

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**

Přírodovědecká fakulta

Katedra rozvojových a environmentálních studií



**Lesní ekosystémy a klimatická změna**

Lukáš Lachman

Bakalářská práce

v oboru Environmentální studia a udržitelný rozvoj

Vedoucí práce: Doc. Ing. Ivo Machar, Ph.D.

Olomouc 2017

## **Prohlášení**

Já, Lukáš Lachman, prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Doc. Ing. Ivo Machara, Ph.D. Veškerou použitou literaturu jsem uvedl v seznamu citovaných zdrojů.

V Olomouci dne 10. 4. 2017

.....

Lukáš Lachman

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu práce Doc. Ing. Ivo Macharovi, Ph.D. za jeho čas, ochotu a všechny cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu psaní podporovali.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
Přírodovědecká fakulta  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš LACHMAN**  
Osobní číslo: **R14013**  
Studijní program: **B1301 Geografie**  
Studijní obor: **Environmentální studia a udržitelný rozvoj**  
Název tématu: **Klimatické změny a lesní ekosystémy**  
Zadávací katedra: **Katedra rozvojových studií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Bakalářská práce bude zaměřena na rešerši aktuální vědecké literatury, týkající se vlivů klimatických změn na lesní ekosystémy v globálním měřítku za posledních pět let. - Teoretická úvodní část práce souhrnným způsobem definuje základní termíny (definice lesa, lesní biomy, les jako ekosystém, antropogenní vlivy na globální cyklus uhlíku ve vztahu k lesním ekosystémům, význam lesa pro akumulaci uhlíku, trvale udržitelný management lesa) - Metodika práce popíše způsob analýzy datových zdrojů, způsob práce s WOS, vybraná použitá klíčová slova a zdůvodnění jejich výběru a vytčené výzkumné otázky, na něž budou formou rešerše hledány odpovědi - Formou rešerše budou analyzovány nejnovější publikované vědecké práce na Web of Science za posledních pět let, které se týkají problematiky klimatických změn ve vztahu k lesům - Výsledky rešerše budou rozděleny tematicky a dle jednotlivých lesních biomů se speciálním důrazem na biom opadavého lesa mírné klimatické zóny - Diskuse a závěr práce bude zaměřen na identifikování znalostních mezer a témat, vyžadujících další výzkum

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **10 - 15 tisíc slov**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Zelená kniha: Ochrana lesů a související informace v EU příprava lesů na změnu klimatu, Evropská komise.1.3.2010, Brusel, dostupné z:**

**[http://eagri.cz/public/web/file/48673/zelena\\_kniha\\_cesky.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/48673/zelena_kniha_cesky.pdf)**

**Janouš, D., Cudlín, P., Hadaš, P., Kulhavý J., Macků, J., Šišák, L., 2001:**

**Výzkum dopadů klimatické změny vyvolané zesílením skleníkového efektu na sektory hydrologie, zemědělství a lesního hospodářství a vliv klimatické změny na lidské zdraví. Bod C, Sektor lesního hospodářství. Závěrečná zpráva DP 02 projektu MŽP ČR VaV/740/1/00. Národní klimatický program ČR, Praha.**

**Kellomaki, S., Karjalainen, T., Mohren, F., Lapvetelainen, T. (editoři), 2000: Expert Assesment on the likely impacts of Climate Change on Forests and Forestry in Europe. EFI Proceedings No.34.**

**Kukrál, J. 2015: Adaptace lesů na klimatické změny a extrémní meteorologické jevy, České Budějovice: Centrum aplikovaného výzkumu a dalšího vzdělávání, o.p.s., Písek a nakladatelství JIH**

**BUČEK, A.: Globální změny klimatu a druhové složení lesů. Učební text pro Univerzitu 3. věku. MZLU v Brně, 2006.**

**ŠKVARENINA, Jaroslav, Matúš HRÍBIK, Jana ŠKVARENINOVÁ a Peter FLEISCHER. Globálne zmeny klímy a lesné ekosystémy. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2013. ISBN 978-80-228 -2595-5. Dostupné z:**

**[http://www.tuzvo.sk/files/3.3/katedry\\_lf/kpp/gkz\\_skvarenina-et-al-online.pdf](http://www.tuzvo.sk/files/3.3/katedry_lf/kpp/gkz_skvarenina-et-al-online.pdf)  
Web of science**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Machar, Ph.D.**  
Katedra rozvojových studií

Datum zadání bakalářské práce: **6. května 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. dubna 2017**

L.S.

prof. RNDr. Ivo Frébort, CSc., Ph.D.  
děkan

doc. RNDr. Pavel Nováček, CSc.  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 6. května 2016

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší vlivů klimatických změn na lesní ekosystémy v globálním měřítku. Mezi lesními ekosystémy a klimatem existuje velmi úzké propojení, neboť les má klíčový význam pro akumulaci atmosférického uhlíku. Je ale otázka, zda bude tuto funkci plnit i tváří v tvář probíhajícím klimatickým změnám. Narušení globálního uhlíkového cyklu, změna v koloběhu živin, rostoucí teplota vzduchu či nedostatek srážek a s ním související sucho a požáry jsou příklady událostí, které mají negativní dopad na lesní ekosystémy a jejich diverzitu. Práce bude zaměřena na identifikaci zásadních změn a podstatných hrozeb v kontextu jednotlivých lesních biomů (tropický deštný les, severský jehličnatý les, opadavý les mírných zeměpisných šířek) se speciálním důrazem na biom opadavého lesa mírné klimatické zóny. Cílem této práce je poukázat na již existující a budoucí možné negativní dopady klimatických změn na lesní ekosystémy a identifikovat nástroje, přispívající k jejich ochraně a adaptaci na změněné podmínky prostředí.

### **Klíčová slova:**

klimatická změna, globální oteplování, uhlíkový cyklus, srážky, teplota, požár, sucho, extrémní klimatické jevy, tajga, boreální lesy, tropické deštné lesy, lesy mírného pásu, opadavé lesy

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the research of impacts of climate change on the forest ecosystems at the global scale. There is a close connection between forest ecosystems and climate due to crucial function of a forest in accumulation of an atmospheric carbon. However, the role of such function is still questionable under climate change. The disruption of the global carbon cycle, changes in nutrient cycles, increasing air temperature, or deficit of precipitation, and related draught and fires represent some of the examples of the negative impact to forest ecosystems and their diversity. Presented work will focus on an identification of essential changes and substantial threats in context of individual forest bioms (tropical rain forest, boreal forest, temperate deciduous forest) with a special emphasis on the temperate deciduous forests biome. The aim of the presented work is to attract attention to the possible negative impact of climate change on forest ecosystems and to identify tools which provide protective contribution and adaptations to the altered environment.

## **Key words:**

climate change, global warming, carbon cycle, precipitation, temperature, wildfire, drought, extreme climatic events, taiga, boreal forests, tropical rainforests, temperate forests, deciduous forests

# Obsah

Seznam odborných pojmů .....	11
1 Úvod .....	13
2 Cíle práce a metodika .....	14
3 Lesní ekosystémy a klimatická změna .....	16
3.1 Vymezení základních pojmů .....	16
3.2 Typy lesních ekosystémů a jejich vazba na klima .....	17
3.3 Biom severských jehličnatých lesů .....	18
3.3.1 Charakteristika biomu .....	18
Obr. 1. Mapa rozšíření boreálního lesa (ostrava-educanet.cz) .....	19
Obr. 2. Biom boreálního lesa (wikipedia.org) .....	20
3.3.2 Koloběh uhlíku a živin .....	20
3.3.3 Permafrost a uhlíková bilance .....	22
3.3.4 Změny ve struktuře a druhové skladbě lesů .....	24
3.3.5 Oheň jako klíčový faktor ovlivňující proces změn .....	26
3.4 Biom tropických deštných lesů .....	27
3.4.1 Charakteristika biomu .....	27
Obr. 4. Biom tropického deštného lesa (Hospodářské noviny, autor: Wikipedia) .....	28
3.4.2 Vliv odlesňování na zásoby uhlíku .....	28
3.4.3 Lesní požáry a jejich vliv na biologickou diverzitu a emise uhlíku .....	30
3.4.4 Sezónní změny vegetačního pokryvu .....	31
3.4.5 Sucho .....	32
3.4.6 Další extrémní klimatické jevy .....	34
3.5 Biom opadavých lesů mírných zeměpisných šířek .....	36



3.5.1 Charakteristika biomu .....	36
Obr. 5. Biom temperátního opadavého listnatého lesa (fld.czu.cz) .....	37
Obr. 6. Mapa rozšíření opadavých lesů mírných zeměpisných šířek (ostrava-educanet.cz).....	37
3.5.2 Vegetační fenologie.....	37
3.5.3 Koloběh uhlíku v ekosystému .....	39
3.5.4 Míšení jako nástroj obnovy .....	41
3.5.5 Vliv CO <sub>2</sub> a živin na ekofyziologii .....	42
3.5.6 Reakce ekosystému na nedostatek vody .....	43
3.5.7 Hrozba snížení biodiverzity a nástroje její ochrany .....	46
4 Závěr.....	48
5 Zdroje .....	52

## Seznam Obrázků

obr. 1. Mapa rozšíření boreálního lesa .....	19
obr. 2. Biom boreálního lesa .....	20
obr. 3. Mapa rozšíření tropických deštných lesů.....	27
obr. 4. Biom tropického deštného lesa .....	28
obr. 5. Biom temperátního opadavého listnatého lesa.....	37
obr. 6. Mapa rozšíření opadavých lesů mírných zeměpisných šířek.....	37

## Seznam odborných pojmů

<b>sekvestrace uhlíku</b>	zachycování a ukládání atmosférického uhlíku do biomasy
<b>uhlíkový sink</b>	přírodní nebo umělý rezervoár, kde se hromadí a ukládá uhlík (dochází k jeho sekvestraci)
<b>NDVI</b>	(normalizovaný diferenční vegetační index) vyjadřuje vztah mezi odrazivostí v intervalu červené viditelné části spektra (600-700 nm) a v blízké infračervené části spektra (přibližně 700–900 nm)
<b>uhlíkové hladovění</b>	nedostatečná funkce fotosyntézy bez dostatečného zásobení vodou
<b>xylém</b>	(také dřevní cévní svazek nebo dřevo) je botanické označení pro druh pletiva cévnatých rostlin, které přivádí a rozvádí minerální živiny z kořenové soustavy rostliny směrem nahoru do jejích nadzemních částí
<b>kavitace</b>	vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí
<b>kambium</b>	rostlinné pletivo, pomocí něhož vzniká sekundární dřevo a sekundární lýko
<b>edifikátor</b>	převažující rostlinný druh, který rozhodujícím způsobem vymezuje strukturální a funkční povahu rostlinného společenstva
<b>fenologie</b>	studium viditelných fází růstového cyklu dřevin, jejich načasování, doba trvání a jejich vývoj v závislosti na lokálních podmínkách prostředí
<b>fotosynteticky aktivní radiace</b>	světlo, které rostliny využívají k fotosyntéze (400-700 nm)
<b>evapotranspirace</b>	Celkový výpar, který se vztahuje k určitému území. Tento celkový výpar se skládá z fyzikálního výparu (evaporace) a fyziologického výparu (transpirace).
<b>autotrofní respirace</b>	ztráta uhlíku dýcháním rostlin

<b>heterotrofní respirace</b>	ztráta uhlíku dýcháním heterotrofních organismů (organismy, které nejsou schopné přeměňovat anorganické látky na organické)
<b>čistá ekosystémová produkce</b>	hrubá primární produkce (množství uhlíku fixovaného fotosyntézou) minus ekosystémová respirace (autotrofní a heterotrofní)
<b>foliární výživa</b>	mimokořenová (listová) výživa
<b>ekofyziologie</b>	obor zabývající se zkoumáním vnějších vlivů na organizmy
<b>hydraulická vodivost</b>	schopnost prostředí vést vodu
<b>asimilace CO<sub>2</sub></b>	proces, během něhož se oxid uhličitý a voda mění na množství organických látek v rostlinné buňce

# 1 Úvod

Lesy jsou klíčovým terestrickým biotem Země a jejich vývoj bude mít na naši planetu významný vliv. Vzhledem k probíhajícím klimatickým změnám a očekávanému dalšímu oteplování je proto důležité pochopit, jaké jsou možné negativní dopady těchto globálních změn a jak jim předejít.

Téma lesních ekosystémů a klimatických změn jsem si vybral ze dvou důvodů. Předně proto, že mám rád lesy. Už jako malý chlapec jsem utíkal z ulic města a toužil po odpočinku, který mi nabízely. Naučil jsem se je milovat, a proto mi není jedno, jakým způsobem s nimi zacházíme. Bolí mě, že si lidé neváží krásy stvoření a ničí ho, ať už přímo či nepřímo, za účelem ekonomického zisku bez ohledu na to, kolik to bude přírodu stát a kolik škod to způsobí. Antropogenní činností způsobené globální oteplování je bezesporu hlavní příčinou bezprecedentních změn odehrávajících se v lesních ekosystémech a my potřebujeme vědět, jaký dopad budou mít měnící se klimatické podmínky na jejich budoucí existenci. Druhým důvodem, který mě vedl k výběru tohoto tématu, je fakt, že mě zajímá, co všechno je možné pro záchranu lesů udělat, a jaké máme v rukou prostředky a technologie ke zmírnění negativních dopadů klimatických změn a nalezení cesty k trvale udržitelnému hospodaření v lesích.

Ve své práci se chci věnovat dopadům klimatických změn na tři nejdůležitější lesní biomy – biot tropického deštného lesa, severského jehličnatého lesa a opadavého lesa mírných zeměpisných šířek. Právě tyto ekosystémy totiž hrají ve vazbě na klima klíčovou roli prostřednictvím regulace globálního uhlíkového cyklu. Pokud totiž lesní ekosystémy přestanou plnit svou přirozenou funkci úložiště uhlíku a začnou jej uvolňovat do atmosféry, dojde k jejímu opětovnému ohřívání, což přinese změny v četnosti a intenzitě extrémních klimatických jevů s negativními konsekvencemi v oblasti fenologie rostlin, posunu vegetačních pásů a areálů rozšíření druhů či zvýšené úmrtnosti lesní vegetace a s ní související značné ztráty biodiverzity.

## 2 Cíle práce a metodika

Cílem této práce je zanalyzovat dopady klimatických změn na lesní ekosystémy v globálním měřítku a nastínit jejich předpokládaný budoucí vývoj. Speciální důraz bude kladen na identifikaci hlavních hrozeb a rizik, ale také adaptivních strategií a mitigačních opatření, které máme k dispozici.

Samotná práce je rozdělena do tří kapitol, dle nejdůležitějších lesních biomů planety. První část je věnována biomu severských jehličnatých lesů. Popsán je jejich klíčový význam pro regulaci globálního uhlíkového cyklu a uvedeny jsou hlavní hybné mechanismy ekosystému, kterými jsou především požáry a tání permafrostu, doprovázené změnou v druhové skladbě lesů.

Druhá část se zabývá tropickými deštnými lesy. Informuje o problémech souvisejících s odlesňováním a vysokou variabilitou srážek a odpovídá na otázku, jak tropická vegetace reaguje na změnu klimatu vyvolané intenzivní požáry, sucha a další extrémní klimatické jevy.

Třetí, poslední část, je věnována opadavým lesům mírných zeměpisných šířek. Popisuje vliv rostoucích teplot vzduchu na fenologii rostlin a vliv měnící se koncentrace živin v ekosystému na jejich ekofyziologii. Zabývá se rovněž reakcemi vegetace na nedostatek srážek a identifikací nástrojů ochrany biodiverzity.

Aby bylo možné dosáhnout vytčených cílů práce, bylo nutné položit následující výzkumné otázky:

- Jak se projevuje klimatická změna v jednotlivých typech lesních ekosystémů?
- Jaké jsou nejvýznamnější dopady klimatických změn na lesní ekosystémy a s nimi spojená budoucí nebezpečí?
- Existují nástroje ochrany, které by pomohly lesním ekosystémům adaptovat se na změnu klimatu?

