

VÝCHOVNÝ ZÁSAH V MLADÝCH SMRKOVÝCH POROSTECH JAKO NÁSTROJ MITIGACE GLOBÁLNÍ KLIMATICKÉ ZMĚNY?

PRE-COMMERCIAL THINNING IN YOUNG NORWAY SPRUCE STANDS AS A TOOL MITIGATING GLOBAL CLIMATE CHANGE?

JAKUB ČERNÝ

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73 Opočno, Czech Republic

e-mail: cerny@vulhmop.cz

ORCID: [J. Černý 0000-0002-9954-1506](https://orcid.org/0000-0002-9954-1506)

ABSTRACT

Although the ongoing global climate change elicits a shift in tree species composition along the vertical gradient, very extensive areas of pure Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] stands still occur out of their ecological optimum in the Czech Republic and Central Europe. Adaptive measures should be applied in these stands to promote productivity and stability. All measurements were performed in the 2018–2021 period on three permanent research plots located in the North-East part of Bohemia (Czech Republic). Based on the results, the most favourable way to increase solar radiation use efficiency expressed by canopy production index (CPI) and leaf area efficiency (LAE) is in-time heavy pre-commercial thinning application. The highest CPI and LAE values were observed in the Norway spruce stand after heavy pre-commercial thinning application (CPI = 2.00 and LAE = 1.59). In contrast, CPI = 1.26 and LAE = 0.99 were observed after the mild one, and CPI = 0.73 and LAE = 0.60 were reported in the control treatment with no silvicultural intervention. Overall, the presented results indicate a positive effect of heavy pre-commercial thinning on CPI and LAE in pure young Norway spruce stands. However, more effort should be devoted to studying the impact of different pre-commercial thinning intensities on solar radiation use efficacy across a broader gradient of site conditions, and future work should also be extended to other tree species.

[For more information see Summary at the end of the article.](#)

Klíčová slova: *Picea abies*; silný zásah; mírný zásah; index produkce porostního zápoje (CPI); efektivita listové plochy (LAE); celková nadzemní biomasa sušiny; kruhová výčetní základna porostu

Key words: *Picea abies*; heavy pre-commercial thinning; mild pre-commercial thinning; Canopy Production Index (CPI); Leaf Area Efficiency (LAE); total above-ground dry biomass; stand basal area

ÚVOD

Globální klimatická změna (GKZ) způsobuje nárůst četnosti extrémních klimatických událostí (RAHMSTORF, COUMOU 2011). Probíhající GKZ je tedy velkou výzvou pro všechna odvětví, nevyjímaje lesnicko-dřevařský sektor. Lesní ekosystémy jsou na jednu stranu vystaveny a ohroženy GKZ, která ovlivňuje růst dřevin napříč druhovým spektrem (SALOMÓN et al. 2022), ale na druhou stranu ji mohou tlumit (mitigovat) sekvestrací uhlíku do biomasy a rovněž působí jako vhodné adaptační opatření prostřednictvím regulace vodního režimu, kvality ovzduší a dokonce snížením klimatických extrémů (VACEK et

al. 2023). V poslední době je v podmínkách ČR zejména smrk ztepilý [*Picea abies* (L.) Karst.] silně sužován abiotickými faktory následovanými poškozením sekundárními biotickými škůdci (*Ips typographus* L.; HLÁSNÝ et al. 2021), které způsobují zvýšený podíl nahodilé těžby (ŠIMŮNEK et al. 2020). Proto nové poznatky o vlivu různých hospodářských opatření v lesních ekosystémech, které mohou ovlivnit jejich ekologickou stabilitu, hrají zásadní roli v tlumení GKZ (NAUDTS et al. 2016), která stále více ovlivňuje schopnost lesů poskytovat ekosystémové služby jako je produkce biomasy, sekvestrace uhlíku, regulace kvality ovzduší a vodního režimu (BELLASSEN, LUYSSAERT 2014; BOTTERO et al. 2021).

V kontextu GKZ je zcela zásadní dostupnost zdrojů pro lesní dřeviny, která výraznou měrou ovlivňuje produkci listoví (VOSE, ALLEN 1988). Ta má významný vliv na intercepci slunečního záření potřebného pro proces fotosyntetické asimilace jakožto hlavního produkčního procesu rostlin. Fotosyntetická asimilace začíná absorpcí fotosynteticky aktivního záření (FAR; vlnové délky 380–720 nm; LARCHER 2003; TAIZ, ZEIGER 2010) rostlinnými pigmenty, kde dochází k přeměně energie FAR na energii chemických vazeb organických látek (OLASCOAGA et al. 2016), která se na konci tohoto fyziologického procesu projevuje sekvestrací uhlíku a růstem rostlin (LANDSBERG, SANDS 2011). V mnoha produkčních studiích byl prokázán lineární vztah mezi absorbovaným FAR (AFAR) a růstem rostlin, a to jak v lesních porostech různého dřevinného složení (např. JARVIS, LEVERENZ 1983; GRACE et al. 1987; CANNELL et al. 1988; DALLATEA, JOKELLA 1991; ČERNÝ et al. 2020a), tak u zemědělských plodin (např. STOCKLE, KINIRY 1990; SHI et al. 2022). Skutečná produkce rostlinných společenstev daného stanoviště však není určena pouze množstvím AFAR, ale i efektivitou přeměny světelné energie na biomasu v rámci procesu fotosyntetické asimilace. Ta je závislá jak na stanovištních podmínkách (dostupnost vody a půdních živin, CENDRERO-MATEO et al. 2015; KUMARATHUNGE et al. 2020), tak i na struktuře porostu (index listové plochy – LAI, kvalita asimilačního aparátu, hustota porostu), druhové diverzité a formě smíšení, které lze plně usměrňovat pěstebními zásahy (LEDERMANN et al. 2022).

