

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav zakládání a pěstění lesů

**Vliv zvýšené vzdušné koncentrace oxidu uhličitého na růst
buku lesního**

Diplomová práce

Brno 2015

Bc. Sokolová Tereza

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci: „**Vliv zvýšené vzdušné koncentrace oxidu uhličitého na růst buku lesního**“ zpracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje 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 vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala panu doc. Ing. Radku Pokornému, Ph.D., za velmi cenné rady, ochotu, poskytnuté materiály a trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Kateřině Novosadové, za její čas a velmi ochotnou pomoc a cenné rady při psaní této práce. Velký dík patří také mým spolužákům.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala mé rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Děkuji.

ABSTRAKT

Jméno posluchače: Tereza Sokolová

Název diplomové práce: **Vliv zvýšené vzdušné koncentrace oxidu uhličitého na růst buku lesního**

Zvýšená koncentrace CO₂ ovlivňuje anatomické, fyziologické i morfologické vlastnosti rostlin a to jak přímo, tak i nepřímo. Cílem této práce bylo zjistit vliv zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ na růst buku lesního (*Fagus sylvatica*). Vlastní experiment probíhal od podzimu roku 2005 na ekologickém pracovišti Bílý Kříž v Beskydech na uměle založených plochách (A-ambient – přirozená vzdušná koncentrace CO₂ – 385 ppm, E-elevated – 700 ppm, C-control – otevřená kontrolní plocha). Dvouleté semenáčky buku a tříleté semenáčky smrku byly vysázeny v trojúhelníkovém sponu do lamelových sfér a to v celkovém počtu 96 stromů. Studie je zaměřená na produkci biomasy buku lesního v různých typech smíšení spolu se smrkem ztepilým (P-pure – monokultura, I-individual – jednotlivé smíšení, G-group – skupinovitě smíšení). V polovině srpna 2013 byla započata destrukce buků, která byla dokončena v září 2013. Nadzemní části byly rozděleny na listy, větve a kmen a také kořeny byly podrobeny později destrukční analýze. Oddělené části stromu se pro stanovení biomasy sušily v sušárně 48 hodin při 80 °C a následně 2 hodiny při 105 °C a nakonec byly zváženy.

Po osmi letech trvání experimentu kultivace smrku ztepilého a buku lesního v lamelových sférách, nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly v celkové biomase stromů mezi sférou A a E. Byl však zjištěn významný vliv CO₂ na biomasu jednotlivých orgánů (listí, větve, kmeny a kořeny včetně pařezů) a také na stromy pěstované v jednotlivém smíšení I. Při srovnání celkové biomasy ve sférách, byla ve sféře E průměrná celková biomasa jednotlivého stromu o 27 % nižší ve smíšení G, o 25 % vyšší ve smíšení P a o 147 % vyšší ve smíšení I než ve sféře A. Produkce biomasy kořenů bez zjištění vlivu smíšení je vyšší o 60 % v rámci sféry E. Největší rozdíl podzemní biomasy byl mezi sférami zjištěn ve smíšení I. Ve sféře E bylo až o 200 % více podzemní biomasy nežli ve sféře A. Tyto předběžné výsledky ukazují, že celková biomasa buku byla vyšší ve sféře E nežli ve sféře A. Rozdíly v celkové biomase je však nutné zohlednit podle smíšení a koncentrace CO₂.

Klíčová slova: biomasa, buk lesní, globální změna klimatu, oxid uhličitý

ABSTRACT

Author: Tereza Sokolová

Title of thesis: **Effect of elevated atmospheric carbon dioxide concentrations on the growth of beech**

Elevated CO₂ concentration influences the anatomical, physiological and morphological characteristics of plants, both directly and indirectly. The aim of this thesis was to determine the effect of increased atmospheric CO₂ concentration on growth of European beech (*Fagus sylvatica*). The experiment was carried out from autumn 2005 on environmental work place Bílý Kříž in Beskydy and established in artificial conditions (A-ambient - natural air concentration of CO₂ - 385 ppm, E-elevated - 700 ppm, C-control - open control area). Two-year old seedlings of beech and three years old spruces seedlings have been planted in a triangular spacing in lamellar biospheres in a total of 96 individuals. The study is focused on biomass production of beech in different types of mixed cultures together with Norway spruce (P-pure - monoculture, I-Individual – individual mixing, G-group – group mixing). In mid August 2013 has begun destruction of beeches, which was completed in September 2013.

Aboveground parts were divided into group consisting of branches and trunk and roots were subjected to destructive analysis later. Separate parts of the trees were dried in the oven for 48 hours at 80 °C and subsequently 2 hours at 105 °C and then were weighed to determine the biomass.

After eight years of experiment, cultivation of spruce and beech in lamellar biospheres, there were no significant differences in total biomass of trees between varieties A and E. However, it showed significant influence of CO₂ on the biomass of individual organs (leaves, branches, trunks and roots, including stumps) as well as trees grown in a single mixed culture (I). When comparing the total biomass in the spheres, sphere E showed average total biomass of an individual tree about 27 % higher, in mixed G variety 25 % lower and in the P mixing 147 % higher than mixed I in the sphere A. Biomass production of roots without identification of mixing factor increased by 60 % in the E variety. Most significant difference in belowground biomass was detected in variety of mixing I. In the E sphere was 200 % more belowground biomass compared to sphere A. These preliminary results show that total biomass of beech was higher in sphere E than

in the sphere A. Differences in total biomass , however, can be caused by mixing and correspond to the concentration of CO₂.

Keywords: biomass, beech, global climate change, carbon dioxide

.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíl práce.....	12
3. Literární přehled	13
3.1. Globální změna klimatu.....	14
3.1.1. Dopady GZK.....	19
3.1.2. Vliv GZK na lesy a lesnictví.....	21
3.2. Skleníkový efekt	22
3.3. Oxid uhličitý – CO ₂	23
3.3.1. Snížení produkce oxidu uhličitého	25
3.4. Koncentrace CO ₂ a její odhad do budoucna	26
3.5. Vliv zvýšené koncentrace CO ₂ na fyziologické procesy rostlin a na lesní ekosystémy.....	29
3.5.1. Obecné výsledky pěstování dřevin ve zvýšené koncentraci CO ₂	32
3.6. Čeled' Bukovité – Fagaceae	33
3.6.1. Buk lesní – <i>Fagus sylvatica</i> a jeho charakteristika.....	33
3.7. Popis pracoviště a experimentu	36
3.7.1. Experimentální ekologické pracoviště a jeho popis	36
3.7.2. Historie studia dlouhodobých účinků zvýšené koncentrace CO ₂	37
3.7.3. Výzkumné plochy se simulací zvýšeného účinku CO ₂	38
3.7.4. Popis lamelových sfér	38
4. Metodika	42
4.1. Popis výsadby stromů	42
4.2. Popis destrukce stromů	43
4.3. Statistická analýza.....	45
5. Výsledky	46
5.1. Celková biomasa.....	46
5.2. Nadzemní biomasa.....	48
5.3. Listová biomasa	49
5.4. Biomasa větví	50
5.5. Biomasa kmene.....	51

5.6.	Biomasa kořenů a pařezů	52
5.6.1.	Biomasa kořenů s tloušťkou menší než 1 mm	53
5.6.2.	Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 1, 01–2 mm	54
5.6.3.	Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 2, 01–5 mm	55
5.6.4.	Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 5, 01–20 mm	56
5.6.5.	Biomasa kořenů s tloušťkou větší než 20,01 mm	57
5.6.6.	Biomasa pařezů	58
6.	Diskuze	59
7.	Závěr	63
8.	SUMMARY	64
	Seznam použité literatury	65
	Seznam obrázků	72
	Seznam tabulek	73

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

A – běžná vzdušná koncentrace CO₂ (z angl. Ambient Concentration)

C – uhlík

CO₂ – Oxid uhličitý

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

E – zvýšená vzdušná koncentrace CO₂ (z angl. Elevated Concentration)

EEP Bílý Kříž – Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž

FAO – Organizace pro výživu a zemědělství (z angl. Food and agriculture Organization)

GZK – Globální změna klimatu

Gt – gigatuna (1Gt = 10⁹ t)

G-group – skupinové smíšení

IPCC – Mezinárodní panel pro klimatickou změnu (z angl. Intergovernmental Panel on Climate Change)

I-individual – jednotlivé smíšení

lvs – lesní vegetační stupeň

N₂O – oxid dusný

NH₄ – čpavek

Mt - megatuna (1Mt = 10⁶ t)

OSN – Organizace spojených národů

ppm – počet částic na jeden milion částic (zkratka z anglického parts per milion)

pH – vodíkový potenciál

P-pure – monokultura

μmol – mikromol (1μmol = 10⁻⁶ mol)

SO₂ – oxid siřičitý

°C – stupeň celsia

1. Úvod

Na schopnosti zelených rostlin transformovat sluneční energii do makroergních uhlíkových vazeb organických sloučenin je založen život na Zemi. Uložená energie je dále využívána pro život zelených rostlin i živočichů. Významnou roli zde hraje uhlík, nejen protože uhlíkaté sloučeniny jsou základním produktem fotosyntézy a jsou základním stavebním kamenem struktur všech živých organismů, ale protože oxid uhličitý (CO₂), společně s vodními parami, se nejvíce podílí na vytváření skleníkového efektu Země. Spalováním fosilních paliv dochází k nárůstu vzdušné koncentrace CO₂ a zesilování skleníkového efektu. Během vývoje planety a života na Zemi se koncentrace CO₂ významně měnila (Luthi et al. 2008).

Na jedné třetině území České republiky se rozkládají lesní porosty, které jsou základním prvkem ekologické stability krajiny. Lesy jsou tvořeny lesními dřevinami, které jsou dlouhověké a mají přirozenou schopnost vytvářet vysoké objemy biomasy, která je obnovitelným přírodním zdrojem. Lesy plní vedle produkční i mimoprodukční funkce, jako například půdoochrannou, vodoochrannou, klimatickou a celou řadu dalších celospolečenských funkcí, které v souvislosti s dopady klimatické změny nabudou na kvalitě i kvantitě svého účinku. Zcela nový funkční potenciál lesních porostů evokuje zesilující se hrozba skleníkového efektu atmosféry.

Kalvová (2002) uvádí, že: „*Problematiku dopadů změny klimatu na lesy a lesní hospodářství České republiky je nutno chápat jako reakci porostů lesních dřevin na kombinaci působení změněných stanovištních podmínek v důsledku změny klimatických faktorů a přímého působení zvýšené koncentrace CO₂. Tedy důsledkem klimatické změny bude změněný potenciál stanoviště pro pěstování porostů lesních dřevin a také změna nároků a tolerance lesních dřevin ke stanovištním podmínkám*“.

Diplomová práce „Vliv zvýšené vzdušné koncentrace oxidu uhličitého na růst buku lesního“, se proto zaměřuje na vliv zvýšené koncentrace CO₂ na produkci biomasy buku lesního kultivovaného v různém smíšení se smrkem ztepilým. Labilní smrkové porosty jsou často přeměňovány či převáděny na smíšené porosty často s bukem lesním, který je v současné době jednou z nejpoužívanějších melioračních dřevin. Experiment, kterému se tato práce věnuje, je právě proto založen na vyhodnocení různého typu smíšení buku lesního a smrku ztepilého na produkci biomasy pod vlivem zvýšené vzdušné koncentrace CO₂.

2. Cíl práce

Cílem diplomové práce bylo vypracovat literární rešerši k problematice narůstající koncentrace CO₂ v ovzduší jejího vlivu na růst lesních dřevin a na základě dosažených výsledků z destrukční analýzy nadzemní části i kořenového systému stromků buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) a odhadnout s tím související dopady na lesní hospodářství.

3. Literární přehled

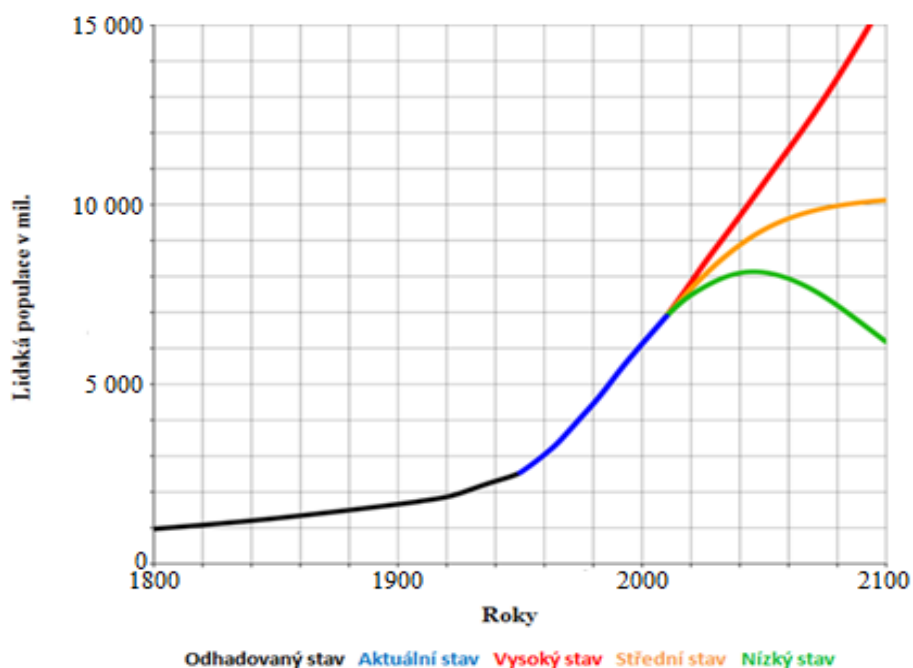
Atmosféra na počátku vývoje Země obsahovala hlavně dusík, oxid uhličitý, metan, čpavek, vodík a další plyny. Postupně narůstal obsah kyslíku až na současných 21 %, zatímco obsah CO₂ klesal až pod 200 μmol na mol vzduchu tj. 0,02 objemová procenta resp. 200 ppm. Zelené fotoautotrofní rostliny pohlcovaly atmosférický CO₂ a uvolňovaly stejné množství kyslíku, tím se vytvořila rovnováha. Heterotrofní organismy, tedy živočichové i člověk využívaly organické látky, které vytvořily rostliny a čerpaly z nich stavební látky a energii za použití kyslíku. Současně takto do atmosféry vylučovaly CO₂, tímto byl koloběh uzavřen a dlouhodobě udržován v rovnováze (Nátr, 2000).

V současnosti dynamika a konání naší civilizace začíná ovlivňovat globální systém. Problematika škodlivin, která se nachází v ovzduší, měla na počátku lokální charakter, v současnosti však narostla do globálního měřítka a je označována jako globální změna klimatu (Dále jen GZK). Lidmi způsobená změna ve složení ovzduší v 21. století, vede k narušení rovnováhy Země, především klimatického systému. Toto narušení se stalo hlavním hybatelem globální změny (Marek et al. 2011).

3.1. Globální změna klimatu

Podle Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu (UNFCCC) je globální změna klimatu „*taková změna klimatu, která je vázána přímo nebo nepřímo na lidskou činnost měnící složení globální atmosféry a která je vedle přirozené variability klimatu pozorována za srovnatelný časový úsek*“ (Hollan, 2011). Globální klimatická změna (též globální změna klimatu, dále jen GZK) je uváděna jako dlouhodobá odchylka klimatických parametrů Země, např. teplot, srážek, rychlosti větru, od průměrů a trendů, které charakterizovaly naši planetu přibližně do počátku 20. století (Marek et al. 2011; Stojanov, 2014). IPCC označuje změnu klimatu jako stav, který lze rozpoznat (pomocí statistických testů) a je typický pro dlouhé období. Může být následkem vnitřních procesů, vnějších sil nebo také jako důsledek trvalých antropogenních změn ve využití půdy, anebo ve složení atmosféry.

Využívání životního prostředí je úzce spjato s historií lidské společnosti, v poslední době se tempo a rozsah využívání zintenzivnilo. V současné době se nejedná jen o ekologické problémy, ale také ekonomické, politické, které se dotýkají samotného bytí člověka na této planetě (Marek et al. 2011). Lidstvo působí na probíhající globální změnu, především jeho rostoucí velikostí populace viz Obr. 1. Dále jsou to zvyšující se požadavky na zdroje energie, potravu a na služby (Hollan, 2011).



Obr. 1 Rostoucí lidská populace (Grace, 2015).

V rámci Klimatické konvence a potřeb inventury emisí je krajina a les součástí sektoru Využití krajiny a lesnictví (Land Use, Land-Use Change and Forestry – LULUCF). Tento LULUCF „zelený“ sektor zahrnuje nejen emise, ale také propady skleníkových plynů a proto je v rámci inventury emisí výjimečný (Marek et al. 2011). Z inventurní zprávy z roku 2008, kterou uvedli Fott et al. (2008) vyplývá, že krajina a les se podílejí na snížení emisí v podmínkách ČR v průměru o 5 % (pro období 1990–2006). Klimatické změny jsou úzce spjaty se stavem lesů a využíváním krajiny, celá pětina globálních emisí skleníkových plynů připadá „zelenému“ sektoru. Toto se děje v důsledku úbytku rozlohy lesa především v rozvojových zemích, kde dle posledních odhadů FAO (FRA 2005) dochází každoročně k úbytku rozlohy lesa na ploše srovnatelné s rozlohou bývalého Československa (Marek et al. 2011). Pouze částečně tuto hodnotu vyvažuje zalesňování v jiných oblastech.

Zdrojem emisí skleníkových plynů je odlesňování, zatímco zalesňování zpětně vede k vázání CO₂ v biomase a svrchních horizontech půdy. Lesy a krajina tudíž představují zdroj i úložiště emisí skleníkových plynů (Marek et al. 2011).

Dřeviny produkují kyslík jako vedlejší produkt fotosyntézy. Část kyslíku spotřebovávají znovu k dýchání, z toho plyne, že rostliny produkují více kyslíku, než kolik spotřebují. Výsadbou dřevin se zvyšuje koncentrace kyslíku v atmosféře a zároveň se snižuje množství oxidu uhličitého, protože uhlík je poután do biomasy při fotosyntetickém procesu. Takto se předchází klimatickým změnám, které úzce souvisí s přibývajícím skleníkovými plyny (Slavíková, 1986).

Změna klimatu významně ovlivní růstové podmínky lesních porostů, se kterými se počítá jako s významnými úložišti vzdušného uhlíku (Stojanov, 2014). Za jednoznačně pozitivní lze považovat vliv zvýšené koncentrace CO₂ na růst dřevin, jež bude zmírňovat nepříznivé dopady klimatické změny na porosty lesních dřevin.

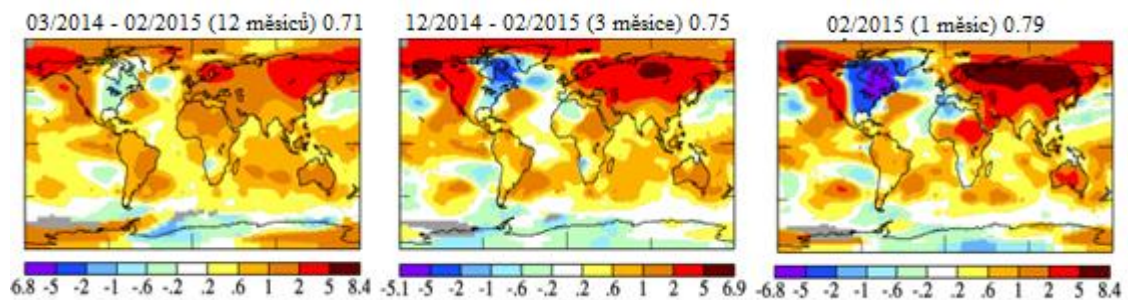
Většina projektů, zabývajících se změnou klimatu a jejím dopadem na sektory hospodářství v ČR čerpají, do roku 2007, informace globálních modelů (GCM). Rozvoj regionálních modelů se po roce 2000 v Evropě urychlil, zvýšilo se rozlišení modelů z 50 km na 25–10 km. V ČR byl použit pro odhad dopadů změny klimatu model HIRHAM, který je řízený globálním modelem ECHAM4/OPYC a dalším je model RCAO řízený HadCM3. Základem scénáře změny klimatu ČR je výstup z modelu ALADIN-CLIMATE/CZ, který je používán ČHMÚ (ČHMÚ, 2011).

