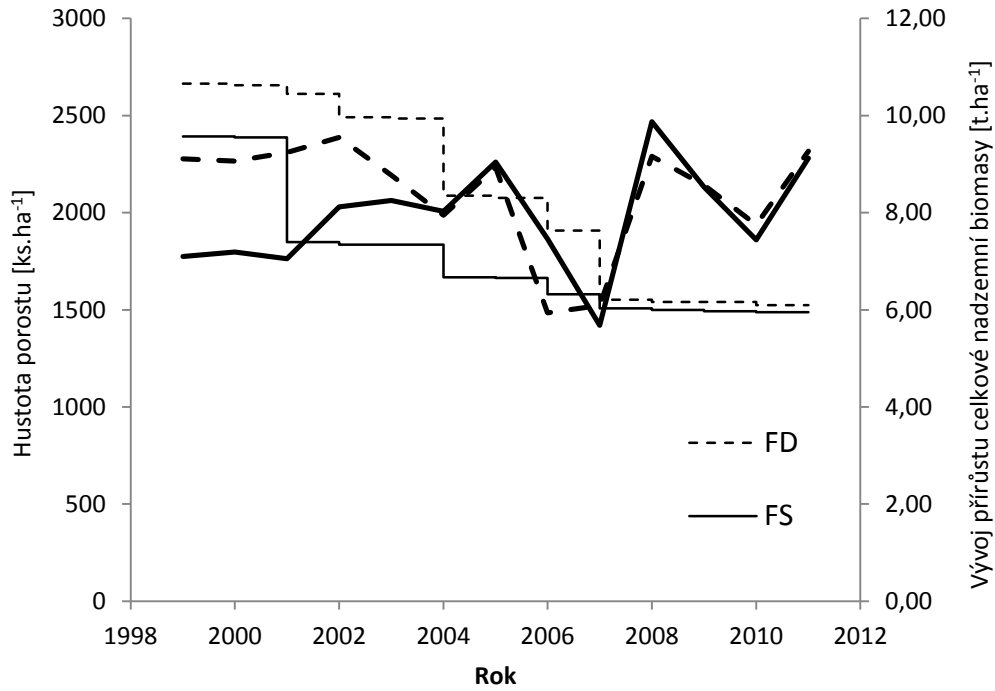
Charakteristika	Plocha	Rok													
		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Celková nadzemní biomasa (TBA)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	61,85	70,87	79,68	87,99	96,64	95,91	104,51	99,30	96,53	105,46	114,01	120,64	129,57
		<b>FS</b>	42,89	50,05	49,46	57,47	65,72	70,39	79,31	83,37	87,24	96,80	104,95	112,20	121,29
Celková podzemní biomasa hr. kořenů (TCRB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	12,09	13,94	15,76	17,51	19,32	19,30	21,12	21,40	15,47	21,82	23,68	25,13	27,07
		<b>FS</b>	8,28	9,73	9,71	11,36	13,07	14,09	15,97	17,05	15,02	19,87	21,62	23,18	25,14
Celková biomasa kmenů (SB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	31,36	36,40	41,42	46,31	51,34	51,64	56,78	55,21	53,61	59,10	64,40	68,60	74,21
		<b>FS</b>	21,21	25,11	25,32	29,84	34,55	37,52	42,75	45,48	47,90	53,68	58,65	63,10	68,72
Celková biomasa větví (BB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	14,68	16,55	18,33	19,94	21,65	21,13	22,77	21,10	20,48	22,12	23,69	24,86	26,47
		<b>FS</b>	10,49	12,03	11,59	13,23	14,90	15,69	17,43	18,10	18,75	20,56	22,07	23,41	25,09
Celková biomasa listoví (LB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	16,10	18,15	20,11	21,87	23,74	23,17	24,97	22,99	22,44	24,24	25,96	27,24	29,01
		<b>FS</b>	11,51	13,19	12,71	14,51	16,35	17,21	19,12	19,78	20,56	22,54	24,20	25,68	27,51
Přírůst celkové nadzemní biomasy (Δ TBA)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	9,11	9,06	9,24	9,55	8,77	7,95	8,93	5,94	6,09	9,16	8,57	7,75	9,27
		<b>FS</b>	7,10	7,19	7,05	8,12	8,25	8,03	9,04	7,46	5,68	9,87	8,53	7,44	9,12
Přírůst biomasy kmenů (Δ SB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	5,01	5,07	5,22	5,47	5,09	4,67	5,30	3,57	3,70	5,60	5,31	4,82	5,80
		<b>FS</b>	3,80	3,92	3,91	4,57	4,70	4,65	5,30	4,42	3,38	5,93	5,19	4,55	5,63

Přírůst biomasy větví ( $\delta$ BB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	1,93	1,88	1,90	1,93	1,74	1,55	1,72	1,13	1,14	1,71	1,57	1,42	1,68
		<b>FS</b>	1,56	1,54	1,48	1,67	1,67	1,60	1,77	1,44	1,08	1,87	1,60	1,39	1,68
Přírůst biomasy listoví ( $\delta$ LB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	2,12	2,06	2,08	2,11	1,91	1,70	1,89	1,24	1,26	1,87	1,72	1,55	1,84
		<b>FS</b>	1,71	1,69	1,63	1,83	1,84	1,75	1,94	1,58	1,22	2,06	1,76	1,53	1,84
Přírůst biomasy hr. kořenů ( $\delta$ RB)	[t.ha <sup>-1</sup> ]	<b>FD</b>	1,85	1,86	1,90	1,98	1,83	1,67	1,88	1,37	1,32	1,98	1,86	1,68	2,00
		<b>FS</b>	1,42	1,46	1,44	1,67	1,71	1,67	1,90	1,62	1,20	2,10	1,82	1,59	1,96

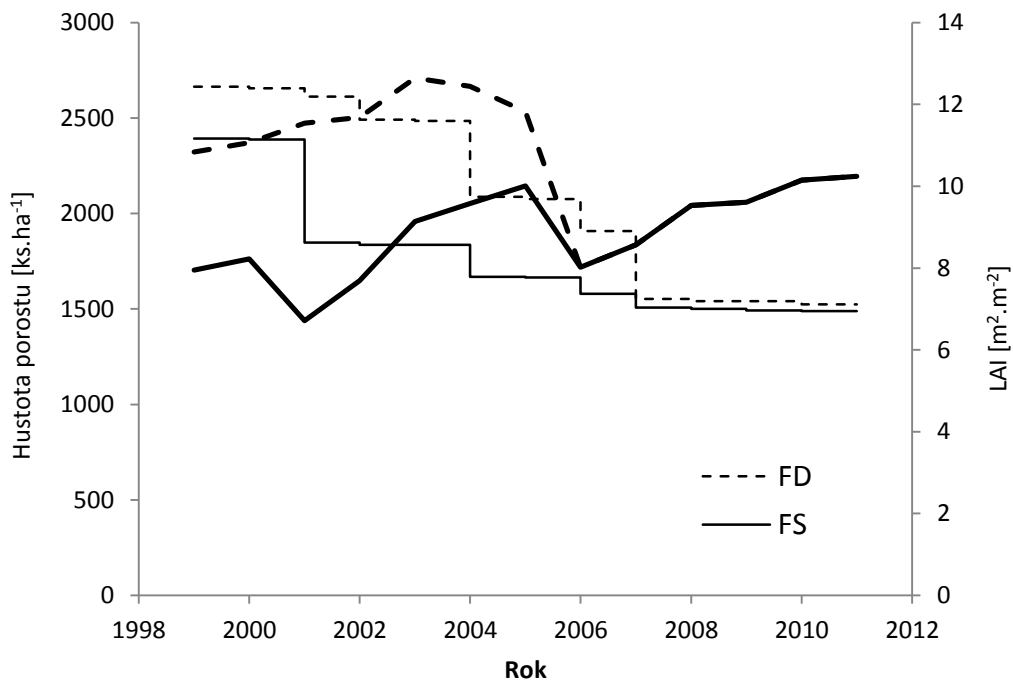
Zásoba celkové nadzemní biomasy v roce 1999 byla o 44 % vyšší na ploše FD oproti FS. Celková biomasa byla fixována ve větším množství stromů na hektar (FD 2664 ks.ha<sup>-1</sup>, FS 2392 ks.ha<sup>-1</sup>). Na konci sledovaného období, kdy hustota porostů byla na takřka stejné úrovni (FD 1520 ks.ha<sup>-1</sup>, FS 1488 ks.ha<sup>-1</sup>), se tak i celková zásoba biomasy téměř nelišila. Zásoba biomasy byla pouze o 7 % vyšší na ploše FD.

Největší rozdíl v zásobě biomasy v roce 2011 se projevil u zásoby biomasy kmenů, která je u plochy FD 74,21 t.ha<sup>-1</sup> a u plochy FS 68,72 t.ha<sup>-1</sup>. Jak vyplývá z [tabulky 12](#), ostatní biomasa orgánů se u obou typů porostů takřka neliší.

Trend vývoje přírůstu celkové nadzemní biomasy je znázorněn na [obrázku 20](#). Na začátku sledovaného období (1999-2001) je výrazně vyšší přírůst biomasy na ploše FD. V roce 2001 byl na ploše FS proveden výchovný zásah, při kterém byla zredukována porostní hustota z 2388 ks.ha<sup>-1</sup> na 1836 ks.ha<sup>-1</sup>. Po tomto zásahu lze pozorovat pozitivní vliv na přírůst biomasy na ploše FS, tento efekt ovlivnil přírůst v následujícím období. Naopak postupně se snižující hustota v porostu FD vlivem nahodilé těžby vedla k posupně se snižujícímu přírůstu celkové nadzemní biomasy, až na úroveň přírůstu v ploše FS. Pozitivní efekt výchovného zásahu lze pozorovat i v roce 2004 na ploše FS a na ploše FD došlo k redukci hustoty z důvodu prolámaní sněhem v zimním období. V následujících letech docházelo k prolamování porostu FD v zimním období, až se hustota porostu téměř vyrovnala s porostní hustotou plochy FS. Výraznější snížení hustoty se projevilo i výraznějším zvýšením přírůstu celkové nadzemní biomasy, a to u obou ploch, i když ke snižování hustoty ve FD docházelo přirozeně vlivem prolámaní v zimním období (poškozené stromy byly těženy), zatímco ve FS uměle (pěstebním zásahem). Propad v roce 2009-2010 je nejspíše způsoben suchým rokem 2009, který byl výrazně sušší než další roky sledovaného období. Tento pokles byl zaznamenán jako výraznější v rámci plochy FS.



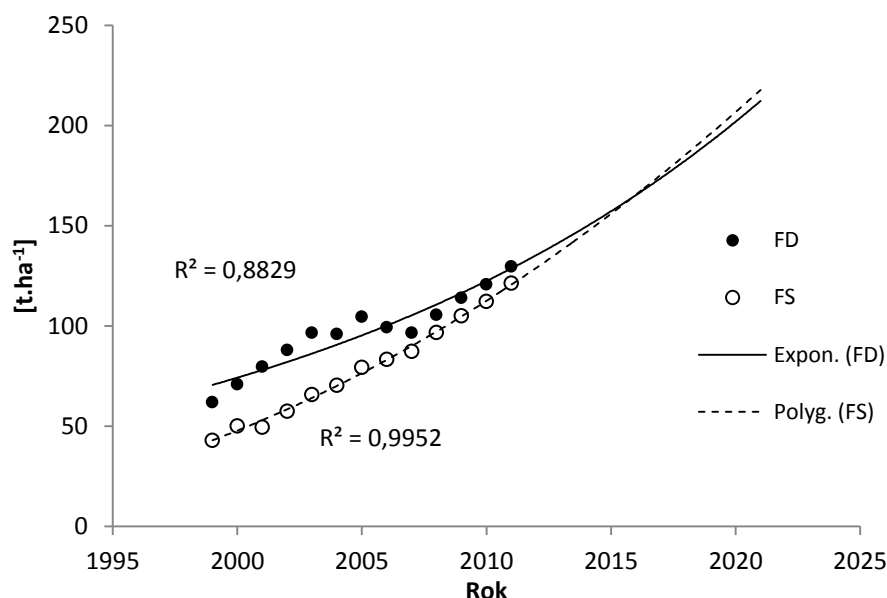
Obrázek 20: Vývoj přírůstu celkové nadzemní biomasy (tučně) v kontextu změny hustoty porostu.



Obrázek 21: Vývoj Indexu listové plochy (LAI), hodnoty sezónního maxima v husté (FD) a řídké (FS) ploše ve vybraných letech 1999–2011 v kontextu změny porostní hustoty.

Během sledovaného období let 1999–2006 vykazovala plocha FD vyšší hodnoty LAI ve srovnání s FS. Pro obě výzkumné plochy bylo možné sledovat křivku vývoje dosahování maximálních hodnot LAI (Obrázek 21). V letech 1999 a 2000 hodnoty LAI narůstaly úměrně na obou plochách. Po probírce v roce 2001 začalo výrazně redukované LAI v FS (o 28 %) velmi rychle narůstat a hodnoty LAI v FS a FD byly již v roce 2003 opět rozdílné obdobně, jako v předchozích letech. Následná redukce hustot obou ploch, ať už po nahodilé těžbě, nebo po probírkovém zásahu, měla za následek srovnatelnou hodnotu LAI, a proto bylo přistoupeno k měření LAI na jediném transektu napříč plochami FS a FD.

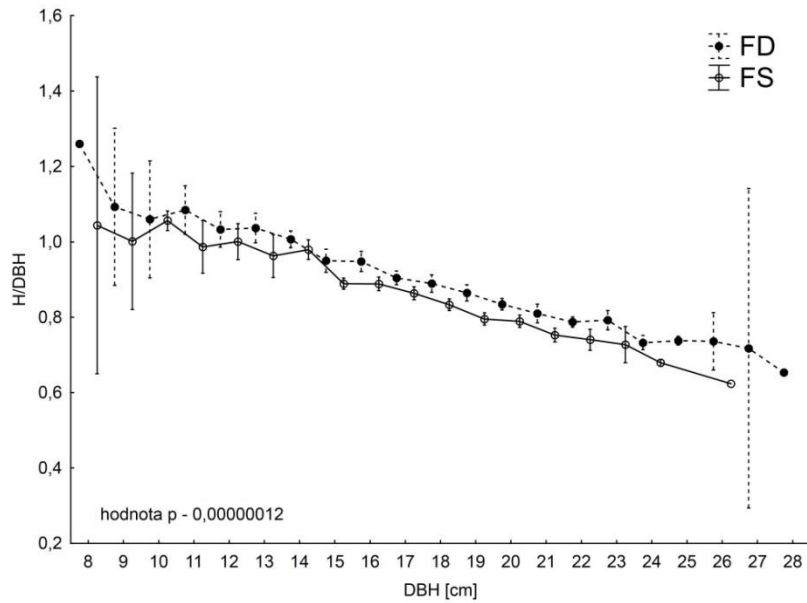
Vývoj zásoby biomasy na porostní úrovni je zobrazen na obrázku 22. Je patrný značný vliv prolamování porostu FD na celkovou zásobu biomasy. Silná porostní výchova na ploše FS vyvolala vytvoření korun s daleko větším procentem osluněné části, což bude ovlivňovat budoucí produkci porostu. Ve výhledu a téměř stejné současné porostní hustotě se dá předpokládat vyšší produkční schopnost jedinců na ploše FS.



Obrázek 22: Vývoj porostní zásoby celkové biomasy v období 1999–2011.

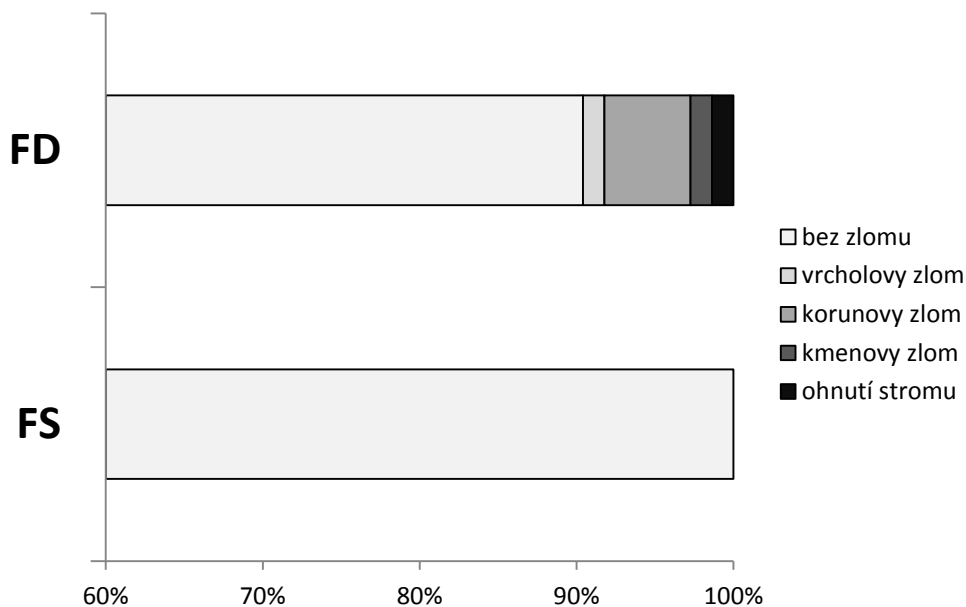
K vyhodnocení mechanické stability stromů byl použit štíhlostní koeficient kmene. Jak je patrné z obrázku 23, štíhlostní koeficient kmene byl vyšší na ploše FD v celém průběhu tloušťkové struktury porostu. Statistické vyhodnocení potvrdilo signifikantní rozdíl mezi štíhlostním koeficientem na ploše FS a FD (hodnota  $p = 0,00000012$ ). Průměrná hodnota štíhlostního koeficientu pro plochu FD je  $0,90 (\pm 0,12)$  a pro plochu FS je  $0,85 (\pm 0,10)$ .





Obrázek 23: Štíhlostní koeficient kmene (SK) v závislosti na výčetní tloušťce jedinců (DBH) v rámci výzkumných ploch FS a FD.

Inventarizace na podzim 2011 na podrobné inventarizační ploše v rámci každé plochy zahrnovala i zjištění zastoupení výskytu zlomu kmene. Z toho šetření vyplývá, že na ploše FD bylo zaznamenáno o 10% vyšší zastoupení výskytu zlomu kmene oproti ploše FS, kde toto poškození nebylo zaznamenáno (Obrázek 24).



Obrázek 24: Procentuální zastoupení výskytu zlomu kmene na inventarizačních plochách v rámci porostu FS a FD.

### 3.2.4 Diskuze

Vztah mezi dimenzí koruny a produkcí biomasy kmene byl pozorován jak na úrovni individuálních stromů, tak na úrovni porostu (FARMER, 1976, BARNEY et al., 1977, CANNELL et al., 1983, FORD, 1985, ETVERK, 1985, KUULUVAINEN, 1988). OKER-BLOM a KELLOMAKI (1982) potvrdili, že tvar koruny může být odpovědný za rozdíl v produktivitě lesních porostů, protože některé typy korun jsou vhodnější z hlediska možnosti absorpce FAR – např. úzké koruny ve vyšších zeměpisných šířkách (SCHMIDT-VOGT, 1972a). Při nejrozličnějších studiích ve smrkových porostech, ať už jsou zaměřeny na fyziologii, produkci, ekologii nebo studie antropických změn prostředí apod., je nezbytná znalost množství, velikosti a způsobu rozložení jehličí v korunovém prostoru (ČERMÁK a KUČERA, 1990). Tvar koruny smrku ztepilého má variabilní charakter (SCHMIDT-VOGT, 1972b). Řada prací vypovídá o smrku jako o dřevině se schopností vytvářet různé typy korun (DELEUZE et al, 1996; MÄKINEN et al., 2003; GEBUREK et al., 2008). Základní rozdělení typů korun uvádějí různí autoři s menšími odchylkami, jedná se o tvary korun od sloupcovitého, válcovitého tvaru až po tvar eliptický a vejcovitý (SAMEK, 1964). Porostní hustota a snižování porostní hustoty (ať už přirozenou formou nebo výchovou porostů) má značný vliv na rostlinnou architekturu (WHITE, 1980), a tudíž i na tvar korunové vrstvy (HARPER, 1977). Kompetiční schopnost jedinců v hustém porostním zápoji je spojena s účinností, se kterou je zachycené sluneční záření a využité v horní části koruny. Vysoká hustota korunové vrstvy, úzká forma koruny a dobrý korunový poměr jsou spojovány s nízkým stupněm samostnění. V severních oblastech úzká forma koruny v porostu zachytí světlo efektivněji oproti širokým formám koruny (OKER-BLOM a KELLOMAKI, 1981, KELLOMAKI et al., 1985). Výsledky této studie ukazují, že ponechání porostu ve větší porostní hustotě vedlo ke vzniku užších, výše nasazených korun. Projekce korunové vrstvy v porostu FD dosahovala 49 % projekce ve výzkumné ploše FS. Tento rozdíl již nebyl tak výrazný u parametru objemu koruny, kde rozdíl mezi plochami FS a FD byl 15 % a statistický test sice potvrdil signifikantní rozdíl mezi objemem korun, ale tento rozdíl se nachází v blízkosti statistické významnosti ( $p = 0,04957$ ). ASSMANN (1970) dokládá, že stromy s malou až střední velikostí koruny mají vyšší efektivitu produkce dřevní hmoty na jednotku plochy, a tudíž vyšší efektivitu korunové vrstvy oproti stromům s velkou korunou. Stejných výsledků jako v případě této studie dosáhli i KANTOLA a MÄKELÄ (2004). V porostech s vyšší hustotou se u smrku vytvořila užší koruna, která si však uchovávala válcovitý tvar a až ve vrchních partiích koruny se kuželovitě zužovala k vrcholu. U porostů pěstovaných ve volnějším sponu se kuželovitost koruny projevila už od spodních vrstev, což přesně odpovídá výsledkům této studie. Dále MÄKELÄ a VANNINEN (2001) uvádí, že hustota listoví u smrku nevzroste v případě zvětšení korunové projekce.

S narůstající intenzitou radiace se mění povaha listoví v rámci korunové vrstvy. Tím se dá rozdělit koruna na části se slunným a stinným typem listoví (POKORNÝ et al., 2004). Jehlice vykazují pozitivní vztah mezi specifickou hmotností sušiny jehlic ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) a vzrůstající radiací (NIINEMETS A KULL, 1995, SPRUGEL et al., 1996, STENBERG et al., 1998). Autoři dále uvádějí, že

stinný typ listoví má menší specifickou hmotnost oproti slunnému typu listoví (GEBAUER et al. 2011). Další morfologické změny v závislosti adaptace jehlic na stínění jsou klesající tloušťka jehlic (NIINEMETS 1997, STENBERG et al. 1998, MESSIER et al. 1999) a klesající šířka (Niinemets, 1997). Z tvarů korun, které byly šetřeny v rámci této práce, lze detekovat hranici mezi slunným a stinným typem listoví. V rámci výzkumné plochy FS se tato hranice pohybovala v intervalu 40–60 % výšky koruny, zatímco na ploše FD tato hranice byla ve výšce 60–80 % výšky koruny. Rozdíl mezi slunnými a stinnými pletivy jehlic spočívají v jejich rozdílném průběhu saturační křivky fotosyntézy, ze které mimo jiné vyplývá i rozdílná hodnota bodu saturace fotosyntézy ( $I_s$ ) - slunná pletiva dosahují ve srovnání se stinnými vyššího maxima asimilace. Ačkoliv za sníženého přísunu světelných podmínek (například při rozbřesku) dosahují později kompenzačního bodu ( $I_k$ ), tedy bodu, kdy se asimilace vyrovnává respiraci (LARCHER, 1988). Tento fakt potvrzují i výsledky této práce, kde na ploše FS s nižší porostní hustotou bylo dosaženo takřka stejného přírůstu celkové nadzemní biomasy, to znamená, že jednotlivé stromy musely mít vyšší produkci. To nastalo v důsledku odlišného poměru mezi stinným a slunným typem listoví.

Dynamika vývoje LAI v hustší smrkové ploše vykazovala tendenci saturace, tj. dosahovat maximální hodnoty LAI, kolem níž se následně s menšími výkyvy LAI porostu pohybuje (převážně díky limitaci dusíkem) více méně až do stádia rozpadu (WANG 1988). Hodnota LAI blížící se hodnotě  $12 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  se zdá být maximální pro lokální podmínky daného horského porostu smrku ztepilého v oblasti Beskyd. V řídké ploše (FS) sezónní maximum LAI narůstalo o 3 až 18 %. Nejvýraznější nárůst byl zaznamenán v letech 2002 a 2003, tj. následující růstové sezóny po probírkovém zásahu. Byl tak potvrzen pozitivní vliv probírky na růst LAI a stimulaci tvorby biomasy (Obrázek 20; Obrázek 21) jako obecný jev (HARRINGTON a REUKEMA, 1983; WANG, 1988). Vysoká hodnota LAI nemusí mít za následek maximální produkci biomasy (BATTAGLIA et al., 1998, POKORNÝ et al., 2008). POKORNÝ et al. (2008) dále uvádějí hodnotu LAI v intervalu  $10\text{--}11 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  jako nejefektivnější hodnotu LAI pro mladé smrkové porosty. Hodnoty LAI na výzkumné ploše FS byly zpočátku nad tímto intervalem, zatímco plocha FS těchto hodnot nedosahovala. Na konci sledovaného období a po sjednocení transektu pro měření LAI se již hodnota LAI dostala do intervalu, kde se dá očekávat maximální produkce biomasy. Toto potvrzuje i trend stoupajícího přírůstu nadzemní biomasy a trend postupného nárůstu hodnoty LAI od roku 2008.

Tvar kmene hraje důležitou roli nejen díky stabilitě, ale také má významný vliv při odhadu zásoby biomasy (MCTAGUE, 1992). Studie zabývající se výzkumem vlivu hustoty porostu a typu aplikované probírky ukazují, že porosty vychovávané a porosty pěstované v řídkém sponu vykazují kmeny s dřevní hmotou fixovanou ve spodní části kmene (KRAMER a JÜNEMANN, 1985, PREUHLER a SCHMIDT, 1989, MUHAIRWE, 1994, DEANS a MILNE, 1999 a KARLSSON, 2000). V tomto případě došlo k vytvoření statisticky významných rozdílů ve tvaru kmene v závislosti na historii porostní výchovy. V porostu vychovávaném v hustém sponu došlo k vytvoření více plnodřevního kmene. Na ploše FD se tvar kmene blížil tvaru válce v rozmezí

18–47 % výšky kmene, oproti tvaru kmene na ploše FS, kde došlo k vytvoření kónického tvaru kmene. Předchozí tvrzení i citovanou literaturu dokládá vypočítaná nepravá výtvarnice kmene, která vykazovala statisticky významný rozdíl při porovnávání ploch FS a FD. Naproti tomu mnoho studií potvrzuje, že způsob výchovy porostu nemá vliv na výškový růst (BRYNDUM, 1967; SJOLTE-JØRGENSEN, 1967; LANNER, 1985; ERIKSSON, 1987; ERIKSSON a KARLSSON, 1997). Ani v případě této studie výškový růst nebyl ovlivněn výchovným zásahem, oproti přírůstu tloušťkovému, kde je patrná reakce porostu na uvolnění.

Objem celkové nadzemní biomasy je větší na ploše FD, tedy na ploše s vyšší počáteční hustotou. Tato studie potvrzuje, že celková produkce na jednotku plochy je nejvyšší v případě ploch bez výchovy, nebo na plochách s aplikací slabých podúrovňových probírek. Výsledky této studie potvrzuje řada experimentů s výchovou smrku ztepilého ve skandinávských zemích (MÖLLER, 1954, BRYNDUM, 1967, 1969, CARBONNIER, 1974, ERIKSSON 1987, BRAASTAD a TVEITE, 2001, MÄKINEN a ISOMÄKI, 2004) a ve střední Evropě (ASSMANN, 1968, HAMILTON, 1976, SCHÖBER, 1980, KRAMER a JÜNEMANN, 1985, SPELLMANN, 1986, PRETZSCH, 2005).

Na ploše FS bylo dosaženo největšího přírůstu celkové nadzemní biomasy v letech 2003 (8,25 t.ha<sup>-1</sup>), 2005 (9,04 t.ha<sup>-1</sup>) a 2008 (9,87 t.ha<sup>-1</sup>). Tyto kulminační body korespondují s následujícím rokem po výchovném zásahu v případě roků 2005 a 2008. V případě probírky v roce 2001 byl zaznamenán kulminační bod přírůstu celkové nadzemní biomasy až druhý rok po výchovném zásahu. Na ploše FD byly také zaznamenány kulminační body přírůstu celkové nadzemní biomasy a i v tomto případě se jedná o reakci na proředění porostu, a to z důvodu prolámaní sněhem. Toto plně koresponduje s tvrzením, že výchovný zásah ovlivňuje přírůst biomasy několik let po výchovném zásahu. HENRIKSEN (1951) uvádí, že vliv výchovného zásahu ovlivňuje přírůst biomasy 2–3 roky po výchovném zásahu, delší interval uvádí ASSMANN (1970), který uvádí tento interval v rozmezí 5-7 let. Jak uvádějí výsledky této studie, stromy ponechané po výchovném zásahu zaplňují vzniklý prostor po vytěžených jedincích. V důsledku této výchovy došlo k vytvoření téměř dvojnásobné korunové projekce u jedinců z plochy FS oproti jedincům z plochy FD. V této práci byl prokázán bezprostřední vliv výchovného zásahu na produkci biomasy v následujícím roce; delší interval nelze přesně určit, protože v následujících letech po zásahu byla porostní hustota dále měněna a již nebylo možno zaznamenat kulminaci přírůstu biomasy po výchovném zásahu.

Stabilita jednotlivých stromů závisí na morfologických charakteristikách jako jsou morfologie kmene, koruny a kořenového systému. Několik prací se zabývá mechanickou stabilitou stromů se zaměřením především na architektonické aspekty stromů jako jsou velikost a tvar kmene (PETTY a WORRELL, 1981, PETTY a SWAIN, 1985, ROTTMANN, 1985, 1986), tvar koruny a její velikost (PERSSON, 1972, ROTTMANN, 1985, 1986) a velikost kořenového systému (COUTTS, 1983, NIELSEN, 1990, STOKES, 1995). Mechanické stabilitě stromů a jejich mechanickému namáhání v silném větru nebo pod zatížením těžkým sněhem a ledem se

věnuje celá řada studií (CANNELL a MORGAN 1987, 1989, GARDINER 1989, NIKLAS 1997, WESSOLLY a ERB 1998, SPATZ a BRUCHERT 2000, SLODIČÁK A NOVÁK 2006).

V otázce struktury porostu a následného vývoje stromových dimenzí, kořenového systému a tvaru kmene a koruny hrají důležitou úlohu aplikované pěstební systémy. Jedná se především o porostní strukturu a porostní hustotu, které ovlivňují vývoj kmene, kořenového systému a korunové vrstvy smrku ztepilého (MITSCHERLICH 1963, SCHMIDT-VOGT 1977, ABETZ A UNFRIED, 1984). V této studii je zřejmé, že rozdílná hustota porostu již v raném věku vedla k vytvoření odlišných morfologických charakteristik stromu. Na ploše FD vedla hustota k vyššímu nasazení živé koruny (průměrně 5,39 m), a tím i k posunutí celého těžiště stromu směrem nahoru. V porostu FS se vyvinula hluboko zavětvená koruna s výškou nasazení živé koruny v 3,81 m. Porostní hustota na ploše FD dále vedla k vývoji daleko menší korunové projekce oproti ploše FS, kde byl porost v mládí pěstován ve volnějším sponu.

Výsledky zjištěné v dřívějších studiích (JACOBS, 1939, PETTY a WORRELL, 1981, PETTY a SWAIN, 1985) ukazují, že lepší stabilita je dosažena v porostech pěstovaných ve volném sponu, kde se vytvoří kuželovitý kmen v porovnání se stromy, které se vyvíjeli v hustém sponu. Jako v případě této studie, kde je statisticky významný rozdíl v tvaru kmene mezi plochami FS a FD. U porostu FS byla výtvarnice kmene 0,44 ( $\pm$  SD 0,04) oproti ploše FD 0,46 ( $\pm$  SD 0,03) pro plochu FD. Jak je patrné na obrázku 17 a jak dokazují i statisticky významné rozdíly v hodnotách výtvarnice kmene, došlo v závislosti na předešlé porostní výchově k vývoji odlišného tvaru kmene. I takto malý rozdíl již vedl k ca 10 % výskytu zlomů na ploše FD. ROE a STOECKELER (1950) uvádějí, že kuželovitého kmene lze dosáhnout silnou výchovou v mládí, kdy je iniciován přírůst spodní části kmene (VALINGER, 1992). Po výchovném zásahu se zvyšuje nebezpečí poškození větrem (CREMER et al., 1982, LAIHO, 1987, VALINGER a LUNDQVIST, 1992) z důvodu zvýšení rychlosti větru uvnitř porostu (BLACKBURN et al., 1988). I v tomto případě tvar kmene v ploše FD alokuje posun těžiště stromu směrem nahoru a tím zvýšení předpokladu k mechanickému poškození abiotickými činiteli.

Pro hodnocení vlivu výchovy porostu na odolnost stejnověkých monokultur smrku proti škodám sněhem a větrem se v literatuře často používá štíhlostní koeficient (poměr výšky (H) a tloušťky (DBH)). Příkladem takto použitého štíhlostního koeficientu jsou studie KONOPKA 1999, KANGAS a MALTAMO 2000, PELTOLA et al. 2000, JIMENÉZ et al. 2003 a SLODIČÁK a NOVÁK 2006. Hodnota štíhlostního koeficientu nad 1,0 se obecně považuje za ukazatel nízké stability porostu (MILNE, 1995, WANG et al., 1998, LEKES a DANDUL, 2000, SLODIČÁK a NOVÁK, 2006). Některé studie (MILDNER 1967, KONOPKA et al., 1987, NAVRÁTIL 1995) tuto hranici uvádějí i nižší a jako hraniční hodnotu uvádějí 0,9 obzvláště v případě ohrožení mladých porostů sněhem. Ještě nižší hodnotu uvádějí VICENA et al. (1979), kteří uvádějí optimální štíhlostní koeficient 0,79 a maximální přípustný na hodnotě 0,83. Dále tuto problematiku detailně popisuje studie Konopky (1999), založená na výsledcích z 85 výzkumných ploch ze Slovenské republiky. Tato studie rozděluje stabilitu smrkových porostů do tříd podle hodnoty

štíhlostního koeficientu na: výbornou stabilitu  $\leq 0,82$ , dobrou stabilitu  $0,83\text{--}0,92$ , vyhovující stabilitu  $0,93\text{--}1,01$  a nevyhovující stabilitu  $\geq 1,02$ .

Tato studie potvrzuje, že i relativně malý rozdíl v hodnotě štíhlostního koeficientu (FS - 0,85 a FD - 0,90) hraje významnou roli z hlediska stability porostu. Z hlediska stability je proto nutno věnovat značnou pozornost výchově mladých smrkových porostů, pro vytvoření příznivého štíhlostního koeficientu.

### 3.3 Ovlivňuje typ probírky alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy?

#### 3.3.1 Úvod

V současné době do popředí stále více vstupuje potřeba přesné kvantifikace biomasy lesních porostů a následně i množství uhlíku vázaného v této biomase, protože lesní ekosystémy hrají velice důležitou roli v globálním uhlíkovém cyklu. Poutání oxidu uhličitého lesními ekosystémy je jedním z důležitých faktorů globálního systému ekologické rovnováhy (VOSE et al., 1994). Stanovení biomasy a následné stanovení množství uhlíku poutaného lesy je součástí plnění mezinárodních závazků České republiky vyplívajících z Kjótského protokolu (UNFCCC, 1997). Dalším důvodem je pochopení fungování různých lesních ekosystémů, jejich efektivita vázat vzdušný uhlík a akumulovat ho jak v nadzemní tak podzemní biomase a v neposlední řadě možnost využití biomasy jako obnovitelného zdroje energie. Nejproblematictější oblastí v procesu odhadu zásoby a sekvestrace uhlíku je přesná kvantifikace celkové zásoby biomasy a její změny v čase (GOODALE et al., 2002, MAREK et al., 2011). Při vlastním odhadu zásoby biomasy se tedy nejčastěji postupuje pomocí alometrických rovnic (MARKLUND, 1987; BROWN, 1997; ABOAL et al., 2005; ZIANIS et al., 2005; MAREK et al., 2011; ČIHÁK et al., 2012). Alometrické rovnice popisují vztah mezi jednoduše měřitelnými parametry kmene či koruny biomase jednotlivých orgánů až po celkovou biomasu stromu. Kvantifikace biomasy v určité lokalitě je nejpřesnější v případě použití lokálních alometrických rovnic, příkladem těchto rovnic jsou vztahy z Ekosystémové stanice Rájec–Němčice (MARKOVÁ a POKORNÝ, 2011), nebo Bílý Kříž (POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ, 2007), kde byly vytvořeny lokální alometrické rovnice pro mladou vrchovinou a horskou smrčinu. Další možností je použití obecných modelů pro výpočet biomasy. Tyto modely jsou konstruovány z rozsáhlého souboru dat. Příklady těchto modelů uvádějí WIRTH et al. (2004), kteří sestrojili alometrické rovnice od jednoduchých, kde je biomasa odvozována pouze na základě dendrometrických veličin (výčetní tloušťka, výška stromu), až po složitější modely, kde vstupují kromě zmíněných veličin i parametry jako je délka koruny stromu, věk, nadmořská výška a bonita stanoviště.

Cílem této kapitoly bylo zjistit, zda odlišný přístup ke způsobu výchovy mladých smrkových porostů má vliv na alometrické vztahy, které jsou často užívané pro stanovení a kvantifikaci nadzemní biomasy. Dalším cílem bylo stanovení expanzních faktorů ke kvantifikaci nadzemní biomasy a biomasy jednotlivých orgánů stromu.

### 3.3.2 Materiál a metody

Práce metodologicky navazuje na práci [MARKOVÁ a POKORNÝ \(2011\)](#), která je zaměřena na alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy pro mladou vrchovinnou smrčinu v oblasti Dražanské vrchoviny. Strukturní analýza vzorníkových stromů byla prováděna na výzkumné ploše probírkových zásahů Rájec–Němčice (viz. Kapitola 3.1.2.1. – Výzkumná plocha probírkových zásahů).

Pro zjištění biomasy jednotlivých orgánů stromu bylo vybráno 21 vzorníkových stromů, konkrétně se jednalo o 8 stromů z plochy C3 se silnou podúrovňovou probírkou (TfB) a 13 stromů z plochy D4 s úrovňovou probírkou (TfA). Těžba vzorníkových stromů byla provedena v rámci probírkového zásahu v roce 2010. V rámci zachování výzkumné plochy a charakteru výchovných zásahů byly vzorníkové stromy vybrány dle charakteru probírkového zásahu. V rámci plochy D4 byly vzorníkové stromy vybírány z hlavní korunové vrstvy porostu, tj. z porostní úrovně. V rámci plochy C3 byly vzorníkové stromy vybrány ze spodní korunové vrstvy porostu, tj. porostní podúrovně. Porostní charakteristiky pro plochu C3 a D4 uvádí [tabulka 13](#).

Tabulka 13: Porostní charakteristiky pro plochy C3 a D4 s plikovanou silnou podúrovňovou probírkou (TfB) a úrovňovou probírkou (TfA).

	C3	D4
<b>Věk porostu</b> [rok] v r.2010	31	31
<b>Porostní hustota</b> [ks.ha <sup>-1</sup> ]	2032	1808
<b>Průměrná výška stromu</b> [m]	15,9 (±2,2)	13,6 (±2,5)
<b>Průměrná výčetní tloušťka kmene</b> [cm]	13,9 (±3,7)	13,2 (±4,0)

U jednotlivých vzorníkových stromů přímo na výzkumné ploše byly měřeny parametry jako: celková výška stromu (H), délka živé koruny (Hc), výčetní tloušťka kmene (tj. tloušťka kmene ve výšce 1,3 m nad zemí (DBH)) a tloušťka kmene (D) v každé metrové sekci podél kmenového profilu. Biomasa větví (BB) byla zjišťována po jednotlivých metrových sekcích, přímo na výzkumné ploše byl odebrán a zvážen každý přeslen a následně z každého přeslenu byla odebrána reprezentativní vzorníková větev pro detailní laboratorní analýzy. V laboratorním prostředí byly tyto reprezentativní větve vysušeny při 80 °C na konstantní váhu a následně rozděleny na biomasu větví (BB) a biomasu listoví (LB). BB a LB byly určeny vážením (KERN 400-47N s přesností 0,1 g). Z poměru mezi čerstvou a suchou biomasou reprezentativních větví byla vypočítána celková biomasa pro jednotlivé přeslenu a celková biomasa orgánu listoví a větví. Objem kmene (V) byl získán jako suma objemu jednotlivých metrových sekcí a zbývající části vrcholu stromu. Objem jednotlivých metrových částí byl



vypočítán na základě znalosti délky sekce a tloušťky měřené uprostřed každé sekce. Biomasa kmene (SB) byla vypočtena na základě přesně stanoveného objemu kmene a hustoty dřeva. Hustota dřeva byla laboratorně zjištěna ze vzorku pro zjištění hustoty dřeva, který byl vždy odebrán ze střední sekce vzorníkového stromu.

Pro každý vzorníkový strom byl vypočítán kompetiční index (CI). Tento index byl vypočítán dle AVERYHO a BURKHARA (1983). Pro vyhodnocení kompetičního indexu daného jedince byla brána v potaz poloha jedince a poloha 8-10 nejbližších jedinců kolem sledovaného vzorníkového stromu.

Statistické zpracování dat bylo provedeno v programu SPSS software. Vstupní parametry (z jednotlivých typů probírek) pro sestavení alometrických rovnic byly testovány na schodu rozptylů (Levene's test) a následně pomocí T-testu pro shodu středních hodnot. Stejný postup byl aplikován pro porovnání suché biomasy z probírkových ploch C3 a D4. Popisná statistika byla vypočítána pomocí programu Excel. Dále v programu Excel byly sestaveny alometrické rovnice. Pro jednoduchou regresi byly použity rovnice číslo 4, 5, 6 a v případě vícenásobné regresní analýzy byla použita rovnice 7.

Rovnice:

$$y=a*x^b \quad (4)$$

$$y=a*x^2-b*x+c \quad (5)$$

$$y=a*e^{b*x} \quad (6)$$

$$y=a+DBH*b+H*c+CI*d \quad (7)$$

V případě alometrických rovnic byly testovány jednotlivé rovnice a podle koeficientu determinace byly vybrány nejlepší rovnice.

Stanovení expanzních faktorů (BEFs) bylo provedeno na základě rozboru vzorníkových stromů. K výpočtu byla potřeba přesná znalost objemu kmene, který byl vypočítán jako součet objemů jednotlivých metrových sekcí kmene a znalost hmotnosti celkové nadzemní biomasy a jednotlivých orgánů stromu. Pro výpočet BEFs byla použita rovnice číslo 8.

$$BEF_s = \frac{W_i}{V} \quad (8)$$

Kde  $W_i$  představuje biomasu jednotlivých orgánů, nebo celkovou nadzemní biomasu stromu a  $V$  objem kmene.

### 3.3.3 Výsledky

Průměrné hodnoty ( $\pm$  směrodatná odchylka, SD) DHB, H a CI vzorníkových stromů vstupujících do alometrických rovnic pro plochy s aplikací odlišného typu probírky uvádí [tabulka 14](#).

Tabulka 14: Průměrné charakteristiky vzorníkových stromů ( $\pm$  směrodatná odchylka, SD), DBH – výčetní tloušťka kmene, CI – kompetiční index.

	C3	D4
<b>Počet vzorníkových stromů</b>	8	13
<b>Výška stromu [m]</b>	14,5 ( $\pm 2,2$ )	15,2 ( $\pm 2,5$ )
<b>DBH [cm]</b>	14,3 ( $\pm 4,0$ )	16,3 ( $\pm 3,7$ )
<b>CI</b>	3,7 ( $\pm 1,2$ )	2,9 ( $\pm 0,9$ )

Pro statistické porovnání vstupních parametrů do alometrických vztahů byl zvolen dvouvýběrový t-test. Statistický test neprokázal signifikantní rozdíl při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  ani v jednom parametru, a tudíž je možné považovat vstupní parametry do alometrických vztahů jako stejné (DBH  $P=0,535$ ; H  $P=0,677$ ; CI  $P=0,205$ ).

Celková nadzemní biomasa (TBA) je uvedena v [tabulce 15](#). TBA je výsledkem součtu jednotlivých frakcí nadzemní biomasy, konkrétně se jedná o biomasu listoví (LB), biomasu větví (BB) a biomasu kmene (SB). [Tabulka 15](#) uvádí průměrné hodnoty biomasy vzorníkových stromů a hodnoty pro celý porost přepočítané na hektar. Porostní zásoba biomasy je výsledkem aplikace specifických alometrických rovnic (viz. [Obrázek 25](#)) pro plochy C3 a D4.

Tabulka 15: Průměrné hodnoty biomasy listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a celkové nadzemní biomasy (TBA) vzorníkových stromů z plochy C3 (TfB;  $n=8$ ) a D4 (TfA;  $n=13$ ). Přepočítané hodnoty biomasy porostu na hektar, jako výsledek aplikace specifických alometrických rovnic pro daný typ probírky.

	C3		D4	
	Průměr/vzorník [kg.ks <sup>-1</sup> ]	Porost [t.ha <sup>-1</sup> ]	Průměr/vzorník [kg.ks <sup>-1</sup> ]	Porost [t.ha <sup>-1</sup> ]
<b>LB</b>	18,4 ( $\pm 12,7$ )	42,178	26,9 ( $\pm 13,0$ )	39,615
<b>BB</b>	21,1 ( $\pm 16,9$ )	46,286	30,0 ( $\pm 13,8$ )	42,878
<b>SB</b>	50,5 ( $\pm 31,1$ )	110,204	66,0 ( $\pm 31,6$ )	94,873
<b>TBA</b>	89,9 ( $\pm 58,7$ )	198,701	123,2 ( $\pm 55,6$ )	177,229

Průměrné hodnoty vzorníkových stromů vykazují rozdíly v biomase, tento rozdíl je zatížen výběrem vzorníkových stromů, z důvodu zachování probírkových ploch a k nim příslušného typu probírky. V případě porostní biomasy byly aplikovány specifické alometrické rovnice pro daný typ probírky (viz [Obrázek 25](#)). Zásoby biomasy pro plochy C3 a D4 se liší o 10 % TBA, 16 % SB, 3 % BB a 1 % LB ve prospěch plochy s podúrovňovým typem zásahu (C3).

Tabulka 16: Průměrné hodnoty biomasy na jeden strom pro plochu C3 s podúrovňovou probírkou (TfB) a plochu D4 s úrovňovou probírkou (TfA), LB značí biomasu listoví, BB biomasu větví, SB biomasu kmene a TBA celkovou nadzemní biomasu.

	<b>C3</b> Průměr/porost/strom [kg.ks <sup>-1</sup> ]	<b>D4</b> Průměr/porost/strom [kg.ks <sup>-1</sup> ]
<b>LB</b>	20,67 (±11,22)	21,91 (±19,15)
<b>BB</b>	22,78 (±12,39)	23,72 (±21,09)
<b>SB</b>	54,23 (±28,06)	52,47 (±47,58)
<b>TBA</b>	97,79 (±51,82)	98,02 (±88,02)

Průměrné hodnoty biomasy po aplikování alometrických rovnic pro daný typ probírky vykazují větší průměrné hodnoty na strom ve prospěch plochy D4 kromě biomasy kmene. Rozdíl mezi plochami pro jednotlivé orgány biomasy byl vyšší o 5 % LB, 4 % BB, a 0,3 % TBA ve prospěch plochy D4. Vyšší průměrné hodnoty biomasy kmene na jeden strom bylo dosaženo na ploše C3 o ca. 3,5% ([Tabulka 16](#)).