Na tyto otázky byly hledány odpovědi formou rešerše za použití dat z databáze Web of Science. Za pomoci klíčových slov (vyjmenovaných v abstraktu práce) byly vyhledány relevantní

vědecké články a shromážděny informace, které byly posléze zpracovány a následně interpretovány. Závěr práce shrnuje odpovědi, získané analýzou dat, a přináší přehled o oblastech vyžadujících další výzkum.

Vedle hlavního zdroje dat, kterým je databáze Web of Science, byly při vypracování práce dále použity relevantní knižní publikace. Práce je rovněž doplněna několika ilustračními obrázky a mapami a seznamem vysvětlivek vybraných odborných pojmů.

## 3 Lesní ekosystémy a klimatická změna

### 3.1 Vymezení základních pojmů

Les je společenstvo, ve kterém dominují stromy. Dle zákona č. 289/1995 Sb. se lesem rozumí lesní porost s jeho prostředím a pozemky určené k plnění funkcí lesa. Lesními porosty jsou stromy a keře lesních dřevin, které v daných podmínkách plní produkční nebo mimoprodukční funkci lesa (MŽP, 1995).

Ekosystém je zpravidla definován jako soubor organismů, žijících na určitém území, spolu s neživým prostředím. Podle zakladatelského pojetí H. G. Tansleyho (1935) je ekosystém „strukturním a funkčním celkem, složeným ze všech živých organismů a abiotického prostředí v daném časoprostoru.“ Je definován především svojí strukturou, dále koloběhem prvků a látek a tokem energií.

Lesní biomy mají klíčový význam pro koloběh a akumulaci uhlíku. Koloběh uhlíku je pro biosféru zásadní, neboť je neoddělitelně spjat s podnebím, koloběhem vody a živin a s produkcí biomasy. Prostřednictvím fotosyntézy se anorganický uhlík stává součástí organických molekul uhlovodíků, které jsou základní kostrou všech organických sloučenin.

Lesní ekosystémy jsou tak potenciálními „úložišti“ atmosférického uhlíku. Jejich klíčová úloha v globálním suchozemském cyklu uhlíku je dána především podílem rozlohy lesů na celkové ploše suchozemských ekosystémů. Dlouhověkost lesního porostu je potom příčinou toho, že se v lesích na jistou dobu ukládá značná část uhlíku, přičemž vedle depozitu v samotných stromech je nesmírně významný i depozit uhlíku v lesních půdách. „Můžeme se tedy na lesní ekosystémy oprávněně dívat jako na obrovskou soustavu pump, která dopravuje vzdušný uhlík z atmosféry do biomasy, půdy, a naopak jej dýcháním a uvolňováním z půdy do ovzduší vydává.“

Člověk ovlivňuje globální cyklus uhlíku už tisíce let. Působí na něj prostřednictvím zemědělství, lesnictví, průmyslové výroby, energetiky či dopravy, ale teprve v posledních dvou stoletích jsou antropogenní emise vzdušného uhlíku sledovatelné v měřítku přirozených uhlíkových toků. Tento prudký nárůst emisí je spojen především s těžbou a spalováním fosilních paliv, v posledních desetiletích je navíc umocněný rozsáhlým odlesňováním a další lidskou činností. Větší část uhlíku je sice zpětně pohlcena suchozemskými ekosystémy a oceány, přesto



však koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší neustále narůstá. Tento vývoj výrazně urychlil zpětnou vazbu globálního uhlíkového cyklu, což může mít negativní dopady na budoucnost Země.

Všechna měření potvrzují, že terestrická (suchozemská) biosféra pohlcuje více atmosférického uhlíku, než uvolňuje a plní tak funkci uhlíkového sinku (úložiště). V posledních desetiletích vykazují evropská lesní deponia uhlíku zřetelnou vzrůstající tendenci, což je patrně důsledek přihnojování přirozených i umělých ekosystémů zvyšujícím obsahem dusíku a oxidu uhličitého v atmosféře. Svým dílem k tomu ale přispívají také změny ve využívání území či změny hospodaření v lesích spojené se změnami věkové struktury (Marek, 2009).

Aby byly zachovány funkce lesních ekosystémů v podmínkách měnícího se klimatu, je nutné realizovat trvale udržitelný management lesa. Princip trvale udržitelného obhospodařování lesů je „taková péče o lesy a lesní půdu a využívání takovým způsobem a takovou rychlostí, aby byla zachována jejich biodiverzita, produktivita, regenerační kapacita, vitalita a schopnosti plnit v současnosti i v budoucnosti všechny ekologické, ekonomické a sociální funkce na místní, regionální a globální úrovni a to tak, aby nebyla způsobována újma jiným ekosystémům (Loketské městské lesy, 2012).“ Můžeme tedy říci, že „trvalost lesa je založena na trvalé produkční schopnosti lesní půdy, trvalé a soustavné obnově úmyslně vytěžených lesních porostů, vyrovnanosti těžeb dřeva, která je zajišťována metodami hospodářské úpravy lesa s cílem přizpůsobit objem těžby dříví objemu dřevní hmoty, která za určité období v lese přiroste a trvalé snaze lesníků o ekologickou stabilitu lesa (Machar, 2014, 38-39).“

### **3.2 Typy lesních ekosystémů a jejich vazba na klima**

Na naší planetě existuje celá paleta rozdílných ekosystémů, z nichž podstatnou část tvoří lesy. Mezi základní lesní biomy patří tropické deštné lesy, tropické poloopadavé a opadavé lesy, tvrdolisté (neopadavé) středozevní lesy, listnaté (opadavé) lesy mírných zeměpisných šířek a lesy boreální (tajga). Z hlediska ovlivňování globálního uhlíkového cyklu, který má zásadní význam pro vývoj klimatu, jsou klíčovými lesními ekosystémy biomy tropických deštných lesů, mírných opadavých lesů a tajgy. Na vztah klimatických změn a lesních ekosystémů je přitom nutné pohlížet jako na mechanismus pozitivní zpětné vazby. Nejde totiž jen o to, jak měnící se klima ovlivní lesní ekosystémy, ale také o to, jak tyto změny v tocích látek, energie a ve struktuře lesních společenstev ovlivní budoucí složení atmosféry a její další ohřívání. Dříve, než se

pokusím tyto vzájemné vazby objasnit, považuji za důležité uvést ještě několik obecných faktů, které je dobré mít na paměti.

Předně je potřeba si uvědomit, že změna klimatu mění lesy po celém světě. Některé navíc způsoby, které mohou podporovat další oteplování v regionálním či dokonce kontinentálním měřítku. Aby bylo možné předpovědět, jak se lesní ekosystémy mohou přizpůsobit měnícímu se klimatu, je proto důležité porozumět odolnosti každého druhu v rámci ekosystému vůči budoucímu modifikovanému prostředí (Brazhnik a Shugart, 2016).

Dále si potřebujeme všimnout, že rychlé oteplování klimatu vytváří nesoulad mezi lesními dřevinami a jejich přirozeným domácím prostředím. Schopnost stromů vyrovnat se s oteplováním tak závisí na jejich schopnosti fyziologicky se přizpůsobit vyšším teplotám. U široce rozšířených druhů existuje hypotéza, že jedinci mající domov v chladnějších klimatických podmínkách se na oteplování aklimatizují úspěšněji než jejich protějšky v teplejších krajích. Tato predikce byla testována na široce distribuovaných druzích *Eucalyptus tereticornis* a *Eucalyptus grandis*, které se přirozeně vyskytují mezi 15,5 až 38 stupněm jižní šířky ve východní Austrálii. V rámci experimentu bylo vypěstováno 21 rostlin v tepelných podmínkách odpovídajících letním teplotám místa jejich původu, a poté se uměle zvýšila teplota o 3,5 °C. Rostliny z chladnějšího místa původu reagovaly na oteplování zvýšením fotosyntetické kapacity a celkové listové plochy, což vedlo ke 20-60 % zvýšení růstu. Rostliny s proveniencí v teplých oblastech reagovaly na oteplování naopak snížením fotosyntetické kapacity a celkové listové plochy, což vedlo ke zpomalení růstu přibližně o 10 %. Tyto výsledky naznačují, že vnitrodruhové rozdíly ve schopnosti stromů reagovat na oteplování jsou předvídatelné – zatímco druhy vyskytující se přirozeně na chladnějších místech budou pravděpodobně z oteplování těžit, druhy obývající teplé klimatické oblasti mohou být ovlivněny negativně (Drake et al., 2015).

### **3.3 Biom severských jehličnatých lesů**

#### **3.3.1 Charakteristika biomu**

Boreální jehličnaté lesy neboli tajga jsou převládajícím zonobiomem mezi 50. až 70 stupněm severní šířky na severní polokouli. Rozkládají se na území Aljašky, Kanady,

Skandinávie, Ruska a Japonska (viz obr. 1). Kvůli vlivu mořských proudů a oceánických větrů jsou při západních pobřežích kontinentů posunuty severněji než v jejich východních částech. Na jižním okraji svého rozšíření sousedí s opadavým listnatým lesem mírných zeměpisných šířek či kontinentální stepí, na severu jsou ohraničeny polární hranicí lesa, který volně přechází do lesotundry a tundry (Ulbrichová, 2005).

Biom severských jehličnatých lesů je charakteristický dlouhými chladnými zimami a krátkými teplými léty. Rozpětí minimálních a maximálních teplot během roku může dosahovat 80-90 °C, což je více než v kterékoli jiné oblasti světa. Boreálním lesům dominují smrky, borovice, modřiny a jedle, mezi nimiž se rozkládají mokřadní ekosystémy jako rašeliniště a močály (viz obr. 2). Ekosystém je obecně velmi bohatý na vodu; obsahuje více vodních toků a jezer než jakákoliv jiná srovnatelně velká krajina na planetě (Greenpeace, 2015).



Obr. 1. Mapa rozšíření boreálního lesa (ostrava-educanet.cz)



Obr. 2. Biom boreálního lesa (wikipedia.org)

### 3.3.2 Koloběh uhlíku a živin

Boreální ekosystém je důležitým globálním rezervoárem uhlíku a útočištěm pro nejrůznější biologická společenstva. Přírodní disturbance, způsobené ohněm a hmyzem, ovlivňovaly boreální společenstva v průběhu celé historie, nyní však roste role člověkem způsobených disturbancí, které negativně ovlivňují uhlíkovou bilanci ekosystému.

Celkové množství boreální zásoby uhlíku a predikce jejího budoucího vývoje vykazují značnou míru nejistoty napříč regiony. Byl proveden výzkum, zabývající se komplexními odhady globálních uhlíkových zásob v severských jehličnatých lesích, a sestavena byla také stoletá předpověď uhlíkového toku. Nadále přetrvává velká míra nejistoty, avšak na základě dostupných údajů existují důkazy, že celková zásoba uhlíku byla podhodnocena. Zjistilo se, že je 3,8krát až 13krát větší, než bylo odhadováno, přičemž se předpokládá, že většina těchto zásob je uložena v půdách a rašeliništích. Vzhledem k tomu, že boreální lesy představují největší pozemní zdroj uhlíku na světě, způsob spravování těchto zásob bude mít dopad na budoucí dynamiku podnebí (Bradshaw a Warkentin, 2015).

V kontextu managementu globálního uhlíkového cyklu jsou přesné znalosti obsahu uhlíku v lesích významným tématem v současné ekologii lesa. Proto bylo prováděno měření nadzemních a půdních zásob uhlíku tmavé jehličnaté tajgy ve státní přírodní rezervaci Stolby poblíž ruského města Krasnojarsk. Výsledky byly porovnány s výpočty provedenými na základě dlouhodobé evidence zásob lesa a jeho druhové skladby. Také v tomto případě se ukázalo, že evidence silně podhodnotila zásoby uhlíku ve studované oblasti. Její odhady se pohybovaly mezi 25 a 73 tunami uhlíku na hektar lesa, zatímco studie naměřila hodnoty ve výši od 59 do 147 tun na hektar, v závislosti na konkrétních podmínkách daného místa. Měření bylo prováděno na živých stromech, stojících mrtvých dřevinách, živém porostu, klestí a stelivu. Bylo zjištěno, že poměr uhlíku v biomase k uhlíku v půdě se pohybuje od 99:1 (pro husté porosty) po 8:2 (pro řídké porosty). To odporuje výše zmíněnému předpokladu, že biomasa boreálních lesů obsahuje pouze 16 až 20 % celkových zásob uhlíku, zatímco zbytek uhlíku je obsažen v půdě (Gavrikov et al., 2016).

Při regulaci toku uhlíku v ekosystému boreálních a temperátních lesů hraje důležitou roli také věk lesního porostu. Mladé boreální lesy představují relativně malý, zato však vytrvalý zdroj uhlíku po dobu delší než 30 let od disturbance, zatímco lesy mírných zeměpisných šířek jsou sice vydatnějším zdrojem uhlíku během prvních 10 let, potom však dochází ke značnému snížení zásob, až dokud nedosáhnou dospělosti. Ruské severské lesy jsou největším souvislým pásem lesa na světě a představují 17 % celosvětového lesního porostu – proto mají zásadní roli v regulaci globálního uhlíkového cyklu. Na základě satelitních snímků byla sestavena mapa mladých lesů (maximální stáří stromů 27 let) mezi lety 2001 a 2012. Mapa zachycuje všechny tři největší bioklimatické vegetační zóny tajgy (severní, centrální a jižní Sibiř) s více než 85 % přesností a výsledky ukazují, že zhruba 9 % ruských lesů bylo na konci roku 2012 mladších než 30 let. Většina z nich se rozkládala v bioklimatické zóně centrální Sibíře. Na základě publikovaných odhadů čisté produkce ekosystému a vytvořené mapy lesů tato studie odhaduje, že mladé ruské lesy představují důležité oblasti propadu uhlíku (Loboda a Chen, 2017).

Podívejme se ještě do Severní Ameriky, konkrétně na Aljašku. Tam se v důsledku zvýšení závažnosti požárů souvisejících se změnou klimatu rozšiřuje listnatý porost v oblastech, kterým dříve dominoval smrk černý. Jehličnany a širokolisté opadavé druhy se liší v rychlosti růstu, vlivu na koloběh uhlíku a živin a akumulaci uhlíku v půdách. To naznačuje, že změny v dřevinné skladbě na Aljašce budou mít dopad na zásoby a toky uhlíku a živin. V jedné ze studií byl měřen

obsah uhlíku, dusíku a fosforu ve třech porostech smrku černého a břízy aljašské, která se zde objevila po jediném rozsáhlém požáru v roce 1958. Bříza vykazovala rychlejší koloběh uhlíku a živin včetně vyšší nadzemní čisté primární produktivity. Ekosystémové zásoby uhlíku byly podobné u obou druhů, nicméně u smrku černého se 78 % zásob uhlíku nacházelo v půdě, zatímco v porostech břízy byla většina zásob uhlíku koncentrována do nadzemní biomasy. Pomocí radiouhlíkové analýzy bylo zjištěno, že přibližně jedna čtvrtina uhlíku v půdní organické vrstvě smrkových porostů byla nahromaděna před požárem, zatímco v půdách březových porostů nebyly zásoby uhlíku před požárem pozorovány. Všechna tato zjištění naznačují, že dřeviny mají silný vliv na koloběh uhlíku a živin v boreálních lesích a jejich skladba může mít dlouhodobé důsledky pro dynamiku uhlíku a živin v ekosystému (Melvin et al., 2015).