Z globálních cirkulačních modelů a scénářů vývoje koncentrace skleníkových plynů v atmosféře vycházejí předpovědi klimatické změny pro Českou republiku.

Velmi reálný scénář, který vychází z modelu HadCM2 a imisního scénáře SRES-A2 předpokládá, že v roce 2050 vzhledem k období 1961–1990, bude o 2–3 °C tepleji a současně se sníží roční úhrn srážek o 6 mm (-6,8 až -5,8 mm; Kalvová, 2002). Vegetační období by se mělo v důsledku oteplení prodloužit o celý měsíc, cca o 29 dnů (Kalvová, 2002; Dubrovský et al. 2011). S nimi souhlasí i Houghton (1998) i Kolařík (2003), kteří uvádějí, že v různých scénářích pro 21. století se předpovídá nárůst teploty v rozpětí od 1,4 ° do 5,8 °C. Kolaříkovi (2003) a dle IPCC (2007) se jako nejpravděpodobnější jeví oteplení o dva až tři stupně. Podle Světové meteorologické organizace celkový nárůst teplot stále stoupá rychleji, protože všechny extrémní výkyvy se započítávají do měsíčních a ročních průměrů. Muselíková (2004) uvádí, že v 20. století průměrná světová teplota stoupla o 0,6 °C stupně (v Evropě o celý 1 °C). Pravděpodobně šlo o nejvyšší "skok" za posledních tisíc let.

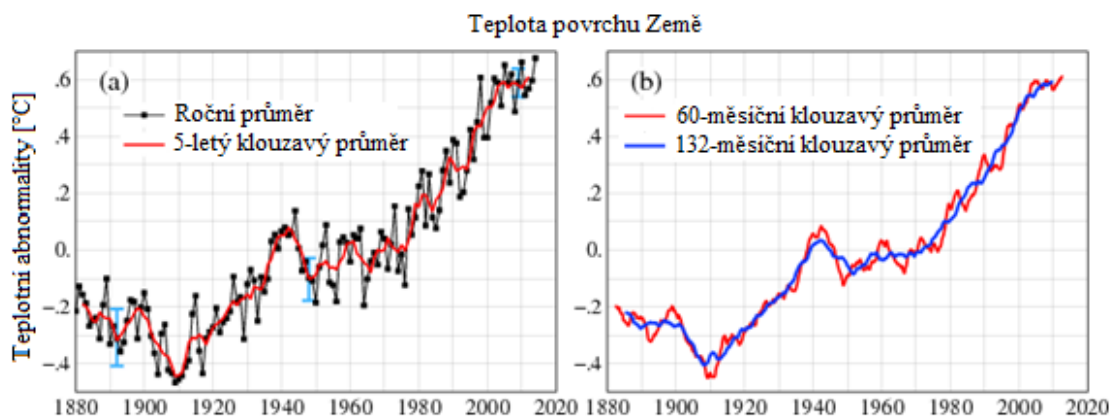
I malé změny průměrných hodnot mohou vést k velkým změnám klimatických jevů, jako jsou tornáda, letní tropická vedra a nerovnoměrnost srážek, častější přívalové deště a častější sucha.

Na následujícím Obr. 2 jsou uvedeny mapy (NASA, 2015) na kterých jsou vyobrazeny teplotní anomálie za posledních 12 měsíců (únor 2014 – březen 2015), za poslední tři měsíce (prosinec 2014 – únor 2015) a za měsíc únor 2015.



Obr. 2 Teplotní anomálie vůči normálovému období 1951-1980 pro únor 2014 – březen 2015 (vlevo nahoře); pro prosinec 2014 - únor 2015 (uprostřed nahoře) a pro únor 2015 (vpravo nahoře), mapy (NASA, 2015).

Níže uvedený graf Obr. 3 zobrazuje roční průměr teplot v letech 1880 – 2020. Vlevo je vyobrazen roční průměr a klouzavý průměr za pět let, vpravo je uveden klouzavý průměr za 60 měsíců a za 132 měsíců (11 let). Tento graf jasně ukazuje, že teplota povrchu Země roste (NASA, 2015).



Obr. 3 Teplota povrchu Země (NASA, 2015).

Tab. 1 Změny teploty vzduchu a podíl úhrnů srážek, relativní vlhkosti vzduchu, průměrné rychlosti vzduchu a úhrnu globálního záření mezi daným budoucím časovým horizontem a referenčním obdobím 1961–1990 na území ČR (ČHMÚ, 2011).

	Změny	Teploty vzduchu (°C)			Úhrnu srážek (mm)			Globálního záření (MJ/den)			Vlhkosti vzduchu (%)			Rychlosti větru (m/s)		
		85%	15%	AL 25	85%	15%	AL 25	85%	15%	AL 25	85%	15%	AL 25	85%	15%	AL 25
2010-2039	jaro	1,42	0,68	0,98	1,12	0,90	1,10	1,03	0,97	0,99	1,03	0,97	1,00	1,02	0,98	1,02
	léto	1,76	0,81	0,90	1,11	0,95	1,01	1,02	0,98	0,99	1,03	0,96	0,99	1,00	0,98	1,00
	podzim	1,51	0,96	1,23	1,12	1,02	1,04	1,01	0,97	1,00	1,01	0,98	0,99	1,03	0,99	0,98
	zima	2,14	0,50	0,90	1,12	1,05	0,91	0,99	0,92	1,09	1,01	0,99	0,99	1,03	0,99	0,98
2040-2069	jaro	2,56	1,33	2,12	1,12	1,01	0,98	0,99	0,93	1,04	1,04	0,98	0,98	1,02	0,98	0,99
	léto	3,15	1,72	2,32	1,05	0,86	0,96	1,04	0,98	1,01	1,01	0,90	0,95	1,01	0,97	1,00
	podzim	2,90	1,84	2,04	1,18	0,95	1,13	1,02	0,96	0,97	1,02	0,97	0,97	1,01	0,97	1,01
	zima	3,67	1,99	1,44	1,18	1,08	0,88	0,95	0,87	1,10	1,01	0,98	0,99	1,04	0,99	0,95
2070-2099	jaro	3,44	2,02	2,87	1,22	1,03	1,07	0,98	0,90	1,01	1,06	0,98	0,98	1,03	0,97	1,02
	léto	4,22	2,59	3,47	0,98	0,81	0,86	1,05	0,98	1,03	1,01	0,88	0,92	1,00	0,97	1,01
	podzim	4,53	2,64	3,04	1,22	1,01	1,06	1,02	0,93	1,00	1,02	0,95	0,94	1,01	0,97	0,97
	zima	4,83	3,18	2,29	1,24	1,07	0,94	0,91	0,83	1,10	1,02	0,97	0,99	1,05	0,96	0,97

V tabulce 1 jsou změny teploty vzduchu ve °C, úhrnů srážek, globálního záření, vlhkosti vzduchu a rychlosti větru mezi budoucím obdobím a obdobím od roku 1961–1990. Jsou zde uvedeny 85% a 15% kvantily. Které jsou odvozené ze souboru 12 simulací ENSEMBLES RCM a simulované hodnoty modelem ALADIN 25 (AL 25). Hodnoty modelu ALADIN 25, které vybočují z rozmezí kvantilů, jsou barevně označeny. Modře jsou označeny ty hodnoty, které vybočují pod rozmezí a růžově ty které vybočují nad rozmezí uvedených kvantilů, dále tučně jsou zvýrazněny hodnoty, které vybočují výrazněji (ČHMÚ, 2011).

3.1.1. Dopady GZK

Dopady GZK již mají pozorovatelné účinky na životní prostředí. Stojanov (2014) uvádí, že tyto účinky lze pozorovat v podobě zvýšeného výskytu klimatických extrémů v různých regionech. Podle IPCC (2007) se bude rozsah dopadů na jednotlivé regiony měnit v průběhu času a dle možností společenských a environmentálních systémů se buď zmírní anebo se přizpůsobí změně.

Dopady očekávané klimatické změny jsou dle dostupných zdrojů Kalvová (2002); IPCC (2007); Kadrnožka (2010); Marek et al. (2011); Primack et al. (2011); NASA (2015):

Zvýšená úroveň mořské hladiny vlivem oteplení a zvětšení objemu vody a ztenčováním ledových štítů, se do konce století zvýší odhadem v průměru o 0,5 až 2 m a dále se budou zvyšovat.

- Ztráta půdy v důsledku odlesňování a znehodnocení orné půdy vlivem sucha i záplav,
- bude ovlivněna zásoba a dostupnost vody pro obyvatele (suchem i záplavami), pokles vody v řekách o 10–40 %,
- šíření nemocí a škůdců do vyšších zeměpisných šířek vlivem oteplení,
- z nově rozšířených plevelů lze očekávat nárůst pylových alergií,
- počasí v následujícím desetiletí bude ve Středozeří v létě odpovídat počasí na Arabském poloostrově s teplotami nad 40 °C,
- zvyšování sucha a tím se zvýší i nebezpečí a četnost požárů.
- Pravděpodobně dojde k nárůstu katastrofických klimatických událostí (hurikány, záplavy apod.).
- Lze očekávat posun stanovištních podmínek o 1 až 2 lesní vegetační stupně.
- Malou šanci na přežití budou mít ve změněných podmínkách smrkové lesy v nížinách, proto je budou muset nahradit odolnější listnáče.

Kolem roku 2100 podle počítačových klimatologických modelů, vzroste průměrná teplota povrchu Země o 2–4 °C a to následkem zvýšených koncentrací oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů. Jestliže bude koncentrace CO₂ růst rychleji než se předpokládá, zvýší se teplota ještě víc, což je možno doložit z emisních scénářů. Z ekologického hlediska bude mít největší dosah snížení rozložení srážek a současné

zvýšení teplot. Toto způsobí převratnou přeměnu ekosystémů. Změna klimatu poté zapříčiní vyhynutí více než poloviny druhů a to by představovalo od doby, co člověk obývá planetu největší pokles biodiverzity (Barros, 2006).

Důkazem globální změny klimatu a následného globálního oteplování jsou dle Kalvové (2002); Muselíkové (2004); Primacka et al. (2011); NASA (2015) následující příklady:

- Roky 1998, 2003 a 2005 byly vyhodnoceny jako nejteplejší v historii přístrojových měření od roku 1861. NASA (2015) již řadí k nejteplejším i rok 2014. Od roku 1990 proběhlo 10 nejteplejších roků od 143 let starého rekordu.
- Za posledních 25 let se zmenšila v letním období rozloha arktického ledu o 15%.
- Stoupající mořskou vodou byla zatopena od roku 1938 jedna třetina pobřežních močálů v Chesapeake Bay na východním pobřeží USA.
- Až dvě třetiny rostlin kvetou časněji než před několika desetiletími.

Mezivládní panel pro změny klimatu (IPCC), předpovídá nárůst teploty o 2,5 ° až 10 °C během příštího století. Globální teploty budou stoupat především v důsledku emisí skleníkových plynů, které jsou produkovány lidskou činností (NASA, 2015). Mohli bychom s naprostou jistotou a s odkazem na literaturu shrnout, že změna klimatu negativně ovlivní nejen pobřežní oblasti, ale také infrastrukturu, vodohospodářství, zemědělství a služby související s ekosystémy a biodiverzitou. Negativně budou také ovlivněny i další odvětví lidské činnosti.

3.1.2. Vliv GZK na lesy a lesnictví

Změny klimatu a další faktory, které ovlivňují růstové prostředí, jsou pro lesnické hospodaření velmi významné. Hospodaření v lesích, na území ČR, na základě hospodářských souborů typů vývoje lesa. Zde je různé růstové prostředí, které je dáno stanovištními podmínkami, výškovou stupňovitostí vegetace. Teoreticky stálé parametry vykazují v posledním desetiletí dynamické změny (Marek et al. 2011). Očekávaný posun stanovištních podmínek o 1–2 lesní vegetační stupně bude mít významný dopad především na porosty smrku. Důsledkem změny klimatu bude ohroženo cca 29 % existujících smrkových porostů. Dopad změny klimatu byl demonstrován na lesní půdu. Na primárně chudých stanovištích, pro ochranu úrodnosti lesní půdy, jí bude potřeba věnovat pozornost (Kalvová, 2002).

Kalvová (2002) a Marek et al. (2011) popisují následující možná adaptační opatření.

- Přeměna druhové skladby porostů, především na příslušných stanovištích, kde porosty neodolají klimatické změně např. předčasné smýcení jehličnatých porostů, a následná náhrada směsí dřevin jehličnatých a listnatých.
- Pro lepší hospodaření porostu s vodou se zde nabízí pěstování porostů v řidším sponu.
- V důsledku zhoršujícího se zdravotního stavu porostů a dosažení dřívější zralosti bude docházet ke zkracování obmýtí.
- Změna hospodaření k přírodě blízkým formám, převod holosečného způsobu na podrostní způsob hospodaření. Za účelem zachytu vzdušného uhlíku by měl být volen tento způsob hospodaření.

3.2. Skleníkový efekt

Princip zvyšování teploty ve skleníku během slunečných dnů je srovnatelný se skleníkovým efektem na Zemi, efekt skla však vytváří skleníkové plyny. Předměty nacházející se na povrchu půdy a samotný povrch pohlcuje sluneční záření, tím se předměty ohřívají a emitují zvyšující se množství energie ve formě dlouhovlnného infračerveného záření. Záření je absorbováno tzv. skleníkovými plyny v atmosféře a důsledkem toho dochází ke zvyšování teploty, v zemské atmosféře (Nátr, 2006). První zmínka o skleníkovém efektu je v literatuře připisována J. B. J. Fourierovi, který počátkem 19. století poukázal na to co se děje v atmosféře a toho, co se děje ve skleníku.

Většinu atmosféry tvoří dusík a kyslík, tyto plyny záření nepohlcují a ani nevysílají. Naopak plyny, které jsou v ovzduší v menším množství např. vodní pára, oxid uhličitý, pohlcují určitou část tepelného záření, jež opouští zemský povrch. Tyto plyny pak působí na vyzařování jako pokrývka a způsobují rozdíl cca 21 °C mezi skutečnou a měrnou povrchovou teplotou na Zemi. Právě působení této ochranné pokrývky způsobuje přirozený skleníkový efekt (Houghton, 1998). Bez něj by byla průměrná teplota na Zemi -18 °C, což by téměř znemožňovalo výskyt a vývoj života.

Kadrnožka (2010) uvádí, že skleníkový efekt se v atmosféře projevoval vždy, akorát v poslední době se zvyšuje koncentrace plynů, což se projevuje rostoucím skleníkovým efektem a tedy zvyšováním teploty zemského povrchu. Oxid uhličitý, který bude popsán v kapitole 3. 3., je jedním z nejdůležitějších skleníkových plynů. CO₂ a do ovzduší se dostává spalováním fosilních paliv, a velkoplošnou likvidací lesních ekosystémů, jak již bylo zmíněno v úvodu této práce. Na zesilování skleníkového efektu se podílí CO₂ asi 70% s vyloučením vodní páry. Antropogenní produkce metanu a dalších skleníkových plynů se podílí menší měrou.

V souvislosti s nárůstem koncentrace hlavních skleníkových plynů CO₂, NH₄, N₂O není problém s absolutními koncentracemi v ovzduší, protože víme, že před desítkami milionů let dosahovala koncentrace CO₂ i 5 000 ppm a více. Problém však nastává s rychlostí změny v radiačním působení a s rychlostí globální změny teploty a také je problém v omezených možnostech adaptace ekosystémů na tyto změny. Radiační působení skleníkových plynů a jeho nárůst je za poslední desetiletí (nejméně za posledních 20 000 let) několikanásobně rychlejší (Joos a Spahni, 2008).

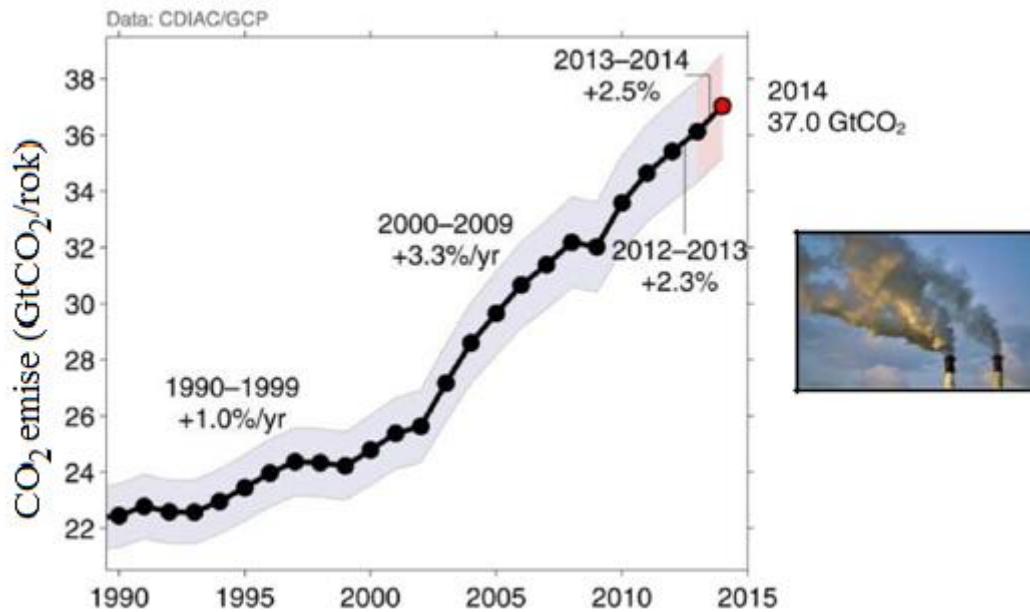
3.3. Oxid uhličitý – CO₂

Na Zemi patří uhlík mezi běžné a hojně se vyskytující látky, představující v čisté formě diamant nebo grafit a většinu především organických sloučenin. Sloučeniny uhlíku vytvářejí základní látky, které zajišťují životní projevy mikrobů, hub, rostlin, živočichů i člověka. Do světa organických látek, které vytvářejí struktury živých organismů a zabezpečujících jejich funkce, vstupuje uhlík ve formě CO₂ (Nátr, 2006). Uhlík v atmosféře je zastoupen v poměrně malém množství především jako sloučenina s kyslíkem oxid uhličitý. Jeho obsah není ve vzduchu stálý a v průběhu geologické historie se vyvíjel (Braniš, Hůnová, 2009). Po dlouhá tisíciletí byl a je fotosyntézou zajišťován přesun uhlíku mezi zásobníky. Oxid uhličitý, který se chová v ovzduší jako skleníkový plyn, je nezbytným zdrojem fotosyntézy. Uhlíkový cyklus má vedle vyrovnání teplot na Zemi ještě následující význam. Zelené rostliny mají schopnost uchovávat sluneční energii a na této schopnosti je založen život na Zemi. Sluneční energie je uchovávána, za nezbytné koncentrace CO₂, v makroenergetických vazbách produktů fotosyntézy a následně využívána v potravním řetězci i pro stavbu těl a zdroj energie pro heterotrofní organismy. Fotosyntézou vzniklá rostlinná biomasa byla pro dlouhé a složité procesy výchozí surovinou. V průběhu dlouhého období se z jejich částí a těl stávaly fosilní zbytky v různých podobách, které je možné energeticky využít při oxidaci spalování (Nátr, 2006; Kadrnožka, 2010).