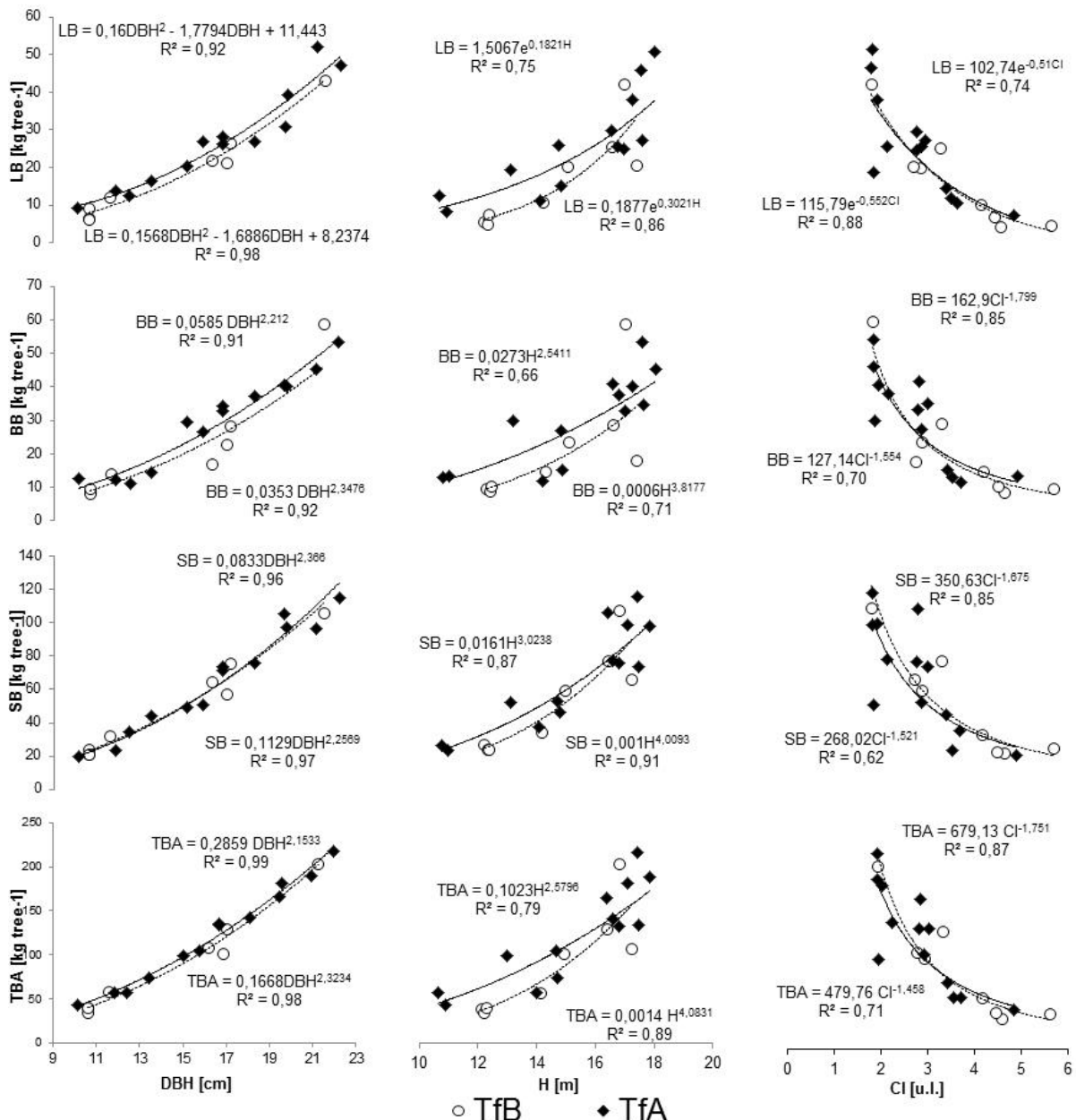
Pro analýzu tvaru kmene byla použita nepravá výtvarnice. Nepravá výtvarnice je definována jako poměr skutečného objemu stromu (V) k objemu ideálního válce, který má se stromem společnou kruhovou základnu ( $g_{1,3}$ ) a stejnou výšku (H). Pro výpočet výtvarnice byla použita rovnice číslo 9.

$$F_{1,3} = \frac{V}{g_{1,3} \times H} \quad (9)$$

Hodnoty nepravé výtvarnice se pohybovaly v rozmezí od 0,51 do 0,57 pro plochu TfB a od 0,47 do 0,55 pro plochu TfA. Průměr pro jednotlivé plochy byl 0,53 pro TfB a 0,52 pro TfA. Statistická analýza neprokázala signifikantní rozdíl mezi tvarem kmene na plochách s odlišným typem probírky ( $P=0,414$ ,  $\alpha = 0,05$ ).

Alometrické vztahy byly zkonstruovány pro biomasu jednotlivých orgánů a pro celkovou nadzemní biomasu (LB, SB, BB a TBA). Prezentované alometrické rovnice ([Obrázek 25](#)) vysvětlují závislost množství biomasy na jednoduše měřitelných parametrech stromu.

V našem případě se jedná o závislost s DBH [cm], H [m] a kompetičním indexem (CI). Všechny prezentované alometrické vztahy vykazují vysokou hodnotu koeficientu determinace  $R^2$ . Koeficient determinace dosahoval nejvyšších hodnot u alometrického vztahu s parametrem DBH, kde se tento koeficient pohyboval od 0,92 do 0,98 pro plochu C3 a od 0,91 to 0,99 pro plochu D4. Alometrický vztah s výškou stromu dosahoval hodnot koeficientu determinace od 0,71 do 0,91 pro plochu C3 a od 0,66 do 0,87 pro D4. Koeficient determinace pro kompetiční index dosahoval hodnot od 0,74 do 0,87 pro plochu C3 a od 0,62 do 0,88 pro plochu D4.



Obrázek 25: Alometrické vztahy pro celkovou nadzemní biomasu (TBA) včetně jednotlivých frakcí biomasy (SB – biomasa kmene, BB – biomasa větví a LB – biomasa listoví). Alometrický vztah je konstruován v závislosti na DBH, H, a kompetičním indexu (CI). Prázdná kolečka a přerušovaná čára reprezentují podúrovňovou probírku (TfB) z plochy C3, plné kosočtverce a plná čára reprezentují probírku úrovnovou (TfA) z plochy D4.

V případě použití vícenásobné regrese došlo ke zvýšení koeficientu determinace pouze u stanovení biomasy kmene u obou typů probírek a u stanovení biomasy větví u nadúrovňové probírky (Tabulka 17, *zvýrazněné hodnoty*). U ostatních orgánů nedošlo ke zlepšení koeficientu determinace oproti jednoduché regresi. Koeficient determinace u vícenásobné regrese se pohyboval od 0,88 po 0,98.

Tabulka 17: Parametry vícenásobné regrese pro stanovení celkové nadzemní biomasy a biomasy jednotlivých orgánů pro podúrovňovou probírku (TfB), kterou reprezentuje plocha C3 a úrovňovou probírku (TfA), reprezentovanou plochou D4 (koeficienty a, b, c, d pro rovnici č. 4),  $r^2$  koeficient determinace vícenásobné regrese.

Frakce biomasy	Typ probírky	hodnoty koeficientů				
		a	b	c	d	$r^2$
TAB	TfB	-166,908	15,815	0,455	6,398	0,964
	TfA	-157,125	17,159	-1,243	6,908	0,983
LB	TfB	-23,866	3,254	-0,322	0,102	0,958
	TfA	-31,241	3,897	-0,540	1,002	0,903
BB	TfB	-9,962	5,755	-3,709	0,645	0,882
	TfA	-28,709	4,222	-0,753	0,492	<b>0,951</b>
SB	TfB	-123,392	7,989	2,603	5,862	<b>0,980</b>
	TfA	-127,450	9,908	0,490	8,626	<b>0,973</b>

Výsledky alometrických rovnic pro stanovení biomasy u různého typu probírky ukazují, že efekt probírky není statisticky průkazný, a není tudíž žádný rozdíl v alokaci biomasy při úrovňové a podúrovňové probírce. Statistické výsledky porovnání uvádí [tabulka 18](#).

Tabulka 18: Statistický test alokace biomasy mezi typy probírky, při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

	Levene's test		t-test						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
LB (kg)	,005	,945	-1,459	19	,161	-8,45	5,80	-20,58	3,68
BB (kg)	,014	,906	-1,325	19	,201	-8,96	6,76	-23,12	5,19
SB (kg)	,032	,859	-1,100	19	,285	-15,56	14,14	-45,16	14,04
TBA (kg)	,000	,993	-1,308	19	,207	-33,35	25,51	-86,74	20,03

Jelikož nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl v alokaci biomasy mezi jednotlivými typy probírek, bylo provedeno stanovení expanzních faktorů (BEFs) napříč všemi vzorníkovými stromy. Z celkem 21 vzorníkových stromů byly vypočítány expanzní faktory podle vzorce 5. BEFs je expanzní faktor, kterým v případě vynásobením objemem kmene/porostu  $V$  [ $m^3$ ] získáme množství biomasy v tunách. Přehled BEFs pro stanovení celkové nadzemní biomasy a jednotlivé nadzemní orgány uvádí [tabulka 19](#).

Tabulka 19: Přehled expanzních faktorů (BEFs) pro stanovení celkové nadzemní biomasy (TBA), biomasy kmene (SB), listoví (LB) a větví (BB) z objemu kmene/porostu. SD – směrodatná odchylka.

	BEFs*	SD
TBA	0,7506	0,1128
SB	0,4034	0,0333
BB	0,1790	0,0422
LB	0,1594	0,0332

\* BEFs je vyjádření v tunách na  $m^3$

U výpočtu BEFs nebyl zaznamenán žádný trend v rámci tloušťkové a výškové struktury vzorníkových stromů, a tudíž je souhrnná hodnota BEFs použitelná pro stanovení biomasy jednotlivých orgánů stromu, celkové biomasy stromu, nebo celých porostů přibližně stejného věku, jako v tomto případě mladé vrchovinné smrčiny ve věku 31 let.

### 3.3.4 Diskuze

Existence alometrických rovnic pro odvození biomasy pro danou lokalitu představuje nej přesnější způsob odvození zásoby biomasy (BOHLMAN a O'BRIEN, 2006; DIETZE et al., 2008). Přesnější metodou je už jenom celková destrukce jedinců na dané ploše a tímto přímým způsobem odvození zásoby biomasy (MAREK et al., 2011).

Rozličné pěstební přístupy uplatněné během výchovy daného porostu nesporně ovlivňují jeho porostní strukturu. LIU a WESTMAN (2009) testovali přesnost Marklundových (1988) alometrických vztahů pro odhad biomasy smrku. Testovali použitelnost těchto alometrických vztahů v porostech, kde nebyla uplatněna žádná porostní výchova po dobu 40 let, ačkoliv Marklundovy alometrické rovnice byly vytvořeny na základě náhodného vzorkování pěstebně vychovávaných porostů ve Švédsku. Výsledky Liue a Westmana (2009) ukázaly, že Marklundovy alometrické vztahy soustavně nadhodnocují celkovou biomasu, především pak biomasu korun (tj. LB a BB) v porostech bez předešlé porostní výchovy. Výsledky provedeného šetření tuto skutečnost potvrzují. Na pokusných plochách, kde byla uplatněna nadúrovňová probírka, byla zjištěna vyšší produkce biomasy u potlačených a podúrovňových stromů v porovnání s plochami s podúrovňovou probírkou. Avšak variabilita dat biomasy listoví a větví vykazovala větší variabilitu, než byla zjištěná variabilita biomasy kmenů. Statistické analýzy ukázaly, že tyto rozdíly nejsou statisticky průkazné. Můžeme ale předpokládat dosažení větších rozdílů v případě porovnání ploch s naprosto rozličnými přístupy výchovy (např. porosty vychovávané vs. porosty pěstebně zanedbané).

Snížení hustoty porostu vede k rozvoji korun ponechaných jedinců a zaujetí volného prostoru dočasně porušeného porostního zápoje (NORD-LARSEN, 2002, SHIBUYA et al., 2005). V souvislosti s tímto dochází k odezvě stromů na provedený výchovný zásah rozvojem slunného typu listoví, který se vyznačuje vyšší asimilační aktivitou (MISSON et al., 2003; MÄKINEN a ISOMÄKI, 2005; ERIKSSON, 2006) a iniciací tloušťkového přírůstu kmene. Stejně tak je z tabulky 15 zřejmé, že na porostní úrovni existují rozdíly v biomase listoví, větví, kmene a celkové nadzemní biomasy. V případě srovnání porostů s uplatněním nadúrovňové nebo podúrovňové probírky byly výrazné rozdíly zaznamenány pouze v případě biomasy kmenů a celkové nadzemní biomasy. Značné jsou rozdíly v biomase kmenů, v rámci šetřených ploch, ale v závislosti na porostní hustotě byla zjištěna větší průměrná biomasa kmenů v podúrovňové variantě výchovy v porovnání s nadúrovňovou výchovou. Přitom je nutné mít na paměti, že efekt provedeného výchovného zásahu se prokáže nárůstem nadzemní biomasy lesního porostu až během následujícího roku nebo několika následujících let (ERIKSSON, 2006) a poté po dosažení plného zápoje porostu tento efekt opět vymizí.

Potlačení jedinci ve starších porostech smrku mohou dosáhnout podobných dimenzí jako nadúrovňoví jedinci v mladých porostech, ale vykazují zcela jinou alokaci biomasy (MÄKELÄ, 1997). V tomto případě je celková biomasa kmenů významně vyšší na ploše

s podúrovňovou probírkou v porovnání s nadúrovňovou variantou. V případě porostní výchovy redukující počet jedinců na ploše může dojít k větší průměrné dimenzi kmene v kratším čase (CHROUST, 1997). V případě prezentované studie bylo fixováno více biomasy v kmenech na ploše C3 s typem výchovy TfB, tento rozdíl je způsoben fixací biomasy ve více kmenech se srovnatelnou průměrnou zásobou biomasy kmene na jeden strom.

Množství biomasy listoví a větví bylo zjištěno v přibližně stejné výši s mírnou převahou na ploše s podúrovňovou probírkou. Zvýšený přísun porostního světla, vyvolaný nadúrovňovou probírkou, vede v konečném důsledku ke zvýšení biomasy listoví ponechaných jedinců a v důsledku vyvinutí asimilačního aparátu k vysokému růstovému potenciálu v následujících letech (LARCHER, 2003, REMEŠ, 2006, FERIN, 2002). V případě této studie je rozdíl nejvíce patrný u jedinců podúrovňových až úrovňových, kde jedinci stejných dimenzí vykazují vyšší hodnoty biomasy větví a listoví na ploše D4 s aplikací úrovňové probírky (Obrázek 25).

Výsledky provedeného šetření vlivu rozdílných pěstebních přístupů ovlivňujících porostní strukturu nevede k rozdílné výši kompetičního indexu v důsledku vysoké míry variability (hodnoty kompetičního indexu jsou 3,7 pro plochu C3 a 2,9 pro plochu D4). Děje se tak proto, že vyšší počet jedinců menší dimenze v okolí šetřeného stromu vede ke stejné výši kompetice, jako v případě šetřeného stromu obklopeného menším počtem jedinců větších dimenzí. Celá řada autorů uvádí kompetiční indexy jako vhodnou možnost odhadu budoucího růstu stromů (DANIELSE et al., 1986; TOME a BURKHART, 1989; BIGING a DOBBERTIN, 1995). Podle těchto autorů kompetiční indexy vysvětlují podstatnou část v proměnlivostech růstu stromů v porostu. Z toho důvodu podobná hodnota kompetičního indexu, zjištěná v podúrovňové i úrovňové variantě, podporuje zjištění o shodě alometrických vztahů obou variant.

K odhadu celkové biomasy či biomasy jednotlivých orgánů stromů slouží expanzní faktory. Expanzní faktory se používají k odvození biomasy na úrovni stromu, porostu i v rámci odhadu biomasy na národní úrovni (LEHTONEN et al., 2004; TOBIN a NIEUWENHUIS, 2007; MAREK et al., 2011). Expanzní faktory (BEFs) jsou vyjádřeny jako podíl celkové biomasy, případně jejích částí (biomasa listoví, větví, kmene), k objemu hroubí kmene stromu. Problematikou BEFs se zabýval LEHTONEN (2004), který publikoval BEFs pro smrkové porosty ve věku od 10–140 let a prokázal klesající tendenci BEFs s věkem. Hodnoty BEFs uvádí v intervalu 0,86–0,77 pro odvození celkové biomasy. Problematikou expanzních faktorů se u nás zabýval i CIENCIALA et al. (2008), kteří sestavili na věku závislé expanzní faktory pro hlavní hospodářské dřeviny. Z jejich výsledků lze zjistit, že expanzní faktor pro odvození celkové biomasy je v intervalu 0,6–0,8 pro smrk ve věku 35. Těchto hodnot bylo dosaženo i v případě této práce, kde byla zjištěna hodnota 0,75 pro odvození nadzemní biomasy z objemu kmene. SVĚTLÍK et al. (*In press*) uvádějí hodnoty BEFs v intervalu 0,48–0,56 v případě stanovení nadzemní biomasy a v intervalu 0,57–0,65 pro celkovou biomasu pro smrkovou kmenovinu



ve věku 106 let v lokalitě Rájec-Němčice. Expanzní faktory představují jednoduchý způsob kvantifikace biomasy. Tento způsob umožňuje pracovníkům lesního hospodářství kvantifikovat celkovou biomasu, či biomasu jednotlivých orgánů stromu na základě zjištěné hodnoty hroubí kmene a právě expanzních faktorů. V blízké budoucnosti může nastat stav, že v lesním hospodářství bude potřeba vykazování zásob celkové biomasy a v tom případě budou hrát alometrické vztahy a expanzní faktory klíčovou roli při odvození biomasy.

## 3.4 Tvar a velikost sociální plochy ke vztahu k růstu jednotlivých stromů

### 3.4.1 Úvod

Smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) Karst.) je jedním z nejvýznamnějších dřevinných druhů v České republice, ale i v celé Evropě. Smrkové monokultury mají neoddiskutovatelné postavení v otázce evropské lesnické ekonomiky. V současné době jsou otázky o budoucnosti pěstování lesních porostů a schopnosti ukládat uhlík diskutovány velmi často. V rámci Kjótského protokolu (UNFCCC, 1997) a emisní inventury (IPCC, 2006) je nutné získat dostatečné množství údajů o množství vytvořené biomasy v lesních porostech, o schopnosti a velikosti přírůstu těchto porostů a tím kvantifikovat potenciál lesních porostů vázat atmosférický uhlík a přispívat ke snižování stoupající koncentrace atmosférického uhlíku (LOSI et al., 2003, PHAT et al., 2004).

Smrkové porosty jsou hodnoceny jako porosty se středním až vysokým potenciálem ohroženosti ve spojení s globální změnou klimatu (ČERMÁK et al., 2004, LINDER et al., 2010, LÉVASQUE et al., 2013). Pochopení a porozumění vztahů, které ovlivňují růst stromů, jsou základními předpoklady pro pěstování, udržení a zlepšení porostních podmínek v měnícím se klimatu (ANDERSON et al., 1998, DOBBERTIN, 2005). Lesní porosty a jejich struktura jsou utvářeny po dlouhá časová období a mají zásadní vliv na všechny životní procesy v lesním ekosystému (Pretzsch, 2009).

Jedinci smrku ztepilého v lesním porostu jsou aglomerovány a v důsledku toho zabírají menší prostor než listnaté dřeviny, jako je třeba buk lesní. Jedinci smrku ztepilého jsou efektivnější při využívání růstového prostoru na mnoha stanovištích (PETRI, 1966, PRETZSCH a BIBER, 2005). Efektivní pěstění smrku nemusí být částí přírodních rostlinných společenstev, a tím nemůže být smrk silným konkurentem na konkrétním místě. Dále jsou tyto porosty pěstované na stanovištích, které nejsou vhodné pro tento druh. Ve střední Evropě smrk dosahuje vysoké účinnosti růstu v uměle založených a vychovávaných porostech (PRETZSCH a SCHÜTZE, 2005). Růstové modely jsou jedním z nejdůležitějších nástrojů v dlouhodobé perspektivě systému plánování pro lesníky v obhospodařovaných lesích a na výzkumných plochách. Pochopení a schopnost modelování a predikce růstu lesních porostů se dostává do popředí zájmu jak u pracovníků lesního hospodářství, tak u vědeckých pracovníků zabývajících se lesními ekosystémy a globální změnou klimatu (VANCLAY, 1994, ANDREASSEN a TOMTER, 2003).

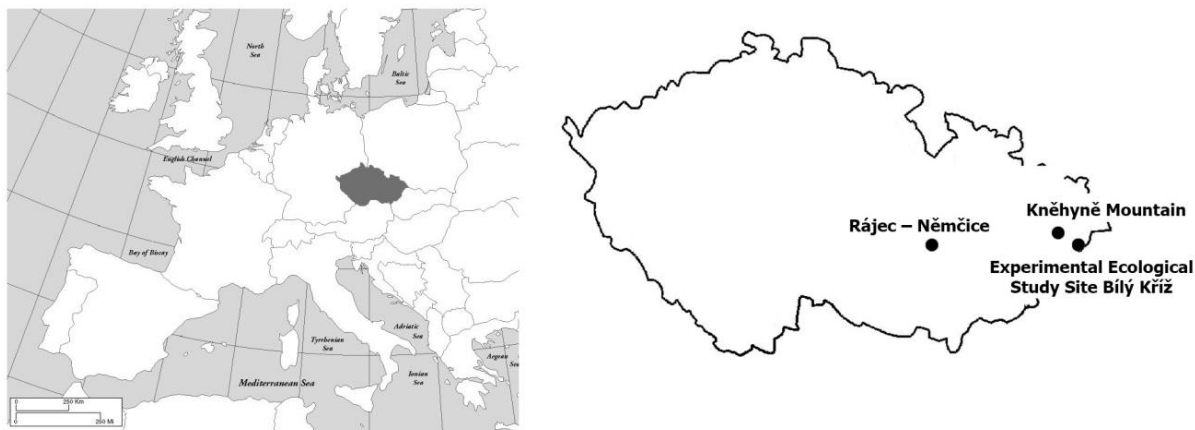
Kompetiční indexy jsou široce používané a poskytují užitečné výsledky pro interpretaci variability růstu a shrnují intenzitu, účinek a výsledek rostlinné konkurence (WEIGELT a JOLLIFFE, 2003). Konkurence rostlin je pouze jednou z mnoha ekologických vazeb, které ovlivňují dynamiku a produkci vegetace. Pro vyjádření míry kompetice ve vztahu k ekologickým faktorům bylo vyvinuto několik kompetičních indexů. Tyto kompetiční indexy můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin: 1. skupinu kompetičních indexů na vzdálenosti

nezávislých (DANIELS et al., 1986, CORONA a FERRARA, 1989, CASTAGNERI et al., 2008) a 2. skupinu kompetičních indexů na vzdálenosti závislých (HEGYI, 1974, PUKKALA A KOLSTROM, 1987, PUKKALA, 1989, BIGING a DOBBERTIN, 1995, PRETZSCH, 1995). Znalost kompetičních vztahů a jejich vliv na růst jedinců hraje důležitou roli při obhospodařování lesních porostů, obzvláště v dnešní době významně a rychle se měnícího klimatu, kdy stoupá ohrožení porostů například zvyšujícím se výskytem větrných kalamit, stresem suchem, nebo poškození lesa hmyzími škůdci (WILLIAMSON et al., 2008, GRIESS a KNOKE, 2013). Tyto disturbance budou mít zásadní vliv na kompetiční vztahy mezi jedinci i na lesní ekosystém jako celek (DALE et al., 2001).

Tato kapitola se zabývá vlivem kompetice na růst jedinců smrku ztepilého a dále vytvořením modelů pro predikci přírůstu výčetní kruhové základny u jednotlivých stromů v závislosti na kompetičních indexech ve stejnověkových smrkových porostech. Tyto modely mohou být použité pro lesnické plánování a pro predikci růstu na výzkumných plochách. Modely byly sestaveny na základě charakteristik jednotlivých stromů a porostu (např. sociální plocha stromu, minimální a maximální vážená vzdálenost mezi jedincem a jeho kompetitorem, kompetiční indexy, korunová projekce, délka koruny, výčetní tloušťka a výška stromu). V této kapitole je také podrobně řešen vztah mezi velikostí a tvarem sociální plochy, její tvarovou orientaci ke světovým stranám a její vztah k růstu jedinců smrku.

### 3.4.2 Metodika

Výzkum tvaru a velikosti sociální plochy ke vztahu k růstu jednotlivých stromů probíhal na devíti výzkumných plochách. Ve všech případech se jedná o čisté porosty smrku ztepilého. Polohu a popis výzkumných ploch uvádí obrázek 26 a tabulka 20. Další obecné informace o výzkumných plochách jsou uvedeny v kapitole 3.1. *Popis lokality*.



Obrázek 26: Poloha výzkumných ploch v rámci České republiky.

Tabulka 20: Základní charakteristiky výzkumných ploch.

Plocha	GPS souřadnice	Nadmořská výška [m] m n.m.	Průměrná roční teplota [°C]	Roční úhrn srážek [mm]	Délka vegetační sezóny [Dny]	Půdní typ
Bílý Kříž	1 49°30'9"N	850–908	5,0	1100-1400	190	Oligotrofní kambizem
	2 18°32'19"E					
Kněhyně	1	980–1075	5,5	1200-1400	190	Leptický podzol
	2					
	3 49°29'30"N, 18°19'17"E					
	4					
	5					
Rájec-Němčice	1 49°26'44"N,	635–640	6,5	600-800	215	Železitý podzol
	2 16°41'49"E					

#### 3.4.2.1 Terénní šetření

U všech stromů napříč výzkumnými plochami byla měřena výčetní tloušťka kmene (DBH), výška stromu (H), korunová projekce (CP), délka koruny (CL) a pozice stromu v souřadnicovém systému. Pro zaměření pozic stromu bylo využito systému Field-Map (IFER ČR). Použitá sestava Field-Map již byla popsána v kapitole 3.2.2. Porostní charakteristiky výzkumných ploch uvádí tabulka 21.

Tabulka 21: Základní charakteristiky výzkumných ploch a jejich dendrometrické charakteristiky. n1 značí počet jedinců na výzkumné ploše, n2 značí počet stromů, pro který byla vypočítána sociální plocha a potencionálně prostorově dostupná plocha, DBH – výčetní tloušťka kmene.

Plocha	Výměra [ha]	Věk [rok]	n1 [ks]	n2 [ks]	DBH [cm]		Výška [m]		
					Průměr	± SD	Průměr	± SD	
Bílý Kříž	1	0,05	31	64	41	17,60	2,83	14,00	1,02
	2	0,05	31	73	40	17,50	3,28	15,50	1,31
Kněhyně	1	0,24	79	51	20	28,90	4,46	19,10	1,33
	2	0,21	89	39	15	42,50	7,62	23,70	3,51
	3	0,20	66	49	24	28,20	4,61	19,60	2,07
	4	0,19	66	44	18	23,90	6,30	19,20	1,91
	5	0,19	71	39	15	30,80	5,24	20,40	1,26
Rájec-Němčice	1	0,05	33	69	41	15,30	3,55	16,10	2,31
	2	0,05	33	90	55	14,40	5,27	13,80	3,92

#### 3.4.2.2 5letý přírůst na výčetní kruhové ploše jedince

Pětiletý přírůst na výčetní kruhové ploše ( $I_{g5}$ ) pro jednotlivé jedince smrku byl vypočítán z pravidelného měření DBH v období 2008 – 2012 podle vzorce:

$$I_{g5} = (BA_a) - (BA_b) \quad (10).$$

Kde:  $BA_a$  – výčetní kruhová plocha jedince na konci roku 2012,  $BA_b$  – výčetní kruhová plocha jedince na začátku roku 2008.

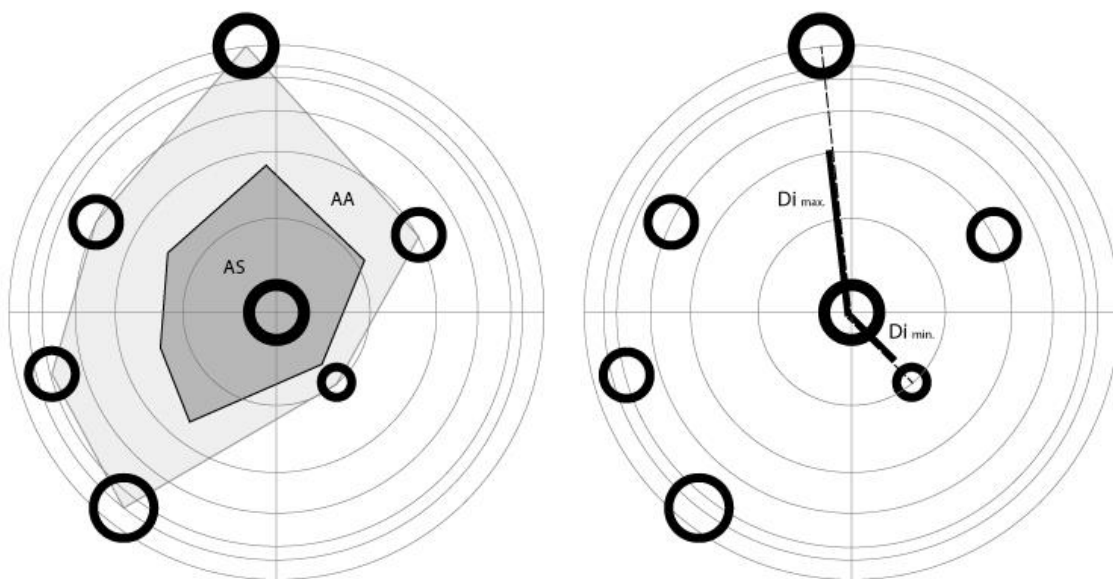
#### 3.4.2.3 Sociální plocha a potencionálně prostorově dostupná plocha

Potencionálně prostorově dostupná plocha (AA) je popsána jako polygonální plocha okolo šetřeného stromu a jeho nejbližších sousedních stromů, kde vzdálenosti ( $D_{ij}$ ) použité pro výpočet AA byly přímo měřené vzdálenosti mezi vzorníkovým stromem a jeho sousedními stromy. Nákres potencionálně prostorově dostupné plochy je znázorněn na obrázku 27. Sociální plocha (AS) je plocha kolem vzorníkového stromu, která funkčně propojuje plochu AA a dimenze vzorníkového stromu. AS je polygonální plocha (Obrázek 27), kde vzdálenosti mezi vzorníkovým stromem a jeho sousedními stromy byly váženy rozměry sousedního stromu a vlastním vzorníkovým stromem. AS byla vypočítána pomocí vzorce 10, kde  $D_{ij}$  (v metrech) je série vzdáleností mezi vzorníkovým stromem a jeho nejbližšími sousedními stromy a tyto vzdálenosti byly váženy příslušnou výčetní kruhovou plochou vzorníkového stromu ( $X_{i \text{ basal, m}^2}$ ) a výčetní kruhovou plochou příslušného sousedního stromu ( $X_{j \text{ basal, m}^2}$ ), (ČERMÁK et al., 2006). Potencionálně prostorově dostupná plocha je plocha

kolem vzorníkového stromu vzdálenostně a směrově orientovaná plocha, zatímco sociální plocha je vzdálenostně, směrově orientovaná a rozměrově závislá plocha kolem vzorníkového stromu (Obrázek 27). Tvar sociální plochy je přímo závislý na pozicích sousedních stromů. Celkem bylo změřeno 518 stromů a z toho byly pro 269 stromů vypočítány charakteristiky AA a AS. Důvodem redukce stromů z celkového počtu 518 je absence sousedních stromů na okraji výzkumných ploch. Vybrané vzorníkové stromy, pro které byla vypočítána AS a AA, byly ze všech stran obklopeny sousedními stromy. Vzdálenosti ( $D_{i\text{ soc}}$ ) použité pro výpočet AS byly vzdálenosti mezi vzorníkovým stromem a jeho příslušným sousedním stromem vypočtené na základě rovnice 11 dle ČERMÁKA (1990):

$$D_{i\text{ soc.}} = D_{ij} * \frac{X_{i\text{ basal}}}{X_{i\text{ basal}} + X_{j\text{ basal}}} \quad (11)$$

Kde  $D_{ij}$  je vzdálenost mezi vzorníkovým stromem  $i$  a sousedním stromem  $j$ ,  $X_{i\text{ basal}}$  a  $X_{j\text{ basal}}$  jsou kruhové průřezové plochy ve výčetní výšce pro vzorníkový strom  $i$  a k tomu příslušný sousední strom  $j$ .



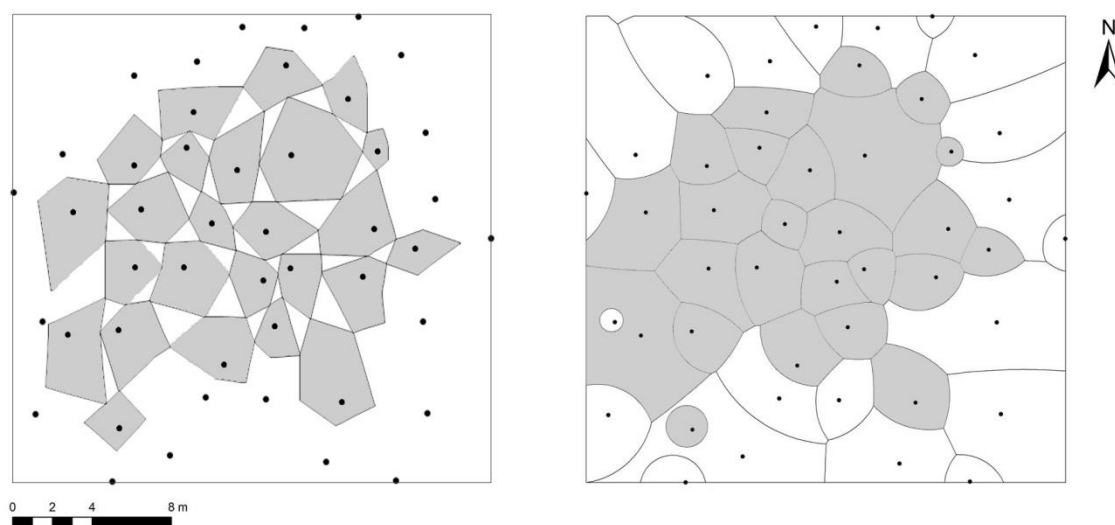
Obrázek 27: Znárodnění polohy vzorníkového stromu k poloze sousedních stromů s vyznačením potenciálně prostorově dostupné plochy (AA), která je vyznačená světle šedou plochou, a sociální plochy (AS), která je vyznačená tmavě šedou plochou (levý obrázek). Pravý obrázek znázorňuje příklad minimálních ( $D_{i\text{ min.}}$ ) a maximální vážených vzdáleností ( $D_{i\text{ max.}}$ ) mezi vzorníkovým stromem a jeho sousedními stromy.

### 3.4.2.4 Výběr stromů

K výběru sousedních stromů byl použit princip výběru individuálních stromů okolo vzorníkového stromu. Sousední stromy byly vybírány přímo v porostu, s použitím mapy pozice stromu s korunovou projekcí. Kolem vzorníkového stromu bylo vybráno šest nejbližších sousedních stromů. Jako parametr váhy pro výpočet AS byla použita výčetní kruhová plocha jedince (BA). Ta byla postupně zkusně nahrazena i jinými parametry (DBH, H, CP) pro zjištění nejlepšího parametru pro vážení v případě korelace s parametrem  $I_{g5}$ .

### 3.4.2.5 Vážené Voroného polygony

Vážené Voroného polygony (WVP) jsou způsobem dekompozice metrického prostoru vzdálenostmi k dané diskrétní množině objektů v prostoru (AURENHAMMER, 1991). V našem případě se jedná o vzorníkové stromy a jejich sousední stromy. Tyto polygony slouží k počítačovému vyhodnocení prostorových dat. Jako parametr pro vážení Voroného polygonů byl použit parametr BA, stejně jako pro výpočet sociální plochy. Výpočet a znázornění WVP byl proveden v programu ArcGIS 10.2. pomocí modulu ET Surface. Příklad WVP a AS jen znázorněn na obrázku 28.



Obrázek 28: Příklad vážených Voroného polygonů (pravý obrázek) a sociální plochy (levý obrázek) na příkladu plochy Kněhyně 3.

Dále byly použity vzdálenostní charakteristiky jako minimální vážená vzdálenost ( $D_{i \min.}$ ), průměrná vážená vzdálenost (MWD) a maximální vážená vzdálenost ( $D_{i \max.}$ ).  $D_{i \min.}$  je charakterizována jako vážená vzdálenost mezi vzorníkovým stromem a jeho nejbližším sousedním stromem.  $D_{i \max.}$  je definována jako vzdálenost mezi vzorníkovým stromem a jeho nejvzdálenějším sousedním stromem, v našem případě se jedná o nejvzdálenější sousední

strom z šesti nejbližších sousedních stromů. MWD je vypočtená průměrná vážená vzdálenost mezi vzorníkovým stromem a jeho šesti sousedními stromy. Vážené vzdálenosti byly vypočítány přímo ze souřadnic stromů, které byly dány ve tvaru souřadnice x a souřadnice y. Znázornění těchto vážených vzdáleností uvádí [obrázek 27](#).

### 3.4.2.6 Vzdálenostně závislé kompetiční indexy

Výběru vzdálenostně závislých kompetičních indexů předcházelo jejich testování a testování jednotlivých vstupních parametrů pro tyto indexy. Nakonec byly vybrány dva vzdálenostně závislé indexy s DBH a CL jako vstupními parametry do těchto indexů. Tvar rovnice pro výpočet vzdálenostně závislých kompetičních indexů uvádí [tabulka 22](#) a její příslušné rovnice.

Tabulka 22: Vzdálenostně závislé kompetiční indexy a jejich příslušné rovnice.

Index	Rovnice	Legenda
1. $CI_{DBH}$	$CI_{DBH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{DBH_j}{DBH_i} \times \frac{1}{D_{ij}} \right)$	n, počet sousedních stromů; DBH <sub>i</sub> , DBH (cm) vzorníkového stromu; DBH <sub>j</sub> , DBH (cm) příslušného sousedního stromu
2. $CI_{CL}$	$CI_{CL} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{CL_j}{CL_i} \times \frac{1}{D_{ij}} \right)$	CL <sub>i</sub> , délka koruny vzorníkového stromu (m); CL <sub>j</sub> , délka koruny příslušného sousedního stromu (m)

$D_{ij}$  je přímá vzdálenost mezi sousedním stromem ( $j$ ) a vzorníkovým stromem ( $i$ ) v metrech.

### 3.4.2.7 Kompetiční index šesti nejbližších stromů ( $NTD_6$ )

Pro výpočet indexu  $NTD_6$ , byla použita [rovnice číslo 12](#), kde sousední strom  $j$  a vzorníkový strom  $i$  reprezentují jejich jednotlivé charakteristiky jako DBH, H, CP, BA a CL. Do výpočtu tohoto indexu nevstupuje vzdálenost jednotlivých sousedních stromů, i když tato veličina se svým způsobem projevuje v tom, že do výpočtu vstupuje pouze šest nejbližších stromů v okolí vzorníkového stromu ([Krejza et al. 2015](#)).

$$CI_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_j}{X_i} \right) \quad (12)$$

Kde  $X_j$  jsou proměnné pro sousední stromy (DBH, H, CP, BA a CL) a  $X_i$  jsou proměnné pro vzorníkový strom (DBH, H, CP, BA a CL).



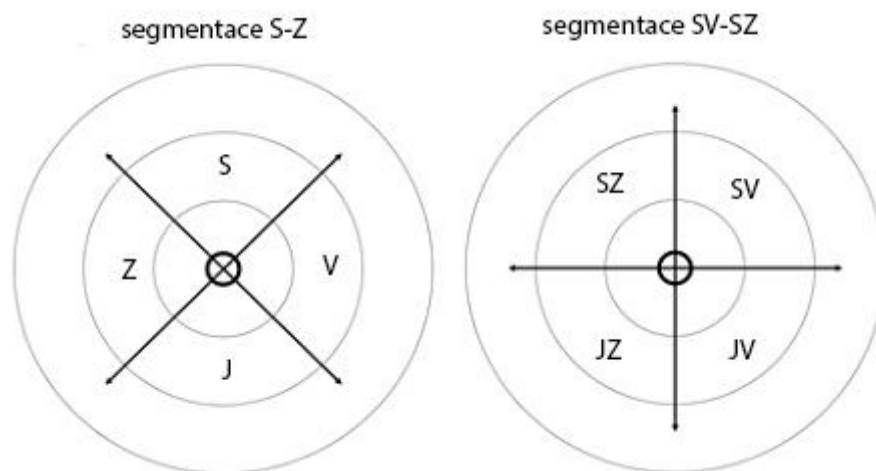
### 3.4.2.8 Tvar sociální plochy ve vztahu k růstu

V případě růstu stromu ve vztahu k tvaru sociální plochy byl jako parametru růstu zvolen přírůst DBH za šetřené 5leté období. Pro porovnání všech stromů ze všech výzkumných ploch bylo třeba tento parametr přepočítat na jeho relativní hodnotu v rámci každého porostu (rovnice č. 13). Relativní hodnota přírůstu DBH za sledované pětileté období ( $I5_{rel.(i)}$ ) byla vypočítána jako:

$$I5_{rel.(i)} = \frac{I5_{abs.(ij)}}{\overline{I5}_{(j)}} \quad (13)$$

Kde:  $I5_{abs.(ij)}$  reprezentuje absolutní přírůst DBH stromu  $i$  na výzkumné ploše  $j$  za sledované 5leté období,  $\overline{I5}_{(j)}$  je průměrný přírůst DBH za sledované 5leté období na ploše  $j$ .

Pro posouzení tvaru AS byla sociální plocha rozdělena dle světových stran na jednotlivé sektory, způsob rozdělení na jednotlivé sektory je zobrazen na obrázku 29. Byla použita segmentace sever-západ (S-Z) a segmentace severovýchod-severozápad (SV-SZ).



Obrázek 29: Způsob prostorové segmentace sociální plochy (AS).

Dále byla vypočítána relativní velikost sociální plochy pro každý segment dle vzorce:

$$AS_{(rel.)ik} = \frac{AS_{ik}}{AS} \quad (14)$$

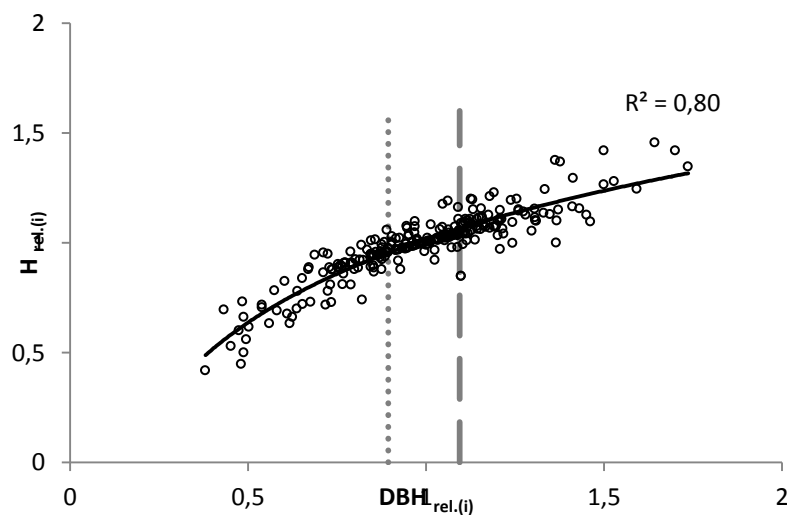
Kde:  $AS_{ik}$  je velikost sociální plochy vzorníkového stromu  $i$  pro jednotlivý sektor  $k$  a  $AS$  je sociální plocha vzorníkového stromu  $i$ .

Dále bylo nutné rozdělit jednotlivé stromy dle jejich sociálního postavení na tři skupiny. Proto byla vylišena skupina stromů nadúrovňových, úrovňových a podúrovňových a to na základě jejich relativní DBH ( $DBH_{rel.(i)}$ ), která byla vypočtena dle následujícího vzorce (rovnice č. 15).

$$DBH_{rel.(i)} = \frac{DBH_{abs.(ij)}}{\overline{DBH}_{(j)}} \quad (15)$$

Kde  $DBH_{abs.(ij)}$  je hodnota DBH stromu  $i$  rostoucího na ploše  $j$  a  $\overline{DBH}_{(j)}$  je průměrné DBH pro plochu  $j$ .

Relativní výška jedinců byla vypočítána podle stejného vzorce (vzorec č. 14). Z důvodu silné korelace mezi parametrem relativní DBH a relativní H ( $R^2=0,85$ ) byl zvolen pouze parametr  $DBH_{rel.(i)}$  pro rozdělení stromů dle sociálního postavení. Rozdělení do sociálních tříd bylo následující 0-1/3 percentilu  $DBH_{rel.(i)}$  – jedinci podúrovňoví, 1/3-2/3 percentilu  $DBH_{rel.(i)}$  – jedinci úrovňoví a 2/3-1 percentilu  $DBH_{rel.(i)}$  jedinci nadúrovňoví. Rozdělení do sociálních tříd znázorňuje také obrázek 30.



Obrázek 30: Grafické znázornění rozdělení stromů dle sociálního postavení. Stromy nalevo od tečkované čáry jsou klasifikovány jako stromy podúrovňové, stromy mezi tečkovanou a přerušovanou čarou jako stromy úrovňové a stromy napravo od přerušované čáry jako stromy nadúrovňové.

### 3.4.2.9 Vyhodnocení tvaru sociální plochy

Pro vyhodnocení tvaru sociální plochy byla sestavena čtyři pravidla pro filtrování dat. Charakter pravidel byl sestaven tak, aby zahrnoval extrémní případy tvaru AS. Filtrování dat dle jednotlivých pravidel bylo provedeno z grafu, kde proti sobě stojí maximální velikost segmentu sociální plochy ( $AS_{(rel.)i\ k=MAX}$ ) a minimální velikost segmentu sociální plochy daného stromu ( $AS_{(rel.)i\ k=MIN}$ ). Matematické a grafické vyjádření jednotlivých pravidel znázorňuje obrázek 31 a tabulka 23.

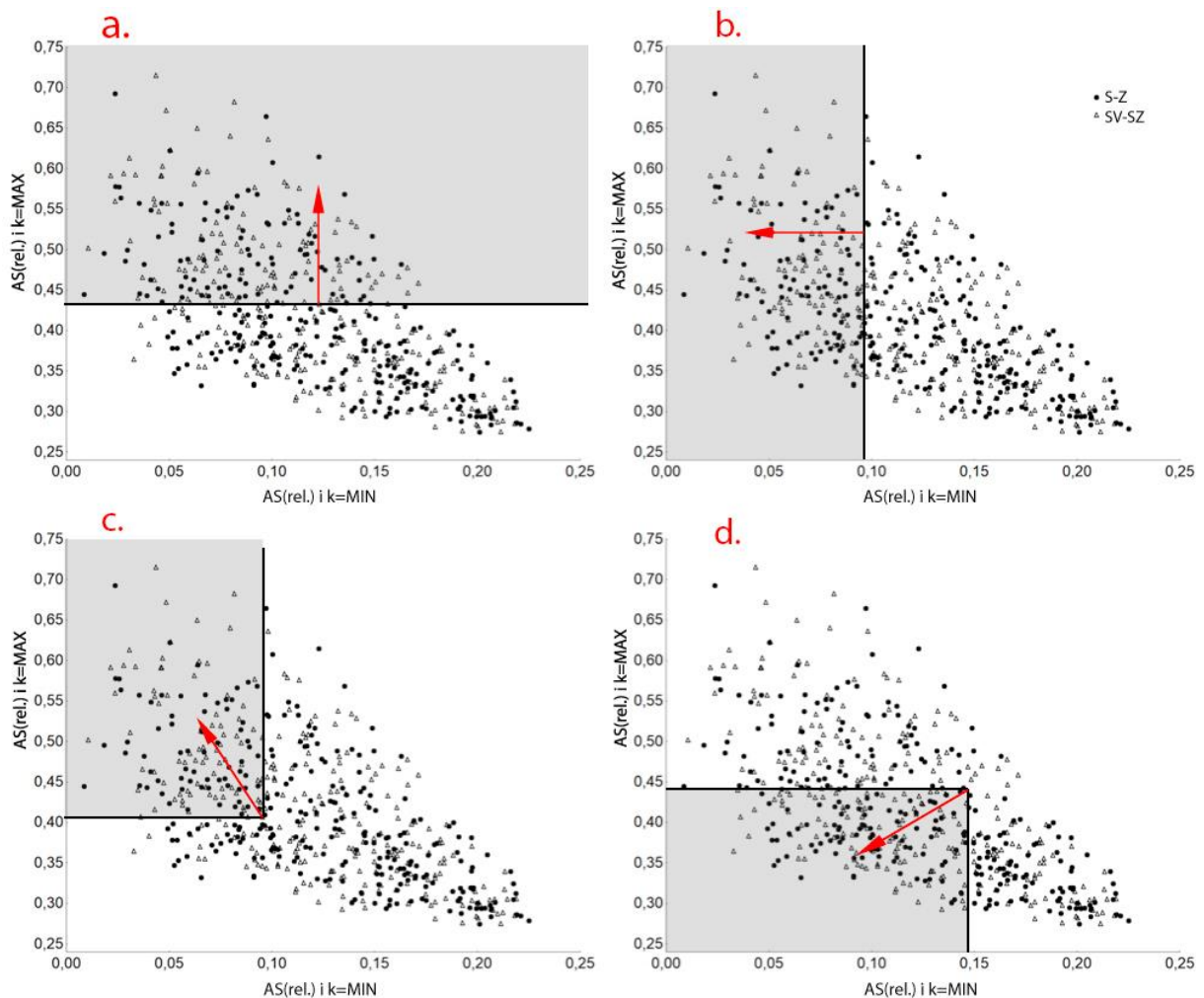
Tabulka 23: Matematické vyjádření pravidel pro filtrování stromů dle tvaru sociální plochy a jejich sociálního postavení.

