

Pěstování lesů pod vlivem měnícího se klimatu



Radek Pokorný



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a Státním rozpočtem ČR InoBio –
CZ.1.07/2.2.00/28.0018

PĚSTOVÁNÍ LESŮ POD VLIVEM MĚNÍCÍHO SE KLIMATU



*/Vliv zvýšené vzdušné koncentrace CO₂
- příspěvek k poznání růstové strategie smrku
jako podklad pro jeho pěstební perspektivy/*

Vypracoval: Doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D.

Adresa pracoviště: Ústav zakládání a pěstění lesů, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno

© 2013

Obsah:

1. Globální změna klimatu a její možné důsledky	3
<i>/Úvod do problematiky/</i>	
2. Klima a vývoj koncentrace CO₂ v ovzduší	8
3. Fyziologické základy působení CO₂ na lesní ekosystémy	11
4. Metody studia terestrických ekosystémů	14
5. Obecné výsledky experimentů pěstování různých druhů dřevin ve zvýšené vzdušné koncentraci CO₂	19
6. Úloha lesů v globálním cyklu uhlíku	23
<i>/Pěstební doporučení/</i>	

1. Globální změna klimatu a její možné důsledky

/Úvod do problematiky/

Život na Zemi je založen na schopnosti zelených rostlin uchovávat sluneční energii v makroenergetických vazbách produktů asimilace. Uložená energie je následně využívána pro zabezpečení existence života těchto zelených rostlin – primárních producentů a pro zabezpečení existence celého následného řetězce konzumentů. Také člověk je článkem tohoto energetického (potravního) řetězce. V rámci něho jsou životní funkce člověka zabezpečeny energií cca 85 W, fyzicky pracující člověk „spaluje“ již 250 W. Ve skutečnosti však průměrný obyvatel planety, aby zabezpečil nejen svoji živočišnou energetickou potřebu, ale i svůj komfort, spotřebovává 2 kW. Ve vyspělých zemích spotřeba přepočtená na jednoho člověka činí asi 10 kW. Narůstající lidská populace proto pro zabezpečení svých energetických potřeb stále intenzivněji využívá fosilní paliva, tedy původně sluneční energii uloženou ve formě chemických vazeb ve fosilních zbytcích organizmů.

Nosičem této energie je redukovaný uhlík původně obsažený v atmosféře ve formě molekuly oxidu uhličitého. Procesem asimilace byl vegetací (primárními producenty) tento vzdušný uhlík odnímán z atmosféry a využíván rostlinami jako základní prvek stavebních i zásobních pletiv. Spalování fosilních paliv, tj. spotřebovávání energie fixované a dlouhodobě uložené rostlinami, znamená zpětný proces uhlíkového cyklu, tedy oxidaci uhlíku a jeho uvolňování ve formě oxidu uhličitého do ovzduší.

Život na Zemi je umožněn příznivými klimatickými podmínkami. A také v tomto případě hraje významnou roli právě uhlík. Oxid uhličitý se totiž společně s vodními parami nejvíce podílí na vytváření skleníkového efektu atmosférického obalu Země. Je to dáno radiačními vlastnostmi těchto plynů, a to propouštět krátkovlnnou sluneční radiaci na zemský povrch, ale pohlcovat dlouhovlnnou tepelnou radiaci vyzařovanou z ohřátého zemského povrchu a vyzařovat ji dále všemi směry, tedy také zpět k zemskému povrchu. Plyny těchto vlastností se nazývají „radiačně aktivní“ nebo také „skleníkové plyny“. Skleníkový efekt atmosféry v současné době zvyšuje teplotu na Zemi na průměrnou teplotu cca 15 °C (Dubrovský a kol. 2011).

Z environmentálního hlediska můžeme současnou epochu lidstva označit jako epochu hrozby globálního oteplení, tedy hrozby klimatické změny vyvolané zesílením skleníkového efektu atmosféry vlivem antropogenního navyšování koncentrace oxidu uhličitého. Uvolňování CO₂ do ovzduší zejména spalováním fosilních paliv, ale také velkoplošná likvidace lesních ekosystémů vede k nárůstu vzdušné koncentrace tohoto plynu a zesilování skleníkového efektu zemské atmosféry. Na zesilování skleníkového efektu se, s vyloučením

vodní páry, CO₂ podílí asi 70 % (25 % při započtení vlivu vodní páry), menší měrou se dále podílí antropogenní produkce metanu a dalších skleníkových plynů.

Koncentrace CO₂ se během vývoje planety a života na Zemi významně měnila. Nakonec se koncentrace v ovzduší ustálila a před začátkem industrializace, který datujeme kolem roku 1750, se po několik tisíc let udržovala na úrovni ca 280 ppm (*parts per milion, tzn. počet objemových částí sledované plynné látky v milionu objemových částí vzduchu*). Průmyslová revoluce s sebou přinesla rozvoj využívání fosilních paliv. Následkem toho se do roku 1900 koncentrace CO₂ zvýšila o cca 15 ppm, v roce 1988 již dosáhla hodnoty 350 ppm, v současnosti je nad hodnotou 385 ppm s přibližným ročním nárůstem 1,5 - 2 ppm (viz kap. 2.).

Na produkci emisí skleníkových plynů se nejvíce podílejí vyspělé země. Podíl rozvojových zemí na emisích však významně narůstá, i když množství emisí v přepočtu na jednoho obyvatele je v těchto zemích stále relativně nízké. Obrovský a stále narůstající lidský potenciál rozvojových zemí společně s potřebou uspokojit sociální a rozvojové potřeby jejich obyvatel nedávají naději blízkého zvratu v nebezpečném nárůstu koncentrace CO₂ v ovzduší.

Globální hrozbou se očekávaná změna klimatu stává ve svých celosvětových sociálně ekonomických důsledcích. Neočekává se globální ekologická katastrofa. Budou oblasti, kde se v důsledku globálního oteplení podmínky pro život dokonce zlepší, budou však oblasti, kde se podmínky výrazně zhorší, a bohužel budou i oblasti, kde bude život vyloučen. Nejvíce postiženy budou především chudé oblasti. Tam, kde již nyní je velice obtížné zabezpečit obyvatelstvo potravinami, to bude ještě obtížnější. Znamená to, že rozdíly mezi chudými a bohatými zeměmi ještě více narostou.

Mezi závažnými globálními dopady očekávané klimatické změny můžeme uvést, že:

- Úroveň mořské hladiny se především vlivem tepelné rozpínivosti vody a částečně i vlivem tání ledovců zvýší a současně dojde k poklesu pevniny vlivem vyčerpání podzemních vod a úbytku pobřežních sedimentů. Toto je fatální hrozba pro řadu ostrovních států a přímořských oblastí.
- V dalších oblastech dojde ke ztrátám půdy v důsledku odlesňování nebo intenzivního zemědělství a ke znehodnocení orné půdy vlivem sucha i záplav. Povede to k ještě větší nerovnoměrnosti v dostupnosti potravin.
- Suchem i záplavami budou ovlivněny zásoby a dostupnost vody pro obyvatele.
- Klimatickou změnou budou přírodní ekosystémy ovlivněny zvláště ve středních a vyšších zeměpisných šířkách, neočekává se však, že změna bude směřovat k rozpadu ekosystémů.
- Oteplení umožní šíření nemocí i škůdců do vyšších zeměpisných šířek.

- Na lidské zdraví budou působit teplotní stresy.
- Finanční náročnost přizpůsobení se změně klimatu se obecně odhaduje na cca 1% HDP.
- Všechny uvedené dopady povedou k tomu, že k politickým a ekonomickým uprchlíkům přibude kategorie „environmentálních uprchlíků“, jejichž počet se odhaduje na 3 mil. ročně.

První vědecké důkazy o hrozbě globální klimatické změny byly podávány v 80. letech XX. století. Problematice globální změny klimatu (GZK) se v širším měřítku dostalo první pozornosti v roce 1979 během První světové klimatické konference pořádané Světovou meteorologickou organizací (WMO) v Ženevě. V roce 1988 byl dvěma institucemi OSN, a to WMO a Programem Spojených národů pro životní prostředí (UNEP), založen Mezivládní panel pro změnu klimatu (IPCC - Intergovernmental Panel for Climate Change). Pracovní skupiny zabývající se vědami o klimatických změnách, dopady klimatické změny a politickými odezvami na varování vědců měly klíčovou úlohu při přípravě Rámcové úmluvy o změně klimatu, zejména ve zhodnocení vážnosti ohrožení světového klimatu v důsledku antropogenní činnosti a možných důsledků jeho změn. Rámcová úmluva o změně klimatu byla přijata v roce 1992 na konferenci v Rio de Janeiro a vstoupila v platnost v roce 1994. Podle Úmluvy bylo nutno připravit protokol, který by obsahoval konkrétní závazky jednotlivých států o snižování emisí. Tímto klíčovým dokumentem v oblasti snižování produkce skleníkových plynů se tak stal tzv. Kyótský protokol (KP), který je součástí Rámcové úmluvy OSN o změnách klimatu. KP byl přijat v roce 1997, vstoupil v platnost v roce 2005. Ke konci roku 2009 přistoupilo ke Kyótskému protokolu 187 signatářů, kteří celkem produkují asi 60% světového objemu emisí. V dubnu 2010 to bylo již 191 signatářů včetně Ruska. Ačkoliv v současné době dochází na globální úrovni k poklesu emisí skleníkových plynů, je tento pokles pro dosažení závazků z Kyóta nedostatečný. Bez spolupráce s USA, které ke smlouvě nepřistoupily, a spolupráce s rozvojovými zeměmi nebude možné globální klimatické problémy řešit. Závazkem plynoucím z podpisu KP je celkové snížení globálních emisí skleníkových plynů v rozmezí let 2008–2012 v průměru o 5,2 % v porovnání s emisemi daného státu produkovány v roce 1990. V případě ČR se jedná o snížení celkových emisí skleníkových plynů o 8 %. Na končící KP měla reagovat konference v Kodani v prosinci 2009 a stanovit závazné snížení emisí skleníkových plynů pro jednotlivé státy v dalším období. Konference stran Úmluvy totiž konstatovaly nedostatek vědeckých podkladů pro přijetí konkrétních opatření a také potřebu zmenšit závazky států dané Kyótským protokolem. Výsledkem však byla pouze dohoda o dlouhodobých cílech snížení emisí skleníkových plynů tak, aby nestoupla teplota na Zemi o více než 2 °C oproti stavu před průmyslovou revolucí. Jednání, která by nastavila další limity pro emise

skleníkových plynů po skončení platnosti Kyótského protokolu, by měla proběhnout v Bonnu v Jihoafrické republice a výroční konference v Riu v roce 2012 – tedy 20 let po uplynutí tzv. Summitu Země.

Hlavní úsilí světového společenství věnované zabránění změně klimatu je zaměřeno na omezení emisí oxidu uhličitého ze spalování fosilních paliv. Jsou hledány možnosti používání jiných zdrojů energie a zvyšování účinnosti energetických procesů v dopravě, ve výrobě a zabezpečování osvětlení a tepla. Dále je snaha o omezení emisí dalších skleníkových plynů, zejména metanu. Hledají se politické nástroje ke snížení rozsahu odlesňování. Naproti úsilí o snižování emisí jde snaha o zvýšení kapacity propadů vzdušného uhlíku změnou hospodaření v lesích a zalesňováním.

Klimatická změna se tedy významně dotýká lesního hospodářství ve dvou oblastech. Budou ovlivněny růstové podmínky porostů a s lesními porosty se počítá jako s významnými úložišti vzdušného uhlíku. To, jaký bude výsledný dopad klimatické změny na lesní hospodářství, je tedy v rukou lesního hospodáře.

Předpovědi klimatické změny vycházejí z globálních cirkulačních modelů a scénářů vývoje koncentrace skleníkových plynů v atmosféře (Dubrovský a kol. 2011). Vhodnost použitého globálního modelu se testuje pro daný region, v našem případě byly globální cirkulační modely testovány pro šedesát stanic meteorologické sítě České republiky. Testovalo se, jak dobře dané modely vystihují klima normálového období, tedy období 1961–1990. Multikriteriálním hodnocením byly pro naše území vybrány dva cirkulační modely, a to HadCM2 a ECHAM4/OPYC3. Pro vybrané globální cirkulační modely je dále nutno zvolit scénář vývoje koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Vybrán byl emisní scénář SRES-A2, který je považován za spíše pesimistický avšak velmi reálný. Vychází z představy heterogenního světa, tzn. že nedojde k podstatnému snížení rozdílu mezi bohatými a chudými zeměmi. Základní ideou scénáře je spoléhat se sám na sebe a zachovat místní identitu, dodržovat místní tradice. Spojitě bude docházet k růstu počtu obyvatel planety Země až na 15 miliard v roce 2100, ekonomický vývoj bude orientován výrazně regionálně, technologické změny budou pomalejší ve srovnání s optimističtějšími scénáři vývoje. Optimističtější variantou je např. scénář SRES-B1. Ten vychází z představy konvergentního, stmelujícího se světa. Předpokládá se rychlý rozvoj informatiky, služeb a zavádění „čistých“ účinných technologií. Důraz se bude klást na globální řešení ekonomických a sociálních problémů a na ochranu životního prostředí.

Následujícím postupem stanovení projevu klimatické změny je možné metodami „downscaling“ (shora - dolů) přejít z globální předpovědi v měřítku stovek kilometrů na regionální úroveň. Výsledkem metody downscaling jsou scénáře klimatické změny pro síť meteorologických stanic České republiky. V této úrovni hovoříme o regionálních scénářích.

Lokální scénář potom získáme pomocí orografické interpolace z regionálních scénářů. To znamená, že při interpolaci mezi body meteorologické sítě respektujeme nejen vzdálenost lokality od těchto bodů, ale také nadmořskou výšku stanoviště.