Obecně lze říci, že reakce severoamerických ekosystémů na zvyšující se oteplování v posledních desetiletích jsou prostorově heterogenní a částečně nejisté. Většina oblastí s nižší průměrnou roční teplotou vzduchu, jako je právě tajga, však zaznamenala v důsledku dlouhého podzimu a časného nástupu jara výrazné oteplení, což vedlo k tomu, že se tyto ekoregiony podílely na 92 % zvýšení hrubé primární produktivity Severní Ameriky během posledních tří dekad (Mekonnen et al., 2016).

### **3.3.3 Permafrost a uhlíková bilance**

Severské jehličnaté lesy jsou jednou z nejrychleji se oteplujících oblastí světa. Významné zvýšení průměrných ročních teplot vzduchu, indexu mrznutí a indexu tání má značný vliv na oblasti permafrostu a přilehlých ekosystémů.

Současná klimatická změna snížila prostorový rozsah a tloušťku permafrostu v mnoha regionech. Rychlé tání permafrostu způsobuje výrazné změny v krajinách, kterým dominuje tajga. V kanadských Northwest Territories se neustále zmenšují zalesněné plochy rašelinišť a krajina pomalu přechází do nelesních mokřadů. Expanze mokřadů má za následek hydrologické propojení mnoha povodí a pozorován je zvýšený povrchový odtok. Kromě toho má snížení plochy zalesněných rašelinišť za následek čistou ztrátu boreálních lesů a souvisejících ekosystémů. Mezi lety 1970 a 2012 byla v Northwest Territories prováděna studie zkoumající základní procesy, které přispívají k tání permafrostu a přechodu krajiny z rašelinišť na mokřadní

komplexy. Naměřená klimatická data byla použita k simulaci bilance povrchové energie mokřadů a rašelinišť. Zjistilo se, že povrchová teplota půdy úzce souvisí s prouděním podpovrchových vod, a tudíž přepravou energie potřebné k tuhnutí či rozmrazení povrchu. Kromě toho simulace naznačují, že vývoj krajiny, určující táním permafrostu, se chová jako pozitivní mechanismus zpětné vazby. Zemský povrch absorbuje větší množství energie a dále tak podporuje jeho tání (Kurylyk et al., 2016).

Změny ve složení a struktuře kanadských boreálních lesů mohou vést k významným dopadům na regionální i globální klima. Mezi lety 2000 a 2014 byly zaznamenány výrazné změny v pokrytí území lesy. Lesů neustále ubývá a oxid uhličitý, vázaný v jejich biomase, se uvolňuje do atmosféry. Hlavními příčinami tohoto odlesnění jsou, přehlédneme-li těžbu ropy z dehtových písků, zejména tání permafrostu, zintenzivnění požárů a sekundární sukcese po těchto disturbancích (na jižní hranici permafrostu je ztráta lesů v důsledku jeho tání převážena růstem nové generace lesa po požáru). Tato zjištění zdůrazňují důležitost tání permafrostu, jakožto klíčového procesu řízení změn v boreálních lesích v průběhu posledního desetiletí (Helbig et al., 2016).

Podívejme se nyní do Ruska, abychom demonstrovali další z klíčových dopadů globální klimatické změny. Ve východní Sibiři byly v posledních několika desetiletích posunuty areály rozšíření mnohých živočichů a rostlin, což může být předzvěstí posunu vegetačních pásů. Oblasti s výskytem půdního ledu jsou obzvláště citlivé na oteplování klimatu a zvýšení průměrné roční teploty vzduchu na Sibiři o 2-3 °C v průběhu posledních tří desetiletí má za následek nárůst teploty povrchu o 0,4-1,3 °C v horní části permafrostu, což vede k rychlému nárůstu hloubky aktivní vrstvy a k prohloubení negativních kryogenních procesů. Pokud jde o emise skleníkových plynů v tajze centrálního Jakutska, vykazují vysoké hodnoty a vysokou prostorovou variabilitu. Vlhké nivní půdy a mělká jezera uvolňují obrovské množství metanu, téměř srovnatelné s emisemi z tropických rašelinišť (Desyatkin et al., 2015).

Z výše uvedeného vyplývá, že permafrostem ovlivněné ekosystémy jsou důležitou součástí globálního uhlíkového cyklu. Proto byla provedena studie, která zkoumala ukládání uhlíku ve dvou souvislých oblastech severovýchodní a východní Sibiře: tundry v okolí Kytalyku a tajgy na rozhraní Spasskaya Padu a Nelegeru. Pro obě prostředí platí, že naprostá většina uhlíku je uložena v půdě (86%), přičemž samotný rozsah zásob uhlíku v krajině je ovlivněn především přítomností termokrasových depresí. Zatímco v tundře je zásoba uhlíku ovlivňována

periglaciálními geomorfologickými prvky, v tajze hraje důležitější roli struktura půdy a lesní sukcese.

Abychom byli schopni předpovědět zranitelnost krajiny vůči předpokládané změně klimatu, je zapotřebí detailní znalost skladování uhlíku v ekosystému a rozložení ledu v krajině. Je nepravděpodobné, že by vegetační dynamika byla schopná nahradit ztrátu uhlíku uvolněného táním permafrostu. Změna zásob organického uhlíku v půdě tak představuje největší potenciální změny v koloběhu uhlíku (Siewert et al., 2015).

### **3.3.4 Změny ve struktuře a druhové skladbě lesů**

Pochopení procesů dlouhodobé dynamiky boreálních lesů může poskytnout informace pro předpověď budoucího složení vegetace v měnících se podmínkách prostředí. Proto je důležité uvědomit si, jak se vyvíjela a čím byla řízena vegetace v holocénu; konkrétně se zaměříme na západní hranici ruské tajgy, kde byla za tímto účelem provedena případová studie.

Pro rekonstrukci dynamiky místní vegetace v průběhu holocénu byly použity záznamy z fosilního pylu a vrstev jehličí ze čtyř malých kotlin a dvou jezerních lokalit na Sibiři. Klíčové bylo posouzení relativní důležitosti potenciálních hnacích mechanismů vývoje vegetace, kterými jsou teplota, lesní požáry a vlhkost. Všechny dominantní druhy stromů ruské tajgy, jako je smrk norský a modřín sibiřský, zde byly přítomny už 10 000 let před naším letopočtem. Stálá holocenní přítomnost sibiřského modřínu ve třech kotlinách naznačuje rychlou postglaciální imigraci druhu v severní Evropě. Přítomen byl i norský smrk, avšak ve sledovaných lokalitách nebyl dominantním druhem. Jeho expanze proběhla až později mezi lety 8000 a 7000 před naším letopočtem, kdy došlo k rozsáhlé změně ve struktuře lesa kvůli ústupu bříz, borovic a výše zmíněných sibiřských modřínů. Výsledky pylových záznamů ukazují, že dynamika lesních ekosystémů ve zkoumané oblasti byla primárně určována teplotou, avšak v krátkodobém měřítku hrály důležitou roli místní faktory, zejména lesní požáry. Porovnání pozorovaných lokalit odhaluje význam místních činitelů pro vývoj severovýchodních lesů a lze proto předpokládat, že budoucí reakce tajgy na změnu klimatu bude převážně záviset na místních podmínkách (Kuosmanen et al., 2016).

Regionální studie na Sibiři prokázaly, že oteplování klimatu vyvolává od konce 20. století změny v rozložení vegetace a lesních typů. Měnící se klima pravděpodobně povede v průběhu



21. století k redistribuci suchozemských ekosystémů a jednotlivých druhů. Pomocí rozsáhlých bioklimatických modelů vegetačních zón byla modelována potenciální změna vegetace a lesních typů na Sibiři do roku 2100. V předpokládaném teplejším a sušším podnebí se očekává výrazný úbytek sibiřských boreálních lesů a jejich posun směrem na severovýchod. Na jejich místo se posunou lesostepi, stepi a listnaté lesy, které by mohly do roku 2090 zabírat většinu Sibiře. Dřeviny odolné vůči požárům a nedostatku vody, například borovice lesní či modřín sibiřský, budou v novém prostředí konkurenčně silnější než vlhkomilné dřeviny, jako je borovice a jedle sibiřská či sibiřský smrk. Zvýšená úmrtnost stromů kvůli horku, suchu, hmyzu a dalším faktorům (zejména na jižní hranici lesa a ve vnitrozemí Jakutska) povede k rozsáhlejším požárům, které urychlí přechod k novému typu vegetace a k nové rovnováze (Tchebakova et al., 2016).

Další studie v oblasti Sibiře se zabývají otázkou změny vzrůstu stromů. Tak, jako jsou používány bioklimatické modely pro simulaci případné změny v distribuci lesních typů, byly rovněž vyvinuty nové regresní modely pro simulaci změn výšky stromů v oteplovacím se klimatu 21. století v náhorních plošinách a horách centrální Sibiře. Cílem bylo zjistit, jak se změní výška stromů v různých typech lesů v budoucích klimatických podmínkách. Výsledkem bylo několik scénářů: simulace předpovídá 80-90 % pokles výšky stromů v lesotundře a tundře, 30 % pokles v lesním prostředí a naopak až 400 % nárůst v lesostepích a 2200 % nárůst ve stepích. Za těchto okolností by lesostepi a stepi postupně pokryly 55 % centrální Sibiře. Při dostatečně vlhkých podmínkách by přitom jižní a centrální oblast severských jehličnatých lesů mohla z oteplování klimatu těžit. Předpokládá se totiž nárůst počtu stanovišť vhodných pro vysoce produktivní lesy (stromy o výšce 30-40 m) na úkor stanovišť vhodných pro lesy méně produktivní (stromy o výšce 10-20 m). V reakci na extrémnější klimatické podmínky by se plocha těchto vysoce produktivních lesů mohla zvýšit o 10-25 %. Nárůst výšky stromů o 10 metrů byl při simulaci zaznamenán na 35-50 % současné lesní plochy centrální Sibiře. V potenciálním extrémně teplém klimatu by se však vysoké stromy (25-30 m) vyskytovaly na konci 21. století pouze na 8-12 % rozlohy sibiřských lesů. V lesostepích by stromy o výšce 30-40 metrů mohly při dostatečné vlhkosti pokrývat přibližně 15 % území (Korets et al., 2016).

### 3.3.5 Oheň jako klíčový faktor ovlivňující proces změn

Ze všeho, co již bylo uvedeno, vyplývá, že důležitým faktorem ovlivňujícím koloběh uhlíku a změnu vegetace v ekosystému je oheň. Oheň je primární hnací silou dynamiky boreálních lesů. Zintenzivnění četnosti požárů v důsledku změny klimatu může způsobit změnu v druhovém složení lesa směrem ke snížené dominanci jehličnanů a většímu množství listnatých dřevin, což může mít vliv na regionální a globální klima. V některých severoamerických boreálních lesích je tento posun již pozorován a je primárně přičítán změnám podmínek v této oblasti. Aby bylo možné lépe porozumět důsledkům častějších požárů v boreálních lesích, byla provedena studie, zaměřená na regeneraci vegetace na pěti spáleništích centrální sibiřské tajgy. Ve snaze kvantifikovat význam místních podmínek a dostupnosti semen pro regeneraci se prokázalo, že hlavním faktorem, určujícím skladbu a hustotu lesa vznikajícího po požáru, bylo omezené množství přežívajících semen stálezelených jehličnanů na spálených plochách. Samotné podmínky daného místa (např. hloubka organické vrstvy) měly rovněž významný, přesto však slabší vliv. Na základě těchto informací lze předpokládat, že sekundární sukcese povede k dominanci tvrdých listnatých dřevin, které budou doprovázené stálezelenými jehličnatými stromy v různých stádiích sukcese. Tento požárem vyvolaný posun směrem k listnaté vegetaci bude mít pravděpodobně vliv na povrchové albedo, koloběh uhlíku, a tím i na klima (Tautenhahn et al., 2016).

Očekávané rostoucí množství požárů bude mít významný dopad také na boreální lesy Severní Ameriky. Za pomoci třinácti klimatických modelů byla provedena simulace vývoje aljašských a kanadských lesů, jejímž cílem bylo odhadnout rozlohu spálených ploch v polovině 21. století (2046–2065). Téměř všechny modely předpovídají významné zvýšení požárem spálené plochy v západní Kanadě a na Aljašce, přičemž střední hodnoty těchto odhadů se pohybují v rozmezí od 150 do 390 %, v závislosti na regionu. Tak zásadní změny jsou připisovány zejména vyšším teplotám ovzduší na povrchu. I pro centrální a jižní kanadské regiony předpovídají modely nárůst spálených ploch, a to o 45-90 %. Výjimku tvoří Taiga Plains, vlhká a zalesněná oblast na západě Northwest Territories v okolí řeky Mackenzie, kde se předpokládá pokles spálených ploch o 50 %. Na severu Kanady se neočekávají žádné výrazné změny v důsledku protichůdných účinků teplejšího počasí a vlhčích podmínek. Ve všech oblastech

severoamerických boreálních lesů se pak předpokládá, že častější požáry zvýší koncentraci přízemního ozonu, což povede k většímu znečištění atmosféry (Yue et al., 2015).

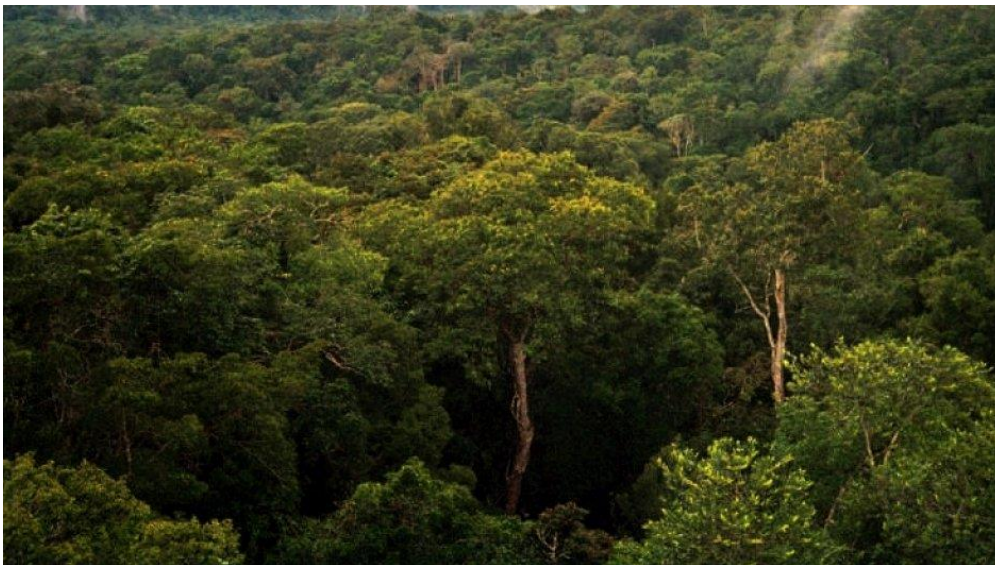
## 3.4 Biom tropických deštných lesů

### 3.4.1 Charakteristika biomu

Tropické deštné lesy se vyskytují v rovníkových oblastech mezi obratníky Raka a Kozoroha. Nejrozsáhlejším je Amazonský prales, následovaný pralesy střední Afriky a jihovýchodní Asie (viz obr. 3). Tato oblast je charakteristická vysokou průměrnou teplotou vzduchu (25–28 °C), vysokými úhrny slunečního záření a dostatečným množstvím srážek (více než 1 500 mm ročně, ale i 10 000 mm ročně). Teplotní rozdíly mezi dnem a nocí jsou malé a poměrně stálá je i půdní teplota. Je zde obrovská druhová rozmanitost stromů, rostlin i živočichů (viz obr. 4). Typický je nedostatek světla při zemském povrchu, a proto je v bylinném patře schopno přežít pouze relativně malé množství druhů. Život je v tropických deštných lesích soustředěn především v korunách stromů, kde je intenzita dopadajícího slunečního záření nesrovnatelně vyšší. Pro biom tropických deštných lesů je dále charakteristická nejvyšší produkce biomasy a nízký obsah živin v půdě (Divíšek a Culek, 2013).