Pravidlo	Sociální postavení stromu	Omezení ze strany největšího sektoru	Omezení ze strany nejmenšího sektoru
1	Nadúrovňový Úrovňový Podúrovňový	$AS_{(rel.)i\ k=MAX} \geq 2/3 p_{MAX}$	bez omezení
2	Nadúrovňový Úrovňový Podúrovňový	bez omezení	$AS_{(rel.)i\ k=MIN} \leq 1/3 p_{MIN}$
3	Nadúrovňový Úrovňový Podúrovňový	$AS_{(rel.)i\ k=MAX} \geq 1/2 p_{MAX}$	$AS_{(rel.)i\ k=MIN} \geq 1/3 p_{MIN}$
4	Nadúrovňový Úrovňový Podúrovňový	$AS_{(rel.)i\ k=MAX} \leq 2/3 p_{MAX}$	$AS_{(rel.)i\ k=MIN} \leq 2/3 p_{MIN}$

Slovní charakteristika pravidel pro filtrování stromů dle tvaru sociální plochy a jejich sociálního postavení, lze vyjádřit následovně:

1. První pravidlo zahrnuje veškeré stromy, které mají sociální plochu výrazně otevřenou k jedné straně a již zde není omezení na utlačení ze strany druhé (Obrázek 31a).
2. Druhé pravidlo zahrnuje veškeré stromy, které mají sociální plochu z jedné strany výrazně utlačenou, ale není zde omezení, že mohou být výrazně uvolněné na stranu jinou (Obrázek 31b).

3. Pravidlo třetí zahrnuje stromy, které mají sociální plochu na jednu stranu výrazně otevřenou a na stranu druhou ji mají výrazně utlačenou (Obrázek 31c).
4. Pravidlo čtvrté zahrnuje stromy, které mají sociální plochu na jednu stranu výrazně utlačenou a zároveň nemají žádné extrémní uvolnění na stranu jinou (Obrázek 31d).



Obrázek 31: Grafické znázornění jednotlivých pravidel pro filtrování stromů dle tvaru jejich sociální plochy.  $AS_{(rel.)i k=MAX}$  je největší relativní segment sociální plochy proti  $AS_{(rel.)i k=MIN}$ , což značí minimální segment sociální plochy.

#### 3.4.2.10 Analýza dat

Pro výpočet charakteristik AS a AA byl použit program MS Excel 2010 a jeho obecné funkce. Následně byla tyto data testována pomocí programu STATISTICA 10 (StatSoft Inc 2011) a QC expert 3.3 (TriloByte Statistical Software Ltd 2013). Analýza kovariance (ANCOVA) byla použita pro vyhodnocení statistických rozdílů mezi jednotlivými modely.

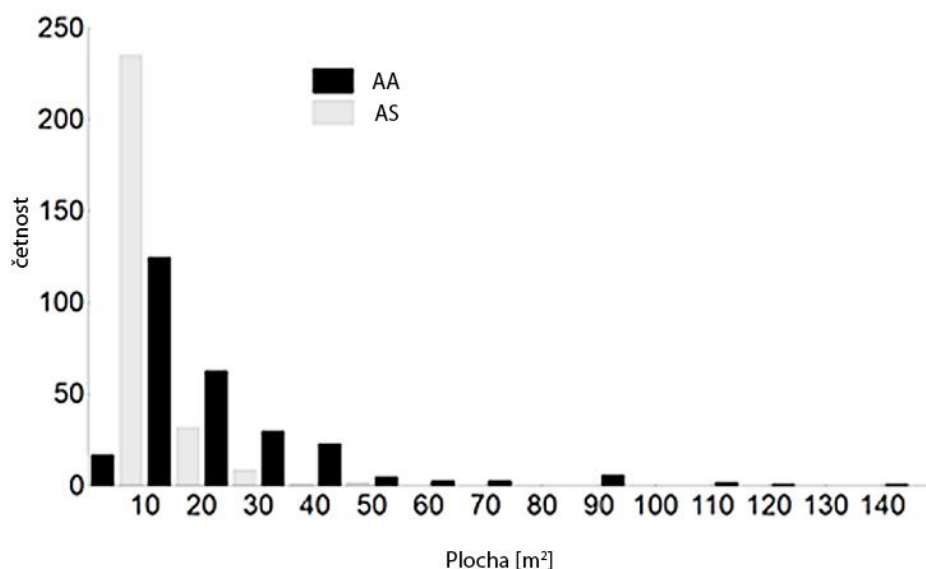
### 3.4.3 Výsledky

#### 3.4.3.1 Sociální a potencionálně prostorově dostupná plocha

Rozložení hodnot sociální (AS) a potencionálně prostorově dostupné plochy (AA) ze všech porostů vykazovalo kladnou šikmost (Obrázek 31). Největší četnosti AS bylo dosaženo v intervalu 0–10 m<sup>2</sup> a v případě AA byla největší četnost dosažena v intervalu 10–20 m<sup>2</sup>. Průměrná hodnota parametru AS byla 6,54 m<sup>2</sup> (minimum 0,06 m<sup>2</sup> a maximum 43,04 m<sup>2</sup>). Průměrná hodnota veličiny AA byla 26,40 m<sup>2</sup> (s minimem 6,77 m<sup>2</sup> a maximem 142,50 m<sup>2</sup>). Průměrné hodnoty AA a AS v rámci všech ploch jsou uvedeny v tabulce 24. Výčetní kruhová základna na hektar se mezi porosty pohybovala v intervalu od 32,48 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup> do 69,36 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>. Dále byl pro všechny porosty vypočítán Index hustoty porostu (SDI) dle REINEKEHO (1933). Výsledky tohoto indexu uvádí tabulka 24.

Tabulka 24: Porostní charakteristiky: průměrné hodnoty sociální plochy (AS), potencionálně prostorově dostupné plochy (AA), směrodatná odchylka (SD), výčetní kruhová základna na hektar (G), počet stromů na hektar (N), Index hustoty porostu (SDI).

Plocha		AS [m <sup>2</sup> ]		AA [m <sup>2</sup> ]		G [m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> ]	N [ha <sup>-1</sup> ]	SDI
		Průměr	± SD	Průměr	± SD			
Bílý Kříž	1	5,27	2,52	20,58	5,28	33,22	1268	721,9
	2	5,32	3,08	21,58	9,56	32,48	1184	667,9
Kněhyně	1	8,80	4,24	39,72	7,65	43,52	639	806,5
	2	22,55	11,80	89,97	20,95	47,91	325	761,6
	3	8,28	3,95	33,88	7,56	49,47	767	930,2
	4	5,89	3,97	21,10	4,66	69,36	1100	1023,4
	5	10,38	5,92	43,50	8,81	50,07	650	908,5
Rájec-Němčice	1	3,53	1,90	13,36	3,28	42,41	2032	924,0
	2	3,74	3,21	14,65	5,35	35,65	1808	745,9



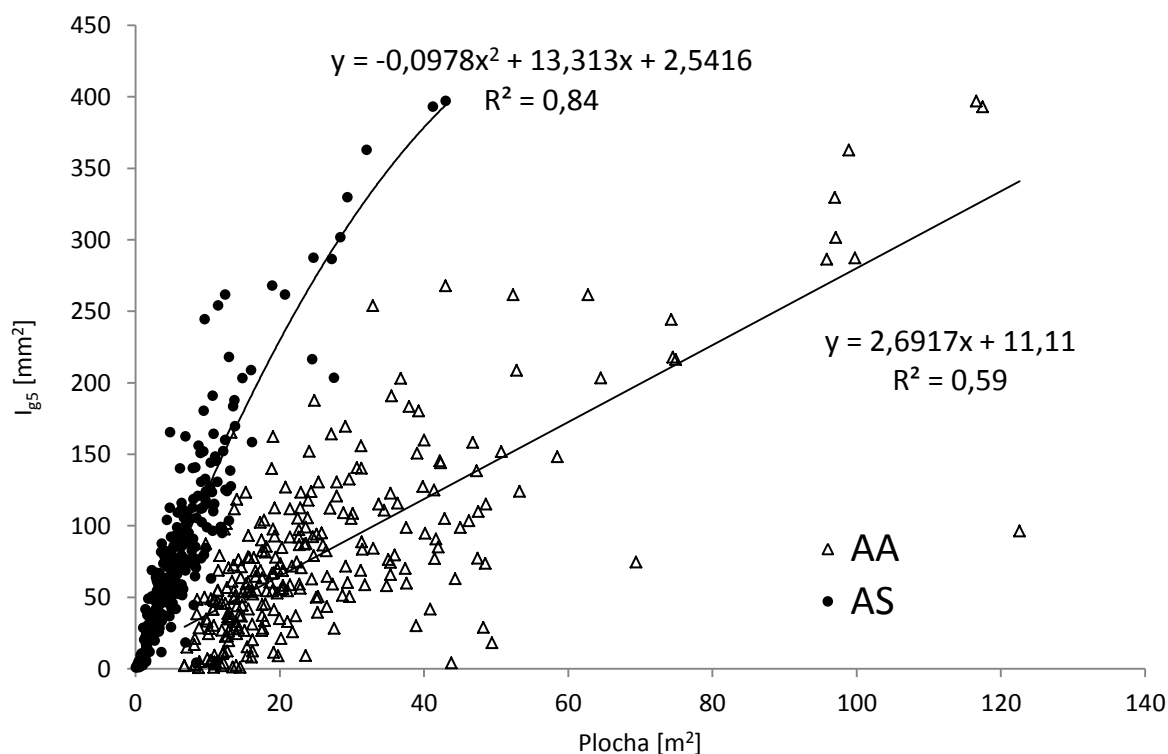
Obrázek 32: Histogram pro parametr potencionálně prostorově dostupné plochy (AA) a sociální plochy (AS).

Na začátku studie byly testovány parametry pro vážení [rovnice 11](#). Do tohoto testu byly vybrány čtyři parametry (DBH, BA, H a CP). Bylo testováno, který parametr pro vážení vzdáleností a vlastní výpočet sociální plochy bude nejlépe korelovat s parametrem  $I_{g5}$ . Výsledky tohoto testu a hodnoty koeficientu determinace uvádí [tabulka 25](#).

Tabulka 25: Hodnoty koeficientu determinace pro korelaci mezi parametrem sociální plochy (AS) a 5letým přírůstem na výčetní kruhové ploše ( $I_{g5}$ ) v případě použití odlišných parametrů pro vážení při výpočtu AS. Použité zkratky značí: BA – výčetní kruhová základna jedince, DBH - tloušťka ve výčetní výšce, CP – korunová projekce, H – výška stromu.

	Parametr pro vážení			
	BA	DBH	CP	H
Korelace ( $R^2$ )	0,84	0,80	0,76	0,72

Z vybraných parametrů bylo dosaženo nejlepší korelace s parametrem BA pro vysvětlení přírůstu  $I_{g5}$ , v tomto případě byla dosažena hodnota koeficientu determinace 0,84. S ostatními parametry koeficient determinace klesal v pořadí DBH, CP a H. Korelace mezi parametrem  $I_{g5}$  a AA byla nižší, u tohoto parametru byl koeficient determinace 0,59. Tyto korelace, včetně rovnic regrese, uvádí [obrázek 33](#). Z dosažené hodnoty korelace u parametru AS je zřejmé, že přírůst  $I_{g5}$  je ovlivněn, jak potencionálně prostorově dostupnou plochou, tak i samotnými rozměry vzorníkových stromů a jeho nejbližšími sousedy.



Obrázek 33: Vztah mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) a sociální plochou (AS), kterou reprezentují plná kolečka, a potenciálně prostorově dostupnou plochou (AA), která je reprezentována trojúhelníky.

Pro ověření funkčnosti obecného regresního modelu (Obrázek 33) a pro predikci přírůstu na kruhové průřezové ploše v závislosti na velikosti sociální plochy napříč porosty, byl použit T-test. T-testem byly porovnány výsledky aplikace obecného modelu v rámci výzkumných ploch (Model ALL) a výsledky aplikace specifických modelů pro jednotlivá stanoviště (Model Single). Výsledky T-testu ukázaly, že u žádné z výzkumných ploch nebyl signifikantní rozdíl mezi modelem ALL a modelem Single, a proto je možné použití obecného tvaru rovnice modelu pro všechny porosty. Tvar a parametry modelů Single a ALL uvádí společně s výsledky T-testu [tabulka 26](#).

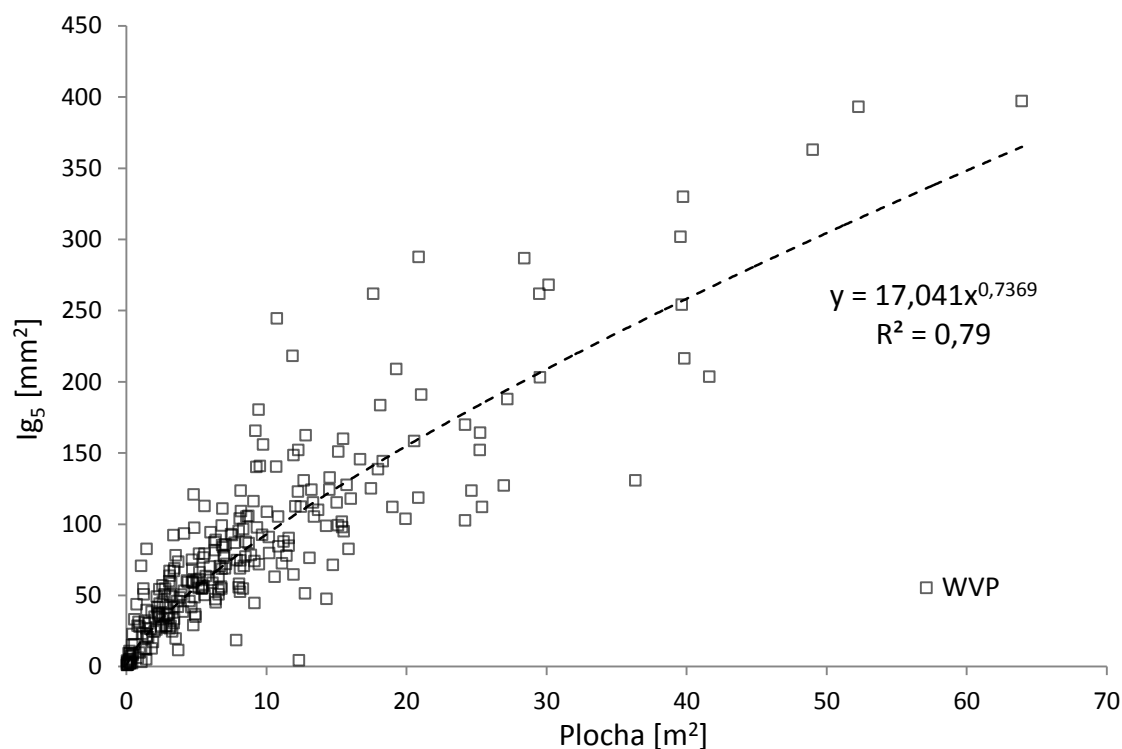
Tabulka 26: Regresní vztah mezi sociální plochou (AS) a přírůstem na kruhové průřezové ploše jednotlivých jedinců za posledních 5 let (I<sub>5</sub>) modelu pro jednotlivé výzkumné plochy (Model single) a obecný model napříč všemi výzkumnými plochami (Model ALL). Hodnota P je výsledkem T-testu, kterým byly porovnány výsledky aplikace modelu ALL a SINGLE. R<sup>2</sup> je koeficient determinace pro jednotlivé modely.

Lokalita Plocha	Bílý Kříž		Kněhyně					Rájec-Němčice	
	1	2	1	2	3	4	5	1	2
Model single	$y = -0,4593x^2 + 13,431x + 20,102$	$y = 21,103x^{0,7523}$	$y = -0,3439x^2 + 20,465x - 33,36$	$y = -0,05x^2 + 9,9223x + 66,495$	$y = 0,045x^3 - 1,1293x^2 + 19,596x - 1,3025$	$y = -0,6539x^2 + 23,197x - 21,401$	$y = -0,2688x^2 + 15,297x - 6,6053$	$y = 8,7918x^{1,1708}$	$y = 8,0173x^{1,1596}$
R <sup>2</sup>	0,66	0,77	0,68	0,77	0,79	0,84	0,53	0,82	0,90
Model ALL	$y = -0,0978x^2 + 13,313x + 2,5416$								
R <sup>2</sup>	0,84								
Hodnota P	0,2973	0,7763	0,8156	0,6219	0,6302	0,6915	0,5313	0,1194	0,1566
Výsledek *	x	x	x	x	x	x	x	x	x

\*x značí, že nebyl prokázán signifikantní rozdíl při hladině významnosti  $\alpha=0,05$



Jednotlivé modely (Model single) pro predikci  $I_{g5}$  vykazovaly hodnoty koeficientu determinace od 0,53 po 0,95. U modelu ALL bylo dosaženo koeficientu determinace 0,84. Schopnost predikování  $I_{g5}$  pomocí parametru AS bylo porovnáno s parametrem vážených Voroného polygonů (WVP), které jsou často používány v těchto případech. V případě sestavení regresního modelu mezi  $I_{g5}$  a WVP bylo dosaženo koeficientu determinace 0,79 (obrázek 33, obrázek 34).

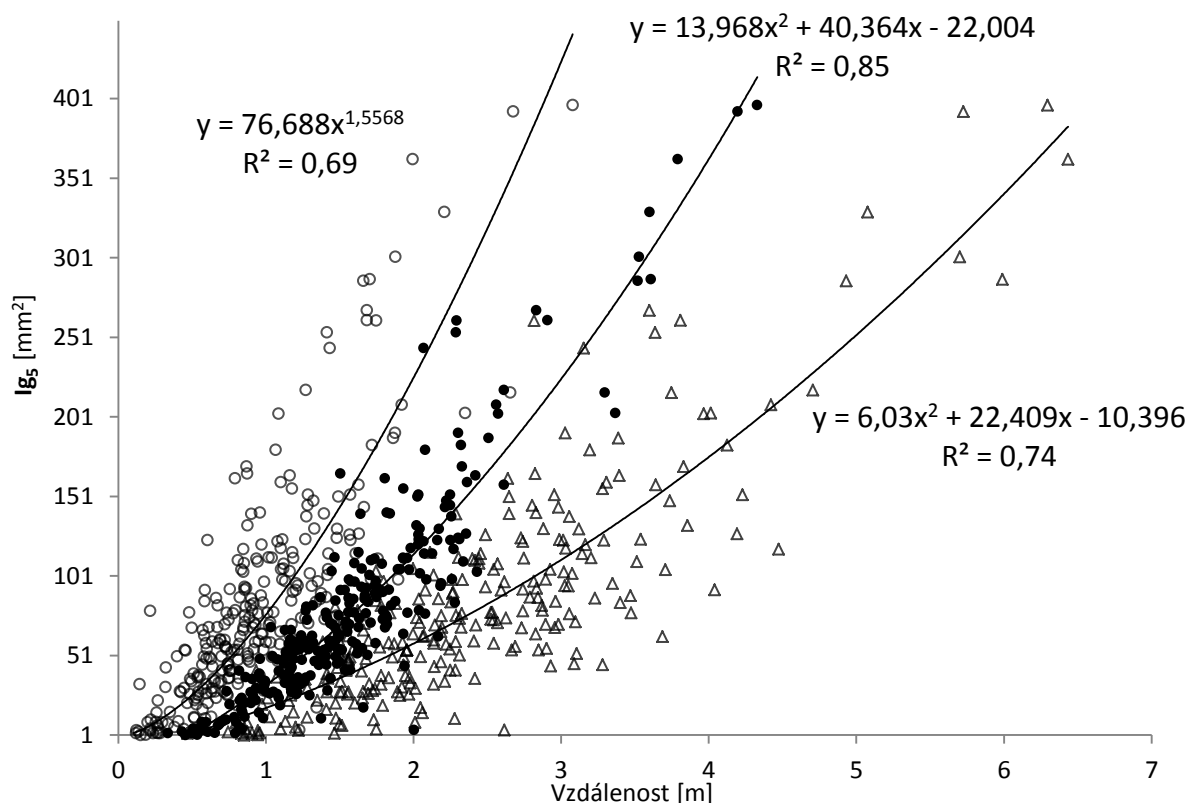


Obrázek 34: Závislost mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) a parametrem vážených Voroného polygonů (WVP) pro jednotlivé jedince.

Z výsledků je patrné, že jednotlivé stromy v porostním zápoji nemusejí využívat celou produkční plochu porostu, což předpokládá parametr WVP. V tomto případě se ukázala sociální plocha jako lepší parametr pro predikci přírůstu na kruhové průřezové ploše individuálních jedinců.

Dalšími parametry, které byly hodnoceny pro predikci přírůstu  $I_{g5}$ , byly parametry minimální ( $D_{i \min.}$ ), průměrná (MWD) a maximální ( $D_{i \max.}$ ) vážená vzdálenost k okolním jedincům. Hodnota parametru  $D_{i \min.}$  se pohybovala v rozmezí od 0,102 m po 3,079 m a tento parametr dosáhl hodnoty koeficientu determinace  $R^2=0,69$ . Parametr  $D_{i \max.}$  dosahoval hodnot 0,288–6,434 m a dosáhl koeficientu determinace  $R^2=0,74$ . Z této skupiny parametrů pro predikci přírůstu  $I_{g5}$  dosáhl nejlepších výsledků parametr MWD, u něhož bylo dosaženo

koeficientu determinace 0,85. Regresní modely i s příslušnými rovnicemi a parametry jsou znázorněny na obrázku 35.



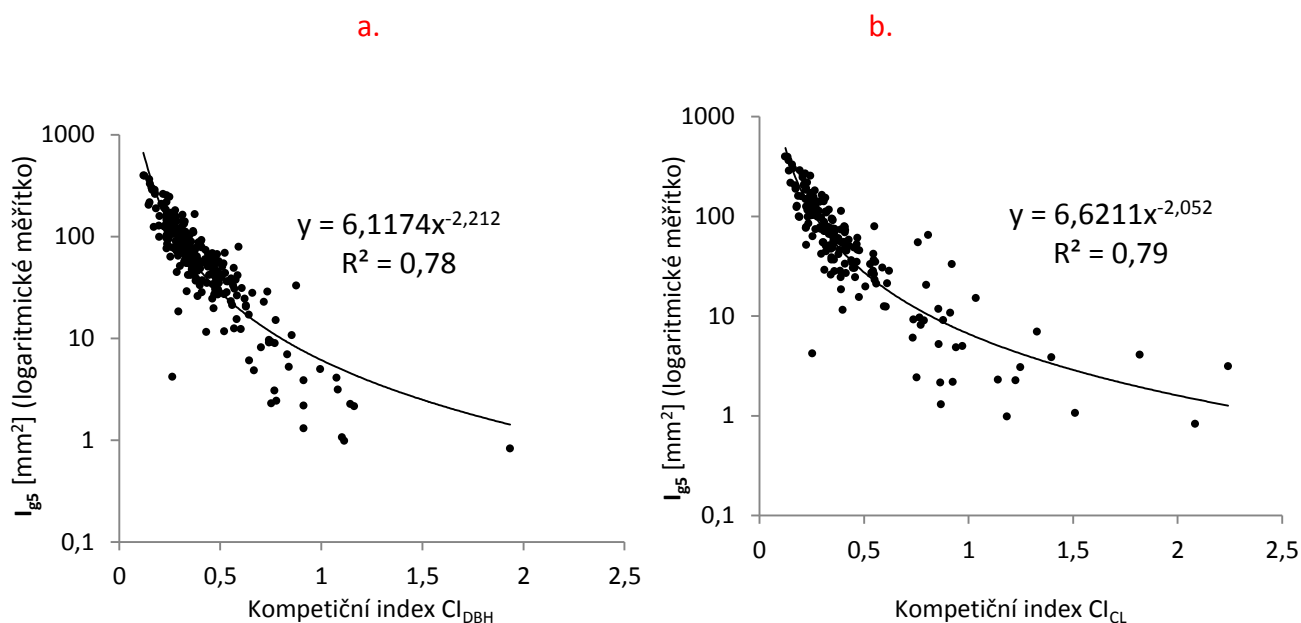
Obrázek 35: Vztah mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše individuálních jedinců ( $I_{g5}$ ) a parametry minimální ( $D_{i \min.}$ ), průměrná (MWD) a maximální ( $D_{i \max.}$ ) vážená vzdálenost k okolním jedincům.  $D_{i \min.}$  reprezentují prázdné kroužky, MWD plné kroužky a parametr  $D_{i \max.}$  reprezentují prázdné trojúhelníky.

Z výsledků vyplývá, že pro alokování přírůstu na kruhové průřezové ploše u jednotlivých stromů je důležitější otevřenost okolního prostoru okolo šetřeného jedince, což je reprezentováno parametrem  $D_{i \max.}$ , než jeho utlačení, které v tomto případě reprezentuje parametr  $D_{i \min.}$ . Jinými slovy jedinci v porostním zápoji využívají k alokaci přírůstu sebemenší uvolnění z jakékoli strany a již méně jsou ovlivněni utlačením ze strany druhé.

### 3.4.3.2 Kompetiční indexy

Kompetiční indexy, a to konkrétně vzdálenostně závislé a kompetiční indexy šesti nejbližších stromů ( $NTD_6$ ), byly vypočteny v různých variantách s odlišnými vstupními parametry. Mezi vstupní parametry do výpočtu kompetičních indexů byly zařazeny charakteristiky stromu jako výčetní tloušťka kmene (DBH), výška stromu (H), korunová projekce (CP), výčetní kruhová plocha jedince (BA) a délka koruny (CL). Indexy s jednotlivými parametry byly testovány z pohledu největší vypovídací schopnosti pro parametr  $I_{g5}$ .

Nejlepších výsledků bylo dosaženo ve skupině vzdálenostně závislých indexů a to v případě competičního indexu s parametrem délka koruny ( $CI_{CL}$ ). Regresní křivka pro tento index a parametr  $I_{g5}$  dosahovala hodnot koeficientu determinace  $R^2=0,79$ . Druhým nejlepším indexem v případě vzdálenostně závislých indexů, který nejlépe koreloval s parametrem  $I_{g5}$ , byl competiční index ( $CI_{DBH}$ ) s parametrem DBH, vzdálenostně závislý index s tímto parametrem dosahoval koeficientu determinace  $R^2=0,78$ . Závislosti mezi těmito indexy a parametrem  $I_{g5}$  jsou znázorněny na [obrázku 36](#). Vzdálenostně závislé indexy s ostatními parametry dosahovaly o něco nižších hodnot koeficientu determinace, ale jejich korelace s parametrem  $I_{g5}$  byla stále velice silná.



Obrázek 36: Vztah mezi 5letým přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) a vzdálenostně závislým competičním indexem s parametrem výčetní tloušťka kmene (DBH) -  $CI_{DBH}$  (obrázek a.). Vztah mezi  $I_{g5}$  a vzdálenostně závislým competičním indexem s parametrem délka koruny (CL) –  $CI_{CL}$  (obrázek b.).

Pro vzdálenostně závislé a competiční indexy šesti nejbližších stromů byl použit dvojitý způsob výpočtu. Obě skupiny indexů byly vypočteny podle příslušných rovnic popsanych v metodice této kapitoly, ale v prvním způsobu výpočtu byly do výpočtu zahrnuty všechny okolní sousední stromy a v případě druhého výpočtu pouze stromy, které jsou větší než zájmový strom (tj. dominantní konkurenti). Pro odvození dominantních konkurentů byl zvolen parametr DBH. Výsledky pro obě skupiny competičních indexů s těmito variantami výpočtu uvádí [tabulka 27](#).

Tabulka 27: Korelace mezi 5letým přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) s jednotlivými kompetičními indexy s odlišnými proměnnými. Kompetiční index  $NTD_6$  je index, do kterého nevstupuje vzdálenost, ale pouze parametry šesti nejbližších stromů. Další použité zkratky jsou: DBH - výčetní tloušťka kmene, CP – korunová projekce, H – výška stromu, BA – výčetní kruhová jedince, CL – délka živé koruny,  $R^2$  – koeficient determinace, All – způsob výpočtu s použitím všech šesti stromů, >Ai způsob výpočtu s použitím pouze větších sousedních stromů než je šetřený strom.

Proměnné	$R^2$	
	All	>Ai
<b><math>NTD_6</math> kompetiční index</b>		
DBH	0,607	0,650
CP	0,426	0,414
H	0,539	0,619
BA	0,567	0,660
CL	0,506	0,619
<b>Vzdálenostně závislé indexy</b>		
Vzdálenost, DBH	0,780	0,736
Vzdálenost, CP	0,587	0,596
Vzdálenost, H	0,699	0,649
Vzdálenost, BA	0,774	0,772
Vzdálenost, CL	0,785	0,718

Skupina kompetičních indexů, do kterých nevstupuje parametr vzdálenost, ale pouze parametry šesti nejbližších stromů ( $NTD_6$ ), dosahovala koeficientu determinace od 0,41 do 0,66 s přírůstem  $I_{g5}$ . Téměř ve všech případech bylo dosaženo vyššího korelačního koeficientu při způsobu výpočtu, který zahrnoval pouze stromy větších dimenzí, než má samotný šetřený strom. Pouze v případě výpočtu kompetičního indexu s parametrem korunová projekce (CP) to bylo přesně opačně a vyššího korelačního koeficientu bylo dosaženo v případě zahrnutí všech šesti sousedních stromů do výpočtu.

Vzdálenostně závislé kompetiční indexy korelovaly s parametrem  $I_{g5}$  lépe než předchozí skupina indexů a koeficient determinace se pohyboval v rozmezí od 0,59 do 0,79. Vyšších korelací bylo dosaženo v případě výpočtu, do něhož byly zahrnuty všechny okolní stromy, to znamená, že v této skupině byla situace přesně opačná, než v předchozím případě.

Pro predikci přírůstu na výčetní kruhové ploše stromu ( $I_{g5}$ ) byly sestaveny lineární modely (Tabulka 28). Tyto lineární modely kombinují výše popsané parametry (AS - sociální plochu, MWD – průměrnou váženou vzdálenost k šesti sousedním stromům a kompetiční indexy  $CI_{DBH}$  a  $CI_{CL}$ ) s jednoduše měřitelnými parametry stromu jako jsou DBH, H, CP, BA a CL. Aplikací těchto modelů je možné predikovat přírůst na výčetní kruhové ploše jedince v milimetrech za pětileté období. Modely byly sestaveny od nejjednodušších, které obsahují pouze dvě proměnné, až po složitější se čtyřmi proměnnými. Pro posouzení vypovídací

schopnosti modelu a vyhodnocení nejlepších modelů bylo použito Akaikovo informační kritérium (AIC). AIC bylo vypočítáno pro každý model dle následujícího vzorce:

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{RSC}{n}\right) + 2m \quad (16)$$

Kde: AIC je Akaikovo informační kritérium, n je počet všech pozorování, RSC je reziduální součet čtverců a m je počet parametrů

AIC nemá vypovídající schopnost pro jednotlivé modely (rovnice č. 16), ale používá se v případě porovnávání více modelů, přičemž modely s nižší hodnotou AIC jsou lepší. Všechny sestavené modely vykazovaly vysokou míru korelace s parametrem  $I_{g5}$  a jejich koeficient determinace se pohyboval v intervalu 0,61–0,90. Skupina modelů se základním parametrem AS dosahovala vysokou míru korelace s koeficientem determinace v intervalu 0,84–0,90. Jako vůbec nejlepší model z této skupiny byl vyhodnocen model č. 13 s koeficientem determinace 0,90. Tento model obsahoval parametry AS, DBH, H a CL.

Skupina modelů se základním parametrem průměrná vážená vzdálenost (MWD) vykazovala koeficient determinace v intervalu 0,82–0,88. U dalších dvou skupin modelů se základními parametry v podobě kompetičních indexů ( $CI_{DBH}$  a  $CI_{CL}$ ) se koeficient determinace pohyboval v intervalu 0,61–0,89, respektive 0,64–0,86.

Tabulka 28: Modely pro predikci přírůstu na výčetní kruhové ploše za pětileté období ( $I_{g5}$ ).

č.	Skupina modelů	n*	AIC <sup>1</sup>	MEP <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sup>3</sup>	Tvar modelu <sup>4</sup>
1	Sociální plocha (AS)	269	1711,8	585,8	0,877	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)$
2		269	1779,8	766,3	0,841	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(CP)$
3		269	1758,0	694,7	0,853	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(H)$
4		234	1259,0	816,4	0,873	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(CL)$
5		269	1713,4	594,2	0,877	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)+b3(CP)$
6		269	1711,3	583,6	0,878	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)+b3(H)$
7		234	1221,3	667,1	0,897	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)+b3(CL)$
8		269	1750,2	682,1	0,859	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(CP)+b3(H)$
9		234	1254,6	814,2	0,877	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(CP)+b3(CL)$
10		234	1253,7	791,5	0,878	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(H)+b3(CL)$
11		269	1713,2	592,8	0,878	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)+b3(CP)+b4(H)$
12		234	1222,5	682,9	0,897	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)+b3(CP)+b4(CL)$
13		234	1217,5	651,7	0,900	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(DBH)+b3(H)+b4(CL)$
14		234	1249,1	787,8	0,882	$I_{g5}=b0+b1(AS)+b2(CP)+b3(H)+b4(CL)$

15	Průměrná vážená vzdálenost (MWD)	269	1760,6	705,9	0,852	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH)$	
16		269	1767,4	721,2	0,848	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(CP)$	
17		269	1812,7	856,5	0,820	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(H)$	
18		234	1301,6	1026,2	0,840	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(CL)$	
19		269	1743,2	662,6	0,862	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH) + b_3(CP)$	
20		269	1744,6	664,3	0,862	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH) + b_3(H)$	
21		234	1274,3	895,0	0,863	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH) + b_3(CL)$	
22		269	1766,9	721,7	0,850	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(CP) + b_3(H)$	
23		234	1272,6	886,8	0,865	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(CP) + b_3(CL)$	
24		234	1303,4	1038,6	0,841	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(H) + b_3(CL)$	
25		269	1736,4	645,7	0,867	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH) + b_3(CP) + b_4(H)$	
26		234	1257,2	821,0	0,877	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH) + b_3(CP) + b_4(CL)$	
27		234	1254,4	801,9	0,879	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(DBH) + b_3(H) + b_4(CL)$	
28		234	1274,4	896,0	0,865	$I_{g5} = b_0 + b_1(MWD) + b_2(CP) + b_3(H) + b_4(CL)$	
29		Kompetiční index ( $CI_{DBH}$ )	269	1770,7	734,8	0,846	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA)$
30			269	1896,0	1174,9	0,755	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(CP)$
31			269	2021,0	1902,7	0,610	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(H)$
32	234		1442,1	2189,7	0,663	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(CL)$	
33	269		1770,8	738,1	0,847	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA) + b_3(CP)$	
34	269		1770,5	748,3	0,848	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA) + b_3(H)$	
35	234		1238,6	733,8	0,887	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA) + b_3(CL)$	
36	269		1864,1	1042,9	0,784	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(CP) + b_3(H)$	
37	234		1329,8	1201,5	0,817	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(CP) + b_3(CL)$	
38	234		1431,1	2185,1	0,686	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(H) + b_3(CL)$	
39	269		1771,6	755,2	0,848	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA) + b_3(CP) + b_4(H)$	
40	234		1240,3	746,5	0,887	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA) + b_3(CP) + b_4(CL)$	
41	234		1236,7	722,4	0,889	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(BA) + b_3(H) + b_4(CL)$	
42	234		1323,1	1195,1	0,825	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{DBH}) + b_2(CP) + b_3(H) + b_4(CL)$	
43	Kompetiční index ( $CI_{CL}$ )	234	1308,5	1067,4	0,834	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(DBH)$	
44		234	1357,9	1383,9	0,785	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(CP)$	
45		234	1455,8	2501,0	0,637	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(H)$	
46		234	1278,1	909,4	0,861	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(DBH) + b_3(CP)$	
47		234	1304,3	1044,6	0,840	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(DBH) + b_3(H)$	
48		234	1325,5	1209,1	0,821	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(CP) + b_3(H)$	
49		234	1278,8	919,1	0,862	$I_{g5} = b_0 + b_1(CI_{CL}) + b_2(DBH) + b_3(CP) + b_4(H)$	

<sup>1</sup>AIC = Akaikovo informační kritérium, <sup>2</sup>MEP= střední kvadratická chyba predikce, <sup>3</sup> R<sup>2</sup> Koeficient determinace, <sup>4</sup> Tvar modelu: Sociální plocha (AS), průměrná vážená vzdálenost (MWD), Kompetiční index s proměnnými DBH a vzdálenost ( $CI_{DBH}$ ), kompetiční index s proměnnými vzdálenost a délka koruny ( $CI_{CL}$ ), DBH = výčetní tloušťka kmene, H = výška stromu, BA = výčetní kruhová plocha jedince, CP = korunová projekce, CL = délka koruny, n – počet jedinců (poznámka: délka koruny byla měřena pouze u 234 jedinců, proto v modelu, kam vstupuje tento parametr, je pouze 234 pozorování)

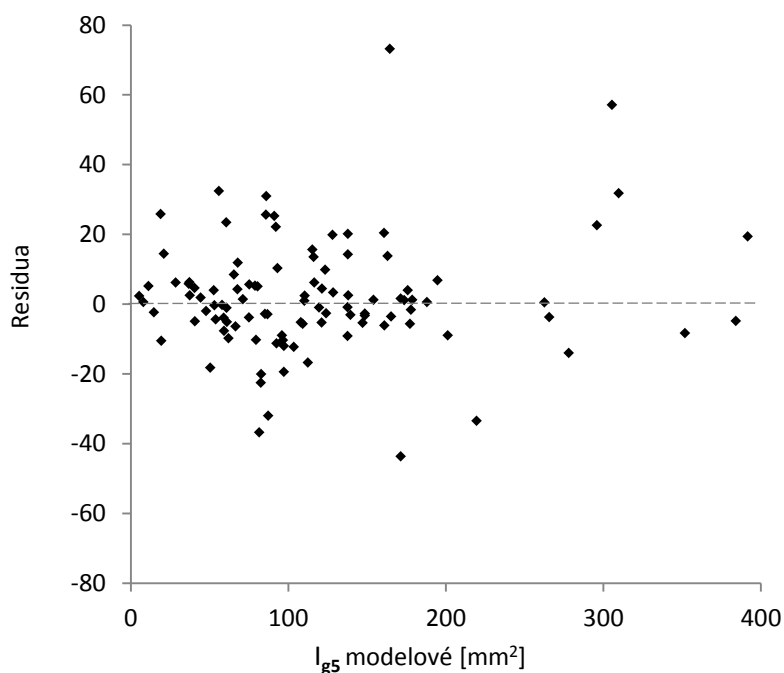
Z každé skupiny modelů byly vybrány modely od jednodušších, pouze se dvěma parametry, až po složitější se čtyřmi parametry. Výběr modelů byl založen na koeficientu determinace, Akaikově informačním kritériu a na střední kvadratické chybě predikce. Nebyly vybrány pouze nejlepší modely, které měly nejlepší charakteristiky, ale také modely které byly jednoduché a přitom měly dostatečnou vypovídací schopnost. Pro tučně vyznačené modely v [tabulce 28](#) jsou prezentovány jednotlivé koeficienty ([Tabulka 29](#)).

Tabulka 29: Hodnoty parametrů rovnic pro vybrané modely.

číslo modelu	Skupina modelů	Koeficienty modelu				
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
	sociální plocha (AS)					
1		<b>-25,728</b>	<b>6,025245</b>	<b>3,277727</b>		
6		-14,8933	<b>5,801706</b>	<b>3,970617</b>	-1,43561	
7		<b>-40,6448</b>	<b>5,886733</b>	<b>2,971507</b>	2,128241	
13		<b>-22,6121</b>	<b>5,25472</b>	<b>4,02755</b>	<b>-3,24142</b>	<b>4,39027</b>
	průměrná vážená vzdálenost (MWD)					
15		<b>-67,9287</b>	<b>50,88699</b>	<b>3,367304</b>		
19		<b>-56,8078</b>	<b>45,44864</b>	<b>2,425515</b>	<b>1,700296</b>	
25		<b>-35,2699</b>	<b>46,42308</b>	<b>3,80999</b>	<b>1,28574</b>	<b>-2,88001</b>
27		<b>-30,6841</b>	<b>43,50817</b>	<b>5,278749</b>	<b>-6,57628</b>	<b>5,04775</b>
	kompetiční index ( $Cl_{DBH}$ )					
29		<b>44,65038</b>	<b>-53,3675</b>	<b>0,145847</b>		
35		-15,3505	-9,95923	<b>0,140698</b>	<b>4,479952</b>	
41		9,40346	-17,9261	<b>0,14714</b>	<b>-2,2528</b>	<b>6,19632</b>
	kompetiční index ( $Cl_{CL}$ )					
43		<b>-78,1395</b>	10,48384	<b>7,136438</b>		
46		<b>-54,4017</b>	3,200601	<b>4,799037</b>	<b>2,834164</b>	
49		<b>-37,4913</b>	-1,65009	<b>5,41751</b>	<b>2,68293</b>	-1,54639

\* *tučně zvýrazněné koeficienty parametrů značí statisticky významný parametr*

Na základě vyhodnocení AIC a koeficientu determinace byl jako nejlepší vyhodnocen model číslo 13. Tento model je založen na parametrech sociální plocha (AS), výčetní tloušťka kmene (DBH), výška stromu (H) a délka živé koruny (CL). U tohoto modelu bylo dosaženo koeficientu determinace 0,90 a nejnižšího AIC ze všech skupin modelů. Rezidua pro tento model zobrazuje [obrázek 37](#).



Obrázek 37: Rezidua pro model číslo 13.  $I_{g5}$  je přírůst na výčetní kruhové ploše stromu, který byl odhadnut pomocí modelu číslo 13.

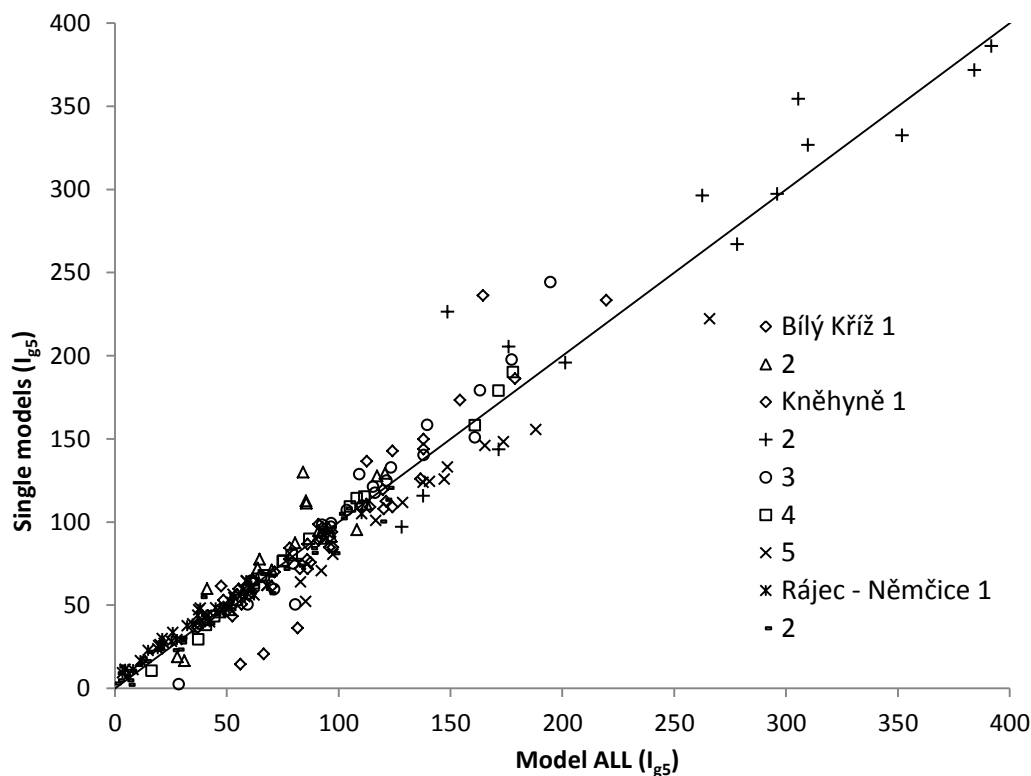
Pro otestování použitelnosti lineárního modelu číslo 13 byla použita analýza kovariance. Byly vypočteny parametry modelu pro každou výzkumnou plochu zvlášť, přičemž byl zachován tvar modelu, jako v případě modelu 13. Koeficienty determinace se u takto sestavených individuálních modelů pro každou výzkumnou plochu pohybovaly v intervalu 0,53–0,94 (Tabulka 30). Analýza kovariance neprokázala žádný signifikantní rozdíl mezi jakýmkoli specifickým modelem pro jednotlivou výzkumnou plochu a celkovým modelem číslo 13 (p-hodnota se pohybovala v intervalu 0,17–0,99), to znamená, že model vztahu přírůstu na výčetní kruhové ploše stromu ( $I_{g5}$ ) se čtyřmi parametry (AS, DBH, H a CL) je pro všechny lokality shodný s celkovým modelem č. 13, jinak řečeno, přímky lze v základním souboru považovat za paralelní (Obrázek 38).

Tabulka 30: Analýza kovariance mezi specifickými modely pro jednotlivé výzkumné plochy a celkový model č. 13 se shodným tvarem rovnice modelu, ale se specifickými parametry pro jednotlivé plochy.  $R^2$  – koeficient determinace, F a p jsou výsledky testu analýzy kovariance pro porovnání shodnosti jednotlivých modelů s modelem č. 13.