Efektivita je obecně definována jako poměr mezi libovolnou měřenou proměnnou produkce biomasy a měřením zásoby či využití zdroje (GSPALTL et al. 2013). Přeměna světelné energie na biomasu není ovšem závislá pouze na množství asimilačního aparátu (LAI), ale také na jeho kvalitě, tj. na poměru slunného a stinného typu listoví ve vertikálním profilu koruny (URBAN et al. 2007; RAJSNEROVÁ et al. 2015). Uvedené typy listoví se vzájemně liší svými morfologickými, anatomickými i fyziologickými vlastnostmi. Stinný typ listoví je v porovnání se slunným obvykle tenčí, ovšem s větší plochou povrchu, má nižší počet stomat (průduchů) na jednotku listové plochy, větší chloroplasty s nepravidelně orientovanými grany (shluky tylakoidů), mají jinou stavbu mezofylu, která se mj. promítá do změny vodivosti CO₂, mají vyšší obsah chlorofylu a karotenoidů a nižší obsah dusíku (SIMS, PEARCY 1994; LICHTENTHALER et al. 2007). Vzhledem k těmto rozdílům má stinný typ listoví nižší mitochondriální respiraci a nižší kompenzační i saturační bod fotosyntetické asimilace. To potvrzuje skutečnost, že fotosyntetická aktivita slunného typu listoví je statisticky významně vyšší než u stinného, což má značný vliv na množství sekvestrovaného uhlíku jednotlivými stromy, resp. celými lesními porosty (URBAN et al. 2007). Z tohoto důvodu slunné druhy dřevin, i přestože mají nižší LAI, ale výrazně vyšší poměr slunného typu listoví, dosahují podobné efektivity produkce jako plně olistěné stín snášející dřeviny (O'HARA et al. 1999; URBAN et al. 2007).

Poměr slunného a stinného typu listoví ve vertikálním profilu korunové vrstvy porostu lze usměrňovat pěstebními zásahy. Bylo zjištěno, že důležitou informací je nejen jejich intenzita, ale také typ výchovného zásahu; zvláště rozdíl mezi úrovnovým a podúrovnovým zásahem (POKORNÝ et al. 2008; ČERNÝ et al. 2018). Úrovnovým zásahem dochází ve vertikálním profilu koruny ke zvýšení podílu slunného typu listoví (s vyšší fotosyntetickou aktivitou), naopak podúrovnovým zásahem k tomuto stimulu tvorby slunného typu listoví nedochází. Pěstební zásah má tedy zcela zásadní vliv jak na kvantitu, tak především na kvalitu listoví, a tím i na efektivitu využití FAR porostním zápojem. Nejvyšší efektivitu porostů vychovávaných úrovnovými zásahy potvrdili např. POKORNÝ et al. (2008) a ČERNÝ et al. (2018) ve smrkových tyčkovinách a tyčovinách v horských a středních polohách. POKORNÝ (2015) uvádí, že relativní světelný požitek 1–2 % (tj. ozáření pod korunovou vrstvou z celkové ozáření nad porostem) je limitující světelnou dotací pro růst listoví a jakékoliv rostlinné vegetace. Tato hodnota ozáření pod porostním zápojem, resp. metodicky

reciproká hodnota LAI může sloužit např. jako ukazatel úspěšnosti přirozené obnovy lesních porostů (např. BEDNÁŘ et al. 2022). Z fyziologického hlediska tyto nízké (mezni) hodnoty ozáření na bázi korun většiny druhů dřevin zřejmě nemohou udržet kladnou uhlíkovou bilanci asimilačního aparátu, který opadává, a nový se v takto nízkých radiačních podmínkách dále vůbec nevytváří. Tato skutečnost má v pěstování lesů také význam v čištění kmene dané dřeviny ve vazbě na hustotu lesního porostu (ALBRECHTOVÁ et al. 2017).

Obecně je známo, že světlo je nejtěsněji vztaženo k produkci biomasy rostlin (MONTEITH 1972; ČERNÝ et al. 2020a). Efektivita využití světla jakožto přímo měřeného zdroje je v současné době nejčastěji označována jako dlouhodobá *Radiation Use Efficiency* (RUE; g MJ⁻¹; např. ČERNÝ et al. 2020a), či krátkodobá (okamžitá) *Light Use Efficiency* (LUE; g MJ⁻¹; např. GAN et al. 2021). Pro vyjádření efektivity využití sluneční radiace se ovšem můžeme v odborné literatuře setkat s listovou plochou či plochou běle jako zastupující proměnné zdroje světla či vody (SHINOZAKI et al. 1964) případně s termíny: Efektivita přírůstu objemu kmene (VIE), která je definovaná jako poměr mezi přírůstem biomasy kmene a AFAR (GROOT, SAUCIER 2008), Efektivita listové plochy (LAE) definovaná jako poměr mezi přírůstem kruhové výčetní základny a listovou plochou (např. ČERNÝ et al. 2018) či Index produktivity porostního zápoje (CPI), který byl uveden jako ekvivalent VIE (TAYLOR 1993; NORBY 1996). Protože množství dopadajícího FAR a efektivita jeho využití jsou hlavními řídicími složkami procesu fotosyntetické asimilace (GSPALTL et al. 2013), při níž je vázán atmosférický CO₂ do biomasy vegetace (MONTEITH 1977), je nesmírně důležité přesné stanovení záchytné plochy (LAI), resp. množství fotosynteticky aktivního listoví (OLASCOAGA et al. 2016). Listoví je s ohledem nejen na porostní výchovu dynamickou a variabilní složkou struktury lesa (FRAZER et al. 2000; BEQUET et al. 2011), v níž se vyskytuje nejvíce drobných časových a prostorových změn v celé biosféře (ASNER et al. 2003). Proto se množství neseného listoví stává základní popisnou proměnnou vegetačních podmínek v široké škále fyziologických, klimatologických, hydrologických a biochemických studií (WULDER et al. 1998; ZHENG, MOSKAL 2009). Všeobecně je v těchto studiích množství asimilačního aparátu neseného konkrétní porostní strukturou kvantifikováno parametrem LAI (ASNER et al. 2003; FOURNIER et al. 2003), který je definován jako projekční plocha listoví normalizovaná horizontální plochou povrchu (MONTEITH, UNSWORTH 2013).