Scénář pro Českou republiku, který můžeme označit jako velmi reálný vycházející z uvedeného modelu HadCM2 a imisního scénáře SRES-A2 předpokládá, že v roce 2050 se vzhledem k normálovému období 1961 – 1990 oteplí o 2 - 3 °C, současně se roční úhrn srážek sníží o 6 mm. Délka vegetačního období by se měla v důsledku oteplení prodloužit téměř o celý měsíc (cca 29 dnů; Dubrovský a kol. 2011)

Změna klimatu významně ovlivní lesní ekosystémy prostřednictvím změněných klimatických podmínek stanoviště. Podle lokálních podmínek a konkrétního stávajícího porostu může změna klimatických podmínek na daný porost působit v rozsahu negativního působení až pozitivního působení. Růst dřevin však bude také ovlivněn zvýšenou koncentrací CO₂ v ovzduší (podrobněji Urban a kol. 2011). Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na růst je možné považovat za jednoznačně pozitivní. Lze očekávat, že zvýšená koncentrace CO₂ bude zmírňovat nepříznivé dopady klimatické změny na porosty lesních dřevin. **Výsledkem by tedy měla být změna potenciálu stanoviště pro pěstování porostů lesních dřevin a naproti tomu také změna tolerance a nároků lesních dřevin ke stanovištním podmínkám.**

Uvedená změna klimatu bude znamenat posun stanovištních podmínek přibližně o dva lesní vegetační stupně směrem k nižším vegetačním stupňům. Lze předpokládat, že zvýšená koncentrace CO₂ částečně sníží negativní dopad tohoto posunu, nejvýrazněji v nižších vegetačních stupních, a to zejména zvýšením tolerance dřevin ke stresovým podmínkám. Přesto se významně zhorší podmínky pro pěstování smrkových porostů v současných středních polohách České republiky, nižší polohy budou z pěstování smrku zcela vyloučeny. Důsledkem změny klimatických podmínek bude také zvýšený tlak biotických činitelů.

Ze současných aktivit světového společenství v souvislosti s plněním závazků jednotlivých států vyplývajících z Kyoto protokolu **lze předpokládat, že lesní hospodářství může být významně ovlivněno společenskou poptávkou po jiných funkcích lesa, než je produkce dřevní hmoty. Obchodování s emisemi uhlíku a vznik „uhlíkové banky“ mohou zásadním způsobem motivovat vlastníky půd k zalesňování a lesního hospodáře ke změnám způsobů hospodaření.**

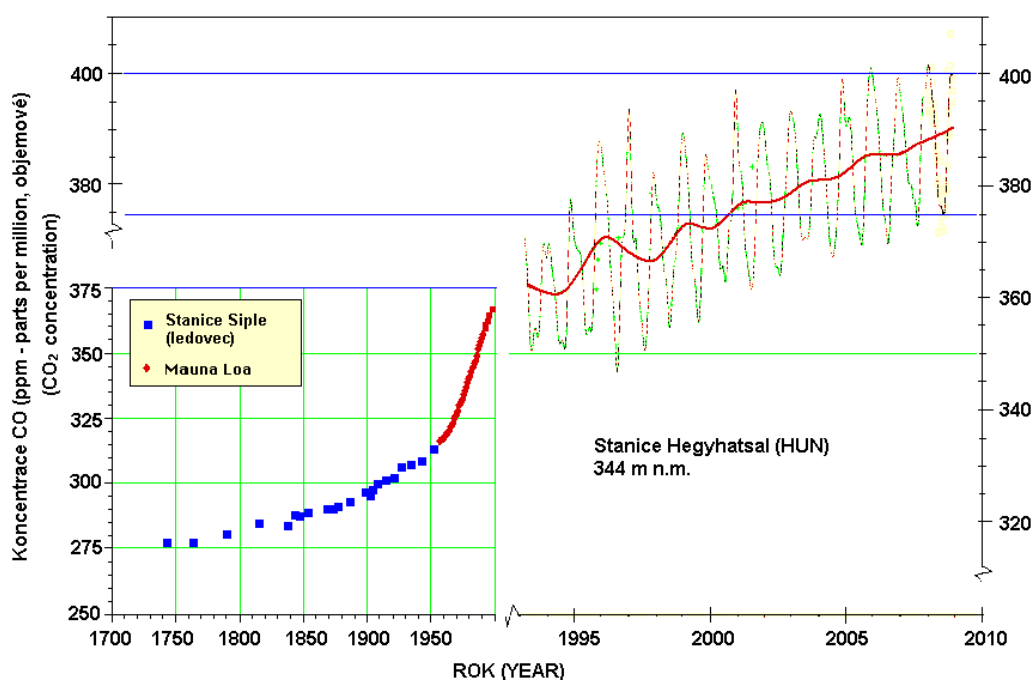
2. Klima a vývoj koncentrace CO₂ v ovzduší

V kontextu následujícího výkladu především o změnách teploty je třeba nejprve uvést, že průměrná teplota na Zemi je přibližně 15°C, ale bez atmosféry, která obsahuje skleníkové plyny, by tato teplota klesla o celých 34°C, tedy na -19°C. Tento tzv. „přirozený skleníkový efekt“ umožňuje vznik podmínkám vhodným pro život a přijatelné podnebí. Největší podíl na tomto efektu má vodní pára (60-70%) a oxid uhličitý (25%). Změny podnebí jsou přirozenou a nedílnou součástí geologické minulosti Země. Pomalé změny (řádově tisíce až desítky tisíc let) v excentricitě oběžné dráhy Země a následné změny intenzity slunečního záření, byly prvotním faktorem ovlivňujícím jak nástup, tak i konec dob ledových a meziledových s periodicitou přibližně 100 000 let (Milankovich, 1920). Objevovali se i kratší cykly s periodicitou 40 a 20 tisíc let, a změny v řádech století, které souviseli se změnami v aktivitě Slunce. V minulosti byl nárůst a pokles globálních teplot vždy doprovázený nárůstem a poklesem skleníkových plynů, zejména oxidem uhličitým (CO₂) a metanem (CH₄) (Luthi a kol. 2008). Změny koncentrace skleníkových plynů byly za změnami teplot vzduchu zpožděny v rozmezí 600 až 1000 let (Caillon a kol. 2003) a působily sekundárně jako zesilovač změn teplot. S nástupem průmyslové revoluce asi před 150 lety došlo k nárůstu emisí skleníkových plynů a tím k dalšímu navyšování skleníkového efektu a globální teploty (IPCC 2007b). Především se jedná o nárůst emisí CO₂, ale i řady dalších radiačně aktivních plynů, zejména metanu a oxidu dusného (N₂O) (Shine a Sturges 2007). Z analýz grónských ledovců vyplývá, že koncentrace CO₂ v ovzduší se za posledních nejméně 800 000 let pohybovala v rozmezí asi 160 – 280 p.p.m. (tj. 0.016-0.028 objemových %) (Luthi a kol. 2008). Dnešní vzdušná koncentrace CO₂ vycházející z přímých měření je 385 p.p.m. s meziročním nárůstem 2 p.p.m. (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) (Obr. 1). Podle různých scénářů může koncentrace CO₂ dosáhnout úrovně až 890 ppm (IPCC 2007a). Tomu odpovídá podle současných klimatických modelů příslušný nárůst globální teploty o 4 °C, s rozsahem mezi 2.4 až 5.8 °C (IPCC 2007b).

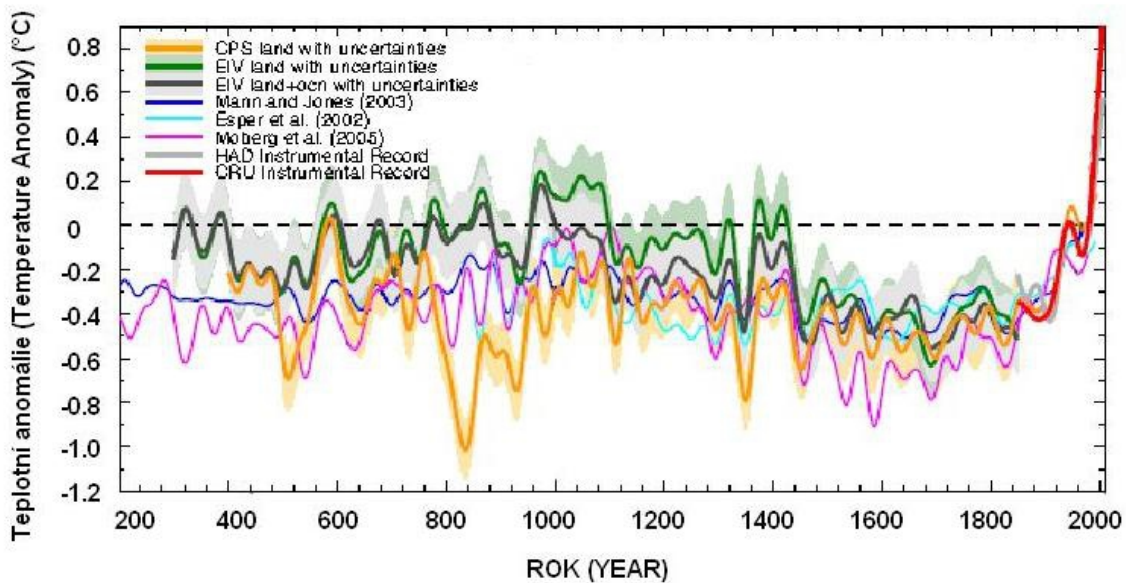
V souvislosti s nárůstem koncentrace hlavních skleníkových plynů (CO₂, CH₄, N₂O) není problém s jejich absolutními koncentracemi v ovzduší (víme, že před desítkami milionů let byla koncentrace CO₂ i 5 000 p.p.m. a vyšší), problém nastává s rychlostí změny v radiačním působení a následně s rychlostí změny globální teploty (Obr. 2) a omezených možnostech adaptace ekosystémů na tyto změny. Nárůst radiačního působení skleníkových plynů za poslední desetiletí je několikanásobně rychlejší, než kdykoli před tím nejméně za posledních 20 000 let (Joos a Spahni 2008). I analýzy teplot na severní polokouli ukazují, že současná rychlost změny průměrné teploty je rychlá a významná a v současnosti se pravděpodobně nacházíme v nejteplejším období za posledních 1300 let (Mann a kol. 2008).

Dochází však nejen k nárůstu teploty, ale i ke změnám v časovém rozložení, lokálním výskytu a množství srážek (Solomon a kol. 2009), rychlosti větru a ostatních složek atmosféry Země včetně stratosférické ozonové vrstvy, které jsou více či méně spojeny s antropogenní činností a chápeme je tak spolu souhrnně jako tzv. globální změnu klimatu (GZK). Navíc dochází ke změnám chemizmu srážek i půd, zvyšuje se depozice dusíku, roste eutrofizace vod, a tak o tomto geologickém období, jehož dominantním faktorem se stává člověk a jeho aktivity, hovoříme jako o „antropocéně“ (Crutzen a Steffen 2003).

Současný záznam teploty ovzduší i jiných charakteristik (Tolasz a kol. 2007) je na celém území ČR prováděn v síti stanic Českým hydrometeorologickým ústavem (www.chmi.cz). Obdobným způsobem monitorovacích stanic je měřena také čistota ovzduší (oxid siřičitý, oxidy dusíku, polévatý prach, popř. přízemní koncentrace ozónu).



Obr. 1. Průběh nárůstu koncentrace oxidu uhličitého (CO₂) v atmosféře z analýz ledovce a přímých měření na nejdéle měřící stanici Mauna Loa (od r. 1958, Hawaii, USA, 3397 m n.m.) a na stanici Hegyhatsal v Maďarsku, která byla vybrána jak geograficky tak výškově nejbližší jižní Moravě. Upraveno z dat NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/iadv/>)



Obr. 2. Dlouhodobý průběh výskytu teplotních anomálií severní polokoule Země. Jednotlivé křivky reprezentují jednotlivé zdroje dat. Upraveno podle Mann a kol. (2008)

Vzdušná koncentrace CO_2 u nás přesným měřením monitorována dosud není. Orientační měření jsou prováděna pouze v souvislosti s výzkumem vlivu zvýšené vzdušné koncentrace CO_2 na lesní ekosystémy na lokalitě Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydách. Laboratoř ekologické fyziologie rostlin ÚSBE AV ČR, v.v.i. resp. nyní Centrem výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. – CzechGlobe (www.czechglobe.cz). Tato měření budou významně zpřesněna již v roce 2013, kdy bude v rámci národní infrastruktury CzeCOS s návazností na mezinárodního projekt ICOS (Integrovaný systém monitorování uhlíku; <http://icos-infrastructure.ipsl.jussieu.fr/>) vybudován monitorovací bod (vysoký meteo-stožár) pro měření koncentrací skleníkových plynů v atmosféře umožňující modelování jejich dálkového přenosu na území ČR, a to nejméně po dobu dalších 20 let. Ve světě je koncentrace CO_2 v ovzduší monitorována právě v postupně se rozšiřující síti pozemních stanic (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/iadv/). Nejdéle (od r. 1958) je koncentrace CO_2 v ovzduší monitorována na stanici Mauna Loa na Havajských Ostrovech. Nejbližší monitorovací stanice pro ČR jsou nyní v Německu (Hohenpeissenberg, Ochsenkopf) a Maďarsku (Hegyhatsal).

Jak se bude vyvíjet teplota v budoucích letech nám mohou pomoci předpovědět globální klimatické modely (GCM). Pro Českou republiku prováděl validaci GCM modelů Dubrovský a kol. (2005). Na základě validace 7 modelů GCM: CCSR/NIEW, CGCM1, CSIRO-MK2, ECHAM4/OPYC, GFDL-R15-a, HadCM2, NCAR DOE-PCM databáze IPCC (IPCC-SAR; http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html) při emisním scénáři IS92a tak bylo zjištěno, že pro ČR a zvláště oblast jižní Moravy je modely nejlépe simulována právě

teplota. Ostatní prvky (globální sluneční radiace, denní úhrn srážek) jsou simulovány s nižší přesností. S ohledem na nejistoty při konstrukci standardizovaného scénáře byla vytvořena sada scénářů změny klimatu, která je určena standardizovanými scénáři čtyř GCM modelů (ECHAM HadCM, CSIRO a NCAR) a dvěma hodnotami změny globální průměrné teploty. Tyto dvě hodnoty odpovídají nižšímu a vyššímu odhadu a jsou nasimulovány modelem MAGICC za předpokladu emisního scénáře SRES-B1 a nízké klimatické citlivosti (nižší odhad), respektive za předpokladu emisního scénáře SRES-A2 a vysoké klimatické citlivosti. Takto lze odhadnout nejpravděpodobnější hodnotu či interval nárůstu teploty (Dubrovský a kol. 2011).

3. Fyziologické základy působení CO₂ na lesní ekosystémy

Růst a zachování biomasy lesních porostů jsou nerozlučně spjaty s procesy trvalé transformace sluneční energie prostřednictvím sledu fyziologických reakcí spojených s fotosyntézou (Marek a kol. 2002, Urban a kol. 2003, Urban a kol. 2011). Fotosyntéza je biofyzikální proces, při kterém se z látek jednoduchých a energeticky chudých tvoří látky složité a energeticky bohaté. Proces přeměny je spojen s fotosyntézou a jako energetický zdroj těchto procesů je využita energie elektromagnetického záření Slunce.