Lokalita	Bílý Kříž		Kněhyně					Rájec-Němčice	
	1	2	1	2	3	4	5	1	2
$R^2$	0,90	0,88	0,90	0,90	0,87	0,86	0,53	0,90	0,94
F	0,8375	1,5974	1,6497	1,0039	0,6465	0,0587	0,3083	0,5312	0,4805
p	0,6522	0,1717	0,1714	0,4977	0,8250	0,9953	0,9614	0,9692	0,9946
Výsledek*	x	x	x	x	x	x	x	x	x

\*x – značí, že nebyl prokázán signifikantní rozdíl při hladině významnosti  $\alpha=0,05$

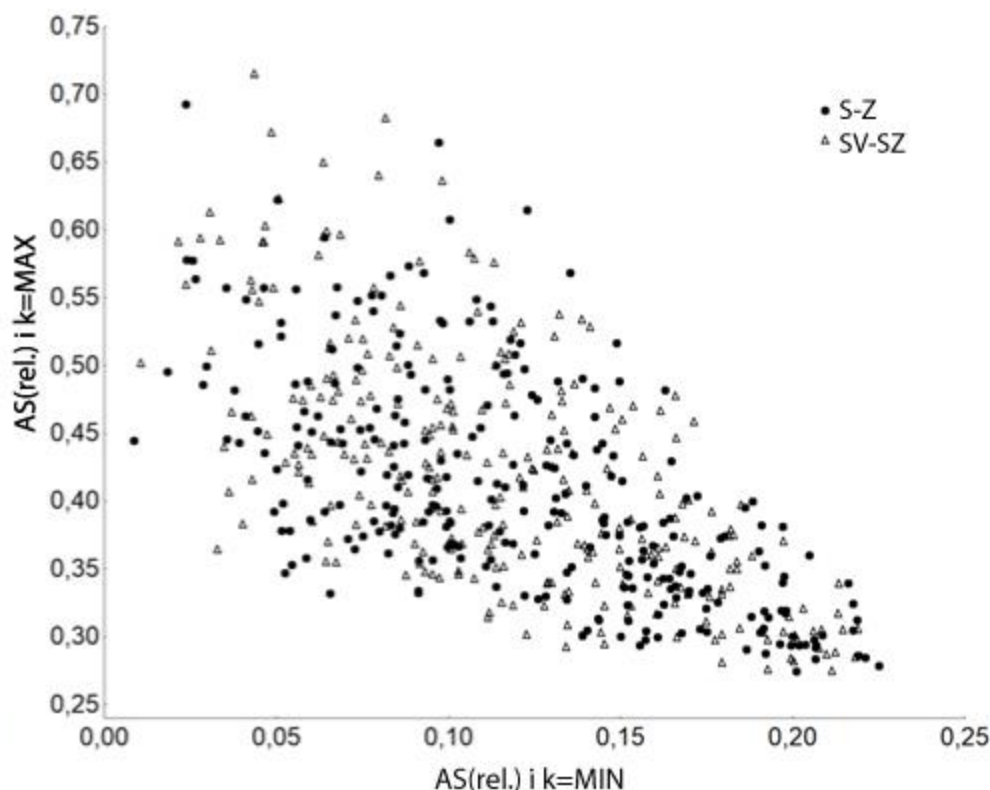




Obrázek 38: Přírůst na výčetní kruhové ploše za 5let dovozený pomocí modelu ALL a SINGLE. Pro model ALL byl použit model č. 13, pro SINGLE model byl použit stejný tvar modelu, ale s individuálními, stanovištně specifickými koeficienty ( $b_0 - b_4$ ) pro jednotlivé výzkumné plochy.

### 3.4.3.3 Tvar sociální plochy ve vztahu k růstu

Pro vyhodnocení vlivu tvaru sociální plochy na přírůst DBH za 5leté sledované období byl sestaven graf (Obrázek 39), u kterého je na ose x minimální relativní velikost segmentu AS ( $AS_{(rel.)i k=MIN}$ ) a maximální relativní velikost segmentu AS ( $AS_{(rel.)i k=MAX}$ ) na ose y. Tento graf byl využit pro filtrování dat o tvaru sociální plochy a byla vybrána pravidla 1-4, která jsou popsána v metodice této kapitoly. Bod se souřadnicemi např. 0,1; 0,55 (X, Y) na obrázku 39 znamená, že daný jedinec měl v segmentaci sever-západ největší část sociální plochy (55 % z celkové své sociální plochy) orientovanou na jednu světovou stranu a naopak nejmenší část na stranu jinou (10 %). V případě, že by se v grafu vyskytoval strom se souřadnicemi 0,25;0,25, znamenalo by to, že tento jedinec má pravidelnou sociální plochu na všechny světové strany, ale strom s takto pravidelnou sociální plochou se v dané studii vůbec nenacházel.

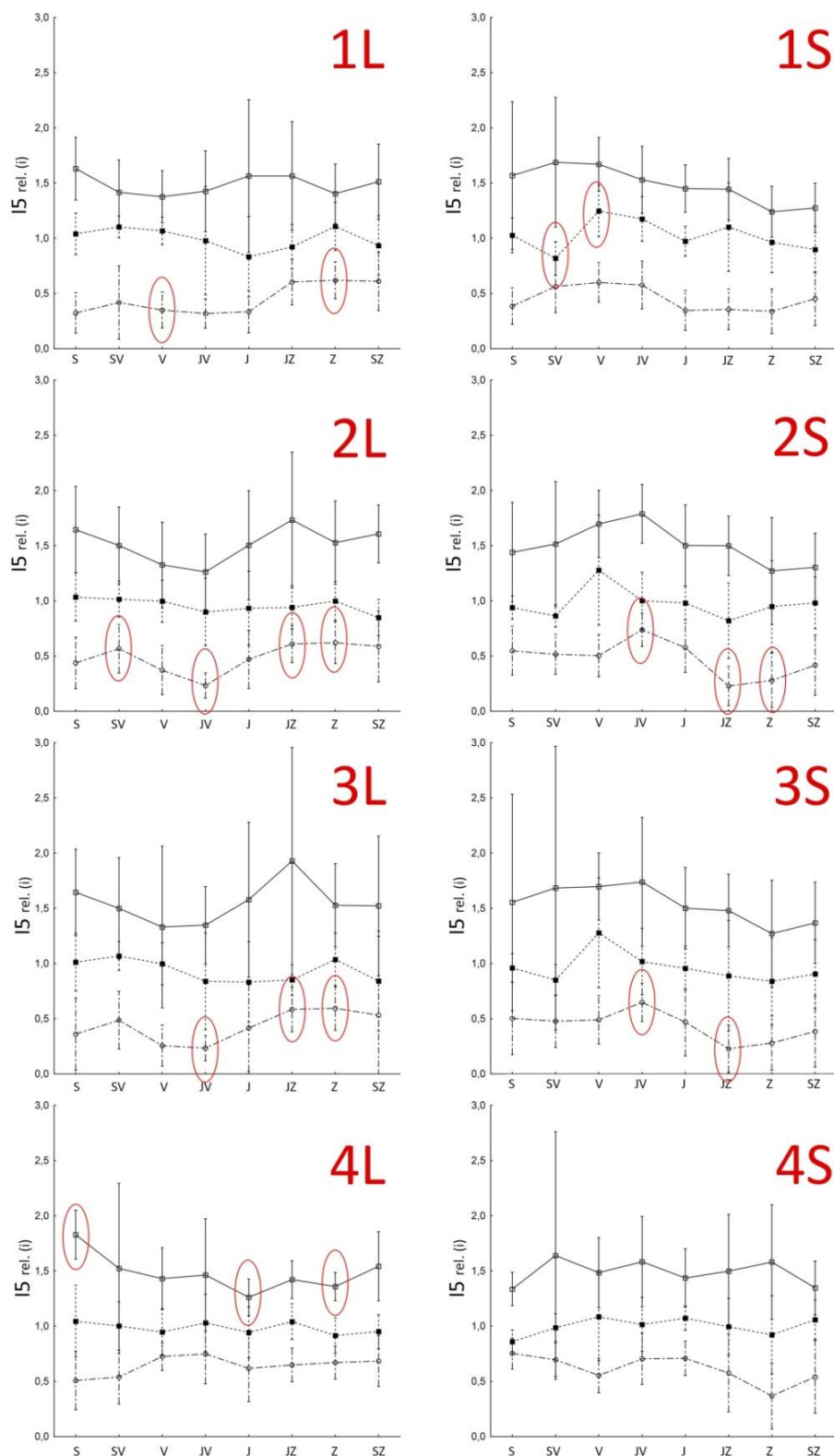


Obrázek 39: Největší relativní velikost sektoru sociální plochy individuálního jedince ( $AS_{(rel.)i k=MAX}$ ) k nejmenšímu relativnímu sektoru sociální plochy individuálního jedince ( $AS_{(rel.)i k=MIN}$ ). Plná kolečka značí velikosti sektorů ze segmentace sever–západ (S-Z) a prázdné trojúhelníky jsou ze segmentace severovýchod–severozápad (SV-SZ).

Tabulka 31 uvádí medián a extrémní hodnoty pro relativní velikosti segmentu sociální plochy ( $AS_{(rel.)i k soc.}$ ) z daného typu segmentace.

Tabulka 31: Medián a extrémní hodnoty relativní velikosti segmentů sociální plochy ( $AS_{(rel.)i k soc.}$ ) v segmentaci sever–západ (S-Z) a v segmentaci severovýchod–severozápad (SV-SZ).

	$AS_{(rel.)i k soc.}$		
	Medián	Min	Max
MIN S-Z	0,11	0,01	0,22
MIN SV-SZ	0,12	0,01	0,22
MAX SZ	0,41	0,28	0,69
MAX SV-SZ	0,39	0,27	0,72



**Obrázek 40:** Průměrné hodnoty relativního přírůstu DBH za sledované pětileté období ( $I5_{rel.(t)}$ ) s vyznačenými intervaly spolehlivosti ( $\alpha=0,05$ ) v závislosti na otevřenosti nebo naopak utlačení ze světových stran. Data byla filtrována dle pravidla 1-4. L značí směrovou orientaci největšího a S nejmenšího segmentu sociální plochy v rámci segmentace ke světovým stranám. Plná čára a prázdné čtverce značí trend u nadúrovňových stromů, přerušovaná čára a plné čtverce značí stromy úrovněové a čerchovaná čára a prázdné kroužky značí stromy podúrovňové. Mezi červeně zakroužkovanými hodnotami je statisticky významný rozdíl v rámci sociálního postavení jedinců v porostu při hladině významnosti  $\alpha=0,05$ .

### Výsledky filtrace stromů dle pravidla 1

Do této skupiny byly zařazeny všechny stromy, které mají na jednu stranu hodně otevřenou sociální plochu, a již zde není žádné další omezení, zda jsou z jiné strany utlačeni, či ne. Výsledky takto vybraných jedinců uvádí [obrázek 40](#), a to konkrétně [1L](#) a [1S](#). [Obrázek 1L](#) uvádí velikost relativního přírůstu DBH za pětileté sledované období ( $I5_{rel.(ij)}$ ) v závislosti na otevřenosti sociální plochy ke světovým stranám. Z výsledků je patrné, že rozdíly mezi relativním přírůstem ( $I5_{rel.(ij)}$ ) jedinců odlišného sociálního postavení jsou statisticky významné. Největšího přírůstu dosahovali jedinci nadúrovňoví, a to konkrétně jedinci, kteří měli největší otevřenost sociální plochy směrem na sever, jih a jihozápad. V případě jedinců úrovnových bylo dosaženo vyššího relativního přírůstu v případě otevřenosti sociální plochy k severovýchodu a západu. V případě stromů podúrovňových byl zaznamenán statisticky významný největší přírůstu v případě uvolnění směrem k západu; nejnižší přírůst v případě uvolnění směrem k východu.

V případě utlačení u této skupiny jedinců byl zaznamenán téměř shodný trend u všech tříd sociálního postavení. Nejvyššího přírůstu bylo zaznamenáno u jedinců, kteří byli utlačeni ze severovýchodní, východní a jihovýchodní strany, dále relativní přírůst klesal ve směru otevřenosti na jižní, jihozápadní a západní světovou stranu a následně docházelo k vzestupu přírůstu v případě strany severozápadní a severní. Statisticky významného rozdílu bylo zaznamenáno pouze u jedinců úrovnových, a to v případě největšího zaznamenaného přírůstu v případě utlačení z východu a nejmenšího přírůstu v případě utlačení ze severovýchodu.

### Výsledky filtrace stromů dle pravidla 2

Do této skupiny byly zařazeny všechny stromy, které byly z jedné strany hodně utlačené, tj. měly k jedné světové straně hodně malou sociální plochu. Z pohledu vyhodnocení otevřenosti segmentu k určité světové straně bylo dosaženo srovnatelných výsledků jako při výběru stromů dle pravidla 1 u jedinců úrovnových a nadúrovňových. Odlišný trend byl zaznamenán u jedinců podúrovňových, kde bylo zaznamenáno nejnižšího relativního přírůstu ( $I5_{rel.(ij)}$ ) v případě otevřenosti sociální plochy jihovýchodním směrem, u ostatních světových stran byl zaznamenán vyšší relativní přírůst. Jako statisticky významné zde byly prokázány rozdíly pouze u jedinců podúrovňových, kde bylo dosaženo nejnižšího přírůstu v případě otevřenosti k jihovýchodu a statisticky vyššího přírůstu v případě otevřenosti sociální plochy směrem k severovýchodu, jihozápadu a západu ([Obrázek 40, 2L](#)).

V případě vyhodnocení utlačení z určité světové strany bylo zaznamenáno největšího relativního přírůstu, když měli jedinci nejmenší segment sociální plochy orientován východním až jihovýchodním směrem. Naopak nejnižší přírůst byl u jedinců, kteří měli nejmenší relativní segment sociální plochy orientovaný jihozápadním a západním směrem. U jedinců všech sociálních tříd byl zaznamenán takřka stejný trend. Statisticky významné

rozdíly byly prokázány pouze u jedinců podúrovňových, kde je statisticky významný rozdíl mezi největším relativním přírůstem v případě utlačení z jihovýchodu a naopak nejnižším přírůstem v případě utlačení z jihozápadu až západu (Obrázek 40, 2S).

#### *Výsledky filtrace stromů dle pravidla 3*

Tato skupina obsahuje jedince, kteří jsou z jedné strany hodně uvolnění a z druhé naopak hodně utlačení, tj. jedním směrem mají velký segment sociální plochy a jiným směrem malý segment sociální plochy. Z hlediska otevřenosti segmentu sociální plochy bylo dosaženo největšího relativního přírůstu u jedinců nadúrovňových v případě otevřenosti sociální plochy k jihozápadu, u jedinců úrovňových v případě otevřenosti sociální plochy k severovýchodu a západu a v případě jedinců podúrovňových k jihozápadu a západu. Naopak nejnižšího relativního přírůstu bylo dosaženo v případě otevřenosti k východu a jihovýchodu u jedinců nadúrovňových a podúrovňových. U jedinců úrovňových byl zaznamenán nejnižší přírůst v případě otevřenosti sociální plochy směrem jihovýchodním až jihozápadním. Statisticky významný rozdíl byl zaznamenán pouze u jedinců podúrovňových, kdy byl významný rozdíl mezi nejmenším relativním přírůstem v případě orientace největšího sektoru sociální plochy jihovýchodním směrem a největším relativním přírůstem v případě orientace největšího segmentu sociální plochy směrem jihozápadním až západním (Obrázek 40, 3L).

V případě vyhodnocení z pohledu utlačení byl zaznamenán téměř shodný trend jako u předchozích dvou pravidel. Jako statisticky významný se projevil rozdíl mezi největším relativním přírůstem v případě utlačení z jihovýchodu a nejnižším relativním přírůstem v případě utlačení z jihozápadu (Obrázek 40, 3S).

#### *Výsledky filtrace stromů dle pravidla 4*

Posledním pravidlem výběru jedinců bylo pravidlo, které zahrnovalo jedince, kteří mají z jedné strany velké utlačení a na žádnou stranu nemají velké uvolnění. Nadúrovňoví jedinci zaznamenali největšího relativního přírůstu ( $IS_{rel.(ij)}$ ) v případě otevřenosti sociální plochy severním směrem a naopak nejmenšího relativního přírůstu směrem jižním a západním, tento rozdíl se projevil jako statisticky významný. U jedinců úrovňových nebyl zaznamenán signifikantní rozdíl v závislosti orientace největšího relativního segmentu sociální plochy ke světové straně. V případě stromů podúrovňových bylo zaznamenáno největšího relativního přírůstu ( $IS_{rel.(ij)}$ ) v případě otevřenosti k východu a jihovýchodu, celkově lze pozorovat zvyšující se trend od otevřenosti k severu až po otevřenost k severozápadu (Obrázek 40, 4L). Efekt utlačení u této skupiny jedinců nebyl zaznamenán u jedinců nadúrovňových a úrovňových. U jedinců podúrovňových bylo dosaženo největšího relativního přírůstu ( $IS_{rel.(ij)}$ ) v případě utlačení ze severní strany a naopak nejmenšího přírůstu v případě utlačení ze západu. Z pohledu utlačení nebyl prokázán žádný statisticky významný rozdíl ani v jedné skupině sociálního postavení stromů (Obrázek 40, 4L).

### *Celkové zhodnocení tvaru sociální plochy ve vztahu k růstu*

Vyhodnocení z pohledu otevřenosti sociální plochy k určité světové straně ukazuje trend ve všech třídách sociálního postavení. Jako nejlepší světová strana z pohledu otevřenosti sociální plochy ve vztahu k relativnímu přírůstu DBH ( $I5_{rel.(ij)}$ ) se jeví jihozápad až západ, naopak jako nejhorší se jeví orientace největšího segmentu sociální plochy směrem na východ až jihovýchod. Jako statisticky průkazné se v tomto případě ukázaly pouze stromy podúrovňové, a to v případě filtrace pole pravidla 1L, 2L a 3L. U ostatních tříd sociálního postavení tento efekt není statisticky průkazný, ale je zde stejný trend. Statistická průkaznost u ostatních tříd sociálního postavení není průkazná z důvodu širokého intervalu spolehlivosti, který je způsoben nízkým počtem jedinců s danou orientací sociální plochy k určité světové straně. Tento trend není průkazný pouze u pravidla 4L, ale v této kategorii jsou pouze stromy, které jsou z jedné strany hodně utlačené a na žádnou další nemají velké uvolnění, a proto je zde i odlišný trend než u předchozích tříd.

Vyhodnocení z pohledu utlačení, tj. z orientace nejmenšího segmentu sociální plochy vůči světovým stranám. Největší relativní přírůst ( $I5_{rel.(ij)}$ ) byl prokázán v případě utlačení (tj. nejmenšího segmentu sociální plochy) ze severní až jihovýchodní strany, naopak nejmenší přírůst byl zaznamenán v případě orientace nejmenšího segmentu jihozápadním až západním směrem. Tento efekt byl prokázán jako statisticky významný pouze v případě jedinců filtrovaných dle pravidla 2S a 3S a to u jedinců podúrovňových. U ostatních tříd sociálního postavení tento trend není statisticky průkazný, ale je shodný s trendem u podúrovňových stromů, u kterých tento trend statisticky průkazný je. Stejně jako u vyhodnocení z pohledu uvolnění i zde je statistické zamítnutí způsobeno širokým intervalem spolehlivosti z důvodu nízkého počtu jedinců v dané třídě orientace nejmenšího segmentu sociální plochy. Na základě tohoto vyhodnocení byla vykreslena „ideální“ sociální plocha a „ideální“ potenciálně prostorově dostupná plocha. Tato plocha je zobrazena na obrázku 54 v kapitole 4.3.

### 3.4.4 Diskuze

Postupné změny v čase u lesních porostů jsou spojeny se změnou ve struktuře a hustotě porostu, nejvíce je tato změna patrná v případě porostů, u kterých byla aplikována porostní výchova (KÖSTNER et al., 2002). Pro prostorové informace uvnitř lesního porostu je často nutná fragmentace porostu a vymezení růstového prostoru každého individuálního jedince. V současné době se pro řešení tohoto problému a odvození prostorové analýzy používají vážené Voroného polygony (MU, 2004; PRETZSCH, 2009; GSPALTL et al., 2012; AAKELA et al., 2013). Porovnány byly parametry prostorové analýzy jako potencionálně prostorově dostupná plocha jedince (AA), sociální plocha (AS) a vážené Voroného polygony (WVP). Tyto parametry byly použity pro vysvětlení přírůstu individuálních jedinců smrku ztepilého na výčetní kruhové ploše. Potencionálně prostorově dostupná plocha jedince vykazovala nízkou korelaci s přírůstem na výčetní kruhové ploše za sledované pětileté období ( $I_{g5}$ ), důvodem této nízké korelace je fakt, že do výpočtu AA nevstupují parametry setřehného stromu a jeho bezprostředního okolí. Na druhou stranu se jako dobrý parametr pro predikci  $I_{g5}$  ukázal parametr AS. Tento parametr v sobě agreguje parametr AA a dimenze zájmového stromu a jeho bezprostředních sousedních stromů. Další výhodou metody AS je její jednoduchost a její proveditelnost s přístroji, pomocí nichž se dá mapovat pozice stromů v prostoru (dálkoměr, kompas). Jako parametr pro predikci konkurence v kořenové vrstvě použili Sociální plochu s dobrými výsledky i jiní autoři (ČERMÁK et al., 2006; BUTLER et al., 2010). Součet všech sociálních ploch u všech jedinců v porostu je menší plocha než plocha celého porostu, jinak je tomu v případě použití vážených Voroného polygonů, kde suma těchto polygonů pro všechny jedince v porostu je rovna ploše porostu. Výsledky této studie ukazují, že stromy nemusí efektivně využívat celou plochu porostu pro vytváření přírůstu na výčetní kruhové ploše jedince, a proto se v tomto případě parametr AS ukázal jako lepší prediktor růstu než WVP.

Parametry pro vážení AS byly testovány pro výpočet sociální plochy s cílem nalezení nejlepší korelace s  $I_{g5}$  a výsledně vypočtenou sociální plochou. Jako vstupní parametry do tohoto testu vstupovaly jednoduše měřitelné parametry, a to DBH, H, BA a CP. Všechny tyto parametry při výpočtu AS zlepšily korelaci s parametrem  $I_{g5}$  oproti AA, a to v následujícím pořadí: výška stromu < korunová projekce < DBH < výčetní kruhová základna jedince. V případě vážení potenciálně dostupné plochy parametrem BA vzrostl koeficient determinace z 0,54 na 0,84 ( $R^2$ ). Srovnatelných výsledků, jako bylo dosaženo v této studii, dosáhl i PELZ (1978), který také testoval parametry pro vážení prostorově dostupné plochy jednotlivých stromů.

V případě vážených vzdáleností byla dosažena vysoká korelace s přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců. Pořadí, které bylo sestaveno na základě korelace s tímto přírůstem je následující: minimální vážená vzdálenost < maximální vážená vzdálenost < průměrná vážená vzdálenost. Dle těchto výsledků je patrné, že přírůst  $I_{g5}$  je pozitivně

ovlivněn otevřeností porostního prostoru kolem šetřeného jedince a negativně ovlivněn těsnou blízkostí sousedních stromů.

Konkurence mezi jednotlivými stromy v porostu jasně ovlivňuje dynamiku růstu jednotlivých stromů, důkazem je tato studie a mnoho dalších, které se zabývají vztahem mezi kompeticí a růstem (BELLA, 1971, ALEMDAG, 1978, DE LUIS et al., 1998, CONTRETAS et al., 2011, BURKHART a TOMÉ, 2012). V této studii se projevily délka koruny ve spojení se vzdáleností mezi sousedními jedinci a šetřeným stromem jako parametry, které nejlépe popisují konkurenční prostředí. Na druhou stranu kompetiční indexy s dalším parametrem koruny, kterým byl parametr korunová projekce, nedosahovaly vysokých korelací ve spojení s přírůstem na výčetní kruhové ploše jednotlivých stromů za sledované období. Výsledky ukázaly, že použití kompetičních indexů může pomoci při vysvětlení variability růstu u nadzemní biomasy. Toto tvrzení podporují i mnohé zahraniční studie, jako příklad jsou uvedeny studie ZUBIZARRETA et al. (2008) a KILPELÄINENA et al. (2010). Několik studií, které použily parametr popisující korunovou vrstvu jedince, použilo parametr objem koruny pro hodnocení kompetičních vztahů (BACHMANN, 1998; PRETZSCH, 2009; FREVER et al., 2014) a hodnotí tento parametr jako jeden z parametrů, který nejvíce ovlivňuje konkurenční prostředí uvnitř porostu. CASTAGNERI et al. (2008) publikovali studii, ve které byly zahrnuty parametry korunové projekce a výšky stromu jako parametry pro výpočet kompetičních indexů a tyto výsledky jsou shodné se závěry této studie. Několik autorů testovalo kompetiční indexy a jejich použitelnost v případě predikce růstu stromů (DANIELSE et al., 1986; TOME a BURKHART, 1989; BIGING a DOBBERTIN, 1995) a podle jejich zjištění kompetiční indexy vysvětlují pouze malou část ve variabilitě růstu jednotlivých stromů. Naopak VETTENRANTA (1999) a MAILLY et al. (2003) uvádějí, že i jednoduše měřitelné charakteristiky stromu ve spojení s kompetičními indexy mohou poskytovat dostatečně přesné výsledky pro predikci růstu stromů stejně jako sofistikovanější indexy, které berou v úvahu jak jednotlivé vzdálenosti mezi konkurenty, tak i tvar koruny a její rozměry.

V této studii bylo dosaženo lepších výsledků při použití vzdálenostně závislých kompetičních indexů oproti skupině indexů označených NTD<sub>6</sub>; toto tvrzení se opírá o korelaci indexů s přírůstem na výčetní kruhové ploše jednotlivých stromů za pětileté sledované období. Důležitou otázkou z pohledu kompetice je, zda daný strom je ještě kompetitor, či nikoli. Několik studií pro vymezení kompetitorů používá poloměr koruny a její násobky (např. 3,5násobek průměrného poloměru koruny (LORIMER, 1983; Mailly, 2003)). Do této studie byly zahrnuty pouze jedinci, kteří byli plně obklopeni okolními jedinci s přesnou znalostí jejich pozice. Pro výpočet sociální plochy a kompetičních indexů měl tedy každý šetřený strom (*i*) započítán pevný počet nejbližších sousedních stromů (*j*). Pro lepší srovnání kompetičních indexů byly tyto indexy vypočítány jako průměr (viz. rovnice v tabulce 22). Jiné studie používají součet ve vzorci pro výpočet kompetičních indexů, což má značný vliv na výslednou hodnotu indexu v případě různého počtu kompetitorů a v případě rozhodování, zda daný



strom je ještě považovat za kompetitora či nikoli (HEGYI, 1974; STADT et al., 2007; WEBER et al., 2008).

Růstové modely predikující přírůst na výčetní kruhové ploše individuálních stromů byly publikovány pro porosty různého stáří a struktury (WYKOFF, 1990; TRASOBARES et al., 2004; ZHAO et al., 2013). V této studii je sestaveno několik modelů pro predikci přírůstu na kruhové průřezové ploše. Tyto modely jsou založené na jednoduše měřitelných parametrech stromů. Modely jsou sestaveny od nejjednodušších, které obsahují pouze jeden parametr, až po modely se čtyřmi různými proměnnými (tj. kompetiční index, vzdálenost, sociální plocha, DBH, výška stromu, korunová projekce a délka živé koruny). Růstové modely jsou založené na originálních růstových funkcích (Tabulka 28). Výsledkem použití modelů je predikce přírůstu na výčetní kruhové ploše individuálních stromů v mm<sup>2</sup> za pětileté období. Základem těchto modelů je vždy parametr charakterizující míru kompetice, která, jak potvrzuje i řada dalších autorů, hraje důležitou roli v případě predikce růstu jedinců v porostním zápoji (MONSERUD a STERBA, 1996; HANN a HANUS, 2002; HARTMANN et al., 2009). Pro predikci růstu a produkci biomasy je nezbytné pochopení kompetičních vztahů mezi jedinci v prostorovém a časovém měřítku (COOMES a ALLEN, 2007).

Tato studie potvrzuje, že sociální postavení (nadúroveň, úroveň, podúroveň) a velikost stromu jsou důležitými indikátory pro přírůst DBH (BOIVIN et al., 2010). Je nutné podotknout, že současné parametry stromu jsou platným parametrem budoucího růstu pouze v případě absence pěstebních zásahů nebo jiného ovlivnění vedoucího ke změně porostní struktury (LORIMER, 1983). BOIVIN et al. (2010) dále upozorňují na chybu z důvodu přílišné extrapolace do nesledovaných dimenzí stromů. Toto jsou důvody, které limitují použití parametru DBH při konstrukci dlouhodobých predikčních modelů a v tomto případě je nutné použití dalšího parametru. Tímto parametrem může být například parametr kompetice.

Dostupná literatura nenabízí žádnou studii, která by hodnotila směrově orientované utlačení či uvolnění pro smrk, jako v případě této studie. Někteří autoři se zabývají aspektem svahu při hodnocení přírůstu na úrovni porostu (např. GREEN a HAWKINS, 2005; KIRCHHEFER, 2000), ale nikdo zatím nehodnotil efekt na úrovni stromu a směrové orientace jeho růstového prostoru. V této studii je prezentován trend účinku orientace největšího a nejmenšího relativního sektoru sociální plochy na relativní tloušťkový přírůst stromu. Jedinci s orientací největšího segmentu sociální plochy směrem na jih a jihozápad vykazovali největší relativní přírůst na DBH a naopak nejnižšího přírůstu dosahovali jedinci, kteří měli největší segment sociální plochy orientovaný východním a jihovýchodním směrem. Tento efekt může být způsobem samostíněním v průběhu slunných dnů (ROEDICK et al., 2001; URBAN et al., 2007). Jedinci, kteří měli největší utlačení ze severovýchodu až jihovýchodu, vykazovali největší relativní přírůst DBH, zatímco stromy, které byly utlačeny z jihozápadu až západu, vykazovaly nejnižší relativní přírůst na DBH. Z pravidla filtrování číslo čtyři, kam spadají

stromy, které byly z jedné strany hodně utlačené a z jiné strany neměly výrazně otevřený prostor, se dá předpokládat, že účinek uvolnění je silnější než účinek utlačení. Tyto výsledky ukazují, jakým způsobem podpořit růst cílových stromů v rámci výchovného zásahu. Maximální pozornost musí být věnována těmto cílovým stromům a jejich uvolnění z jižní až západní strany. Z pohledu utlačení nám výsledky říkají, že při utlačení ze severní, severovýchodní, východní a jihovýchodní strany nemusí být tomuto utlačení věnována taková pozornost, protože i přes toto utlačení jsou jedinci schopni vytvářet přírůstek na výčetní kruhové ploše jedince.

## 3.5 Vliv typu a intenzity probírkového zásahu na sekvestraci a obsah uhlíku

### 3.5.1 Úvod

Lesnictví se vyznačuje dlouhodobým výrobním cyklem, což vyžaduje odpovídající plánování hospodářských opatření. Predikce budoucího produkčního potenciálu a růstu lesů má velmi zásadní význam pro lesnictví. Strategický význam dlouhodobého plánování v lesnictví se zvyšuje s měnícími se klimatickými a environmentálními podmínkami, které ovlivňují zdravotní stav, dynamiku růstu a stabilitu současných lesních ekosystémů. Lesní zdroje v širším slova smyslu neposkytují pouze produkci dřevní hmoty, ale poskytují i další funkce pro společnost. V současné době se dostává do popředí pozornosti schopnost lesních ekosystémů zachycovat a ukládat vzdušný uhlík (HOUGHTON, 2005), a podílet se tak na zmírnění dopadů globální změny klimatu (IPCC, 2007). Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (UNFCCC) vyžaduje zhodnocení a vykazování emisí z jejich zdrojů a propadů. Lidskou aktivitou jsou tyto propady (sinky - spotřebiče) ovlivňovány využitím krajiny, změnou využití půdy a hospodářskými aktivitami v lesích a zemědělství (LULUCF - *Land Use, Land Use Change and Forestry Activities*). Ve střední Evropě jsou tyto změny ovlivněny především způsobem obhospodařování lesů, což představuje rozhodující mechanismus dynamiky uhlíku hospodářských lesů Evropy. Na les je třeba se dívat jako na ekosystém, obrovskou soustavu pump - stromů, které nasávají vzdušný uhlík z atmosféry v procesu fotosyntézy, ukládají jej do biomasy a půdy prostřednictvím opadu a dekompozice jemných kořenů a vypouštějí jej zpět do atmosféry respirací (Marek et al., 2011).

Klíčovým parametrem k porozumění cyklu uhlíku v lesním hospodářství je jeho fixace v nadzemní a podzemní biomase (HORWATH et al., 1994, TRUMBORE, 2006). Evropské lesy jsou intenzivně využívány k produkci dřevní hmoty a z pohledu klimatické změny to jsou významná úložiště uhlíku. Inventarizace lesa sloužily k zjišťování zásob lesních porostů daleko dříve, než vzrostl zájem o cyklus uhlíku v lesních ekosystémech. V současné době tyto inventarizace představují cenný zdroj informací ke kvantifikaci a pochopení distribuce uhlíku v lesním ekosystému (LISKI et al., 2002, 2003; GOODALE et al., 2002; NABUURS et al., 2007).

Jedním z cílů této práce bylo zhodnotit sekvestraci uhlíku do biomasy mladých smrkových porostů v závislosti na typu a intenzitě probírkového zásahu. Přesněji porovnat proporční rozdělení biomasy do jednotlivých orgánů stromu a obsahy uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromu u mladé vrchovinné a horské smrčiny.

### 3.5.2 Materiál a metody

#### 3.5.2.1 Popis stanoviště a porostu

Výzkum vlivu typu a intenzity probírkového zásahu na sekvestraci a obsah uhlíku probíhal na výzkumných plochách stacionářů Rájec-Němčice a Bílý Kříž, kde se nachází porosty se 100 % zastoupením smrku a téměř shodného stáří. Z lokality Bílý Kříž se jedná o plochy označené jako FS (plocha řídká s porostní výchovou směřovano do podúrovně až úrovně) a FD (plocha hustá – bez zásahu). Konkrétní popis těchto ploch je uveden v kapitole 3.1.1.1. Z lokality Rájec-Němčice byly vybrány plochy C3 a D4. Popis výzkumné plochy Rájec-Němčice je uveden v kapitole 3.1.2.1. V lokalitě Rájec-Němčice byly vybrány dvě plochy, které nejvíce odpovídaly příslušnému typu probírky, v tomto případě kvadrant C3, kde byla dosud aplikována silná podúrovňová probírka (TfB), a kvadrant D4, na kterém byla dosud aplikována úrovňová probírka (TfA). Základní charakteristiky výzkumných ploch pro tuto studii uvádí tabulka 32.

Tabulka 32: Základní charakteristiky výzkumných ploch z jara 2009 a podzimu 2014.

Porostní charakteristika			Plocha			
			C3	D4	FS	FD
Počet stromů na hektar	[ks.ha <sup>-1</sup> ]	jaro 2009	2304	1872	1500	1540
Průměrná tloušťka stromu	[cm]		13,78	12,95	15,3	15,61
Průměrná výška stromu	[m]		15,8	13,4	14,6	15,2
Výčetní kruhová základna	[m <sup>2</sup> ]		36,66	28,14	28,62	30,97
SDI*			886	651	682	723
Počet stromů na hektar	[ks.ha <sup>-1</sup> ]	podzim 2014	2032	1808	1256	1128
Průměrná tloušťka stromu	[cm]		15,00	14,76	18,72	19,23
Průměrná výška stromu	[m]		16,6	14,7	16,8	17,2
Výčetní kruhová základna	[m <sup>2</sup> ]		43,78	36,21	35,93	34,82
SDI*			895	776	789	740

\* Index hustoty porostu (SDI) REINEKE (1933).

#### 3.5.2.2 Měření stromů a stanovení množství biomasy

Na výzkumných plochách byly zjišťovány dendrometrické charakteristiky všech stromů. Každým rokem na konci vegetační sezóny byl měřen obvod kmene každého jedince, z kterého byla následně vypočítána výčetní tloušťka (DBH). Dále byla měřena výška stromů (H) pomocí výškoměru Vertex (Haglöf Sweden AB).

Pro stanovení biomasy jednotlivých orgánů stromu (jehlic, větví a kmene) byly použity stanovištně specifické alometrické rovnice. Pro lokalitu Bílý Kříž se jedná o rovnice, které byly publikovány POKORNÝM a TOMÁŠKOVOU (2007). Pro lokalitu Rájec-Němčice byly použity specifické rovnice pro danou lokalitu a daný typ probírky, které jsou popsány

v kapitole 3.3 a byly publikovány v práci KREJZA et al., 2013. Pro odvození biomasy kořenů byly převzaty rovnice z práce DREXHAGE a GRUBER (1999).

Z alometrických rovnic pro danou lokalitu a daný typ probírky byl odvozen procentuální podíl biomasy jednotlivých orgánů na úrovni jednotlivých stromů. Pro odhad procentuálního podílu biomasy jednotlivých orgánů stromu byly sestaveny regresní modely. Pro tyto modely byly vybrány následující rovnice vycházející z výčetních tlouštěk:

$$y = a_1 * \text{EXP}[a_2 * \ln(\text{DBH})] + a_3 * [\ln(\text{DBH})]^2 + a_4 \quad (17)$$

$$y = a_1 - a_2 / \text{DBH} + a_3 / (\text{DBH}^2) \quad (18)$$

$$y = a_1 \text{DBH}^{a_2} + a_3 \quad (19)$$

$$y = a_1 * \text{EXP}(a_2 * \text{DBH}) + a_3 \quad (20)$$

$$y = a_1 + a_2 * \text{DBH} + a_3 * \log(\text{DBH}) \quad (21)$$

$$y = \text{DBH}^2 / (a_1 + a_2 * \text{DBH} + a_3 * \text{DBH}^2) + a_4 \quad (22)$$

Tento set rovnic byl testován pro odhad procentuálního podílu biomasy pro jednotlivé orgány stromu v dané lokalitě a pro daný typ probírky. Nejlepší rovnice pro daný případ byly vybrány na základě indexu determinace ( $R^2$ ) a na základě střední čtvercové chyby modelu (MSE)

### 3.5.2.3 Stanovení obsahu uhlíku

Pro stanovení obsahu uhlíku v jednotlivých orgánech stromu byly odebrány vzorky ze vzorníkových stromů. Odběr vzorků byl realizován ve vegetační sezóně 2014, přičemž do analýzy jehličí a větví nebyl zahrnut poslední přírůst letorostu, z důvodu nerovnoměrného vyvrání letorostů v rámci vertikálního profilu koruny a sledovaných lokalit. Dendrometrické parametry vzorníkových stromů uvádí [tabulka 33](#). U tlustě zvýrazněných stromů byly odebrány vzorky všech orgánů, u ostatních byl odebrán pouze vzorek kmene. V lokalitě Rájec–Němčice byly vzorky jehličí a větví odebrány vždy z každého druhého přeslenu od vrcholu stromu, aby bylo možné zachytit změny v obsahu uhlíku v rámci vertikálního profilu koruny. V lokalitě Bílý Kříž byly vzorky jehličí a větví odebrány ve třech úrovních koruny (vrcholová – osluněná část koruny, střední – přechodová část a bazální – zastíněná část koruny), které nesou statisticky významně se lišící letorosty v morfologických parametrech. [POKORNÝ et al., \(2004\)](#). Vzorky dřeva kmene byly odebrány pomocí přírůstového nebozezu a to ve výčetní výšce (tj. 1,3 m nad zemí).

Tabulka 33: Dendrometrické charakteristiky vzorníkových stromů pro zjištění obsahu uhlíku v jednotlivých orgánech stromu.

Lokalita	Bílý Kříž										Rájec - Němčice					
	FS					FD					C3			D4		
Plocha	18,9	22,3	18,6	24,3	16,1	18,3	12,0	17,2	13,6	14,2	14,1	16,8	13,5	14	19,5	16,3
DBH [cm]	18,9	22,3	18,6	24,3	16,1	18,3	12,0	17,2	13,6	14,2	14,1	16,8	13,5	14	19,5	16,3
Výška stormu [m]	16,9	18,0	16,8	18,3	15,5	16,7	13,0	16,1	14,0	14,4	14,6	14,5	15,6	13,7	15,8	15,6
Ø výška vzorníku [m]	16,0 ± 1,6					15,0 ± 0,8										
Ø DBH vzorníku [cm]	17,5 ± 3,6					15,7 ± 2,1										

#### 3.5.2.4 Příprava vzorků a stanovení obsahu uhlíku

Vzorky pro analýzu obsahu uhlíku byly vysušeny v sušárně při 80 °C a dostatečně homogenizovány. K následné analýze bylo do cínové kapsle naváženo vždy cca 2 g vysušeného a namletého vzorku. Tato kapsle byla pomocí dvou pinzet uzavřena, zvážena a použita k analýze.

Stanovení celkového uhlíku bylo provedeno pomocí prvkového analyzátoru (NCS Flash 2000 s autosamplerem). Vzorek je při analýze spálen za vysoké teploty (950 °C), která zajišťuje, že se veškerý uhlík přemění na CO<sub>2</sub>. Vzniklé plyny jsou v proudu nosného plynu (helium) unášeny přes reaktor (křemenná trubice naplněná elektrolytickou mědí a oxidem měďnatým) umístěný v peci a následně přes adsorpční filtr, pohlcující vlhkost, naplněný chloristanem hořečnatým. Spaliny jsou dále unášeny nosným plynem na chromatografickou kolonu a následně na teplotně vodivostní detektor. Výsledky jsou následně vyhodnoceny pomocí příslušného softwaru (Thermo Scientific™ Eager Xperience™, USA). Výsledky obsahu uhlíku jsou uváděny v hmotnostních % navažovaného vzorku.

### 3.5.3 Výsledky

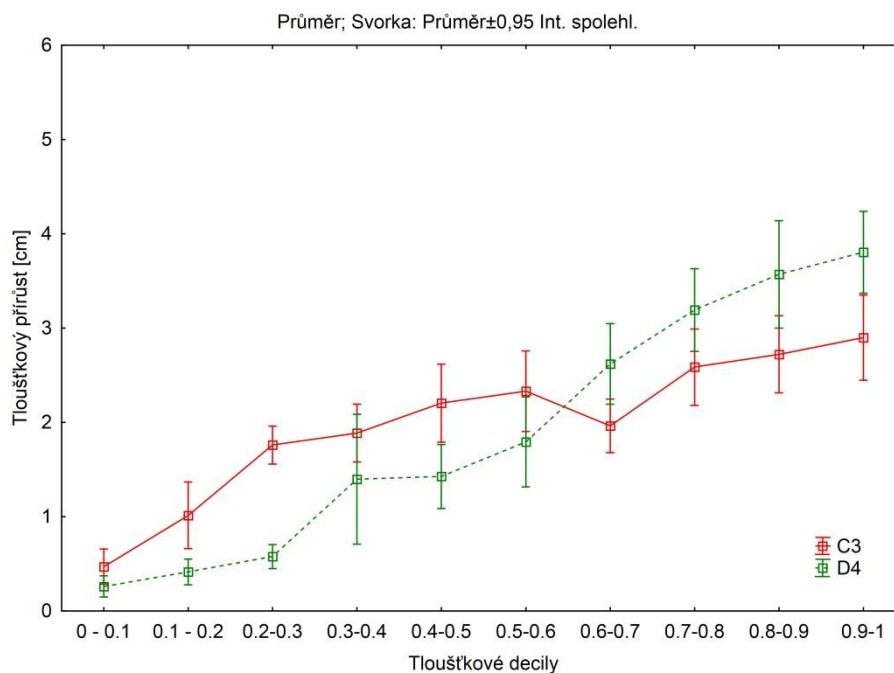
#### 3.5.3.1 Vývoj porostních charakteristik

Vývoj porostních charakteristik pro jednotlivé výzkumné plochy uvádí [tabulka 32](#). Ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014) klesl počet stromů na všech plochách. V lokalitě Rájec-Němčice to bylo z důvodu provedeného výchovného zásahu. Výchovný zásah respektoval typ probírky již dříve aplikovaný v dané výzkumné ploše (C3 – silná podúrovňová probírka, D4 – úrovňová probírka). Probírkový zásah byl proveden na jaře 2010, přičemž z výzkumné plochy C3 bylo odstraněno 19,10 t.ha<sup>-1</sup> biomasy, což odpovídalo 8,76 % z celkové biomasy porostu. Na ploše D4 bylo vytěženo 9,93 t.ha<sup>-1</sup> biomasy, což odpovídalo 5,84 % z celkové biomasy porostu. V lokalitě Bílý Kříž byl pokles porostní hustoty způsoben poškozením stromů v zimním období těžkým sněhem s následně provedenou nahodilou těžbou (odstraňovány jsou vývraty a stromy se zlomem koruny převyšujícím 60 % její délky). U plochy FD bylo za sledované období odstraněno 32,70 t.ha<sup>-1</sup> biomasy, což odpovídá 27 % z celkové biomasy porostu. Na ploše FS bylo za sledované období odstraněno 17,48 t.ha<sup>-1</sup> biomasy, což odpovídá cca 15 % z celkové biomasy porostu. Celkově vytěžená biomasa zahrnuje i biomasu kořenů, která nebyla z plochy odstraněna a z celkové biomasy tvoří 11–18 %. Nárůst průměrných dendrometrických veličin je ovlivněn výchovným zásahem a přirozeným zředěním, resp. nahodilou těžbou, z důvodu poškození především jedinců se špatným štíhlostním koeficientem (viz [kapitola 3.1](#)).

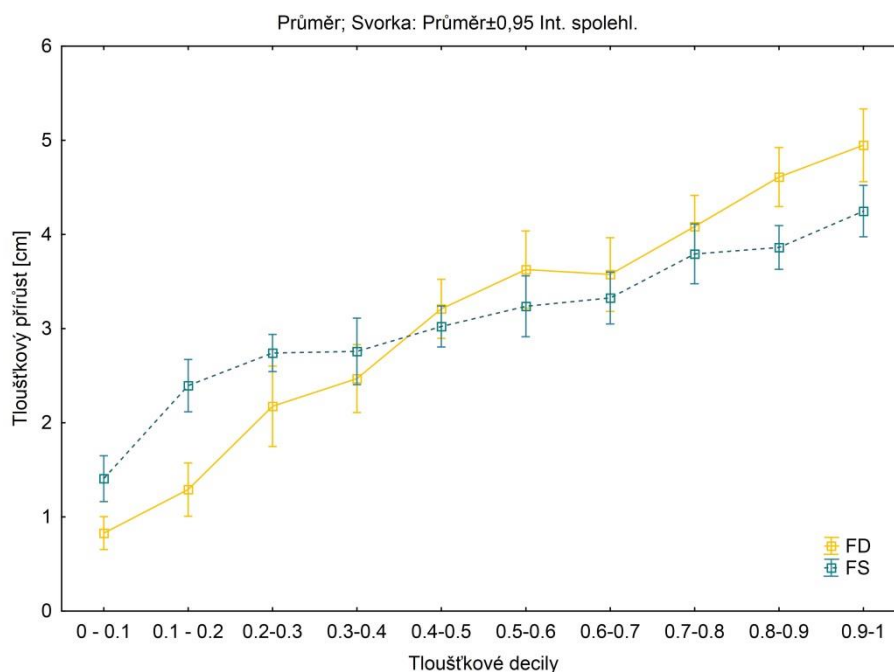
Pro podrobný vývoj výčetní tloušťky stromů byly sestaveny grafy tloušťkového přírůstu po tloušťkových decilech (statistická hodnota, která je získána členěním všech jedinců z výzkumné plochy na deset stejných částí, první decil odpovídá 10 % nejtenčích stromů na výzkumné ploše atd.).

Pro lokalitu Rájec-Němčice je velikost tloušťkového přírůstu dle tloušťkových decilů zobrazena na [obrázku 41](#). Z obrázku je patrné, že nejsilnější jedinci z plochy D4 vykazovali statisticky významně větší tloušťkový přírůst než jedinci na ploše C3. A naopak u nižších tloušťkových decilů bylo dosaženo průkazně vyššího tloušťkového přírůstu na ploše C3. Tento statisticky významný rozdíl je nejvíce patrný u tloušťkových decilů 0,2-0,3 a 0,1-0,2.

Z výsledků je patrné, že při podúrovňovém zásahu je pozitivně ovlivněn přírůst jedinců nižších tloušťkových decilů (plocha C3 a FS), zatímco při aplikaci úrovňových zásahů je stimulován přírůst stromů vyšších decilů (plocha D4)



Obrázek 41: Tloušťkový přírůst po tloušťkových decilech za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) v lokalitě Rájec-Němčice.



Obrázek 42: Tloušťkový přírůst po tloušťkových decilech za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) v lokalitě Bílý Kříž.