Navzdory probíhající GKZ, která je charakterizovaná zvyšováním průměrných teplot vzduchu a změnou distribuce srážek během vegetačního období (SEIDL et al. 2014), je smrk ztepilý ve střední Evropě stále ekologicky a ekonomicky významnou dřevinou, a to i přes vysokou citlivost k pruhu (ALBRECHT et al. 2012). V ČR je dřevinou s nejvyšším zastoupením (49 %), přičemž se rozsáhlé výměry mladých smrkových monokultur vyskytují za hranicí vhodnosti jejich pěstování (MZE 2022).

Z těchto důvodů je cílem předložené studie stanovení sezónní maximální hodnoty porostního indexu listové plochy (LAI_{max}), přírůstu celkové nadzemní biomasy sušiny a kruhové výčetní základny studovaných porostů, na jejichž základě je porovnán vliv různé intenzity pěstebního zásahu na efektivitu využití slunečního záření porostním zápojemem hodnoceného prostřednictvím CPI a LAE.

V předloženém článku bude ověřována níže uvedená hypotéza:

H1: Nejvyšší efektivitu využití slunečního záření (CPI, LAE) bude dosahovat smrkový porost po nejsilnějším výchovném zásahu (plocha C) vzhledem ke snížení konkurence v prostoru korunového zápoje a zvýšení ozáření korun ponechaných stromů.

MATERIÁL A METODIKA

Stanovištní podmínky a studované porosty

Veškerá měření byla provedena v mladých 15letých (2021) nesmíšených smrkových porostech na lokalitě Křivina (50°12'55.376" N; 16°06'50.669" E; obr. 1 vlevo), která se nachází na rovinatém terénu v nadmořské výšce 402 m n. m. Tyto polohy odpovídají lokalitám za hranicí vhodnosti pěstování smrku ztepilého v podmínkách ČR a dle klimatických scénářů (např. HANEWINKEL et al. 2013) lze předpokládat, že bude v těchto polohách smrk velmi výraznou měrou stresován nepříznivými klimatickými faktory. Studované porosty byly v roce 2006 uměle obnoveny po mechanické přípravě půdy (diskovou frézou) vyspělým krytokořenným sadebním materiálem smrku. Výchozí hustota všech sledovaných porostů byla 3 500 stromů na hektar.

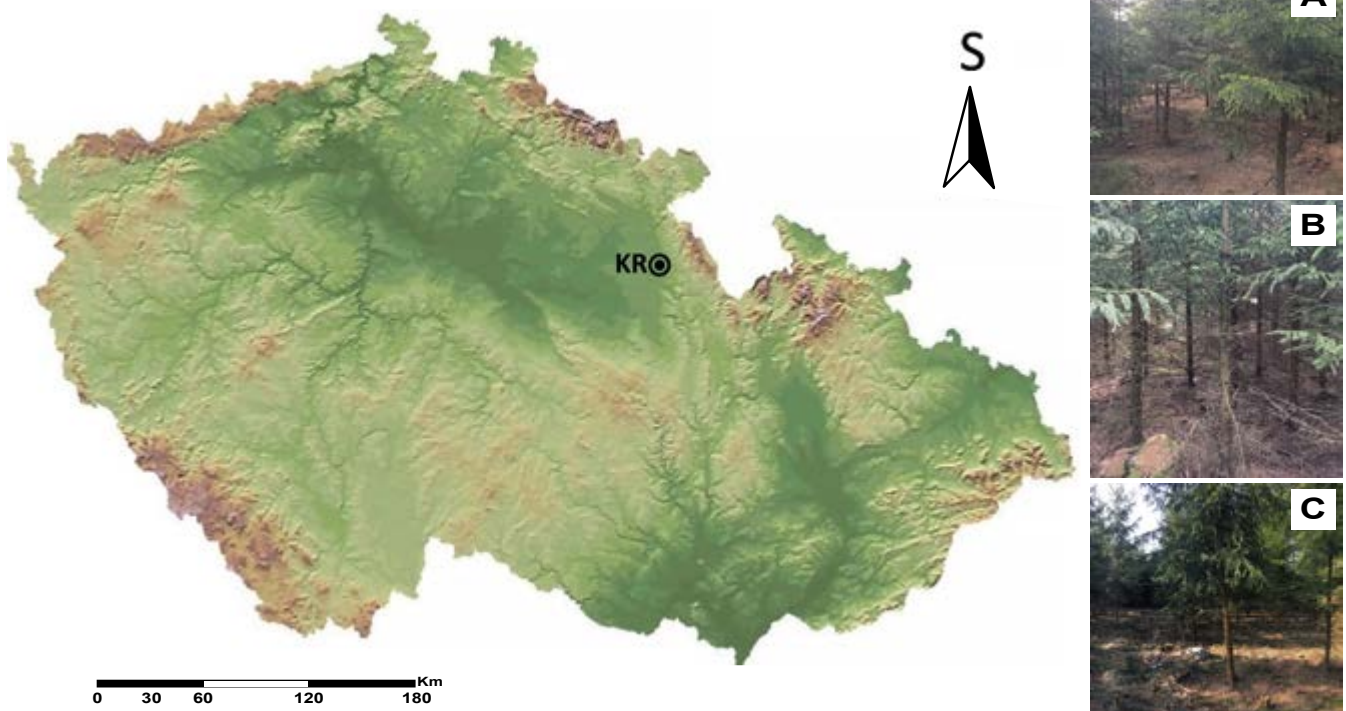
Půdním typem je kambizem modální, průměrné teploty vzduchu a roční úhrn srážek (za období 2018–2020) jsou 10,4 °C a 606,3 mm. Klimatické charakteristiky byly ve sledovaném období kontinuálně měřeny meteostanicí, která je umístěna na dostatečně velké volné ploše (FLECK et al. 2020) ve vzdálenosti 500 m od studovaných ploch. Typologicky je studovaná lokalita klasifikována jako hlinitá dubová bučina šťavelová (*Querceto-Fagetum illimerosum trophicum*; VIEWEGH et al. 2003).