Obr. 3. Mapa rozšíření tropických deštných lesů (ostrava-educanet.cz)



Obr. 4. Biom tropického deštného lesa (Hospodářské noviny, autor: Wikipedia)

### 3.4.2 Vliv odlesňování na zásoby uhlíku

Tropické lesy hrají klíčovou roli při regulaci terestrického uhlíkového cyklu a zmírňování klimatických změn díky ukládání uhlíku ve dřevě. Zůstává však značná nejistota ohledně toho, zda budou i nadále působit jako úložiště uhlíku tváří v tvář zvýšenému tlaku z rozšiřování lidské činnosti. Kácení a vypalování tropických lesů je dnes na denním pořádku, díky tomu se do atmosféry dostává ohromné množství oxidu uhličitého. Nastává tak paradoxní situace, kdy deštný les, který za normálních okolností  $\text{CO}_2$  pohlcuje, ho nyní svým způsobem produkuje a vyrábí.

V Sierra Leone se nachází národní park Gola Rainforest, na jehož území se rozkládá jeden z největších neporušených tropických vlhkých lesů v západní Africe. V srdci zdejšího pralesa byl proveden průzkum bazální plochy stromů, jejich druhové rozmanitosti, předchozích disturbancí spojených s těžbou dřeva a také obsahu živin v půdě, který je hlavním limitujícím faktorem produkce dřeva. Nejprve byl statisticky modelován průměrný růst jednotlivých stromů, aby bylo možné odhadnout nadzemní produkci dřeva na předem stanovených 142 trvalých lesních pozemcích. V celé síti pozemků se jako hlavní determinant nadzemní produkce dřeva ukázala bazální plocha kmene, z čehož vyplývá, že v hustě zalesněném prostoru byla naměřena nejvyšší míra přírůstu nadzemní dřevní hmoty. Pozitivně souvisely s produktivitou také druhová diverzita stromů a obsah fosforu v půdě. Naproti tomu minulé těžbařské aktivity, které odstranily

mnoho velkých stromů, ovlivnily produkci dřeva negativně. Výsledky ukazují, že těžařské aktivity mohou mít dlouhodobý dopad na schopnost lesa sekvestrovat a ukládat uhlík, a proto je ochrana původních tropických lesů naprosto nezbytná (Jucker et al., 2016).

Odhad ztrát uhlíku způsobených selektivní těžbou dřeva v tropických lesích je poměrně dobře zdokumentovaný, neboť je známý objem vytěžené dřevní hmoty. Méně však víme o osudech souběžně poškozených stromů, které zpočátku přežívají. Reakce stromů na poškození těžbou je důležitým a přehlíženým ekologickým procesem, který postihuje 2-5 % všech existujících tropických stromů. Proto byly studovány reakce poškozených stromů amazonského pralesa ve východní Bolívii. Nejvyšší úmrtnost byla zaznamenána hned v prvním roce po těžbě, potom postupně klesala. Studie naznačuje, že pokud poškozený strom přežije 8 let, pak je jeho mortalita přibližně stejná jako u zdravého stromu. Dále bylo zjištěno, že poškození koruny nejvíce snížilo tempo růstu, zatímco ohnuté stromy vykazovaly nejvyšší míru úmrtnosti. Překvapením však zůstává fakt, že poškozené stromy přežily sucha lépe než stromy nepoškozené, snad kvůli jejich blízkosti k vykáceným mýtinám, kde je snížená nadzemní a podzemní kompetice o omezené zdroje (Shenkin et al., 2015).

Stejně jako v tajze je i v tropických lesích značná část uhlíku uložena v půdě. Vliv odlesňování a s ním souvisejících změn ve využití zemědělské půdy na zásoby půdního organického uhlíku je proto velmi důležitý. V Amazonii byly shromažďovány poznatky o změnách v těchto zásobách po založení pastviny nebo orné půdy. Datový soubor tvořilo 21 převážně synchronních studií z 52 lokalit napříč Brazílií, Kolumbií, Francouzskou Guyanou a Surinamem. Ukázalo se, že pastviny (průměrný věk 17,6 let) měly mírně vyšší zásoby půdního organického uhlíku než lesy (v průměru o 6,8 %), zatímco orná půda (průměrný věk 8,7 let) měla zásoby nižší (v průměru o 8,5 %). Zatímco bylo prokázáno, že způsob obhospodařování pastvin nemá na zásoby uhlíku žádný významný vliv, vliv orby na obsah organického uhlíku v půdě je nadále nejasný (Fujisaki et al., 2015).

Při určování nadzemních lesních zásob uhlíku v tropických lesích jsou klíčovými faktory sezónnost, roční srážky a průměrná roční teplota. Změna v těchto klimatických proměnných pravděpodobně vyvolá pokles zásob uhlíku v tropických lesích. Tato ztráta může být způsobena poklesem průměrné velikosti stromu a změnou v rozšíření dřevin (upřednostňovány budou druhy menšího vzrůstu). Odhaduje se, že oteplováním klimatu vyvolané emise oxidu uhličitého z lesů

do atmosféry by mohly být srovnatelné s emisemi spojenými s antropogenním odlesňováním (Vieilledent et al., 2016).

### **3.4.3 Lesní požáry a jejich vliv na biologickou diverzitu a emise uhlíku**

V důsledku lidského hospodaření s půdou, které používá oheň jako nástroj, a kvůli abnormálním suchům se v posledních desetiletích mnohé tropické lesy staly náchylnější k opakujícím se požárům s negativními důsledky pro biologickou rozmanitost. Otázkou však zůstává, zda mají jednorázové a opakující se požáry stejný dopad na všechny biologické druhy, nebo zda jsou patrné výraznější mezidruhové rozdíly. V Amazonské pánvi byl proto studován vliv ohně na populace mravenců, brouků, ptáků, mladých stromků a stromů. Opakované požáry mají velký vliv na lesní strukturu, protože způsobují redukci biomasy živých stromů a počtu lián, které zásadním způsobem přispívají k celkové druhové bohatosti tropických lesů. Řidší stromovou klenbou však proniká k povrchu lesa více světla, což umožňuje růst většího množství mladých stromků. Podle předpokladů měly opakující se požáry větší vliv na alfa diverzitu než požáry jednotlivé, s beta diverzitou je to však komplikovanější. Zatímco beta diverzita mravenců, nekroužkovaných ptáků a stromů nebyla ovlivněna frekvencí požárů, beta diverzita brouků, kroužkovaných ptáků a mladých stromků se změnila. Zdá se však, že struktury živočišných společenstev byly více než skrze samotný oheň ovlivněny nepřímo, prostřednictvím změny vegetace (Silveira et al., 2016). Ze všech zjištěných poznatků vyplývá, že rozsáhlejší požáry a další dopady klimatické změny v kombinaci s všudypřítomnými změnami ve využívání půdy představují hlavní hrozbu pro biologickou rozmanitost v odlesněných oblastech Amazonie. Kombinace odlesňování a změny mikroklimatu zde může změnit strukturu hmyzích i ptačích společenstev (Vieira et al., 2015).

Lesní požáry spojené s těžbou dřeva se nyní staly jednou z nejrozsáhlejších příčin znehodnocování lesů, mající vliv na rovnováhu mezi emisemi a sekvestrací uhlíku v nížinných tropických pralesech jihovýchodní Asie (Osone et al., 2016). Zejména kácení a vypalování lesů za účelem zakládání plantáží palmy olejné představuje klíčový ekologický problém s významným negativním dopadem na biologickou diverzitu deštného lesa. Trpasličí slon, medvěd malajský, orangutan bornejský a další živočichové včetně mnohých endemitů ztrácejí svůj domov. Plantáže monokultur palem spotřebují velké množství vody, takže podzemní voda mizí, krajina vysychá a

půda eroduje. Ztrácí se její retenční kapacita a v období dešťů tak dochází k rozsáhlým záplavám. A na pozadí toho všeho, co je možné spatřit okem, se z vykácené dřevní hmoty i obnažených půd uvolňuje obrovské množství CO<sub>2</sub>, který volně uniká do atmosféry a ta se nadále ohřívá.

### 3.4.4 Sezónní změny vegetačního pokryvu

Rovníkové oblasti jsou výrazně ovlivňovány teplotním a srážkovým režimem. Změny teploty vzduchu a změny v chodu srážek tak mohou vyvolat závažné důsledky pro tropickou vegetaci. Důležitým zdrojem informací o reakci tropických deštných lesů na tyto změny jsou letokruhy. Studie letokruhů poskytují důležité poznatky pro pochopení citlivosti tropických stromů na změnu klimatu a dopadů globálních změn na tropické lesy. Letokruhy ukazují, že průměrná délka života tropických dřevin je 200 let a pouze několik druhů se dožívá více než 500 let. Tyto hodnoty jsou podstatně nižší, než se odhadovalo. Neustále se také zvyšují rozdíly v délce dožití u stromů stejného druhu kvůli rozdílné dostupnosti světla, vody a živin. Analýzy naznačují, že růst tropických dřevin je středně citlivý na množství srážek (v období sucha snížený růst) a teplotu (v horkém období snížený růst). Studie letokruhů dále dokládají zvýšení efektivity využívání vody, s největší pravděpodobností kvůli rostoucímu množství atmosférického CO<sub>2</sub> (Brienen et al., 2016).

Pojďme se nyní podívat do střední Afriky, kde se rozkládá druhý největší světový tropický prales po Amazonské pánvi. Ve srovnání s Amazonií přijímá africký deštný les mnohem méně deště (přibližně 1500 mm/rok), přičemž srážky jsou rozděleny do dvou období dešťů, které jsou od sebe odděleny dvěma obdobími sucha. V tropických lesích střední Afriky je rovněž zaznamenáno výrazně pomalejší tempo odlesňování než v kterékoli jiné oblasti výskytu tropické vegetace, takže hlavní hrozbou pro příští desetiletí by mohla být změna klimatu. Vzhledem k tomu, že reakce afrického tropického lesa na sluneční cyklus a úhrn srážek je jen málo známá, byla provedena analýza těchto faktorů v cílové oblasti nacházející se mezi 0-5° severní šířky a 12-19° východní délky za účelem lépe porozumět tomu, jak každoroční klimatický cyklus ovlivňuje zeleň stromů. Výsledkem výzkumu jsou tři hlavní závěry. Zaprvé: denní cyklus je klíčovým bodem pro pochopení ročního cyklu srážek a přicházejícího slunečního záření na zemský povrch. Zadruhé: období sucha se sobě navzájem nepodobají a stejně je tomu i u období

dešťů; každé období se vyznačuje jinou mírou oblačnosti, slunečního záření a dešťových srážek, a tedy také jinou míru přírůstku či úbytku zeleně. Zatřetí: zatímco hlavní období dešťů (březen-květen) se zdá být zejména díky příznivým světelným podmínkám optimální pro růst zeleně, rozhodujícím faktorem v hlavním období sucha (prosinec-březen) je dostupnost vody. Pokud jde o krátké období sucha (červen-srpen) a dešťů (září-říjen), hlavním limitujícím faktorem je dostupnost světla (Philippon et al., 2016).

V regionálním měřítku se naprostá většina studií zaměřuje na oblast Amazonie a jen velmi málo jich zkoumá tropické pralesy v jihovýchodní Asii, které jsou velmi důležitou oblastí tropické vegetace. Proto se budeme věnovat výsledkům výzkumu časoprostorové variability fotosyntetické aktivity vegetace v tomto regionu. V lesích s výrazným sezónním cyklem (střídání období dešťů a sucha) byl zjištěn konzistentní vztah mezi normalizovaným diferenčním vegetačním indexem (NDVI) a klimatickými faktory (srážky, teplota a sluneční záření). Všechny datové soubory ukázaly, že míra zeleně během období sucha trvale klesala. Tento výsledek je v přímém kontrastu s výsledky naměřenými v Amazonském pralesu, kde byl během období sucha pozorován významný přírůstek zeleně. Pokud jde o období dešťů, byly v tropických lesích jihovýchodní Asie pozorovány různé sezónní rozdíly v NDVI, ale jeho maximální hodnota byla pozorována na konci období dešťů. Všechny výsledky tak směřují k závěru, že lesy v jihovýchodní Asii mají v období sucha nedostatek vláhy, což upozorňuje na zranitelnost vůči budoucímu zvýšení intenzity události El Niño a vůči zvyšující se evapotranspiraci v důsledku rostoucích teplot (Zhang et al., 2016).

### **3.4.5 Sucho**

Předpokládá se, že změna klimatu zvýší výskyt extrémního sucha, jehož následkem je zvýšená úmrtnost tropických stromů. Tato úmrtnost je vyvolaná dvěma hlavními mechanismy: hydraulickým selháním a uhlíkovým hladověním. Existují různé strategie, které tropické rostliny využívají pro přežití těchto stavů. Mezi klíčové faktory pro přežití sucha patří přítomnost xylému, odolného vůči kavitaci, vysoký objem bělového dřeva, které chrání xylém před kriticky nízkým množstvím vody, opadávání, hluboké kořeny, fotosyntetická aktivita stonku, který má potenciál asimilovat uhlík při nedostatku vody s větší účinností než listy, a konečně regulace výměny plynů s cílem snížit ztráty vody z listů. Pokud všechny zmíněné autoregulační mechanismy selžou, pak



je poslední možností záchrany v delších obdobích sucha snížení vodivosti pletiv (Santiago et al., 2016).

Zatímco dvouděložné rostliny mohou období sucha přestát díky výše zmíněným vlastnostem a mechanismům, jednoděložné rostliny, jako jsou palmy, to mají o poznání složitější. Palmy představují jednu z nejstarších přežívajících jednoděložných rostlin vůbec a liší se od dvouděložných dřevin hned v několika klíčových ohledech. Především postrádají vaskulární kambium a místo něj spoléhají při přepravě tekutin výhradně na cévní svazky. Většina druhů palm má také pouze jeden vrcholový meristém, ze kterého vyrůstají všechny nové listy a stonek, čímž je omezena jejich schopnost polohovat listy a vystavit je světlu. Tyto rozdíly budou mít pravděpodobně dopad v kontextu globálních klimatických změn, nemusí však být nutně negativní. Zvýšení teploty totiž přináší potenciál pro rozšíření palm ve vyšších nadmořských výškách a zeměpisných šířkách. Vše navíc nasvědčuje tomu, že existuje silná pozitivní korelace mezi druhovou bohatostí palm a množstvím srážek, takže lze předpokládat, že největší vliv na jejich budoucí rozšíření budou mít pravděpodobné změny ve srážkových modelech. Oteplování klimatu tak může přinést jak redistribuci palm v rámci deštného lesa, tak změnu v jejich individuálních fyziologických funkcích. Přesto však by měly být palmy nadále přítomné v mnoha tropických ekosystémech (Renninger a Phillips, 2016).

Vzhledem k očekávanému nárůstu četnosti období sucha, který předpovídají klimatické modely tropických regionů, je zvláště důležité studovat odolnost hospodářsky využívaných tropických stromů vůči vodnímu stresu. Proto byla provedena studie zaměřená na 14 druhů stromů, představujících relevantní obchodní zájem v oblasti produkce dřeva v Guyanské vysočině, za účelem identifikovat interakci mezi selektivní těžbou dřeva a stresem kvůli nedostatku vody. Byl vytvářen model růstu a úmrtnosti každého druhu v závislosti na klimatu, vodním stresu a množství těžbou ztracené nadzemní biomasy. U naprosté většiny druhů měl vodní stres negativní dopad na tempo růstu, zatímco vliv těžby na tempo růstu byl pozitivní. Opačné výsledky byly zaznamenány v případě úmrtnosti. Zjištěné informace byly použity pro vygenerování pořadí zranitelnosti druhů od druhů převážně odolných vůči vodnímu stresu, a to i pod tlakem těžby, až po druhy vysoce zranitelné. Na základě těchto výsledků je potřeba vytvořit strategii na ochranu nejohroženějších druhů v Guyanské vysočině. Zachování již adaptovaných druhů lze totiž považovat za nejjistější způsob, jak chránit tropické lesy v rámci budoucích změn klimatu (Fargeon et al., 2016).