Uhlík vzniká především spalováním materiálu organického původu, tedy fosilních paliv, který je dnes hlavním zdrojem energie (Žalud, 2009). Dýchání člověka je určitou formou spalování, kdy se organické látky (cukry), tvořící základ rostlinné hmoty, rozkládají postupně až na CO₂ a vodu (Nátr, 2006). Nejenom spalováním fosilních paliv se CO₂ dostává do ovzduší, ale také vypalováním lesů, tlením biohmoty a změnami v obhospodařování půdy je emitováno 32 až 35 Gt oxidu uhličitého za rok viz Obr. 4 (Kadrnožka, 2010). Z tohoto množství oxidu uhličitého přibližně polovina zůstává v ovzduší a zvyšuje jeho koncentraci v atmosféře (viz kapitola 3. 4.), a druhá polovina je pohlcována ve vodě moří a oceánů. CO₂ se rozpouští ve vodě oceánů i v pevninských vodách a přechází do vody srážkové, u které snižuje hodnotu pH (Braniš, Hůnová, 2009). Kadrnožka (2010) uvádí, že rozpustnost CO₂ ve vodě závisí na teplotě vody v povrchových vrstvách a na parciálním tlaku oxidu uhličitého v ovzduší. Tento tlak je tím větší, čím větší je jeho koncentrace v ovzduší a obráceně.

Pouze rostliny dokážou část oxidu uhličitého vestavět do organických látek a následně jimi zásobovat všechny živé bytosti naší planety a to pomocí fotosyntézy (Nátr, 2006). Fotosyntéza rostlin odstraňuje oxid uhličitý, tím i uhlík z atmosféry a ukládá jej do vegetace. Další cesty uhlíku ze spotřebovaného oxidu uhličitého, se různí, podle prostředí do jakého se odumřelá rostlinná nebo živočišná biomasa dostala (Kadrnožka, 2010). Biosféra produkuje CO₂ jako produkt metabolických pochodů např. dýchání a trávení všech živých organismů (Martinec, 2010). Na celkovém oteplování se dle Žaluda (2009) ze všech plynů podílí oxid uhličitý cca 55% a rozhodující podíl z toho tvoří spalování fosilních paliv (2/3) dále pak odlesňování, kdy běžně vázaný uhlík v lesní biomase zůstává ve formě CO₂ v atmosféře. Kopáček a Bednář (2005) odhadují, že činností člověka obsah CO₂ v atmosféře stoupl během posledního století o 30 %.

V devadesátých letech byla produkce uhlíku způsobená spalováním fosilních paliv odhadována na 6,3 gigatun (GtC=109 tC) ročně. V tomto období docházelo také k odlesňování a to na cca 16,1 miliónů hektarů lesa, toto vedlo k uvolnění 1,6 GtC za rok z celkového množství uhlíku. Světový oceán poutá asi 2,1 GtC a suchozemská vegetace asi 2,5 GtC (Urban, Pokorný, 2002). Zásoba uhlíku v půdě je dvojnásobná, oproti množství uhlíku obsaženého v nadzemní biomase, toto platí pro lesy mírného pásma. V boreálních lesích může poměr vystoupat až na 5 : 1. Čistým zdrojem uhlíku se stává les po každém narušení. Výběr druhu dřeviny, kterou se bude provádět zalesnění má také vliv na schopnost ukládat uhlík. Na celkovou bilanci uhlíku nemá velký vliv doba obmýtí. K hromadění uhlíku v půdě, který je ve formě stabilního humusu, může přispívat dlouhodobý rozklad listů a kořenů. Do atmosféry uvolněné množství uhlíku z půdy činí z celkové půdní zásoby asi 20 %. Při těžbě se celkem odnese a uvolí cca 300 tun uhlíku na hektar. Skrze půdu do atmosféry emitujeme roční těžbou 7–8 Mt C. Do biomasy kmenů je zabudováno každoročně 5,5 Mt uhlíku, v dalších částech porostu a v půdě je akumulován zbytek (Oulehle, Hruška, 2009).



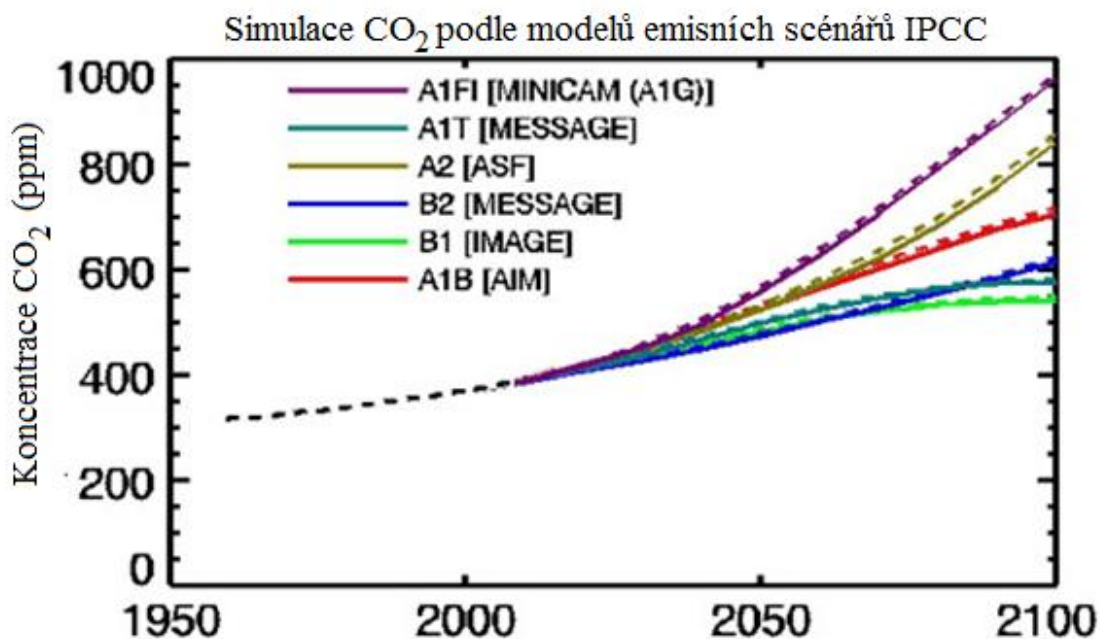
Obr. 4 Rostoucí emise CO₂ vlivem spalování fosilních paliv (LeQuéré et al. 2014).

3.3.1. Snížení produkce oxidu uhličitého

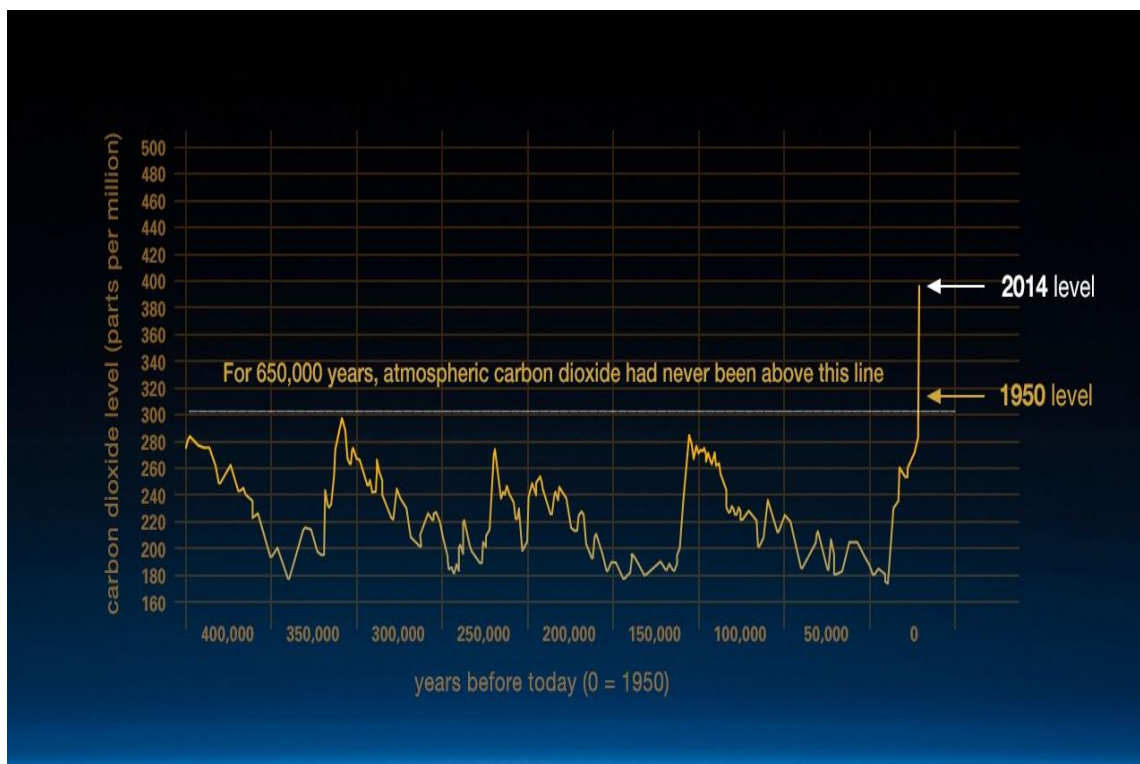
Na mezivládní úrovni se diskutuje o nejznámějším způsobu, který vede ke snížení produkce CO₂, a to je omezení spalování fosilních paliv a také omezení těžby lesních porostů (Nátr, 2006). Metodu jak vázat uhlík a extrahovat jej z atmosféry představuje zvětšování biomasy v lesích. Zalesňování může významně přispět v příštích 20 či 30 letech ke snížení čistých emisí a tím by se mohlo stát přechodným opatřením, než se začne snižovat spotřeba uhlovodíků (Barros, 2006). V atmosféře lze snižovat koncentraci CO₂ omezením spotřeby a ve výrobní technologii zvýšením účinnosti využívání energie. Další metodou je využívání postupů vyrábějící energii bez emisí CO₂ např. jaderná energie, vodní elektrárny, sluneční energie, nebo další alternativní zdroje jako je větrná energie, biomasa rostlin, energie oceánů. Druhou alternativou je odstraňování a dlouhodobé ukládání produkovaného CO₂, nebo jeho částí do vhodných úložišť. Touto alternativou je například zvýšená absorpce CO₂ v biomase rostlin a v půdě a zvýšená akumulace C z CO₂ v biomase moří (Houghton, 1998; Nátr, 2006).

3.4. Koncentrace CO₂ a její odhad do budoucna

Během vývoje planety a života na Zemi se koncentrace CO₂ významně měnila (Marek et al. 2011). Nakonec se před začátkem industrializace, kolem roku 1750 udržovala koncentrace atmosférického oxidu uhličitého měřená v jádrech vrtů v ledovcích na úrovni 280 ppm. Tuto rovnováhu narušila průmyslová revoluce, následkem toho se do roku 1900 zvýšila o cca 15 ppm a v roce 1988 dosáhla hodnoty 350 ppm. V současnosti je koncentrace nad hodnotou 385 ppm s ročním nárůstem 1,5-2 ppm (Marek et al. 2011). Žalud (2009) uvádí, že se v současnosti obsah v atmosféře zvyšuje tempem 0,5 % za rok a jeho koncentrace vzrostla od poloviny 18. Století z 280 ppm na 380 ppm. Houghton (1998) uvádí, že dle přímých měření je dnešní vzdušná koncentrace CO₂ 385 ppm s meziročním nárůstem 2 ppm. Podle různých scénářů může koncentrace CO₂ dosáhnout úrovně až 890 ppm viz Obr. 5. Tomu odpovídá nárůst globální teploty o 4 °C s rozsahem mezi 2,4 až 5,8 °C podle současných klimatických modelů. To vyplývá z analýz ledovce a přímých měření, na nejdéle měřící stanici, Mauna Loa viz Obr. 6; 7 (od r. 1958, Hawaii, USA, 3397 m n. m.) a na stanici Hegyhatsal v Maďarsku, která byla vybrána geograficky i výškově jako nejbližší jižní Moravě. Podle Kadrnožky (2006) a Luthia et al. (2008) vyplývá z analýz grónských ledovců, že koncentrace CO₂ v ovzduší se za posledních nejméně 800 000 let pohybovala v rozmezí asi 160–280 ppm tj. 0,016–0,028 objemových %. Koncentrace oxidu uhličitého se v ovzduší zvýšila asi o 40 % (Kadrnožka, 2006). Oproti tomu Kopáček a Bednář (2005) uvádějí, že ve vzduchu je obsah CO₂ 386 ppm to je 0,04 objemových %. Současná koncentrace CO₂ dle Nátra (2006) je v atmosféře 370 ppm s ročním nárůstem o 1 ppm. V průběhu minimálně uplynulých 400 000 let je koncentrace CO₂ ve vzduchu vyšší. Na stránkách ÚSBE AV ČR, v.v.i. resp. nyní Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.–CzechGlobe se lze dočíst, že vzdušná koncentrace CO₂ u nás s přesným měřením dosud není monitorována (CzechGlobe, 2015).



Obr. 5 Vývoj koncentrace CO₂ v ovzduší, podle různých modelů do roku 2100. (osa y udává hodnotu koncentrace CO₂ v ppm, osa x pak počet let; různé barvy pak udávají různé předpovědi vývoje koncentrace CO₂, Cook, 2015).



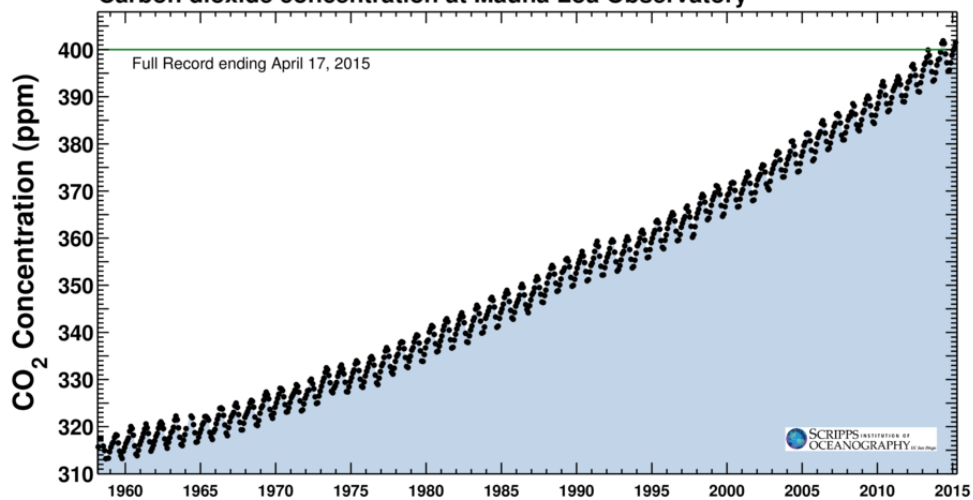
Obr. 6 Historický vývoj vzdušné koncentrace CO₂ s doplněním měřených dat od roku 1950 na stanici NOAA Mauna Loa (NASA, 2015).

Latest CO₂ reading

April 17, 2015

403.98 ppm

Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory



Obr. 7 Podrobnější hodnoty vývoje vzdušné koncentrace CO₂ na stanici Mauna Loa s aktuální hodnotou 17. dubna 2015 překračující hranici 400 ppm (Scripps Institution of Oceanography, 2015)

3.5. Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na fyziologické procesy rostlin a na lesní ekosystémy

První pokusy popisující vliv zvýšené koncentrace CO₂ na růst rostlin se přisuzují Nicolasovi T. de Saussuremu (1767–1845). Zjistil, že hrách pěstovaný při vysoké koncentraci CO₂ roste lépe než v normálním vzduchu (Nátr, 2000). Studium vlivu zvýšené koncentrace CO₂ v ČR má největší ekofyziologickou základnu na Bílém Kříži v Beskydech, kde je situována pokusná část a tvoří ji několik velkých komor, ve kterých rostou smrky (Nátr, 2006). Koncentrace v současné době je nad hodnotou 385 ppm s ročním nárůstem 1,5–2 ppm (Marek et al. 2011). Změna klimatu bude, dle Vinše et al. (1997) znamenat posun stanovištních podmínek. Tento posun bude přibližně o dva lesní vegetační stupně, směrem k nižším lvs. Zvýší se tolerance dřevin ke stresovým podmínkám a to díky zvýšené koncentraci CO₂, která částečně sníží negativní dopad tohoto posunu (Kolařík, 2003). Rostliny pohlcují CO₂ a zapojují ho do organických látek, při tomto dochází k přeměně energie sluneční na energii chemickou a tím rostliny zvětšují svojí biomasu. Rostliny rostou vždy v závislosti na klimatických a půdních podmínkách (Nátr, 2006).

Vlastnosti rostlin fyziologické, morfologické a anatomické ovlivňuje jak přímo, tak nepřímo zvýšený obsah CO₂ (Körner, 2006).

Většina autorů považuje vliv zvýšené koncentrace CO₂ na růst rostlin (dle typu fotosyntézy) za jednoznačně pozitivní a dle nich lze očekávat zmírnění nepříznivých klimatických dopadů na lesní dřeviny (Kolařík, 2003; Barros, 2006). Účinnost využití slunečního záření při fotosyntéze, závisí především na intenzitě slunečního záření, na dostatku vody také na teplotě a na druhu rostliny. Zvyšuje se intenzita fotosyntézy u dřevin a ta jako jedna z nejdůležitějších vazeb ovlivňuje rychlost zvyšování průměrné globální teploty (Nátr, 2006). Rychlost fotosyntézy se při dvojnásobné koncentraci CO₂ zvyšuje o 50 % až 60 %, ale je zřejmé že míra stimulace je závislá na stádiu vývoje rostliny. Zvýšená intenzita fotosyntézy bude mít pozitivní vliv na produkci rostlinné biomasy a zvýší se tím efektivnost pěstování biomasy pro energetické účely (Houghton, 1998; Nátr, 2000; Kalvová, 2002; Urban, Pokorný, 2002; Nátr, 2006; Žalud, 2009). Vyšší produkce biomasy se ne vždy musí projevit ve vyšší produkci těžených sortimentů (Kalvová, 2002). Při snížení intenzity fotosyntézy jde o tzv. aklimační depresi (Urban, Pokorný, 2002; Kolařík, 2003). S procesem trvalé transformace

sluneční energie je spjat růst a zachování biomasy lesních porostů prostřednictvím fyziologických reakcí (Marek et al. 2002; Urban et al. 2003; Urban et al. 2011). Zvýšenou koncentrací CO₂ působící dlouhodobě, lze pozorovat na zvýšené produkci biomasy kořenů, zejména jehličnanů. O možných rozdílech, mezi jehličnatými a listnatými stromy, nejsou dosud jednoznačné výsledky. Avšak z porovnání velkého množství výsledků vyplývá, že schopnost dlouhodobě profitovat ze zvýšené koncentrace CO₂ mají obecně listnáče než jehličnany (Urban, Pokorný, 2002). Zvýšená produkce biomasy může zvýšit celkovou spotřebu vody a minerálních živin. Zvýšení těchto potřeb může být významné a to zejména z pohledu postupujícího vysychání kontinentů. Sušina je ukládána do kořenů při nedostatku minerálních živin nebo i vody. Dřevina musí zabezpečovat dostatečný přísun živin, zvláště na chudších stanovištích, čímž více investuje do kořenového systému (Kalvová, 2002). Z důvodu nedostatku vody a minerálních živin mohou některé druhy rostlin před dozráním semene odumřít. Toto pak může vést ke zmenšení jejich zastoupení v přírodě (Nátr, 2006).