V roce 2018 byly založeny 3 výzkumné plochy o výměře 40 × 65 m, na nichž byly všechny stromy přítomné na ploše vzestupně očíslovány a inventarizovány (výčetní tloušťka kmene v prsní výšce: DBH, výška stromu: H). Výchozí porostní hustota (3 500 stromů/ha) sledova-

ných ploch byla v zimě 2019/2020 snížena výchovným zásahem různé intenzity na porostní hustotu: (i) 1 800 jedinců/ha (mírný zásah; plocha A), (ii) 1 300 stromů/ha (silný zásah; plocha C) a (iii) kontrolní variantu, která byla ponechána samovolnému vývoji (tj. výchozích 3 500 jedinců/ha; plocha B; obr. 1 vpravo). Výchovný zásah byl realizován na základě negativního výběru s jádrem pěstební péče v podúrovni porostu (KORPEL et al. 1991). Během výchovného zásahu byl kladen důraz na ponechání spádného okraje porostů z důvodu jejich stability a bezprostředně po provedení zásahu bylo provedeno vyklizení veškerých těžebních zbytků. Na výzkumných plochách byla každoročně provedena inventarizace porostů (2018, 2019, 2020, 2021). V rámci inventarizace byly podle publikace ČERNÝ et al. (2020b) měřeny DBH ve dvou na sebe kolmých směrech průměrkou s přesností 0,1 cm a H všech stromů pomocí výškoměru Vertex IV (Haglůf, Švédsko) s přesností 0,1 m.

Stanovení LAI

Hodnota LAI byla stanovena před provedením výchovného zásahu (30/07/2019), který byl realizován v zimním období 2019/2020, i po něm v průběhu následujícího vegetačního období (18/07/2020), kdy LAI ve smrkových porostech kulminuje a dosahuje své sezónní maximální hodnoty (LAI_{max} ; POKORNÝ et al. 2008; KINANE et al. 2021). LAI byl v každém studovaném porostu měřen přístrojem LaiPen LP 110 (PSI, ČR) v duálním modu 1,3 m nad zemí v rámci pravidelné sítě 18 měřicích bodů (spon 10 × 10 m) pod porostním zápojem. Jeden přístroj, který měří záření dopadající nad porost, byl umístěn na



Obr. 1.

Lokalizace studovaných smrkových výzkumných ploch (vlevo) a pohled do interiéru porostů po výchovném zásahu provedeném v zimě 2019/2020 (vpravo). KR: Křivina, A: smrkový porost s mírným zásahem (1 800 stromů/ha), B: kontrolní plocha bez výchovného zásahu (3 500 stromů/ha), C: smrkový porost se silným výchovným zásahem (1 300 stromů/ha)

Fig. 1.

Localisation of the studied Norway spruce research plots (left) and view into the inner part of the studied spruce stands after pre-commercial thinning applied in winter 2019/2020 (right). KR: Křivina, A: Norway spruce stand with mild pre-commercial thinning (1,800 trees/ha), B: control plot with no silvicultural intervention (3,500 trees/ha), and C: Norway spruce stand with heavy pre-commercial thinning (1,300 trees/ha)

dostatečně velké volné ploše v těsné blízkosti sledovaných porostů (FLECK et al. 2020) a druhý byl použit pro souběžné měření pod porostním zápojem při stejné orientaci úhlu záběru čidla (tj. kolmo na sever). Měření probíhalo vždy za vhodných synoptických podmínek (tj. při bezvětří a homogenní oblačnosti; ČERNÝ et al. 2019). Detailní metodický postup, kalibrace použité dvojice přístrojů a výpočet LAI podle Lambert-Beerova zákona je uvedena v ČERNÝ, POKORNÝ (2021). Pro účely předložené studie byl pro každý porost vypočítán porostní LAI_{max} před a po provedení výchovného zásahu.

Výpočet CPI a LAE

Parametr CPI byl vypočítán podle TAYLORA (1993) a NORBYHO (1996) jako poměr mezi roční produkcí celkové nadzemní biomasy sušiny a maximální sezónní hodnotou porostního LAI:

$$CPI = TAB_{inc} LAI_{max}^{-1} \quad (1)$$

kde CPI je Index produktivity porostního zápoje, TAB_{inc} je přírůst celkové nadzemní biomasy sušiny a LAI_{max} představuje maximální sezónní hodnotu indexu listové plochy.

Hodnoty LAE byly vypočítány jako poměr mezi ročním přírůstem kruhové výčetní základny porostu v prsní výšce (tj. 1,3 m nad zemí) a maximální sezónní hodnotou porostního LAI (ČERNÝ et al. 2018):

$$LAE = BA_{inc} LAI_{max}^{-1} \quad (2)$$

kde LAE je Efektivita využití listové plochy, BA_{inc} představuje přírůst kruhové výčetní základny porostu a LAI_{max} představuje maximální sezónní hodnotu indexu listové plochy.