Kácení deštného lesa a s ním související expanze zemědělství v Amazonii však bude vzhledem k rostoucí globální poptávce potravin v průběhu několika příštích dekád pokračovat. Předpokládá se, že již zmíněný přechod z přirozených lesních ekosystémů k pastvinám a zemědělským polím vytvoří teplejší a sušší atmosférické podmínky, nicméně těmito procesy podmíněné změny ve srážkovém úhrnu by nemusely být výrazné (v řádu několika procent). Sušší podmínky budou především výsledkem zvýšení odtoku a poklesu celkové evapotranspirace, jež jsou spojené se ztrátou lesa (Swann et al., 2015).

Změna v míře evapotranspirace je ale relativní záležitostí. Vzhledem k úbytku lesa její hodnoty klesají, ale vyšší teploty vzduchu způsobují v oblastech stávající vegetace její nárůst. Můžeme tedy říct, že celková míra evapotranspirace klesá, ale míra evapotranspirace na jednotku lesa roste. Fakt, že celodenní vysoké teploty vzduchu zvýšily míru evapotranspirace, znamená, že rostliny rychleji ztrácí vláhu potřebnou ke svému růstu, a musí proto využít svoje adaptační mechanismy. Dřeviny tak čelí suchu růstem v těch denních hodinách, kdy teploty klesají a ztráta vody v důsledku evapotranspirace je snížena (Mendivelso et al., 2016).

Sušší podmínky jsou tedy důležitým, avšak rozhodně ne jediným faktorem ovlivňujícím hojnost vegetace tropických deštných lesů. Existuje značný zájem o pochopení osudu Amazonie v nadcházejícím století tváří v tvář klimatickým změnám, rostoucí atmosférické hladině CO<sub>2</sub>, pokračující přeměně půdy a intenzivnějším požárům. Proto byl analyzován kombinovaný dopad těchto čtyř faktorů na amazonské ekosystémy a hodnocen jejich relativní vliv na množství biomasy a rozlohu lesa. Výsledky naznačují, že nejvýznamnějším dopadem klimatických změn bude skutečně změna v množství srážek: odhaduje se, že v nejsušším klimatickém scénáři by došlo ke ztrátě 14 % rozlohy amazonského pralesa. Modely však zároveň předpokládají, že vyšší koncentrace CO<sub>2</sub> zvýší produktivitu vegetace, zmírní klimatickými změnami vyvolaný vodní stres a v konečném důsledku tak povede k zachování lesní biomasy. Naopak změny ve využívání půdy a změny klimatu vyvolané frekvencí požárů pravděpodobně způsobí další ztrátu nadzemní biomasy a sníží rozlohu lesa (Zhang et al., 2015).

### **3.4.6 Další extrémní klimatické jevy**

Vědci zabývající se změnou klimatu předpovídají zvýšenou intenzitu bouří, jako jsou cyklóny, hurikány a tajfuny. Tyto intenzivní bouře mohou mít důležitý význam pro ekosystémy tropických lesů, protože usnadní invazi rostlin, zejména prostřednictvím omezení konkurence,

zvýšení dostupnosti zdrojů a zvýšení možnosti reprodukce díky vyššímu rozšířením semen. Při dokumentaci stavu současných znalostí o reakci invazních druhů rostlin na intenzivní bouřky dospěli vědci k názoru, že struktura a funkce lesů v bouřkami ohrožených regionech se může změnit v důsledku invaze plevelů. Intenzivní bouřky poskytují velký časoprostorový rámec pro jejich invazi a výzkumy již nyní potvrzují zvýšení druhové rozmanitosti plevelu, který se rychle šíří v tropických lesích. Zejména liány a invazivní druhy dřevin, které jsou odolné vůči nedostatku světla, představují největší hrozbu pro tropické lesy vzhledem k předpokládaným následujícím bouřkovým událostem. Lesy přetrvávající ve fragmentovaných krajinách budou vystaveny důsledkům intenzivních bouří a následné invaze plevelu nejzávažněji. V bouřkových regionech bude pravděpodobně docházet ke snížení rozmanitosti původních druhů lesa, homogenizaci společenstev, snížení rychlosti sukcese, postupující degradaci lesních fragmentů a v konečném důsledku i k poškození ekosystémových funkcí (Murphy a Metcalfe, 2016).

Důležitým přírodním fenoménem ovlivňujícím klima v tropických lesích Amazonie a jihovýchodní Asie je El Niño. Jde pravděpodobně o nejznámější meziroční režim klimatu, vyvolaný vzájemným působením mezi atmosférou a Tichým oceánem, kdy dochází k zeslabení studeného Peruánského proudu a tím k výraznému oteplení tamějších vod. Do tohoto schématu se pak ještě připojuje tzv. upwelling, tedy jev, při kterém vlivem větru dochází k tomu, že studená voda, bohatá na živiny, nahrazuje na povrchu hladiny vodu teplou, na živiny chudou. A právě proměnlivost teplot hladiny tropického Tichého oceánu má vliv na teplotu vzduchu, množství srážek, četnost požárů a s tím vším spojené změny v růstu stromů a rozmnožování rostlin (Fletcher, 2015). Denní amplitudy kolísání průměru kmene se výrazně liší v období deště a v období sucha. Na rozdíl od vlhkého roku 2009, sucho vyvolané událostí El Niño v roce 2011 způsobilo v západní části Amazonie rychlé snížení denních amplitud, což mělo za následek úplné zastavení růstu kmene. Tento fakt naznačuje, že extrémní klimatické události mají značný dopad na odstraňování oxidu uhličitého z ekosystému tropického lesa (Spannl et al., 2016).

Zvýšená variabilita klimatu vyvolá období závažného omezení dostupnosti zdrojů, což bude mít zásadní vliv na biodiverzitu deštného lesa. Zvýšení frekvence, závažnosti či délky trvání extrémních povětrnostních a klimatických jevů může vyvolat zúžení zdrojů, které způsobí silný demografický tlak na suchozemské živočichy, často ještě zvýšený lidskou činností (Maron et al., 2015).

Ačkoli tropické lesy představují jen zlomek zemského povrchu planety, vyměňují si s atmosférou více oxidu uhličitého než jakýkoli jiný biot na Zemi, a tak hrají velkou roli v globálním klimatu. V příštích 20 letech budou tropy zažívat bezprecedentní oteplování, přesto je mimořádně vysoká nejistota ohledně jejich možných reakcí na tuto hrozící klimatickou změnu (Cavaleri et al., 2015).

## **3.5 Biot opadavých lesů mírných zeměpisných šířek**

### **3.5.1 Charakteristika biotu**

Opadavé lesy mírných zeměpisných šířek jsou dominantním zonobiomem mírného podnebného pásma na severní polokouli. Často bývá označován jako temperátní listnatý les či v kontextu středoevropské vegetace pouze listnatý les (viz obr. 5). Základním charakteristickým rysem edifikátorů je utváření a opad listů na počátku období vegetačního klidu v zimních měsících. Podnebí je charakterizováno čtyřmi až šesti teplými měsíci a průměrnou červencovou teplotou kolem 20 °C. Průměrná roční teplota se pohybuje okolo 10 °C a roční úhrn srážek mezi 500 až 1500 mm.

Širokolisté opadavé lesy se vyskytují ve třech hlavních oblastech: na většině území Evropy s výjimkou Středomoří, Skandinávie a severovýchodní části evropského Ruska, ve východní oblasti Severní Ameriky mezi 30° a 45° severní šířky a konečně ve východní Asii, konkrétně ve východní Číně, Mandžusku, Koreji a severní části Japonska (viz obr. 6). Jediná oblast tohoto typu lesního ekosystému na jižní polokouli leží v Chile při Pacifickém pobřeží mezi 35° a 40° jižní šířky (Ulbrichová, 2005).



Obr. 5. Biom temperátního opadavého listnatého lesa (fld.czu.cz)



Obr. 6. Mapa rozšíření opadavých lesů mírných zeměpisných šířek (ostrava-educanet.cz)

### 3.5.2 Vegetační fenologie

Fenologie rostlin je klíčovým ukazatelem odezvy suchozemské biosféry na změnu klimatu a prostřednictvím změn v cyklech uhlíku, energie a vody globální klima ovlivňuje.

Současné oteplování klimatu posunulo načasování jarních a podzimních fenologických projevů v mírných a boreálních lesních ekosystémech Evropy. V mnoha oblastech přichází fenologické jaro dříve a podzimní fenologické události nastupují buď dříve, nebo naopak se zpožděním, což znamená, že se průměrná délka vegetačního období v evropských lesích mírných a vyšších zeměpisných šířek prodlužuje. Vliv teplého jara a podzimu na fenologii a produktivitu vegetace však zůstává do velké míry neznámý.

Jedna ze studií, zabývající se extrémními teplými jarními a podzimními událostmi v Evropě mezi lety 2003 a 2011, zkoumala, zda přímý dopad vyšších jarních teplot na lesní fenologii a produktivitu má vliv i na následující fenologické události. Prokázalo se, že teplejší jarní teploty, vyskytující se zejména ve vyšších zeměpisných šířkách Evropy, vedly k nemalému zvýšení produktivity a zapříčinily výrazně dřívější nástup zeleně v širokolistém opadavém lese a v lesích smíšených. Tento dřívější nástup listů však nezapříčinil jeho dřívější podzimní opad. Naopak, v důsledku teplých podzimních teplot se opad listů opoždí a v následujícím roce dochází k podstatně časnějšímu olistění v jarním období. Z toho vyplývá, že pro úplné pochopení reakce ekosystémů na vysoké teploty během klíčových fenologických událostí, zvláště těch podzimních, je potřeba brát v úvahu jejich přenesený vliv na další vegetační období (Crabbe et al., 2016).

To, že jsou časové posuny ve fenologii důležitým biotickým ukazatelem změny klimatu, je zcela zřejmé. Zajímavé je však zjištění, že složení společenstev napříč krajinou hraje v otázce doby nástupu fenologických fází stejně důležitou roli jako podnebí a počasí. V rámci studie prováděné v Nové Anglii (USA) bylo zjištěno, že dominance břízy vedla k dřívějšímu olistění, zatímco v lokalitách s dominancí dubu byl nástup listů opožděný (Xie et al., 2015).

Právě brzký nástup jarních fenologických událostí, jako je vývin listů, zaujímá klíčovou roli ve struktuře a fungování ekosystémů. Během manipulativního experimentu, který měl za cíl zjistit vliv denního a nočního oteplování na mladé stromky tří druhů stromů (dub, buk, bříza) mírných listnatých lesů a prozkoumat různé dopady denních a nočních teplot na jarní fenologii, se prokázalo, že jak denní, tak noční oteplování značně uspíšilo vývoj listů, ale citlivost na zvýšené teploty se výrazně lišila v závislosti na denní hodině. Na oteplování v denních hodinách reagovaly stromy citlivěji než na zvýšené teploty v průběhu noci. Vliv zvýšené denní teploty na rozvoj listů byl přibližně třikrát vyšší, ale noční teploty rostou rychleji než denní, takže modelové projekce budoucí jarní fenologie by měly zahrnovat i účinky nočních teplot (Fu et al., 2016).

### 3.5.3 Koloběh uhlíku v ekosystému

Změny ve fenologii rostlin ovlivňují globální uhlíkový cyklus. Jedním z důsledků prodloužení délky vegetačního období je fakt, že listnaté lesy mírných zeměpisných šířek zvyšují svoje uhlíkové zásoby. Při zkoumání dopadů sezónních fenologických změn a vyšší absorpce uhlíku na čistou ekosystémovou produkci východních opadavých lesů Severní Ameriky bylo zjištěno, že existuje silná korelace mezi opožděným koncem vegetačního období a dobou ukládání uhlíku. Vzhledem k prodlužující se délce vegetačního období má ekosystém k dispozici delší čas pro absorpci uhlíku z biomasy, což vysvětluje meziroční i dlouhodobé trendy v rostoucí čisté produkci ekosystémů. Snížení plynných emisí oxidů síry a dusíku a emisí jemných částic v oblasti východních listnatých lesů USA navíc vede k vytvoření jasnějších atmosférických podmínek, díky čemuž roste intenzita fotosynteticky aktivní radiace, která největší měrou přispívá k pohlcování uhlíku a zvýšení čisté ekosystémové produkce (Gonsamo et al., 2015).

Po celém světě lesy ročně absorbují asi 30 % globálních antropogenních emisí oxidu uhličitého a plní tak důležitou funkci uhlíkového sinku. Předpokládá se, že mrtvá dřevní hmota, tvořící nezanedbatelnou část nadzemní lesní biomasy, podstatně přispívá k celkovým lesním zásobám uhlíku. Než se mrtvá dřevní hmota kompletně rozloží, může to trvat od několika let po celá staletí a uhlík mezitím vstupuje do lesních půd přímo nebo ve formě rozpuštěného organického uhlíku. Ačkoli nadzemní rozklad dřevní hmoty je předmětem mnoha studií, o relativní velikosti, složení a osudu uhlíkových toků z dřevní hmoty do půd se ví jen málo. Toky uhlíku z rozkládající se dřevní hmoty se mohou značně lišit v důsledku rozdílné dřevinné skladby a odlišných podmínek prostředí. Vše naznačuje tomu, že přítomnost mrtvé dřevní hmoty zvyšuje diverzitu mikrobiálních komunit, které podporují rozpouštění organického uhlíku a jeho následné toky do minerálních půd. Rozpuštěný organický uhlík a zbytky organické hmoty z pozdějších stádií rozpadu jsou tak obohaceny o mikrobiální složku. Zvýšená rozmanitost dekompozitorů navíc přispívá k převodu uhlíku do mikrobiální biomasy, která může přispět ke stabilizaci zásob uhlíku v lesní půdě. Ze všeho výše uvedeného je zřejmé, že změny ve vstupu organické hmoty mění produktivitu lesů a půdní mikroklima, což by mělo být bráno v úvahu při modelování uhlíkových toků a zásob v podmínkách budoucího klimatu (Magnusson et al., 2016).

Lesní půdy tvoří přibližně 70 % globálních zásob půdního organického uhlíku, jsou tudíž důležitou součástí globálního uhlíkového cyklu. Předpokládá se, že změna klimatu ovlivní

distribuci lesních druhů a cyklus organického uhlíku, a to zejména v oblasti Středozemního moře. Jedním z nejdůležitějších rezervoárů uhlíku z hlediska živé biomasy i organických látek v půdě jsou bukové lesy, které jsou velmi náchylné ke globálnímu oteplování. Proto bylo zjišťováno, jaký vliv budou mít předpovídané změny klimatu na distribuci buku a půdní zásoby uhlíku v severní Itálii. Na základě scénářů klimatických změn byl sestavován model potenciálního rozšíření buku a prováděn průzkum terénu kvůli kvantifikaci podílu organického uhlíku ve vrchních 5 cm půdy, které jsou nejcitlivější vůči klimatickým vlivům. Výsledné scénáře předpokládají výrazný ústup bukového lesa na jižní hranici jeho areálu rozšíření spolu s pozoruhodným posunem bučin do vyšších nadmořských výšek a zeměpisných šířek. Výsledky dále naznačují, že množství organického uhlíku v ekosystému souvisí se sezónními teplotami a nadmořskou výškou, a podle různých scénářů Mezivládního panelu pro změny klimatu se očekává výrazný pokles v jeho zásobách, v nejhorším případě až o 98,8 % (Innangi et al., 2015).