Tvorba biomasy, tedy veškeré organické hmoty lesních dřevin, je spojena nejen s tvorbou organických látek ve fotosyntéze, ale je závislá i na respiraci (Janouš a kol. 2000, Acosta a kol. 2010), procesu příjmu a výdeje vody, transpiraci, a na asimilaci minerálních živin (Kupper a kol. 2006, Dieleman a kol. 2010). Je nutno podotknout, že energie nutná pro utilizaci minerálních živin, to je procesu jejich začleňování se do organických látek a metabolismu dřeviny, opět závisí na již akumulované energii sluneční radiace.

Zjednodušeně je možné tvorbu a zachování biomasy lesních dřevin považovat za výsledek *synergického (společného) příjmu a transformace*: a) energie slunečního záření, b) atmosférického CO₂ a c) vody a minerálních živin.

Je zřejmé, že procesy růstu a existence lesních porostů, tedy populací autotrofních organismů, jsou silně závislé na dostupnosti oxidu uhličitého, který slouží jako základní substrát biochemické reakce fotosyntézy, zvané *karboxylace*. Výsledkem této reakce je vazba molekuly anorganického uhlíku na skelet organického akceptoru. Tak se „*anorganický*“ uhlík začleňuje do „*organického*“ světa. Jiný způsob takové inkorporace v naší biosféře v podstatě neexistuje. Naše informace o karboxylační reakci jasně ukazují na tu skutečnost, že z hlediska průběhu této reakce je současná koncentrace CO₂ v ovzduší vlastně nízká! Předpokládané navyšování množství CO₂ by se mělo nutně projevit ve zvýšení rychlosti

karboxylace, fotosyntézy, a následné produkci asimilátů. Znamená to, že je-li globální změna klimatu spojována s nárůstem atmosférického obsahu CO₂, pak se objektivně musí projevit i na úrovni produkce biomasy.

Obsah koncentrace CO₂ v atmosféře Země není konstantní, mění se v průběhu staletí, ale i v průběhu jedné vegetační sezóny (viz. kap 2.).

Jaké tedy mohou být účinky zvýšené koncentrace CO₂? V zásadě lze tyto účinky rozdělit na: i) *Přímé*, které vyplývají z funkce molekul CO₂, jako *substrátu* pro karboxylační reakce, ii) *Odvozené*, které vyplývají z toho, že jisté molekuly CO₂ musí být přítomny, aby došlo k aktivaci enzymu fixace CO₂, tedy úloha *CO₂ aktivátora*, iii) *Sekundární*, molekuly CO₂ ovlivňují otevřenost či uzavřenost průduchových štěrbin (podrobněji Urban a kol. 2011). Zvyšující se množství CO₂ způsobuje uzavírání průduchů, a tím se omezuje výdej vodní páry rostlinou a příjem CO₂, tzv. *CO₂ sensor*.

Reakce rostlin na dlouhodobé působení zvýšené koncentrace CO₂ je možné sledovat na úrovních vícero fyziologických procesů, které souvisejí s produkcí biomasy a s uchováváním biomasy stávající. Tedy je možné tyto účinky sledovat na úrovni: fotosyntetické asimilace, respiračních procesů, transpirace, tvorby a distribuce biomasy (Marek a kol. 2011).

Na úrovni fotosyntetické asimilace CO₂ je možné pozorovat experimentální důkazy o tom, že zvýšený atmosférický obsah CO₂ se skutečně projevuje ve stimulaci rychlosti fotosyntézy měřené jako rychlost příjmu CO₂. Tato stimulace je přímým důkazem zvýšené rychlosti karboxylace uvnitř asimilačního aparátu.

Dlouhodobě působící zvýšená koncentrace CO₂ může za jistých podmínek mít i zcela opačný efekt, tj. může dojít k poklesu rychlosti asimilace. Tuto situaci označujeme jako aklimační depresi fotosyntézy. Tato deprese má především příčinu v poklesu síly sinku, tedy síly tzv. vnitřního spotřebiče asimilátů. Stručně řečeno: „ čím je větší tento vnitřní spotřebič, tím je fotosyntetická asimilace více stimulována“. Vnitřní spotřebič je například pozitivně stimulován situacemi, kdy jsou měněny kompetiční vztahy či další stanovištní podmínky ve prospěch stimulace růstu. **To je silná výzva směrem k praktickým lesníkům majícím po ruce prostředek, který může výrazným způsobem ovlivnit sílu růstového sinku, tj. probírku.**

Dlouhodobě působící zvýšená koncentrace CO₂ však neovlivňuje pouze rychlost fotosyntézy, tedy proces tvorby nových asimilátů, tj. základu biomasy. Příkladem je rychlost respirace, tedy procesu zpracování asimilátů pro potřeby růstu a bazálního metabolismu stromu (Marek a kol. 2011). Například respirace kmene je ovlivněna zvýšeným CO₂, přičemž dochází k její mírné depresi, a to v průběhu celé vegetační sezóny.

Obecně je známo, že zvyšující se koncentrace CO₂ způsobuje přivření průduchů, tj. otvorů v listech či jehlicích, které jsou hlavním místem výdeje vody z rostlin. Výhodou průduchové transpirace je to, že je fyziologicky, a to v závislosti na vnějších podmínkách, regulovatelná. Přivření průduchů v důsledku zvýšeného obsahu CO₂ v okolí listu pak *vede ke zvýšené efektivnosti využití vody* v procesech tvorby biomasy.

Dlouhodobě působící zvýšená koncentrace CO₂ vede k vyšší produkci biomasy a ke změně její distribuce. Hlavním pozorovatelným účinkem je zvýšená produkce biomasy kořenů (Pokorný a kol. 2013).

Velice významnou součástí hodnocení efektů zvýšené koncentrace CO₂ na růst lesních porostů je posouzení efektivnosti, s jakou porosty produkují novou biomasu. Tuto efektivnost je možné hodnotit na základě účinnosti přeměny sluneční energie, tedy jaké jednotkové množství biomasy se vytvoří absorpcí jednotkového množství sluneční radiace.

Předběžné výsledky ukazují, že porosty rostoucí ve zvýšené koncentraci vykazují vyšší efektivnost využití sluneční energie při produkci biomasy.

Tyto informace dávají velkou šanci lesnictví k naplnění nové celospolečenské funkce, tedy funkce lesů jako efektivního spotřebiče nebo úložiště atmosférického uhlíku. Ukazuje se, že lesy budou profitovat z navýšené atmosférické koncentrace CO₂ a budou tento uhlík ukládat ve své biomase, opadu a půdě. **Úpravou druhové, věkové a prostorové výstavby porostu, podporou růstového sinku, především probírkovými zásahy, může lesní hospodář tuto depoziční sílu nejen udržet, ale i zvyšovat** (Cienciala a kol. 2011).

Vhodné je dodat, že **depoziční kapacita porostů najde i svou ekonomickou odezvu, tedy tržní cenu.** Vlastník lesa tak může ekonomicky profitovat nejen z ceny dříví na trhu, ale také při obchodování s emisemi z roční renty odvozené od depoziční síly porostu poutat vzdušný CO₂. V zemích EU podle instrukcí odvozených od mezinárodní konference v Kyóto (Kyoto protokol) byla původní cena jedné tuny fixovaného CO₂ odhadnuta na 10 Euro. Tato cena za tunu emitovaného – poutaného CO₂ se velmi pohybuje, nejčastěji mezi 11-22 Eury (www.co2prices.eu). V první polovině r. 2008 to bylo např. 22 Euro/tCO₂, ve stejném období r. 2009 13 Euro/tCO₂ (díky celosvětové recesi), s předpokladem na r. 2013-20 až kolem 30 Euro/tCO₂ (viz. EU Emission Trading Scheme). Z dosavadních šetření plyne, že například porost horské smrkové monokultury druhé věkové třídy (20 - 40 let) v Beskydech je schopen za sezónu pohltit cca 17 t CO₂. Tedy zisk z depozice činí cca 5 až 8 tis. Kč na hektar plochy porostu.

Je třeba zdůraznit, že úloha lesních porostů jako deponia atmosférického uhlíku, a tedy i jistého „ochránce“ proti působení globální změny klimatu je nesporná. Navíc se

ukazuje, že lesník svými tradičními pěstebními postupy může sílu depoziční aktivity výrazně ovlivňovat. Můžeme proto hovořit o nové a velice důležité mimoprodukční (v klasickém pojetí) funkci lesa.

4. Metody studia terestrických ekosystémů

Lesní porosty mají díky své schopnosti dlouhodobě ukládat vzdušný uhlík velký význam při utváření celosvětového (globálního) klimatu. To znamená, že kromě jiného plní i funkci uhlíkového sinku (spotřebiče) a dlouhodobého úložiště v jeho globálním cyklu na Zemi. Pojmem „uhlíkový sink“ je v tomto případě myšlen jakýkoliv proces či mechanismus, který vede k odnímání oxidu uhličitého (CO_2) z atmosféry.

Správné ohodnocení uhlíkové bilance a úložišť uhlíku a zejména přenesení výsledků lokálních měření až na úroveň globálních atmosférických modelů vyžaduje zkoumání v časovém i prostorovém měřítku. Časové měřítko zahrnuje rychlé biofyzikální a chemické změny v řádu sekund, ale i změny v lesních ekosystémech v řádu staletí. Prostorové měřítko zahrnuje škálu od buněčných organel přes jednotlivé stromy a porosty, až po úroveň celkové suchozemské biosféry. Na základě výsledků těchto výzkumů jsou vytvářeny modely chování jednotlivých ekosystémů v daných klimatických podmínkách. Aby bylo možné správně předpovědět změny v chování těchto ekosystémů v budoucnu, je nutné doplnit tyto modely o výsledky tzv. účinkových (impaktových) studií. Tedy experimentů, při kterých je simulována změna vybraného faktoru vnějšího prostředí, v tomto případě nárůstu koncentrace CO_2 .

Pro dlouhodobé pěstování dřevin v atmosféře obohacené o CO_2 se nejčastěji používají speciální uzavřené růstové komory, větvové vaky (BB- Branch Bags) nebo komory s otevřeným vrchem (OTC- Open Top Chambers), které se liší různou mírou tzv. komorového efektu. V posledních letech se rozšířilo používání systémů volné atmosféry obohacené o CO_2 , kdy je plyn aplikován přímo do otevřeného lesního porostu, nejlépe při využívání přírodního zdroje CO_2 (tzv. FACE systémy- Free Air CO_2 Enrichment). Výhodou těchto posledně jmenovaných postupů je plné odstranění komorového efektu. Pro dlouhodobou simulaci účinků atmosféry se zvýšeným obsahem CO_2 na porosty smrku jsou v České republice na Experimentálním ekologickém pracovišti (EEP) Bílý Kříž v Beskydech používány tzv. lamelové kultivační sféry (Urban a kol. 2001; Obr. 3).

Studiem fyziologických procesů v měnícím se životním prostředí se zabývá tzv. ekologická fyziologie. Každý živý organismus či systém je charakteristický tím, že se jedná o otevřený termodynamický systém, tedy systém, který si vyměňuje látky a energii se svým okolím, má schopnost vlastní reprodukce a vývoje a má svou vnitřní paměť. Proto jde vždy

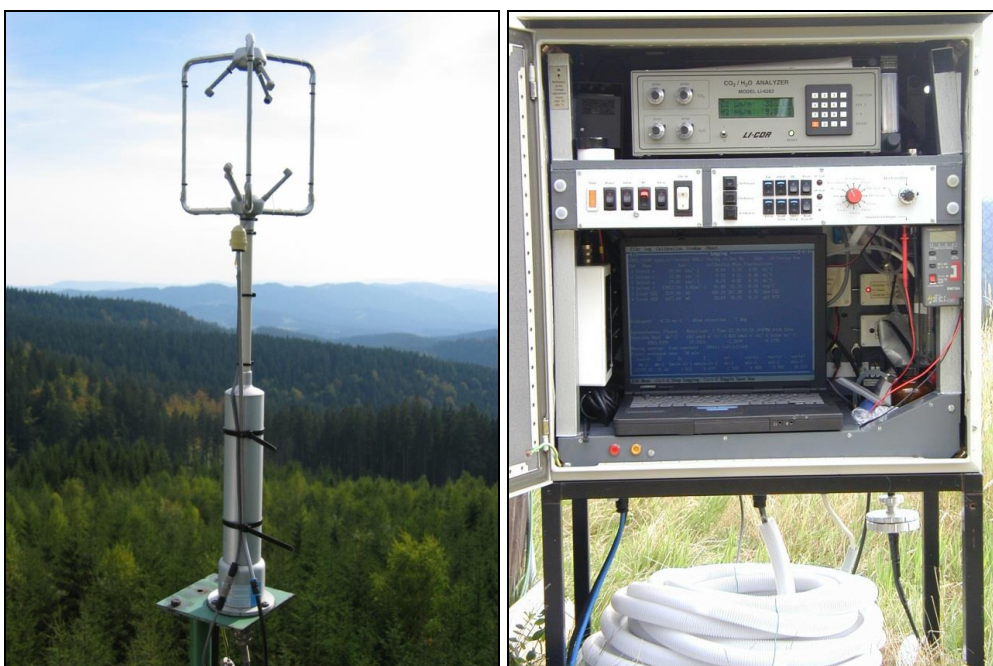
při studiu ekosystémů obecně o pochopení principu toků energií a látek a jejich kvantifikaci. K tomu můžeme zvolit jeden ze tří následujících přístupů.



Obr. 3. Kultivační lamelové sféry pro simulaci účinku zvýšené vzdušné koncentrace CO_2 na vybrané druhy lesních dřevin a trav umístěné na EEP Bílý Kříž v Moravsko-Slezských Beskydech. Rozměry jednoho „skleníku“ jsou 9 m x 9 m x 7 m (podrobný popis viz Urban a kol. 2001).

Za prvé se jedná o *přístup analytický*, tedy přístup zabývající se detailním rozbořením jednotlivých složek systému. Zde řadíme zejména metody biochemické a biofyzikální. Jedná se zejména o metody chromatografické a elektroforézní umožňující separaci látek na základě velikosti, elektrického náboje či polaridy jejich molekul. To umožňuje například sledování množství enzymů, vytvářených asimilátů či změn pigmentů chránících listy před nadměrným ozářením v průběhu dne atd. Dále to jsou metody spektrofotometrické založené na sledování změn absorpance (pohlcení) světelného paprsku, zpravidla přesně definované vlnové délky, sledovanou látkou. Takto se dá stanovit například aktivita nejvýznamnějšího fotosyntetického enzymu Rubisco nebo množství fotosynteticky aktivních pigmentů (chlorofyly, karotenoidy). K analytickým metodám však řadíme rovněž fenologická pozorování a měření na úrovni jednotlivých stromů, tj. sledování rašení pupenů, stanovení prodlužovacího růstu, tloušťkového a výškového přírůstu kmene apod.