Obecně je známo, že vlivem zvyšující se koncentrace CO₂ dochází k přivření průduchů, což jsou otvory v listech či jehlicích (Žalud, 2009; Marek et al. 2011). Tyto průduchy jsou hlavním místem výdeje vody (vodní páry) z rostlin a to vede ke zvýšené efektivnosti využití vody (Urban, Pokorný, 2002). Dle Nátra (2000) může zvýšená koncentrace CO₂ eliminovat vodní stres vyvolaný zvýšenou teplotou.

Příznivý je zvýšený výdej exudátů do rhizosféry pro symbiotické houby a také příznivá stimulace regeneračních procesů asimilačních orgánů. Naproti tomu může docházet k výskytu biotických činitelů a vyššího obsahu cukrů v pletivech (Kalvová, 2002). Dlouhodobě působící zvýšená koncentrace CO₂ také ovlivňuje rychlost respirace, což je proces při kterém se zpracovávají asimiláty pro potřeby růstu a bazálního metabolismu stromu (Marek et al. 2011). V průběhu celé vegetační sezóny dochází k mírné depresi, protože respirace kmene je ovlivněna zvýšeným CO₂.

Výše zmíněná aklimační deprese je stav, kdy působením zvýšené koncentrace CO₂ klesá či mizí v čase týdnů či měsíců počáteční stimulace fotosyntézy. Porušení rovnováhy produkce a akumulace asimilátů, je významným faktorem, který je zodpovědný za vznik aklimační deprese (Kolařík, 2003). Příčina této deprese je především v poklesu síly sinku (vnitřní spotřebič asimilátů). Důsledkem dlouhodobě působící vyšší koncentrace CO₂ je zvýšené ukládání cukrů v asimilačním pletivu.

Dle Kalvové (2002) je možné konstatovat, že dopad zvýšené koncentrace CO₂ bude jednoznačně pozitivní a to jak na odolnost porostů lesních dřevin, tak na jejich růstovou

aktivitu. Při nedostatku dusíku může zvýšená koncentrace vyvolávat zvýšenou alokaci asimilátů do kořenů, listová plocha však zůstane beze změny (Nátr, 2000). Dále má zvýšená koncentrace CO₂ vliv na fotorespiraci, respiraci, vodivost průduchů a transpiraci (Marek et al. 2011). Konečný důsledek zvýšené koncentrace CO₂ se projeví s časovou prodlevou let či desetiletí. Na úrovni ekosystému pozorujeme v intervalu let až desetiletí změny v tvorbě biomasy i schopnosti využití vody. V řádu staletí pak může docházet ke změnám biodiverzity, využití půdy rostlinami i druhového složení celého ekosystému (Marek et al. 2011).

3.5.1. Obecné výsledky pěstování dřevin ve zvýšené koncentraci CO₂

V minulosti byly prováděny pokusy, které sledovaly vliv zvýšené CO₂ na polní plodiny, tyto pokusy byly úspěšné, přesto ale chyběly obdobné údaje pro lesní hospodářství. Používají se speciální růstové komory pro pěstování dřevin v atmosféře obohacené o CO₂ (Urban, Pokorný, 2002). Na Bílém Kříži se pro porosty smrku a buku používají lamelové sféry pro sledování zvýšeného obsahu CO₂ viz kapitola 3.7.4.

V závislosti na druhu, věku, růstových podmínkách, na délce pěstování a na minerální výživě se mění reakce dřevin v podmínkách zvýšené koncentrace CO₂. Například smrk ztepilý pěstovaný v řídkém sponu 5 tis.ha⁻¹, ve stádiu mlaziny, reaguje pozitivním nárůstem nadzemní biomasy, tloušťkovým přírůstem kmene a listové plochy na zvýšenou vzdušnou koncentraci CO₂ v porovnání s výsadbou v hustotě 10 tis.ha⁻¹. Na počáteční fázi rašení pupenů nebyl shledán zásadní vliv zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ (Urban, Pokorný, 2002). Na následujícím obrázku 8 jsou patrné výsledky pěstování jehličnatých a listnatých dřevin ve zvýšené koncentraci CO₂.

jehličnany

biomasa	+ 38 %	
rychlost fotosyntézy	+ 40 %	(0 % až 95 %)
asimilační plocha	+ 24 %	
kořen/výhon	+ 10 %	(- 14 % až + 81 %) (- 10 % až + 57 %)

listnáče

biomasa	+ 63 %	
rychlost fotosyntézy	+ 61 %	(0 % až + 290 %)
asimilační plocha	+ 33 %	
kořen/výhon	+ 9 %	(- 67 % až + 132 %) (- 35 % až + 74 %)

Obr. 8 Výsledky pěstování dřevin ve zvýšené koncentraci CO₂

3.6. Čeled' Bukovité – Fagaceae

Do čeledi *Fagaceae* náleží šest rodů s několika sty druhy, které jsou rozšířené v mírném pásmu na obou polokoulích. Na našem území jsou zastoupeny dva nejdůležitější hospodářské rody buk – *Fagus* a dub – *Quercus*. V této diplomové práci je posuzován vliv zvýšeného CO₂ na růst buku lesního, proto je dále popsán pouze rod *Fagus*, který má cca 10 druhů, které jsou rozšířeny v Evropě, ve východní Asii a na východě Severní Ameriky dále pak k jihu až po Mexiko (Úradníček, 2004).

3.6.1. Buk lesní – *Fagus sylvatica* a jeho charakteristika

Buk je dřevina, která dosahuje velkých rozměrů. Má štíhlý, rovný válcovitý kmen s hladkou, šedou kůrou. Dřevina se dorůstá výšky dle Úradníčka (2004) 35 metrů a Klika ve své publikaci Lesní dřeviny (1947) uvádí výšku 30 až 50 metrů a průměr kmene dosahuje až 1,5 m.

Buk plodí na volném prostranství dle Úradníčka (2004) již mezi 20. a 40. rokem, zatímco Klika (1974) uvádí 40–50 let, plodnost v porostu podle obou autorů nastupuje až v 60 letech většinou ve víceletých intervalech 3 až 8 let. Listy rostoucí ve stínu, nebo uvnitř koruny jsou nejmenší, ploše rozložené a mají tenkou čepel, zatímco listy na slunci jsou větší a pevné s čepelí k okraji zdviženou, toto umožňuje stejnoměrné využití dopadajícího světla. Plodem jsou trojhranné nažky „bukvice“, které dozrávají na podzim a zpočátku mají výbornou klíčivost.

Buk má srdčitý kořenový systém, který pod povrchem vytváří silné kořeny všemi směry do půdy, proto bývá v půdě velmi dobře zakotven a netrpí vývraty. Kořenový systém ve spojení s mykorhizou intenzivně vyčerpává živiny z půdy. V prvním roce roste velmi pomalu, teprve od pátého roku rychleji (Mráček, 1989).

Rozšíření a ekologie:

Přirozený areál výskytu buku zaujímá velkou část střední, západní a jihovýchodní Evropy. Tato oblast, charakterizuje buk jako dřevinu, které vyhovuje mírné atlantické podnebí a na stanovištích svého optima se vyhýbá především mrazovým polohám, zejména mrazovým kotlinám.

V oblastech klimaticky mu vyhovujících nemá buk velké nároky na půdu, roste na většině půdních typů, vyhýbá se bažinám a suchým písčitým půdám.

Vyhovují mu hlubší minerální půdy s dobrou fyzikální strukturou. Zde vytváří bohatou kořenovou soustavu, která je schopná z hlubších vrstev půdy přivádět do oběhu živiny. Odumírající kořeny zanechávají po zetlení v půdě duté prostory, které jsou důležité pro přístup vzduchu a pohyb vody. Opad bukového listí se během dvou až tří let rozkládá a tím příznivě ovlivňuje humusovou vrstvu bučin, proto se buk používá především jako meliorační dřevina při přeměně rozsáhlých jehličnatých monokultur (Mráček, 1989).

Buk snáší zastínění, spolu s jedlí a tisem patří mezi stinné dřeviny, které asimilují (rostou) při slabém světle a i tak v hustých porostech dobře propouští atmosférické srážky k půdě.

Buk má vyšší nároky na teplo než jedle bělokorá (*Abies alba*). Mayer (1980) ve své publikaci uvádí, že vegetační období je delší než 5 měsíců. Vyhovuje mu průměrná teplota cca 15–25 °C, přitom nejchladnější měsíc v roce by měl mít teplotu kolem 0 °C. Ve střední Evropě, na optimálním stanovišti buku, dosahuje průměrná roční teplota kolem 10°C. Buk snáší nejvýše 120 zimních dnů s teplotami maximálně pod 5 °C a potřebuje nejméně 26 letních dnů s maximem teploty přes 20,5 °C (Mráček, 1989). Harlinger a Knees (1998) uvádějí, že v Rakousku je buk v porostu schopný být jednou z převládajících dřevin až do minimálního ročního úhrnu teplot zhruba 2 150 °C, to odpovídá ročnímu teplotnímu průměru > 5,5 °C. V Bavorsku byly nalezeny porosty s dominancí buku, které se nacházejí v rozsahu průměrných ročních teplot 4–9,5 °C (Felbermeier, 1994).

V literatuře lze najít pro minimální srážky různé hodnoty například Wagenitz (1981) uvádí při východní kontinentální hranici v Německu 500 mm, Mayer (1980) uvádí 600 mm. Avšak v polohách, pro něj optimálních, srážky dosahují až 1000 mm ročně (Úradníček, 2004).

Buk je řazen mezi dřeviny se středními nároky na vodu, které propouštějí velké množství srážek do přízemních vrstev lesa. Například při srážkách cca 5 mm pronikne pod koruny v olistěné bučině 63,4 %; při srážkách 15–20 mm je to až 81,3 % (Mráček, 1989). Buk vypařuje méně vody než bříza a olše, avšak více než jilm, javor a dub (Klika, 1947).

Co se týče abiotických činitelů, je buk vůči větru, sněhu a námraze do značné míry odolný, výjimkou je ledovka, kterou jsou nejvíce ohroženy polohy kolem 600 m n. m. (Mráček, 1989). Buk bývá málo ohrožen hmyzími škůdci, k vážnějším škůdcům počítáme štetconoše bukového (*Calliteara pudibunda* L),

bekyni velkohlavou (*Lymantria dispar*) a bekyni mnišku (*Lymantria monacha*). Z chorob je v některých oblastech Evropy a také u nás nebezpečná nekróza bukové kůry, stromy po napadení chřadnou a často dochází k úhynu jednotlivých stromů, nebo i celých porostů (Leontovič, Urošević, 1978). Dále mladé kultury buku bývají napadány drobnými hlodavci, především žírem myšovitých. Ochrana se zajišťuje otrávenými žaludy, nebo nátěrem (Morzuvin), který chrání celé kmínky. Na kulturách buku způsobuje největší škody lesní zvěř, kdy škodí především okusem, v průměru až 27 % (Mráček, 1989).

Na přelomu 18. a 19. století, byl buk nejvýznamnější dřevinou a dostal se do popředí dřevařského zájmu a to především kvůli ceněnému bukovému palivu, po kterém byla značná poptávka, která záhy poklesla, stejně tak i zájem o pěstování buku (Mráček, 1989). Bukové dřevo a jeho použití je rozsáhlé. Využívá se například jako cenná surovina k pilařské výrobě, na výrobu železničních pražců, parket, beden, sudů, hraček a dalších předmětů. Buk je také nejlepší surovinou k výrobě dřevěného uhlí a méně kvalitní sortimenty se používají na výrobu paliva, jak již bylo uvedeno (Úradníček, 2004).



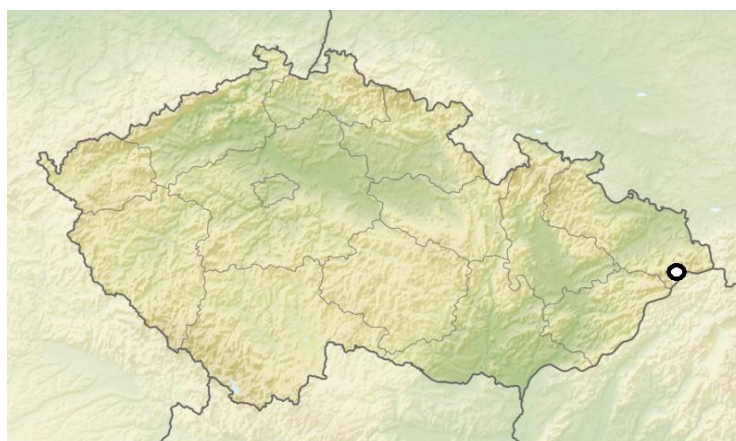
Obr. 9 Buk lesní – *Fagus Sylvatica* L.

3.7. Popis pracoviště a experimentu

3.7.1. Experimentální ekologické pracoviště a jeho popis

Experimentální ekologické pracoviště (dále jen EEP) Bílý Kříž bylo založeno roku 1986 v rámci projektu „Komplexní výzkum vlivu imisí na lesní hospodářství Beskyd“. Původně bylo toto pracoviště založeno jako klimatologická stanice umístěná v lesním prostředí. Postupně byla přeměněna na rozsáhlé experimentální ekologické pracoviště, které řeší celou řadu dalších problémů životního prostředí. Tehdejší oddělení ekologické fyziologie lesních dřevin se přeměrovalo od prvotního studia vlivu imisí na beskydské lesy na výzkum vlivu globální klimatické změny, zahrnující vliv zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ (spojený se skleníkovým efektem) a zvýšené UV-B radiace (spojené s ozónovou vrstvou) na smrk ztepilý a buk lesní. EEP je součástí evropské infrastruktury projektu ICOS (Integrated Carbon Observation System) začleněného do mezinárodní výzkumné infrastruktury ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures; CzechGlobe, 2015).

EEP se nachází na území Moravskoslezských Beskyd a rozkládá se na 6 hektarovém území a leží v nadmořské výšce cca 850–903 metrů, v pátém lesním vegetačním stupni. Klima je zde mírné chladné a vlhké, s průměrnou roční teplotou vzduchu $6,7 \pm 1,2$ °C a průměrný roční úhrn srážek je zde 1300 mm (průměr z let 1998–2007), jako půdní typ se zde uvádí železitý podzol. Marková et al. (2009) uvádí průměrné roční srážky 1330 mm (průměrné hodnoty z posledních 10 let (2004–2013)). Z hlediska znečištění ovzduší leží EEP v oblasti s mírným imisním zatížením, průměrná roční koncentrace SO₂ je 20 až 26 µg.m⁻³.



Obr. 10 Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž – Moravskoslezské Beskydy

V současnosti EEP sestává z následujících základních částí:

vlastní stacionár a klimatologická stanice, výzkumné plochy se simulací zvýšeného účinku CO₂, výzkumné plochy se simulací zvýšeného účinku UV-B, volná smrková plocha a horská louka.

3.7.2. Historie studia dlouhodobých účinků zvýšené koncentrace CO₂

V posledních letech je značná pozornost věnována studiu dlouhodobého účinku zvýšené koncentrace CO₂ na řadu rostlinných druhů (Urban 2003, Korner 2006). K tomuto účelu byla zkonstruována mnohá experimentální zařízení, první pokusy byly prováděny na rostlinách umístěných v růstových komorách s kontrolovaným prostředím. V pozdějších letech se využívalo větrových vaků, v tomto případě byly vystaveny zvýšené koncentraci CO₂ jednotlivé větve stromu (Barton et al. 1993). V komorách s otevřeným vrchem, v rámci reálného lesního systému byl uměle vytvořené atmosféře vystaven pouze jeden jedinec (Marek a Kalina, 1996; Janouš et al. 1996). V současné době se opouští od umělých podmínek uzavřených komor a využívají se polouzavřené mini-ekosystémy minisféry (semi-face systémy) a zcela volné ekosystémy s nenarušenou mikroklimatologickou charakteristikou, tzv. face systémy (McLeod a Long, 1999).



Obr. 11 Vlevo komory s otevřeným vrchem, ve kterých byli kultivováni jedinci smrku (celkem 4ks v přirozené a 4 ks v dvojnásobné vzdušné koncentraci CO₂) v letech 1992-1995 (v rámci projektu ECOGRAFT); vpravo lamelové kultivační sféry pro kultivaci stromů v porostním měřítku.

3.7.3. Výzkumné plochy se simulací zvýšeného účinku CO₂

V roce 1997 byly vybudovány na Experimentálním ekologickém pracovišti Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydech dvě minisféry sloužící ke sledování vlivu zvýšené koncentrace CO₂ na fyziologické reakce smrku ztepilého. Výzkumné plochy (A, E, C) se simulací zvýšeného účinku CO₂ na porosty lesních dřevin s využitím minisfér vznikaly od r. 1995 v rámci vědeckovýzkumného programu Atmosféra 2045 a plně dokončeny byly v r. 1997.

Experiment je v současnosti prováděn na třech identických, uměle založených plochách (*A-ambient* – přirozená vzdušná koncentrace CO₂ 385 ppm, *E-elevated* – navýšená 700ppm, *C-control* – otevřená kontrolní plocha) a zde se zkoumá vliv zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ na dřeviny a vybrané travní druhy.

3.7.4. Popis lamelových sfér

Na Bílém Kříži v roce 1992 vzniklo první experimentální ekologické pracoviště, kde se měřily dopady zvýšené koncentrace CO₂ v růstových komorách kolem stromů. Touto problematikou se vědci z EEP zabývají dodnes, protože stále není objasněné, jak rostliny reagují na dlouhodobé působení zvýšené koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší. V roce 1997 byly vybudovány dvě minisféry sloužící ke sledování vlivu zvýšené koncentrace CO₂ na fyziologické reakce smrku ztepilého. Tyto minisféry se musí chránit před přehříváním, protože jediný způsob chlazení je větrání a střechy se otvírají pouze na závětrné straně. Lamelové sféry jsou postaveny na betonu se základnou 9x9 m a vysoké jsou v nejvyšší části 7 metrů. Sféry mají kovový rám vážící přibližně 17 tun. Obsahují 72 pohyblivých oken, u kterých je automaticky řízeno otevírání a zavírání za účelem udržení požadované koncentrace vzduchu CO₂ a dalších růstových podmínek stromů jako je teplota a vlhkost vzduchu. Pohyb zařízení oken automaticky reaguje na směr a rychlost větru a na teplotu vzduchu, takže skleníky fungují jako semi-open systém, tedy polootevřený systém. V obou sférách musejí být stejné podmínky, jediný rozdíl je v navýšeném CO₂. Oxid uhličitý je skladován v kapalné formě v zásobníku o obsahu 15 tun. Odtud je CO₂ pomocí výparníku (kombinace vzdušného a elektrického výparníku) převáděno na plynnou formu

a rozvodným potrubím injektováno přímo k ventilátorům. Celková roční spotřeba CO₂ činí asi 130 tun, přičemž k maximální spotřebě dochází v letních měsících, kdy ventilace sfér pracuje na maximální výkon. Vzduch je distribuován v rámci lamelové sféry systémem radiálních a pomocných ventilátorů (modely RNH 400 a 500 W, Janka Radotín, Česká republika) o průtoku vzduchu 1,2 m³ s⁻¹. Ve sféře *A-ambient* je okolní koncentrace CO₂ shodná s běžnou koncentrací CO₂ v okolí tj. 385 μmol CO₂ mol⁻¹ a ve sféře *E-elevated* je koncentrace uměle zvýšená na 700 μmol CO₂ mol⁻¹. Za účelem dosažení této zvýšené koncentrace je do sféry E vháněn CO₂ nepřetržitě 24 hodin denně a to od dubna do listopadu.