Pro přesnou predikci globálního uhlíkového cyklu jsou potřeba důkladné znalosti o vlivech globálního oteplování na půdní komponenty a její respiraci. V ekosystému mírného listnatého lesa v severním Japonsku byl proto proveden experiment, jehož cílem bylo identifikovat odezvu půdní respirace (heterotrofní a autotrofní) a jemné kořenové biomasy na rostoucí teploty. Vzhledem k tomu, že je místní les vystaven silnému dennímu i sezónnímu kolísání teploty, byla rovněž zkoumána časová variabilita účinků oteplování půdy na její heterotrofní a autotrofní respiraci. Teplota půdy byla v letech 2007 až 2014 kontinuálně zvyšována o 4 °C a půdní respirační procesy byly monitorovány ve všech čtyřech ročních obdobích od roku 2012 do roku 2014. Oteplování půdy zvýšilo roční respiraci o 32-45 %, ale velikost tohoto nárůstu byla odlišná pro heterotrofní (39-41 %) a autotrofní (17-18 %) respiraci. Jemná kořenová biomasa a půdní dostupnost dusíku během vegetačního období nebyly oteplováním nijak významně ovlivněny. Účinky oteplování se přitom měnily sezónně. Hodnoty heterotrofní respirace sice vykazovaly progresivní růst v průběhu celého roku, ovšem s významnými sezónními rozdíly, s maximální stimulací v jarních měsících. To naznačuje, že zvyšující se jarní teploty zapříčiní intenzivnější uvolňování CO<sub>2</sub> než teplé letní teploty. Tyto dlouhodobé výsledky rovněž ukazují, že rovnováha mezi reakcemi půdních mikroorganismů a adaptací kořenů stromů na ohřev půdy hraje důležitou roli při predikci půdní respirační aktivity. Všechna tato zjištění poskytují cenné informace pro předpověď reakcí dynamiky půdního uhlíku na budoucí teplotní podmínky (Noh et al., 2016).



Lesy v sobě ukrývají velkou část globální suchozemské biodiverzity. Dlouho však nebylo jasné, zda druhová diverzita dřevin ovlivňuje zásoby půdního organického uhlíku. Měření koncentrace uhlíku v půdách různé zrnitosti ve starých listnatých lesích Evropy na třech gradientech druhové diverzity (1, 3 a 5 druhů) odhalilo vliv půdní struktury a dřevinné skladby na zásoby půdního organického uhlíku. Rozdíly v obsahu půdního jílů vysvětlily pozorovaný vyšší obsah organického uhlíku v druhově bohatších listnatých lesích jen částečně, ale koncentrace CO<sub>2</sub> v půdním podloží, která byla v porostech s rozmanitější dřevinnou skladbou o 30-35 % vyšší než v porostech monokulturních, indikuje výrazný vliv druhové identity či druhové rozmanitosti na stabilizaci uhlíku v ekosystému. Ve srovnání s jehličnany navíc listnaté stromy podporují sekvestraci organického uhlíku hlouběji do půdního profilu, což vede k dalšímu posílení stability uhlíkových zásob. Tato zjištění mohou mít důležité implikace pro lesní hospodářství, protože preference smíšených porostů namísto monokultur by mohla zvýšit lesní zásoby půdního organického uhlíku a zmírnit oteplování klimatu (Schleuss et al., 2014).

### **3.5.4 Míšení jako nástroj obnovy**

Míšení doplňujících se druhů dřevin může zvýšit jejich produktivitu, zmírnit následky sucha a dalších rizik a připravit cestu k lesní produkci, která by byla stabilnější a efektivněji využívala zdroje tváří v tvář klimatickým změnám. Proto je důležité realizovat empirické výzkumy, zabývající se kombinováním mnoha rozšířených a komerčně významných druhů. Jeden z takových výzkumů studoval růst borovice lesní a buku lesního, rostoucích pohromadě či odděleně v mnoha zemích napříč Evropou, od Švédska po Bulharsko a od Španělska až po Ukrajinu. Cílem bylo zjistit, jak míšení těchto druhů modifikuje strukturu a produktivitu stromů. Ve srovnání se sousedními monokulturními lesy se smíšené porosty vyznačovaly vyšší hustotou, bazální plochou kmene a celkovou produktivitou, a to nezávisle na geografické oblasti a klimatických proměnných, zejména výrazných rozdílech v množství srážek (520-1175 mm/rok) nebo odlišných průměrných ročních teplotách (6 - 10,5 °C). Na základě této studie lze předpokládat, že je spojení borovice lesní a buku lesního potenciálně užitečné pro zvyšování produktivity lesa v rozmanitých oblastech a klimatických podmínkách (Pretzsch et al., 2015).

Zcela opačný vliv na produktivitu a vitalitu stromů může mít nutriční nerovnováha, způsobená změnou podmínek na konkrétních stanovištích. Míšení dřevin by mohlo zmírnit tyto

dopady prostřednictvím působení na mimokořenovou (foliární) výživu. Proto byla zkoumána listová výživa 82 dubů a 44 buků, obklopených jedním až třemi jinými druhy stromů v listnatých lesích v belgických Ardenách. Byla testována hypotéza, zda má přítomnost jednoho či více sousedních druhů vliv na foliární výživu. Výsledky potvrzují, že opravdu existuje obecně pozitivní vliv míšení dřevin v porostu, neboť foliární koncentrace vápníku, draslíku, dusíku a fosforu výrazně vzrostla u obou druhů stromů, zejména u dubu. Obecně lze konstatovat, že příměsí jiných dřevin měly pozitivní vliv na foliární výživu a skrývají tak potenciál ke zmírnění nerovnováhy živin, a to zejména v dubových porostech (Nickmans et al., 2015).

### **3.5.5 Vliv CO<sub>2</sub> a živin na ekofyziologii**

Globální změny, zejména pak oteplování klimatu, změna lesního managementu a složení atmosférických depozic, výrazně upravily podmínky pro růst evropských lesů. V belgických porostech buku lesního byly v minulém století kontinuálně monitorovány dopady těchto změn na 149 zdravých stromů ve věku 87-186 let s konkrétním zaměřením na časové závislé změny růstu. Výsledky monitoringu z let 1930-2008 ukazují, že zatímco před rokem 1980 bylo tempo růstu ovlivněno zejména typem lesního managementu, změnou půdních vlastností (zhuštění půdy) a množstvím atmosférických depozic dusíku, od roku 1980 je to právě klimatická změna, která se největší měrou podílí na rostoucí časové variabilitě růstu buku v evropských lesích a celkovém snižování tempa tohoto růstu. Role živin v půdě a v samotných tělech rostlin však i přes rostoucí vliv měnícího se klimatu nesmí být opomíjena (Latte et al., 2016).

Fosfor je vedle dusíku pravděpodobně nejdůležitějším zdrojem živin pro lesní ekosystémy. Proto byla testována hypotéza, že koncentrace fosforu v listech buku lesního v evropském měřítku klesá. Listové koncentrace fosforu byly monitorovány na základě Mezinárodního kooperativního programu sledování a vyhodnocování vlivu znečištění ovzduší na lesy a výsledky ze 79 parcel z 12 evropských zemí z let 1991-2010 ukazují, že výživa fosforem je u evropského buku lesního narušena a listová koncentrace fosforu se během posledních 20 let výrazně snížila. Příčinou tohoto trendu je pravděpodobně vysoká atmosférická depozice dusíku, zvýšená acidifikace lesních půd a změna klimatu. Pokračující pokles koncentrace fosforu v listech může vést k dalšímu zpomalení růstu a snížení vitality bukových lesů Evropy (Talkner et al., 2015).

Depozice dusíku a měnící se klimatické vzorce mohou ovlivňovat produktivitu lesů skrze účinky na poměr živin a využívání vody. V mírných listnatých lesích státu Massachusetts na severovýchodě USA byla provedena studie, která hodnotila kombinovaný efekt dusíkatých depozic, změny klimatu a rostoucího množství atmosférického CO<sub>2</sub> na ekofyziologii dubu sametového. Pro tyto účely byly vymezeny dva typy lesních pozemků, z nichž jeden byl vystaven dusíkatému hnojení a druhý byl ponechán v původním stavu. Bylo zjištěno, že zatímco výrazné a trvalé zvýšení růstu během období studie (1984-2011) bylo zcela podle předpokladů zaznamenáno pouze u stromů vystavených dusíkatému hnojení, zlepšenou efektivitu využívání vody vykazovaly všechny stromy bez výjimky. Trendy ve vnitřní efektivitě využívání vody u stromů neobohacených dusíkem byly řízeny především změnami ve vodivosti průduchů, zatímco stimulace fotosyntézy, podpořená nárůstem podílu mimokořenového listového dusíku, přispěla k efektivnějšímu využívání vody u stromů vystavených intenzivnímu hnojení. Všechny tyto výsledky naznačují, že dusíkaté depozice v oblasti na dusík chudých lesů v Massachusetts pozitivně stimulovaly růst stromů a rostoucí koncentrace CO<sub>2</sub> zdokonalila jejich vnitřní efektivitu využívání vody. To znamená, že vyšší depozice dusíku a CO<sub>2</sub> mají synergický účinek na vnitřní efektivitu využívání vody u dubu sametového (Jennings et al., 2016).

### **3.5.6 Reakce ekosystému na nedostatek vody**

Neustále rostoucí teploty spolu s nižším množstvím srážek prohlubují vodní deficit, představující hrozbu pro lesní ekosystémy po celém světě. Dopady extrémních klimatických událostí na dlouhodobou ekosystémovou efektivitu využívání vody v oblasti opadavých lesů mírných zeměpisných šířek jsou však jen málo známé. V severoamerickém Ohiu byly mezi lety 2004 až 2013 analyzovány změny v účinnosti využívání vody u dominantních lesních druhů, kterými jsou v této oblasti duby. Cílem bylo zjistit dlouhodobou reakci ekosystémové efektivity využívání vody na lokální biofyzikální změny a měnící se vlastnosti ekosystémů. Závislost denní efektivity využívání vody na teplotě vzduchu byla v chladných měsících lineární, v teplých měsících během vegetačního období naopak unimodální. Lze konstatovat, že v teplých letních měsících se nezávisle na množství srážek efektivita využívání vody přestala zvyšovat v okamžiku, kdy teplota vzduchu překročila 22 °C. V průběhu deseti let pozorování byla v otázce účinnosti využívání vody zaznamenána výrazně klesající tendence především díky

kombinovanému účinku sezónního sucha a zvyšující se evapotranspirace. Výsledky ukazují, že sezónní dynamika srážek, přesněji variabilita srážkového úhrnu, byla klíčovou proměnnou při regulaci efektivity využívání vody ve vlhkých letech. Naproti tomu, navzdory negativním dopadům oteplování klimatu, byly dostupnost podzemní vody a časný začátek vegetačního období důležitými faktory pro vysvětlení vysoké účinnosti využívání vody v letech suchých (Xie et al., 2016).

V souvislosti s předpokládanou rostoucí frekvencí letního sucha v severovýchodních listnatých lesích Severní Ameriky v důsledku klimatických změn byla zkoumána schopnost aklimatizace žluté břízy, ekonomicky důležité původní dřeviny, na deficit vody v půdě. Sazenice, které byly podrobeny střednímu deficitu půdní vody po dobu čtyř po sobě jdoucích měsíců v průběhu jejich druhého vegetačního období, vykazovaly 40 % pokles akumulace biomasy, ale zpočátku žádnou změnu v její alokaci do různých částí rostliny. Teprve později došlo k přesunu nadzemní koncentrace biomasy do spodních, kratších větviček, namísto těch horních a mohutnějších. Čistá asimilace CO<sub>2</sub> v listech rovněž v důsledku vodního deficitu asi o 15 % klesla, ale určitě to samo o sobě nestačí k vysvětlení celkového snížení růstu břízy. Pozorované snížení míry čisté asimilace CO<sub>2</sub> souviselo s poklesem vodivosti průduchů a obsahu chlorofylu. Pochopení procesů souvisejících s redukcí růstu a změnou větvení tak bude vyžadovat další výzkum, jisté však je, že během vodního deficitu dochází u žluté břízy v juvenilním stádiu k podstatné ztrátě tempa růstu a celkové biomasy (Rasheed a Delagrange, 2016).

Z výše uvedeného vyplývá, že globální změna, na mnoha místech doprovázená nedostatkem vody, sníží výšku stromů v mírných ekosystémech některých regionů. Z ekofyziologických mechanismů, které jsou předkládány pro vysvětlení poklesu výšky, je oslabení cévního systému vzhledem k dopravě látek jedním z nejdůležitějších (Delaporte et al., 2016). Důkazy pro toto tvrzení poskytují např. výsledky studie efektu místních klimatických podmínek na roční dynamiku tvorby dřeva a jeho strukturu v porostech buku lesního v České republice ve dvou po sobě jdoucích letech 2010 a 2011, které se vyznačovaly rozdílným množstvím srážek. Teplota vzduchu a půdní vlhkost byly na výzkumné ploše měřeny každý den. Studie letokruhů a cévních vlastností potvrdily různé reakce buku na klimatické faktory v průběhu sledovaného období. V roce 2010, na srážky poměrně bohatém, paradoxně došlo k počátku tvorby kambiálních buněk o téměř 10 dní později než v roce 2011, kdy došlo k výraznému snížení množství srážek v zimních a jarních měsících. Vysvětlení je takové, že nedostatek srážek v roce

2011 způsobil předčasné ukončení dělení buněk, což sice vedlo k jejich dřívější tvorbě, ale později nebyly schopné účinně podporovat růst stromů. Suchý rok 2011 se tak vyznačoval snížením tempa růstu dřevin, ale naopak nárůstem jejich cévní hustoty. Z toho lze usuzovat, že v reakci na místní klimatické podmínky buk řídí hydraulickou vodivost především změnou tempa růstu a změnou počtu a velikosti cév (Giagli et al., 2016).

Globální oteplování a s ním související pokles dešťových srážek v letním období tedy může ohrozit vitalitu a produktivitu lesů v mnoha oblastech mírného pásma. Jednou z možností, které by mohly snížit riziko selhání dřevin, je vytváření genotypů, v nichž by byla spojena tolerance vůči suchu s vysokou produktivitou. Růstové experimenty s proveniencí v různých klimatických podmínkách ukazují, že vystavení suchu může vyvolat určité adaptivní reakce opadavých stromů, ale není známo, zda a do jaké míry může regionální snížení srážek zvýšit odolnost druhů vůči suchu. Proto byl proveden růstový experiment s pěti populacemi evropského buku lesního v oblastech s výraznou heterogenitou srážek. Výsledky ukázaly, že buky vystavené různým srážkovým režimům vyvinuly některé fenotypové rozdíly v oblasti regulace vody v listech, ale tyto úpravy jsou spojeny pouze s malou adaptací v morfologii rostlin a nedokáží zabránit dalšímu snižování tempa růstu mladých stromků (Knutzen et al., 2015).

Temperátní lesy Evropy jsou na klima citlivé ekosystémy a vzhledem k teplejším a sušším klimatickým podmínkám lze rovněž očekávat posun současné druhové skladby stromů. Zejména změny u dominantních druhů dřevin mají silný dopad na lesní ekosystémy, protože zásadně mění životní podmínky rostlin a živočichů žijících v lese. V roce 2013 představil Tobias Mette klimatický „bod zlomu“, tedy koncept, který vymezuje klimatické podmínky, ve kterých má taková změna druhové dominance nastat. Tento bod zlomu byl modelován pro přechod mezi bukem lesním a dubem zimním, a proto se zaměříme na studii, zabývající se klimatickým zlomem mezi bukem a dubem za použití dat z Národní inventarizace lesů v západní Evropě. Bylo formulováno několik výzkumných otázek, předně za jakých klimatických podmínek dochází k bodu zlomu a zda je modifikován typem půdy. Ke klimatickému bodu zlomu, který indikuje přechod od buku k dubu, dochází podle Metteho při průměrných ročních teplotách vyšších než 8-9 °C, pokud je roční úhrn srážek nižší než 600 mm. V případě průměrných ročních srážek vyšších než 900 mm se posouvá k hranici 11-12 °C. Na tento vztah však má neoddiskutovatelný vliv také typ půdy, což dokazuje fakt, že oproti výše uvedeným, Mettem formulovaným, předpokladům dub nahradil buk v západní Evropě za mnohem mírnějších klimatických podmínek. To lze přičíst

historii lesního hospodaření a sto let starému antropogennímu upřednostňování dubu (Dolos et al., 2016).