Další skupinou analytických metod rozšířených v ekofyziologii jsou metody aerodynamické, založené na měření profilu koncentrací vodní páry, rychlosti větru a teploty v sérii různých výšek v porostu a nad porostem. V poslední době se začíná prosazovat metoda eddy-kovariance, česky vířivé kovariance či přímo „turbulentní difúze“. Tento metodický přístup pohlíží na lesní porost, včetně půdní složky, jako na jeden velký list (tzv. Big Leaf Model) vyměňující si látky a energii s okolní atmosférou. Při této metodě je rychlost proudění vzduchu, rozložená do trojrozměrných pravouhlých souřadnic, měřená pouze v jednom bodě nad porostem pomocí 3D ultrazvukového anemometru. K výpočtům výměny neboli toků vody, CO₂ a tepla mezi lesním porostem a atmosférou stačí měření příslušných koncentrací a teploty také pouze v jedné výšce nad porostem. Tato měření umožňují nejen přímé stanovení množství přijatých látek (voda, CO₂) lesním porostem, ale i celkové energetické bilance porostu a krajiny. Tu udává např. tzv. Bowenův poměr, což je poměr mezi energií odvedenou z povrchu konvekcí k energii odvedené jako výparné teplo.

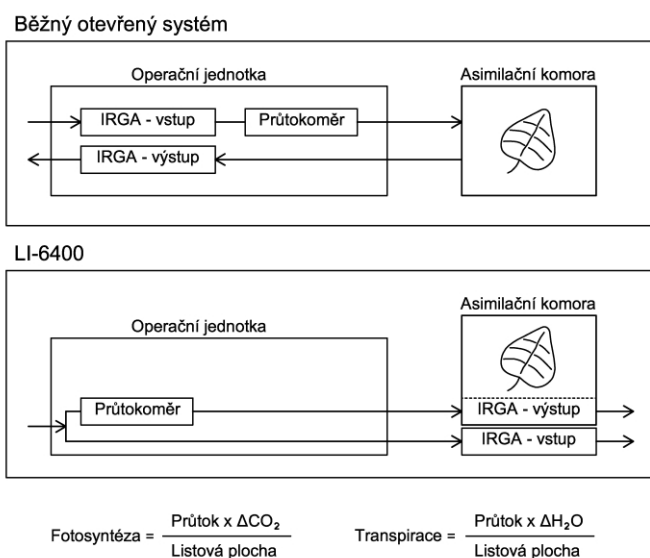


Obr. 4. Eddy-kovarianční systém sestávající z 3-D ultrasonického anemometru (vlevo) a řídicí jednotky (PC) s infračerveným analyzátozem plynu (vpravo).

Druhým přístupem studia ekosystémů je *přístup merologický*. Tok energie a látek je v tomto případě sledován prostřednictvím vybraného procesu, který je nositelem informace o stavu systému. Takovýmto velice vhodným procesem je fotosyntéza a s ní spojené procesy. Proč právě fotosyntéza? Fotosyntéza je křižovatkou toků energie a látek, je úzce spjata se základními životními projevy rostliny, podmiňuje a je podmíněna ostatními procesy

(transpirace, respirace, minerální výživa). Fotosyntéza je rovněž výrazně spjata s radiačním režimem porostu a ostatními mikroklimatickými faktory prostředí.

Nejrozšířenější metodou měření fotosyntézy, tj. spotřeby CO_2 resp. výdeje O_2 , je metoda gazometrická – založená na sledování dynamiky změny koncentrace plynů v atmosféře obklopující měřený list. Koncentrace CO_2 je stanovována velmi přesně pomocí infračervených analyzátorů, které pracují na principu absorpce plynů (CO_2 a vodní páry) v infračervené oblasti spektra, přičemž absorpce vzrůstá s rostoucí koncentrací daného plynu. Nárůst koncentrace CO_2 pak představuje převahu respiračních procesů (např. při nedostatku světla či poškození listu), úbytek CO_2 dokládá jeho spotřebu ve fotosyntéze (Obr. 5). Na základě měření závislosti rychlosti fotosyntézy na intenzitě dopadajícího světla, resp. koncentraci CO_2 v okolním prostředí lze vyčíslit např. efektivitu využití světla, efektivitu asimilace CO_2 , asimilační kapacitu nebo vodivost průduchů regulujících výdej vody (transpiraci) na úrovni listů.



Obr. 5. Schéma tradičního otevřeného gazometrického systému (vlevo) a otevřeného gazometrického systému LI-6400 (Licor, Lincoln, NE, USA) pro měření rychlosti transpirace a rychlosti asimilace CO_2 . IRGA představuje infračervený analyzátor plynů, který měří koncentraci CO_2 a H_2O ve vzduchu na vstupu do asimilační komůrky (IRGA – vstup) a na jejím výstupu (IRGA – výstup). Na výstupu z asimilační komůrky je koncentrace CO_2 a H_2O ve vzduchu ovlivněna aktuálním chováním listu. Rychlost fotosyntézy je vypočtena na základě změny koncentrace CO_2 na vstupu do komůrky a jejím výstupu (ΔCO_2), změna koncentrace H_2O ($\Delta\text{H}_2\text{O}$) je přímo úměrná rychlosti transpirace. Pro stanovení průduchové vodivosti je nutné měřit také teplotu listu T_L . (b) Příklad otevřeného gazometrického systému: Li-6400. Zdroj: Urban a kol. 2011.

Za pomoci matematických modelů jsou tyto výsledky měření na úrovni listů extrapolovány do měřítek porostů a globálních terestrických ekosystémů. To je spojeno s problémy vysoké variability a biologické diverzity. Proto se hledají takové vnitřní parametry systému, které vykazují nejmenší variabilitu spojenou s heterogenitou prostředí a genetickou diverzitou. Vhodným parametrem se například ukázala být efektivita (kvantový výtěžek) asimilace CO₂. Na jejím základě je modelováno rozšíření C3 a C4 druhů rostlin v podmínkách zvýšené atmosférické koncentrace CO₂.

Transpiraci lze stanovit například metodou tepelných pulsů, jako množství vody prošlé jednotkou plochy vodivé části kmene za jednotku času. Jedná se o metodu tepelného značkování vody, jejímž základem je měření časové prodlevy potřebné k odtoku ohřáté vody k teplotnímu senzoru (Obr. 6). Ze znalosti plochy vodivé části běle v příčném průřezu kmene lze vypočítat transpiraci celého stromu, případně tyto výsledky extrapolovat na úroveň celého porostu. Dynamika transpiračního proudu je závislá na řadě klimatických parametrů, především intenzitě slunečního záření a teplotě, ale rovněž dostupnosti vody v půdě aj.



Obr. 6. Systém SF 300 (Greenspan Technology, Austrálie) pro měření rychlosti transpiračního proudu sestávající z páru sond zavrtaných přímo do kmene (vlevo) a datalogeru umožňujícím automatické měření a komunikaci s PC (vpravo).

V posledních letech se rozvíjí třetí přístup zkoumání živých systémů, tzv. *systémový přístup*. Tento přístup má, v porovnání s analytickým přístupem, přednost ve schopnosti odhalit jednotlivé strukturní celky, jejich interakce a způsoby řízení vedoucí k udržení odolnosti celého systému k proměnnému a dynamickému prostředí. Přirozená nestabilita mikroklimatu vyvolává odezvu ve formě oscilací fyziologických parametrů. Příkladem mohou být oscilace rychlosti fotosyntézy v reakci na změny intenzity dopadajícího slunečního záření do spodních pater korunové vrstvy v důsledku pohybu větví. Tvar těchto oscilací pak udává

míru regulačních zpětnovazebných procesů, které úzce souvisí s doposud velmi málo probádanou oblastí – výše zmíněnou vnitřní pamětí ekosystémů.

5. Obecné výsledky experimentů pěstování různých druhů dřevin ve zvýšené vzdušné koncentraci CO₂

Všem ekosystémům je vlastní schopnost autoregulace nebo-li samořízení. Jejím základem jsou vyvážené vzájemné vztahy mezi organismy a jejich přizpůsobivost (adaptabilita) v biologickém koloběhu látek a energií. Adaptací je v biologii obecně míněna změna vlastností organismu, a to jak morfologických tak fyziologických, vyvolaná změnou kvality růstového prostředí. Podstatou je pozvolné zesilování dosavadních vlastností (adaptace pozitivní, stimulující růst a vývoj rostlin) nebo naopak jejich potlačování (adaptace negativní).

V literatuře lze nalézt výsledky mnoha experimentů dokumentujících fyziologické reakce rostlin na podmínky zvýšené vzdušné koncentrace CO₂. Reakce se silně mění v závislosti na rostlinném druhu, věku rostliny, růstových podmínkách, minerální výživě a také na délce pěstování v podmínkách zvýšeného CO₂. Délka trvání experimentu je nesmírně důležitá, protože může ovlivnit výslednou aklimaci. Aklimace je definována jako jakékoli přizpůsobení se rostliny, které se vyvine během kultivace ve zvýšené koncentraci CO₂. Z časového hlediska se aklimace rozlišují na *krátkodobé*, mezi něž patří rychle vratné procesy na úrovni fyziologické, a aklimace *dlouhodobé* zahrnující procesy umožňující změny morfologických vlastností. Aklimace může být z hlediska vybrané vlastnosti rostliny pozitivní nebo negativní.

Při dlouhodobém působení zvýšené koncentrace CO₂ (měsíce až roky) byl pozorován pokles rychlosti fotosyntézy v porovnání s variantou kontrolní. Tento jev se nazývá *aklimační deprese fotosyntézy*. Vysoká koncentrace CO₂ může způsobit nahromadění asimilátů v listoví, které pak mohou zasahovat do vlastní funkce chloroplastů porušením tylakoidní membrány nebo zabraňovat difúzi metabolitů a plynů mezi chloroplastem a cytolem. Toto poškození buněk vzniká pravděpodobně díky chybějícímu aktivnímu spotřebiči (tzv. sinku) nahromaděných asimilátů.

Zvýšený růst v atmosféře se zvýšenou koncentrací CO₂ je výsledkem nárůstu rychlosti fotosyntézy, tedy příjmu uhlíku, a na druhé straně poklesem respirace (dýchání) letorostu. Ukládání uhlíku do biomasy rostlin závisí na růstových podmínkách, zejména na minerální výživě. Klíčovou úlohou lesních porostů je především ukládání vzdušného uhlíku do půdy a biomasy na delší časové období.

Výsledky experimentů kultivace dřevin ve zvýšené vzdušné koncentraci CO₂:

Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na fotosyntézu

- rychlosti fotosyntézy, až na nepatrné výjimky, jsou vyšší
- účinnost využití slunečního záření je vyšší
- kompenzační ozáření (tj. intenzita záření, při níž rychlost asimilace uhlíku kompenzuje ztráty respirací) se sníží, prodloužení „fotosyntetického dne“
- hranice kompenzační ozáření se posouvá do nižších částí korunové vrstvy porostu
- výskyt aklimační deprese fotosyntézy při nedostatku minerálních živin a nízkých teplotách okolí rostlin (není sink pro asimiláty)
- rozdílná kvantitativní reakce druhů, změna kompetice mezi druhy
- pozitivní důsledky v produkci dřeva i potravin

Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na dýchání

- pokles během dne i noci
- celková respirace však vlivem většího množství biomasy může být vyšší

Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na účinnost využití vody

- zvýší se až dvojnásobně
- sníží se vodivost průduchů pro vodní páru až o 40 %
- sníží se rychlost transpirace na jednotku plochy průřezu kmene
- sníží se ztráty vody na jednotku plochy listu i půdy
- zlepšení vodního režimu je příznivé pro všechny druhy
- klesá hustota průduchů
- celková transpirace však může být vlivem větší celkové listové plochy větší

Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na rašení pupenů

- některé druhy dřevin budou ovlivněny (dřívější nástup), některé ne
- následný prodlužovací růst může být mírně opožděn nebo naopak urychlen (± 1-2 týdny)

Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na růst

- je pozitivní
- celková produkce biomasy je vyšší v průměru o 33 %
- významně vyšší růst kořenů

- pozitivní ovlivnění půdních mikroorganismů (včetně bakterií fixujících dusík a mykorrhizních hub)
- zvýšené odnožování trav a obilnin
- rychlejší růst a dřívější zralost
- větší výška a listová plocha bylin a trav
- změna struktury a fyziologie plodin, větší rostliny, zvýšené hromadění sacharidů
- zvýšení sklizňového indexu

Spolupůsobení zvýšené koncentrace CO₂ a vnějších stresů

- pozitivní vliv na růst je zesilován vyšší teplotou
- snižuje se nepříznivý vliv vodního stresu (vyšší koeficient využití vody- množství vody spotřebované na tvorbu jednotkového množství biomasy, větší kořenový systém)
- zvyšuje nepříznivý vliv nedostatku minerálních živin
- nepříznivé účinky atmosférických polutantů jsou sníženy přivřením průduchů
- rozdílné interakce s kompetujícími biologickými systémy (plevelé, hmyz, patogeny)

Vliv zvýšené koncentrace CO₂ na složení rostlinného těla

- snížení obsahu N v pletivech, tedy vyšší hodnoty C/N
- změny exudátu na povrchu kořenů, mění se druhové zastoupení půdních organismů

Výsledky pěstování lesních dřevin ve zvýšené koncentraci CO₂

jehličnany	<i>/průměrná hodnota, rozpětí/</i>
tloušťka kmene/větví	+12%, 0% až +33%
délka větví	+25%, -16% až +53%
počet větví	+39%, 0% až +110%
biomasa	+ 38 %, 0 % až +95 %
rychlost fotosyntézy	+ 40 %
listová plocha	+ 24 %, - 14 % až + 81 %
kořen/výhon	+ 10 %, - 10 % až + 57 %
listnáče	
tloušťka kmene/větví	+41%, +0% až +175%
délka větví	+33%, -21% až +137%
počet větví	+36%, 0% až +122%
biomasa	+ 63 %, 0 % až + 290 %

rychlost fotosyntézy	+ 61 %
listová plocha	+ 33 %, 67 % až + 132 %
kořen/výhon	+ 9 %, - 35 % až + 74 %

Pokusíme-li se generalizovat dosažené výsledky účinkových studií, je možno říci, že více budou ze zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ profitovat listnaté dřeviny - z nich pak především ty rychlerostoucí (např. topol, vrba, dub). I jehličnaté dřeviny mohou být pozitivně stimulovány k vyšším přírůstkům.