Koncentrace CO₂ je měřena automatickým systémem ve dvou výškách, v polovině aktuální průměrné výšky stromů a ve výšce 3 m, a to rovnoměrně ve všech částech porostu. Ze čtyř odběrových míst je vzduch nasáván pomocí pumpy a je veden do směsné komůrky. Deset elektromagnetických ventilů (typ B2197-60, Fluidtechnic, Rakousko) řídí vstup jednotlivých vzorků vzduchu ze sfér do infračerveného analyzátoru plynu (WMA-2, PP Systems, Anglie). Měřicí ústřednou (Delta-T, Anglie) jsou automaticky zapisovány údaje o aktuálních koncentracích. Rozmístění odběrových míst je identické v obou sférách, čtyři ventily pro sféru A, čtyři ventily pro sféru E. Ventily slouží pro čtení referenční okolní koncentrace CO₂ a další ventil vede vzduch přes absorbér CO₂, tím umožňuje měření nulové koncentrace CO₂ a usnadňuje čtení výpisů z měřicí ústředny, celková doba měření jednoho cyklu činí cca 30 minut.

Minisféry jsou vybaveny automatickým zavlažovacím systémem (AMET s.r.o., ČR), který pracuje na principu porovnávání půdní vlhkosti na otevřené kontrolní ploše C a půdní vlhkosti v jednotlivých biosférách. Měření je prováděno v nastavitelných pravidelných časových intervalech (12, 24, 48, 96, resp. 192 minut) snímači půdní vlhkosti VIRRIB (AMET s.r.o., ČR) a v případě potřeby je otevřen elektromagnetický ventil závlahového zařízení. Závlahový systém pracuje ve třech režimech: (I) V případě detekce zvýšené půdní vlhkosti na kontrolní ploše C, je závlaha prováděna po dobu 3 minut a 3 minuty se nezavlažuje. Tento cyklus se opakuje až do dalšího měření půdní vlhkosti. Není-li zaznamenána během tohoto měření vyšší vlhkost v komoře, pokračuje se dále se závlahou. (II) Po detekci zvýšené půdní vlhkosti je závlaha prováděna po dobu 3 minut, potom následuje přestávka až do dalšího měření. (III) Po detekci zvýšené půdní vlhkosti je závlaha prováděna nepřetržitě po celou periodu měření, pokud během ní nedojde k vyrovnání půdních vlhkostí, zavlažuje se dále.

Do těchto sfér byly vysázeny ve stejných pozicích dvouleté semenáčky buku a tříleté smrkové semenáčky. Prostřednictvím moderních metod ekofyziologického výzkumu se zde zjišťuje, jaké dopady bude mít dvojnásobně navýšená koncentrace CO₂ oproti současnému stavu na růst a stav lesních porostů viz kapitola 4. metodika.



Obr. 12 Lamelové sféry



Obr. 13 Zásobník tekuté formy CO₂



Obr. 14 Přívod CO₂ do lamelových sfér

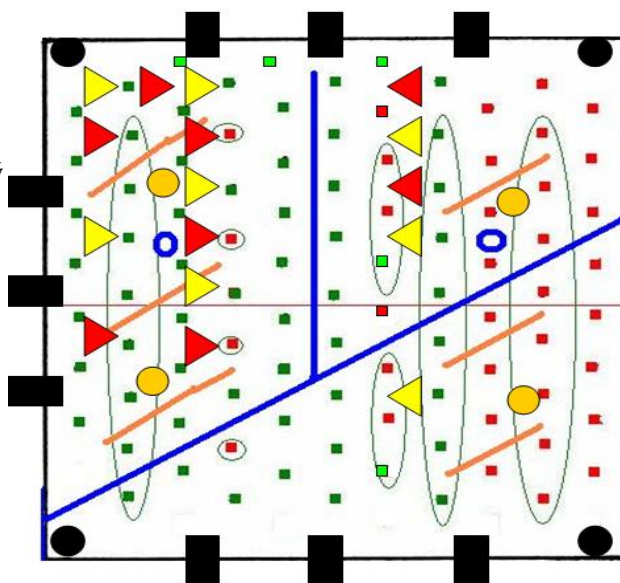
4. Metodika

4.1. Popis výsadby stromů

V experimentu byl zkoumán vliv smíšení dřevin smrku ztepilého (*Picea abies* L.) a buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) v poměru 35 % : 65 % v různé vzdušné koncentraci CO₂. V rámci ploch byly vylíšeny sub-plochy bez smíšení, s jednotlivým a skupinovitým smíšením.

Na podzim roku 2005 byly dvouleté semenáčky buku a tříleté smrkové semenáčky (průměrná výška stromu 77,1 cm u buku a 46 cm pro smrk) vysázeny pozičně identicky v obou sférách, později byly dokonce pomístně podsazeny dvěma druhy trav (*Luzula spp.*, *Calamagrostis spp.*). Celkem bylo vysázeno v trojúhelníkovém sponu 96 stromů v každé z variant. Pozičně shodné páry sazenic ve sféře A a E byly pečlivě vybrány tak, aby tyto byly co do velikosti (tloušťka kořenového krčku, výška, velikost koruny) co nejvíce shodné. Stromy by totiž měly mít stejný počáteční růstový potenciál a podmínky pro růst jen s výjimkou koncentrace CO₂. Ve sférách byly použity tři typy směsí a to P–*pure* (monokultura), I–*individual* (jednotlivé smíšení), G–*group* (skupina). Fumigace CO₂ začala na jaře roku 2006. Na následujícím obrázku (Obr. 15) je vyobrazeno schematické rozmístění stromků. Modrá čára představuje přístupovou cestu v kultivační sféře.

buk lesní - zelený čtverec
smrk ztepilý – červený čtverec
bika hajní – trojúhelník žlutý
třtina rákosovitá – trojúhelník červený
teplota půdy – oranžové kolo
vlhkost půdy – modrý kruh
dopadající, prostupující
a odražená FAR – oranžová čára



Obr. 15 Současné schematické rozmístění stromků.

4.2. Popis destrukce stromů

Destrukce buků začala v polovině srpna 2013 a byla dokončena v září roku 2013. Vyzdvižení kořenového systému z půdy následovalo po vyřezání a destrukční analýze všech stromů ze sfér, a to na konci října 2013. Všechny stromy byly uřezány ruční pilou, co nejbliže k zemi a zbývající pahýl byl ponechán pro budoucí identifikaci pařezů a kořenového systému a jejich následného vyzdvižení.

Nadzemní část každého stromu byla rozdělena na tři části u korun stromů (dle tvaru a morfologických znaků – osluněná, přechodová a zastíněná), v rámci nichž byly analyzovány zvláště listy a větve. Dále byla u stromů změřena výška a obvod kmene v 0,1; 0,3 a 1,3 metru nad zemí. Kmeny byly rozděleny do osmi segmentů, jejichž délka byla rovna 1/8 výšky stromu, a ve střední části každého segmentu se změřil kmenový obvod s cílem analyzovat tvar kmene. Pro stanovení biomasy jednotlivých částí stromů se oddělily větve a listy a ty se sušily v sušárně 24 hodin při 80 °C a následně 2 hodiny při 105 °C a nakonec byly zváženy. Totéž bylo provedeno s kmenem.

Celé kořenové systémy byly vyzdviženy z půdy pomocí nadzvukového proudu vzduchu (Air-150/90, Spade vyrobený Concept Engineering Group, Inc., Verona, PA, USA). Tento systém je založen na proudění vzduchu ze silného kompresoru (Ingersoll-Rand VHP 400) dosahující průtok vzduchu až $12 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ při pracovním tlaku do 1,2 MPa. (Rizzo a Gross 2000; Nathenson a Jarabak 2001; Nadezhdina a Čermák 2003a, b; Čermák et al., 2008c). Při této metodě byla půda odstraněna použitím vzduchu o vysoké rychlosti, který způsobuje řadu mikro-výbuchů v půdním prostředí. Pevné předměty jako jsou kameny a kořeny (kromě mykorhizních) zůstávají nepoškozené. Po vyjmutí byly kořeny očištěny vodou, vysušeny stejným postupem jako předchozí části stromů a zváženy.



Obr. 16 Metoda vyhloubení kořenového systému pomocí nadzvukového proudu vzduchu.

Byla provedena destrukční analýza kořenového systému. Kořeny byly skladovány v papírových pytlích a popsány zkratkami, podle toho, ve které sféře a v jakém typu smíšení byly pěstovány. Poté byly kořeny rozděleny podle jednotlivých průměrů v příčném průřezu (1 mm, 1,01–2mm, 2,01–5 mm, 5,01–20 mm, nad 20 mm a pařez) do tloušťkových tříd a uloženy do menších papírových pytlů, ve kterých byly později sušeny v sušárně 24 hodin při 80 °C a následně 2 hodiny při 105 °C.

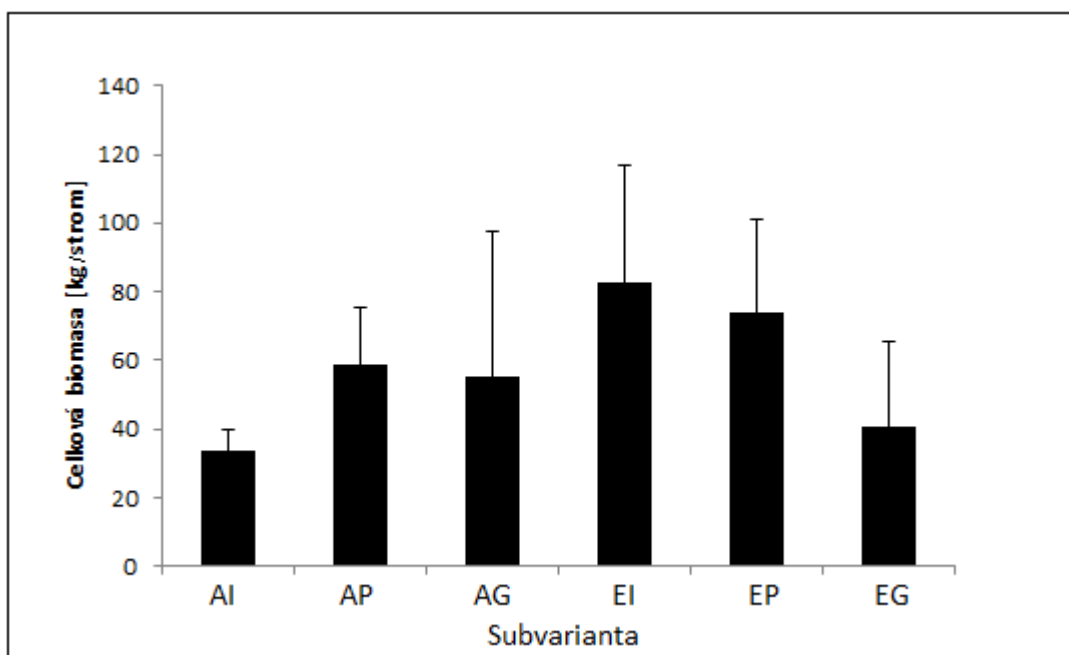
4.3. Statistická analýza

Pomocí softwaru STATISTICA (STATISTICA Cz 12Copyright©StatSoft, Inc.) byla provedena statistická analýza dat. Před vyhodnocením statistickou analýzou byly značné rozdíly a byla zkoumána normalita rozdělení dat. Hlavní účinky interakce byly testovány s použitím programu ANOVA. Lamelové sféry A a E, druhy smíšení P, I a G byly použity jako hlavní účinky. Při determinaci rozdílu pomocí analýzy ANOVA, byl použit Fisherův LSD test pro zjištění velikosti rozdílů mezi hlavními účinky a interakcemi. Intervaly spolehlivosti byly stanoveny na 95 %.

5. Výsledky

5.1. Celková biomasa

Po osmi letech pěstování smrku ztepilého a buku lesního v lamelových sférách, kdy ve sféře A byla okolní koncentrace CO₂ shodná s běžnou koncentrací CO₂ v okolí 385 μmol CO₂ mol⁻¹ a ve sféře E byla koncentrace zvýšená na 700 μmol CO₂ mol⁻¹ (viz kapitola 3.7.4. popis lamelových sfér), nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly v celkové biomase stromů mezi sférou A a E (Fisher's LSD test). Po porovnání samostatných výsledků jednotlivých typů smíšení – P, I a G byly nalezeny rozdíly. Průměrná celková biomasa jednotlivého stromu ve sféře E ve srovnání se sférou A byla o 27 % nižší při smíšení G, o 25 % vyšší při smíšení P a dokonce o 147 % vyšší ve smíšení I. Avšak pouze u varianty I byl nalezen statisticky významný rozdíl (p = 0,012). Ve sféře A nebyl nalezen statisticky významný rozdíl mezi různými smíšeními. Ve sféře E bylo nalezeno nejméně biomasy ve smíšení typu G. Výsledky ve smíšení G se významně lišily od smíšení I o 104 % (p = 0,012) a od P o 81 % (p = 0,033). U výsledků mezi typem smíšení I pěstovaným ve sféře A a mezi P ve sféře E byl zjištěn statisticky významný rozdíl (p = 0,031). Z tohoto důvodu lze předpokládat, že existují různé strategie růstu pro typy smíšení při různých koncentracích CO₂.

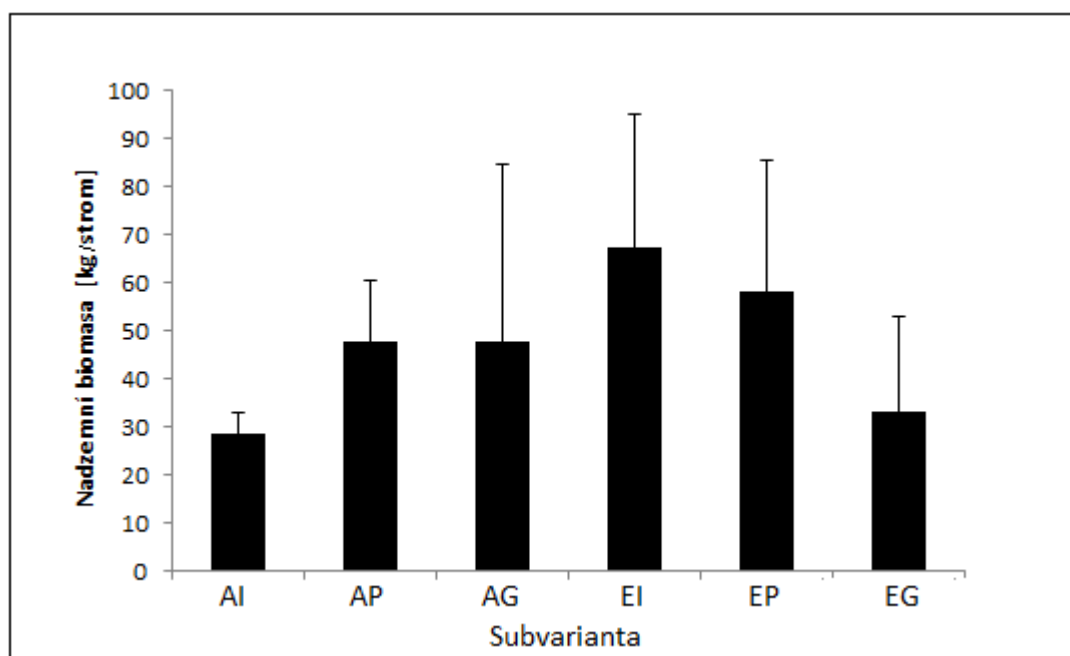


Obr. 17 Celková biomasa stromu dle jednotlivých sub-variant.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v kg/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂.

5.2. Nadzemní biomasa

Pro nadzemní biomasu, která se skládá z biomasy listů, větví a kmene, nebyly nalezeny, pomocí Fisherova LSD testu žádné statisticky významné rozdíly mezi sférou A a E. Při porovnání typů smíšení bylo ve sféře E ve smíšení G o 31 % méně biomasy než ve sféře A, ve smíšení P bylo o 22 % více biomasy a ve smíšení I bylo o 137 % více biomasy. Pouze ve smíšení I byl nalezen statisticky významný rozdíl mezi variantami ($p = 0,022$). Ve sféře A nebyl nalezen žádný rozdíl. Významný rozdíl ve sféře E byl nalezen mezi typem smíšení I a G ($p = 0,018$).

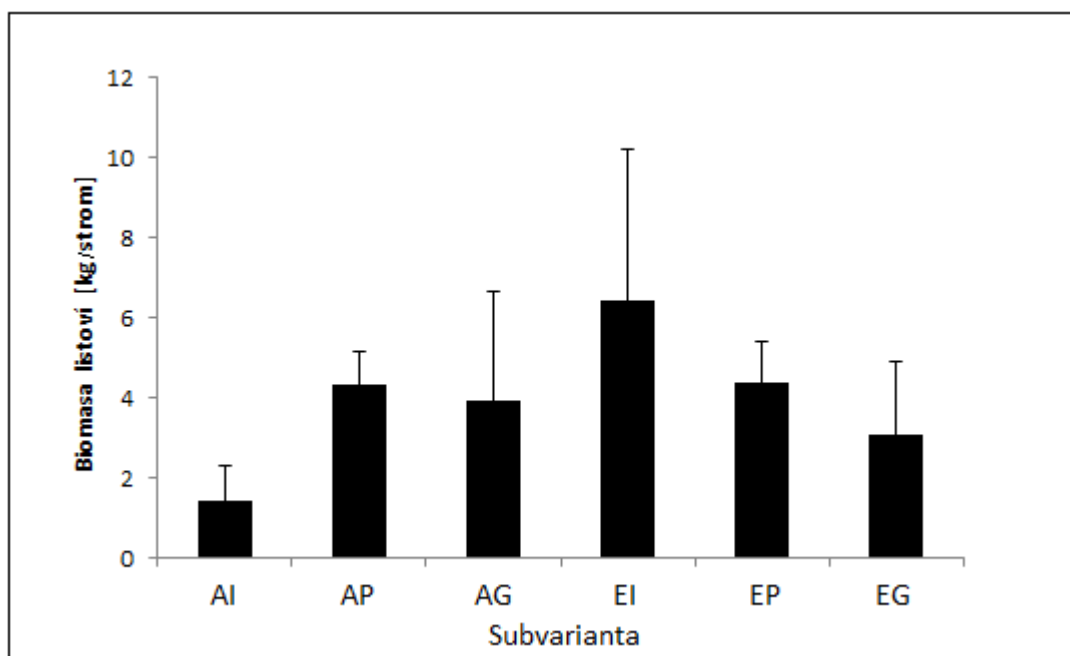


Obr. 18 Nadzemní biomasa průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v kg/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂.

5.3. Listová biomasa

Bez ohledu na typ smíšení měl buk pěstovaný ve sféře E v průměru o 21 % vyšší listovou biomasu než buk, který byl pěstován ve sféře A. Stromy pěstované v jednotlivém smíšení I ve sféře E dosahovaly extrémně vyšších hodnot listové biomasy ve srovnání se sférou A (až o 445 %, $p = 0,00078$). Toto je největší zjištěný rozdíl v biomase ze všech zkoumaných orgánů. Rozdíl ve sféře A byl zjištěn mezi hodnotami biomasy listoví ve smíšení I a G, a to o 132 % (více biomasy bylo v G; $p = 0,042$) a I a P to bylo o 153 % (více biomasy v P; $p = 0,035$).