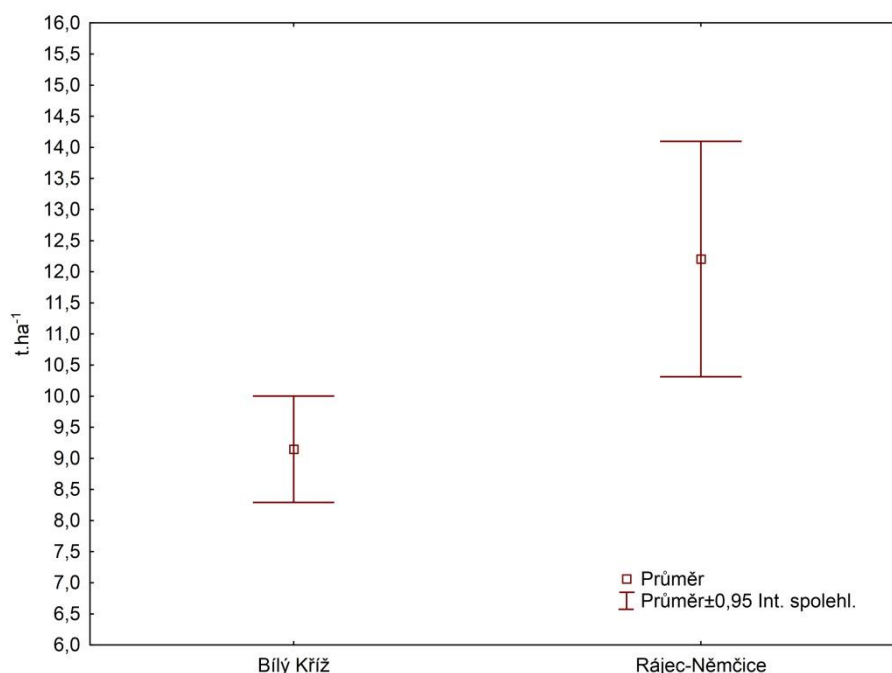
Podobný trend je patrný i v lokalitě Bílý Kříž (Obrázek 42). Statisticky významný rozdíl v tloušťkovém přírůstu byl prokázán u nejvyšších tloušťkových decilů, kde bylo dosaženo většího tloušťkového přírůstu u jedinců na ploše FD. Statistická významnost rozdílu u těchto nejsilnějších jedinců byla prokázána u tloušťkových decilů 0,8-0,9 a 0,9-1. Na druhou stranu u



nejnižších tloušťkových decilů je patrný vyšší přírůst u jedinců z plochy FS. Statisticky významný rozdíl byl prokázán u dvou tloušťkových decilů, a to konkrétně u 0-0,1 a 0,1-0,2.

V případě porovnání dvou sledovaných lokalit je patrné, že ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014) bylo dosaženo vyššího tloušťkového přírůstu v lokalitě Bílý Kříž.

Zásoba biomasy pro jednotlivé výzkumné plochy je uvedena v [tabulce 34](#). Na počátku sledovaného období (jaro 2009) byla celková vázaná biomasa nejvyšší na lokalitě Rájec-Němčice na ploše C3. Celková biomasa dosahovala  $218,20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , jako druhá plocha s nejvyšší zásobou celkové biomasy byla plocha D4 se zásobou  $170,04 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Diametrálně odlišná zásoba biomasy byla zjištěna v lokalitě Bílý Kříž, kde zásoba biomasy dosahovala  $111,64 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  na ploše FS a  $121,92 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  na ploše FD. Detailní informace, ve kterých orgánech je celková biomasa fixována, jsou uvedené v [tabulce 34](#). Nejvyšší průměrný přírůst celkové biomasy byl zaznamenán na ploše C3, kde průměrně ročně přirostlo  $12,55 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , z lokality Bílý Kříž byl největší průměrný přírůst celkové biomasy zaznamenán na ploše FD, a to  $9,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Mezi jednotlivými plochami v jedné lokalitě není statisticky průkazný rozdíl, ale v případě porovnání lokalit Rájec-Němčice a Bílý Kříž ([Obrázek 43](#)) se rozdíl v průměrném ročním přírůstu biomasy projevil jako statisticky významný ( $\alpha=0,05$ ,  $p=0,0406$ ). Průměrné roční přírůsty pro jednotlivé frakce biomasy uvádí [tabulka 35](#) pro lokalitu Rájec-Němčice a Bílý Kříž včetně statistického porovnání pomocí t-testu pro dva nezávislé výběry při hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . Z jednotlivých stromových orgánů vyšel statisticky odlišný roční přírůst biomasy jehličí a větví, u průměrného ročního přírůstu biomasy kmene a kořenů nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl.



Obrázek 43: Průměrný roční přírůst celkové biomasy pro lokalitu Rájec-Němčice a Bílý Kříž.

Tabulka 34: Zásoba biomasy v jednotlivých stromových orgánech (frakcích) na úrovni porostu na jaře 2009 a na podzim 2014. V tabulce jsou uvedeny zásoby biomasy kmenů (SB), větví (BB), listoví (LB) a kořenů (RB). Celková biomasa (TB) je potom součtem těchto jednotlivých orgánů stromu. Těžba je uvedena jako celková těžba biomasy včetně kořenů, přičemž tato část biomasy byla na výzkumných plochách ponechána.

Lokalita	Plocha	Typ výchovy		SB	BB	LB	RB	TB	Těžba TB 2009 – 2014
				t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>	t.ha <sup>-1</sup>
Rájec-Němčice	D4	Úrovňová probírka	jaro 2009	82,48	35,90	32,24	19,42	170,04	9,93
			podzim 2014	111,75	48,91	44,08	26,53	231,26	
			ø roční přírůst	5,68 ± 1,67	2,52 ± 0,73	2,29 ± 0,67	1,37 ± 0,40	11,86 ± 3,47	
	C3	Podúrovňová probírka	jaro 2009	105,98	46,04	41,30	24,89	218,20	19,10
			podzim 2014	132,82	58,00	52,19	31,43	274,44	
			ø roční přírůst	6,02 ± 2,34	2,66 ± 1,04	2,42 ± 0,94	1,45 ± 0,56	12,55 ± 4,88	
Bílý Kříž	FS	Intenzivní výchova	jaro 2009	52,34	20,30	19,13	19,87	111,64	17,48
			podzim 2014	71,77	25,73	23,12	26,85	147,47	
			ø roční přírůst	4,60 ± 1,01	1,44 ± 0,32	1,16 ± 0,27	1,68 ± 0,37	8,86 ± 1,96	
	FD	Mírná výchova	jaro 2009	57,60	21,99	20,54	21,80	121,92	32,70
			podzim 2014	71,64	25,09	22,24	26,69	145,66	
			ø roční přírůst	4,92 ± 0,96	1,50 ± 0,29	1,20 ± 0,24	1,79 ± 0,34	9,41 ± 1,84	

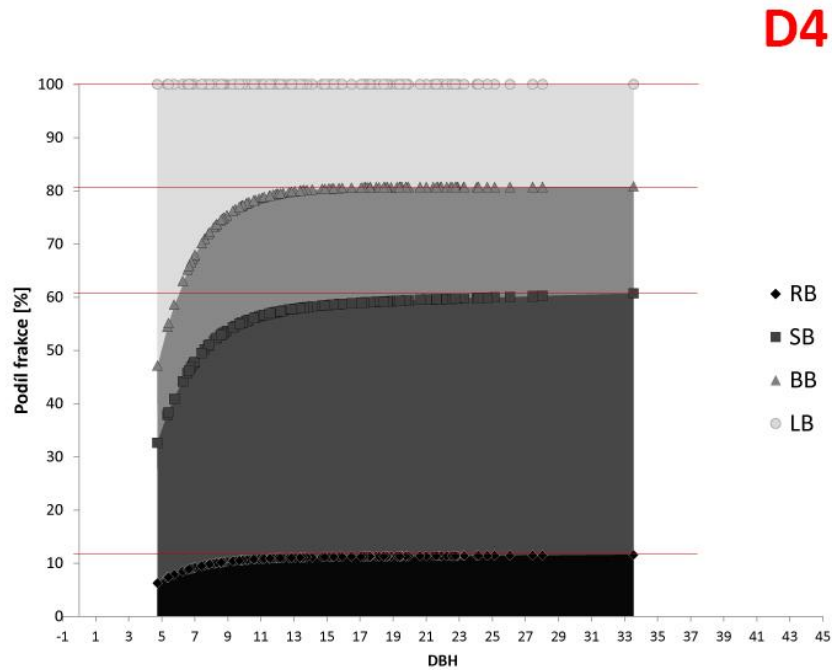
Nejvyšší zásoba celkové biomasy na podzim v roce 2014 byla zaznamenána v lokalitě Rájec-Němčice, konkrétně na ploše C3 ve výši 274,44 t.ha<sup>-1</sup>. V lokalitě Bílý Kříž bylo nejvíce celkové biomasy zaznamenáno na ploše FD ve výši 147,47 t.ha<sup>-1</sup>. Detailní přehled o množství vázané biomasy uvádí [tabulka 34](#).

Tabulka 35: Průměrný roční přírůst biomasy za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) pro lokality Bílý Kříž a Rájec-Němčice. Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB). Hodnota p je výsledkem t-testu.

Lokalita		Jehlice	Větve	Kmen	Kořeny	Celkem
Průměrný roční přírůst biomasy za sledované období						
Rájec-	t.ha <sup>-1</sup>	2,35	2,59	5,85	1,41	12,21
-Němčice	SD	0,85	0,94	2,13	0,51	3,68
Bílý Kříž	t.ha <sup>-1</sup>	1,18	1,47	4,76	1,74	9,15
	SD	0,26	0,32	1,04	0,38	1,66
Hodnota p		<b>0,0002</b>	<b>0,0008</b>	0,1255	0,0944	<b>0.0406</b>
Výsledek*		o	o	x	x	o

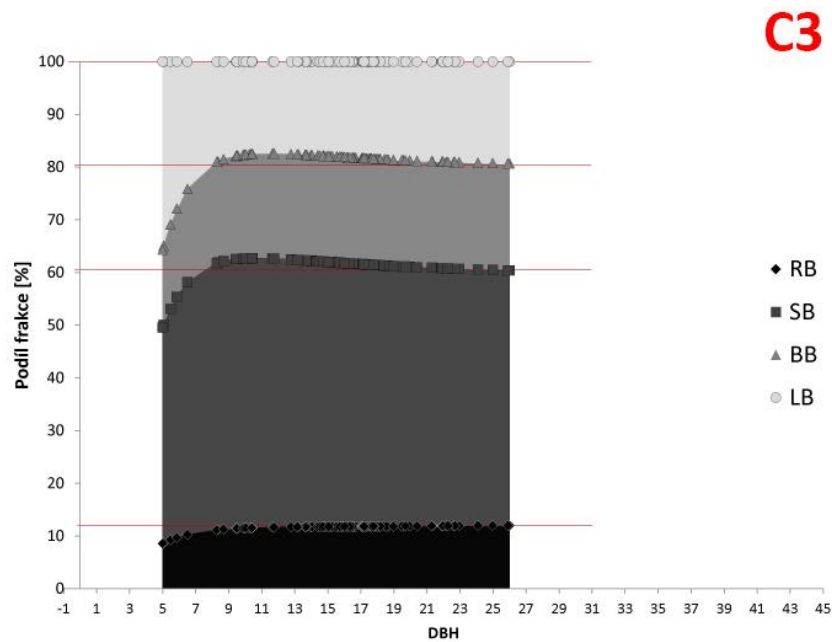
\* o značí statisticky významný rozdíl mezi sledovanými lokalitami při hladině významnosti  $\alpha=0,05$ ; x značí, že statisticky významný rozdíl nebyl prokázán.

Ze stanovištně specifických alometrických vztahů byly odvozeny procentuální podíly biomasy jednotlivých orgánů stromu (Obrázek 44, Obrázek 45, Obrázek 46). Pro lokalitu Rájec-Němčice je u jedinců nevětších dimenzí takřka stejné procentuální rozložení biomasy, 50 % biomasy je fixováno v kmenech (SB), přibližně 20 % ve větvích (BB), 19 % v listoví (LB) a 11 % v kořenech. Významný je rozdíl rozložení biomasy u tloušťkově nejslabších jedinců mezi výzkumnými plochami v Rájci-Němčicích. Na ploše D4 je u nejslabších jedinců více než 50 % LB, toto vysoké zastoupení LB jde na úkor všech ostatních složek biomasy (Obrázek 44). Od nejslabších jedinců (s DBH 5 cm) se podíl LB rapidně zmenšuje a naopak rapidně stoupá podíl SB. Tento trend se ustáluje někde kolem DBH 15-19 cm, kde je proporční rozložení biomasy téměř shodné jako u jedinců nejsilnějších dimenzí (DBH 33 cm).



Obrázek 44: Procentuální podíl zásoby biomasy na stromové úrovni dle DBH z lokality Rájec-Němčice (plocha D4). Zkratky na obrázku značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB).

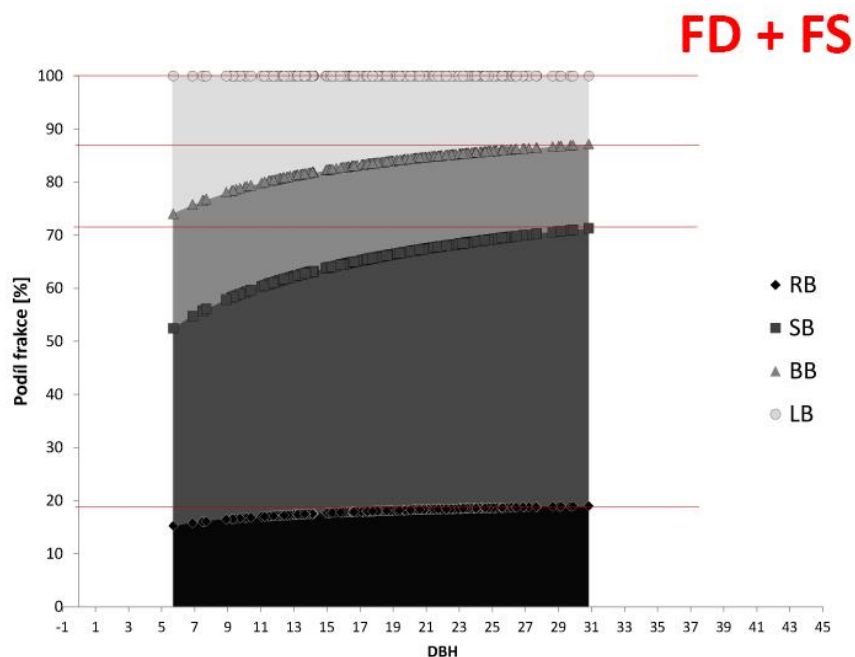
Na ploše C3 je tento trend obdobný jako v případě plochy D4 (Obrázek 45), jen u nejslabších jedinců (DBH 5 cm) je maximální hodnota LB okolo 35 % na úkor všech ostatních složek biomasy, směrem k vyšším dimenzím DBH podíl LB rychle klesá až po dosažení dimenze s DBH ca 11 cm. Při této hodnotě dimenze kmene byl podíl LB nejmenší (ca 17 %) přičemž poté nepatrně hodnota podílu LB stoupala a ustálila se na nepatrně vyšší hodnotě ca 19 % po dosažení dimenze kmene v DBH 23 cm. Je patrné, že procentuální podíl jednotlivých složek celkové biomasy je ovlivněn výrazněji procentuálním zastoupením LB. Pokud podíl této složky klesá, podíl všech ostatních složek stoupá. S klesajícím zastoupením složky LB je patrný největší nárůst složky SB.



Obrázek 45: Procentuální podíl zásoby biomasy na stromové úrovni dle DBH z lokality Rájec-Němčice, plocha C3. Zkratky na obrázku značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB).

V lokalitě Bílý Kříž je trend vývoje procentuálního podílu biomasy jednotlivých orgánů stromů v závislosti na DBH nepatrně odlišný (Obrázek 46). Pouze SB a RB vykazují kladnou korelaci s parametrem DBH, ostatní dvě složky biomasy vykazují negativní korelaci s DBH. U nejsilnějších jedinců je podíl složek biomasy 52 % SB, 19 % RB, 15 % BB a 14 % LB. Procentuální podíl biomasy kmenů stoupá od nejslabších jedinců (DBH 5 cm) především na úkor biomasy listoví a biomasy větví. Největší procentuální podíl biomasy listoví je v případě jedinců nejmenších dimenzí (LB 26 %), ale nedosahuje tak vysokých proporčních hodnot jako v případě lokality Rájec-Němčice. V lokalitě Bílý Kříž bylo také zaznamenáno vyšší procentuální zastoupení biomasy kořenů. Procentuální zastoupení biomasy kořenů se pohybovalo v intervalu 15–19 %, oproti lokalitě Rájec-Němčice, kde se hodnota procentuálního podílu biomasy kořenů pohybovala od 7 do 12 %.

Průměrné hodnoty procentuálního podílu biomasy jednotlivých stromových orgánů jsou uvedeny v tabulce 36 včetně jejich variability, která je vyjádřena směrodatnou odchylkou (SD).



Obrázek 46: Procentuální podíl zásoby biomasy na stromové úrovni dle DBH z lokality Bílý Kříž. Zkratky na obrázku značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB).

Největší procentuální zásoba biomasy kmenů (SB) byla dosažena v lokalitě Rájec-Němčice na výzkumné ploše C3, která představuje plochu s aplikovanou silnou podúrovňovou probírkou. Na této ploše bylo průměrně téměř 50 % biomasy vázáno v kmenech (SB) a zároveň bylo dosaženo nejmenší variability v rámci sledovaných ploch (Tabulka 36).

Tabulka 36: Průměrné hodnoty procentuálního podílu biomasy jednotlivých orgánů stromu. Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB).

Lokalita	Plocha	Typ výchovy		SB [%]	BB [%]	LB [%]	RB [%]
Rájec-Němčice	D4	Úrovňová probírka	Průměr	45,32	21,25	22,71	10,71
			SD	4,22	1,17	6,12	0,98
	C3	Podúrovňová probírka	Průměr	49,68	19,90	18,75	11,67
			SD	1,45	0,83	2,61	0,52
Bílý Kříž	FS+FD	Mírná výchova + Intenzivní výchova	Průměr	47,96	17,72	16,28	18,04
			SD	2,53	1,01	2,12	0,60

Pro odhad procentuálního podílu zásoby biomasy v jednotlivých stromových orgánech byly sestaveny jednoduché regresní modely. Modely jsou sestaveny na

základě proměnné výčetní tloušťky kmene a parametry konkrétních modelů pro obě lokality jsou uvedeny v tabulce 37. Pro odhad podílu biomasy listoví (LB), kmene (SB), větví (BB) a kořenů (RB) byly pro jednotlivé stromové orgány testovány rovnice č. 1-6. Nejlepší model pro danou plochu a danou frakci biomasy byl vybrán na základě koeficientu determinace ( $R^2$ ) a střední čtvercové chyby modelu (MSE). Všechny představené modely vykazují vysokou míru korelace s proměnou DBH, což dokládá koeficient determinace, který se u představených modelů pohyboval od 0,99 do 1. Vysokých hodnot koeficientu determinace bylo dosaženo nalezením vhodné inverzní funkce k stanovištně specifickým alometrickým rovnicím pro danou lokalitu a daný typ probírky. Výsledkem jednotlivých modelů je procentuální podíl biomasy daného orgánu stromu z celkové biomasy.

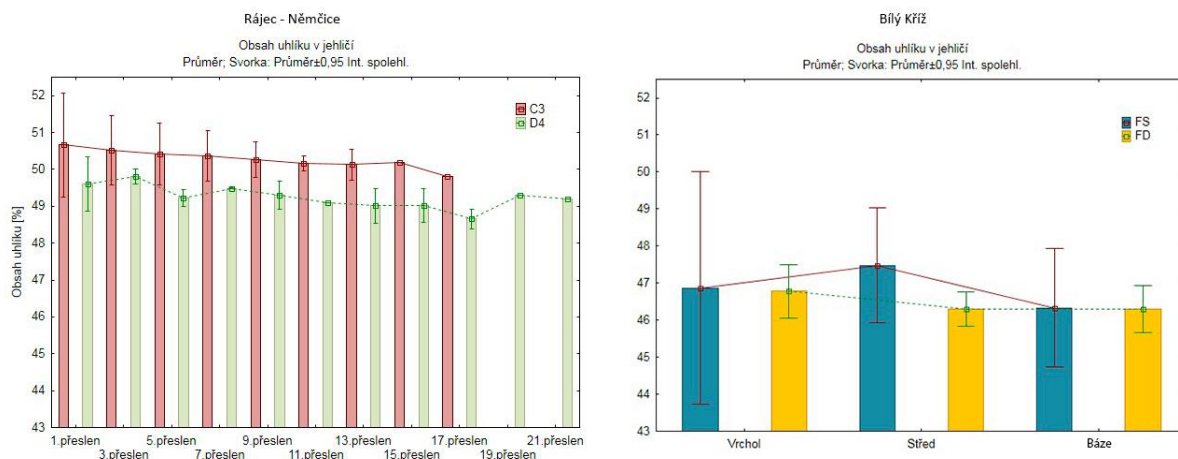
Tabulka 37: Parametry modelu pro odhad procentuálního podílu zásoby biomasy jednotlivých orgánů stromu z celkové biomasy stromu. Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB), koeficient determinace ( $R^2$ ) a střední čtvercová chyba modelu (MSE).

Lokalita	Plocha	Typ výchovy		rovnice č.	a1	a2	a3	a4	$R^2$	MSE
Rájec-Němčice	D4	Úrovňová probírka	SB [%]	22	0,0603	-0,0040	0,0084	-72,1248	1,00	0,021
			BB [%]	22	0,0965	-0,0168	0,0134	-56,5711	0,99	0,008
			LB [%]	20	273,1504	-0,4381	19,2178		1,00	0,007
			RB [%]	22	0,0033	-0,0002	0,0045	-212,3923	1,00	0,002
	C3	Podúrovňová probírka	SB [%]	2	42,7145	-175,0117	-919,0913		1,00	0,008
			BB [%]	17	164,5221	0,3574	-28,5531	-203,5360	1,00	0,002
			LB [%]	17	6299,0387	-3,5118	0,7070	12,2194	1,00	0,032
			RB [%]	18	11,6104	-11,6058	-133,0483		0,99	0,001
Bílý Kříž	FS+FD	Mírná výchova / Intenzivní výchova	SB [%]	21	20,4238	-0,0617	22,6863		1,00	0,000
			BB [%]	20	9,9910	-0,0560	14,1708		1,00	0,000
			LB [%]	21	41,8844	0,1383	-22,3171		1,00	0,000
			RB [%]	21	10,5070	-0,0493	6,6937		1,00	0,000

### 3.5.3.2 Obsah uhlíku

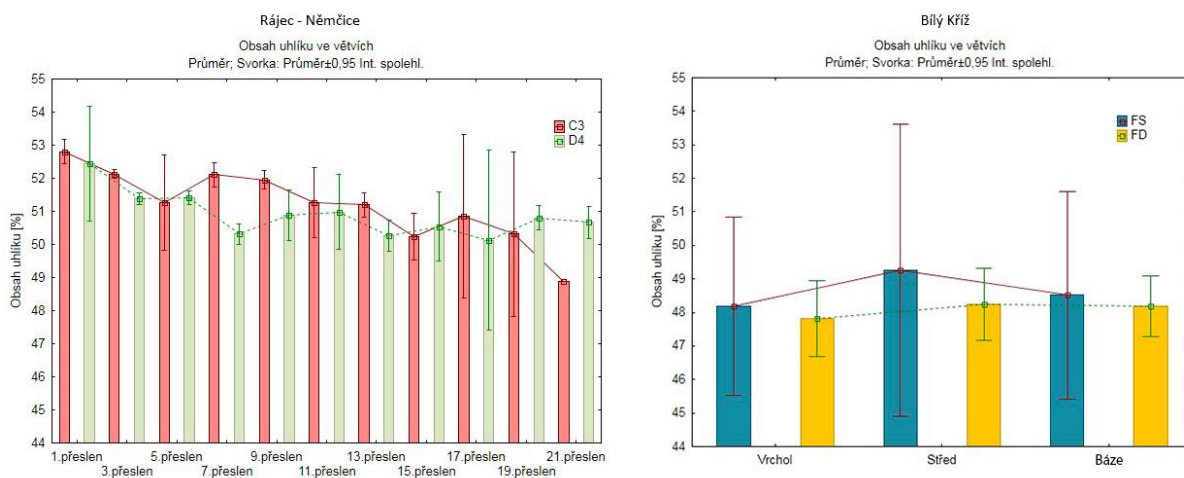
Obsah uhlíku v jehličí vykazuje trend v rámci vertikálního profilu koruny. V lokalitě Rájec-Němčice byl prokázán sestupný trend obsahu uhlíku od nejvyšších partií koruny až k jejím spodním vrstvám. Odlišnost je vidět i mezi jednotlivými výzkumnými plochami, kde byl prokázán nepatrně vyšší procentuální obsah uhlíku na ploše C3 oproti ploše D4. Tento rozdíl se pohyboval na úrovni 1 % po celé délce vertikálního profilu koruny. V některých případech byl však tento rozdíl zaznamenán již jako statisticky významný. V lokalitě Bílý Kříž nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl v procentuálním obsahu uhlíku v jehličí mezi plochami FS a FD. U plochy FD byl

prokázán shodný trend jako na ploše Rájec-Němčice, a to sestupný trend směrem od horních partií koruny ke spodním v procentuálním obsahu uhlíku. U plochy FS byl zaznamenán největší procentuální podíl v obsahu uhlíku v jehličí ve střední části koruny (Obrázek 47).



Obrázek 47: Obsah uhlíku v biomase jehličí ve vertikálním profilu koruny z lokality Rájec-Němčice a Bílý Kříž.

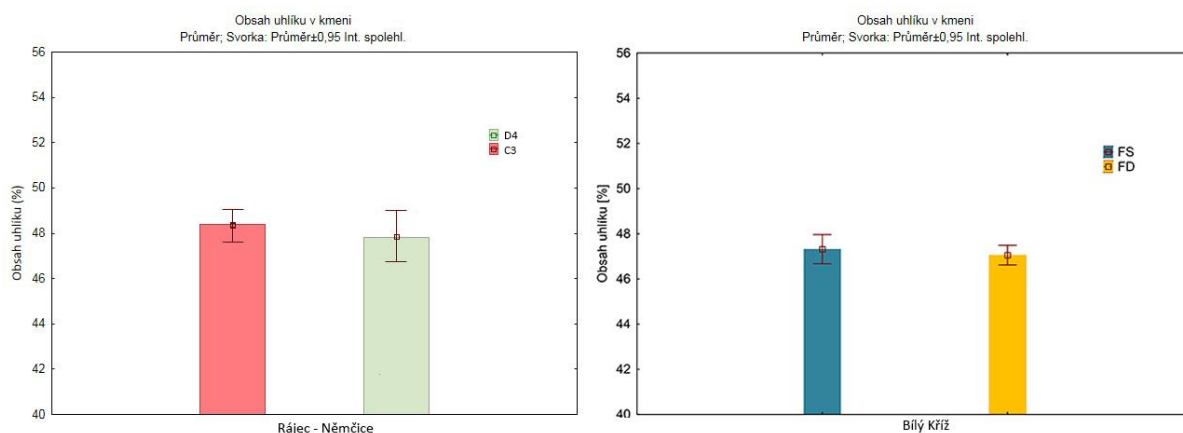
Obsah uhlíku ve větvích vykazoval stejný trend v lokalitě Rájec-Němčice jako v případě obsahu uhlíku v jehličí (Obrázek 48). Mezi plochami C3 a D4 nebyl zaznamenán větší rozdíl a obsah uhlíku byl po celém vertikálním profilu takřka totožný. V lokalitě Bílý Kříž byl zaznamenán stejný trend jako v případě obsahu uhlíku v jehličí v případě plochy FS, plocha FD vykazovala přesně opačný trend oproti plochám v lokalitě Rájec-Němčice. Obsah uhlíku ve větvích byl o 1-2 % vyšší v porovnání s obsahem uhlíku v jehličí a to na obou sledovaných lokalitách.



Obrázek 48: Obsah uhlíku v biomase větví ve vertikálním profilu koruny z lokality Rájec-Němčice a Bílý Kříž.



V rámci šetření obsahu uhlíku v biomase kmene byl odebíráán vzorek kmene pouze z úrovně 1,3 m nad zemí. Ani v jedné z lokalit nevyšel statisticky významný rozdíl v obsahu uhlíku v biomase kmene (Obrázek 49).



Obrázek 49: Obsah uhlíku v biomase kmene z lokality Rájec-Němčice a Bílý Kříž.

Tabulka 38 uvádí vzájemné porovnání sledovaných lokalit. Procentuální obsah uhlíku v jednotlivých orgánech stromu se od sebe navzájem statisticky významně lišil. Největší rozdíl byl zaznamenán v případě procentuálního podílu obsahu uhlíku v biomase listoví, kde mezi lokalitami činil rozdíl 3 %, u biomasy větví 2,7 % a v případě biomasy kmenů pouze 0,9 %.

Tabulka 38: Průměrné procentuální zásoby uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromu.

Lokalita		Jehlice	Větve	Kmen	Průměr
Obsah uhlíku [%]					
Rájec-Němčice	%	49,7	51,0	48,1	49,7
	SD	0,67	1,00	0,49	0,67
Bílý Kříž	%	46,7	48,4	47,2	47,6
	SD	0,68	0,95	0,42	0,68
Hodnota p		0,0000	0,0000	0,0063	0,0020
Výsledek*		o	o	o	o

\* o značí statisticky významný rozdíl mezi sledovanými lokalitami při hladině významnosti  $\alpha=0,05$

Zásoba uhlíku pro jednotlivé výzkumné plochy byla vypočítána násobkem zásoby biomasy jednotlivých orgánů stromu a příslušným obsahem uhlíku. Největší zásoba uhlíku v biomase stromů byla zaznamenána na jaře roku 2009 na ploše C3, a to

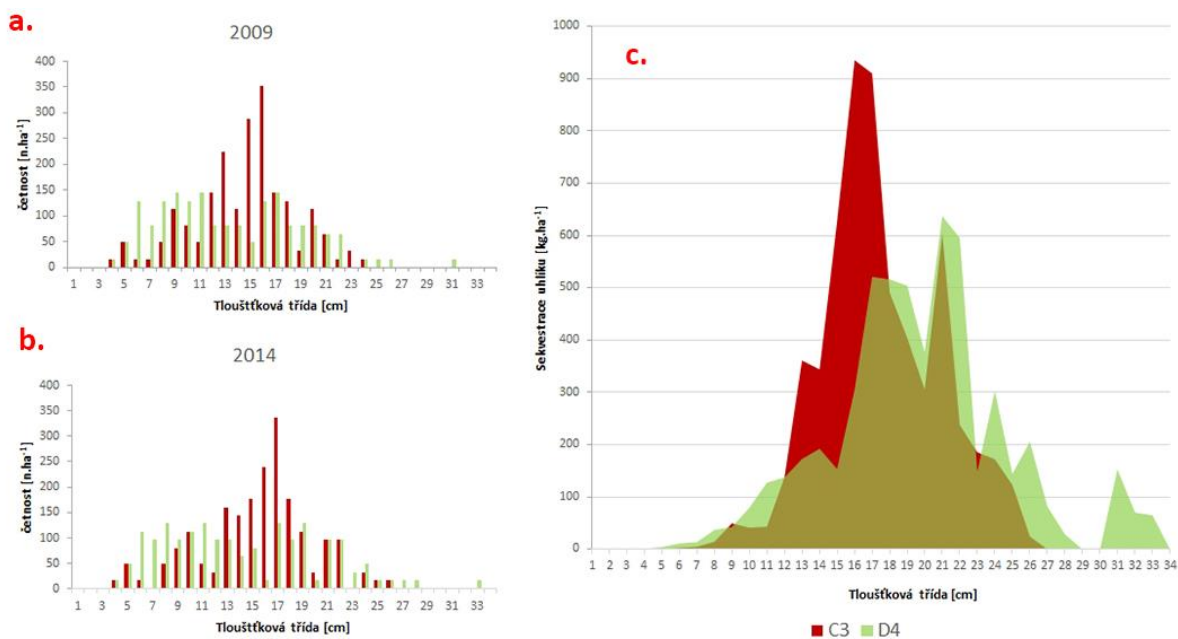
ve výši 107 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku. Toto množství bylo takřka dvojnásobné oproti plochám v Bílém Kříži, kde zásoba uhlíku v biomase činila 53 t.ha<sup>-1</sup> (FS), respektive 57 t.ha<sup>-1</sup> (FD) uhlíku. Jak dále vyplývá z [tabulky 39](#) největší množství uhlíku je fixováno v biomase kmenů a to téměř 48 % veškerého uhlíku fixovaného ve sledovaných porostech. Dále je nejvíce uhlíku fixováno v biomase větví a listoví. Pro odvození biomasy a následně zásoby uhlíku v kořenech bylo použito převzatého modelu (dle. [DREXHAGE a GRUBER, 1999](#)), což může hrát významnou roli při porovnání zásoby biomasy v tomto orgánu stromu. Nicméně dle tohoto modelu a procentuálního zastoupení uhlíku (procentuální zásoba uhlíku v biomase kořenů byla použita stejná jako u biomasy kmenů) vychází zásoba uhlíku v biomase kořenů na všech sledovaných výzkumných plochách v intervalu 9,28–12,05 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku. Tato zásoba uhlíku v biomase kořenů odpovídá 11–18 % z celkově fixovaného uhlíku v biomase.

Tabulka 39: Zásoba uhlíku v jednotlivých orgánech stromu na porostní úrovni v roce 2009 (jaro). Použité zkratky označují biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB) a celkovou biomasu (TB).

Lokalita	Plocha	Typ výchovy		SB	BB	LB	RB	TB
Rájec-Němčice	D4	Úrovňová probírka	t.ha <sup>-1</sup>	39,43	18,27	15,86	9,28	82,84
			%	47,59	22,06	19,14	11,21	100,00
	C3	Podúrovňová probírka	t.ha <sup>-1</sup>	51,29	23,62	20,77	12,05	107,73
			%	47,61	21,92	19,28	11,18	100,00
Bílý Kříž	FS	Intenzivní výchova	t.ha <sup>-1</sup>	24,76	9,89	8,97	9,40	53,02
			%	46,70	18,65	16,92	17,73	100,00
	FD	Mírná výchova	t.ha <sup>-1</sup>	27,13	10,58	9,53	10,27	57,50
			%	47,18	18,39	16,57	17,86	100,00

Průměrná roční sekvestrace uhlíku do celkové biomasy ve sledovaných lokalitách a jejich výzkumných plochách je zobrazena na [obrázku 50](#), respektive [51](#). Sekvestrace uhlíku do biomasy odpovídá dynamice růstu jednotlivých tloušťkových tříd v rámci výzkumných ploch. V případě lokality Rájec-Němčice je vyšší dynamika růstu u jedinců nižších tloušťkových tříd na ploše C3 oproti jedincům ze stejných tloušťkových tříd v rámci plochy D4 ([Obrázek 50](#)). Přesně opačný trend byl zaznamenán u jedinců vyšších tloušťkových tříd, kde vyšší dynamiku růstu vykazovaly jedinci z plochy D4, oproti stejným tloušťkovým třídám stromů plochy C3. Stejný trend lze pozorovat i v rámci sekvestrace uhlíku do biomasy dle tloušťkových tříd. Na ploše D4 je vyšší zastoupení jedinců v intervalu tloušťkových tříd 6–10 cm oproti ploše C3. Nicméně sekvestrace do tohoto tloušťkového intervalu je takřka stejná. Na opačném konci

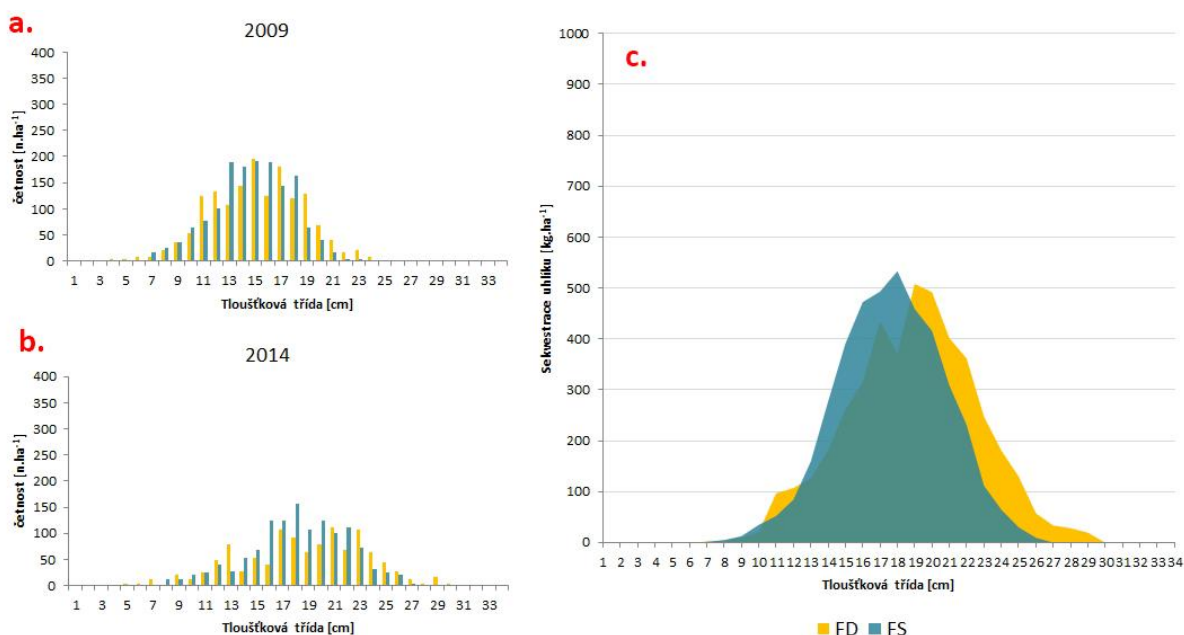
tloušťkových tříd (interval tloušťkových tříd 18–26), kde je také téměř srovnatelný počet jedinců, je však sekvestrace uhlíku daleko vyšší na ploše D4. Průměrná sekvestrace uhlíku do biomasy je v rámci výzkumných ploch z lokality Rájec-Němčice 6,20 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše C3 a 5,78 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše D4 za sledované období od jara 2009 do podzimu 2014.



Obrázek 50: Průměrná roční sekvestrace uhlíku do celkové biomasy ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014). Obrázek a. znázorňuje rozložení tlouštěk na jaře roku 2009, obrázek b. znázorňuje tloušťkové rozložení na podzim r. 2014, obrázek c. zobrazuje průměrnou roční sekvestraci uhlíku do celkové biomasy dle tloušťkových tříd na sledované výzkumné ploše C3 (červená barva) a na ploše D4 (zelená barva) v lokalitě Rájec-Němčice.

Stejný trend lze pozorovat v lokalitě Bílý Kříž (Obrázek 51). Vyšší dynamiku růstu mají jedinci na ploše FS z tloušťkových tříd nižších, než je medián tloušťky, oproti jedincům na ploše FD ze stejných tloušťkových tříd. A naopak jedinci vyšších dimenzí, než je medián tloušťky, mají větší dynamiku růstu na ploše FD oproti ploše FS. Toto lze pozorovat i v rámci sekvestrace uhlíku ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014) v lokalitě Bílý Kříž. Ačkoli sledované výzkumné plochy mají takřka stejný histogram rozložení výčetních tlouštěk (Obrázek 51 a, b) probíhala sekvestrace uhlíku za sledované období více do nižších tloušťkových tříd v rámci plochy FS, oproti ploše FD, kde je sekvestrace uhlíku vyšší ve vyšších tloušťkových třídách (Obrázek 51c). Průměrně bylo do biomasy v rámci výzkumných ploch z lokality Bílý Kříž uloženo 4,44

t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše FD a 4,22 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše FS za hodnocené období šesti let (tj. od jara 2009 do podzimu 2014).



Obrázek 51: Průměrná roční sekvestrace uhlíku do celkové biomasy ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014). Obrázek a. znázorňuje rozložení tlouštěk na jaře roku 2009, obrázek b. zobrazuje tloušťkové rozložení na podzim r. 2014, obrázek c. představuje průměrnou roční sekvestraci uhlíku do celkové biomasy dle tloušťkových tříd na sledovaných výzkumných plochách na lokalitě Bílý Kříž (FD - žlutá barva, FS - modrá barva).

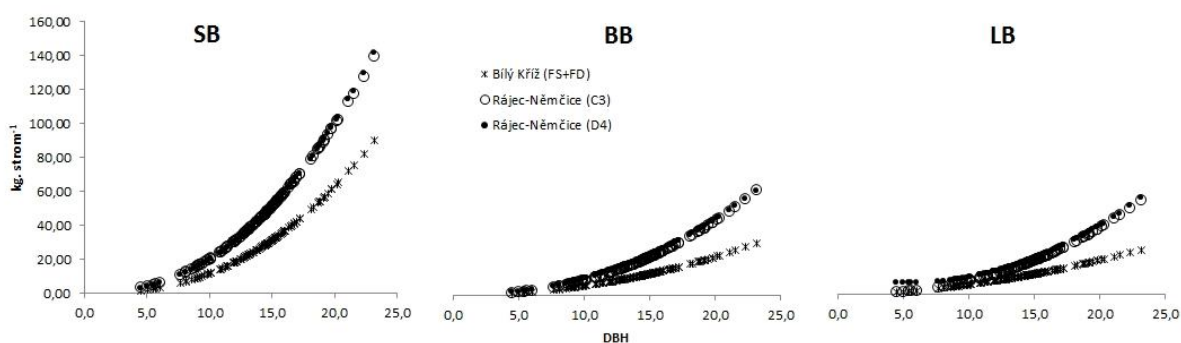
Průměrná roční sekvestrace uhlíku do jednotlivých orgánů stromu na porostní úrovni je uvedena v tabulce 40.

Tabulka 40: Průměrná roční sekvestrace uhlíku do jednotlivých orgánů stromu na porostní úrovni za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014). Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB) a celkovou biomasu (TB).

Lokalita	Plocha	Typ výchovy	Jednotka	SB	BB	LB	RB	TB
Rájec-Němčice	D4	Úrovňová probírka	t.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup>	2,71	1,28	1,13	0,66	5,78
			SD	0,80	0,38	0,33	0,19	1,69
	C3	Podúrovňová probírka	t.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup>	2,92	1,37	1,22	0,70	6,20
			SD	1,13	0,53	0,47	0,27	2,41
Bílý Kříž	FS	Intenzivní výchova	t.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup>	2,18	0,70	0,55	0,80	4,22
			SD	0,48	0,16	0,12	0,18	0,93
	FD	Mírná výchova	t.ha <sup>-1</sup> .rok <sup>-1</sup>	2,32	0,72	0,56	0,84	4,44
			SD	0,45	0,14	0,11	0,16	0,87

Průměrná roční sekvestrace uhlíku je vyšší v lokalitě Rájec-Němčice a to průměrně o hodnotu v intervalu 1,34–1,98 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku. Za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) tak bylo ve vrchovinné oblasti lokality Rájec-Němčice sekvestrováno o 8,05–11,89 t.ha<sup>-1</sup> více uhlíku než v horské oblasti Beskyd lokality Bílého Kříže.

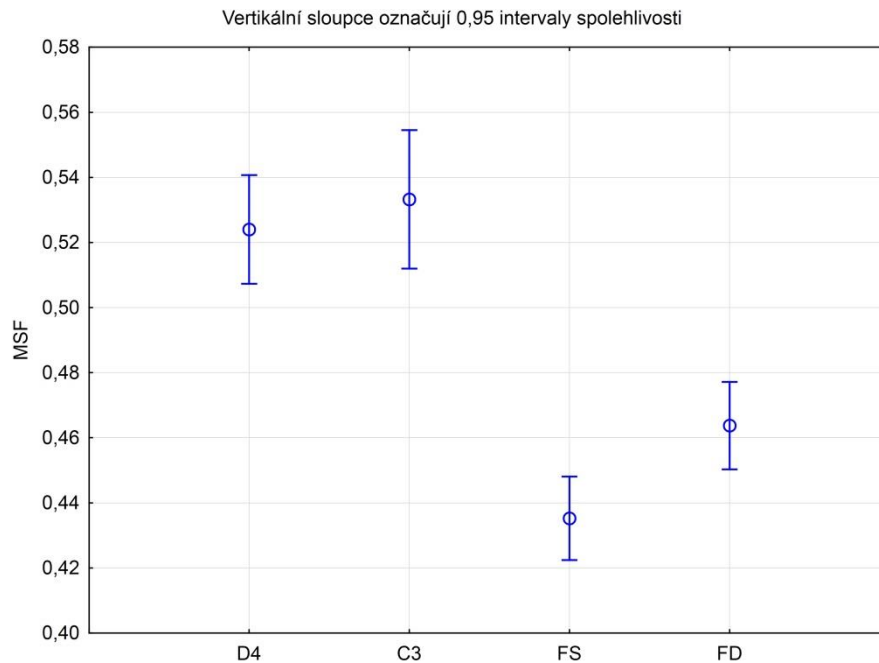
Navzdory tomu, že dynamika růstu DBH byla vyšší v lokalitě Bílý Kříž, tak zásoba a následná sekvestrace uhlíku ve sledovaném období byla nižší, než v lokalitě Rájec-Němčice. Jedním z důvodů tohoto stavu je rozdílná alometrie pro stanovení množství biomasy v šetřených lokalitách. Jak potvrzují výsledky kapitoly 3.2, tak i obrázek 53, způsob výchovy v lokalitě Rájec-Němčice nepřináší významný rozdíl v alometrickém vztahu mezi DBH a biomasou pro jednotlivé orgány stromu. Naopak významný rozdíl lze pozorovat v případě porovnání lokalit a jejich specifických alometrických vztahů pro stanovení biomasy pro jednotlivé orgány stromu. U nejsilnějších stromů (C3 – 2009, DBH = 23,2 cm) je tento rozdíl vyšší v případě biomasy kmene (SB) až 57 %, v případě biomasy větví (BB) až 101 % a v případě biomasy listoví (LB) až 114 % u jedinců z lokality Rájec-Němčice oproti stromu stejné dimenze v lokalitě Bílý Kříž (Obrázek 52).



Obrázek 52: Modelové zobrazení rozdílnosti alometrických vztahů pro stanovení biomasy kmene (SB), biomasy větví (BB) a biomasy listoví (LB) pro lokality Rájec-Němčice (plocha C3 (prázdná kolečka) a D4 (plná kolečka)) a Bílý Kříž (černé hvězdičky).

Jedním z důvodů pro rozdílnou alometrii kmene je rozdíl ve tvaru kmene ve sledovaných lokalitách (Obrázek 53). V lokalitě Rájec-Němčice byla prokázána statisticky významně vyšší průměrná výtvarnice kmene (MSF) oproti lokalitě Bílý Kříž. Metodika výpočtu MSF byla stejná jako v případě kapitoly 3.2. Rovněž byl potvrzen i rozdíl mezi plochami v lokalitě Bílý Kříž, tento rozdíl byl prokázán jako statisticky významný. V lokalitě Rájec-Němčice byla zjištěna téměř totožná MSF pro obě plochy. Samotný rozdíl v MSF však nemůže způsobit tak významné změny v biomase jednotlivých orgánů stromu. Jak lze ověřit zkušebním výpočtem, rozdíl ve výtvarnici

(Obrázek 53) vysvětluje totiž maximálně 30% rozdíl v objemu kmene a následně i v celkové hmotnosti kmene, a proto z hlediska rozdílnosti alometrie kmene musí hrát roli další faktory. Tímto faktorem bude nejspíš rozdílná hustota dřeva v rámci sledovaných lokalit. Hustota dřeva nebyl sledovaný parametr v rámci této práce, ale rozdílnost hustoty dřeva v rámci jednotlivých stanovišť je řešena v diskuzi této kapitoly (kapitola 3.5.4).



Obrázek 53: Výsledek porovnání průměrné výtvarnice kmene (MSF) pro jednotlivé výzkumné plochy pomocí statistické analýzy ANOVA.

### 3.5.4 Diskuze

#### 3.5.4.1 Rozdílnost alometrie

Stanovení zásoby uhlíku v lesních ekosystémech z pohledu Evropského a světového lesnictví je často diskutované téma, což dokládá i množství vědeckých prací (např. KAUPPI et al., 1992; KARJALAINEN, 1996; MARTIN et al., 1998; GOODALE et al., 2002). Z pohledu českého lesnictví se však tomuto tématu věnuje pouze omezená část prací (SVOBODA et al., 2006; CIENCIALA et al., 2008; MAREK et al., 2011). Podobně je na tom nedostatek prací s obecnými alometrickými rovnicemi pro odvození nadzemní a především podzemní biomasy pro Českou republiku. K dispozici jsou zde pouze lokální rovnice a to spíše pro mladší smrkové porosty (ČERNÝ, 1990; POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ, 2007; MARKOVÁ a POKORNÝ, 2011; KREJZA et al., 2013). Při stanovení biomasy se tak používají velice rozšířené globální modely, které jsou parametrizované pro evropské podmínky (MARKLUND, 1988; WIRTH et al., 2004). Jak ukazují výsledky této studie, použití nesprávného modelu pro danou lokalitu může přinést značně rozdílné výsledky ve stanovení biomasy u jednotlivých orgánů i při stanovení celkové biomasy.