Velikost přírůstků biomasy listnatých i jehličnatých dřevin se rapidně zvýší s lepší dostupností dusíku v půdním substrátu. Naopak nedostatek dusíku může být výrazným limitujícím faktorem růstu v podmínkách navýšené vzdušné koncentrace CO₂. Obsah a dostupnost dusíku v půdě tak bude nejen hlavním mezidruhovým „konkurenčním“ faktorem, ale také faktorem řídícím alokaci uhlíku (kořeny vs. nadzemní biomasa). Následně bude proto muset v praxi zřejmě dojít k přehodnocení bonit jednotlivých druhů dřevin na daném stanovišti.

Dalším faktorem akcelerujícím růst je zvyšující se kapacita existujícího spotřebiče (sinku) nebo tvorba alternativních spotřebičů (např. sekundární větvení). Tvorba těchto spotřebičů je pak dána především silou konkurenčních vztahů. Silným nástrojem lesníka k úpravě těchto vztahů je pěstební zásah upravující kompetiční vztahy dřevin v porostu. Častější zásahy budou zřejmě vhodnější převážně v jehličnatých porostech, neboť listnaté dřeviny jsou „růstově drážděny“ každoroční obnovou celého svého asimilačního aparátu.

Velkým spotřebičem asimilátů při tvorbě biomasy je tvorba kořenového systému, jehož rozrůstáním se snaží rostlina zabezpečit především příjem živin z půdního substrátu. Zvětšením kořenového systému (délky i biomasy kořenů) bude zároveň dosaženo větší mechanické stability (resp. ukotvení) dřevin, čímž se sníží riziko vývrátů. Větší kořenový systém spolu s lepším využitím vody v procesu tvorby biomasy v podmínkách zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ bude u lesních dřevin spojen také s větší šancí čelit vodnímu stresu v obdobích přisušku.

Biomasa rostlinných orgánů bude narůstat rychleji než jejich objem. Bylo shledáno, že plošný poměr mezi tloušťkou buněčné stěny a lumenem buňky vzroste, a to především u jarního dřeva. Zvýší se tak pevnost dřeva. U dřevin jako například smrk ztepilý, borovice lesní, dub letní, či třešeň ptačí bylo prokázáno navýšení počtu i velikosti buněk (tracheid popř. trachejí) v příčném průřezu kmene, zvýšení tloušťky jejich buněčné stěny a snížení počtu pryskyřičných kanálků. Hustota dřeva bude více ovlivněna přihnojováním dusíkem.

Z hlediska zakládání a pěstování lesních porostů bude nástup doby rašení pupenů méně ovlivněn zvýšenou koncentrací CO₂ v ovzduší v porovnání s vlivem zvýšené teploty, která tento nástup uspíší. Následný růst (zejména listoví a letorostů) bude však mnohem expanzivnější než doposud. V posledních létech se setkáváme s vysokými teplotami vzduchu a přísuškem již v časném jarním období. Proto zřejmě vyvstane potřeba přehodnotit vhodnost jarní výsadby. V souvislosti s *globální změnou klimatu* bude také zřejmě nutné přehodnotit i podmínky pro vylišení lesních vegetačních stupňů v naší republice. Ekivalence našich domácích druhů dřevin je poměrně široká, globální změnou klimatu budou proto ohroženy pouze ty druhy dřevin, které se již dnes nacházejí na nevhodných stanovištích. U zakládajících kultur lze předpokládat nutnost intenzivnějšího boje s buřením a v souvislosti s ochranou lesa s vyšším výskytem především savého hmyzu (mšice, sviluška, korovnice, puklice apod.).

Z výše uvedeného přehledu vyplývá, že bude zřejmě výhodné pěstovat spíše listnaté rychlerostoucí dřeviny. Z hlediska potřeby dlouhodobé akumulace uhlíku v celém lesním ekosystému bude ale stále vhodnější pěstovat dlouhověké, stín-snášející dřeviny. Vhodné bude pěstovat více-etážové porosty.

6. Úloha lesů v globálním cyklu uhlíku

/Pěstební doporučení/

Uhlík se v litosféře Země vyskytuje v čisté, pevné formě jako diamant nebo grafit (tuha). V této formě je poměrně málo reaktivní, většinou reaguje s dalšími prvky až při vyšší teplotě. V atmosféře existuje hlavně jako plyn oxid uhličitý (CO₂). Přestože tvoří velmi malý objemový podíl z plynů atmosféry (asi 0,04 %), je zásadní pro život na Zemi (součást organické hmoty). Oxid uhličitý vzniká dokonalým spalováním uhlíku, při dýchání rostlin a živočichů, kvašením, tlením, při spalování uhlí a organických látek. Jeho zvyšující se obsah v ovzduší značně přispívá ke skleníkovému efektu. Je to bezbarvý plyn, bez zápachu, rozpustný ve vodě, těžší než vzduch. Nehoří a působí dusivě (při koncentracích v řádu jednotek %). Za nedostatečného přístupu vzduchu nebo za vysokých teplot vzniká spalováním uhlíku oxid uhelnatý. Je to značně reaktivní plyn se silně redukčními účinky (odnímá kyslík oxidovaným sloučeninám). Při rozpouštění oxidu uhličitého ve vodě vzniká slabá kyselina uhličitá.

Pro stavbu organické hmoty živých organismů je zdrojem převážně plynný CO₂ v atmosféře. CO₂ se mění v rostlinách fotosyntézou na sacharidy a dále na proteiny, lipidy, atd.

Tyto látky jsou uhlovodíkovou potravou a stavebním materiálem pro zelené rostliny a živočišné konzumenty. Přitom všechny organismy dýchají, tj. přijímají kyslík a vydechují uhlík do atmosféry ve formě CO_2 . Po smrti jsou mrtvoly rozloženy a znovu mineralizovány rozkladači různého typu. V jejich trofických řetězcích se uhlík ve finále často vrací do oběhu opět ve formě CO_2 (respirace půdy). Cyklus uhlíku se zpomaluje (zpomalením činnosti fauny a mikroflóry půdních saprofytů) při nedostatku vzduchu, vody, při nízké teplotě či výrazné kyselosti prostředí hromaděním odumřelých organismů a zbytků rostlin.

Životní cyklus stromů je dlouhý, jejich rychlost migrace omezená, a proto většina z dnes vysazených či přirozeně zmlazených a odrůstajících stromů bude růst v podmínkách prostředí a klimatu, které bude v dané oblasti panovat za několik desítek až stovek let. Pro „přirozené“ i hospodářské lesy je proto velmi důležité poznat adaptační mechanismy jednotlivých druhů dřevin i celých ekosystémů k očekávaným změnám podmínek klimatu. **Za nejdůležitější faktor vyvolávající nastupující „globální změnu klimatu“ (GZK) je považována zvyšující se koncentrace CO_2 v ovzduší.** Zvyšující se koncentrace CO_2 v ovzduší ovlivňuje dřeviny a lesní ekosystémy mnoha způsoby zahrnující jak přímé účinky, neboť CO_2 je substrátem i aktivátorem fotosyntézy, tak nepřímé které jsou zprostředkovány (tzv. sekundární a terciární účinky, Marek a kol. 2011).

Je téměř nezpochybnitelné na základě výzkumu historických koncentrací CO_2 na Zemi i přímých měření z posledních desetiletí, že **tyto koncentrace narůstají (v současnosti rychlostí 1,5 až 2 ppm za rok) a s ohledem na předpokládaný vývoj lidské populace budou stoupat i nadále** (IPCC 2007). Spolu s nárůstem koncentrací CO_2 **lze předpokládat** s různou měrou pravděpodobnosti a v kombinaci s různými emisními scénáři pomocí klimatických modelů (tzv. GCM- modely globální cirkulace) převážně **nárůst teplot, změnu v množství a rozložení srážek během roku** atd. (Dubrovský a kol. 2005, Marek a kol. 2011). Omezená míra pravděpodobnosti vychází především z vysoké variability dat a z důvodu neznalosti jak veškerých přímých tak především zpětno-vazebných mechanismů (např. oblačnosti). Ještě více nejistá je pak predikce změn klimatických parametrů v lokálních měřítcích. Jak se nejpravděpodobněji změní hodnoty jednotlivých klimatických prvků ze současných na očekávané např. v r. 2050 v různých oblastech ČR, graficky zobrazuje zvlášť pro letní i zimní období Dubrovský a kol. 2011. Protože pěstování rostlin v zemědělství i lesnictví je ohrožováno především výskytem extrémních klimatických podmínek, byly zpracovány také trendy ve vývoji klimatických extrémů (teplotních a srážkových). Bylo zjištěno, že **maximální denní teploty i délka horkého období v průběhu roku téměř na celém území ČR vzrostou. Roční extrémy v denních minimálních teplotách i délce studených období se změní statisticky nevýznamně stejně jako srážkové extrémy. Období sucha se budou spíše zkracovat.**

Úloha lesů v globálním cyklu uhlíku i v mírnění dopadů globální změny klimatu je zřejmá, neboť lesní dřeviny jsou dlouhožijícími autotrofními organismy schopnými odnímat atmosférický CO₂ a ukládat ho následně do své biomasy, ekosystému. Biomasa a v ní obsažený uhlík (podíl uhlíku v biomase činí přibližně 50%, IPCC 2007) je z porostu v hospodářských lesích z velké části odvážena a následně po delší či kratší dobu uchovávána v podobě různých sortimentů či výrobků ze dřeva apod. Zbývající část ve formě opadu, těžebních zbytků, odumřelých stromů, pařezů atd. v lese zůstává a uhlík z ní může být následně uvolněn či fixován v půdním prostředí, a to dokonce na dobu několikanásobně delší než v biomase (Hyvönen a kol. 2007). Ukazuje se, že porosty vyšších poloh (od 600 m n.m.) mírného pásma s vysokým podílem smrku ztepilého mohou být z tohoto pohledu velice významným úložištěm uhlíku (Janssens a kol. 2003, Vetter a kol. 2005). Smrk ztepilý (*Picea abies* [L.] Karst.) je v současnosti nejzastoupenější dřevinou lesů České republiky (52 %, www.uhul.cz/zelenazprava) i lesů Evropy (35%, Wirth a kol. 2004). Je naší hlavní hospodářskou dřevinou. Ač je jeho podíl v našich lesích vysoký, přirozeně by dosahoval maximálně 11% zastoupení. Nesmíšené porosty vytvářel smrk pouze ve smrkovém lesním vegetačním stupni (Ivs), od 4 - 5. Ivs, kde nachází svoje produkční maximum, však již tvořil spolu s bukem a jedlí klimaxová společenstva. Smrk je výjimečnou dřevinou právě s ohledem na tvorbu klimaxových společenstev při své pionýrské strategii růstu. Je poměrně rychlerostoucí dřevinou s dobrou kvalitou dřeva a nízkými nároky na půdní prostředí (široká eko-valence). Stresem většinou trpí z nedostatku vláhy (stanoviště s ročním úhrnem srážek pod ca 600 mm), což vede sekundárně k napadání biotickými škůdci. Z abiotických činitelů je ohrožován větrem, sněhem a námrazou pro jeho mělký kořenový systém. Před 50 lety bylo zastoupení smrku ještě ca o 10% vyšší než dnes, avšak hromadný úhyn v monokulturách a na nevhodných stanovištích, přinutil lesníky k postupným přestavbám na porosty smíšené zejména s bukem (Souček a Tesař 2008). Pěstování smrku v monokulturách bude zřejmě uplatňováno pouze při plantážních hospodářských postupech (s dobou obmýtlí do ca 60 let), nicméně pro jeho hospodářskou efektivnost je plánováno v optimalizované porostní skladbě s jeho zastoupením ca 37% (Souček a Tesař 2008).

Tato práce shrnuje dosažené výsledky kultivace smrku jak v komorách s otevřeným vrchem – měřítko jedinec, tak v kultivačním zařízení lamelových sfér – měřítko porost a porovnává je v diskusích s dalšími studii na jedincích či porostech se zastoupením smrku rostoucích v podmínkách zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ ve snaze odhadnout další pěstební perspektivy smrku v kontextu GZK.

Při vyvozování závěrů budoucích pěstebních perspektiv je třeba stavět na poznatkové bázi reakcí řady fyziologických, morfologických a chemických procesů, které jsou v jednotlivostech ovlivněny, v daném případě zvýšenou vzdušnou koncentrací CO₂, třeba i

nízkou měrou a statisticky neprůkazně ($P=0,95$), avšak v interakcích či komplexním pojetí mohou výrazně změnit „chování“ celé rostliny, produkci biomasy aj. Produkce biomasy je v podstatě výsledkem fyziologických procesů, z nich klíčovou úlohu hrají především procesy fotosyntézy, respirace a transpirace. Vliv intenzity dopadajícího slunečního záření, teploty, dostupnosti vody i živin na fyziologické procesy a jejich průběh je znám (např. Larcher 2003). Řada otázek však zůstává dostatečně nezodpovězena, především co se týče časové dynamiky fyziologických procesů v reakci na změny v intenzitě sluneční radiace, koncentrace CO_2 v ovzduší, teplotě a vlhkosti vzduchu aj. Například, jaký vliv mohou mít náhlé i déletrvající výkyvy počasí či klimatických faktorů? Jakou měrou bude změněné prostředí se zvyšující se vzdušnou koncentrací CO_2 ovlivňovat fyziologické procesy, růst a vývoj či morfologické parametry smrku i jiných druhů dřevin a rostlin tvořících se smrkem porosty v celém koncepčním pojetí „funkčního ekosystému“? Jaký komplex spolupůsobení více faktorů bude mít největší vliv na zmiňované procesy? Směřujeme k hledání nového „ideotypu“ (Donald 1968)? Tedy jedince/ porostu nejen plně produkčního v podmínkách GZK, z hlediska hospodářského výnosu, ale i jedince/ porostu blíže přírodního typu s primární úlohou přežít a reprodukovat se? Tyto otázky zřejmě zůstanou ještě jistou dobu nezodpovězeny, neboť simulovat celý komplex v prostoru i čase se měnících faktorů je velmi obtížné. Z hlediska pěstebního a výnosového je pak třeba se ptát, jaká bude produkční aktivita, produkce a vlastní výnos, jenž je větší měrou dán celospolečenskou poptávkou po užitcích lesa (Marek 1992). I když tlak prostředí na stabilitu, zdravotní stav či produkci lesních porostů a především dynamika jeho změn může být v budoucnu tak velká, že prvotním zájmem může být i prosté zachování lesa.