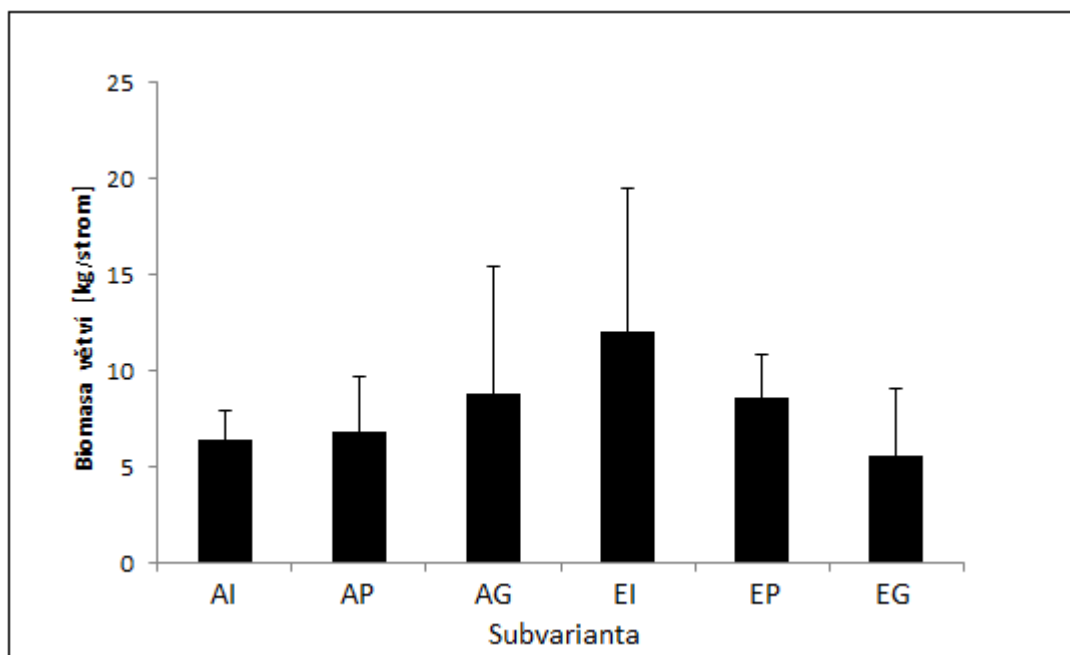


Obr. 19 Listová biomasa průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v kg/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂.

5.4. Biomasa větví

Biomasa větví mezi sférami nebyla statisticky rozdílná. Ve sféře A mezi typy smíšení nebyl nalezen žádný rozdíl. Jediný statisticky signifikantní rozdíl byl nalezen ve sféře E mezi smíšením G a I ($p = 0,016$), kdy ve smíšení I bylo nalezeno o 88 % více biomasy větví nežli ve smíšení typu G.



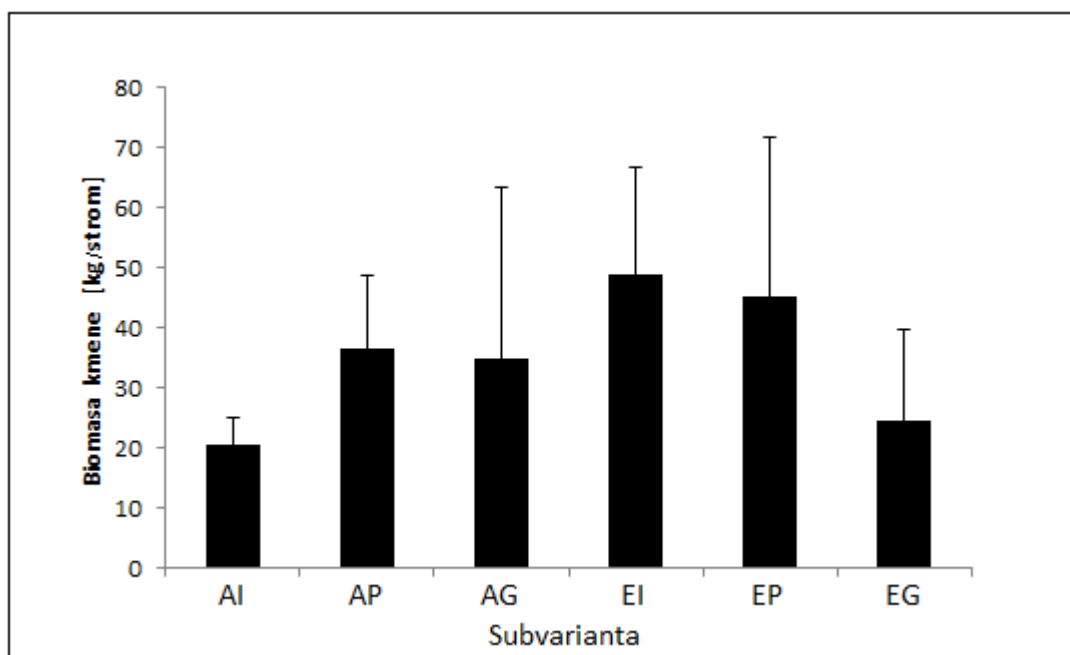
Obr. 20 Biomasa větví průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v kg/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂;

EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂.

5.5. Biomasa kmene

V rámci testování rozdílů v biomase kmenů nebyl nalezen statisticky významný rozdíl mezi sférami A a E. Ve sféře E byl nalezen rozdíl ve smíšení I a G ($p = 0,032$). Průměrný strom v I měl o 101 % více biomasy než průměrný strom v G. V interakci smíšení a sféry byl nalezen rozdíl mezi EI a AI ($p = 0,035$). Ve sféře E měl průměrný strom v jednotlivém smíšení více biomasy kmene než ve sféře A ve stejném smíšení.

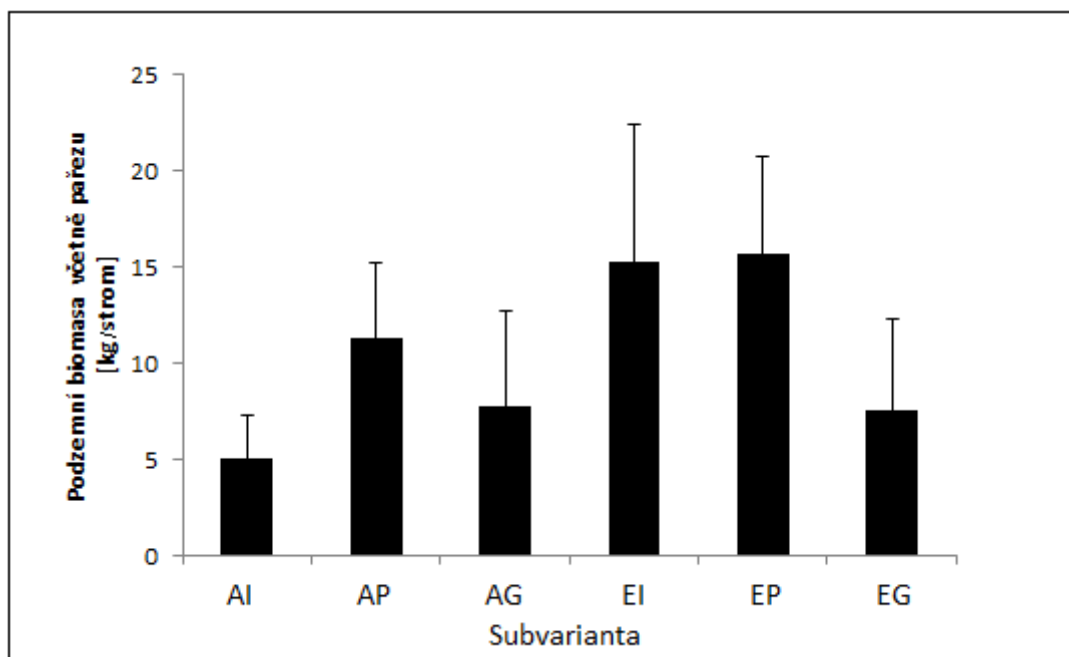


Obr. 21 Biomasa kmene průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v kg/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO_2 ; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO_2 ; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO_2 ; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO_2 ; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO_2 ; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO_2 .

5.6. Biomasa kořenů a pařezů

V produkci podzemní biomasy byly nalezeny statisticky významné rozdíly. Dle Fisherova LSD testu byl prokázán významný pozitivní vliv zvýšeného CO₂ na celkovou podzemní biomasu ($p = 0,024$). Kdybychom shrnuli všechny výsledky podzemní biomasy pro jednotlivé typy smíšení, byla by produkce biomasy kořenů vyšší o 60 % v rámci zvýšeného CO₂. Porovnání jednotlivých typů smíšení, vykazuje nejvýznamnější statistický rozdíl pro smíšení I ($p = 0,002$), v tomto smíšení vykazuje podzemní biomasa u stromů, které byly pěstovány ve sféře E až o 200 % větší produkci biomasy než ve sféře A. Ostatní rozdíly mezi typy smíšení mezi sférami A a E nebyly statisticky významné, pravděpodobně jako důsledek vysoké variability dat.

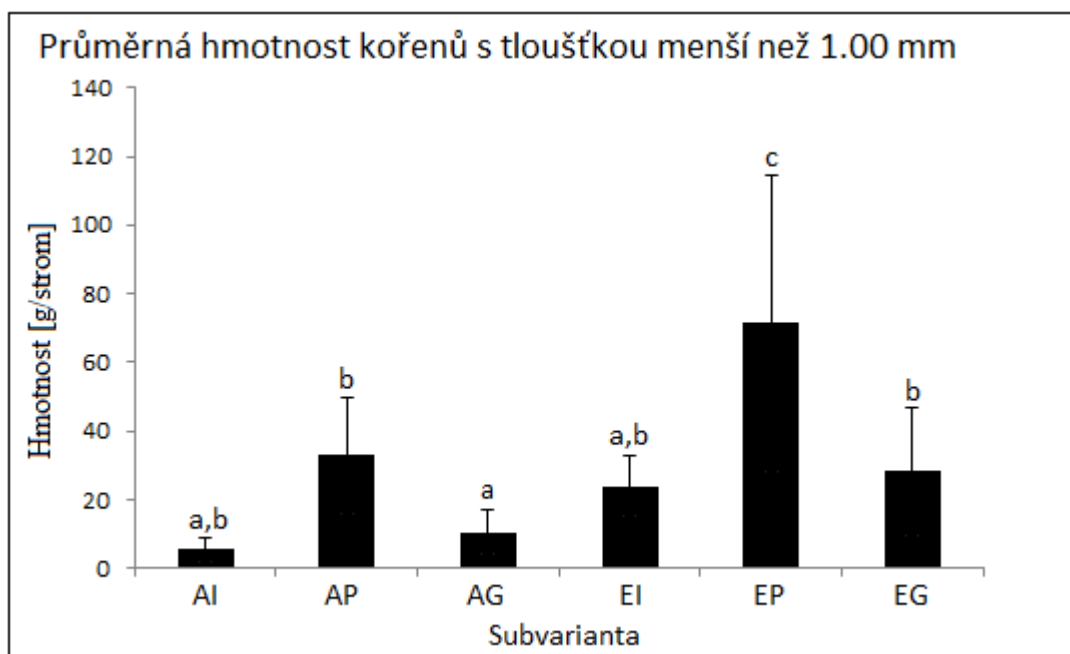


Obr. 22 Podzemní biomasa kořenů (včetně pařezu) průměrného stromu dle jednotlivých typů smíšení.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v kg/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂.

5.6.1. Biomasa kořenů s tloušťkou menší než 1 mm

Ve sféře A byl nalezen statistický rozdíl mezi smíšenými typy G a P (o 320 %; $p = 0,025$), kdy více biomasy bylo nalezeno ve smíšení P. Ve sféře E bylo nalezeno více biomasy ve smíšení P na rozdíl od smíšení I (o 238 %; $p = 0,008$) a od smíšení G (o 212 %; $p = 0,0001$). Mezi jednotlivými sférami byl nalezen rozdíl ve smíšení P (o 113 %; $p = 0,001$) a G (o 216 %; $p = 0,04689$), vždy ve prospěch varianty E.



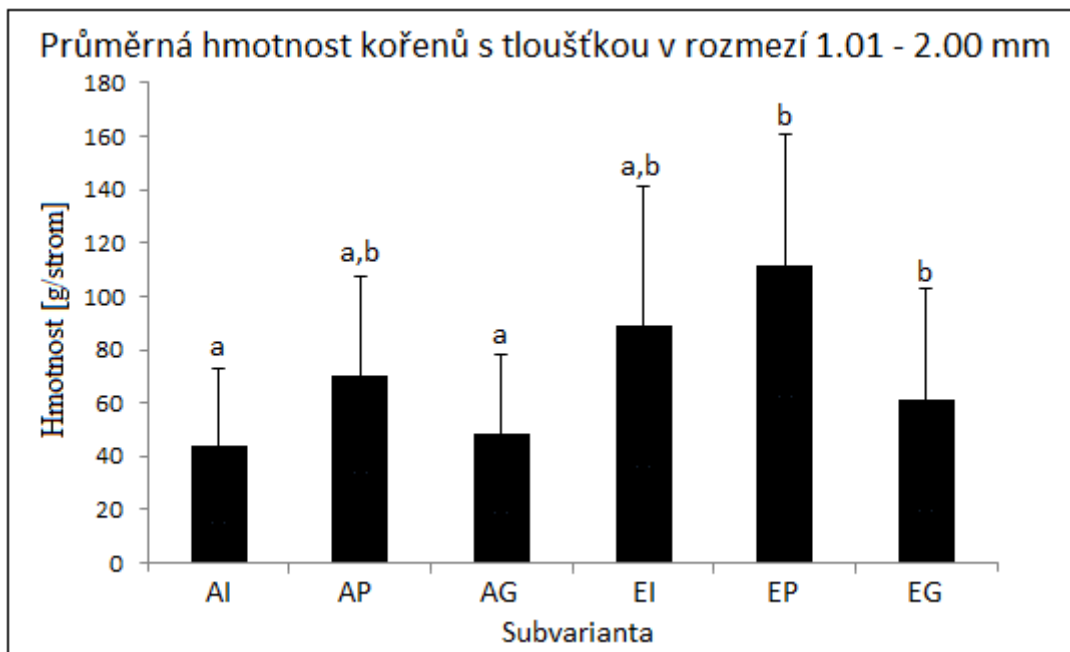
Obr. 23 Biomasa jemných kořenů s tloušťkou menší než 1 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v g/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂;

EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; a, b, c – označují homogenní skupiny.

5.6.2. Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 1, 01–2 mm

Všeobecně, bez ohledu na typ smíšení, nebyl mezi sférami nalezen statisticky významný rozdíl. Ve sféře A nebyl mezi smíšenými nalezen rozdíl. Ve sféře E byl nalezen statisticky významný rozdíl mezi smíšením P a G ($p = 0,011$). Více biomasy bylo nalezeno ve smíšení P a to o 81 %.

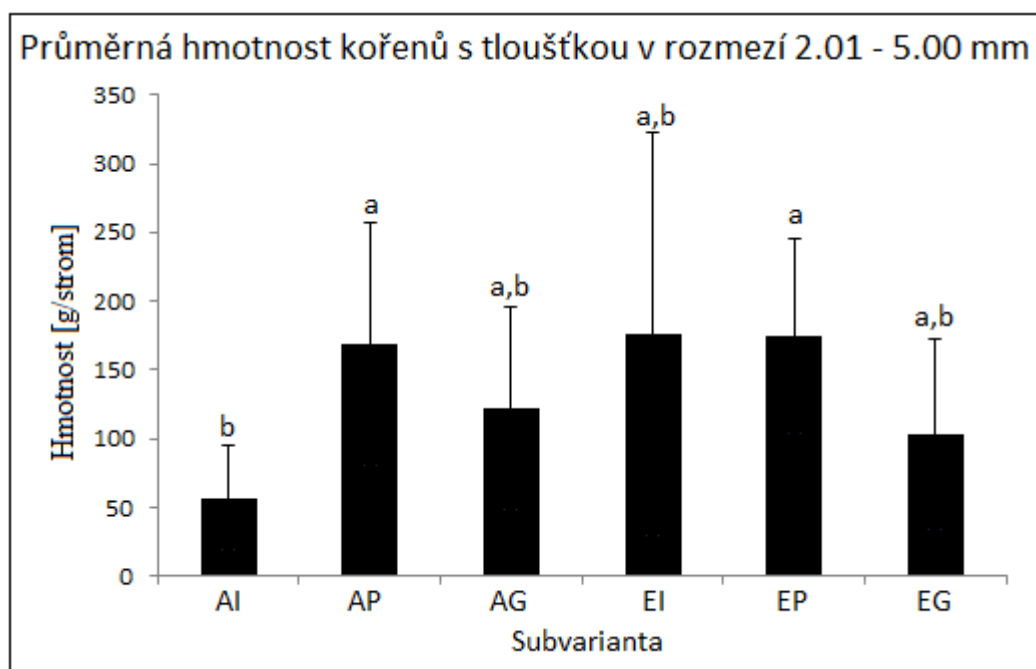


Obr. 24 Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 1, 01–2 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v g/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO_2 ; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO_2 ; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO_2 ; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO_2 ; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO_2 ; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO_2 ; a, b, c – označují homogenní skupiny.

5.6.3. Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 2, 01–5 mm

Mezi sférami nebyl nalezen statistický rozdíl. Ve sféře A byl nalezen rozdíl mezi smíšením I a P ($p = 0,049$). Více biomasy bylo ve smíšení P a to o 320 %. Ve sféře E nebyl nalezen statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými typy smíšení.

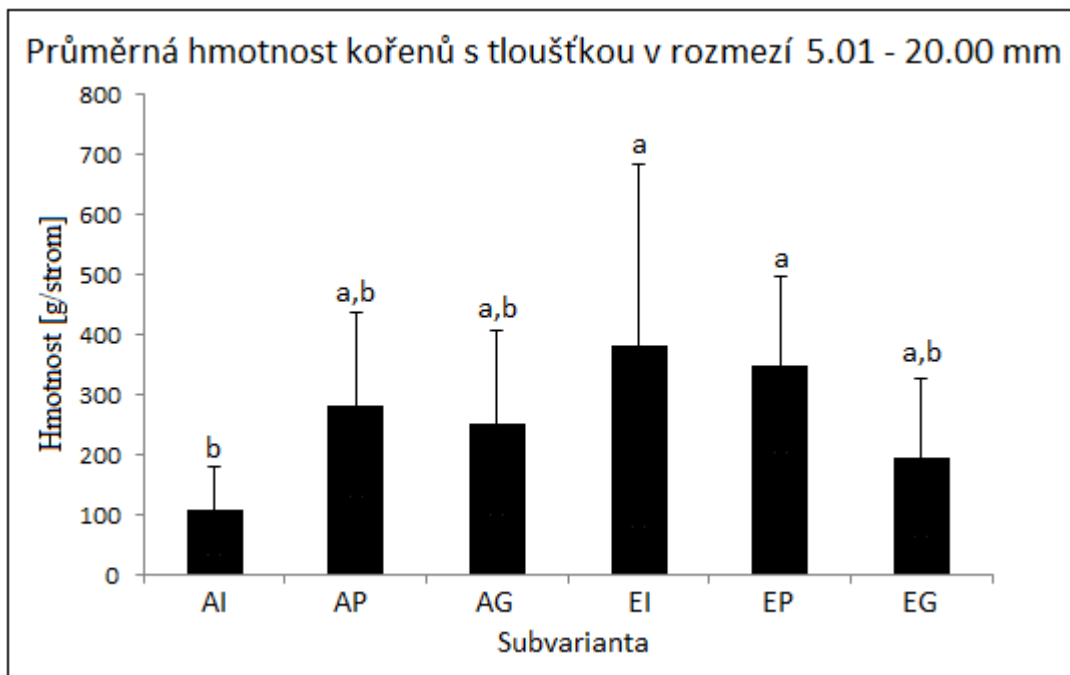


Obr. 25 Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 2, 01–5 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v g/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; a, b, c – označují homogenní skupiny.