Z hlediska tvorby dřeva je kromě výškového růstu důležitý i růst tloušťkový. Činností kambia a felogenu strom každým rokem zvětšuje svoji tloušťku. Každým rokem vzniká na stromě nový plášť dřeva a kůry. Vynesením jednotlivých tloušťkových přírůstků v závislosti na věku stromu vznikne křivka, která se nazývá tloušťková přírůstová křivka (GUTTENBERG, 1915, ZEIDE, 1993). Tato křivka má kulminační bod u smrku někde kolem věku 25 let. Výsledky této části práce zabývající se sekvestrací uhlíku mladých smrkových porostů (ve věku 28-34 let) tedy probíhaly těsně za kulminačním bodem tloušťkového přírůstu, a tudíž v období, kdy se dá předpokládat, že sekvestrace uhlíku do dřevní biomasy bude v blízkosti svého maxima. ASSMANN (1968) analyzoval růst smrkových kmenů v závislosti na stupni jeho uvolnění. Jeho výsledky uvádějí, že v případě jedince, který roste v zapojeném porostu, je tloušťkový přírůst skoro symetrický v rámci kmenového profilu, přičemž je dobře pozorovatelné maximum v horní části kmene. Zatímco tloušťkový přírůst uvolněných smrkových jedinců je alokovan na spodní, přízemní část kmene. To potvrzují i výsledky této studie, kde byl ve více uvolněných porostech v lokalitě Bílý Kříž zaznamenán větší tloušťkový přírůst za sledované období. Z těchto důvodů došlo i k vytvoření odlišných tvarů kmene v rámci sledovaných lokalit i v rámci výzkumných ploch s odlišnou porostní strukturou. Rozdílnost výtvarnice kmene pro jedince rostoucí v nížinách a v horském prostředí uvádějí CIOŠMAK (2002) a SOCHA a KULEJ (2007).

Jak ukazují výsledky této práce, důvodem rozdílné alometrie pro stanovení biomasy kmene jsou i rozdílné tvary kmenů ve sledovaných lokalitách. Za posledních několik desetiletí se v lesnické literatuře objevilo několik studií zabývajících se tvarem kmene a modelováním jeho průběhu od paty až po samotný vrchol (CLARK et al., 1991;

MAGUIRE a BATISTA, 1996; KOZAK 1988; 2004; LEITES a ROBINSON, 2004; JIANG et al., 2007). Důvodem tohoto zájmu bylo především odvození přesnějších hodnot objemu kmene, než nám poskytují objemové tabulky. Vlastní měření kmenových profilů a z nich odvozené vlastní objemové tabulky jen potvrzují hypotézu, že lokální modely nám poskytují přesnější informace pro danou lokalitu a použití převzatých modelů by mělo vždy předcházet ověření jejich relevance pro danou lokalitu (SVĚTLÍK et al., *In press*).

Rozdílnost v alometrických vztazích pro stanovení biomasy na jednotlivých stanovištích může být dána nejen rozdílem ve tvaru kmene (resp. výtvarnici kmene), ale i v hustotě dřeva, či rozdílnou morfologickou stavbou jednotlivých stromových orgánů. Rozdíly mezi stromy mohou být způsobeny dědičnou vlastností dřeva, a to zejména v případě hustoty dřeva (HANNRUP, 1999, SARANPÄÄ, 2003 a HANNRUP et al., 2004). LINDSTRÖM (1996) a WILHELMSSON et al. (2002) dále dodávají, že je mnohem snazší predikovat hustotu dřeva na porostní úrovni než na úrovni jednotlivých stromů. Výsledky Lindströma (1996) potvrzují, že genetická variabilita hustoty dřeva v průměru na porost je výrazně nižší než genetická variabilita mezi jednotlivými stromy. Toto tvrzení potvrzuje i studie MÄKINENA et al. (2007). Hustota dřeva je značně variabilní v rámci letokruhu, pohybuje se od cca 300 kg.m<sup>-3</sup> v případě jarního dřeva po cca 1000 kg.m<sup>-3</sup> u dřeva letního (OLESEN, 1982, MÄKINEN et al., 2002, Decoux et al., 2004). Vlastní výsledná hustota dřeva je pak tedy dána vzájemným podílem jarního a letního dřeva. Rozdíly v podílu jarního a letního dřeva v lokalitách Rájec-Němčice a Bílý Kříž se zabývali POKORNÝ et al. 2012. Výsledky jejich práce uvádí, že podíl jarního/letního dřeva byl 79/21 % v případě lokality Bílý Kříž a 46/54 % v lokalitě Rájec-Němčice. Vyšším podílem letního dřeva je dosažena vyšší celková hustota dřeva kmene stromů z vrchovinné oblasti lokality Rájec-Němčice, a tím i větší biomasa kmene srovnatelných dimenzí stromu. Obecně lze konstatovat, že dostatek srážek ve vyšších nadmořských výškách stimuluje přírůst jarního dřeva, zatímco vyšší letní teplota stimuluje přírůst letního dřeva, proto jsou limitující pro radiální růst v nižších nadmořských výškách srážky, zatímco ve vyšších nadmořských výškách je limitujícím faktorem teplota (DITTMAR a ELLING, 1999, WILSON a HOPFMÜLLER, 2001). SPLECHTNA et al. (2000) popisují negativní korelaci v případě stoupající nadmořské výšky a tloušťky letokruhu, tloušťky letního i jarního dřeva a i v případě hustoty letního dřeva. Dále v této studii nebyla statisticky prokázána negativní korelace mezi procentuálním zastoupením letního dřeva a nadmořské výšky, tento vztah naopak popisují jako signifikantní jiní autoři (LARSON, 1969, SCHWEINGRUBER et al., 1979, TRANQUILLINI, 1979). Hustota vlastního letokruhu závisí daleko více na procentuálním zastoupení letního dřeva než na samotné hustotě dřeva letního či jarního, protože rozdíly v hustotě jarního a letního dřeva nejsou tak velké jako v případě procentuálního zastoupení letního dřeva v rámci letokruhu. Toto tvrzení se opírá o publikované práce BARBOUR et al. (1994) a SPLECHTNA et al. (2000). Změny v procentuálním zastoupení letního dřeva v rámci letokruhu se



mohou lišit od nížin po polohy ve vysokých nadmořských výškách, stanoviště od stanoviště i rok od roku. Značnou rozkolísanost těchto vztahů potvrzuje i řada rozporuplných publikací, které se zabývají tímto tématem (WORALL, 1970, PETTY et al., 1990, CREGG et al., 1998, DUTILLEUL et al., 1998).

#### 3.5.4.2 Proporční rozložení biomasy stromu

Část této studie se věnuje funkční závislosti podílu biomasy mezi jednotlivými orgány stromu v závislosti na lokalitě, tloušťce a dosavadním způsobu výchovy. Nejenom, že byla tato funkční závislost nalezena, ale byly i odvozené jednoduché modely pro stanovení proporcionálního podílu biomasy jednotlivého stromového orgánu k celkové biomase. Tomuto tématu se věnuje několik prací, v nichž je ovšem tento vztah řešen v závislosti na měnícím se věku porostu (KANTOLA a MÄKELA, 2005, ILOMAKI et al., 2003; BERNINGER et al., 2005; LEHTONEN, 2005). Z prací na území České republiky nebo Slovenska se jedná o práce KONOPKY et al. (2015), ČIHÁKA et al. (2012), VINŠ A ŠIKA (1975) a ČERNÉHO (1990). Všechny práce souhrnně uvádějí změnu proporcí v biomase v závislosti na věku, a to s narůstajícím věkem nárůst procentuálního podílu biomasy kmene na úkor biomasy orgánů korunové části. Tento trend byl prokázán i v této studii u smrkové monokultury ve věku 34–36 let, závislost však nebyla šetřena v závislosti na věku, ale na dimenzi jedinců v rámci výzkumné plochy. Byl prokázán trend úbytku biomasy listoví a naopak nárůstu biomasy kmenů směrem s rostoucími dimenzemi jedinců porostní struktury. Průměrné hodnoty procentuálního rozložení biomasy jsou podobné, jak uvádí KANTOLA a MÄKELA (2006), pro mladé smrkové porosty, a to v poměru 30 % pro biomasu listoví, 30 % pro biomasu větví a 40 % pro biomasu kmenů. V této studii byl do celkové biomasy započítán i podíl biomasy kořenů. Průměrný podíl biomasy pro jednotlivé stromové orgány byl tak následující: 47 % SB, 20 % BB, 19 % LB a 13 % RB. VINŠ a ŠIKA (1975) uvádějí u mladých až středně starých vzorníků smrku podíl biomasy kmene v sušině 58,3 % v případě středně starých vzorníků a 54,1 % pro vzorníky mladé. Toto procentuální zastoupení biomasy kmene je vypočtené pouze z nadzemní biomasy. V případě započítání biomasy kořenů, které tvořily v našem případě ca 11-18 % z celkové biomasy, jsou výsledky zcela srovnatelné s výsledky VINŠE a ŠIKY (1975).

#### 3.5.4.3 Obsah uhlíku v jednotlivých orgánech stromu

Několik prací zabývajících se problematikou stanovení obsahu uhlíku v nadzemí biomase lesních porostů vychází z paušálního předpokladu, že v biomase smrku je podíl uhlíku 50 % (MATTHEWS, 1993, BROWN, 1997, MACLAREN, 2000, COOMES et al., 2002, ERIKSSON, 2006, CIENCIALA et al., 2008) s tím, že změny v jeho obsahu se mezi jednotlivými dřevními orgány pohybují v řádu několika jednotek procent. Weiss et al., (2000) například uvádějí průměrnou hodnotu koncentrace uhlíku v biomase dřeva

smrku 50,1 %. Ještě podrobnější studii provedli SVOBODA et al. 2006., kteří uvádějí koncentrace uhlíku pro všechny frakce biomasy stromu v následujících intervalech: 42,5–43,2 % pro obsah uhlíku v listoví, 41,4–45,3 % v biomase větví a 41,8–43,1 % v biomase kmene. Práce THOMASE a MARTINA (2012) uvádí koncentraci uhlíku pro boreální a temperátní lesy v intervalu 43,4–55,6 %. Dále uvádí signifikantní rozdíly v koncentraci uhlíku mezi jednotlivými biomy a signifikantní rozdíl mezi nahosemennými a krytosemennými dřevinnými druhy. Koncentrace uhlíků v biomase dřeva uvádí v intervalu 41,9–51,6 % pro tropické lesy a pro lesy mediteránu koncentraci uhlíku v intervalu 45,7–60,7 %. Dále THOMAS a MARTIN (2012) uvádějí, že jehličnaté dřeviny vykazují vyšší koncentraci uhlíku v biomase dřeva oproti dřevinám z oddělení krytosemenných ( $50,8 \pm 0,7$  % a  $47,7 \pm 0,3$  %). Hodnoty obsahu uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromu v rámci této práce se v některých případech lišily od výše citovaných autorů. Koncentrace uhlíku v biomase jehličí dosahovala 49,7 % v lokalitě Rájec-Němčice a 46,7 % v lokalitě Bílý Kříž. Obsah uhlíku v biomase větví dosahoval 51,0 % v lokalitě Rájec-Němčice a 48,4 % v lokalitě Bílý Kříž. Biomasa kmene obsahovala podíl uhlíku 48,1 % v lokalitě Rájec-Němčice a 47,2 % v lokalitě Bílý Kříž. Ve všech případech tak byl zjištěn nižší obsah uhlíku v jednotlivých orgánech smrku z lokality Bílý Kříž. SVOBODA et al. 2006 své hodnoty obsahu uhlíku v biomase získali z šetření v lokalitách z vyšších částí pohoří Šumavy, a tudíž se dá předpokládat obdobný trend, a to že s nadmořskou výškou klesá obsah uhlíku v jednotlivých frakcích biomasy stromu. Z lokality Rájec-Němčice uvádějí hodnoty obsahu uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromu v přehledu SVĚTLÍK et al. (*In press*), a to pro smrkový porost ve věku 106 let. Váženým průměrem (dle podílů biomasy jednotlivých orgánů a obsahu uhlíku v nich) dospěli k obsahu uhlíku v celkové biomase porostu ve výši 51,1 %, přičemž nejvyšší obsah uhlíku byl zjištěn v biomase živých větví (52,04 %) a naopak nejnižší v biomase mrtvých větví (50,20 %) a jehlicích (50,45 %).

Dosažené hodnoty se liší od často používané konstanty pro výpočet uhlíku z biomasy (50 %) nepatrně (o 0,3 % v lokalitě Rájec-Němčice a 2,4 % v lokalitě Bílý Kříž), avšak v případě aplikace této hodnoty na rozsáhlá území by mohlo dojít ke značnému nadhodnocení v kvantifikaci poutaného uhlíku lesními ekosystémy.

#### 3.5.4.4 Zásoba a sekvestrace uhlíku

Světové lesy významně přispívají k celkové uhlíkové bilanci, změnami v příjmu uhlíku mohou lesní ekosystémy působit jako důležité zpětnovazebné spotřebiče současné zvýšené vzdušné koncentrace oxidu uhličitého (MALHI et al. 1999). Z pohledu celosvětové sekvestrace uhlíku je důležitá role evropských lesů mírného pásma (KAUPPI et al., 1992; JANSSENS et al., 2003), obzvláště pak role lesů jehličnatých. Tento fakt dokládá i prezentovaná studie, kde smrkové porosty ve věku 34–36 let jsou schopny ve své biomase uložit významné množství uhlíku, a to od horských až po vrchovinné

oblasti ve výši od 53 t.ha<sup>-1</sup> do 108 t.ha<sup>-1</sup>. Což odpovídá průměrné zásobě uhlíku v biomase dřevin (95,4 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku), kterou uvádějí MAREK et al. (2011) pro převládající cílové hospodářské soubory. JANDL et al. (2007) uvádějí medián pro zásobu uhlíku v biomase smrkových porostů v Evropě ve výši 74 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku. Pro porovnání smrkových porostů uvádějí Jandl et al. (2007) i hodnoty mediánu zásoby uhlíku v biomase i pro další hlavní hospodářské dřeviny a jejich porosty: borovice lesní 60 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku, jedle bělokoré 100 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku, buku lesního 119 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku a dubu 83 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku. Chronologicky lze k těmto údajům uvést zásobu uhlíku dospělého smrkového porostu z lokality Rájec-Němčice, kde je ve smrkovém porostu ve věku 106 let fixováno 236,16 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku (SVĚTLÍK et al., *In press*). Dalším důležitým aspektem jsou jemné kořeny z pohledu uhlíkového cyklu lesních ekosystémů (NORBY et al., 2000; KONÔPKA 2009). Jemné kořeny nebyly započítány z důvodu jejich rychlé dynamiky změn. JACKSON et al. (1997) uvádějí, že až okolo jedné třetiny čisté primární produkce připadá právě na jemné kořeny a uvádějí hodnotu biomasy jemných kořenů ve výši 2,3 t.ha<sup>-1</sup> pro boreální lesy. Podobné hodnoty zásoby biomasy jemných kořenů uvádí i práce BØRJA et al. (2008), výsledky této práce udávají biomasu jemných kořenů v intervalu od 1,84 t.ha<sup>-1</sup> po 3,98 t.ha<sup>-1</sup>. Zároveň několik studií dodává, že odumřelá hmota kořenů je rovna (MCCLAUGHERTY et al., 1984) či dokonce několikanásobně vyšší (JOSLIN a HENDERSON 1987) než je opad listoví. Tím se přes odumřelou organickou hmotu kořenů dostává každým rokem významná část uhlíku do půdního prostředí lesního ekosystému. Lal (2005) uvádí hodnoty zásoby uhlíku v půdě temperátních lesů ve výši 122 t.ha<sup>-1</sup> a v lesích boreálních dokonce ve výši 296 t.ha<sup>-1</sup>. Podobných hodnot (150,5 t.ha<sup>-1</sup>) bylo dosaženo i v lokalitě Rájec-Němčice v práci Světlík et al. (*In press*).

Ve studované lokalitě vrchovinné oblasti Rájec-Němčice byla průměrná sekvestrace uhlíku do biomasy 6,20 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> na ploše C3 (plocha s podúrovňovým zásahem) a 5,78 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše D4 (plocha s úrovňovým zásahem) za sledované období šesti let od jara 2009 do podzimu 2014. Průměrná sekvestrace uhlíku do biomasy je v rámci výzkumných ploch horské oblasti lokality Bílý Kříž 4,44 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše FD a 4,22 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku na ploše FS za stejné šestileté sledované období. VALENTINI et al. (2000) uvádějí roční bilanci uhlíku od ukládání uhlíku v objemu 6,6 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> až po jeho uvolnění ve výši 1,1 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> pro lesní porosty napříč celou Evropou. Mezi jednotlivými typy porostů byla samozřejmě zaznamenána velká variabilita. V případě jehličnatých porostů VALENTINI et al. (2000) uvádějí hodnoty sekvestrace uhlíku ve výši od 4,3 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> (jehličnatý porost ve věku 29 let, Francie), 3,3–5,4 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> (jehličnatý porost ve věku 105 let, Německo) a 5,7–6,7 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> (jehličnatý porost ve věku 17–18 let, Velká Británie). Vyšší sekvestrace uhlíku bylo dosaženo v případě mladých porostů ve věku 14 let u smrku sitky (*Picea sitchensis*). V případě těchto porostů byla zaznamenána sekvestrace uhlíku do biomasy až ve výši 7,69–9,44 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> (z oblasti středního Irska, BLACK et al.,

2007). Podobnou práci publikovali i SUNDERS et al. (2012), kteří uvádějí u stejně starých porostů smrku sitky sekvestraci uhlíku do biomasy dokonce v rozmezí 13,24–18,94 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>.

Jedním z nejpřesnějších způsobů stanovení sekvestrace uhlíku mezi ekosystémem a atmosférou je její přímé měření pomocí techniky vířivé difúze (eddy-kovariance; MAREK et al., 2011). Takovéto zařízení je umístěno v lokalitě Bílý Kříž v porostu FS. MAREK et al., (2011) uvádějí sekvestraci uhlíku tohoto porostu v období 2003–2007, která byla měřena zmíněnou technikou vířivé difúze, ve výši 5,1 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. V roce 2009 poutal tento ekosystém 6,43 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> uhlíku (MAREK et al., 2011a). Pomocí biometrických měření a postupů, podle kterých byla odvozena sekvestrace uhlíku v této práci, bylo zjištěno vázání uhlíku na výzkumné ploše FS v roce 2009 ve výši 4,6 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, což lze považovat za dobrou shodu. Disproporce ve zjištěné sekvestraci uhlíku mezi biometrickým měřením a metodou vířivé difúze je z důvodu rozdílnosti ve velikosti šetřených ploch, resp. částí porostu odlišných strukturních parametrů, než má samotná inventarizovaná výzkumná plocha FS, neboť záběr metody vířivé difúze je tvořen stopou o rozměrech až několika desítek hektarů.

Chronologicky k sekvestraci uhlíku na výzkumné ploše Rájec-Němčice (plochy C3 a D4) lze uvést i publikované údaje o sekvestraci uhlíku dospělou smrkovou kmenovinou na této lokalitě (SVĚTLÍK et al., *In press*). Studovaná smrková monokultura ve věku 106–108 let fixovala průměrně 3,47 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku ročně do své biomasy (analyzované období 2010-2012). Srovnatelné výsledky jsou uváděny i v ostatních evropských pracích pro staré smrkové porosty: 4–7 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> (GRÜNWARD, BERNHOFER, 2007), 4 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> a 6,24 t.ha<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup> (BERNHOFER et al., 2003).

## 4. Závěr a doporučení pro praxi

### 4.1 Vliv historie výchovy na parametry porostu a alokaci biomasy

Odlišná porostní výchova má zásadní vliv na morfologické charakteristiky jednotlivých stromů, a to jak kmene, tak koruny. Na ploše s podúrovňovými zásahy a s méně intenzivní porostní výchovou došlo k vytvoření méně sbíhavého tvaru kmene oproti jedincům z plochy s intenzivnější porostní výchovou, u kterých došlo k vytvoření konického tvaru kmene. Rozdíl ve tvaru kmene se nejvíce projevil v částech kmene od nasazení živé koruny až po cca 80 % výšky kmene. Tento rozdílný tvar kmene vedl k rozdílné výtvarnici a objemovým rovnicím pro odvození objemu či biomasy kmene. Na ploše s „mírnější“ porostní výchovou došlo k vytvoření více objemného kmene při stejné dimenzi výčetní tloušťky kmene oproti ploše se „silnou“ porostní výchovou. Rozdílný tvar kmene vedl také k rozdílnému štíhlostnímu koeficientu kmene. V této studii byl potvrzen fakt, že i relativně malý rozdíl v hodnotě štíhlostního koeficientu hraje významnou roli z hlediska stability jednotlivých stromů a následně i stability celého porostu.

Další významná charakteristika z pohledu stability a produkce porostu je morfologie koruny a korunové vrstvy porostu. I v tomto případě došlo k vytvoření diametrálně odlišných morfologických charakteristik korun v závislosti na historii porostní výchovy. U porostu se slabou porostní výchovou došlo k vytvoření vysoko nasazených a úzkých korun. U porostu se silnou porostní výchovou došlo naopak k rozvoji hluboko nasazených a širokých korun. Největší rozdíl v morfologii korun v závislosti na porostní výchově byl zaznamenán v korunové projekci a korunovém poměru. Přestože se morfologie korun významně lišila v těchto parametrech, objem koruny byl takřka totožný u rozdílného způsobu výchovy. Takřka totožný objem koruny byl docílen diametrálně odlišným vertikálním profilem koruny, který se blížil tvaru válce na ploše s mírnou porostní výchovou, zatímco na ploše se silnou porostní výchovou byl vertikální profil koruny kuželovitého tvaru. Tyto tvary nejlépe popisuje parametr výtvarnice koruny, který byl 0,48 na ploše se silnou porostní výchovou, oproti 0,72 na ploše s mírnou porostní výchovou. Tento rozdílný tvar koruny vyústil i k odlišnému procentuálnímu zastoupení osluněné části koruny. Na ploše s mírnou porostní výchovou došlo k vytvoření takřka válcovité koruny, kde osluněná část koruny tvořila ca 20-40 % horní části koruny. Na ploše se silnou porostní výchovou došlo k vytvoření kuželovitého tvaru koruny s osluněnou částí koruny tvořící 40–60 % horní části koruny.

Vhodnou porostní výchovou tak mohou být docílené vhodné morfologické charakteristiky z pohledu stability jednotlivých stromů a následně i celého porostu. Morfologie korunové části má i značný vliv na současnou i budoucí produkci vlastního

porostu. V tomto případě měla silná výchova smrkových porostů v mládí za výsledek vznik stabilních jedinců s nízko položeným těžištěm z důvodu sbíhavosti kmene, hluboko nasazené koruny s těžištěm ve spodní části a velkým procentem osluněné části koruny. Tyto parametry dávají předpoklad vysokého potenciálu stability a produkce v následujícím období. Na druhé straně mírná porostní výchova v mládí měla za výsledek vznik méně sbíhavých kmenů s vysoko nasazenou korunou srovnatelného objemu koruny, což posouvá celé těžiště stromu směrem nahoru, a tím se snižuje mechanická stabilita daného jedince. Naopak z ekonomického pohledu se zdá být vhodnější mírná porostní výchova, která měla za výsledek plnodřevný kmen s menším zastoupením suků, a tudíž potencionálně větší zastoupení cenných sortimentů.

## 4.2 Ovlivňuje typ probírky alometrické vztahy pro odhad nadzemní biomasy?

Odhad zásoby biomasy pomocí alometrických vztahů se v současné době považuje za nejpřesnější způsob stanovení zásoby biomasy, ale i tento přístup má svá omezení a předpoklady. Jedním z těchto předpokladů je využití vhodných alometrických rovnic pro danou lokalitu. V případě, že pro danou lokalitu neexistují verifikované alometrické rovnice, přistupuje se k použití obecných alometrických rovnic. V takovémto případě je však nutné ověření správnosti těchto rovnic pro danou lokalitu.

V předložené práci bylo ověřováno, zda jsou alometrické vztahy ovlivněny předchozí porostní výchovou. Sestaveny byly alometrické rovnice pro odhad celkové nadzemní biomasy, biomasy listoví, kmene a větví pomocí jednoduše měřitelných parametrů stromu (DBH – výčetný tloušťka kmene, H – výška stromu, CI - kompetiční index). Tyto alometrické rovnice byly sestaveny pro plochy s aplikovaným odlišným typem probírky a rozdílnou intenzitou, konkrétně se silnou podúrovňovou probírkou a úrovňovou probírkou. Všechny alometrické vztahy vykazovaly vysokou hodnotu koeficientu determinace, přičemž nejvyšších hodnot bylo dosaženo s parametrem DBH. Výsledky sestavených alometrických rovnic ukazují, že typ probírkového zásahu neměl statisticky významný vliv na alometrické závislosti. Typ výchovného zásahu vyvolal největší rozdíl u alometrických rovnic pro odvození biomasy listoví a větví, ale ani tento rozdíl nebyl statisticky významný. Na ploše s aplikovanou úrovňovou probírkou mají jedinci nižšího sociálního postavení více biomasy listoví a větví než jedinci stejné tloušťky na ploše s podúrovňovou probírkou.

V práci byly sestaveny i alometrické rovnice pro odhad celkové nadzemní biomasy a biomasy jednotlivých orgánů, které obsahují více proměnných. Jednalo se o kombinaci výše zmíněných parametrů (DBH, H a CI). V případě sestavení multiregresního modelu, který byl založen na spojení výše zmíněných parametrů, bylo zaznamenáno zlepšení v predikci biomasy pouze u biomasy kmene a u nadúrovňového typu probírky i u biomasy větví. To znamená, že parametr DBH má sám o sobě velikou vypovídací schopnost při odvození biomasy a investování práce a času do zjišťování dalších dendrometrických charakteristik nepřináší významný efekt ve zlepšení odhadu biomasy.

Dalším efektivním způsobem pro odhad biomasy je použití expanzních faktorů (BEFs). Tato metoda stanovení biomasy navazuje na alometrické vztahy, ale tvoří most mezi vědeckou prací a potřebami lesního hospodářství kvantifikovat biomasu. Expanzní faktory jsou faktory, pomocí nichž se převede objem hroubí kmene ( $m^3$ ) na celkovou zásobu biomasy či biomasu jednotlivých orgánů stromu. V této práci byly sestaveny BEFs pro odhad biomasy listoví, větví, kmene a celkové nadzemní biomasy. U BEFs

nebyl zaznamenán žádný trend v rámci tloušťkové struktury porostu, a tudíž jsou uváděny jako jedno souhrnné číslo. Použitelnost těchto BEFs je od úrovně jednotlivých stromů až po odhad biomasy celých porostních skupin. Presentované BEFs byly sestaveny pro porost smrku ztepilého ve věku 31 let a dávají pracovníkům lesního hospodářství jednoduchý nástroj na odvození biomasy z objemu hroubí pro porosty rostoucí na srovnatelných stanovištích v přibližně stejném věku jako v případě této práce. Nedoporučuje se přílišná extrapolace této hodnoty na porosty výrazně jiného věku, protože jak uvádí jiní autoři, hodnota těchto expanzních faktorů je na věku závislá. Použití těchto hodnot v jiných věkových stupních by mohlo vést k hrubé chybě ve stanovení zásoby biomasy. V případě použití konstanty 0,5 pro odvození množství uhlíku v biomase, případně použitím přesně zjištěné hodnoty koncentrace uhlíku v biomase na dané lokalitě, je použití BEFs a těchto konstant jednoduchým způsobem odvození množství fixovaného uhlíku v biomase ze zjištěné zásoby hroubí kmenů.

V budoucnu může nastat stav, kdy lesní porosty nebudou hodnoceny z pohledu produkce, stability nebo ekosystémových služeb, ale z pohledu kolik jsou schopny poutat vzdušného uhlíku a následně, jak velké úložiště uhlíku plní. V takovém případě se jeví nasnadě právě použití expanzních faktorů (kapitola 3.3) a koncentrace uhlíku v biomase (kapitola 3.5), jako jeden ze způsobů odvození zásoby uhlíku v lesním porostu.



### 4.3 Tvar a velikost sociální plochy ke vztahu k růstu jednotlivých stromů

V modelování růstu stromů i celých porostů je nutné identifikovat hlavní, pokud možno snadno měřitelné faktory ovlivňující přírůst jednotlivých stromů a omezit zbytečné úsilí v procesu sběru mnoha parametrů a dat. Presentované výsledky disertační práce potvrzují hypotézu, že konkurence mezi jedincem a jeho sousedními stromy má velmi významný vliv na přírůst daného jedince. Potenciálně prostorově dostupná plocha daného jedince, která byla vymezena pouze na základě polohy sousedních jedinců, nevykazovala nejvyšší míru závislosti s přírůstem na výčetní kruhové ploše. Z výsledků je patrné, že pouze znalost polohy sousedních jedinců nemůže vést k přesnému odhadu budoucího růstu jedince. V případě přidání dalšího parametru a vážením potenciálně prostorově dostupné plochy parametry kompetitorů bylo dosaženo následující pořadí důležitosti měřených parametrů: výška stromu < korunová projekce < DBH < výčetní kruhová plocha stromu. Sociální plocha jedince, která se skládá z potenciálně prostorově dostupné plochy a je výrazně ovlivněna dimenzí zájmového jedince a sousedních stromů, se ukázala jako lepší způsob pro odhad přírůstu stromu. Sociální plocha dosahovala lepších predikčních schopností i než široce používaná metoda vážených Voroného polygonů. V případě zaměření se pouze na vážené vzdálenosti mezi šetřeným stromem a jeho sousedními stromy byla dosažena také vysoká míra korelace s růstem na výčetní kruhové ploše daného jedince. Korelace mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše stromu a váženými vzdálenostmi klesala v pořadí: průměrná > maximální > minimální vážená vzdálenost. Z těchto výsledků je patrné, že pro dosažení přírůstu daného jedince je zásadní otevřenost růstového prostoru jedince z jedné strany, než jeho utlačení ze strany druhé (tj. daný jedinec reaguje na sebemenší uvolnění růstového prostoru zvýšením dynamika růstu na výčetní kruhové ploše).

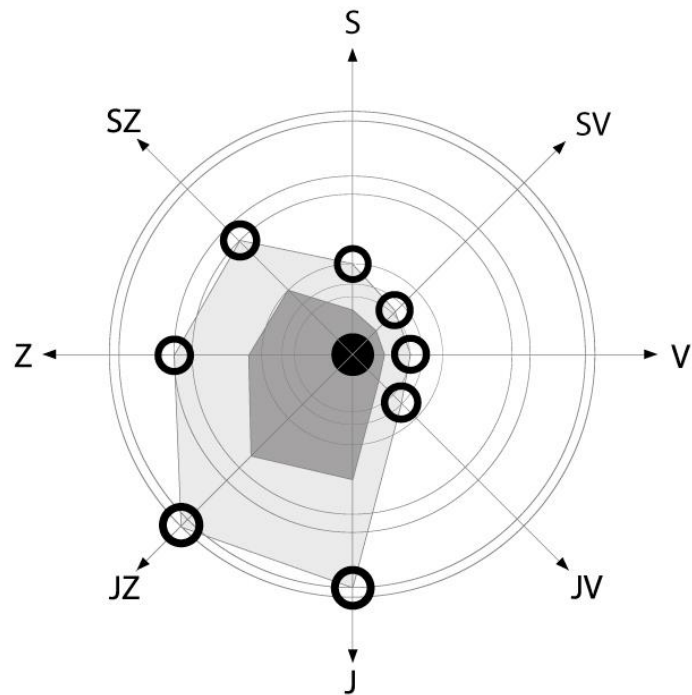
Délka koruny je parametr, který je snadněji měřitelný než korunová projekce. Tato studie ukazuje, že délka koruny (jako faktor odrážející korunový rozměr) je nejen snadněji měřitelná, ale je dokonce lepším parametrem pro odhad přírůstu stromu než korunová projekce. Toto tvrzení bylo potvrzeno jak u skupiny kompetičních indexů, které jsou vzdálenostně závislé, tak u skupiny kompetičních indexů kde není vstupním parametrem vzdálenost, ale kompetiční indexy byly vypočteny pouze na základě charakteristik šesti nejbližších stromů (tento kompetiční index byl v této studii označen zkratkou  $NTD_6$ ). V případě skupiny indexů  $NTD_6$  je DBH klíčovým parametrem pro predikci růstu. V případě skupiny indexů, které jsou vzdálenostně závislé, bylo nalezeno více parametrů, které poskytovaly dobré výsledky v případě predikce růstu stromu na výčetní kruhov základně. Těmito parametry byly DBH, výčetní kruhová plocha jedince a délka koruny. Tato skupina indexů s těmito parametry vykazovala vyšší korelaci s přírůstem na výčetní kruhové ploše kmene stromu. V případě skupiny indexů  $NTD_6$ ,

pouze větší sousední stromy, než je šetřený strom, hrají klíčovou roli v predikci růstu, zatímco v případě vzdálenostně závislých indexů byla dosažena lepší predikce růstu v případě zahrnutí všech sousedních stromů.

V této práci byla představena řada lineárních modelů pro predikci růstu na výčetní kruhové ploše jedince na základě jednoduše měřitelných parametrů stromu a jeho růstového prostoru, který je charakterizován sociální plochou, nebo různými kompetičními indexy. Použitelnost těchto modelů je u smrku ztepilého v tloušťkovém rozmezí DBH od 5,3 cm po 54,7 cm. Nejlepší predikce přírůstu na výčetní kruhové ploše stromu bylo dosaženo v případě lineárního modelu zahrnujícího tyto parametry: sociální plocha, DBH, výška stromu a délka živé koruny. Koeficient determinace tohoto modelu s přírůstem na výčetní kruhové základně za sledované pětileté období byla 0,90. Tato studie potvrzuje, že kompetice hraje důležitou roli při odhadu přírůstu stromu.

Při výchovných zásazích v lesních porostech hospodářských lesů dochází k pěstebním zásahům, při kterých se uvolňují vybrané - cílové stromy, a tím se iniciuje jejich budoucí přírůst. S výjimkou schématických zásahů dochází k individuálnímu výběru ať už vybraných jedinců, kteří mají být uvolněni, tak i jedinců, kteří budou odstraněni. V těchto případech pracovníci lesního hospodářství rozhodují o uvolnění na úrovni jednotlivých stromů. Tato studie podává výsledky, díky nimž lze předpokládat větší iniciaci růstu u vybraného jedince v závislosti na tvaru a velikosti jeho sociálního prostoru, resp. uvolnění či utlačení v závislosti na orientaci ke světovým stranám. Výsledky ukazují, že v případě uvolnění růstového prostoru jedince směrem k jihozápadu (jih a západu, tj.  $180^\circ - 270^\circ$ ) se dá předpokládat vyšší dynamika přírůstu, než při směru uvolnění ve směru jiných světových stran. Z pohledu utlačení jedince je z výsledku zřejmé, že nejmenšího omezení přírůstu bylo zaznamenáno u jedinců, kteří měli největší utlačení ze severovýchodu až jihovýchodu (tj.  $45^\circ - 135^\circ$ ). Na základě dosažených výsledků bylo možné znázornit (Obrázek 54) „ideální“ potenciálně prostorově dostupnou plochu a „ideální“ sociální plochu ve smyslu orientace ke světovým stranám. Tyto poznatky lze v lesním hospodářství využít v případě uvolňování cílových stromů a tím maximalizovat jejich budoucí přírůst.

Jednotlivé rozdíly ve tvaru sociální plochy jsou důležitým parametrem vyjadřujícím míru kompetice mezi jedinci. Tato problematika si proto zaslouží více pozornosti v budoucím výzkumu s potenciálem využití v praktickém lesním hospodářství. Obzvláště v době výrazně se měnících podmínek prostředí a změn v růstových strategiích různých druhů lesních dřevin.



Obrázek 54: Schématické znázornění „ideální“ potenciálně prostorově dostupné plochy (světle šedá plocha) a „ideální“ sociální plochy z pohledu orientace ke světovým stranám. Plné černé kolečko značí záměrný strom, prázdná kolečka značí sousední jedince stromu.

#### 4.4 Vliv typu a intenzity probírkového zásahu na sekvestraci a obsah uhlíku

Typ a intenzita pěstebního zásahu vedl k odlišnému proporčnímu rozdělení biomasy v mladých porostech smrku ztepilého s ohledem na jejich tloušťkovou strukturu. Úrovňový typ probírky měl za efekt zvýšený podíl biomasy listoví u podúrovňových jedinců. Tento vysoký podíl biomasy listoví rapidně klesal s narůstající tloušťkou stromů a naopak narůstá biomasa kmene. Stejný trend byl zaznamenán v případě podúrovňového typu probírky, ale biomasa listoví nedosahovala tak vysokých hodnot jako v případě úrovňové probírky. Na ploše s podúrovňovým typem probírky bylo dosaženo největšího procentuálního zastoupení biomasy kmene ze všech sledovaných ploch. Proporční rozdělení biomasy v případě této probírky bylo 50 % biomasy kmene, 20 % biomasy větví, 19 % biomasy listoví a 11 % biomasy kořenů. Z pohledu lesního hospodářství smrkových porostů, kde je stále kladen důraz na produkci dřeva a ekonomiku, se podúrovňový typ probírky jeví ve smrkových porostech jako ideální, což odpovídá minulé i současné lesnické praxi. Pro potřeby kvantifikace procentuálního podílu biomasy byly sestaveny modely, které na základě výčetní tloušťky a typu probírky dávají odhad, kolik procent biomasy je fixováno v jednotlivých orgánech stromu.

Pro stanovení zásoby uhlíku z biomasy stromu se běžně používá konstantní přepočtový koeficient 0,5 (vyjadřující 50% podíl). Výsledky této práce ukazují, že procentuální podíl uhlíku v biomase se může lišit mezi jednotlivými lokalitami díky způsobu výchovy a mezi jednotlivými orgány stromu. Největší obsah uhlíku v biomase byl zaznamenán v případě biomasy větví v lokalitě Rájec-Němčice, která reprezentuje smrkové porosty vrchovinné oblasti a naopak nejnižší obsah uhlíku byl zaznamenán v biomase jehlic na lokalitě Bílý Kříž, která reprezentuje horské polohy. Výsledky analýzy obsahu uhlíku v biomase naznačují rozdíl v obsahu uhlíku v orgánech smrku pěstovaného v různých nadmořských výškách. Obsah uhlíku klesal ve všech orgánech smrku s vyšší nadmořskou výškou. Použití jednotné hodnoty přepočtového koeficientu 0,5 pro odvození vázaného uhlíku v biomase lesních porostů může vést ke značné chybě. S použitou konstantou 0,5 je odhadovaná zásoba uhlíku v lesích České republiky 272 Mt, v případě aplikace konstanty z této práce (pro horskou oblast, tj. 46,7 %) by byla tato zásoba odhadnuta na 254 Mt, což dělá rozdíl v odhadu 18 Mt zásoby uhlíku. Jak uvádí několik významných prací, jehličnaté dřeviny mají vyšší obsah uhlíku oproti dřevinám krytosemenným. Z těchto výsledků je zřejmé, že tato hodnota je mírně nadhodnocena pro stanovení vázaného uhlíku v biomase porostů smrku ztepilého pro aplikaci na větší územní celky. Měla by být tedy věnována větší pozornost stanovení přesné konstanty pro odvození zásoby uhlíku z biomasy lesních porostů.

Výsledky práce ukázaly, že mladá vrchovinná a mladá horská smrčina jsou významným úložištěm uhlíku. V těchto porostech (ve věku 32, respektive 34 let) je v celkové biomase uloženo 53–108 t.ha<sup>-1</sup> uhlíku. Tyto porosty ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014) dosáhly průměrné výše roční sekvestrace uhlíku v intervalu 4,2–6,2 t.ha<sup>-1</sup>. Porosty v oblasti Dražanské vrchoviny se ukázaly jako efektivnější z pohledu sekvestrace uhlíku oproti porostům horské polohy Beskyd. Dle typu a intenzity probírky se jeví porost s podúrovňovým typem probírky a méně intenzivní výchovou, jako vhodnější způsob výchovy z pohledu sekvestrace uhlíku, čemuž odpovídají i závěry z ostatních evropských prací, které se zabývají obhospodařováním lesů z pohledu sekvestrace uhlíku. Výsledky ukazují i na značný rozdíl v alometrických vztazích pro stanovení biomasy jednotlivých orgánů smrku z vrchovinné a z horské oblasti. Tento příklad je demonstrován na alometrických rovnicích pro odvození biomasy kmene, která se lišila o 57 % v rámci stejné dimenze DBH v rámci sledovaných lokalit vrchoviny a horské polohy. Jedním z důvodů rozdílné alometrie byl prokázán rozdílný tvar kmene (vyjádřený nepravou výtvarnicí kmene), ale jak bylo potvrzeno kontrolním výpočtem, tvar kmene vysvětluje pouze 30 % v rozdílu odhadu. Zbývající rozdíl již nemůže být morfologického původu, ale musí existovat rozdíly na úrovni anatomické stavby dřeva.

Závěrem lze konstatovat, že z pohledu uhlíkového hospodářství musí být porostům smrku ztepilého věnována značná pozornost i z hlediska mechanické stability. Tyto porosty jsou pod stále větším klimatickým stresem díky extrémům a dalším projevům klimatické změny. Je tedy zřejmé, že pokud tyto porosty nebudou funkční z hlediska stability, tak ani nemohou plnit funkci dlouhodobého úložiště uhlíku a tím se podílet na mitigaci chodu globální klimatické změny.

## 5. Conclusions

### 5.1 The effect of thinning history on the stand parameters and biomass allocation.

The thinning type had a huge impact on the morphological characteristics of particular trees in both the stem and the tree crown. A Less convergent shape of the stem was created on the plots with thinning from below and less intensive thinning, compared to the conical shape of the stem on plots with heavy thinning. The most apparent changes in the stem shape were observed in the part situated between the live crown base and ca. 80 % of the tree height. There were a different stem form and different volume equations (to derive stem volume or biomass) as a result of the differently shaped stems. Stems on plots with "less intensive" thinning were more voluminous compared to stems with the same DBH dimension on plots with "heavy" thinning. The different shape of the stem led to a difference in slenderness coefficient, as well. It was found that slenderness ratio had a substantial impact on the mechanical stability of trees, even in those cases where the difference in the slenderness ratio values was relatively small.

The crown morphology and crown layer features of the stand are other important characteristics affecting stability and production. Morphologically different crowns were created depending on the thinning history. Narrow crowns with relatively high crown base were created on the plot with less intensive thinning. Moreover, there were widely and deeply deployed crowns. The biggest difference in the crown morphology caused by thinning was observed in the crown projection and the crown ratio. Although the morphology of crowns differed significantly for both parameters, crown volume was almost the same among different thinning approaches. The founding of similar crown volumes despite different crown projections and crown ratios was caused by the different crown shapes. A cylinder shaped crown was created in the case of the less intensive thinning, whereas in the case of heavy thinning a conical shaped crown was created. These different shapes were most accurately described by the parameter of crown form (MCF), which was 0.48 on the plot with heavy thinning compared to 0.72 on the plot with less intensive thinning. The different shapes of the crowns resulted in differences in the portions of the crown that were shaded or exposed to the sun. In the case of a cylindrical crown, created under less intensive thinning, the portion of the crown exposed to the sun was 20-40% of the top part of the crown. However, in the case of a conical crown, created under heavy thinning, the portion of the crown exposed to the sun was 40-60% of the top part of the crown.

Using an adequate thinning approach leads to suitable morphological characteristics of the crown in terms of the stability of individual trees and consequently of the forest stand. The morphology of the tree crown has a considerable influence on the current, as well as the future, stand production. Heavy thinning led to the formation of stable pole spruce stands. These individuals had a low centre of gravity due to the convergence of the stem, a low set tree crown and a high percentage of the sunlit part of the tree crown. These parameters led to the assumption of a high potential production and stability in the following growing period. Less intensive thinning in young trees led to the formation of less converging stems with a high tree crown and a similar crown volume compared to heavy thinned stands. The whole centre of gravity of the tree is moved upward, thus reducing the mechanical stability of the individual tree. However, from an economic viewpoint, a less intensive thinning in young trees resulted in non-tapering stems with a lower amount of knots and therefore a potentially greater value of assortments.

## **5.2 Is allometry for aboveground organ's mass estimation in young Norway spruce stand affected by different type of thinning?**

The estimation of biomass amount by allometric relationships is currently considered the most accurate method for determining biomass in forest ecosystems, but this approach has its own limitations and requirements. One of these presumptions is the usage of appropriate allometric equations for a given location. In the case where a verifiable allometric equation is not available for a particular site, estimation of biomass is derived by the use of general allometric equations. In this case, it is necessary to verify the accuracy of these equations for the particular site.

The allometric relationships and their functions under different thinning regimes were verified. Allometric equations for estimating the total aboveground biomass, foliage, stem and branch biomass, using easily measurable parameters of the tree (DBH – diameter at the breast height, H - height of the tree, CI – Competition index), were compiled. These allometric equations were developed for plots under different thinning treatments, especially heavy thinning from below and thinning from above. All allometric relationships exhibited a high value of correlation – the highest with DBH. Results showed that the thinning type had no significant effect on the allometric relationships. The thinning type used resulted in different allometric equations for leaf and branch biomass, but these differences were not significant. Trees with a lower social status had more leaf and branch biomass under thinning from above compared to the trees with the same DBH growing under thinning from below.

Allometric equations containing multiple variables were constructed for the estimation of total aboveground biomass and the biomass of various tree organs. It was a combination of the parameters (DBH, H and CI) which were mentioned above.

Multiple regressions brought improvements only in the prediction of stem biomass and branch biomass on the plot with thinning from above. It means that the parameter DBH itself had great explanatory power in the derivation of biomass by allometric relationship. Time and effort invested into measuring other dendrometric characteristics brought only slight improvement in biomass estimation.

The usage of expansion factors (BEFs) is considered to be another effective way of estimating biomass. This method of determining biomass follows the allometric relationships and creates a connection between the scientific work and the needs of the forestry sector in terms of quantifying biomass. Expansion factors are used to convert the volume of timber ( $\text{m}^3$ ) into the total tree biomass or biomass (t) of various tree organs. BEFs for estimating the biomass of leaves, branches, stem and total aboveground biomass were constructed in this thesis. There was no trend for BEFs across the stand thickness structure and therefore they were presented as one aggregate number. Presented BEFs were developed for a 31 year old Norway spruce stand and could provide a simple tool for foresters to derive biomass from the volume of stand timber on comparable sites of approximately the same age. The usefulness of the investigated BEFs is to estimate the biomass from the level of individual trees to groups of stands or whole regions. BEFs are an easy way to derive the amount of fixed carbon in the biomass of the forest ecosystem both if you use a constant of 0.5 to derive the amount of carbon or exact values of carbon concentration in the biomass on the site.

### **5.3 The shape and size of the social area in relationship to the growth of particular tree**

In forest growth modelling it is necessary to identify the main measurable factors influencing the increment of a particular tree to reduce unnecessary efforts in the process of collecting data. The results supported the hypothesis that the competition between neighbouring trees had an important effect on the tree increment. Only spatially delineated area without considering the sizes of neighbouring trees showed low correlation ( $R^2=0.59$ ) with a tree basal area increment. Thus, tree spacing without knowledge of the tree size dimensions cannot lead to appropriate estimation of the tree increment. The order of weighted parameters (tree height < crown projection < DBH < Basal area) was obtained. Tree social area influenced by an available growing area together with the size of neighbouring trees, was found to be a better tool for estimation of tree increment ( $R^2=0.84$ ) and provided higher correlation than the commonly used method of weighted Voronoi polygons ( $R^2=0.79$ ). Using the weighted distances between certain sampled trees and the nearest neighbouring trees can result in very accurate tree increment estimation



( $R^2=0.85$ ). The correlation between tree increment and the weighted distances decreased in consequence of mean, maximal and minimal weighted distances.

The crown length is an easier parameter to measure than the crown projection. This study showed simultaneously that the crown length (as a factor reflecting the crown dimension) was found to be a better parameter for the tree increment estimation than the crown projection. It was confirmed for both distance-independent and distance-dependent competition indexes. In a group of distance-independent competition indexes, DBH seemed to be a key parameter for the tree increment prediction. The comparison among distance-dependent indexes showed that the following parameters (DBH, basal area - BA and crown length - CL) provide good correlation with individual tree increment with an accuracy of  $R^2 > 0.75$ . In the case of distance-dependent indexes, all neighbouring trees are important, including the trees with smaller dimensions than the sample tree. However, in distance-independent indexes, only trees larger than the sample tree are important.