Závěrem této kapitoly je potřeba zmínit problém vysoké mortality, která se objevuje v mnoha lesních ekosystémech. Údaje shromážděné v průběhu posledních 50 let v mírných lesních ekosystémech naznačují, že dominantní druhy dřevin, jako je buk lesní, zaznamenávají zvýšenou míru úmrtnosti. Výsledky ukazují, že bazální plocha stromů v bukových porostech klesla o 33 % a hustota stromů v juvenilním stádiu byla snížena o celých 70 %. Neustále rostoucí sezónní teploty navíc zvyšují četnost sucha a prohlubování deficitu půdní vody, což může vést i k úmrtnosti velkých, statných stromů, která je rovněž podpořena negativními účinky některých patogenních hub. V důsledku ztráty bazální plochy stromů dochází ke změnám ve stromových společenstvech, druhové bohatosti zemní flóry a podílu travního pokryvu. Otázkou zůstává, zda bychom měli zvážit přijetí odumírání lesů jako součást adaptivní odezvy systému na nové podmínky prostředí, ačkoliv to pravděpodobně bude spojeno s významnou změnou v biologické rozmanitosti a poskytování ekosystémových služeb (Martin et al., 2015).

### **3.5.7 Hrozba snížení biodiverzity a nástroje její ochrany**

Central Hardwood Region ve Spojených státech představuje jeden z nejrozmanitějších ekoregionů v Severní Americe a oblast nejrozsáhlejšího mírného listnatého lesa na světě. Navzdory ekonomickému a ekologickému významu této lokality zůstávají dlouhodobé dopady změn klimatu a jimi vyvolaných častějších požárů na lesní strukturu do značné míry neznámé. Na základě mnoha studií se však předpokládá, že do roku 2100 dojde k významnému posunu ve struktuře lesních společenstev. Zásadní změnou by měl být přechod od dominantních druhů, jako jsou duby a ořechovce, k javorům, a s tím související ztráta druhové rozmanitosti a výrazný pokles objemu dřevní hmoty. Tyto předpokládané změny budou mít hluboké ekologické a ekonomické dopady. Z ekologického hlediska by změny ve druhové diverzitě, které budou upřednostňovat javory, změnily ekosystémové zpracování živin a následné toky živin do drenážní vody. Změna stanovišť navíc ovlivní široké spektrum organismů závislých na lese, což povede k redistribuci volně žijících druhů a zvýší riziko vyhynutí druhů již ohrožených. Z ekonomického hlediska by se celková hodnota místního lesního ekosystému vzhledem k poklesu diverzity

dřevin a samotných dřevních zásob snížila o 54,5 až 59,8 % z přibližně 1,317 bilionů na 529 až 599 miliard dolarů (Ma et al., 2016).

Temperátní lesní ekosystémy čelí extrémním tlakům ze strany současné změny klimatu, invazi škůdců a antropogenních nároků na jiné způsoby využití půdy. Tyto tlaky budou vyžadovat přehodnocení stávajícího lesního managementu, který by měl v budoucnu zahrnovat zejména tři nástroje: funkční obnovu, asistovanou migraci a bioinženýrství. V otázce funkční obnovy je kladen důraz na obnovu nebo udržení funkcí poskytovaných lesními ekosystémy, jako je produkce dřeva, zachování biodiverzity, kvality vody či ukládání oxidu uhličitého. K zachování těchto funkcí bude potřeba provést některé kroky, jako například asistovanou migraci lesních dřevin v rámci jejich areálu rozšíření za účelem jejich adaptace na změnu klimatu nebo přesun druhů mimo hranice jejich rozšíření, aby se zabránilo jejich vyhynutí. Kromě toho také může udržování druhů a funkcí, které poskytují, vyžadovat nové technologie v čele s genetickým inženýrstvím, které by mohlo přispět k řešení problému invaze hmyzu a škůdců. V kontextu rozvoje holistických adaptivních strategií vůči současným a budoucím antropogenním stresovým faktorům je realizace výše zmíněných opatření klíčová a může znamenat rozdíl mezi obnovením funkčních ekosystémů či jejich nenávratným úpadkem (Dumroese et al., 2015).

## 4 Závěr

Lesní ekosystémy po celém světě čelí oteplování klimatu, které nemá v minulosti žádný precedent. Správně předpovídat reakce jednotlivých složek ekosystémů na tyto změny je velmi obtížné, přesto se o to musíme pokusit. Potřebujeme efektivně využít to, co víme, a tyto informace doplnit novými poznatky z oblastí, v nichž je naše poznání zatím jen velmi omezené.

Tato práce odpověděla na otázky, jak se klimatická změna projevuje v jednotlivých typech lesních ekosystémů a jaké jsou její nejvýznamnější dopady a s nimi spojená budoucí nebezpečí. Pojdme tedy zrekapitulovat zásadní poznatky v kontextu jednotlivých biomů:

Boreální lesy představují největší souvislý pás lesa na světě a zároveň největší pozemní zdroj uhlíku, takže způsob spravování těchto zásob bude mít dopad na budoucí dynamiku podnebí. Severské jehličnaté lesy jsou důležitým místem propadu uhlíku, ale rozšiřující se lesní požáry a tání permafrostu, které jsou nejvýznamnějšími projevy klimatických změn v boreálních ekosystémech, způsobují, že se uhlík ve formě CO<sub>2</sub> či metanu uvolňuje do atmosféry. Globálním oteplováním způsobené požáry a tání permafrostu mají rovněž za následek snížení plochy zalesněných rašelinišť a s ním související ztrátu boreálních lesů. Obnažený zemský povrch přitom absorbuje větší množství energie a dále tak podporuje jeho zahřívání.

Zintenzivnění četnosti požárů v důsledku změny klimatu také způsobuje změnu v druhovém složení lesa směrem ke snížené dominanci jehličnanů a většímu množství listnatých dřevin. Opadavé druhy přitom mají odlišný vliv na koloběh uhlíku a živin, což naznačuje, že změny v dřevinné skladbě budou mít dopad na zásoby a toky uhlíku a živin v boreálních lesích. Změny v dřevinné skladbě a s nimi související posunutí areálů rozšíření mnohých živočichů a rostlin jsou nezpochybnitelnou předzvěstí posunu vegetačních pásů směrem k severu, což povede k redistribuci terestrických ekosystémů a v nich žijících druhů.

Tropické deštné lesy jsou oblastí s největší biodiverzitou na naší planetě. Největší hrozbou pro ekosystém deštného lesa je rostoucí teplota vzduchu a pokles v množství srážek, jejichž kombinované účinky vyvolávají abnormální období sucha, která jsou doprovázena častými a opakovanými požáry. Právě samovolné lesní požáry a požáry spojené s těžbou dřeva a změnami využití půdy mají hlavní vliv na narušení rovnováhy mezi emisemi a sekvestrací uhlíku,



neboť do atmosféry uvolňují obrovské množství oxidu uhličitého, který byl vázán v lesní biomase. Vyšší teploty vzduchu a nižší srážkový úhrn dále způsobují pokles tempa růstu stromů, který je navíc umocněný tím, že v důsledku stoupajících teplot roste celková míra evapotranspirace a ekosystém tak ztrácí vodu ještě rychleji.

Změna klimatu se v tropickém podnebném pásu projevuje také zvýšenou intenzitou bouří, které usnadňují invazi rostlin, a to zejména prostřednictvím omezení konkurence, zvýšení dostupnosti zdrojů a rozšíření semen. Zatímco tak klimatické změny podporují invazi nových druhů, rozmanitost původních druhů lesa je neustále snižována.

V ekosystému opadavých lesů mírných zeměpisných šířek je nejvýznamnějším projevem klimatických změn prodloužení vegetační doby, v jehož důsledku stromy akumulují větší množství uhlíku do lesní biomasy, čímž ovlivňují globální uhlíkový cyklus. Množství organického uhlíku v ekosystému přitom úzce souvisí se sezónními teplotami, jejichž stoupající trend bude s největší pravděpodobností znamenat snižování uhlíkových zásob v důsledku nižšího tempa růstu vegetace. Pozitivní vliv na množství půdního organického uhlíku má naopak druhová diverzita dřevin.

Kvůli kombinovanému účinku sezónního sucha a zvyšující se evapotranspirace je u dřevin v mírných opadavých lesích pozorován pokles účinnosti využívání vody. Naopak vyšší depozice atmosférického dusíku a oxidu uhličitého mají na vnitřní efektivitu využívání vody vliv pozitivní. Teplejší a sušší klimatické podmínky však prohlubují deficit půdní vody, což vede ke snížení tempa růstu a zvýšení úmrtnosti stromů.

V neposlední řadě se v mírných lesních ekosystémech očekává změna současné druhové skladby stromů. Zejména změny u dominantních druhů dřevin, jako jsou duby a buky, mají silný dopad na lesní ekosystémy, protože zásadně mění životní podmínky rostlin a živočichů žijících v lese.

Zvýšená variabilita klimatu vyvolá období závažného omezení dostupnosti vody, živin a jiných zdrojů v lesních ekosystémech. Zachování již adaptovaných druhů dřevin lze považovat za nejjistější způsob, jak chránit lesy v rámci budoucích změn klimatu, samo o sobě to však stačit nebude, a proto potřebujeme najít vhodná řešení v boji s negativními dopady klimatických změn na lesní prostředí.

Obnova lesů je důležitým nástrojem v boji se změnou klimatu a v otázce ochrany biologické rozmanitosti. Ať už mluvíme o tropických deštných lesích či o opadavých lesích mírných zeměpisných šířek, všechny výzkumy potvrzují obecně pozitivní vliv míšení dřevin na fungování ekosystémů. Přechod od monokultur k druhově bohatším společenstvům prokazatelně zlepšuje vitalitu porostu a zmírňuje nutriční nerovnováhu prostřednictvím působení na mimokořenovou výživu. Cílem lesního hospodářství by proto mělo být udržování vysoké rozmanitosti dřevin a planě rostoucích rostlin, neboť se zdá, že vyšší diverzita zajišťuje vyšší stabilitu ekosystému jako celku.

Adaptace lesních typů a druhů dřevin na změnu klimatu a s tím spojené zachování ekosystémových funkcí bude vyžadovat nové nástroje a postupy, mezi něž patří především asistovaná migrace a genetické inženýrství. V případě asistované migrace můžeme mluvit o migraci v rámci areálu rozšíření druhu, ale také o migraci mimo areál rozšíření, a to v případě, že adaptace dřevin na změněné podmínky prostředí není možná a hrozí jejich vyhynutí. Zachování ekosystémových funkcí a stávajících druhů mohou dále napomoci nové technologie v čele s genetickým inženýrstvím, využívajícím úpravu genomu za účelem zvýšení produktivity a vyřešení problému invaze hmyzu a škůdců, působících nemoci.

Lidstvo tak stále má v rukou určitou moc kontrolovat dění v lesních ekosystémech. Pravdou ale zůstává, že z dlouhodobé perspektivy to nebude k ničemu, pokud ji nezačneme používat nejen v boji proti změnou klimatu způsobeným škodám, ale především v oblasti prevence těchto škod.

Na úplný závěr je potřeba s pokorou uznat, že naše vědomosti jsou v mnoha oblastech velmi omezené. Přestože nikdy nebudeme schopni plně obsáhnout komplexitu dějů ovlivňujících lesy po celém světě, i částečné prohloubení našeho poznání může přinést řešení mnoha problémů.

Reakce dřevin na rostoucí teploty představuje zásadní nejistotu, která omezuje naši schopnost předvídat interakci biosféry a atmosféry v oteplovajícím se světě. Mezi prioritní studijní zájmy v oblasti posuzování vlivu rostoucích teplot na ekofyziologii stromů patří růst a rozmnožování. Ačkoliv je mnoho druhů stromů dost možná blízko k prahovým hodnotám teplot umožňujícím jejich reprodukci, citlivost stromů na vyšší teploty z hlediska reprodukce je do značné míry neprostudovaná. Další důležitá otázka zní, jak horkem vyvolané atmosférické sucho ovlivní úmrtnost stromů. Vystává tak naléhavá potřeba provádět pravidelné experimenty, které

by přinesly lepší znalosti v těchto oblastech a zlepšily tak naši schopnost předvídat uhlíkové toky v lesních ekosystémech.

Právě celkové množství zásoby uhlíku v lesích a predikce jejího budoucího vývoje patří mezi klíčové nejistoty globálního charakteru. Proto je zapotřebí detailní znalost skladování uhlíku v ekosystému i znalost jeho alokace do půdy, respektive biomasy. Zatímco je prováděno mnoho studií zabývajících se výměnou uhlíku mezi biomasou a atmosférou, o relativní velikosti, složení a osudu různých uhlíkových toků z dřevní hmoty do půd se ví jen málo. Změna zásob organického uhlíku v půdě přitom představuje největší potenciální změny v koloběhu uhlíku.

Předpovídané zvýšení četnosti a intenzity sucha napříč biomy zdůrazňují potřebu zkoumat, do jaké míry se mohou jednotlivé typy lesních ekosystémů lišit ve své citlivosti vůči vodnímu stresu. Abychom mohli zjistit, jaká je schopnost ekosystému využívat vodu, potřebujeme pochopit zejména dynamické interakce, ke kterým dochází pod zemí mezi kořeny a fyzikálními a biologickými půdními faktory.

V důsledku rostoucích teplot a klesajících zásob vody v lesních ekosystémech je důležité nacházet nové způsoby ochrany jejich diverzity. Jedním z nich je bezesporu míšení, avšak systematické empirické studie o účincích míšení mnoha komerčně důležitých a rozšířených druhů stále chybí. Mnoho nejistot máme také v oblasti fenologie rostlin a reakce živočichů na změnu ve struktuře dřevinných společenstev. Těžké je rovněž odhadovat, jakou změnu přinesou klimatické změny v oblasti poskytování ekosystémových služeb, jisté však je, že lepší porozumění procesům ovlivňujícím dynamiku lesních ekosystémů je k zajištění ochrany a vhodného managementu biodiverzity a ekosystémových funkcí bezpodmínečně nutné.