5.6.4. Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 5, 01–20 mm

Mezi sférami nebyl nalezen žádný statistický rozdíl. Mezi smíšenými ve sféře A ani mezi smíšenými ve sféře E nebyl nalezen statistický rozdíl. Rozdíl byl nalezen mezi smíšenými typu I ($p = 0,031$). Ve sféře E bylo v tomto typu smíšení více biomasy a to o 325 % nežli ve sféře A.

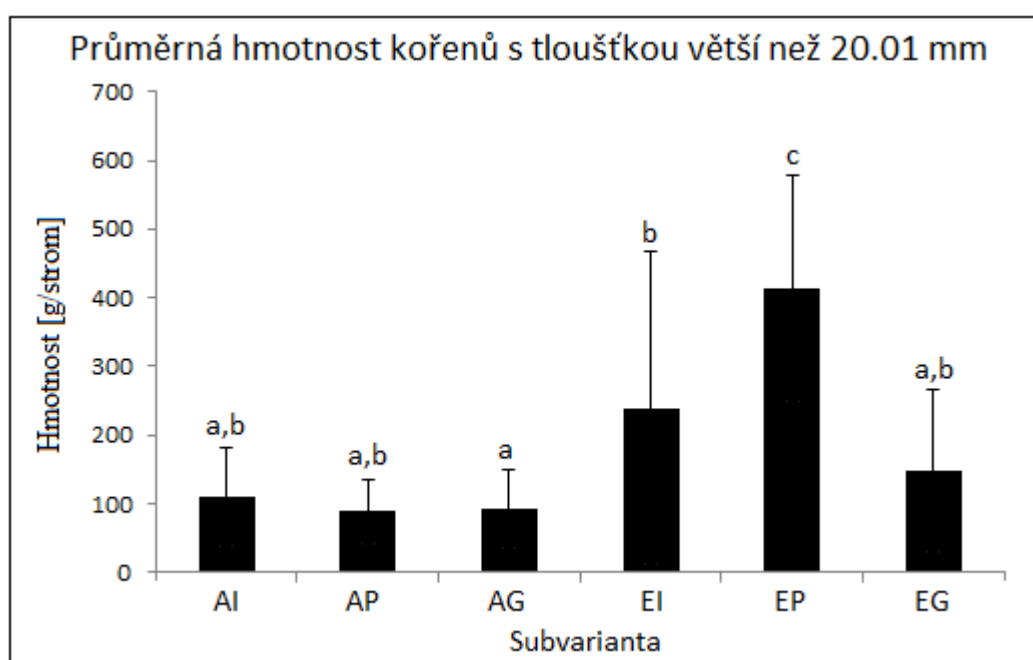


Obr. 26 Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 5, 01–20 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V Grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v g/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; a, b, c – označují homogenní skupiny.

5.6.5. Biomasa kořenů s tloušťkou větší než 20,01 mm

Mezi sférami nebyl nalezen statisticky významný rozdíl. Ve sféře A mezi smíšením P a I ($p = 0,031$) a P a G ($p = 0,00005$). Ve smíšení P bylo více biomasy o 86 % nežli ve smíšení I a o 142 % nežli ve smíšení G. V interakci mezi sférami a smíšením byl nalezen rozdíl ve smíšení P ($p = 0,000009$). Více biomasy bylo nalezeno ve sféře E a to o 398 %.

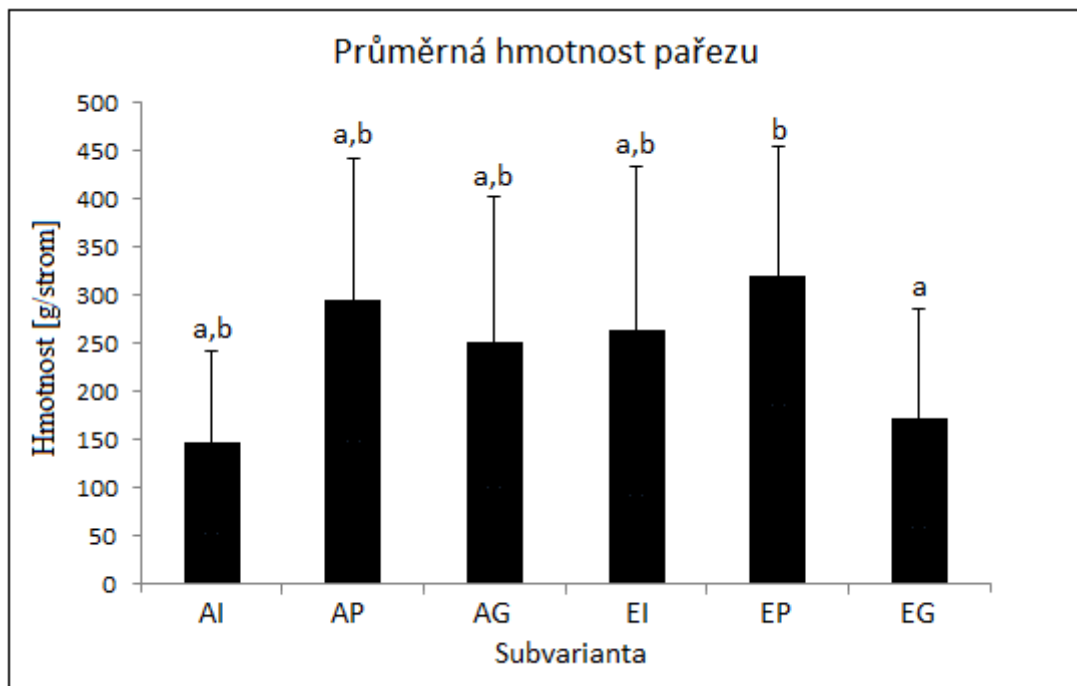


Obr. 27 Biomasa kořenů s tloušťkou větší než 20,01 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V Grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v g/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; a, b, c – označují homogenní skupiny.

5.6.6. Biomasa pařezů

Mezi sférami nebyl nalezen žádný statistický rozdíl. Ve sféře E byl nalezen rozdíl mezi smíšenými P a G ($p = 0,029$). Více biomasy bylo ve smíšení P a to o 45 %. Ve sféře A nebyl nalezen rozdíl.



Obr. 28 Biomasa pařezů průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.

V grafu osa x popisuje jednotlivé druhy smíšení, osa y hmotnost biomasy v g/průměrný strom. AI – smíšení individuální ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AP – monokultura ve sféře se současnou koncentrací CO₂; AG – smíšení skupinové ve sféře se současnou koncentrací CO₂; EI – smíšení individuální ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EP – monokultura ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; EG – smíšení skupinové ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂; a, b, c – označují homogenní skupiny.

6. Diskuze

Účinky CO₂ na rostliny či ekosystém je nutno zkoumat v prostorovém i časovém měřítku (Jarvis, 1998; Urban, 2003; Körner, 2006; Ainsworth a Rogers, 2007). K nárůstu intercelulární koncentrace CO₂ a průkaznému navýšení hodnoty asimilace rostlin, která kolísá v intervalu 20–300 % (Špunda et al. 2005), vede již krátkodobá aplikace zvýšené koncentrace CO₂ (Von Caemmerer, 2000). S délkou působení zvýšené koncentrace CO₂ však stimulace rychlosti asimilace často klesá. Tento jev je pozorovatelný především při nedostatečné minerální výživě rostlin (Jarvis, 1998; Ainsworth a Rogers, 2007; Leuzinger a Körner, 2007). Například dostatek dusíku spolu se zvýšenou koncentrací CO₂ jsou hlavními faktory, které ovlivňují důležité parametry architektury stromu a přírůst biomasy (Bužková a Pokorný, 2013). Prostorové měřítko je dáno nejen velikostí experimentálního zařízení, které bylo použito pro simulaci vybraných podmínek, ale i struktura testovaného rostlinného společenství. Například Körner (2006) popisuje závislosti na druhu experimentálního zařízení dle uzavřeného, částečně otevřeného nebo otevřeného systému. Dalším důležitým faktorem jsou i vlastnosti půdy (množství dusíku v půdě, obsah živin, kyselost půdy, typ půdy atd.). Tento faktor může vysoce ovlivnit výsledky přírůstu a celkového množství biomasy (Eamus a Jarvis, 1989; Bazzaz, 1990; Johnson, 1992; Egli a Körner, 1997; Dyckmans et al. 2000; Spinnler et al. 2002, Hyvönen et al. 2007; Franklin, 2007; Dieleman et al. 2010). Z těchto důvodů je důležité znovu upozornit, že experiment byl založen v polootevřeném zařízení lamelových sférách ve třech typech smíšení. Vlastnosti půdy pro tuto práci nebyly brány v potaz, neboť v obou sférách a všech typech smíšení byly vlastnosti půdy stejné.

Z tohoto experimentu výsledky celkové biomasy buku bez ohledu na smíšení ukazují, že zvýšení biomasy při pěstování pod navýšenou koncentrací CO₂ by nemělo být abnormální. Tento výsledek se rozchází s výsledky, které uvádí například Egli a Körner (1997) nebo Spinnler et al. (2003), kteří popsali čtyři roky dlouhý experiment směsí bukového a smrkového porostu ve zvýšené [CO₂] (cca 570 μmol mol⁻¹). Po prvním roce působení vzduchu se zvýšenou [CO₂] byl nárůst biomasy statisticky nevýznamný, avšak po čtyřech letech analýza dat ukázala významný rozdíl mezi biomasou stromů pěstovaných při různé koncentraci CO₂. Při ohledu použitého smíšení je patrné ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂ snížení celkové biomasy ve skupinovém

smíšení a naopak navýšení celkové biomasy v monokultuře a především v jednotlivém smíšení v porovnání s buky pěstovanými ve sféře se současnou koncentrací CO₂. V monokultuře jsou výsledky obdobné jako u výsledků experimentu Smith et al. (2013), který popsal čtyři roky dlouhý pokus pod zvýšenou [CO₂] (cca 580 umol mol⁻¹) v monokultuře a smíšeném porostu *Betula pendula*, *Alnus glutinosa* a *Fagus sylvatica*. V těchto dvou porostech byla srovnávána biomasa. Po čtyřech letech se biomasa zvýšila o 22 % v monokultuře s navýšenou koncentrací CO₂ oproti monokultuře, která byla pěstována pod současnou koncentrací CO₂. U buku ve smíšeném porostu pěstovaném pod navýšenou koncentrací CO₂ nebyl zaznamenán nárůst biomasy oproti smíšenému porostu pěstovaným pod současnou koncentrací CO₂. U smíšeného porostu však lze polemizovat, zda přimíšená dřevina byla v jednotlivém nebo skupinovém smíšení. Dle našich výsledků by mohlo být usuzováno, že buk byl pěstován ve skupinovém smíšení anebo smíšení těchto druhů dřevin může mít jiný vliv nežli smrko-bukové smíšení. Za zmínku stojí i výsledky v jednotlivých sférách. Celková biomasa průměrného stromu v různém smíšení ve sféře se současnou koncentrací CO₂ nebyla rozdílná. Naproti tomu, ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂ byl patrný rozdíl mezi jednotlivým smíšením a především skupinovým smíšením, kde celková biomasa průměrného stromu v jednotlivém smíšení byla více nežli jednonásobně vyšší než celková biomasa průměrného stromu ve skupinovém smíšení.

Podle prvního předpokladu nebyl nalezen rozdíl v nadzemní biomase mezi sférami s různou [CO₂]. Potvrdily se však výsledky při využití různého smíšení. Největší rozdíl (a zároveň i jediný signifikantní) byl patrný u jednotlivého smíšení, kdy ve sféře s navýšenou [CO₂] bylo zjištěno více uložené biomasy nežli ve sféře se současnou [CO₂]. Nenalezení rozdílu bylo předpokládáno na základě poměru kmene, větví a listoví. Váha biomasy kmene a větví převyšovala váhu biomasy listoví. Přestože Jarvis (1998) nebo Zak et al. (2000) popisují, že polovina asimilátů z celkové fotosyntetické produkce je u dřevin použita pro růst nadzemní biomasy, a druhá polovina je používána na růst kořenů, je nutné vyslovit možnost, že nejprve je zapotřebí, aby strom zvýšil listovou plochu a biomasu listoví (Pokorný et al. 2001; McMurtrie et al. 2008) současně s množstvím jemných kořenů a mykorhizu (Jarvis 1998; Zak et al. 2000) a teprve poté deponoval asimiláty do kmenů popřípadě větví. Tímto by poměr podzemní/nadzemní biomasy měl být odlišný od současného poměru. Tuto úvahu částečně podporuje i Urban (2003), který popisuje, že při zvýšené

koncentraci CO₂ je změněna prostorová realokace biomasy. To se odráží ve změně poměru nadzemní/podzemní biomasa a celé struktury stromu.

Rozdíl biomasy kmene nebo větví nebyl signifikantní mezi sférami s různou koncentrací CO₂. Tento výsledek se neshoduje s výsledky studií od Jarvis (1998) nebo Zak et al. (2000), kteří ukázali, že nárůstem [CO₂] se zvětší výškový a tloušťkový přírůst kmene a naroste větvení – tedy zvýší se biomasa. V našem případě se lišilo množství biomasy pouze v jednotlivém smíšení mezi sférami. Je obtížné odhadnout důvod rozdílných výsledků mezi Jarvis (1998) a Zak et al. (2000) a našimi. Pravděpodobně zde můžou hrát velkou roli nejen vlastnosti půdy ale samotný spon mezi dřevinami.

Listová biomasa vykazovala značný rozdíl mezi sférami s různou koncentrací CO₂. Mnoho autorů – například Jarvis (1998) nebo Ainsworth a Rogers (2007) popisují navýšení listové biomasy vlivem navýšené koncentrace CO₂. Tyto výsledky podporují i autoři Pokorný et al. (2001) anebo McMurtrie et al. (2008), kteří rozšiřují poznatek i o zvětšení listové plochy, neboť není pravidlem, že čím větší váha listu, tím větší je i jeho plocha. Avšak je nutné podotknout, že tyto studie se zabývají monokulturami. V našem experimentu podle typu smíšení, lze pozorovat, že monokultura nevykazuje velký rozdíl v množství biomasy pod různou [CO₂]. Za to rozdíl je patrný u buku pěstovaných v jednotlivém smíšení, kde buky pod zvýšenou [CO₂] mají daleko více biomasy nežli buky pěstované v současné koncentraci CO₂. Naproti tomu, snížení množství biomasy ve skupinovém smíšení bylo nalezeno ve sféře s navýšenou [CO₂] oproti sféře se současnou koncentrací CO₂.

Větší uložení asimilátů do podzemní biomasy – jakožto jeden z prvních projevů nárůstu biomasy díky navýšení [CO₂] - podporují například Urban (2003), Jarvis (1998), Zak et al. (2000) nebo Ainsworth a Rogers (2007). Dle našich výsledků, lze s těmito studiemi souhlasit, neboť jsme našli statisticky významný rozdíl mezi sférami s různou koncentrací CO₂. A to nejen všeobecně ale i v jednotlivém smíšení. Rozdíl nebyl nalezen v monokultuře – ale dle dat lze spíše usuzovat, že to bylo z důvodu variability dat a nikoliv z důvodu malého rozdílu mezi množstvím biomasy pro jednotlivé buky. Curtis et al. (1990), Norby (1994), Prior et al. (1994), Wullschleger et al. (1995) ve své studii tvrdí, že přírůst podzemní biomasy je dokonce vyšší nežli přírůst nadzemní biomasy. Naše výsledky se k tomuto závěru přiklánějí. Zatímco rozdíl nadzemní biomasy nebyl signifikantní (statistická významnost byla nalezena pouze u jednotlivého smíšení mezi sférami), u podzemní biomasy byl rozdíl nalezen již mezi

sférami (vliv navýšené koncentrace CO₂ byl potvrzen také). Taub (2010) vysvětluje tuto skutečnost větším podílem ukládání asimilátů do kořenového systému z důvodu podpory získávání více živin pro následný vývoj a přírůst celého stromu. Pokud bychom k této hypotéze přistoupili, pak bychom předpokládali z prvopočátku nárůst jemného vlášení a mykorhizních kořenů – tedy podle naší tloušťkové diferenciaci kořenů první popřípadě druhé tloušťkové třídy. Dle našich výsledků byly nalezeny mezi sférami pozitivní výsledky na průměrné množství kořenů pro jeden strom pouze u tloušťkového intervalu do 1 mm. U ostatních tloušťkových intervalů již nebyl patrný statistický rozdíl, přestože rozdíly v nárůstu biomasy dle výsledných hodnot patrné byly (opět lze usuzovat na vyšší variabilitu dat, která zabránila určit statisticky významný rozdíl). Zpravidla bylo více biomasy ve sféře s navýšenou koncentrací CO₂. I tyto výsledky lze porovnat se studii s kladným výsledkem. Například Jarvis (1998), Zak et al. (2000) anebo Ainsworth a Rogers (2007) dokazují ve svých pracích, že jemné vlášení a mykorhizní kořeny buků pěstovaných pod navýšenou koncentrací CO₂ mají nejen více biomasy, ale jsou i delší, početnější a mají rychlejší růst než u buků pěstovaných se současnou koncentrací CO₂. Trochu odlišné výsledky byly nalezeny u studií Norby (1994) nebo Spinner et al. (2003). Tyto práce poukazují na zvýšení biomasy ve všech jejich tloušťkových třídách, což v našem případě nebylo.

Z výsledků mnohých experimentů byl zaznamenán nárůst nejen poměru mezi podzemní a nadzemní biomasou, ale také nárůst počtu kořenů tzn. jejich délky, rychlosti růstu a také biomasy kořenového vlášení (Jarvis, 1998; Zak et al. 2000; Ainsworth a Rogers, 2007; Bužková a Pokorný, 2013).

Reakce půdy jsou většinou zprostředkovány účinkem kořenů a zvýšená koncentrace CO₂ přednostně podporuje růst kořenů (Prior et al. 1994). Norby (1994) potvrzuje vliv zvýšené koncentrace CO₂ na přírůst podzemní biomasy.

7. Závěr

Dle výsledků nejen z tohoto experimentu ale i literatury, která se danou problematikou zabývá, jsou patrné dva základní výstupy: nárůst biomasy v závislosti na její alokaci a nárůst/pokles biomasy v závislosti na smíšení.

Nárůst biomasy byl jasně zřetelný a zároveň statisticky významný po 8 letech především u listoví a kořenového systému. Rostlina musí nejprve investovat do množství a velikosti listoví, pro odběr fotosyntetického záření a tím i možnosti větší absorpce uhlíku, a také do množství biomasy jemných kořenů – pro zvětšení plochy přijímající živiny, neboť růst stromů není založen pouze na přijetí a uložení uhlíku z atmosféry, ale je zapotřebí i dalších látek pro zvýšení biomasy a přežití stromu. Teprve po zajištění vyrovnanosti potřeb obou rostlinných částí množství těchto dvou rostlinných částí komunikujících nejvíce s prostředím (nadzemní – listoví/podzemní – jemné kořeny), lze předpokládat zvýšení biomasy i u ostatních částí – větví a kmene.