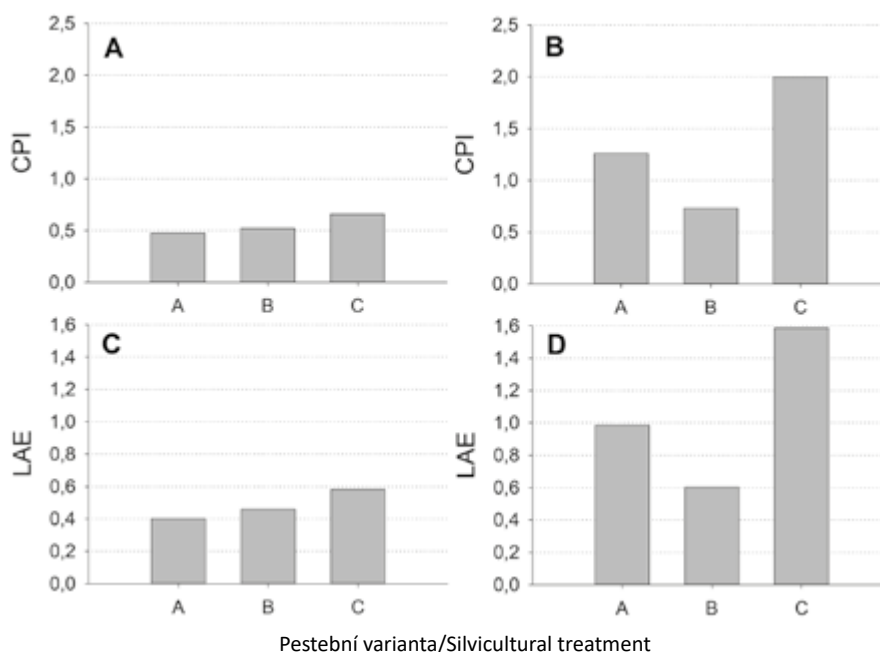
Pro výpočet ročního přírůstu kruhové výčetní základny porostu a celkové nadzemní biomasy sušiny, které jsou nezbytné pro výpočet CPI a LAE, byla využita data z pravidelné každoroční inventarizace studovaných porostů z let 2018–2021 a alometrické vztahy pro smrk ztepilý v podmínkách České republiky (VEJPUSKOVÁ et al. 2017). S rostoucí hodnotou parametrů CPI a LAE se zvyšuje efektivita využití slunečního záření porostním zápojem.

Veškerá data, která byla použita v předložené studii, byla analyzována v softwaru SigmaPlot® verze 13 (Systat Software Inc., CA, USA).

VÝSLEDKY

Před provedením výchovného zásahu v roce 2019 byly zaznamenány vyrovnané hodnoty CPI (0,47–0,66) i LAE (0,40–0,58) na všech studovaných pěstebních variantách (obr. 2A, 2C). První rok po provedení výchovného zásahu s různou intenzitou byl zjištěn nejvýraznější nárůst obou sledovaných parametrů na variantě C se silným zásahem (CPI = 2,00; LAE = 1,59). Mírný zásah (varianta A) měl rovněž pozitivní vliv na efektivitu využití slunečního záření porostním zápojem, kdy byly rok po zásahu sledovány hodnoty CPI = 1,26 a LAE = 0,99. Nejnižší hodnoty CPI a LAE byly v roce 2020 zjištěny na variantě B bez provedení výchovného zásahu (CPI = 0,73; LAE = 0,60; obr. 2B, 2D).

Výchovný zásah měl příznivý vliv na efektivitu využití slunečního záření hodnocenou prostřednictvím parametrů CPI a LAE (obr. 3), kdy porost s mírným zásahem (varianta A) dosahoval 4 × vyššího



Obr. 2.

Hodnoty CPI studovaných porostů smrku ztepilého před (A) a po výchovném zásahu (B) a LAE sledovaných porostů před (C) a po (D) výchovném zásahu. CPI: Index produktivity porostního zápoje; LAE: Efektivita využití listové plochy; A: výzkumná plocha s mírným zásahem (1 800 stromů/ha), B: kontrolní plocha bez výchovného zásahu (3 500 stromů/ha), C: plocha se silným výchovným zásahem (1 300 stromů/ha) Fig. 2.

CPI and LAE values observed in the studied pure Norway spruce stands before (A, C) and after (B, D) pre-commercial thinning application, respectively. CPI: Canopy production index; LAE: Leaf area effectivity; A: research plot with mild pre-commercial thinning (1,800 trees/ha), B: control plot with no silvicultural intervention (3,500 trees/ha), and C: research plot with heavy pre-commercial thinning (1,300 trees/ha)

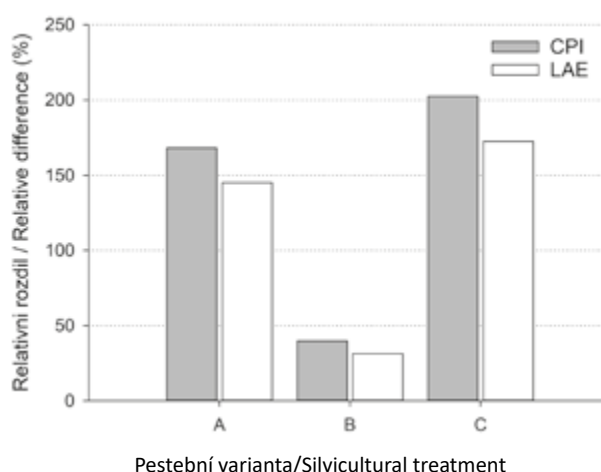
nárůstu efektivity v porovnání s porostem ponechaným bez výchovného zásahu (varianta B). Nejvyšší nárůst obou sledovaných parametrů po provedení porostní výchovy byl ovšem zaznamenán ve smrkovém porostu se silným výchovným zásahem (varianta C), kde CPI i LAE dosahovaly více než 5násobné zvýšení v porovnání s porostem bez výchovy (varianta B). V případě porovnání porostů s uplatněnou porostní výchovou byl na variantě se silným zásahem (C) vyšší nárůst hodnot CPI o 34 % a LAE o 27 % než na ploše s mírným zásahem (A).