Během posledních desetiletí se ekologický výzkum zaměřil na studium reakcí rostlin a suchozemských ekosystémů na zvýšenou vzdušnou koncentraci CO_2 v ovzduší o čemž svědčí řada přehledových studií (např. Eamus a Jarvis 1989, Ceulemans a Mousseau 1994, Luo a kol. 1999, Urban 2003, Körner 2006). **Původní předpoklady a výsledky účinkových studií z kultivací rostlin v atmosféře s navýšeným CO_2 dokládaly výraznou pozitivní stimulaci rychlosti fotosyntézy** (Farquahar a kol. 1980, Sage 1990), **k níž dochází i u smrku** (Marek a kol. 2002, Urban a kol. 2003). **Současně však u smrku, jako u většiny jehličnanů, dochází ke snížení fotosyntetické kapacity, která rychlost fotosyntézy následně zpomaluje (tzv. aklimační deprese fotosyntézy).** Experimenty potvrzují, že fotosyntetická kapacita je pod vlivem zvýšené koncentrace CO_2 v ovzduší řízena kombinací celé řady biochemických, morfologických a fyziologických zpětno-vazebných mechanismů (podrobněji Urban a kol. 2011 v Marek a kol. 2011). U smrku ztepilého byla nalezena v tomto ohledu **výrazná periodicitu v průběhu růstové sezóny díky aktivitě či redukci růstového sinku** (místo spotřeby uhlíku v rostlině), což je spojeno se spotřebou asimilátů pro aktivní růst, či akumulací sacharidů a škrobů v jehlicích, a **především díky snížení obsahu dusíku**

v jehličí (zředovací efekt, Dieleman a kol. 2010). Aklimační depresi u smrku výrazně prohlubuje právě nedostatek dusíku v jehličí a jeho dostupnost v půdě. Dusík bude tedy jedním z významných limitujících faktorů pro trvalou stimulaci fotosyntézy a tvorbu biomasy (Dieleman a kol. 2010).

Bylo možné předpokládat, že pokud bude smrk schopen tvorby alternativních sinků (tj. míst spotřeby pro zvýšené množství asimilátů např. tvorbou sekundárních struktur), ať už jako přirozená reakce nebo vyvolaná, například probírkovým zásahem, **je možné fotosyntetickou depresi zmírňovat. Tvorba sekundárního větvení, sekundárních kořenových struktur i stimulace přírůstku po schematickém pěstebním zásahu při pěstování smrku ztepilého v kultivačním zařízení lamelových sfér tyto předpoklady potvrzovala (Marek a kol. 2011, Pokorný a kol. 2012, 2013). Potvrzovala to i stimulace růstu primární struktury, nových ročníků jehlic a letorostů v jarních měsících (květen – červen, kap. Pokorný a kol. 2010, 2013). Nově se dělicí pletiva (meristémy) jsou totiž nejaktivnějším sinkem pro asimiláty.**

Produkce a přírůst biomasy je odvozen od „fixační“ bilance uhlíku tj. rozdílem mezi jeho příjmem fotosyntézou a výdejem respirací. Respirace kmene i kořenů smrku, závislá především na teplotě a růstové aktivitě, se pouze v důsledku vlivu zvýšeného množství CO₂ v ovzduší statisticky průkazně nezvýšila. Avšak její vyšší hodnoty i na konci růstové sezóny vypovídají o **prodlužujícím se období fyziologické aktivity (Janouš a kol. 2000, Acosta a kol. 2010), což může mít význam při odrůstání v konkurenčním boji s buření či listnáči. Z analýzy různých druhů prací se jeví, že odrůstání dřevin do doby tvorby korunového zápoje (vzájemný dotyk a počátek prolínání korunových těles) či zaplnění prostoru půdy kořeny bude rychlejší v důsledku dostatečného růstového prostoru (korunového i půdního) a zásobení živinami, což může podporovat odrůstání dřevin před bylinnou vegetací (Körner 2006). Toto bude však zřejmě nutno stanovištně diferencovat, neboť buřeň (včetně invazivních druhů) bude zvýšenou koncentrací CO₂ růstově stimulována také (Kubínová 2008, Woodward a Kelly 2008).**

Nakolik bude zvýšená depozice dusíku (Hruška a kol. 2002) pokrývat zvyšující se nároky či naopak brzdit dekompoziční procesy zůstává otázkou. Nicméně **k přehodnocení kvality či bonity stanoviště pro smrk (i jiné druhy dřevin) s vysokou pravděpodobností dojde. Tvorba sinků v podobě stimulace růstu primární struktury či tvorba sekundárních struktur je u smrku patrná, jak bylo zmíněno, z konkrétních výsledků získaných na Experimentálním ekologickém pracovišti (EEP) Bílý Kříž. Jedním z primárních sinků může být zvyšující se rychlost růstu letorostů a jehlic po vyrašení pupenů, které je i v podmínkách zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ řízeno především teplotou (Pokorný a kol. 2010). Nejvýznamnějším aktivním sinkem jsou však jemné kořeny (Pokorný a kol. 2012), jejichž tvorba je silně stimulována zřejmě především zvýšenou poptávkou po**

dostatečném zásobování dusíkem. Tomuto zvýšenému požadavku odpovídá také výrazná podpora tvorby **sekundární struktury kořenového systému jako alternativního sinku**. Dalším alternativním sinkem je zvýšená tvorba **sekundárního větvení** (Pokorný a kol. 2012).

Nejvhodnějším **stimulačním nástrojem**, který je lesníkovi nejdostupnější, může být klasický **výchovný zásah (prořezávka, probírka)**. V důsledku tohoto zásahu je ovlivněna kompetice, kdy se kromě zvýšení světelného požitku zvyšuje dostupnost vody, dusíku a živin z půdního prostředí (uvolněním prostoru a dekompozicí zbytků po těžebním zásahu). Probírkou vyvolaný přírůst primárních struktur (nových letorostů, kořenů i kmene) funguje jako akcelerující „spotřebič“ pro zvýšenou produkci asimilátů pod vlivem EC. **Četnější zásahy nebo zásahy vyšší intenzity by byly zřejmě stimulačně výraznější. V tomto ohledu je však třeba dbát se zvýšenou opatrností na zachování tzv. funkční struktury porostu**, která v komplexu druhové, věkové a prostorové skladby porostu zaujímá výjimečné postavení, a to jako funkčního integrátora ekologických procesů v lesním ekosystému. **Především se jedná o zachování koloběhu dusíku a nenarušení procesů a vazeb v jeho příjmu z půdního prostředí.**

Z hlediska světelného režimu v podmínkách zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ (EC) bude smrk sice pravděpodobně schopen vytvářet víceetážové a strukturně bohatší porosty, jak dokládá rozdílný stupeň stimulace fotosyntézy slunného a stinného typu jehličí v porostech s různou hustotou, na druhou stranu **vyšší hodnoty ozáření korun stromů (nad 250 μmol m⁻² s⁻¹) stimuluje výrazněji celkový denní průběh fotosyntetické asimilace uhlíku v podmínkách EC, ponechá smrk zařazen mezi slunné či stín-snášející dřeviny jako doposud s maximalizací produkce při dostatečném světelném požitku (Špunda a kol. 2005, Pokorný a kol. 2012). Jeho ekovalence ke světlu tak bude zřejmě širší a vliv pěstebních zásahů bude mít větší růstově-stimulační efekt. Jeho výjimečnost v tom, že je pionýrskou a zároveň klimaxovou dřevinou bude ještě umocněna.**

Očekávat lze v podmínkách EC nejen nárůst biomasy při dostatečně bohaté půdě na dusík, ale také změnu kvality dřeva kmene (Janouš a Pokorný 1999, Tomášková kol. 2007). To dokládá jak vývoj hustoty dřeva kmene tak analýza buněk dřeva v příčném průřezu, kde nalezený větší podíl tloušťky buněčné stěny ku lumenu nasvědčuje zvýšení pevnosti dřeva. **Smrk tedy zůstane i z tohoto hlediska perspektivní dřevinou s dostatečnou kvalitou dřeva pro široké využití v průmyslu a stavebnictví.** I zde je třeba věnovat pozornost dostupnosti dusíku, neboť jak uvádí Kostianinen a kol. (2004), i kvalita dřeva je jí v podmínkách zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ opět výrazně podřízena.

Z hlediska vodního režimu a nároků smrku na vodu bude smrk v podmínkách zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ oproti těm dnešním zvýhodněn, a to hned z několika

důvodů. Jedním z nich je **snížení stomatální vodivosti** (např. Ainsworth a Long 2005). Díky níž dochází ke **zvýšení efektivity využití vody**. V porovnání s bukem byla u obou druhů dřevin nalezena vyšší efektivita využití vody, která s narůstající teplotou exponenciálně klesá více v současné koncentraci CO₂ oproti navýšené (700 ppm), a to výrazněji u buku (Urban, nepublikováno). **Listová plocha se sice zvětší, avšak méně než její biomasa či plocha absorpčních kořenů** (Pokorný a kol. 2013). **Hustota průduchů nebude výrazně změněna**, takže výparná plocha se zvětší víceméně úměrně s nárůstem celkové listové plochy. V našich předběžných analýzách (nepublikováno) byla hustota průduchů jehlic smrků v podmínkách EC mírně vyšší oproti současným podmínkám (73 ± 8 vs. 68 ± 10; průměr ± sm.odch., statisticky nevýznamně). Rozdíly ve specifické rychlosti transpiračního proudu v kmeni a celkové transpiraci byly zaznamenány na počátku po zahájení experimentu zkoumání vlivu zvýšené koncentrace CO₂ (z důvodu poklesu stomatální vodivosti), následně po několika letech trvání experimentu především v obdobích přísušku, kdy se projevila morfologická změna v podmínkách EC tj. změna proporcí mezi výparnou plochou, plochou vodivé části běle kmene a absorpční plochou jemných kořenů (Urban a kol. 2011). Statisticky významně se totiž v podmínkách EC **zvětšila jak biomasa tak délka a plocha jemných - absorpčních kořenů** (Pokorný a kol. 2013). Tyto výsledky dokládají, že u smrku oproti současnosti dojde ke zlepšení „hydraulických“ poměrů, hospodaření s vodou a přežívání období snížené dostupnosti vody v půdě bez závažnějších dopadů na růst a vývoj, což potvrzuje i analýza dalších 20 studií na smrku (Körner 2006). Pokud se tedy jedná o odpověď na to, jaký vliv mohou mít náhlé i déletrvající výkyvy klimatických extrémů, pak **vůči přísuškům bude smrk pravděpodobně odolnější**. Neznamená to však, že smrk bude schopen růst trvale v oblastech s nedostatkem srážek. Především v nižších polohách a teplejších oblastech povedou vyšší teploty ke zvýšení výparu bez ohledu na vyšší koncentraci CO₂ v ovzduší, zvýšení respirace a tím snížení produkce smrku případně až odumření v důsledku negativní bilance (vodní i uhlíkové). Zvyšování ztrát uhlíku respirací vyplývá z teplotních závislostí fotosyntézy a respirace (Larcher 2003), kdy s teplotou narůstá respirace asi 2,5 krát rychleji. **Narůst respirace celého ekosystému je jedním z velkých nebezpečí, kdy se celé biomy namísto sinku (spotřebiče) CO₂ mohou stát jeho producenty**. Na druhou stranu zrychlenou dekompozicí může více uvolněných živin podporovat zpětně fotosyntetickou fixaci uhlíku zvláště na chudých stanovištích (Kirschbaum 2004). **Zrychlí se tak pravděpodobně dynamika uhlíkového cyklu**.

I když rašení pupenů smrku je ovlivňováno především teplotou a vlivem vyšší koncentrace CO₂ v ovzduší je uspíšeno jen mírně (o 2-5 dnů, Pokorný a kol. 2010), s ohledem na následný rychlý vývoj letorostů po vyrašení pupenů a také s ohledem na předpokládané změny v distribuci srážek i nárůstu teplot lze očekávat, že vhodné podmínky pro výsadbu smrku v jarním období budou trvat kratší dobu nebo dokonce

jen několik málo dnů. Při umělé obnově tak bude zřejmě třeba smrk vysazovat spíše na podzim nebo využívat obalovanou sadbu. V následném zajištění kultur bude třeba ve vlhkých obdobích a na bohatých stanovištích ještě více než doposud bojovat s buřením, či invazivními druhy rostlin (Woodward a Kelly 2008). Dalším potenciálním nebezpečím je s ohledem na zvýšenou tvorbu a hromadění produktů asimilace v jehličí i pupenech (Pokorný a kol. 2013) **zvýšený výskyt savého a listožravého hmyzu.** Z důvodu založení experimentu zkoumání vlivu EC v „umělých podmínkách“ tj. komorách s otevřeným vrchem i lamelovém kultivačním zařízení na EEP Bílý Kříž nebylo možno koncepčně a statisticky relevantními způsoby vyhodnotit výskyt hmyzu, nicméně byl v podmínkách zvýšené koncentrace CO₂ na smrcích zaznamenán zvýšený výskyt: svlušky (*Tetranychidae*), mšice (*Cinara curvipes*), korovnic (*Sacchiphantes abietis*, *Adelges tardus*), a při analýze kořenového systému i larvy lalokonosce rýhovaného (*Otiorhynchus sulcatus*; zřejmě z důvodu větší produkce exudátů, nestanoveny). Zvýšený výskyt hmyzu souvisí i se zvyšující se teplotou (příznivé podmínky), obsahem dusíku v jehličí, floémovým tokem atd. V podmínkách globální změny se mohou měnit „zákonitosti“ poškozování listožravým hmyzem a patogeny několika způsoby: 1) přímo ovlivněním jejich vývoje a přežíváním, 2) fyziologickou změnou v obranném mechanismu stromů a 3) nepřímo změnou v početnosti přirozených nepřátel, mutualismu a kompetici (Körner 2000). Díky krátkému životnímu cyklu, pohyblivosti, reprodukčnímu potenciálu a fyziologické citlivosti k teplotě se předpokládá, že rozšíření a četnost výskytu mnoha druhů hmyzích škůdců a patogenů vzroste (Ayres a Lombardero 2000).