The best linear model for the estimation of the individual tree basal area increment reached a correlation of  $R^2=0.90$  and required tree parameters of: social area, DBH, tree height and crown length as inputs. This study confirmed that tree competition plays an important role in tree increment estimation. Therefore, models for estimating tree increment should include a parameter for tree competition and these models should be widely used for tree growth prediction, especially at present when the climatic conditions are rapidly changing.

Forest tending is usual in commercial forests. During this operation competitors of the target trees are selected and removed, thus improving their future increment. Exception of the geometric thinning, thinning commonly leads to an individual choosing which trees will be released and which individuals will be removed. Foresters decide about releasing of target trees in such cases. The results showed greater initial growth of the target trees, depending on the shape and size of the social area of the particular tree. This was influenced by the rate of releasing or suppression and by the orientation of releasing or suppression, respectively. The results showed that if the growth space of a particular tree was released from the southwest ( $180^\circ - 270^\circ$ ), we can assume a greater dynamic of increment than when releasing comes from other directions. From the viewpoint of suppression, it was evident that the greatest increment of the particular trees was observed when they were suppressed from the northeast to the southeast ( $45^\circ - 135^\circ$ ). Based on these findings, it was possible to create the "ideal" potentially available area and "ideal" social area of a particular tree and their orientation (Fig. 54, chapter 4.3). This set of findings can be used effectively in forestry tending practice to maximize the future growth of the target trees.

Partial differences in the form of social areas are important parameters for expressing the competition between trees. Therefore, this issue deserves more attention in future research with the potential for use in practical forestry, especially under changing environmental conditions and changes in the growth strategies of forest tree species.

#### **5.4 The impact of thinning type and intensity to carbon content and sequestration**

It was clearly found that thinning leads to different proportional distributions of biomass within the stand; this is also influenced by its thickness structure. Thinning from above resulted in a higher proportion of foliage biomass on suppressed trees in Norway spruce pole stands. The high proportion of foliage biomass rapidly decreased with the increasing of tree thickness. The proportion of foliage was replaced by stem biomass. The same trend was observed in the case of thinning from below, but foliage biomass did not reach such high values as in the case of thinning from above. The plot with thinning from below showed the largest percentage of stem biomass of all the studied types of tending. The proportional distribution of biomass in the case of this thinning approach was 50% of stem biomass, 20% of branch biomass, 19% of leaf biomass and 11% of root biomass. From the viewpoint of spruce stands tending, where there is still an emphasis on the timber production and the economy, the thinning from below seems to be ideal. This corresponds with past and current forestry practices. The models based on DBH and thinning treatment were assembled for the purpose of quantifying the proportional distribution of biomass. The result of these models is a forecast of the percentages of biomass fixed in the particular organs of the tree.

A constant factor of 0.5 (i.e. 50% concentration of carbon in tree biomass) is commonly used to determine the carbon stock of tree biomass. It was observed that the concentration of carbon in the biomass can vary between localities, thinning treatment and between different organs of the tree. The biggest content of carbon was observed in the branch biomass in the Rájec-Němčice plot, which represents the pure spruce stand in the upland zone. By contrast, the lowest carbon content was recorded in the needle biomass in the Bílý Kříž plot, which represents a mountain zone. The results of the carbon content analysis indicated the difference in the carbon content in the organs of spruce trees growing within different altitudinal zones. The carbon content decreased from lower to higher altitudes in all organs of spruce. Using a single value (coefficient 0.5) for the derivation of fixed carbon in the biomass of forest ecosystems may lead to considerable error.

Using the coefficient of 0.5 to calculate the carbon stock of forests in the Czech Republic resulted in a carbon stock estimate of 272 Mt, while the value calculated

using the constant from this work (i.e. 0.467 created just for the mountain zone) resulted in a value of 254 Mt. Therefore, the different coefficients resulted in a difference of 18 Mt of carbon stock. As it was reported by several major studies, conifers have higher carbon content than the angiosperms species. Therefore, the value of the constant 0.5 is probably an overestimate. For this reason, it should be the aim of future studies to determine accurate constants for deriving the carbon stock from biomass.

It was found that the Norway spruce pole stands growing in mountain and highland zones are an important carbon sink. In these stands (aged 32 and 34 years) there is 53 to 108 t ha<sup>-1</sup> of the total carbon in the biomass. The average annual carbon sequestered in these stands varied from 4.2 to 6.2 t ha<sup>-1</sup> during the observed period (spring 2009 – autumn 2014).

The spruce stands growing on the highland (Drahanská vrchovina) were shown to be better in terms of carbon sequestration compared to spruce stands growing within the mountain zone (Moravskoslezské Beskydy). The stands tended by thinning from below and less intensive thinning seemed to be better in terms of carbon sequestration. This corresponds with the common conclusions of other European papers that deal with forest management and carbon forestry. In carbon forestry attention must be paid to the stand mechanical stability against climatic factors and manifestations of climate change. If the stands are not vital and stable, they can't perform the function of a long-term carbon sink.

## 6. Seznam použité literatury

- AAKALA, T., FRAVER, S., D'AMATO, A.W., PALIK, B., 2013. Influence of competition and age on tree growth in structurally complex old-growth forests in northern Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management* 308, 128-135.
- ABETZ, P., 1975. Eine Entscheidungshilfe für die Durchforstung von Fichtenbeständen. *AFZ Allgemeine Forstzeitschrift* 30, 666-667. . [English abstract and summary]
- ABETZ, P., UNFRIED, P., 1984. Fichten-Standraumversuche im Forstbezirk Riedlingen/Donau, *AFZ Allg. Forst- und Jagdzeitung* 155 (4/5), 89-110. [English abstract and summary]
- ABOAL, J.R., AREVALO, J.R., FERNANDEZ, A., 2005. Allometric relationships of different tree species and stand above ground biomass in the Gomera laurel forest (Canary Islands). *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 200 (3), 264-274.
- ALAM, A., KILPELÄINEN, A., KELLOMÄKI, S., 2008. Impacts of thinning on growth, timber production and carbon stocks in Finland under changing climate. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23, 501-512.
- ALEM DAG, I.S., 1978. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. Canadian Forestry Service, Department of the Environment. Forest Management Institute Information Report FMR-X-108.
- ANDERSON, F., BRÆKKE, F.H., HALLBÄCKEN, L., 1998. Nutrition and growth of Norway spruce forests in a Nordic climatic and deposition gradient. TemaNord, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 255 s.
- ANDREAE, M.O., ARTAXO, P., BRANDAO, C., CARSWELL, F.E., CICCIOLI, P., DA COSTA, A.L., CULF, A.D., ESTEVES, J.L., GASH, J.H.C., GRACE, J., KABAT, P., LELIEVELD, J., MALHI, Y., MANZI, A.O., MEIXNER, F.X., NOBRE, A.D., NOBRE, C., RUIVO, M.D.L.P., SILVA-DIAS, M.A., STEFANI, P., VALENTINI, R., JOUANNE, J., VON WATERLOO, M.J., 2002. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: the LBA-EUSTACH experiments. *Journal of Geophysical Research* 107 (D20), 1-25. doi: 10.1029/2001JD000524.
- ANDREASSEN, K., TOMTER, S.M., 2003. Basal area growth models for individual trees of Norway spruce, Scots pine, birch and broadleaves in Norway. *Forest Ecology and Management* 180, 11-24.
- ASSMANN, E., 1968. *Náuka o výnose z lesa*. Bratislava: Príroda, vydavateľstvo poľnohospodárskej literatury, 488 s.
- ASSMANN, E., 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon Press Ltd, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig.
- AURENHAMMER, F., 1991. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure, *ACM Computing Surveys* 23 (3), 345-405.
- AVERY, T.E., BURKHART, H.E., 1983. *Forest measurements*. 3rd Edition. McGraw-Hill, New York, USA.
- BACHMANN, M., 1998. Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. *Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern*. Forstl Forschungsber München 171, 261 s.
- BALDOCCHI, D., FALGE, E., GU, L.H., OLSON, R., HOLLINGER, D., RUNNING, S., ANTHONI, P., BERNHOFER, C., DAVIS, K., EVANS, R., FUENTES, J., GOLDSTEIN, A., KATUL, G., LAW, B., LEE, X.H., MALHI, Y., MEYERS, T., MUNGER, W., OECHEL, W., PAW, U.K.T., PILEGAARD, K., SCHMID, H.P., VALENTINI, R., VERMA, S., VESALA, T., WILSON, K., WOFSY, S., 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82, 2415-2434.
- BARBOUR, J.R., FAYLE, D.C.F., CHAURET, G., COOK, J., KARSH, M.B., RAN, S., 1994. Breast-height relative density and radial growth in mature jack pine (*Pinus banksiana*) for 38 years after thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 2439-2447.
- BARNEY, R.J., VAN CLEVE, K., SCHLENTNER, R., 1977. Biomass distribution and crown characteristics in two Alaskan *Picea mariana* ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* 8 (1), 36-41.

- BATTAGLIA, M., CHERRY, M.L., BEADLE, C.L., SANDS, P.J., HINGSTON, A., 1998. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiology* 18, 521-528.
- BELLA, I.E., 1971. A new competition model for individual trees. *Forest Science* 17, 364-372.
- BENGSTON, L., 1997. A numerical simulation of anthropogenic climate change. *Ambio* 26 (1), 56-65.
- BERGH, J., FREEMAN, M., KELLOMÄKI, S., LINDER, S., 2006. Impacts of climate change on the forest growth and the production potentials of bio-fuels in Forestry. In: KELLOMÄKI, S., LEINONEN, S. (Eds.). *Impacts of climate change on renewable energy sources and their role in Nordic and Baltic energy systems: case of bio-fuels. Research notes. University of Joensuu, Finland*, 19-37.
- BERNHOFER C., AUBINET M., CLEMENT R., GRELE A., GRÜNWARD T., IBROM A., JARVIS P., REBMANN C., SCHULZE E.D., TENHUNEN J.D. 2003. Spruce forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fir): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants. In: Valentini, R. (ed.): *Fluxes of carbon, water and energy of European forests: with 46 tables. Berlin, Springer: 99–124. Ecological Studies, 163.*
- BERNINGER, F., COLL, L., VANNINEN, P., MÄKELÄ, A., PALMROTH, S., NIKINMAA, E., 2005. Effects of tree size and position on pipe model ratio. *Canadian Journal of Forest Research* 35(6), 1294-1304.
- BIGING, G.S., DOBBERTIN, M., 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *Forest Science* 41 (2), 360-377. ISSN 0015-749X.
- BINKLEY, C.S., VAN KOOTEN, G.C., 1994. Integrating climatic change and forests: economic and ecologic assessments. *Climatic Change* 28, 91-110.
- BINKLEY, D., 1986. *Forest nutrition management. New York: John Wiley and Sons, 299 s.*
- BLACK, K., BOLGER, T., DAVIS, P., NIEUWENHUIS, M., REIDY, B., SAIZ, G., TOBIN, B., OSBORNE, B., 2007. Inventory and eddy covariance – based estimates of annual carbon sequestration in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) forest ecosystem. *European Journal of Forest Research*, 126, 167-178. doi: 10.1007/s10342-005-0092-4.
- BLACKBURN, P., PETTY, J.A., MILLER, K.F., 1988. An assessment of the static and dynamic factors involved in windthrow. *Forestry* 61, 29-44.
- BOHLMAN, S., O'BRIEN, S., 2006. Allometry, adult stature and regeneration requirement of 65 tree species on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Tropical Ecology* 22(2), 123-136.
- BOIVIN, F., PAQUETTE, A., PAPAİK, M., THIFFAULT, N., MESSIER, CH., 2010. Do position and species identity of neighbours matter in 8-15-years-old post harvest mesic stands in the boreal mixedwood? *Forest Ecology and Management* 260 (7), 1124-1131.
- BOLTE, A., RAHMANN, T., KUHR, M., POGODA, P., MURACH, D., VON GADOW, K., 2004. Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Plant Soil* 264, 1-11.
- BØRJA, I., DE WIT, H.A., STEFFENREM, A., MAJDI, H., 2008. Stand age and fine root biomass, distribution and morphology in a Norway spruce chronosequence in southeast Norway. *Tree Physiology* 28, 773-784.
- BRAASTAD, H., TVEITE, B., 2001. Tynning i gran- og furubestand. Effekt av tynning på volumproduksjon, middeldiameter og diameter av de 800 grøvste trær per ha. Norwegian Forest Research Institute, Research Paper No. 10/01, 1-27. [English summary]
- BROWN, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Rome: FAO Forestry Paper 134, 55 s.
- BROWN, S., 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116 (3), 363-372.
- BRÜCHERT, F., BECKER, G., SPECK, T., 2000. The mechanics of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* 135, 45-62.

- BRYNDUM, H., 1967. Thinning experiments in young Norway spruce. Medd. Norske Skogfors. ves. 84 (bd. XXII), 49-63.
- BRYNDUM, H., 1969. A thinning experiment in Norway spruce in Gludsted plantation. Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark 32 (1), 1-156.
- BUČEK, A., KOPECKÁ, V., 2001. Globální klimatické změny a vegetační stupně na území ČR. Veronica 15 (1), 10-14.
- BUČEK, A., KOPECKÁ, V., 2004. Možná globální změna klimatu a vegetační stupně. In: POLEHLA, P. (Ed.). Hodnocení stavu a vývoje lesních geobiocenóz. Brno: MZLU, Geobiocenologické spisy 9, 73-88.
- BURKHART, H.E., TOMÉ, M., 2012. Growth and Yield Models for Uneven-Aged Stands. In: BURKHART, H.E., TOMÉ, M. 2012. Modelling Forest Trees and Stands, Berlin: Springer, Verlag, 339-361 s. ISBN: 978-94-007-1597-4.
- BURSCHEL, P., KÜRSTEN, E., LARSON, B.C., 1993. Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt -Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. Forstliche Forschungsberichte 126, 1-135.
- BUTLER AJ, BARBIER N, ČERMÁK J, KOLLER J, THORNILY C, MCEVOY C, NICOLL B, PERKS MP, GRACE J, MEIR P., 2010. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. Tree Physiology 30:705–714
- CANNELL, M.G.R., MORGAN, J., 1987. Young's modulus of sections of living branches and tree trunks. Tree Physiology 3, 355-364.
- CANNELL, M.G.R., MORGAN, J., 1989. Branch breakage under snow and ice loads. Tree Physiology 5, 307-317.
- CANNELL, M.G.R., SHEPPARD, L.J., FORD, E.D., WILSON, R.F.H., 1983. Clonal differences in dry matter distribution, wood specific gravity and foliage "efficiency" in *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. Silvae Genetica 32, 195-202.
- CARBONNIER, C., 1967. Comments on thinning programmes for spruce stands. Meddr. Norske Skogfors. ves. 84 (bd. XXII), 139-155. [in Swedish with English summary]
- CARBONNIER, C., 1974. Preliminary results from a thinning experiment in a Norway spruce plantation. Department of Forest Yield Research, Royal College of Forestry, Stockholm, Research Notes 29.
- CARTER, T.R., JYLHÄ, K., PERRELS, A., FRONZEK, S., KANKAPÄÄ, S., 2005. FINADAPT scenarios for the 21st century: alternative futures for considering adaptation to climate change in Finland. FINADAPT Working Paper 2, Helsinki: Finnish Environment Institute Mimeographs 332, 42 s.
- CASTAGNERI, D., VACCHIANO, G., LINGUA, E., MOTTA, R., 2008. Analysis of intraspecific competition in two subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in Paneveggio (Trento, Italy). Forest Ecology and Management 255, 651-659.
- CAIS, P., SCHELHAAS, M.J., ZAEHLE, S., PIAO, S.L., CESCATTI, A., LISKI, J., LUYSSAERT, S., LE-MAIRE, G., SCHULZE, E.D., BOURIAUD, O., FREIBAUER, A., VALENTINI, R., NABUURS, G.J., 2008. Carbon accumulation in European forests. Nature Geoscience 1, 425-429.
- CIENCIALA, E., 2011. Analýza adaptačních a mitigačních opatření v lesnictví navrhovaných v České republice a ve vybraných zemích EU. Příspěvek lesnického sektoru v emisní bilanci ČR a modelová predikce scénářů managementu lesa v podmínkách České republiky. Jílové u Prahy: IFER, 51 s.
- CIENCIALA, E., EXNEROVÁ, Z., SCHELHAAS, M.-J., 2008. Development of forest carbon budget and wood production in the Czech Republic until 2060. Annals of Forest Science 65, 603 (1-10).
- CIENCIALA, E., HENŽLÍK, V., ZATLOUKAL, V., 2006. Assessment of carbon stock change in forests - adopting IPCC LULUCF Good Practice Guidance in the Czech Republic. Forestry Journal 52 (1-2), 17-28.
- CIOŚMAK, P., 2002. Pełność strzał świerka bez kory. Sylwan 4, 81-88.
- CLARK, A.C.III, SOUTER, R.A., SCHLAEGEL, B.E., 1991. Stem profile equations for southern tree species. USDA Forest Service and Research Paper. SE-282. Asheville, NC. 113 s.

- CLEMMENSEN, K.E., BAHR, A., OVASKAINEN, O., DAHLBERG, A., EKBLAD, A., WALLANDER, H., STENLID, J., FINLAY, R.D., WARDLE, D.A., LINDAHL, B.D., 2013. Roots and associated fungi drive longterm carbon sequestration in boreal forest. *Science* 339, 1615-1618. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1231923>
- CONTRERAS, M.A., AFFLECK, D., CHUNG, W., 2011. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. *Forest Ecology and Management* 262, 1939-1949.
- COOMES, D.A., ALLEN, R.B., 2007. Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology* 95, 1084-1097.
- COOPER, C.F., 1983. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research* 13, 155-166.
- CORONA, P., FERRARA, A., 1989. Individual competition indices for conifer plantations *Agriculture, Ecosystems and Environment* 27, 429-437.
- COUTTS, M.P., 1983. Root Architecture and Tree Stability. *Plant and Soil* 71 (56), 171-188.
- CREGG, B.M., DOUGHERTY, P.M., HENESSEY, T.C., 1988. Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. *Canadian Journal of Forest Research* 18, 851-858.
- CREMER, K.W., BOROUGH, C.J., MCKINNELL, F.H., CARTER, P.R., 1982. Effects of stocking and thinning on wind damage on plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 12, 244-268.
- CZ LITER, 2015. CZECH LONG-TERM ECOLOGICAL RESEARCH NETWORK. [online]. 20. 3. 2015 [cit. 2015-03-20]. doi: <http://www.lter.cz/index.php?lang=cs>.
- CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE (CHMI), 2014. National greenhouse gas inventory report of the Czech Republic (reported inventories 1990-2012). Praha, 15. dubna 2014, 285 s.
- ČERMÁK, J., 1990. Calculation of operative areas in large trees - a manual. Brno: Mendel University of Agriculture and Forestry, 160 s.
- ČERMÁK, J., KUČERA, J., 1990. Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds. *Silva Carelica* 15, 101-120.
- ČERMÁK, J., ULRICH, R., STANĚK, Z., KOLLER, J., AUBRECHT, L., 2006. Electrical measurement of tree root absorbing surfaces by the earth impedance method: 2. Verification based on allometric relationships and root severing experiments. *Tree Physiology* 26 (9), 1113-1121.
- ČERMÁK, P., JANKOVSKÝ, L., CUDLÍN, P., 2004. Risk evaluation of the climatic change impact on secondary Norway spruce stands as exemplified by the Křtiny Training Forest Enterprise. *Journal of Forest Science* 50 (6), 256-262.
- ČERNÝ, M., 1990. Biomass of *Picea abies* (L.) KARST. in Midwestern Bohemia. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5, 83-95.
- ČERNÝ, M., APLTAUER, J., CIENCIALA, R., 2006. Testování přesnosti dendrometrického měření biomasy stojících buků. *Forestry* 52(3), 223-237. ISSN: 0323-1046.
- ČERNÝ, M., PAŘEZ, J., 2005. Zjišťování objemu a sortimentace stojících kmene s využitím modelu tvaru kmene. *Lesnická práce*, 12(84), 22-25. ISSN: 0322-9254.
- ČIHÁK, T., VEJPUŠKOVÁ, M., ŠRÁMEK, V., MARUŠÁK, R., 2012. Vyhodnocení alometrických funkcí pro stanovení nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* /L./ KARST.) z oblasti Orlických hor. *Zprávy lesnického výzkumu* 57 (3), 257-265.
- DALE, V.H., JOYCE, L.A., McNULTY, S., NEILSON, R.P., AYRES, M.P., FLANNIGAN, M.D., HANSON, P.J., IRLAND, L.C., LUGO, A.E., PETERSON, C.J., SIMBERLOFF, D., SWANSON, F.J., STOCKS, B.J., WOTTON, B.M., 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience* 51, 723-734.
- DANIELS, R.F., BURKHART, H.E., CLASON, T.R., 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* 16 (6), 1230-1237. ISSN: 1208-6037.
- DE LUIS, M., RAVENTÓS, J., CORTINA, J., MORO, M.J., BELLOT, J., 1998. Assessing components of a competition index to predict growth in an even-aged *Pinus nigra* stand. *New Forests* 15, 223-242.

- DE VRIES, W., POSCH, M., 2011. Modelling the impact of nitrogen deposition, climate change and nutrient limitations on tree carbon sequestration in Europe for the period 1900-2050. *Environmental Pollution* 159 (10), 2289-2299. doi: [10.1016/j.envpol.2010.11.023](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.023).
- DEANS, J.D., MILNE, R., 1999. Effects of respacing on young Sitka spruce crops. *Forestry* 72, 47-57.
- DECOUX, V., VARCIN, É., LEBAN, J.M. 2004. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. *Annals of Forest Science* 61: 251-262.
- DELEUZE, CH., HERVÉ, J.-CH., COLIN, F., RIBEYROLLES, L., 1996. Modelling crown shape of *Picea abies*: spacing effects. *Canadian Journal of Forest Research* 26, 1957-1966.
- DIETZE, M.C., WOLOSIN, M.S., CLARK, J.S., 2008. Capturing diversity and interspecific variability in allometries: A hierarchical approach. *Forest Ecology and Management* 256 (11), 1939-1948.
- DITTMAR, C., ELLING, W., 1999. Radial growth of Norway spruce and European beech in relation to weather and altitude. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118, 251-270.
- DIXON, R.K., SCHROEDER, P.E., WINJUM, J.K., 1991. Assessment of promising forest management practices and technologies for enhancing the conservation and sequestration of atmospheric carbon and their costs at the site level. Washington, D.C.: US Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, 138 s.
- DOBBERTIN, M., 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* 124, 319-333.
- DREXHAGE, M., GRUBER, F., 1999. Above- and below-stump relationship for *Picea abies*: estimating root system biomass from breast-height diameters. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14 (4), 328-333. doi: <http://prodinra.inra.fr/record/54878>.
- DUTILLEUL, P., HERMAN, M., AVELLA-SHAW, T., 1998. Growth rate effects on correlations among ring width, wood density, and mean tracheid length in Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research* 28, 56-68.
- ELIZONDO, B.E., GARCIA-GONZALO, J., PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S., 2006. Carbon stocks and timber yield in two boreal forest ecosystems under current and changing climatic conditions subjected to varying management regimes. *Environmental Science and Policy* 9 (3), 237-252.
- ERIKSSON, E., 2006. Thinning operations and their impact on biomass production in stands of Norway spruce and Scots pine. *Biomass and Bioenergy* 30 (10), 848-853.
- ERIKSSON, H., 1987. New results from plot no. 5 at Sperlingsholm estate in southwestern Sweden in the European stemnumber experiment in *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2, 85-98.
- ERIKSSON, H., KARLSSON, K., 1997. Effects of different thinning and fertilization regimes on the development of Scots pine (*Pinus sylvestris* (L.)) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in long-term silvicultural trials in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research, Report 42, 135 s.
- ETVERK, I., 1985. Genetic variation of crown form in Norway spruce and its influence on stand yield in cultivated forests. In: TIGERSTEDT, P.M.A., PUTTONEN, P., KOSKI, V. (Eds.). *Crop Physiology of Forest Trees*. Helsinki University Press, 147-151.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. Rome: FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 378 s. doi: <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/>.
- FARMER, R.E.JR., 1976. Relationships between genetic differences in yield of deciduous tree species and variation in canopy size, structure and duration. In: CANNELL, M.G.R., LAST, E.T. (Eds.). *Tree Physiology and Yield Improvement*. Academic Press, London, 119-137.
- FEHRMANN, L., KLEINN, C., 2006. General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in Central Europe. *Forest Ecology and Management* 236, 412-421.



- FERLIN, F., 2002. The growth potential of understorey silver fir and Norway spruce for uneven-aged forest management in Slovenia. *Forestry* 75, 375-383.
- FORD, E.D., 1985. Branching, crown structure and the control of timber production. In: CANNELL, M.G.R., JACKSON, J.E. (Eds.). *Attributes of Trees as Crop Plants*. Institution of Terrestrial Ecology, Monks Wood, Hunts, U.K., 228-252.
- FRAVER, S., D'AMATO, A.W., BRADFORD, J.B., JONSSON, B.G., JÖNSSON, M., ESSEEN, P.A., 2014. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning *Journal of Vegetation Science* 25, 374-385.
- GARCIA-GONZALO, J., PELTOLA, H., BRICENO-ELIZONDO, E., KELLOMÄKI, S., 2007. Effect of climate change and management on timber yield in boreal forests, with economic implications: A case study. *Ecological Modelling* 209 (2-4), 220-234.
- GARDINER, B.A., 1989. Mechanical characteristics of Sitka spruce. Forestry Commission Occasional Paper 24.
- GEBAUER, R., VOLAŘÍK, D., URBAN, J., BØRJA, I., NAGY, N.E., ELDHUSET, T.D., KROKENE, P., 2011. Effect of thinning on anatomical adaptations of Norway spruce needles. *Tree Physiology* 31, 1103-1113.
- GEBUREK, T., ROBITSCHKE, K., MILASOWSKY, N., 2008. A tree of many faces: Why are there different crown types in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.)? *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 203 (2), 126-133. ISSN: 0367-2530.
- GODBOLD, D.L., FRITZ, H., JENTSCHKE, G., MEESENBURG, H., RADEMACHER, P., 2003. Root turnover and root necromass accumulation of Norway spruce (*Picea abies*) are affected by soil acidity. *Tree Physiology* 23, 915-921. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/23.13.915>
- GOODALE, C., APPS, M.J., BIRDSEY, R.A., FIELD, CH.B., HEATH, L.S., HOUGHTON, R.A., JENKINS, J.C., KOHLMAYER, G.H., KURZ, W., LIU, S., NABUURS, G.-J., NILSSON, S., SHVIDENKO, A.Z., 2002. Forest carbon sinks in the Northern hemisphere. *Ecological Applications* 12, 891-899.
- GOULD, S.J. 1966. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews* 41(4), 587-638.
- GREEN, D.S., HAWKINS, C.D.B., 2005. Competitive interactions in sub-boreal birch-spruce forests differ on opposing slope aspects. *Forest Ecology and Management* 214, 1-10.
- GREIS, I., KELLOMÄKI, S., 1981. Crown structure and stem growth of Norway spruce undergrowth under varying shading. *Silva Fennica* 15, 306-322.
- GRIESS, V.C., KNOKE, T., 2013. Bioeconomic modelling of mixed Norway spruce - European beech stands: economic consequences of considering ecological effects. *European Journal of Forest Research* 132 (3), 511-522.
- GSPALTL, M., BAUERLE, W., BINKLEY, D., STERBA, H., 2013. Leaf area and light use efficiency patterns of Norway spruce under different thinning regimes and age classes *Forest Ecology and Management* 288, 49-59.
- GRÜNWARD, T., BERNHOFER, C. 2007. A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus B*, 59: 387-396.
- GUTTENBERG, A.R., 1915. *Growth and yield of spruce in Hochgebirge*. Wien: Franz Deuticke.
- HADAŠ, P., 2002. Temperature and precipitation conditions in the high elevation spruce stands of the Dražanská vrchovina upland. *Ekológia* 21, 69-87.
- HALL, J.P., 2002. Sustainable production of forest biomass for energy. *The Forestry Chronicle* 78 (3), 391-396.
- HAMILTON, G.J., 1976. The Bowmont Norway spruce thinning experiment 1930-1974. *Forestry* 49, 109-121.
- HAMILTON, G.J., 1981. The effects of high intensity thinning on yield. *Forestry* 54 (1), 1-15.
- HANEWINKEL, M., CULLMANN, D.A., SCHELHAAS, M.J., NABUURS, G.J., ZIMMERMANN, N.E., 2013. Climate change may cause severe loss in economic value of European forest land. *Nature Climate Change* 3, 203-207. doi: 10.1038/nclimate1687.

- HANN, D.W., HANUS, M.L., 2002. Enhanced diameter-growth-rate equations for undamaged and damaged trees in southwest Oregon. Forest Research Laboratory, Research Contribution 39, Oregon State University, Corvallis, OR, 54 s.
- HANNRUP, B. 1999. Genetic parameters of wood properties in *Pinus sylvestris* (L.). Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria 94, 36-43.
- HANNRUP, B., CALAHAN, C., CHANTRE, G., GRABNER, M., KARLSSON, B., LE BAYON, I., JONES, G.L., MÜLLER, U., PEREIRA, H., RODRIGUES, J.C., ROSNER, S., ROZENBERG, P., WILHELMSSON, L., WIMMER, R., 2004. Genetic parameters of growth and wood quality traits in *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research 19 (1), 14-29.
- HARMON, M.E., FERRELL, W.K., FRANKLIN, J.F., 1990. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forest to young forests. Science 247, 699-702.
- HARMON, M.E., MARKS, B., 2002. Effects of silvicultural practices on carbon stores in Douglas-fir-western hemlock forests in the Pacific Northwest, USA: results from a simulation model. Canadian Journal of Forest Research 32, 863-877.
- HARPER, J.L., 1977. Population biology of plants. Academic Press, London, New York, 892 s.
- HARRINGTON, C.A., REUKEMA, D.L., 1983. Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. Forest Science 29, 33-44.
- HARTMANN, H., BEAUDET, M., MAZEROLLE, M., MESSIER, C., 2009. Sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) growth is influenced by close conspecifics and skid trail proximity following selection harvest. Forest Ecology and Management 258, 823-831.
- HASENAUER, H., BURKHART, H.E., AMATEIS, R.L., 1997. Basal area development in thinned and unthinned loblolly pine plantations. Canadian Journal of Forest Research 27, 265-271.
- HEGYI, F., 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. (Ed.), Growth Models for Tree and Stand Simulation. Royal Collage of Forestry, Stockholm, Sweden, 74-90.
- HEIKKILÄ, J., SIRÉN, M., ÄIJÄLÄ, J.O., 2007. Management alternatives of energy wood thinning stands. Biomass and Bioenergy 31, 255-266.
- HENRIKSEN, H.A., 1951. Durchforstungsversuch in jungem Buchenbestand. Forstl. Forsögsv. Danmark 20, 387-401. [English abstract and summary]
- HOCHBICHLER, E., BELLOS, P., LICK, E., 2006. Biomass functions for estimating needle and branch biomass of spruce (*Picea Abies*) and Scots pine (*Pinus Sylvestris*) and branch biomass of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* and *petrea*). Austrian Journal of Forest Science 123, 35-46.
- HOLDER, B., SAARIKKO, J., VOSHMIR, D., 2006. Global Forest Decimal Classification (GFDC). IUFRO World Series Vol. 19. Vienna. 338 s.
- HORNE, R., ROBINSON, G., GWALTER, J., 1986. Response increment: a method to analyse thinning response in even-aged forests. Forest Science 32, 243-253.
- HORWATH, W.R., AND E.A. PAUL. 1994. Microbial biomass. p. 753-773. In R.W. Weaver et al. (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. SSSA Book Ser. no. 5. SSSA, Madison, WI.
- HOUGHTON, R.A., 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. Global Change Biology 11 (6), 945-958.
- CHAVE, J., ANDALO, C., BROWN, S., CAIRNS, M.A., CHAMBERS, J.Q., EAMUS, D., FÖLSTER, H., FROMARD, F., HIGUCHI, N., KIRA, T., LESURE, J.-P., NELSON, B.W., OGAWA, H., PUIG, H., RIERA, B., YAMAKURA, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia 145 (1), 87-99.
- CHROUST, L., 1997. Ekologie výchovy lesních porostů. Opočno: VÚLHM-VS, 277 s.
- ILOMÄKI, S., NIKINMAA, E., MÄKELÄ, A., 2003. Crown rise due to competition drives biomass allocation in silver birch. Canadian Journal of Forest Research 33, 2395-2404.
- INGERSLEV, M., HALLBÄCKEN, L., 1999. Above ground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part II. Accumulation of biomass and nutrients. Forest Ecology and Management 119, 21-38.

- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan.
- JACKSON, R.B., MOONEY, H.A., SCHULZE, E.D., 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94 (14), 7362-7366.
- JACOBS, M.R., 1939. The effect of wind on trees. *Austrian Forestry* 2, 25-32.
- JANDL, R., LINDNER, M., VESTERDAL, L., BAUWENS, B., BARITZ, R., HAGEDORN, F., JOHNSON, D.W., MINKKINEN, K., BYRNE, K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137 (3-4), 253-268.
- JANSSENS, I. A., A. FREIBAUER, P. CIAIS, P. SMITH, G. J. NABUURS, G. FOLBERTH, B. SCHLAMADINGER, R. W. A. HUTJES, R. CEULEMANS, E. D. SCHULZE, R. VALENTINI, AND A. J. DOLMAN. 2003. Europe's terrestrial Biosphere Absorbs 7 to 12 % of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. *Science* 300: 1438-1541.
- JENKINS, J.C., CHOJNACKY, D.C., HEATH, L.S., BIRDSEY, R., 2003. National scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science* 49, 12-35.
- JIANG, L., BROOKS, J.R., HOBBS, G.R., 2007. Using crown ratio in yellow-poplar compatible taper and volume equations. *Northern Journal of Applied Forestry* 24, 271-275.
- JIMENEZ, J., KRAMER, H., AGUIRRE, O., 2003. Untersuchung des Einzelbaumwachstums in einem ungleichaltrigen Nadelholzmischbestand mit Hilfe von Stammanalysen. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 174 (9), 169-175.
- JOHANSSON, T., 1999. Biomass production of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) growing on abandoned farmland. *Silva Fennica* 33, 262-280.
- JOSLIN, J.D., HENDERSON, G.S., 1987. Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. *Forest Science* 33, 330-346.
- JYLHÄ, K., TUOMENVIRTA, H., RUOSTEENOJA, K., 2004. Climate change projections for Finland during the 21<sup>st</sup> century. *Boreal Environmental Research* 9, 127-152.
- KAIPAINEN, T., LISKI, J., PUSSINEN, A., KARJALAINEN, T., 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science and Policy* 7, 205-219.
- KANGAS, A., MALTAMO, M., 2000. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. *Forest Science* 46 (3), 390-396.
- KANTOLA, A., MÄKELÄ, A., 2004. Crown development in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Trees* 18, 408-421.
- KANTOLA, A., MÄKELÄ, A., 2006. Development of biomass proportions in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Trees* 20 (1), 111-121.
- KARJALAINEN, T. 1996A. Dynamics of the Carbon Flow through Forest Ecosystem and the Potential of Carbon Sequestration in Forests and Wood Products in Finland. *Research Notes Faculty of Forestry, University of Joensuu, Finland*, 171 s.
- KARJALAINEN, T., 1996. Model Computations on Sequestration of Carbon in Managed Forests and Wood Products under Changing Climatic Conditions in Finland. *Journal of Environmental Management* 47 (4), 311-328.
- KARLSSON, K., 2000. Stem form and taper changes after thinning and nitrogen fertilization in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15, 621-632.
- KAUPPI, P.E., MIELIKÄINEN, K., KUUSELA, K., 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science* 256, 70-74.
- KELLOMÄKI S., STRANDMAN H., NUUTINEN T., PELTOLA, H., KORHONEN, K.T., VÄISÄNEN, H., 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. *Finnish Environment Institute Mimeographs* 334, 1-44. ISBN: 952-11-2105-X.
- KELLOMÄKI, S., KARJALAINEN, T., VÄISÄNEN, H., 1997. More timber from boreal forests under changing climate? *Forest Ecology and Management* 94, 195-208.

- KELLOMÄKI, S., OKER-BLOM, P., KUULUVAINEN, T., 1985. The effect of crown and canopy structure on light absorption and distribution in a tree stand. In: TIGERSTEDT, P.M.A., PUTTONEN, P., KOSKI, V. (Eds.). *Crop Physiology of Forest Trees*. Helsinki University Press, 107-115.
- KEMPENEERS, P., SEDANO, F., SEEBACH, L., STROBL, P., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., 2011. Data fusion of different spatial resolution remote sensing images applied to forest type mapping. *Geoscience and Remote Sensing* 49 (12), 4977-4986. doi: 10.1109/TGRS.2011.2158548.
- KETTERINGS, Q.M., COE, R., VAN NOORDWIJK, M., AMBAGAU, Y., PALM, C.A., 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146 (1-3), 199-209.
- KILPELÄINEN, A., ROUTA, J., PELTOLA, H., GERENDIAIN, A.Z., PULKKINEN, P., KELLOMÄKI, S., 2010. Effects of genetic entry and competition on above ground biomass production of Norway spruce grown in southern Finland *Forest Ecology and Management* 259, 2327-2332.
- KING, D.A., 1996. Allometry and life history of tropical trees. *Journal of Tropical Ecology* 12, 25-44.
- KIRCHHEFER, A.J., 2000. The influence of slope aspect on tree-ring growth of *Pinus sylvestris* L. in northern Norway and its implication for climate reconstruction. *Dendrochronologia* 18, 27-40.
- KLIMO, E., 1990. *Lesnická pedologie*. Brno: VŠZ, 256 s.
- KONÔPKA, B., 2009. Differences in fine root traits between Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) – A case study in the Kysucké Beskydy Mountains. *Journal of Forest Science* 55 (12), 556-566.
- KONÔPKA, B., PAJTÍK, J., MARUŠÁK, R., 2015. Biomass allocation influenced by canopy closure in a young spruce stand. *Journal of forest science* 61 (2), 62-71.
- KONÔPKA, J., 1999. Ohrozenie lesnych porastov mechanicky pôsobiacimi abiotickými činiteľmi. *Forestry Journal* 45 (1), 51-72.
- KONÔPKA, J., PETRÁŠ, R., TOMA, R., 1987. Štíhlostný koeficient hlavných drevin a jeho význam pri statickej stabilitě porastov. *Lesnictví* 33 (10), 887-904.
- KONŠEL, J., 1931. *Stručný nástin tvorby a pěstění lesů v biologickém ponětí*. Písek: Československá matice lesnická, 543 s.
- KORPEL, Š., PEŇÁZ, J., SANIGA, M., TESAŘ, V., 1991. *Pestovanie lesa*. Bratislava: Príroda, 472 s.
- KÖSTNER, B., FALGE, E., TENHUNEN, J.D., 2002. Age-related effects on leaf area/sapwood relationships, canopy transpiration and carbon gain of Norway spruce stands (*Picea abies*) in the Fichtelgebirge, Germany. *Tree Physiology* 22, 567-574.
- KOZAK, A., 1988. A variable-exponent taper equation. *Canadian Journal of Forest Research* 18, 1363-1368.
- KOZAK, A., 2004. My last words on taper equations. *The Forestry Chronicle* 80, 507-514.
- KRAMER, H., JÜNEMANN, D., 1985. The influence of heavy individual and schematic thinning on the growth of young spruce stands. *Forstarchiv* 56, 253-258.
- KRAMER, H., SPELLMANN, H., 1980. Beiträge zur Bestandesbegründung der Fichte. *Schrift. Forstl. Fak. University Göttingen u. Nieders. Forstl. Versuchsanstalt*, No. 64.
- KRATOCHVÍLOVÁ, I., JANOUŠ, D., MAREK, M.V., BARTÁK, M., ŘÍHA, L., 1989. Production activity of mountain cultivated Norway spruce stands under impact of air pollution. *Ekológia* (8), 407-419.
- KREJZA, J., POKORNÝ, R., MARKOVÁ, I. 2013. Is allometry for aboveground organ's mass estimation in young Norway spruce stands affected by different type of thinning? *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 61 (6), 1755-1761.
- KREJZA, J., SVĚTLÍK, J., POKORNÝ, R., 2015. Spatially explicit basal area growth of Norway spruce. *Trees - Structure and Function* 29 (10), 1545-1558. ISSN: 0931-1890. doi: <http://link.springer.com/journal/468>.
- KULHAVÝ, J., 2003. *Ekologie lesa*. Multimediální učební text. Brno: LDF MZLU, Ústav ekologie lesa. [CD-ROM]

- KUULUVAINEN, T., 1988. Crown architecture and stemwood production in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Tree Physiology* 4, 337-346.
- LAIHO, O., 1987. Susceptibility of forest stand to windthrow in Southern Finland. *Folia Forestalia* 706, 1-24.
- LAL, R., 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220 (1-3), 242-258.
- LANDSBERG, J., SANDS, P., 2011. *Physiological ecology of forest production: principles, processes and models*. 4<sup>th</sup> Volume, London: Elsevier, Academic Press, 331 s., ISBN 978-0-12-374460-9.
- LANNER, R.M., 1985. On the insensitivity of height growth to spacing. *Forest Ecology and Management* 13, 143-148.
- LARCHER, W., 1988. *Fyziologická ekologie rostlin*. Praha: Academia, 368 s.
- LARCHER, W., 2003. *Physiological plant ecology (Ecophysiology and stress physiology of functional groups)*. 4th edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 504 s., ISBN 3-540-43516-6.
- LARSON, P.R., 1969. Wood formation and the concept of wood quality. *Yale University School of Forestry Bulletin* 74, 1-54.
- LEHTONEN, A. 2005. Estimating foliage biomass for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) plots. *Tree Physiology* 25, 803-811.
- LEHTONEN, A., CIENCIALA, E., TATARINOV, F., MÄKIPÄÄ, R., 2007. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. *Annals of Forest Science* 64, 133-140.
- LEHTONEN, A., MAKIPAA, R., HEIKKINEN, J., SIEVANEN, R., LISKI, J., 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188, 211-224.
- LEITES, L.P., ROBINSON, A.P., 2004. Improving taper equations of loblolly pine with crown dimensions in a mixed-effects modeling framework. *Forest Science* 50, 204-212.
- LEKES, V., DANDUL, I., 2000. Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), 331-344.
- LEPPÄLAMMI-KUJANSUU, J., ARO, L., SALEMAA, M., HANSSON, K., KLEJA, D.B., HELMISAARI, H.-S., 2014. Fine root longevity and carbon input into soil from below and aboveground litter in climatically contrasting forests. *Forest Ecology and Management* 326, 79-90.
- LÉVESQUE, M., SAURER, M., SIEGWOLF, R., EILMANN, B., BRANG, P., BUGMANN, H., RIGLING, A., 2013. Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. *Global Change Biology* 19 (10), 3184-3199.
- LEVY, P.E., HALE, S.E., NICOLL, B.C., 2004. Biomass expansion factors and root: shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry* 77 (5), 421-430.
- LINDER, S., 1987. Response of water and nutrition in coniferous ecosystem. In: SCHULZE, E.D., ZWÖLFER, H. (Eds.). *Potentials and limitations of ecosystem analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 180-222.
- LINDNER, M., MAROSCHEK, M., NETHERER, S., KREMER, A., BARBATI, A., GARCIA-GONZALO, J., SEIDL, R., DELZON, S., CORONA, P., KOLSTRÖM, M., LEXER, M.J., MARCHETTI, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259 (4), 698-709.
- LINDSTRÖM, H. 1996. Basic density in Norway spruce. Part I. A literature review. *Wood and Fiber Science* 28(1): 15-27.
- LISKI, J., KOROTKOV, A.V., PRINS, C.F.L., KARJALAINEN, T., VICTOR, D.G., KAUPPI, P.E., 2003. Increased carbon sink in temperate and boreal forests. *Climatic Change* 61 (1), 89-99.
- LISKI, J., PERRUCHOU, D., KARJALAINEN, T., 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *Forest Ecology and Management* 169, 159-175.
- LIU, C., WESTMAN, C.J., 2009. Biomass in a Norway spruce-Scots pine forest: a comparison of estimation methods. *Boreal Environment Research* 14, 875-888.

- LORIMER, C.G., 1983. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. *Forest Ecology and Management* 6, 343-360.
- LOSI, C.J., SICCAMI, T.G., CONDIT, R., MORALES, J.E., 2003. Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest Ecology and Management* 184 (1-3), 355-368. ISSN: 0378-1127.
- MACLAREN, J.P., 2000. Trees in the greenhouse - the role of forestry in mitigating the enhanced greenhouse effect. *Forest Research Bulletin* 219, 1-72. ISSN: 1174-5096.
- MAGUIRE, D.A., BATISTA, J.L.F., 1996. Sapwood taper models and implied sapwood volume and foliage profiles for coastal Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 26, 849-863.
- MAILLY, D., TURBIS, S., POTHIER, D., 2003. Predicting basal area increment in a spatially explicit, individual tree model: a test of competition measures with black spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 33, 435-443.
- MÄKELÄ, A., 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. *Forest Science* 43, 7-24.
- MÄKELÄ, A., VANNINEN, P., 2001. Vertical structure of Scots pine crowns in different age and size classes. *Trees* 15, 385-392.
- MÄKINEN, H., ISOMÄKI, A. 2004. Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of Norway spruce trees. *Forest Ecology and Management* 201, 295-309.
- MÄKINEN, H., JAAKKOLA, T., SARANPÄÄ, P., PIISPANEN, R., 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 241 (1-3), 175-188.
- MÄKINEN, H., OJANSUU, R., SAIRANEN, P., YLI-KOJOLA, H., 2003. Predicting branch characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from simple stand and tree measurements. *Forestry* 76, 525-546.
- MÄKIPÄÄ, A., KARJALAINEN, T., PUSSINEN, A., KUKKOLA, M., 1998. Effects of nitrogen fertilization on carbon accumulation in boreal forests: model computations compared with the results of long-term fertilization experiments. *Chemosphere* 36 (4-5), 1155-1160.
- MALHI, Y., BALDOCCHI, D., JARVIS, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22 (6), 715-740.
- MAREK, M.V., JANOUŠ, D., TAUFAROVÁ, K., HAVRÁNKOVÁ, K., PAVELKA, M., KAPLAN, V., MARKOVÁ, I., 2011a. Carbon exchange between ecosystems and atmosphere in the Czech Republic is affected by climate factors. *Environmental Pollution* 159, 1035-1039.
- MAREK, M.V., ET AL., 2011. Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. Praha: Academia, 253 s., ISBN: 978-80-904351-1-7.
- MARKLUND, L.G., 1987. Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) in Sweden. Department of Forest Surveying, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Report 43, 127 s.
- MARKLUND, L.G., 1988. Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden. Department of Forest Surveying, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Report 45, 73 s.
- MARKOVÁ, I., PAVELKA, M., JANOUŠ, D., 2013. Ročenka meteorologických měření 2011. Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž (Moravskoslezské Beskydy). Ekosystémová stanice Štítná nad Vláří (Bílé Karpaty). Brno: Keloc Pc, spol. s. r. o., 125 s. ISBN: 978-80-87902-01-1.
- MARKOVÁ, I., POKORNÝ, R., 2011. Allometric relationships for dry mass of aboveground organs estimation in young highland Norway spruce stand. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunenensis* 6, 217-224. ISSN: 1211-8516.
- MARTIN, M.E., NEWMAN, S.D., ABER, J.D., CONGALTON, R.G. 1998. Determining forest species using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 65, 249-254.
- MATTHEWS, G., 1993. The carbon content of trees. Forestry Commission Technical Paper 4, Edinburgh: Forestry Commission.
- MÄKINEN, H., SARANPÄÄ, P., LINDER, S. 2002. Effect of growth rate on fibre characteristics in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holzforschung* 56(5): 449-460.