DISKUSE

Porostní výchova je jedním z hospodářských opatření, které hraje zásadní roli při usměrňování růstu jedinců v porostu (MÄKINEN et al. 2005). Kromě regulace tloušťkového a výškového přírůstu odstraňováním jedinců z porostu mohou být časnější a intenzivnější výchovné zásahy účinným opatřením pro zvýšení mechanické stability stromů (resp. celých porostů; DUŠEK et al. 2023), sekvestrace atmosférického uhlíku či zlepšení vodní bilance porostu v rámci měnících se klimatických podmínek (NUUTINEN et al. 2006; HEIKKILÄ et al. 2007). METSLAID et al. (2007) zjistili, že narušením porostního zápoje dochází nejen ke zvýšením ozářenosti korun ponechaných stromů, ale především k morfologickým změnám listů v podobě zvětšení jeho tloušťky a šířky jako reakce na zvýšený světelný požitek. To znamená, že v rámci vertikálního profilu koruny dochází k nárůstu podílu slunného typu listů, který je obecně charakteristický (i) nízkou hodnotou SLA (cm^2/g), tedy vyšším obsahem vyprodukovaných asimilátů (biomasy; g) na jednotku plochy listů (cm^2), nebo naopak vysokou hodnotou inverzní veličiny LMA (g/cm^2); (ii) změnou plochy listů; (iii) vyšší hustotou stomat (průduchů); (iv) zvětšením tloušťky pokožky, kutikuly i mezofylu atd. (LARCHER 2003; ČATER, SIMONČIČ 2010; JARČUŠKA 2011), a tím i k vyšší efektivitě využití FAR zelenými pleťiv v procesu fotosyntetické asimilace, která vede k vyšší sekvestraci uhlíku a objemové produkci ponechaných stromů (WALLENTIN, NILSON 2011). Tomu odpovídají i výsledky předložené studie, kde

byla zaznamenána nejvyšší efektivity využití slunečního záření (CPI a LAE) v mladém smrkovém porostu s nejsilnějším výchovným zásahem (varianta C; obr. 2B, 2D). Tuto skutečnost podepírají i závěry studií, které na stejné lokalitě prokázaly ve stejném porostu (varianta C) nejen nejvyšší přírůst kruhových ploch jednotlivých přítomných stromů v porostu, příznivou hodnotu štíhlostního kvocientu (stabilitu; PETERKOVÁ, ČERNÝ 2022), ale i nejvyšší počet nově přirůstajících xylémových a floémových buněk (GIAGLI et al. 2023), což potvrzuje testovanou hypotézu H1. Z pohledu vodní bilance porostu by v kontextu probíhající GKZ naopak mohla nejintenzivněji vychovávaná varianta (C) představovat zvýšené riziko vzhledem k vyšší evaporaci (fyzikálnímu výparu) z povrchu půdy kvůli vyšší otevřenosti porostního zápoje. To ovšem vyvrací DUŠEK et al. (2021), který se ve své studii zahrnující i studovanou lokalitu Křivina věnoval vlivu otevřenosti porostního zápoje na půdní vlhkost ve svrchních horizontech minerální půdy a nenalezl mezi diferencovanými přístupy pěstebnímu managementu žádné statisticky průkazné rozdíly.

Vliv na efektivity využití slunečního záření, a tím i tlumení GKZ má též umístění pěstebního zásahu ve vertikálním profilu koruny. POKORNÝ et al. (2008) sledovali rozdílný vliv podúrovňové a úrovňové probrírky v horských smrkových 22–29letých porostech. Studie prokázala pozitivní vliv úrovňového zásahu na CPI, který se pohyboval v rozmezí 0,08 až 0,12 (kg/m^2) s klesajícím trendem v průběhu narůstajícího věku, což odpovídá studii HACUROVÉ et al. (2020), která zaznamenala vyšší počet nově vzniklých buněk xylému a floému v mladším (35letém) než ve starším (106letém) smrkovém porostu. Stejně výsledky prokázal i ČERNÝ et al. (2018), který sledoval nejvyšší hodnoty CPI i LAE v 36letém smrkovém porostu s provedeným úrovňovým zásahem. To je způsobeno signifikantně odlišným tvarem koruny smrku ztepilého v porostech s úrovňovými zásahy, které jsou hlouběji zavětvené (MISSON et al. 2003; MÄKINEN, ISOMÄKI 2004), což se výraznou měrou podílí na průniku světla porostním zápojem skrz vertikální světelné šachty. Tato zvýšená ozářenost listů podporuje proces fotosyntetické asimilace v nižších vrstvách koruny, a tím zvyšuje i efektivity využití slunečního záření celého korunového zápoje. Úrovňovým



Obr. 3.

Relativní rozdíly (%) vlivu pěstebnímu managementu na hodnoty CPI a LAE. CPI: Index produktivity porostního zápoje; LAE: Efektivita využití listové plochy; A: výzkumná plocha s mírným zásahem (1 800 stromů/ha), B: kontrolní plocha bez výchovného zásahu (3 500 stromů/ha), C: plocha se silným výchovným zásahem (1 300 stromů/ha)

Fig. 3.