Při současné koncentraci CO_2 , nebyl nalezen statistický rozdíl v množství biomasy mezi jednotlivými druhy smíšení, je však patrný trend, kdy nejvíce biomasy má průměrný strom v monokultuře (bez smíšení). O něco méně biomasy měl strom pěstovaný ve skupinovém smíšení a nejméně biomasy je uloženo ve stromu, který rostl jako vtroušený v jednotlivém smíšení. Naproti tomu při cca dvojnásobně zvýšené $[\text{CO}_2]$ lze díky výsledkům očekávat změnu tohoto trendu. Jednotlivě vmíšený buk by měl dosahovat nejvíce biomasy, zatímco buk pěstovaný ve skupinovém smíšení nejméně. Průměrný buk v monokultuře by měl vykazovat množství biomasy o něco méně nežli buk v jednotlivém smíšení a zároveň o dost více nežli buk ve smíšení skupinovém. Rozdílné chování by mohlo být vyvozováno z intra- a inter-druhové konkurence o příjem světelného požitku a živin v kořenové vrstvě.

Tyto výsledky by bylo vhodné podpořit opakovaným měřením na širším souboru dat, neboť jsou zásadní pro lesní hospodářství a tvorbu porostních směsí.

8. SUMMARY

According to the results of this experiment (as well as the theories known from literature on the given subject), two primary outcomes are recognizable: increase in biomass depending on its allocation and increase / decrease in biomass depending on the mixing.

The increase in biomass is actually visible and also statistically significant after 8 years in the foliage and root system. The reason is physiological nature of trees. For the plant, it is necessary to invest the energy into the quantity and size of foliage used for taking photosynthetic radiation first for the purpose of achieving greater carbon absorption, and also into fine root biomass - to enlarge the surface receiving nutrients, because the tree growth is not based on receiving of a deposit of carbon only, but also other substances are needed for increase of biomass and the tree survival. Only after providing the necessary amounts of these two plant parts there can be expected increase in biomass for the other part – the branches and trunk.

With the current CO₂ concentration no significant difference in the amount of biomass between different types of mixing was found, there can be seen the following trend - an average tree in a monoculture has the most biomass. A little less biomass was described in the case of the tree grown in mixed group and the least amount in biomass is stored within the tree, which grew as disseminated type in a single mixing. In contrast under the condition of increase in [CO₂] (double) the change of this trend can be expected (according to the results). The beech individually mixed in the monoculture should reach the most biomass, while beech grown in a mixed group the least. Average beech in monoculture should show less amount of biomass than the single beech in monoculture and at the same time more than a mixed group of beech. Different behaviour could be explained by intra- and inter-species competition for receiving total site factor and nutrients in the root layer.

The results of the research should be supported by the analyse of greater amount of data, because if approved they could play a key role in the planning of the forest farming and formation of the forest covers.

Seznam použité literatury

- Ainsworth, E. A., Rogers, A., 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment* 30, 258-270.
- Barros, V., 2006. Globální změna klimatu. 1. vyd. Praha: Mladá fronta, 165 s., [24] s. barev. obr. příl. ISBN 80-204-1356-1.
- Barton, C. V. M., Lee, H. S. J., Jarvis, P.G., 1993. A branch bag and CO₂ control systém for long-term CO₂ enrichment of nature Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.): technical report. *Plant Cell Environ.* 16: 1139-1148.
- Bazzaz, F. A., 1990. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 21: 167-196.
- Braniš, M., Hůnová, I., 2009. Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší. Vyd. 1. V Praze: Karolinum, 351 s. ISBN 978-80-246-1598-1.
- Curtis, P.S., Baldum, L.M., Drake, B.G., Whigman, D.F., 1990. Elevated atmospheric CO₂ effects on belowground processes in C₃ and C₄ estuarine marsh communities. *Ecology* 7:2001-2006.
- Čermák J., Ulrich R., Culek I., Čermák M., 2008c. Visualization of root systems by the supersonic air stream. 89-95pp. In: Neruda J.: Determination of damage to soil and root systém of forest trees by the operation of logging machines. Mendel University of Agriculture and Forestry Publishing House, Brno, 138p.
- Dieleman, W. I. J., Luysaert, S., Rey, A., De Angelis, P., Barton, C. V. M., Broadmeadow, M. S. J., ... Dufrene, E., 2010. Soil [N] modulates soil C cycling in CO₂-fumigated tree stands: a meta analysis. *Plant, Cell & Environment*, 33(12), 2001–2011.
- Dubrovský M., Pokorný R., Marek M. V., 2011. Scénáře vývoje globální změny klimatu.
- Dyckmans, J., H. Flessa, A. Polle and F. Beese., 2000a. The effect of elevated [CO₂] on uptake and allocation of ¹³C and ¹⁵N in beech (*Fagus sylvatica* L.) during leafing. *Plant Biol.* 2:113–120.
- Eamus, D. and Jarvis P. G., 1989. The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. *Adv. Ecol. Res.* 19:1-55.

Egli, P., Korner, C., 1997. Growth responses to elevated CO₂ and soil quality in beech-spruce model ecosystems. *Ecologica* 18(3): 343-349.

Foot, P. et al., 2008. National Green house Gas Emission Inventory Report of the Czech Republic. Reported Inventory 2006. ČHMI, Praha.

Franklin, O., 2007. Optimal nitrogen allocation controls tree responses to elevated CO₂. *New Phytol* 174 (4): 811-22.

Grace, J., 2015. Global Change Research Centrum: annual conference Global Change: A Complex Challenge.

Houghton, J., 1998. Globální oteplování: úvod do studia změn klimatu a prostředí. Vyd. 1. Praha: Academia.

Hyvonen, R., Agren, G. I., Linder, S., Persson, T., Cotrufo, M. F., Ekblad, A., Wallin, G., 2007. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *The New Phytologist*, 173(3), 463-480.

IPCC- Climate Change, 2007. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (ed) Summary for policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

Janouš, D., Dvořák, V., Opluštilová, M., Kalina, J., 1996: Chamber effects and response of trees in the experiment using open top chambers. *J.Plant Physiol.* 148: 332-338.

Jarvis, P.G. (Ed), 1998. European Forests and Global Change. The likely Impacts of Rising CO₂ and Temperature. Cambridge, Cambridge University Press, UK, 383 pp.

Johnson DW (1992) Nitrogen retention in forest soils. *J. Environ. Qual.* 21:1-12.

Joos, F., Spahni, R., 2008. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20 000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 1425 – 1430.

Kadrnožka, J., 2006. Energie a globální oteplování: Země v proměnách při opatřování energie. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 189 s. ISBN 80-214-2919-4.

Kadrnožka, J., 2010. Země se ubrání. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 238 s. ISBN 978-80-7204-678-2.

- Kalvová, J., 2002. Scénáře změny klimatu na území České republiky a odhady dopadů klimatické změny na hydrologický režim, sektor zemědělství, sektor lesního hospodářství a na lidské zdraví v ČR. 1. vyd. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 141 s., [4] l. barev. obr.příl. ISBN 80-86690-01-6.
- Klika, J., 1947. Lesní dřeviny: Lesnická dendrologie. Praha.
- Kolařík, J., 2003. Péče o dřeviny rostoucí mimo les. Vlašim: ČSOP Vlašim, 261s. ISBN 80-86327-36-11.
- Kopáček, J. a Bednář, J., 2005. Jak vzniká počasí. Vyd. 1. V Praze: Karolinum, 226 s., [16] s. obr. příl. ISBN 80-246-1002-7.
- Körner, C., 2006. Plant CO₂ responses: an is me of definition, time and ressource supply. *The New phytologist*. 172(3): 393-411.
- LeQuéré et al., 2014. Estimates for 2011, 2012, and 2013 are preliminary Source: CDIA. Global Carbon Budget 2014.
- Leuzinger, S., Körner, C., 2007. Watersavings in mature decious forest trees under elevated CO₂. *Global Change Biology* 13, 2498-2508.
- Luthi et al., 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years befor represent. *Nature publishing Group*; vol 453/15 May 2008, 379-382.
- Norby, R.J., 1994 Is sues and perspectives for investigating root responses to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Soil* 165:9-20.
- McMurtrie, R. E. et al., 2008. Why is plant-growth response to elevated CO₂ amplified hen water is limiting, but reduced hen nitrogen is limiting? A growth-optimisation hypothesis. *Functional Plant Biology* 35, 521-534.
- Marek, M. V., Kalina, J., 1996: Comparis on of two experimental approaches used in the investigation of the long-term effects of elevated CO₂ concentration. *Photosynthetica* 32: 129-133.
- Marek, M. V., et al., 2011. Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. *Academia Praha*, 255 s., 2011.
- Marková, I., Pavelka, M., Tomášková, I., Janouš, D., 2009. Ročenka meteorologických měření 2007, Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž (Moravskoslezské Beskydy), Ústav systémové biologie a ekologie AV CR, v.v.i., Brno, ISBN 978-80-904351-0-0, 80 str.

Martinec, P., 2010. Oxid uhličitý a horninový masiv: Carbon dioxide and rock massif. Ostrava: ÚGN AV ČR, 138 s. ISBN 978-80-86407-14-2.

McLeod A.R., Long S.P., 1999: Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research: A review *Advances in Ecological Research*, 28 Book Series: *Advances in Ecological Research* 28: 1-56.

Mráček, Z., 1989. Pěstování buku. 1. vyd. Praha Státní zemědělské nakladatelství, 223 s.

Nadezhdina, N., and Čermák, J., 2003a. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems in large trees. *Journal of Experimental Botany* 54 (387): 1511-1521.

Nadezhdina, N., and Čermák, J., 2003b. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems in large trees. *Proc. Of the 5th International Workshop on Field Techniques for Environmental Physiology, Tenerife, Canary Islands, Spain, 16-22 March 2003*, 23-33pp.

Nathenson, R., and Jarabak, A., 2001. The evolution of air-tools for use in arboriculture. *Tree Care Industry*, May 2001, 29-41.

Nátr, L., 2000. Koncentrace CO₂ a rostliny. Vyd. 1. Praha: ISV, 257 s. ISBN 80-85866-62-5.

Nátr, L., 2006. Země jako skleník: proč se bát CO₂?. Vyd. 1. Praha: Academia, 142 s. ISBN 80-200-1362-8.

Oleskog, 2005. Ekologické a pěstební základy pro podsadby buku (*Fagus sylvatica* L.) v mateřském porostu smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst.). Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 64 s. ISBN 80-7157-901-7.

Pokorný, R., Šalanská, P., Janouš, D., 2001. Growth and transpiration of Norway spruce trees under atmosphere with elevated CO₂ concentration. *Ekológia-Bratislava* 20, 14-28.

Primack, R. B., Kindlmann, P., Jersáková, J., 2011. Úvod do biologie ochrany přírody. Vyd. 1. Praha: Portál, 466 s. ISBN 978-80-7367-595-0.

Prior, S.A., H.H. Rogers, G.B. Runion, and G.R. Hendrey, 1994. Free-air CO₂ enrichment of cotton: Vertical land root distribution patterns. *Plant Soil* 165:33-44.

Rizzo, D.M., and Gross, R., 2000. Distribution of *Armillaria mellea* on pear root systems and comparison of excavation techniques. In: A. Stokes (ed.) *The Supporting Roots of*

Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology. Developments in Plant and Soil Sciences, Vol.87, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.305-311.

Slavíková, J., 1986. Ekologie rostlin: celostátní vysokoškolská učebnice pro stud. Přírodověd. Fak. Skupiny stud. Oborů 15 - biologické vědy. 1.vyd. Praha: státní pedagogické nakladatelství, 366 s.

Smith, A.R., Lukac, M., Hood, R., Healey, J.R., Miglietta, F., Godbold, D.L., 2013. Elevated CO₂ enrichment induces a differential biomass response in a mixed species temperate forest plantation. *New Phytologist* 198: 156-168.

Stojanov, R., 2014. Životní prostředí, změna klimatu a obyvatelstvo: migrace jako adaptace?. 1. vyd. Brno: Centrum výzkumu globální změny, Akademie věd České republiky, 76 s. ISBN 978-80-87902-02-8.

Spinler, D., Egli, P., Korner, C., 2002. Four-year growth dynamics of beech-spruce model ecosystems under CO₂ enrichment on two different forest soils. *Trees* 16:423-436.

Spinler, D., Egli, P., Korner, C., 2003. Provenance effects and allometry in beech and spruce under elevated CO₂ and nitrogen on two different forest soils. *Basic Appl. Ecol.* 4, 467-468.

Špunda, V., et al. 2005. Diurnal dynamics of photosynthetic parameters of Norway spruce trees cultivated under ambient and elevated CO₂: the reasons of mid day depression in CO₂ assimilation. *Plant Science* 168, 1371-1381.

Taub, D.R., 2010. Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants. *Nature Education Knowledge* 3(10):21.

Urban, O., Pokorný, R., 2002. Výzkum vztahu globální změny klimatu a lesních porostů v ČR. *Lesnická práce*, ročník 81/2002.

Urban, O., 2003. Physiological impacts of elevated CO₂ concentration rating from molecular to whole plant responses. *Photosynthetica*. 41(1):9-20.

Urban, O., Košvancová, M., Pokorný, R., Tomášková, I., Marek, M.V., 2011. Podstata a ekofyziologické předpoklady ukládání uhlíku. In : Marek et. al, *Cyklus uhlíku v terestrických ekosystémech ČR*, Academia Praha, 2011.

Úradníček, L., 2004. *Lesnická dendrologie II.: (Angiospermae)*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 70 s. ISBN 80-7157-740-x.

Vinš, B., et al., 1997. Impacts of a Potential Climate Change on Forests of the Czech Republic. Národní klimatický program, 23. ČHMÚ, 142 s.

Von Caemmerer, S., 2000. Biochemical Models of Leaf Photosynthesis. Colling wood, Vic., CSIRO Publishing, 165 pp.

Wullschleger, S.D., Post, W.M., King, A.W., 1995. On the potential for a CO₂ fertilization effect in forests: estimated of the biotic growth factors based on 58 controlled-exposure studies. In: Wood well GM, Mackenzie FT (eds) Biotic feedacks in the global climatic system. Oxford University Press.

Zak, D. R., et al., 2000. Elevated atmospheric CO₂, fine rous and the response of soil microorganisms: A review and hypothesis. New Phytologist 147, 201-222.

Žalud, Z., 2009. Změna klimatu a české zemědělství - dopady a adaptace: Climatechange and Czech agriculture - impacts and adaptations : monografie. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 154 s. ISBN 978-80-7375-369-6.

Internetové zdroje

Bužková, R., and Pokorný, R., 2013. Biomass allocation and transpiration of *picea abies* and *fagus sylvatica* cultivated under ambient and elevated [CO₂] concentration. Acta Hort. (ISHS) 991:157-162. [online]. Citováno 4. dubna 2015. Dostupné na WorldWide Web: <http://www.actahort.org/books/991/991_19.htm>.

Cook, 2015. Explaining climate change science & rebutting global warming misinformation [online]. Citováno 22. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <<http://www.skepticalscience.com>>.

CzechGlobe, 2015. Globální změna klimatu [online]. Citováno dne 19. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <<http://www.czechglobe.cz/cs/globalni-zmena>>.

ČHMÚ, 2015. Klimatická změna a klimatické fluktuace - normály vybraných klimatologických prvků na území ČR [online]. Citováno 23. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <<http://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/nkp/vav2001.html>>.

Hollan, J., 2011. Globální změna klimatu [online]. Citováno 19. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <<http://amper.ped.muni.cz/gw/pojmy.html>>.

Muselíková, K., 2002. Globální oteplování v ČR [online]. Citováno 22. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <http://klubpp.palmparadise.biz/clanky/oteplovani_cz/oteplovani_cz.html>.

Nasa, 2015. Globaltemperature [online]. Citováno 22. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <<http://www.columbia.edu/~mhs119/Temperature/>> a <<http://climate.nasa.gov/faq/>>.

Oulehle, F., Hruška, J., 2009. Lesy v globálním koloběhu uhlíku [online]. Citováno 22. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <<http://casopis.vesmir.cz/clanek/lesy-v-globalnim-kolobehu-uhliku>>.

Scripps Institution of Oceanography, 2015. [online]. Citováno 23. března 2015. Dostupné na WorldWide Web: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-bluemoon/graphs/mlo_full_record.png>.

Seznam obrázků

Obr. 1 Rostoucí lidská populace (Grace, 2015).....	14
Obr. 2 Teplotní anomálie vůči normálovému období 1951-1980 pro únor 2014 – březen 2015 (vlevo nahoře); pro prosinec 2014 - únor 2015 (uprostřed nahoře) a pro únor 2015 (vpravo nahoře), mapy (NASA, 2015).	16
Obr. 3 Teplota povrchu Země (NASA, 2015).	17
Obr. 4 Rostoucí emise CO ₂ vlivem spalování fosilních paliv (LeQuéré et al. 2014).	25
Obr. 5 Vývoj koncentrace CO ₂ v ovzduší, podle různých modelů do roku 2100. (osa y udává hodnotu koncentrace CO ₂ v ppm, osa x pak počet let; různé barvy pak udávají různé předpovědi vývoje koncentrace CO ₂ , Cook, 2015).....	27
Obr. 6 Historický vývoj vzdušné koncentrace CO ₂ s doplněním měřených dat od roku 1950 na stanici NOAA Mauna Loa (NASA, 2015).....	27
Obr. 7 Podrobnější hodnoty vývoje vzdušné koncentrace CO ₂ na stanici Mauna Loa s aktuální hodnotou 17. dubna 2015 překračující hranici 400 ppm (Scripps Institution of Oceanography, 2015).....	28
Obr. 8 Výsledky pěstování dřevin ve zvýšené koncentraci CO ₂	32
Obr. 9 Buk lesní – <i>Fagus Sylvatica</i> L.	35
Obr. 10 Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž – Moravskoslezské Beskydy	36
Obr. 11 Vlevo komory s otevřeným vrchem, ve kterých byli kultivováni jedinci smrku (celkem 4ks v přirozené a 4 ks v dvojnásobné vzdušné koncentraci CO ₂) v letech 1992-1995 (v rámci projektu ECOCRAFT); vpravo lamelové kultivační sféry pro kultivaci stromů v porostním měřítku.....	37
Obr. 12 Lamelové sféry	40
Obr. 13 Zásobník tekuté formy CO ₂	40
Obr. 14 Přívod CO ₂ do lamelových sfér	41
Obr. 15 Současné schematické rozmístění stromků.	42
Obr. 16 Metoda vyhloubení kořenového systému pomocí nadzvukového proudu vzduchu.....	44
Obr. 17 Celková biomasa stromu dle jednotlivých sub-variant.....	47
Obr. 18 Nadzemní biomasa průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	48
Obr. 19 Listová biomasa průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	49
Obr. 20 Biomasa větví průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.	50
Obr. 21 Biomasa kmene průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	51
Obr. 22 Podzemní biomasa kořenů (včetně pařezu) průměrného stromu dle jednotlivých typů smíšení.	52
Obr. 23 Biomasa jemných kořenů s tloušťkou menší než 1 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	53
Obr. 24 Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 1, 01–2 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	54
Obr. 25 Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 2, 01–5 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	55
Obr. 26 Biomasa kořenů s tloušťkou v rozmezí 5, 01–20 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	56
Obr. 27 Biomasa kořenů s tloušťkou větší než 20,01 mm průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	57
Obr. 28 Biomasa pařezů průměrného stromu v jednotlivých sub-variantách.....	58

Seznam tabulek

Tab. 1 Změny teploty vzduchu a podíl úhrnů srážek, relativní vlhkosti vzduchu, průměrné rychlosti vzduchu a úhrnu globálního záření mezi daným budoucím časovým horizontem a referenčním obdobím 1961–1990 na území ČR (ČHMÚ, 2011).	18
--	----