- MCCLAUGHERTY, C.A., ABER, J.D., MELILLO, J.M., 1984. Comparative root and soil dynamics on a white pine watershed and in the hardwood forest in the Coweeta Basin. *Oikos* 42, 378-386.
- MCTAGUE, J.P., 1992. Enhanced estimates of total volume with any single upper-stem measurement. *Forest Ecology and Management* 48, 55-67.
- MESSIER, C., DOUCET, R., RUEL, J.C., CLAVEAU, Y., KELLY, C., LECHOWICZ, M.J., 1999. Functional ecology of advance regeneration in relation to light in boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29, 812-823.
- MILDNER, H., 1967. Die Widerstandsfähigkeit von Fichtenjungbeständen gegenüber atmosphärischen Einwirkungen. *Soz. Forstwirtschaft* 17, 57-59.
- MILNE, R., 1995. Modelling mechanical stresses in living Sitka spruce stems. In: COUTTS, M.P., GRACE, J. (Eds.). *Wind and Trees*. Cambridge: Cambridge University Press, 165-181.
- MINISTRY OF AGRICULTURE (MA), CZECH REPUBLIC, 2014. Report about forest and forestry conditions in the Czech Republic 2011 (Green Report), Prague: Ministry of Agriculture, 137 s. ISBN: 978-80-7434-063-5.
- MISSON, L., VINCKE, C., DEVILLEZ, F., 2003. Frequency responses of radial growth series after different thinning intensities in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. *Forest Ecology and Management* 177 (1-3), 51-63.
- MITSCHERLICH, G., 1963. Das Wachstum der Fichte in Europa. Teil I. *AFJZ Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 134, 30-45; 61-72; 94-110; 199-216.
- MÖLLER, C.M., 1954. The influence of thinning on volume growth. Part I. In: HEIBERG, S.O. (ed.). *Thinning Problems and Practice in Denmark*. State University New York, Coll. For., Tech. Publ. 76, 5-32.
- MONSERUD, R.A., STERBA, H., 1996. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management* 80, 57-80.
- MU, L., 2004. Polygon characterization with the multiplicatively weighted voronoi diagram. *The Professional Geographer* 56(2), 223-239.
- MUHAIRWE, C.K., 1994. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 1904-1913.
- MUND, M., KUMMETZ, E., HEIN, M., BAUER, G.A., SCHULZE, E.-D., 2002. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management* 171, 275-296.
- NABUURS, G.J., MASERA, O., ANDRASKO, K., BENITEZ-PONCE, P., BOER, R., DUSCHKE, M., ELSIDDIG, E., ET AL., 2007. Forestry. In: METZ, B., DAVIDSON, O.R., BOSCH, P.R., DAVE, R., MEYER, L.A. (Eds.). *Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2007: Mitigation*, 543-578.
- NABUURS, G.J., MOHREN, G.M.J., 1995. Modelling analysis of potential carbon sequestration in selected forest types. *Canadian Journal of Forest Research* 25, 1157-1172.
- NABUURS, G.J., PÄIVINEN, R., SIKKEMA, R., MOHREN, G.M.J., 1997. The role of European forests in the global carbon cycle - a review. *Biomass and Bioenergy* 13, 345-358.
- NÁVAR, J., 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257, 427-434. doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.028.
- NAVRATIL, S., 1995. Minimizing wind damage in alternative silviculture systems in boreal mixedwoods. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Canada-Alberta Partnership Agreement in Forestry Report 124, 81 s.
- NĚMEČEK, J., MACKŮ, J., VOKOUN, J., VAVŘÍČEK, D., NOVÁK, P., 2001. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Praha: ČZÚ, 78 s.
- NIELSEN, C.C.N., 1990. Influences of plant distance and tree density on form of roots, root biomass and root anchoring as well as biomass distribution with regard to wind stability of Norway spruce. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der*

- Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Bd. 100, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main.
- NIINEMETS, Ü., 1997. Distribution patterns of foliar carbon and nitrogen as affected by tree dimensions and relative light conditions in the canopy of *Picea abies*. *Trees* 11, 144-154.
- NIINEMETS, Ü., KULL, O., 1995. Effects of light availability and tree size on the architecture of assimilative surface in the canopy of *Picea abies*: variation in needle morphology. *Tree Physiology* 15, 307-315.
- NIKLAS, K.J., 1992. Size- and age-dependent variation in the properties sap- and heartwood in black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Annals of Botany*, 79, 473-478.
- NORBY, R.J., FITTER, A.H., JACSKON, R.B., 2000. Root dynamics and global change. An ecosystem perspective. *New Phytologist* 147, 3-12.
- NORD-LARSEN, T., 2002. Stand and site productivity response following whole-tree harvesting in early thinning of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Biomass and Bioenergy* 23 (1), 1-12.
- NOVÁK, J., SLODIČÁK, M., 2004. Structure and accumulation of litterfall under Norway spruce stands in connection with thinnings. *Journal of Forest Science* 50 (3), 101-108.
- NUUTINEN, T., MATALA, J., HIRVELÄ, H., HÄRKONEN, K., PELTOLA, H., VÄISÄNEN, H., KELLOMÄKI, S., 2006. Regionally optimized forest management under changing climate. *Climatic Change* 79 (3), 315-333.
- OKER-BLOM, P., KELLOMÄKI, S., 1981. Theoretical computations on the role of crown shape in the absorption of light by trees. *Mathematical Biosciences* 59, 291-311.
- OKER-BLOM, P., KELLOMÄKI, S., 1982. Metsikiin tiheyden vaikutus puun latvuksen sisäiseen valoilmastoon ja oksien kuolemiseen. (Effect of stand density on the within-crown light regime and dying off of branches.) *Folia Forestalia* 509, 4-14.
- OULEHLE, F., HRUŠKA, J., 2009. Lesy v globálním koloběhu uhlíku. *Vesmír* 7, 496-500.
- PARRY, M.L. (ED.) 2000. Assessment of potential effects and adaptation for climate change in Europe: the Europe ACACIA project. Norwich, UK: Jackson Environment Institute, University of East Anglia, 320 s.
- PELTOLA, H., KELLOMÄKI, S., HASSINEN, A., GRANANDER, M., 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), 143-153.
- PELZ, D.R., 1978. Estimating individual tree growth with tree polygons. *School of Forestry and Wildlife Research, Blacksburg, VA, FWS-1-78*, 172-178 s.
- PERSSON, P., 1972. Wind and snow damage associated with stand treatment, a survey of thinning experiments in comparatively young stands. *Rapporter och Uppsatser Institutionen for Skogsproduktion.*, No. 23.
- PETERSSON, H., HOLM, S., STÅHL, G., ALGER, D., FRIDMAN, J., LETHONEN, A., LUNDSTRØM, A., MÄKIPÄÄ, R., 2012. Individual tree biomass functions or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass - A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270, 78-84.
- PETIT, J.-R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E., Stievenard, M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429-436.
- PETRI, H., 1966. Versuch einer standortgerechten, waldbaulichen und wirtschaftlichen Standraumregelung von Buchen-Fichten-Mischbeständen. *Mitteilungen aus der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz* 13, 145 s.
- PETTY, J.A., MACMILLAN, D.C., STEWARD, C.M., 1990. Variation of density and growth ring width in stems of Sitka and Norway spruce. *Forestry* 63 (1), 39-49.
- PETTY, J.A., SWAIN, C., 1985. Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry* 58 (1), 75-84.



- PETTY, J.A., WORRELL, R., 1981. Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry* 54 (2), 115-128.
- PHAT, N.K., KNORR, W., KIM, S., 2004. Appropriate measures for conservation of terrestrial carbon stocks - Analysis of trends of forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management* 191 (1-3), 283-299. ISSN: 0378-1127.
- PODRÁZSKÝ, V., NOVÁK, J., MOSER, W.K., 2005. Vliv výchovných zásahů na množství a charakter nadložního humusu v horském smrkovém porostu. [Effect of thinning on amount and character of the surface humus in mountain spruce stand]. *Zprávy lesnického výzkumu* 50 (4), 225-228.
- POHJOLA, J., VALSTA, L., 2007. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics* 9 (7), 789-798.
- POKORNÝ, R., TOMÁŠKOVÁ, I., 2007. Allometric relationships for surface area and dry mass of young Norway spruce aboveground organs. *Journal of Forest Science*, 53 (12), 548-554.
- POKORNÝ, R., TOMÁŠKOVÁ, I., HAVRÁNKOVÁ, K., 2008. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research* 127, 359-367.
- POKORNÝ, R., URBAN, O., MAREK, M.V., 2004. Effect of Norway spruce planting density on shoot morphological parameters. *Biologia Plantarum* 48, 137-139.
- PRETZSCH, H., 1995. Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 166 (9/10), 190-201.
- PRETZSCH, H., 2005. Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. *European Journal of Forest Research* 124, 193-205.
- PRETZSCH, H., 2009. Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model. Berlin: Springer, 560-565 s.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., 2005. A re-evaluation of Reineke's rule and Stand Density Index. *Forest Science* 51, 304-320.
- PRETZSCH, H., SCHÜTZE, G., 2005. Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands. *Plant Biology* 7, 628-639.
- PREUHLER, T., SCHMIDT, R., 1989. Observations on a deferred-thinning trial of Norway spruce. *Forstw. Cbl.* 108, 271-288.
- PUKKALA, T., 1989. Methods to describe the competition process in a tree stand. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4, 187-202.
- PUKKALA, T., KOLSTRÖM, T., 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica* 21 (1), 55-67.
- PULKKINEN, P., PÖYKKÖ, T., 1990. Inherited narrow crown form, harvest index and stem biomass production in Norway spruce, *Picea abies*. *Tree Physiology* 6(4), 381-391.
- QC EXPERT 3.3, TriloByte Statistical Software Ltd., Pardubice, Czech Republic.
- RAICH, J.W., SCHLESINGER, W.H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B* 44 (2), 81-99.
- REINEKE, L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46, 627-638.
- REMEŠ, J., 2006. Transformation of even-aged spruce stands at the School Forest Enterprise Kostelec nad Černými lesy: structure and final cutting of mature stand. *Journal of Forest Science* 52 (4), 158-171.
- RICHARDSON, J., BJÖRHEDEN, R., HAKKILA, P., LOWE, A.T., SMITH, C.T., 2002. Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice- Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Neederlands. 344 s.
- ROE, E.I., STOECKELER, J.H., 1950. Thinning over-dense Jack pine seedling stands in the Lake States. *Journal of Forestry* 48, 861-865.

- ROEDICK, M.L., FARQUHAR, G.D., BERRY, S.L., NOBLE, I.R., 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia* 129, 21-30.
- ROTTMANN, M., 1985. Schneebruchschäden in Nadelholzbeständen. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main.
- ROTTMANN, M., 1986. Wind- und Sturmschäden im Wald. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main.
- ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T., 2003. Seminář „Mikroklima porostů.“ Brno, 26. Března 2003, 151-156. ISBN: 80-8669 05-9.
- SAMEK, V., 1964. Metodika výzkumu morfologické proměnlivosti smrku z hlediska fytogeografického. *Zprávy lesnického výzkumu* 10(2-3), 18-25.
- SARANPÄÄ, P., 2003. Wood density and growth. In: BARNETT, J.R., JERONIMIDIS, G. (Eds.). *Wood Quality and Its Biological Basis*. Biological Sciences Series, Blackwell Publishing & CRC Press, 87-117.
- SAUNDERS, M., TOBIN, B., BLACK, K., GIORIA, M., NIEUWENHUIS, M., OSBORNE, B.A., 2012. Thinning effects on the net ecosystem carbon exchange of a Sitka spruce forest are temperature-dependent. *Agricultural and Forest Meteorology* 157, 1-10. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.01.008.
- SEELY, B., WELHAM, C., KIMMINS, H., 2002. Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecology and Management* 169 (1-2), 123-135.
- SELLERS, P.J., HALL, F.G., KELLY, R.D., BLACK, A., BALDOCCHI, D., BERRY, J., RYAN, M., RANSON, K.J., CRILL, P.M., LETTENMAIER, D.P., MARGOLIS, H., CIHLAR, J., NEWCOMER, J., FITZJARRALD, D., JARVIS, P.G., GOWER, S.T., HALLIWELL, D., WILLIAMS, D., GOODISON, B., WICKLAND, D.E., GUERTIN, F.E., 1997. BOREAS in 1997: experiment overview, scientific results, and future directions. *Journal of Geophysical Research* 102 (D24)0, 28731-28769.
- SHIBUYA, M., HASABA, H., YAJIMA, T., 2005. Effect of thinning on allometry and needle-age distribution of trees in *Abies* stands of northern Japan. *Journal of Forest Research* 10, 15-20.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1972a. Studien zur morphologischen Variabilität der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) 3. Der gegenwertige Stand der Forschung zur morphologischen Variabilität der Fichte Gesetzmäßigkeiten und Theorien. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 143, 221-240.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1972b. Studien zur morphologischen Variabilität der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) 1. Litersturbericht. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 143, 133-144.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1977. Die Fichte Band 1, Taxonomie, Verbreitung, Morphologie, Ökologie, Waldgesellschaften.
- SCHOBER, R., 1979. Massen-, Sorten- und Wertertrag der Fichte bei verschiedener Durchforstung. Teil I. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 150, 129-152. [in German]
- SCHOBER, R., 1980. Volume, assortment and value yield of Norway spruce under different thinning treatments. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 151, 1-21. [in German with English summary]
- SCHRÖDER, W., PESCH, R., 2011. Mapping carbon sequestration in forests at the regional scale - a climate biomonitoring approach by example of Germany. *Environmental Sciences Europe* 2011, 23-31.
- SCHULP, C.J.E., NABUURS, G.-J., VERBURG, P.H., DE WAAL, R., 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management* 256, 482-490.
- SCHWEINGRUBER, F.H., BRAEKER, O.U., SCHÄR, E., 1979. Dendroclimatic studies on conifers from central Europe and Great Britain. *Boreas* 8 (4), 427-452.
- SJOLTE-JØRGENSEN, J., 1967. The influence of spacing in the growth and development of coniferous plantations. *International Reviews of Forest Research* 2, 43-94.

- SLODIČÁK, M., NOVÁK, J., 2006. Silvicultural measures to increase the mechanical stability of pure secondary Norway spruce stands before conversion. *Forest Ecology and Management* 224 (3), 252-257.
- SLODIČÁK, M., NOVÁK, J., 2007. *Výchova lesních porostů hlavních hospodářských dřevin*. Lesnický průvodce 4/2007, 46 s. ISBN: 978-80-86461-89-2.
- SMITH, D.M., LARSON, B.C., KELTY, M.J., ASHTON, P.M.S., 1997. *The practice of silviculture: applied forest ecology*. New York: John Wiley & Sons, 9<sup>th</sup> ed., 560 s. ISBN: 0-471-10941-X.
- SNORRASON, A., EINARSSON, S.F., 2006. Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry. *Icelandic Agricultural Sciences* 19, 15-24.
- SOCHA, J., KULEJ, M., 2007. Variation of the tree form factor and taper in European larch of Polish provenances tested under conditions of the Beskid Sądecki mountain range (southern Poland). *Journal of Forest Science* 53 (12), 538-547.
- SPATZ, H.-CH., BRÜCHERT, F., 2000. Basic biomechanics of self-supporting plants. *Forest Ecology and Management* 135 (1-3), 33-44.
- SPELLMANN, H., 1986. The effects of various thinning techniques and intensities on the development of a widely spaced Norway spruce stand. *Allg. Forst- und Jagdzeitung* 157, 27-31. [in German with English summary]
- SPLECHTNA, B.E., DOBRY, J., KLINKA, K., 2000. Tree-ring characteristics of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook) Nutt.) in relation to elevation and climatic fluctuations. *Ann. For. Sci.* 57, 89-100.
- SPRUGEL, D.G., BROOKS, J.R., HINCKLEY, T.M., 1996. Effects of light on shoot geometry and needle morphology in *Abies amabilis*. *Tree Physiology* 16, 91-98.
- STADT, K.J., HUSTON, C., COATES, K.D., FENG, Z., DALE, M.R.T., LIEFFERS, V.J., 2007. Evaluation of competition and light estimation indices for predicting diameter growth in mature boreal mixed forests. *Annals of Forest Science* 64, 477-490.
- STATSOFT, INC. 2011. *Statistica for Windows*. (data analysis software system) version 10. StatSoft, Tulsa, USA, [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- STENBERG, P., SMOLANDER, H., SPRUGEL, D., SMOLANDER, S., 1998. Shoot structure, light interception and distribution of nitrogen in an *Abies amabilis* canopy. *Tree Physiology* 18, 759-767.
- STOKES, A., 1995. The shape of tree root systems affects root wood strength. *Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftl. Ber. FZKA* 5518.
- SVĚTLÍK, J., KREJZA, J., MENŠÍK, L., POKORNÝ, R., MAZAL P., KULHAVÝ, J., 2015. *SEKVESTRACE UHLÍKU SMRKOVÝM POROSTEM (Picea abies (L.) Karst.) V OBLASTI DRAHANSKÉ VRCHOVINY*, Zprávy lesnického výzkumu. (In Press)
- SVOBODA, M., KOPÁČEK, J., MATĚJKA, K., PODRÁZSKÝ, V., SLÁDKOVÁ, L., 2006. Carbon pools in mountain Norway spruce ecosystem in the Bohemian forests (Czech Republic). *Forestry Journal* 52 (1-2), 79-87. ISSN 0323-1046.
- ŠALANSKÁ, P., 1999. *Index listové plochy a jeho využití pro hodnocení vlivu vnějšího prostředí na lesní porosty*. Brno: Masarykova univerzita, 76 s.
- TALKKARI, A., 1996. Regional predictions concerning the effects of climate change on forests in southern Finland. *Silva Fennica* 30 (2-3), 247-257.
- TESAŘ, V., DOBROVOLNÝ, L., 2011. Growth response of spruce stands to subsiding air pollution load at promoted development of crowns. *Beskydy* 4 (2), 179-190. ISSN: 1803-2451.
- TESAŘ V., HORČIČKA L. 1997. VELIKOST KORUN A PŘÍRŮST VÝČETNÍ ZÁKLADNY SMRKOVÝCH POROSTŮ VE VYŠŠÍCH POLOHÁCH BESKYD, Zpravodaj Beskydy „Vliv imisí na lesy a lesní hospodářství Beskyd“, 9 (1997): 189 – 196 Ediční středisko MZLU v Brně
- THOMAS, S.C., MARTIN, A., 2012. Carbon Content of Tree Tissues: A Synthesis. *Forests* 3 (2), 332-352. doi: 10.3390/f3020332
- THUILLER, W., 2007. Biodiversity: Climate change and the ecologist. *Nature* 448, 550-552.
- THUILLER, W., ALBERT, C., ARAÚJO, M.B., BERRY, P.M., CABEZA, M., GUIGAN, A., HICKLER, T., MIDGLEY, G.F., PATERSON, J., SCHURR, F.M., SYKES, M.T., ZIMMERMANN, N.E., 2008. Predicting global

- change impacts on plant species distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 9 (3-4), 137-152.
- THUILLER, W., LAVERGNE, S., ROQUET, C., BOULANGEAT, I., ARAÚJO, M.B. 2011. Consequences of climate change on the Tree of Life in Europe. *Nature* 448, 550-552.
- TOBIN, B., NIEUWENHUIS, M., 2007. Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (BONG.) CARR.) in Ireland. *European Journal of Forest Research* 126, 189-196.
- TOMÉ, M., BURKHART, H. E., 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science* 35 (3), 816-831. ISSN 0015-749X.
- TRANQUILLINI, W., 1979. Physiological ecology of the alpine timberline. Tree existence at high altitudes with special reference to the European alps. *Ecological Studies* 31, 1-137.
- TRASOBARES, A., PUKKALA, T., 2004. Using past growth to improve individual-tree diameter growth models for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Annals of Forest Science* 61, 409-417.
- TRUMBORE S., 2006. Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges. *Global Change Biology* 12, 141-153.
- TURNER, D.P., LEE, J.J., KOERPER, G.J., BARKER, J.R. (Eds.) 1993. The forest sector carbon budget of the United States: Carbon pools and flux under alternative policy options. U.S. Environmental Protection Agency, EPA Report 600/3-93/093, 202 s.
- ÚHÚL, 2003. Inventarizace lesů: Metodika venkovního sběru dat. Brandýs nad Labem: ÚHÚL, Interní materiál, 136 p.
- UNFCCC (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE), 1997. Kyoto Protocol. Available online [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php)
- URBAN, O., JANOUŠ, D., ACOSTA, M., CZERNÝ, R., MARKOVÁ, I., NAVRÁTIL, M., PAVELKA, M., POKORNÝ, R., ŠPRTOVÁ, M., ZHANG, R., ŠPUNDA, V., GRACE, J., MAREK, M.V., 2007. Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce stand. Comparison of the response in direct vs. diffuse solar radiation. *Global Change Biology* 13, 157-168.
- VALENTINI, R., MATTEUCCI, G., DOLMAN, A.J., SCHULZE, E.-D., REBMANN, C., MOORS, E.J., GRANIER, A., GROSS, P., JENSEN, N.O., PILEGAARD, K., LINDROTH, A., GRELE, A., BERNHOFER, C., GRÜNWARD, T., AUBINET, M., CEULEMANS, R., KOWALSKI, A.S., VESALA, T., RANNIK, Ü., BERBIGIER, P., LOUSTAU, D., GUETHMUNDSSON, J., THORGEIRSSON, H., IBROM, A., MORGENSTERN, K., CLEMENT, R., MONCRIEFF, J., MONTAGNANI, L., MINERBI, S., JARVIS, P.G., 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404, 861-865. doi: 10.1038/35009084.
- VALINGER, E., 1992. Effects of thinning and nitrogen fertilization on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* (L.) trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 7, 219-228.
- VALINGER, E., LUNDQUIST, L., BONDESSON, L., 1993. Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics. *Forestry* 66 (3), 249-260.
- VALINGER, E., LUNGQVIST, L., 1992. Influence of thinning and nitrogen fertilization on the frequency of snow and wind induced stand damage in forests. *Scottish Forestry* 46, 311-320.
- VANCLAY, J.K., 1994. Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests, CAB International, UK, 223-250 s.
- VETTENRANTA, J., 1999. Distance-dependent models for predicting the development of mixed coniferous forests in Finland. *Silva Fennica* 33 (1), 51-72.
- VICENA, I., PAŘEZ, J., KONŮPKA, J., 1979. Ochrana lesa proti polomům . Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 244 s.
- VINŠ B., ŠIKA A. 1975. Biomasa nadzemních a podzemních částí vzorníků smrku. Dílčí závěrečná zpráva. Jíloviště-Strnady, VÚLHM: 38 s.
- 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.

- VYSKOT, M., ET AL., 1971. Základy růstu a produkce lesů. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 446 s.
- WANG, Y., TITUS, S.J., LEMAY, V.M., 1998. Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixedwood forests. *Canadian Journal of Forest Research* 28 (8), 1171-1183.
- WANG, Y.P., 1988. Crown structure, radiation, absorption, photosynthesis and transpiration. Dissertation. University of Edinburgh.
- WEBER, P., BUGMAN, H., FONTI, P., RIGLING, A., 2008. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. *Forest Ecology and Management* 254, 96-106.
- WEIGELT, A., JOLLIFFE, P., 2003. Indices of plant competition. *Journal of Ecology* 91 (5), 707-720.
- WEISS P., SCHIELER K., SCHADAUER K., RADUNSKY K., ENGLISCH M. 2000. Carbon budget of Austrian Forests and Considerations about Kyoto Protocol. Monograph M-106. Wien, Federal Environment Agency.
- WESSOLLY, L., ERB, M., 1998. Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Berlin: Patzer, 270 s. ISBN: 3-87617-093-1.
- WHITE, J., 1980. Demographic factors in populations of plants. In: SOLBRING, O.T. (Ed.). *Demography and Evolution in Plant Populations*. Oxford: Blackwell Scientific, 21-48.
- WIESMEIER, M., PRIETZEL, J., BARTHOLD, F., SPÖRLEIN, P., GEUß, U., HANGEN, E., REISCHL, A., SCHILLING, B., VON LÜTZOW, M., KÖGEL-KNABNER, I., 2013. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) - implications for carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 295, 162-172.
- WILHELMSSON, L., ARLINGER, J., SPÅNGBERG, K., LUNDQVIST, S.-O., GRAHN, T., HEDENBERG, Ö., OLSSON, L. 2002. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 330-350.
- WILLIAMSON, T.B., PRICE, D.T., BEVERLY, J., BOTHWELL, P.M., FRENKEL, B., PARK, J., PATRIQUIN, M.N., 2008. Assessing potential biophysical and socioeconomic impacts of climate change on forest-based communities: a methodological case study. Edmonton: Report NOR-X-415E., 166 s.
- WILSON, R.J.S., HOPFMÜLLER, M., 2001. Dendrochronological investigations of Norway spruce along an elevational transect in the Bavarian Forest, Germany. *Dendrochronologia* 19, 67-69.
- WIRTH, C., SCHUMACHER, J., SCHULZE, E.D., 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* 24, 121-139.
- WORALL, J., 1970. Interrelationships among some phenological and wood property variables in Norway spruce. *Tappi* 53, 58-63.
- WRIGHT, T.W., 1957. Some effects of thinning on soil of a Norway spruce plantation. *Forestry* 30 (2), 123-133.
- WYKOFF, R.W., 1990. A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky Mountains. *Forest Science* 36, 1077-1104.
- ZEIDE, B., 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* 39 (3), 549-616.
- ZEIDE, B., 2001. Thinning and growth: a full turnaround. *Journal of Forestry* 99 (1), 20-25.
- ZHAO, J., MAGUIRE, D.A., MAINWARING, D., WEHAGE, J., KANASKIE, A., 2013. Thinning mixed-species stands of Douglas-fir and western hemlock in the presence of Swiss needle cast: guidelines based on relative basal area growth of individual trees. *Forest Science* 60 (1), 191-199.
- ZHENG, D., FREEMAN, M., BERGH, J., RØSBERG, I., NILSEN, P., 2002. Production of *Picea abies* in south-east Norway in response to climate change: a case study using process-based model simulation with field validation. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17 (1), 35-46.
- ZIANIS, D., MENCUCCINI, M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187, 311-332.
- ZIANIS, D., MUUKKONEN, P., MÄKIPÄÄ, R., MENCUCCINI, M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica* 4, 1-63.
- ZUBIZARRETA GERENDIAIN, A., PELTOLA, H., PULKKINEN, P., IKONEN, V.P., JAATINEN, R., 2008. Differences in growth and wood properties between narrow and normal crowned types of Norway spruce grown at narrow spacing in southern Finland. *Silva Fennica* 42 (3), 423-437. ISSN: 0037-5330.

## 7. Přílohy

### 7.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Lesnatost v rámci Evropy (KEMPENEERS et al., 2011).....	3
Obrázek 2: Zjednodušené schéma cyklu uhlíku v lesním ekosystému. ....	4
Obrázek 3: Koncentrace atmosférického CO <sup>2</sup> (PETIT et al., 1999).....	6
Obrázek 4: Vykazované emise skleníkových plynů (sloupce, osa y vlevo) pro emisní kategorie uvedené legendou napravo. Modrá linie (osa y vpravo) zobrazuje relativní podíl propadů (navázaného množství) skleníkových plynů v kategorii lesní plocha vzhledem k celkovým emisím (zdroj CIENCIALA, 2011). ....	7
Obrázek 5: Modelová změna zastoupení hlavních dřevin v rámci Evropy v období od současnosti až po rok 2100 (HANEWINKEL et al., 2013). ....	8
Obrázek 6: Posun společenstev smrku zteplého na základě současného tempa chodu globální klimatické změny. Žlutá barva značí místa s nízkou pravděpodobností výskytu smrku zteplého, fialová barva naopak značí místa, kde bude pravděpodobnost výskytu smrku vysoká (HANEWINKEL et al., 2013). ....	9
Obrázek 7: Poloha Experimentálního ekologického pracoviště Bílý Kříž a letecký pohled na volnou smrkovou plochu EEP. ....	24
Obrázek 8: Poloha výzkumné stanice Rájec-Němčice (vlevo) a letecký snímek probírkových ploch (vpravo).....	27
Obrázek 9: Prostorové rozmístění kvadrantů se smrkovými porosty, ve kterých jsou prováděny různé varianty pěstební výchovy. ....	28
Obrázek 10: Poloha výzkumných ploch Salaška (modré označení) a ploch Leopoldka (červené označení). ....	29
Obrázek 11: Vývoj hustoty porostů v lokalitě Leopoldka (Výzkumná plocha 1. a 2.), (TESAŘ a DOBROVOLNÝ, 2011 <i>aktualizováno na současný stav porostů</i> ). ....	31
Obrázek 12: Vývoj porostní hustoty v lokalitě Salaška (výzkumná plocha 3., 4., a 5.), (TESAŘ a DOBROVOLNÝ, 2011 <i>aktualizováno na současný stav porostů</i> ). ....	31
Obrázek 13: Vývoj porostní hustoty v ploše FS a FD. ....	33
Obrázek 14: Schéma zaměření vzorníkových stromů z ploch FS a FD. ....	34
Obrázek 15: Znázornění zaměření korunové projekce (a.), korunového profilu (b.) a kmenového profilu (c.). ....	35
Obrázek 16: Četnost stromů dle tloušťkových tříd pro plochu FS a FD. ....	39
Obrázek 17: Tvar kmene pro plochy FS a FD.....	41
Obrázek 18: Relativizovaný tvar koruny vzorníkových stromů na ploše FS a FD. MCF je průměrná výtvarnice koruny. ....	42
Obrázek 19: Regresní vztah mezi DBH a objemem kmene, DBH a objemem koruny a DBH s korunovou projekcí. U všech vztahů je uvedena regresní rovnice a koeficient determinace.....	43
Obrázek 20: Vývoj přírůstu celkové nadzemní biomasy (tučně) v kontextu změny hustoty porostu. ....	46
Obrázek 21: Vývoj Indexu listové plochy (LAI), hodnoty sezónního maxima v husté (FD) a řídké (FS) ploše ve vybraných letech 1999–2011 v kontextu změny porostní hustoty. ....	46
Obrázek 22: Vývoj porostní zásoby celkové biomasy v období 1999–2011. ....	47
Obrázek 23: Štíhlostní koeficient kmene (SK) v závislosti na výčetní tloušťce jedinců (DBH) v rámci výzkumných ploch FS a FD. ....	48
Obrázek 24: Procentuální zastoupení výskytu zlomu kmene na inventarizačních plochách v rámci porostu FS a FD. ....	48
Obrázek 25: Alometrické vztahy pro celkovou nadzemní biomasu (TBA) včetně jednotlivých frakcí biomasy (SB – biomasa kmene, BB – biomasa větví a LB – biomasa listoví). Alometrický vztah je	

konstruován v závislosti na DBH, H, a kompetičním indexu (CI). Prázdná kolečka a přerušovaná čára reprezentují podúrovňovou probírku (TfB) z plochy C3, plné kosočtverce a plná čára reprezentují probírku úrovňovou (TfA) z plochy D4. ....	59
Obrázek 26: Poloha výzkumných ploch v rámci České republiky. ....	67
Obrázek 27: Znázornění polohy vzorníkového stromu k poloze sousedních stromů s vyznačením potencionálně prostorově dostupné plochy (AA), která je vyznačená světle šedou plochou, a sociální plochy (AS), která je vyznačená tmavě šedou plochou (levý obrázek). Pravý obrázek znázorňuje příklad minimálních ( $D_{i\min}$ ) a maximální vážených vzdáleností ( $D_{i\max}$ ) mezi vzorníkovým stromem a jeho sousedními stromy. ....	69
Obrázek 28: Příklad vážených Voroného polygonů (pravý obrázek) a sociální plochy (levý obrázek) na příkladu plochy Kněhyně 3. ....	70
1. $CI_{DBH}$	71
$CI_{DBH} = 1n_i = 1n(DBH_j DBH_i \times 1D_{ij})$ .....	71
$CI_{CL} = 1n_i = 1n(CL_j CL_i \times 1D_{ij})$ .....	71
n, počet sousedních stromů ; DBH <sub>i</sub> , DBH (cm) vzorníkového stromu; DBH <sub>j</sub> , DBH (cm) příslušného sousedního stromu .....	71
CL <sub>i</sub> , délka koruny vzorníkového stromu (m); CL <sub>j</sub> , délka koruny příslušného sousedního stromu (m) .....	71
Obrázek 29: Způsob prostorové segmentace sociální plochy (AS). ....	72
Obrázek 30: Grafické znázornění rozdělení stromů dle sociálního postavení. Stromy nalevo od tečkované čáry jsou klasifikovány jako stromy podúrovňové, stromy mezi tečkovanou a přerušovanou čarou jako stromy úrovňové a stromy napravo od přerušované čáry jako stromy nadúrovňové. ....	73
Obrázek 31: Grafické znázornění jednotlivých pravidel pro filtrování stromů dle tvaru jejich sociální plochy. $AS_{(rel.)i k=MAX}$ je největší relativní segment sociální plochy proti $AS_{(rel.)i k=MIN}$ , což značí minimální segment sociální plochy.....	75
Obrázek 32: Histogram pro parametr potencionálně prostorově dostupné plochy (AA) a sociální plochy (AS).....	77
Obrázek 33: Vztah mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) a sociální plochou (AS), kterou reprezentují plná kolečka, a potencionálně prostorově dostupnou plochou (AA), která je reprezentována trojúhelníky. ....	78
Obrázek 34: Závislost mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) a parametrem vážených Voroného polygonů (WVP) pro jednotlivé jedince. ....	80
Obrázek 35: Vztah mezi přírůstem na výčetní kruhové ploše individuálních jedinců ( $I_{g5}$ ) a parametry minimální ( $D_{i\min}$ ), průměrná (MWD) a maximální ( $D_{i\max}$ ) vážená vzdálenost k okolním jedincům. $D_{i\min}$ reprezentují prázdné kroužky, MWD plné kroužky a parametr $D_{i\max}$ reprezentují prázdné trojúhelníky. ....	81
Obrázek 36: Vztah mezi 5letým přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) a vzdálenostně závislým kompetičním indexem s parametrem výčetní tloušťka kmene (DBH) - $CI_{DBH}$ (obrázek a.). Vztah mezi $I_{g5}$ a vzdálenostně závislým kompetičním indexem s parametrem délka koruny (CL) - $CI_{CL}$ (obrázek b.). ....	82
Obrázek 37: Rezidua pro model číslo 13. $I_{g5}$ je přírůst na výčetní kruhové ploše stromu, který byl odhadnut pomocí modelu číslo 13. ....	87
Obrázek 38: Přírůst na výčetní kruhové ploše za 5let dovozený pomocí modelu ALL a SINGLE. Pro model ALL byl použit model č. 13, pro SINGLE model byl použit stejný tvar modelu, ale s individuálními, stanovištně specifickými koeficienty ( $b_0 - b_4$ ) pro jednotlivé výzkumné plochy. ....	88
Obrázek 39: Největší relativní velikost sektoru sociální plochy individuálního jedince ( $AS_{(rel.)i k=MAX}$ ) k nejmenšímu relativnímu sektoru sociální plochy individuálního jedince ( $AS_{(rel.)i k=MIN}$ ). Plná kolečka značí velikosti sektorů ze segmentace sever-západ (S-Z) a prázdné trojúhelníky jsou ze segmentace severovýchod-severozápad (SV-SZ). ....	89

Obrázek 40: Průměrné hodnoty relativního přírůstu DBH za sledované pětileté období ( $I_{5,rel.(t)}$ ) s vyznačenými intervaly spolehlivosti ( $\alpha=0,05$ ) v závislosti na otevřenosti nebo naopak utlačení ze světových stran. Data byla filtrována dle pravidla 1-4. L značí směrovou orientaci největšího a S nejmenšího segmentu sociální plochy v rámci segmentace ke světovým stranám. Plná čára a prázdné čtverce značí trend u nadúrovňových stromů, přerušovaná čára a plné čtverce značí stromy úrovně a čerchovaná čára a prázdné kroužky značí stromy podúrovně. Mezi červeně zakroužkovanými hodnotami je statisticky významný rozdíl v rámci sociálního postavení jedinců v porostu při hladině významnosti $\alpha=0,05$ . .....	90
Obrázek 41: Tloušťkový přírůst po tloušťkových decilech za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) v lokalitě Rájec-Němčice. ....	103
Obrázek 42: Tloušťkový přírůst po tloušťkových decilech za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) v lokalitě Bílý Kříž. ....	103
Obrázek 43: Průměrný roční přírůst celkové biomasy pro lokalitu Rájec-Němčice a Bílý Kříž. ....	104
Obrázek 44: Procentuální podíl zásoby biomasy na stromové úrovni dle DBH z lokality Rájec-Němčice (plocha D4). Zkratky na obrázku značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB). ....	107
Obrázek 45: Procentuální podíl zásoby biomasy na stromové úrovni dle DBH z lokality Rájec-Němčice, plocha C3. Zkratky na obrázku značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB). ....	108
Obrázek 46: Procentuální podíl zásoby biomasy na stromové úrovni dle DBH z lokality Bílý Kříž. Zkratky na obrázku značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB). ....	109
Obrázek 47: Obsah uhlíku v biomase jehličí ve vertikálním profilu koruny z lokality Rájec-Němčice a Bílý Kříž. ....	111
Obrázek 48: Obsah uhlíku v biomase větví ve vertikálním profilu koruny z lokality Rájec-Němčice a Bílý Kříž. ....	111
Obrázek 49: Obsah uhlíku v biomase kmene z lokality Rájec-Němčice a Bílý Kříž. ....	112
Obrázek 50: Průměrná roční sekvestrace uhlíku do celkové biomasy ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014). Obrázek a. znázorňuje rozložení tlouštěk na jaře roku 2009, obrázek b. znázorňuje tloušťkové rozložení na podzim r. 2014, obrázek c. zobrazuje průměrnou roční sekvestraci uhlíku do celkové biomasy dle tloušťkových tříd na sledované výzkumné ploše C3 (červená barva) a na ploše D4 (zelená barva) v lokalitě Rájec-Němčice. ....	114
Obrázek 51: Průměrná roční sekvestrace uhlíku do celkové biomasy ve sledovaném období (jaro 2009 – podzim 2014). Obrázek a. znázorňuje rozložení tlouštěk na jaře roku 2009, obrázek b. zobrazuje tloušťkové rozložení na podzim r. 2014, obrázek c. představuje průměrnou roční sekvestraci uhlíku do celkové biomasy dle tloušťkových tříd na sledovaných výzkumných plochách na lokalitě Bílý Kříž (FD - žlutá barva, FS - modrá barva). ....	115
Obrázek 52: Modelové zobrazení rozdílnosti alometrických vztahů pro stanovení biomasy kmene (SB), biomasy větví (BB) a biomasy listoví (LB) pro lokality Rájec-Němčice (plocha C3 (prázdná kolečka) a D4 (plná kolečka)) a Bílý Kříž (černé hvězdičky). ....	116
Obrázek 53: Výsledek porovnání průměrné výtvarnice kmene (MSF) pro jednotlivé výzkumné plochy pomocí statistické analýzy ANOVA. ....	117
Obrázek 54: Schématické znázornění „ideální“ potenciálně prostorově dostupné plochy (světle šedá plocha) a „ideální“ sociální plochy z pohledu orientace ke světovým stranám. Plné černé kolečko značí zájmový strom, prázdná kolečka značí sousední jedince stromu. ....	130



## 7.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled používaných alometrických vztahů pro odvození biomasy jednotlivých orgánů stromu pro smrk ztepilý z oblasti Evropy (zahrnutý studie z 9 evropských států). Použité zkratky značí: M – počet modelů a DBH – tloušťka stromu ve výčetní výšce. Zvýrazněné modely jsou modely z území České republiky.....	20
Tabulka 2: Hodnoty expanzních faktorů (BEFs) pro smrk ztepilý, které byly publikovány pro evropské podmínky.....	22
Tabulka 3: Průměrná roční teplota vzduchu ve výšce 2 m nad zemí (Ta) a roční úhrn srážek (P) v letech 1998–2011 na klimatologické stanici Bílý Kříž ( $\pm$ směrodatná odchylka) MARKOVÁ et al., (2013).25	25
Tabulka 4: Vývoj porostní hustoty a indexu listové plochy (LAI) na výzkumných plochách FS a FD v období 1999–2011 LAI byl stanoven nepřímou metodou (LAI-2000, PCA, Li-Cor, USA). V závorce u parametru LAI je uvedena směrodatná odchylka sezónního maxima.....	26
Tabulka 5: Porostní charakteristiky vybraných ploch z probírkových zásahů. (DBH - výčetní tloušťka ve výšce 1,3 m, H - výška porostu, G <sub>1,3</sub> – výčetní kruhová základna porostu, TA - celková biomasa. ....	28
Tabulka 6: Základní charakteristika výzkumných ploch z oblasti Beskyd (plocha 1. a 2. – Leopoldka, plochy 3. – 5. Salaška, Moravskoslezské Beskydy, vrch Kněhyně).....	29
Tabulka 7: Základní porostní charakteristiky výzkumných ploch z lokality Beskyd (Kněhyně) z roku 2012 (DBH - výčetní tloušťka ve výšce 1,3 m, H - výška porostu, G <sub>1,3</sub> – výčetní kruhová základna porostu). ....	30
Tabulka 8: Alometrické rovnice použité pro stanovení biomasy jehlic (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB). ....	37
Tabulka 9: Klasifikace výskytu zlomu kmene (HOLDER et al., 2006). ....	37
Tabulka 10: Základní dendrometrické charakteristiky výzkumných ploch FS a FD v období 1999–2011. ( $\pm$ SD – směrodatná odchylka). ....	38
Tabulka 11: Vybrané charakteristiky vzorníkových stromů z plochy FS (n=22) a FD (n=20).....	40
Tabulka 12: Vývoj zásoby biomasy a její přírůstek pro jednotlivé orgány z období 1999–2011 pro plochu FS a FD. ....	44
Tabulka 13: Porostní charakteristiky pro plochy C3 a D4 s plikovanou silnou podúrovňovou probírkou (TfB) a úrovňovou probírkou (TfA). ....	55
Tabulka 14: Průměrné charakteristiky vzorníkových stromů ( $\pm$ směrodatná odchylka, SD), DBH – výčetní tloušťka kmene, CI – kompetiční index.....	57
Tabulka 15: Průměrné hodnoty biomasy listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a celkové nadzemní biomasy (TBA) vzorníkových stromů z plochy C3 (TfB; n=8) a D4 (TfA; n=13). Přepočítané hodnoty biomasy porostu na hektar, jako výsledek aplikace specifických alometrických rovnic pro daný typ probírky. ....	57
Tabulka 16: Průměrné hodnoty biomasy na jeden strom pro plochu C3 s podúrovňovou probírkou (TfB) a plochu D4 s úrovňovou probírkou (TfA), LB značí biomasu listoví, BB biomasu větví, SB biomasu kmene a TBA celkovou nadzemní biomasu. ....	58
Tabulka 17: Parametry vícenásobné regrese pro stanovení celkové nadzemní biomasy a biomasy jednotlivých orgánů pro podúrovňovou probírku (TfB), kterou reprezentuje plocha C3 a úrovňovou probírku (TfA), reprezentovanou plochou D4 (koeficienty a, b, c, d pro rovnici č. 4), $r^2$ koeficient determinace vícenásobné regrese.....	60
Tabulka 18: Statistický test alokace biomasy mezi typy probírky, při hladině významnosti $\alpha = 0,05$ . 60	60
Tabulka 19: Přehled expanzních faktorů (BEFs) pro stanovení celkové nadzemní biomasy (TBA), biomasy kmene (SB), listoví (LB) a větví (BB) z objemu kmene/porostu. SD – směrodatná odchylka.....	61
Tabulka 20: Základní charakteristiky výzkumných ploch. ....	67

Tabulka 21: Základní charakteristiky výzkumných ploch a jejich dendrometrické charakteristiky. $n_1$ značí počet jedinců na výzkumné ploše, $n_2$ značí počet stromů, pro který byla vypočítána sociální plocha a potenciaálně prostorově dostupná plocha, DBH – výčetní tloušťka kmene. ....	68
Tabulka 22: Vzdálenostně závislé kompetiční indexy a jejich příslušné rovnice. ....	71
Tabulka 23: Matematické vyjádření pravidel pro filtrování stromů dle tvaru sociální plochy a jejich sociálního postavení. ....	74
Tabulka 24: Porostní charakteristiky: průměrné hodnoty sociální plochy (AS), potenciaálně prostorově dostupné plochy (AA), směrodatná odchylka (SD), výčetní kruhová základna na hektar (G), počet stromů na hektar (N), Index hustoty porostu (SDI). ....	76
Tabulka 25: Hodnoty koeficientu determinace pro korelaci mezi parametrem sociální plochy (AS) a 5letým přírůstem na výčetní kruhové ploše ( $I_{g5}$ ) v případě použití odlišných parametrů pro vážení při výpočtu AS. Použité zkratky značí: BA – výčetní kruhová základna jedince, DBH - tloušťka ve výčetní výšce, CP – korunová projekce, H – výška stromu. ....	77
Tabulka 26: Regresní vztah mezi sociální plochou (AS) a přírůstem na kruhové průřezové ploše jednotlivých jedinců za posledních 5 let ( $I_{g5}$ ) modelu pro jednotlivé výzkumné plochy (Model single) a obecný model napříč všemi výzkumnými plochami (Model ALL). Hodnota P je výsledkem T-testu, kterým byly porovnány výsledky aplikace modelu ALL a SINGLE. $R^2$ je koeficient determinace pro jednotlivé modely. ....	79
Tabulka 27: Korelace mezi 5letým přírůstem na výčetní kruhové ploše u jednotlivých jedinců ( $I_{g5}$ ) s jednotlivými kompetičními indexy s odlišnými proměnnými. Kompetiční index $NTD_6$ je index, do kterého nevstupuje vzdálenost, ale pouze parametry šesti nejbližších stromů. Další použité zkratky jsou: DBH - výčetní tloušťka kmene, CP – korunová projekce, H – výška stromu, BA – výčetní kruhová jedince, CL – délka živé koruny, $R^2$ – koeficient determinace, All – způsob výpočtu s použitím všech šesti stromů, $>A_i$ způsob výpočtu s použitím pouze větších sousedních stromů než je šetřený strom. ....	83
Tabulka 28: Modely pro predikci přírůstu na výčetní kruhové ploše za pětileté období ( $I_{g5}$ ). ....	84
Tabulka 29: Hodnoty parametrů rovnic pro vybrané modely. ....	86
Tabulka 30: Analýza kovariance mezi specifickými modely pro jednotlivé výzkumné plochy a celkový model č. 13 se shodným tvarem rovnice modelu, ale se specifickými parametry pro jednotlivé plochy. $R^2$ – koeficient determinace, F a p jsou výsledky testu analýzy kovariance pro porovnání shodnosti jednotlivých modelů s modelem č. 13. ....	87
Tabulka 31: Medián a extrémní hodnoty relativní velikosti segmentů sociální plochy ( $AS_{(rel.) i k soc.}$ ) v segmentaci sever-západ (S-Z) a v segmentaci severovýchod-severozápad (SV-SZ). ....	89
Tabulka 32: Základní charakteristiky výzkumných ploch z jara 2009 a podzimu 2014. ....	99
Tabulka 33: Dendrometrické charakteristiky vzorníkových stromů pro zjištění obsahu uhlíku v jednotlivých orgánech stromu. ....	101
Tabulka 34: Zásoba biomasy v jednotlivých stromových orgánech (frakcích) na úrovni porostu na jaře 2009 a na podzim 2014. V tabulce jsou uvedeny zásoby biomasy kmenů (SB), větví (BB), listoví (LB) a kořenů (RB). Celková biomasa (TB) je potom součtem těchto jednotlivých orgánů stromu. Těžba je uvedena jako celková těžba biomasy včetně kořenů, přičemž tato část biomasy byla na výzkumných plochách ponechána. ....	105
Tabulka 35: Průměrný roční přírůst biomasy za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014) pro lokality Bílý Kříž a Rájec-Němčice. Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB). Hodnota p je výsledkem t-testu. ....	106
Tabulka 36: Průměrné hodnoty procentuálního podílu biomasy jednotlivých orgánů stromu. Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB) a kořenů (RB). ....	109
Tabulka 37: Parametry modelu pro odhad procentuálního podílu zásoby biomasy jednotlivých orgánů stromu z celkové biomasy stromu. Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB), koeficient determinace ( $R^2$ ) a střední čtvercová chyba modelu (MSE). ....	110
Tabulka 38: Průměrné procentuální zásoby uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromu. ....	112

Tabulka 39: Zásoba uhlíku v jednotlivých orgánech stromu na porostní úrovni v roce 2009 (jaro). Použité zkratky označují biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB) a celkovou biomasu (TB).....	113
Tabulka 40: Průměrná roční sekvestrace uhlíku do jednotlivých orgánů stromu na porostní úrovni za sledované období (jaro 2009 – podzim 2014). Použité zkratky značí biomasu listoví (LB), větví (BB), kmene (SB), kořenů (RB) a celkovou biomasu (TB). .....	115