Při volbě hustoty sponu výsadby bude třeba vycházet z ekonomických nákladů na přípravu stanoviště, předpěstování vhodného sadebního materiálu smrku a především ze zvýšených nároků na zásobu dusíku v půdě. Přihnojování je ekonomicky více-nákladem, který však zůstává v podmínkách EC k reálnému zvážení. **Výběr stanoviště či vhodná porostní směs, kde by smrk netrpěl nedostatkem v zásobování dusíkem bude zřejmě zásadní.** S ohledem na dostupné množství dusíku v půdě a schopností smrku lépe přežívat období přisušků by bylo zřejmě vhodnější volit řidší spon výsadby. Na druhou stranu se zdá, že by byl smrk schopen růstu a tvorby srovnatelné produkce v podmínkách EC jako v současnosti v porostech s vyšší hustotou, a bylo by tak možno prodloužit i interval probírkových zásahů s ohledem na využití slunečního záření. Avšak opět díky limitaci dusíkem nebude prodlužování těchto intervalů vhodné. Ve zvýšené vzdušné koncentraci CO₂ navíc narůstá oproti současným podmínkám prostředí listová plocha více, tudíž při stejné hustotě porostu budou světelné podmínky uvnitř budoucích porostů nižší, což může být vyváжено právě snížením hodnoty kompenzační ozáření (Marek a kol. 2002). Opad se může zvýšit, neboť listoví spolu s jemnými kořeny jsou vhodným, vysokým i když krátkodobým (z hlediska rychlosti obratu) sinkem – spotřebičem uhlíku. Víme-li, že

maximální produkce či efektivita produkce smrkového porostu je optimální při určitých hodnotách množství listové plochy v korunové vrstvě (kvantifikováno indexem listové plochy, LAI) nabývajících hodnot 8 - 10 nad nimiž následně efektivita klesá (Pokorný a kol. 2008), je možno hodnoty LAI brát jako ukazatel pro aplikaci pěstební zásahu. Ačkoli budou tedy smrkové porosty schopny dosahovat vyšších hodnot LAI, optimální hodnoty LAI se příliš měnit nemusí. Optimální hodnoty LAI stejně jako maximální hodnoty LAI se nemusí měnit ani z důvodu limitace dusíkem. Smrk tak sice bude schopen růstu v hustších porostech než dnes či dokonce částečně ve spodní etáži, ale pro maximalizaci jeho produkce bude vhodnější provádět pěstební zásahy s vyšší frekvencí nebo intenzitou pro udržení optimálních hodnot LAI a udržení vyšších ozáření v korunách, a to zvláště v částech s vyšší hustotou listoví. Při vyšších ozářeních je totiž denní průběh čisté asimilace CO₂ u smrků kultivovaných ve zvýšené vzdušné koncentraci CO₂ (EC) vyšší (Špunda a kol. 2005). **Probírkový zásah tak může mít mnohem větší stimulační efekt než dnes** uvolněním růstového prostoru (Pokorný a kol. 2012). Bohužel výzkum tohoto typu v podmínkách EC je stále nedostatečný.

Větší podpora růstu kořenového systému smrku (biomasa, délka i plocha kořenů) v podmínkách EC, který tak obsáhne větší plochu (či objem půdy) a zabezpečí kromě lepšího zásobení dřeviny živinami a vodou, **pravděpodobně i větší mechanickou stabilitu a zvýší odolnost smrku převážně ve vyšších polohách proti působení bořivého větru, sněhu a námraze**. O vlivu zvýšené vzdušné koncentrace na prostorovou distribuci kořenů v půdním prostředí toho však bohužel víme ještě málo.

Ač se z porovnání v růstové reakci na zvýšenou koncentraci CO₂ mezi listnatými a jehličnatými dřevinami může zdát, že v konkurenčním boji a pěstování v porostní směsi s listnatými dřevinami bude smrk znevýhodněn, neboť listnaté dřeviny jsou zvýšenou koncentrací CO₂ růstově stimulovány většinou více (např. Pritchard a kol. 1999), **byl smrk shledán úspěšnější například v konkurenci s bukem na kyselých půdách a dokonce produkčně srovnatelný na půdách obohacených vápníkem** (Körner 2006). Listnáče jsou růstově stimulovány každoroční náhradou vlastního asimilačního aparátu, který funguje jako první významný „orgánový“ spotřebič. Smrk bude sice snášet větší zastínění aniž by oproti současnosti poklesla jeho produkce, ale ve srovnání s přírůstkem listnáčů by pouze tímto v konkurenčním boji s nimi neobstál. Bude tedy zřejmě vhodnější pěstovat jej ve skupinovitém či jednotlivém smíšení s dřevinami méně náročnými na obsah dusíku v půdě, které příznivě působí opadem na vlastnosti půdy a půdní procesy (většina melioračních a zpevňujících dřevin). Vhodnou formu smíšení je však třeba ještě více experimentálně testovat. Výhodou smrku oproti listnáčům je délka růstové sezóny resp. „produkčního období“, které se bude s ohledem na GZK ještě prodlužovat.

Při simulaci změn klimatických podmínek a jejich přenesení do prostorového měřítka ČR, lze předpokládat, že dojde především vlivem nárůstu průměrných teplot k posunu lesních vegetačních stupňů o 1-2 lvs do vyšších nadmořských výšek (Vinš a kol. 1997). Tím se z hlediska teplotních a vlhkostních nároků posune optimum podmínek pro pěstování smrku do vyšších poloh; ze současných 3. a 4. lvs by tak vymizel smrk téměř úplně (až na možné výjimky, chladná a vlhkostně příznivá údolí, severní svahy apod.), obdobně ve vyšších lvs s menším plošným rozsahem, na méně živných stanovištích bude díky menšímu přírůstku (ve srovnání s jinými druhy dřevin) a konkurenci jej možné pěstovat spíše jako přimíšenou nebo vtroušenou dřevinu. Z předběžných měření změn teplotních závislostí rychlosti asimilace v podmínkách EC resp. teplotní aklimace se zdá, že smrk například oproti buku posune své teplotní optimum světlem saturované rychlosti fotosyntézy více, a to dokonce až o ca 8 °C ve srovnání s bukem o ca 3 °C (Urban, nepublikováno). Tento optimistický výsledek podporující možné pěstování smrku i v nižších polohách, resp. těch současných i při předpokládaném zvýšení teplot, je však třeba v celkovém kontextu mírnit, neboť citlivost respiračních procesů k působení teploty je vyšší v porovnání se stimulací vlastní asimilace CO₂. Asimilační účinnost, definovaná jako poměr maximální rychlosti asimilace ku temnotní respiraci, s nárůstem teploty může totiž v konečném důsledku klesnout.

Optimální pro smrk budou v blízké budoucnosti zřejmě podmínky vyšších poloh pokud možno bohatších stanovišť. Současný trend v lesnictví podporuje snižování zastoupení smrku v lesích ČR především v nižších polohách a je jen na lesním hospodáři jaké procentické zastoupení bude z hlediska přírodních a ekonomických podmínek cílové (Cienciala a kol. 2011).

Protože experimenty s umělým navyšováním CO₂ v ovzduší nemají dlouhého trvání (počaly většinou v 80. – 90. letech minulého století), a navíc většinou byly sledovány spíše reakce mladých dřevin ve fázi intenzivního růstu v umělých růstových podmínkách (vaky či zařízení s komorovým efektem, kultivační zařízení s upraveným půdním prostředím – mechanickou úpravou či promíšením půdních horizontů, úpravou skeletnatosti, dodání umělého substrátu, dodání živin, změna hydrického režimu apod.) nelze s jistotou říci, že jsou známy všechny adaptační mechanismy a jejich intenzita projevu ani u smrku ztepilého, jako jedné z geneticky dobře přizpůsobivých dřevin. V těchto experimentech jsou různým způsobem kultivováni jedinci bez vlivu kompetice či soubor jedinců simulujících porostní měřítko, avšak s nízkou úrovní funkční struktury porostu. Při zkoumání vlivu zvýšené vzdušné koncentrace CO₂ na různé variety smrku ztepilého se mimo jiné jižní ekotypy jeví adaptabilnější než severské (Vanhatalo a kol. 2003). Také nelze přesně říci, jaké bude chování smrku a jeho porostů při spolupůsobení více extrémních či pozměněných faktorů prostředí (zvýšený příkon UV-B, vyšší koncentrace přízemního ozónu, depozice

dusíku, síry atd.). Komplex vlivu vnějších podmínek je velmi obtížné identifikovat natož simulovat. Částečně je tento nedostatek kompenzován možným sledováním působení zvýšené koncentrace CO₂ v ovzduší na lesní dřeviny rostoucí ve volné přírodě ve funkčním ekosystému (tzv. FACE z anglického Free Air CO₂ Enrichment) tj. se stabilizovanými koloběhy živin, vody, rozvinutou mykorhizou atd. nebo-li v porostu s dostatečnou „funkční“ strukturou. Pro možnost zkoumání vlivu zvýšené koncentrace CO₂ na ekosystém, porost či skupinu dospělých stromů vlastně lepší technologie dosud vyvinuta nebyla. Na druhou stranu kultivační zařízení umožňují řízeně simulovat působení jednoho i více faktorů současně a pochopit funkční podstatu účinku každého z nich v různých vazbách.

Výsledky z kultivačních zařízení (komor s otevřeným vrchem a kultivačního zařízení lamelových sfér; Janouš a kol. 1986, Urban a kol. 2001) je proto vhodné srovnat se studii z FACE systémů. Přehlednou studii v tomto ohledu zpracoval Körner (2006). Ze známých výsledků experimentů kultivace smrku a porostů se smrkem v podmínkách EC (současná vzdušná koncentrace CO₂ + 160 ppm až 350 ppm; Švýcarsko, Švédsko a naše výsledky z EEP Bílý Kříž) vyplývá, že **nadzemní biomasa či LAI (index listové plochy) narůstají** (ca o 10%, statisticky nevýznamně) **jen do doby tvorby korunového zápoje** (což podporuje zakládání porostů v řidším sponu), **biomasa narůstá více po přihnojení** (nebo než bude vyčerpána zásoba dusíku v půdě) či **po probírkovém zásahu** (plánovaném i přirozeném) nebo při nižším obsahu vody v půdě ve srovnání s dnešními podmínkami. Vždy však významně **narůstá aktivita podzemních částí a kořenový systém výrazně expanduje**. **Tyto výsledky naznačují, že porostní díry, mezery, kotlíky budou v podmínkách EC dříve „zataženy“**. Z důvodu rozdílné reakce různých druhů dřevin na zvýšenou vzdušnou koncentraci CO₂ budou v této fázi upřednostňovány „citlivější“ rychleji rostoucí dřeviny, což bude **ovlivňovat biodiverzitu**. Körner (2006) uvádí, že pozitivní efekt zvýšené koncentrace CO₂ v atmosféře na přírůst biomasy dřevin se nesmí přeceňovat. Předpokládá, že dlouhodobý vyrovnaný nárůst biomasy bude stimulován ca do 10 % a v porostech vyššího stáří po dosažení vyrovnaného stavu (v kompetici o světlo, vláhu a živiny) nemusí být žádný. **Stimulace růstu dospívajících porostů urychlí dynamiku vývoje lesa a zvýší se zastoupení rychlerostoucích dřevin pravděpodobně s dopadem na celkové množství uhlíku v ekosystému. Doba obmýti se bude snižovat**. Pro ovlivnění celkového uhlíkového cyklu je třeba růstovou a produkční odpověď dřevin a lesních porostů, **z výsledků experimentů se zvýšeným CO₂ převést do kontextu hospodaření s uhlíkem v krajině ve smyslu jeho vázání a uchovávání v biomase, humusu a půdě, což je základem pro podporu dlouhodobé dynamiky uhlíkového cyklu a strategie využívání krajiny** (Lichter a kol. 2005).

Z požadavků kladených na lesního hospodáře se vedle trvalosti či zvyšování produkce, péče o dobrý zdravotní stav a stabilitu porostů i plnění požadovaných

ekosystémových služeb (funkcí lesů) dostává do popředí, v souvislosti se zvyšující se koncentrací CO₂ v ovzduší a globální změnou klimatu, požadavek na hospodaření spojené s novou funkcí lesa – „úložiště uhlíku“. Na tuto celospolečenskou poptávku lze reagovat úpravou hospodaření v lesích, která se odráží v pojmu „**Carbon Forestry**“ – uhlíkové lesnictví. Vedle snahy o klasické zvyšování produkce dřeva se tak jedná především o **zvyšování celkových zásob uhlíku v lesním ekosystému**, a to nejen v nadzemní biomase kmenů, ale i dalších částech stromu a především humusu a půdě. Dále Carbon Forestry podporuje pěstování rychlerostoucích dřevin jejichž biomasa může být využita jako surovina pro průmysl či zdroj energie namísto fosilního paliva, podporuje zamezení degradace půd a snížení emisí uhlíku apod. V rámci ČR byly odhadnuty zásoby biomasy a kvantifikovány potenciální možnosti hlavních typů ekosystémů poutat a ukládat vzdušný CO₂ v delším časovém období vyúsťující v následný návrh hospodářských opatření jak stimulovat dlouhodobý uhlíkový cyklus (Marek a kol. 2011).