## 5 Zdroje

- Machar, I., Remeš, J., Vacek, S. *Kapitoly z aplikované ekologie lesa a péče o lesní ekosystémy*. 1. st. ed. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014, 5–6, 38–39.
- Marek, M. V. Výzkum účinků globální změny klimatu na úrovni ekosystémů. *Ochrana přírody 2009*, 64: 12–15.
- Ministerstvo životního prostředí. *Zákon o lesích č. 289/1995 Sb.* Praha, 1995
- Loketské městské lesy. 2012. *Trvale udržitelné hospodaření s lesích* [online]. Dostupné z: <[http://www.lesyloket.cz/?article\\_id=284](http://www.lesyloket.cz/?article_id=284)>
- Ulbrichová, I. *Ekologie lesa: Biomy*. Praha, 2005.
- Greenpeace. 2015. *Boreální les* [online]. Dostupné z: <<http://www.greenpeace.org/czech/cz/Kampan/Ochrana-pralesu/Borealni-les1/>>
- Divíšek, J., Culek, M. *Biogeografie: Multimediální výuková příručka*. 2. nd ed. Brno: Masarykova univerzita, 2013. Tropický (rovníkový) deštný les.
- Verlík, J. 2010. *Biosféra*, [online]. Dostupné z: <[http://ostrava-educanet.cz/biologie/ostrava-educanet.cz/www\\_biologie/index4afc.html?option=com\\_content&view=article&id=77&Itemid=77](http://ostrava-educanet.cz/biologie/ostrava-educanet.cz/www_biologie/index4afc.html?option=com_content&view=article&id=77&Itemid=77)>
- Hospodářské noviny. 2013. *Vědci v surinamské džungli objevili na 60 nových druhů zvířat. Včetně "kakaové žáby"* [online]. Dostupné z: <<http://zahranicni.ihned.cz/amerika-usa/c1-60961780-vedci-v-surinamske-dzungli-objevili-na-60-novych-druhu-zvirat-vcetne-kakaove-zaby>>
- Ulbrichová, I. *Nauka o lesním prostředí: projekt FRVŠ 2010: 962/2010*. Praha, 2010.
- Brubaker, L. B. *Picea glauca taiga*. In: *Wikipedia* [online]. 2007 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Tajga#/media/File:Picea\\_glauca\\_taiga.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tajga#/media/File:Picea_glauca_taiga.jpg)>
- Brazhnik, K., Shugart, H. H. 2016. SIBBORK: A new spatially-explicit gap model for boreal forest. *Ecological Modelling*, 320: 182–196.
- Drake, J. E., Aspinwall, M. J., Pfautsch, S., Rymer, P. D., Reich, P. B., Smith, R. A., Crous, K. Y., Tissue, D. T., Ghannoum, O., Tjoelker, M. G. 2015. The capacity to cope with climate warming declines from temperate to tropical latitudes in two widely distributed Eucalyptus species. *Global Change Biology*, 21: 459–472.
- Bradshaw, C. J. A., Warkentin, I. G. 2015. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global and Planetary Change*, 128: 24–30.

- Gavrikov, V. L., Sharafutdinov, R. A., Knorre, A. A., Pakharkova, N. V., Shabalina, O. M., Bezkorovaynaya, I. N., Borisova, I. V., Erunova, M. G., Khlebopros, R. G. 2016. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools. *Journal of Forestry Research*, 27: 907–912.
- Loboda, T. V., Chen, D. 2017. Spatial distribution of young forests and carbon fluxes within recent disturbances in Russia. *Global Change Biology*, 23: 138–153.
- Melvin, A. M., Mack, M. C., Johnstone, J. F., McGuire, A. D., Genet, H., Schuur, E. A. G. 2015. Differences in Ecosystem Carbon Distribution and Nutrient Cycling Linked to Forest Tree Species Composition in a Mid-Successional Boreal Forest. *Ecosystems*, 18: 1472–1488.
- Mekonnen, Z. A., Grant, R. F., Schwalm, C. 2016. Contrasting changes in gross primary productivity of different regions of North America as affected by warming in recent decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218: 50–64.
- Kurylyk, B. L., Hayashi, M., Quinton, W. L., McKenzie, J. M., Voss, C. I. 2016. Influence of vertical and lateral heat transfer on permafrost thaw peatland landscape transition, and groundwater flow. *Water Resources Research*, 52: 1286–1305.
- Helbig, M., Pappas, C., Sonnentag, O. 2016. Permafrost thaw and wildfire: Equally important drivers of boreal tree cover changes in the Taiga Plains, Canada. *Geophysical Research Letters*, 43: 1598–1606.
- Desyatkin, R., Fedorov, A., Desyatkin, A., Konstantinov, P. 2015. Air temperature changes and their impact on permafrost ecosystems in eastern Siberia. *Thermal Science*, 19: 351–360.
- Siewert, M. B., Hanisch, J., Weiss, N., Kuhry, P., Maximov, T. C., Hugelius, G. 2015 Comparing carbon storage of Siberian tundra and taiga permafrost ecosystems at very high spatial resolution. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 120: 1973–1994.
- Kuosmanen, N., Seppa, H., Reitalu, T., Alenius, T., Bradshaw, R. H. W., Clear, J. L., Filimonova, L., Kuznetsov, O., Zaretskaya, N. 2016. Long-term forest composition and its drivers in taiga forest in NW Russia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 25: 221–236.
- Tchebakova, N. M., Parfenova, E. I., Soja, A. J. 2016. Significant Siberian Vegetation Change is Inevitably Brought on by the Changing Climate. *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*, 269–285.
- Korets, M. A., Tchebakova, N. M., Parfenova, E. I., Conard, S. G. 2016. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate. *Environmental Research Letters*, 11.
- Tautenhahn, S., Lichstein, J. W., Jung, M., Kattge, J., Bohlman, S. A., Heilmeyer, H., Prokushkin, A., Kahl, A., Wirth, C. 2016. Dispersal limitation drives successional pathways in Central

Siberian forests under current and intensified fire regimes. *Global Change Biology*, 22: 2178–2197.

Yue, X., Mickley, L. J., Logan, J. A., Hudman, R. C., Martin, M. V., Yantosca, R. M. 2016. Impact of 2050 climate change on North American wildfire: consequences for ozone air quality. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15: 10033–10055.

Jucker, T., Sanchez, A. C., Lindsell, J. A., Allen, H. D., Amable, G. S., Coomes, D. A. 2016. Drivers of aboveground wood production in a lowland tropical forest of West Africa: teasing apart the roles of tree density, tree diversity, soil phosphorus, and historical logging. *Ecology and Evolution*, 6: 4004–4017.

Shenkin, A., Bolker, B., Pena-Claros, M., Licona, J. C., Putz, F. E. 2015. Fates of trees damaged by logging in Amazonian Bolivia. *Forest Ecology and Management*, 357: 50–59.

Fujisaki, K., Perrin, A. S., Desjardins, T., Bernoux, M., Balbino, L. C., Brossard, M. 2015. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Global Change Biology*, 21: 2773–2786.

Vieilledent, G., Gardi, O., Grinand, C., Burren, C., Andriamanjato, M., Camara, C., Gardner, C. J., Glass, L., Rasolohery, A., Ratsimba, H. R., Gond, V., Rakotoarijaona, J. R. 2016. Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology*, 104: 703–715.

Silveira, J. M., Louzada, J., Barlow, J., Andrade, R., Mestre, L., Solar, R., Lacau, S., Cochrane, M. A. 2016. A Multi-Taxa Assessment of Biodiversity Change After Single and Recurrent Wildfires in a Brazilian Amazon Forest. *Biotropica*, 48: 170–180.

Vieira, C. R., Pitts, J., Colli, G. R. 2015. Microhabitat changes induced by edge effects impact velvet ant (Hymenoptera: Mutillidae) communities in southeastern Amazonia, Brazil. *Journal of Insect Conservation*, 19: 849–861.

Osone, Y., Toma, T., Warsudi, Sutedjo, Sato, T. 2016. High stocks of coarse woody debris in a tropical rainforest, East Kalimantan: Coupled impact of forest fires and selective logging. *Forest Ecology and Management*, 374: 93–101.

Brienen, R. J. W., Schongart, J., Zuidema, P. A. 2016. Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees. *Tropical Tree Physiology: Adaptations and Responses in a Changing Environment*, 6: 439–461.

Philippon, N., de Lapparent, B., Gond, V., Seze, G., Martiny, N., Camberlin, P., Cornu, G., Morel, B., Moron, V., Bigot, S., Brou, T., Dubreuil, V. 2016. Analysis of the diurnal cycles for a better understanding of the mean annual cycle of forests greenness in Central Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223: 81–94.

- Zhang, Y., Zhu, Z. C., Liu, Z., Zeng, Z. Z., Ciais, P., Huang, M. T., Liu, Y. W., Piao, S. L. 2016. Seasonal and interannual changes in vegetation activity of tropical forests in Southeast Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224: 1–10.
- Santiago, L. S., Bonal, D., De Guzman, M. E., Avila-Lovera, E. 2016. Drought Survival Strategies of Tropical Trees. *Tropical Tree Physiology: Adaptations and Responses in a Changing Environment*, 6: 243–258.
- Renninger, H. J., Phillips, N. G. 2016. Palm Physiology and Distribution in Response to Global Environmental Change. *Tropical Tree Physiology: Adaptations and Responses in a Changing Environment*, 6: 67–101.
- Fargeon, H., Aubry-Kientz, M., Brunaux, O., Descroix, L., Gaspard, R., Guitet, S., Rossi, V., Herault, B. 2016. Vulnerability of Commercial Tree Species to Water Stress in Logged Forests of the Guiana Shield. *Forests*, 7.
- Swann, A. L. S., Longo, M., Knox, R. G., Lee, E., Moorcroft, P. R. 2015. Future deforestation in the Amazon and consequences for South American climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214: 12–24.
- Mendivelso, H. A., Camarero, J. J., Gutierrez, E., Castano-Naranjo, A. 2016. Climatic influences on leaf phenology, xylogenesis and radial stem changes at hourly to monthly scales in two tropical dry forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216: 20–36.
- Zhang, K., Castanho, A. D. D., Galbraith, D. R., Moghim, S., Levine, N. M., Bras, R. L., Coe, M. T., Costa, M. H., Malhi, Y., Longo, M., Knox, R. G., McKnight, S., Wang, J. F., Moorcroft, P. R. 2015. The fate of Amazonian ecosystems over the coming century arising from changes in climate, atmospheric CO<sub>2</sub>, and land use. *Global Change Biology*, 21: 2569–2587.
- Murphy, H. T., Metcalfe, D. J. 2016. The perfect storm: Weed invasion and intense storms in tropical forests. *Austral Ecology*, 41: 864–874.
- Fletcher, M. S. 2015. Mast seeding and the El Nio-Southern Oscillation: a long-term relationship?. *Plant Ecology*, 216: 527–533.
- Spannl, S., Volland, F., Pucha, D., Peters, T., Cueva, E., Brauning, A. 2016. Climate variability, tree increment patterns and ENSO-related carbon sequestration reduction of the tropical dry forest species *Loxopterygium huasango* of Southern Ecuador. *Trees-Structure and Function*, 30: 1245–1258.
- Maron, M., McAlpine, C. A., Watson, J. E. M., Maxwell, S., Barnard, P. 2015. Climate-induced resource bottlenecks exacerbate species vulnerability: a review. *Diversity and Distributions*, 21: 731–743.
- Cavaleri, M. A., Reed, S. C., Smith, W. K., Wood, T. E. 2015. Urgent need for warming

experiments in tropical forests. *Global Change Biology*, 21: 2111–2121.

Crabbe, R. A., Dash, J., Rodriguez-Galiano, V. F., Janous, D., Pavelka, M., Marek, M. V. 2016. Extreme warm temperatures alter forest phenology and productivity in Europe. *Science of the total Environment*, 563: 486–495.

Xie, Y. Y., Ahmed, K. F., Allen, J. M., Wilson, A. M., Silander, J. A. 2015. Green-up of deciduous forest communities of northeastern North America in response to climate variation and climate change. *Landscape Ecology*, 30: 109–123.

Fu, Y. S. H., Liu, Y. J., De Boeck, H. J., Menzel, A., Nijs, I., Peaucelle, M., Penuelas, J., Piao, S. L., Janssens, I. A. 2016. Three times greater weight of daytime than of night-time temperature on leaf unfolding phenology in temperate trees. *New Phytologist*, 212: 590–597.

Gonsamo, A., Croft, H., Chen, J. M., Wu, C. Y., Froelich, N., Staebler, R. M. 2015. Radiation contributed more than temperature to increased decadal autumn and annual carbon uptake of two eastern North America mature forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201: 8–16.

Magnusson, R. I., Tietema, A., Cornelissen, J. H. C., Hefting, M. M., Kalbitz, K. 2016. Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 377: 1–15.

Innangi, M., d'Alessandro, F., Fioretto, A., Di Febbraro, M. 2015. Modeling distribution of Mediterranean beech forests and soil carbon stock under climate change scenarios. *Climate Research*, 66: 25–36.

Noh, N. J., Kuribayashi, M., Saitoh, T. M., Nakaji, T., Nakamura, M., Hiura, T., Muraoka, H. 2016. Responses of Soil, Heterotrophic, and Autotrophic Respiration to Experimental Open-Field Soil Warming in a Cool-Temperate Deciduous Forest. *Ecosystems*, 19: 504–520.

Schleuss, P. M., Heitkamp, F., Leuschner, C., Fender, A. C., Jungkunst, H. F. 2014. Higher subsoil carbon storage in species-rich than species-poor temperate forests. *Environmental Research Letters*, 9.

Pretzsch, H., del Rio, M., Ammer, C., Avdagic, A., Barbeito, I., Bielak, K., Brazaitis, G., Coll, L., Dirnberger, G., Drossler, L., Fabrika, M., Forrester, D., Godvod, K., Heym, M., Hurt, V., Kurylyak, V., Lof, M., Lombardi, F., Matovic, B., Mohren, F., Motta, R., den Ouden, J., Pach, M., Ponette, Q., Schutze, G., Schweig, J., Skrzyszewski, J., Sramek, V., Sterba, H., Stojanovic, D., Svoboda, M., Vanhellefont, M., Verheyen, K., Wellhausen, K., Zlatanov, T., Bravo-Oviedo, A. 2015. Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *European Journal of Forest Research*, 134: 927–947.

Nickmans, H., Verheyen, K., Guiz, J., Jonard, M., Ponette, Q. 2015. Effects of neighbourhood



identity and diversity on the foliar nutrition of sessile oak and beech. *Forest Ecology and Management*, 335: 108–117.

Latte, N., Perin, J., Kint, V., Lebourgeois, F., Claessens, H. 2016. Major Changes in Growth Rate and Growth Variability of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Related to Soil Alteration and Climate Change in Belgium. *Forests*, 7.

Talkner, U., Meiwes, K. J., Potocic, N., Seletkovic, I., Cools, N., De Vos, B., Rautio, P. 2015. Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science*, 72: 919–928.

Jennings, K. A., Guerrieri, R., Vadeboncoeur, M. A., Asbjornsen, H. 2016. Response of *Quercus velutina* growth and water use efficiency to climate variability and nitrogen fertilization in a temperate deciduous forest in the northeastern USA. *Tree Physiology*, 36: 428–443.

Xie, J., Chen, J. Q., Sun, G., Zha, T. S., Yang, B., Chu, H. S., Liu, J. G., Wan, S. Q., Zhou, C. X., Ma, H., Bourque, C. P. A., Shao, C. L., John, R., Ouyang, Z. T. 2016. Ten-year variability in ecosystem water use efficiency in an oak-dominated temperate forest under a warming climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218: 209–217.

Rasheed, F., Delagrange, S. 2016. Acclimation of *Betula alleghaniensis* Britton to moderate soil water deficit: small morphological changes make for important consequences in crown display. *Tree Physiology*, 36: 1320–1329.

Delaporte, A., Bazot, S., Damesin, C. 2016. Reduced stem growth, but no reserve depletion or hydraulic impairment in beech suffering from long-term decline. *Trees-Structure and Function*, 30: 265–279.

Giagli, K., Gricar, J., Vavrcik, H., Mensik, L., Gryc, V. 2016. The effects of drought on wood formation in *Fagus Sylvatica* during two contrasting years. *Iawa Journal*, 37: 332–348.

Knutzen, F., Meier, I. C., Leuschner, C. 2015. Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus sylvatica* L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree Physiology*, 35: 949–963.

Dolos, K., Mette, T., Wellstein, C. 2016. Silvicultural climatic turning point for European beech and sessile oak in Western Europe derived from national forest inventories. *Forest Ecology and Management*, 373: 128–137.

Martin, P. A., Newton, A. C., Cantarello, E., Evans, P. 2015. Stand dieback and collapse in a temperate forest and its impact on forest structure and biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 358: 130–138.

Ma, W., Liang, J. J., Cumming, J. R., Lee, E., Welsh, A. B., Watson, J. V., Zhou, M. 2016. Fundamental shifts of central hardwood forests under climate change. *Ecological Modelling*, 332: 28–41.

Dumroese, R. K., Williams, M. I., Stanturf, J. A., Clair, J. B. S. 2015. Considerations for restoring temperate forests of tomorrow: forest restoration, assisted migration, and bioengineering. *New Forests*, 46: 947–964.