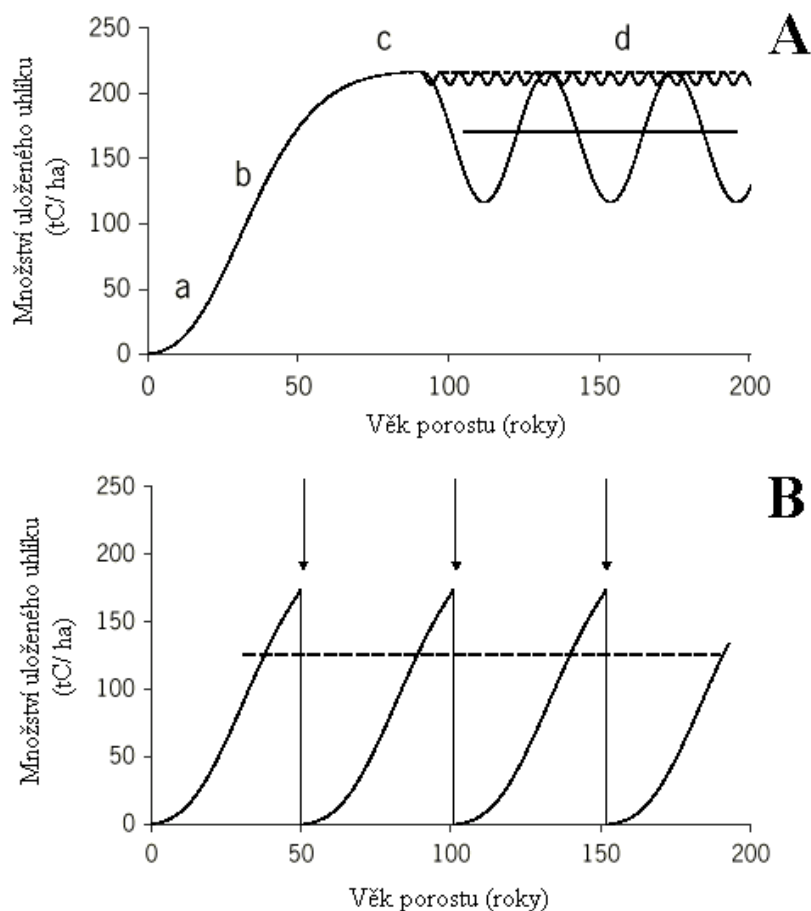
Hospodaření v lesích ČR je diferencováno na základě hospodářských souborů, resp. typů vývoje lesa. Jejich determinantou je růstové prostředí, které je předurčeno stanovištními podmínkami. Tyto teoreticky stálé parametry prostředí však v posledních desetiletích prokazují dynamické změny, které budou s vysokou pravděpodobností pokračovat, jak bylo uvedeno výše. Bude se měnit i chemizmus prostředí, jak dokládá z nedávné minulosti problematika imisí a kyselých dešťů, která se dodnes projevuje v lesních půdách nutričním ochuzením vynucujícím si až meliorační opatření v podobě vápnění nebo jiného přihnojování. Další změnou chemizmu prostředí je nadměrná depozice dusíku, která v našich podmínkách výrazně stimuluje růst dřevin. K těmto častěji regionálním faktorům díky industrializaci se přidávají aspekty související s globální změnou klimatických podmínek, jako je zvyšující se teplota a zvýšená frekvence klimatických extrémů. To jsou faktory, se kterými má rigidní způsob plánování a hospodaření v lesích problémy, a musí proto hledat adekvátní řešení. **Prioritním adaptačním opatřením je proto změna hospodaření k přírodě blízkým formám, což kromě věkové diversifikace znamená především urychlenou přeměnu dřevinné skladby porostů a zvýšení funkční struktury porostů.** Jakým způsobem se změní uhlíková bilance lesů, bude-li převážně intenzivní smrkové hospodaření postupně nahrazováno porosty s výrazně větším podílem listnáčů? K této otázce byla připravena analýza „Vývoj zásob uhlíku ve vazbě na změny stavu lesa v podmínkách lesního hospodaření České republiky“ včetně souboru navržených provozních opatření vedoucích ke stabilizaci porostů a uhlíkových zásob (Cienciala a kol. 2011).

Smrk s jedlí patří k dřevinám schopným vyprodukovat největší hektarový objem biomasy. Tyto dřeviny jsou sice z hlediska objemové produkce výhodné hospodářsky, nepředstavují však ve stejnověkových porostech dlouhodobě stabilní zásobu uhlíku. Dřeviny s různými ekologickými nároky (zejména na světlo) umožňují bohatší prostorovou výstavbu

lesa a příznivější funkční využití nadzemního i podzemního prostoru biomasou. S prostorovou výstavbou lesa úzce souvisí hustota lesa. Mírný pokles hustoty lesa (o cca 10-20 %) jsou, zejména stinné dřeviny, schopné kompenzovat světlostním přírůstem, takže se neprojeví poklesem zásoby uhlíku vázaného biomasou stromů. Ač snížení zápoje vede na jedné straně k rozvoji přízemní vegetace, na straně druhé vede ke změnám v obsahu, kvalitě a rozložení půdního humusu. Oba tyto procesy se promítají do uhlíkové bilance lesa. Na zásobách uhlíku a uhlíkové bilanci lesa se významně podílí i mrtvé dřevo ponechané k zetlení. Pro stanovení zásob uhlíku v mrtvém dřevě je, vedle jeho objemu a hustoty (závisející na druhu dřeviny z níž dřevo pochází), rozhodující stupeň rozkladu dřeva. Rychlost uvolňování uhlíku z mrtvého dřeva ponechaného k rozkladu závisí na druhu dřeviny a dimenzi mrtvého dřeva, porostním mikroklimatu, způsobu vzniku mrtvého dřeva (např. postupným chřadnutím, vlivem imisí, žírem kůrovce aj.). Podstatný vliv na dynamiku rozkladu mrtvého dřeva má odkornění, případně jeho kontakt s půdním povrchem. Ve vytrvalých orgánech přízemní vegetace (nadzemních i podzemních) je uhlík vázán dlouhodobě a podílí se tak na zásobách uhlíku vázaného lesním ekosystémem přímo.

Velikost zásoby uhlíku vázaného lesem lze zvyšovat hospodářskými opatřeními extenzivního i intenzivního charakteru. K těm prvním patří **zvětšování rozlohy lesní půdy zalesňováním ploch** (obvykle zemědělských či neplodných), které mají nižší schopnost deponovat uhlík než les (Marek a kol. 2011). **K intenzivním opatřením patří změny způsobu obhospodařování lesů** směřující k takové prostorové, druhové a v lesích pasečného typu i věkové skladbě lesa, která v konečném výsledku povede ke zvýšení průměrné hektarové zásoby biomasy a v ní vázaného uhlíku lesním ekosystémem jako celkem. **Aktuální výše uhlíkové zásoby není sama o sobě zárukou dlouhodobě příznivé uhlíkové bilance, pokud není dostatečně stabilní.** Stabilita uhlíkové zásoby v lesích **úzce souvisí s jejich funkční strukturou a ekologickou stabilitou.** Obecně platí, že ekologická stabilita ekosystémů a tím i stabilita uhlíku v nich vázaného, vzrůstá s diverzitou ekosystému. Současné lesní ekosystémy jsou proti přírodním lesům značně hospodářsky pozměněné. Tyto změny v naprosté většině případů znamenaly podstatné snížení druhové, věkové, prostorové i genetické diverzity lesa. Prognózy vývoje uhlíkové bilance lesů v České republice, zpracované v rámci projektu CzechCarbo, pracovali především s druhovou a věkovou diverzitou lesa, protože data o prostorové a genetické diverzitě lesních ekosystému nejsou v potřebném rozsahu zatím k dispozici (Cienciala a kol. 2011). Prostorová a genetická diverzita lesních ekosystémů se od druhové a věkové diverzity lesa do značné míry odvíjí. Pro obnovu genetické diverzity lesa má zásadní význam zvýšení podílu přirozených reprodukčních procesů při obnově lesních porostů na úkor obnovy umělé. Hospodaření zaměřené na posílení stability uhlíkové zásoby v lesích musí být do značné míry univerzální a splňovat i požadavky na plnění ostatních funkcí lesa. Cílem proto není

návrat k přirozené skladbě lesů. Cílová skladba lesa a s ní související prostorová výstavba lesa je hospodářskou modifikací skladby přirozené, která současně se zvýšením zásoby uhlíku v lesích zvyšuje i její stabilitu a při tom neohrožuje plnění ostatních funkcí lesa, zejména funkce produkční, na které závisí ekonomika lesního hospodářství.



Obr. 7. Rychlost akumulace uhlíku v nově založeném lesním porostu obhospodařovaném (A) s ohledem na jeho uhlíkový sink (tzv. Kjóto porost) a (B) současným holosečným způsobem. S ohledem na akumulaci uhlíku můžeme rozlišit fázi obnovy (a), dorůstání (b), stadium optima (c) a fázi udržování uhlíkového sinku (d). Dlouhodobé udržování uhlíkového sinku může mít rozdílnou dynamiku s menším (plná čára) nebo větším (přerušovaná čára) množstvím stabilně vázaného uhlíku. Tato fáze u holosečného hospodaření zcela chybí. Zdroj: IEA (2001).

Lesnický management zaměřený na změnu současné druhové skladby lesů, na skladbu cílovou, která je podstatně blíže skladbě přirozené a současně respektuje hospodářské zájmy vlastníků lesa, povede k mírnému zvýšení zásob uhlíku ve vytrvalé biomase stromů, velmi pravděpodobně k úbytku množství uhlíku v humusové vrstvě a stejné množství se uloží v minerální půdě, tudíž celková bilance se zřejmě příliš nezmění (Cienciala a kol. 2011). Přesunem uhlíku z dřevinného patra do humusové vrstvy a následně do

minerální vrstvy půdy se omezí emise uhlíku z lesních půd, k nimž dochází při rozkladu nadložního humusu, a to především při dočasném odlesnění, smýcení mateřského porostu při obnově násečným nebo holosečným způsobem při plošných rozpadech porostů a dlouhodobě při přechodu na vyšší zastoupení listnatých dřevin. **Změnou současné druhové skladby lesů na cílový stav tedy nelze v ČR očekávat navýšení celkové zásoby uhlíku v lesních půdách, avšak hospodářská opatření mohou směřovat ke stabilizaci uhlíku v půdě a zvýšené rezistenci proti nenadálým změnám a katastrofickým scénářům. Taková strategie by měla vyhovovat i úsilí čelit možným scénářům dopadů očekávané klimatické změny na naše lesy.**

Literatura

- Ainsworth E.A. and Long, S.P.: What we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂? *New Phytol.* 165: 351-372, 2005.
- Ayres M.P., Lombardero M.J.: Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of the Total Environment* 262 (3): 263-286, 2000.
- Ceulemans R., Mousseau M.: Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants. *New Phytologist* 127 (71): 425-446, 1994.
- Cienciala E., Apltauer J., Exnerová Z., Zatloukal V., Macků J., Henžlík V., Šefrna L., Janderková J., Marek M.V.: Les, uhlík a lesnictví ČR v podmínkách měnícího se prostředí. In: Marek M.V. a kol. Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. *Academia Praha*, 2011.
- Donald C.M.: The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17: 385-403, 1968.
- Dubrovský M., Pokorný R., Marek M.V. Scénáře vývoje globální změny klimatu. V: Marek a kol. Cyklus uhlíku v terestrických ekosystémech ČR, *Academia Praha*, 2011.
- Eamus, D., Jarvis, P.G.: The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. – In: Begon, M., Fitter, A.H., Ford, E.D., MacFadyen, A. (ed.): *Advances in Ecological Research*. Pp. 1-55. Academic Press, London – Tokyo – Toronto 1989.
- Farquhar, G.D., Caemmerer, S. von, Berry, J.A.: A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. – *Planta* 149: 78-90, 1980.
- Hruška J., Cienciala E., Moravčík P., Navrátil T., Hofmeister J.: Dlouhodobá acidifikace a nutriční degradace lesních půd – limitující faktor současného lesnictví I-IV. *Lesnická práce* 81, 2002.
- Hyvönen R, Agren G, Linder S, et al.: 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):463-80, 2007.
- Janouš, D., Dvořák, V., Opluštilová, M., Kalina, J. Chamber effects and responses of trees in the experimental using open top chamber. *Journal of Plant Physiology* 148: 332-338, 1996.
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P. et al.: Europe's terrestrial biosphere absorbs 7–12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science*, 300: 1538–1542, 2003.
- 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

- ORD, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (ed) Summary for policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- Kirschbaum M.U.F.: Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration. *Plant Biology* 6: 242-253, 2004.
- Körner C.: Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecological Applications* 10 (6): 1590-1619, 2000.
- Körner C.: Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. *The New phytologist*. 172(3): 393-411, 2006.
- Kostiainen K. Kaakinen S., Saranpää P., Sigurdsson B.D., Linder S., Vapaavuori, E.: Effect of elevated [CO₂] on stem wood properties of mature Norway spruce grown at different soil nutrient availability. *Global Change Biol.* 10 (9): 1526-1538, 2004.
- Košvancová M., Urban O., Šprtová M., Hrstka M., Kalina J., Tomášková I., Špunda V., Marek M.V.: Photosynthetic induction in broadleaved *Fagus sylvatica* and coniferous *Picea abies* cultivated under ambient and elevated CO₂ concentrations. *Plant Science* 177: 123–130, 2009.
- Larcher W.: Physiological plant ecology. In: *Physiology and stress physiology of functional groups*, 4th ed. Springer, Berlin, 2003.
- Marek M.V. Ekofyziologie produkční aktivity lesních dřevin. Habilitační práce, Vindeln, 138 s., 1992.
- Marek M.V. a kol.: Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. Academia Praha, 255 s., 2011.
- McKenzie R.I., Conner B., Bodeker G.E.: Increased summertime UV radiation in New Zealand in response to ozone loss. *Science* 285: 1709-1711, 1999.
- Luo, Y., Reynolds, J., Wang, Y., Wolfe, D.: A search for predictive understanding of plant responses to elevated [CO₂]. – *Global Change Biol.* 5: 143-156, 1999.
- Pokorný R., Tomášková, I., Havránková, K.: Temporal variation and efficiency of LAI in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research* 127 (5): 359-367, 2008.
- Pritchard, S.G., Rogers, H.H., Prior, S.A., Peterson, C.M.: Elevated CO₂ and plant structure: a review. – *Global Change Biol.* 5: 807-837, 1999.
- Sage, R.F.: A model describing the regulation of ribulose-1,5- biphosphate carboxylase, electron transport, and triose phosphate use in response to light intensity and CO₂ in C₃ plants. – *Plant Physiol.* 94: 1728-1734, 1990.
- Souček J., Tesař V.: Metodika přestavby smrkových monokultur na stanovištích přirozených smíšených porostů. *Recenzovaná metodika. Lesnický průvodce* 4, 37s., 2008.
- Špunda V., Kalina J., Urban O., Luis V.C., Sibisse I., Puertolas J., et al.: Diurnal dynamics of photosynthetic parameters of Norway spruce trees cultivated under ambient and elevated CO₂: the reasons of midday depression in CO₂ assimilation. *Plant Sci.* 168, 1371-1381, 2005.
- Urban O.: Physiological impacts of elevated CO₂ concentration ranging from molecular to whole plant responses. *Photosynthetica*. 41(1):9–20, 2003.
- Urban O., Janouš D., Pokorný R. et al. Glass domes with adjustable windows: A novel technique for exposing juvenile forest stands to elevated CO₂ concentration. *Photosynthetica* 9 (3): 95–401, 2001.
- Urban O., Košvancová M, Pokorný R., Tomášková I., Marek M.V. Podstata a ekofyziologické předpoklady ukládání uhlíku. V: Marek a kol. *Cyklus uhlíku v terestrických ekosystémech ČR*, Academia Praha, 2011.
- Vetter M., Wirth Ch., Böttcher H. et al.: Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories. *Global Change Biology*, 11: 810–827, 2005.
- Vinš, B. a kol.: Impacts of a Potential Climate Change on Forests of the Czech Republic. *Národní klimatický program*, 23. ČHMÚ, 142 s., 1997.
- Wirth Ch., Schumacher J., Schulze E.D.: Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 24: 121–139, 2004.

Woodward F.I., Kelly, C.K. Responses of global plant diversity capacity to changes in carbon dioxide concentration and climate. *Ecology Letters* 11: 1229-1237, 2008.