The effect of various silvicultural management on CPI and LAE values (expressed as relative differences in %). CPI: Canopy production index; LAE: Leaf area effectivity; A: research plot with mild pre-commercial thinning (1,800 trees/ha), B: control plot with no silvicultural intervention (3,500 trees/ha), and C: research plot with the heavy pre-commercial thinning (1,300 trees/ha)

zásahem tedy dochází ve vertikálním profilu koruny, v důsledku zvýšení ozářenosti listoví v nižších patrech korunové vrstvy, ke zvýšení podílu slunného typu listoví (METS LAID et al. 2007), což má značný vliv na množství sekvestrovaného uhlíku ponechanými stromy (MAREK et al. 1999; URBAN et al. 2007). Z předchozích studií je všeobecně zřejmé, že se LAE jedince zvyšuje s rostoucí dimenzí stromu (GSPALTL et al. 2013) jako výsledek vyšší ozářenosti koruny, a tím i vyšší absorpce FAR v rámci fotosyntetické asimilace (BINKLEY et al. 2010). Na druhou stranu je tato otázka mnohem složitější za předpokladu jejího hodnocení na úrovni celého lesního porostu vzhledem k distribuci tloušťkových tříd (GSPALTL et al. 2013), což podporuje i výsledky předložené studie, kde na variantě s nejsilnějším výchovným zásahem (C) převládají jedinci s širokými a hlubokými korunami.

Ačkoliv prezentované výsledky celkově naznačují pozitivní vliv silného zásahu na CPI i LAE v mladých smrkových monokulturách, je s ohledem na lokálnost předložené studie nutné ověření vlivu různé intenzity pěstební zásahu na efektivitu využití slunečního záření na širší škále stanovištních podmínek a případně i v porostech dalších hlavních hospodářských dřevin ČR.

ZÁVĚR

- Nejvyšší efektivita využití slunečního záření hodnocená pomocí CPI a LAE byla zaznamenána v porostu se silným výchovným zásahem, kde došlo v zimě 2019/2020 k redukci počtu jedinců z původních 3 500 stromů/ha na 1 300 stromů/ha.
- Silný výchovný zásah 5× zvýšil efektivitu využití slunečního záření (CPI, LAE) v porovnání s kontrolní variantou bez porostní výchovy.
- Smrkový porost se silným výchovným zásahem měl po uplatnění pěstební výchovy vyšší nárůst hodnot CPI o 34 % a LAE o 27 % než porost vychovávaný mírným zásahem (tj. redukce z 3 500 stromů/ha na 1 800 stromů/ha).
- Z pohledu mitigace probíhající GKZ se ve smrkových porostech jeví jako nejvhodnější včasný silný zásah. Nicméně pro generalizaci výsledků je nezbytné další sledování vlivu intenzity pěstební zásahu na širší škále stanovištních podmínek.

Poděkování:

Prezentovaný výzkum byl financován institucionální podporou MZE-RO0123 a projekty Národní agentury zemědělských věd ČR (NAZV) č. QK21020307 a QK22020008.

LITERATURA

- ALBRECHT A., HANWINKEL M., BAUHUS J., KOHNLE U. 2012. How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research*, 131: 229–247. DOI: 10.1007/s10342-010-0432-x
- ALBRECHTOVÁ J., KUPKOVÁ L., CAMPBELL P.K.E. 2017. Metody hodnocení fyziologického stavu smrkových porostů. Případové studie sledování vývoje stavu smrkových porostů v Krušných horách v letech 1998–2013. Praha, ČGS: 401 s. Geographica, sv. 10.
- ASNER G.P., SCURLOCK J.M.O., HICKE J.A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12: 191–205. DOI: 10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x

- BEDNÁŘ P., SOUČEK J., KREJZA J., ČERNÝ J. 2022. Growth and morphological patterns of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) juveniles in response to light intensities. *Forests*, 13: 1804. DOI: 10.3390/f13111804
- BELLASSEN V., LUYSSAERT S. 2014. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature*, 506: 153–155. DOI: 10.1038/506153a
- BEQUET R., CAMPIOLI M., KINT V., VANTEENKISTE D., MUYS B., CEULEMANS R. 2011. Leaf area index development in temperate oak and beech forests is driven by stand characteristics and weather conditions. *Trees*, 25: 935–946. DOI: 10.1007/s00468-011-0568-4
- BINKLEY D., STAPE J.L., BAUERLE W.L., RYAN M.G. 2010. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259: 1704–1713. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.05.037
- BOTTERO A., FORRESTER D.I., CAILLERET M., KOHNLE U., GESSLER A., MICHEL D., BOSE A.K., BAUHUS J., BUGMANN H., CUNTZ M., GILLEROT L., HANWINKEL M., LÉVESQUE M., RYDER J., SAINTE-MARIE J., SCHWARZ J., YOUSEFPOUR R., ZAMORA-PEREIRA J.C., RIGLING A. 2021. Growth resistance and resilience of mixed silver fir and Norway spruce forests in central Europe: Contrasting responses to mild and severe droughts. *Global Change Biology*, 27: 4403–4419. DOI: 10.1111/gcb.15737
- CANNELL M.G.R., SHEPPARD L.J., MILNE R. 1988. Light use efficiency and woody biomass production of poplar and willow. *Forestry*, 61 (2): 124–130. DOI: 10.1093/forestry/61.2.125
- CENDRERO-MATEO M., CARMO-SILVA A.E., PORCAR-CASTELL A., HAMERLYNCK E.P., PAPUGA S.A., MORAN M.S. 2015. Dynamic response of plant chlorophyll fluorescence to light, water and nutrient availability. *Functional Plant Biology*, 42 (8): 746–757. DOI: 10.1071/FP15002
- ČATER M., SIMONČIČ P. 2010. Root distribution of under-planted European beech (*Fagus sylvatica* L.) below the canopy of a mature Norway spruce stand as a function of light. *European Journal of Forest Research*, 129 (4): 531–539. DOI: 10.1007/s10342-009-0352-9
- ČERNÝ J., KREJZA J., POKORNÝ R., BEDNÁŘ P. 2018. LaiPen LP 100 – a new device for estimating forest ecosystem leaf area index compared to the etalon: A methodologic case study. *Journal of Forest Science*, 64 (11): 455–468. DOI: 10.17221/112/2018-JFS
- ČERNÝ J., POKORNÝ R., HANINEC P., BEDNÁŘ P. 2019. Leaf area index estimation using three distinct methods in pure deciduous stands. *Journal of Visualized Experiments*, 150: e59757. DOI: 10.3791/59757
- ČERNÝ J., POKORNÝ R., VEJPUŠKOVÁ M., ŠRÁMEK V., BEDNÁŘ P. 2020a. Air temperature is the main driving factor of radiation use efficiency and carbon storage of mature Norway spruce stands under global climate change. *International Journal of Biometeorology*, 64: 1599–1611. DOI: 10.1007/s00484-020-01941-w
- ČERNÝ J., HANINEC P., POKORNÝ R. 2020b. Leaf area index estimated by direct, semi-direct, and indirect methods in European beech and sycamore maple stands. *Journal of Forestry Research*, 31: 827–836. DOI: 10.1007/s11676-018-0809-0
- ČERNÝ J., POKORNÝ R. 2021. Field measurement of effective leaf area index using optical device in vegetation canopy. *Journal of Visualized Experiments*, 173: e62802. DOI: 10.3791/62802
- DALLATEA F., JOKELLA E.J. 1991. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly

- pine stand. *Forest Science*, 37 (5): 1298–1313. DOI: 10.1093/forests/37.5.1298
- DUŠEK D., NOVÁK J., ČERNÝ J., KACÁLEK D. 2021. Vliv prvních výchovných zásahů v mlazinách na obsah vody ve svrchní vrstvě minerální půdy. *Zprávy lesnického výzkumu*, 66 (4): 270–276.
- DUŠEK D., NOVÁK J., ČERNÝ J. 2023. The mechanical stability of pure Norway spruce stands along an altitudinal gradient in the Czech Republic. *Forests*, 14: 1558. DOI: 10.3390/f14081558
- FLECK S., RASPE S., ČATER M., SCHLEPPI P., UKONMAANAHO L., GREVE M., HERTEL CH., WEIS W., RUMPF S., THIMONIER A., CHIANUCCI F., BECKSCHÄFER P. 2020. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part XVII. Canopy leaf area. Version 2020-1. Eberswalde, Thünen Institute of Forest Ecosystems: 37 p. Dostupné na/Available on: https://www.icp-forests.org/pdf/manual/2020/ICP_Manual_part17_2020_LAI_version_2020-1.pdf
- FOURNIER R.A., MAILLY D., WALTER J.M., SOUDANI K. 2003. Indirect measurement of forest canopy structure from in situ optical sensors. In: Wulder M., Franklin S. (eds.): *Methods for remote sensing of forests: Concepts and case studies*. Dordrecht, Kluwer: 77–114.
- FRAZER G.W., TROFYMOW J.A., LERTZMAN K.P. 2000. Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests. *Canadian Journal of Forest Research*, 30 (2): 239–256. DOI: 10.1139/x99-201
- GAN R., ZHANG L., YANG Y., WANG E., WOODGATE W., ZHANG Y., HAVERD V., KONG D., FISCHER T., CHIEW F., YU Q. 2021. Estimating ecosystem maximum light use efficiency based on the water use efficiency principle. *Environmental Research Letters*, 16: 104032. DOI: 10.1088/1748-9326/ac263b
- GIAGLI K., VAVRČÍK H., TSALAGKAS D., ČERNÝ J., LEUGNER J., HACUROVÁ J., GRYC V. 2023. Effect of different stand densities on xylem and phloem formation in Norway spruce plantations. *IAWA Journal*, DOI: 10.1163/22941932-bja10140
- GRACE J.C., JARVIS P.G., NORMAN J.M. 1987. Modelling the interception of solar energy in intensively managed stands. *New Zealand Journal of Forest Science*, 17: 193–209.
- GROOT A., SAUCIER J.-P. 2008. Volume increment efficiency of *Picea mariana* in northern Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*, 255 (5–6): 1647–1653. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.11.024
- GSPALT M., BAUERLE W., BINKLEY D., STERBA H. 2013. Leaf area and light use efficiency patterns of Norway spruce under different thinning regimes and age classes. *Forest Ecology and Management*, 288: 49–59. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.11.044
- HACUROVÁ J., HACURA J., GRYC V., ČERNÝ J., VAVRČÍK H. 2020. Xylogenesis and phloemogenesis of Norway spruce in different ages stands at middle altitudinal zone. *Wood Research*, 65 (6): 937–950. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.6.937950
- HANEWINKEL M., CULLMANN D.A., SCHELHAAS M.-J., NABUURS G.-J., ZIMMERMANN N.E. 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 3: 203–207. DOI: 10.1038/nclimate1687
- HEIKKILÄ J., SIRÉN M., ÄIJÄLÄ J.O. 2007. Management alternatives of energy wood thinning stands. *Biomass and Bioenergy*, 31 (5): 255–266. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.01.013
- HLÁSNÝ T., KÖNIG L., KRONEKE P., LINDNER M., MONTAGNÉ-HUCK C., MÜLLER J., QIN H., RAFFA K.F., SCHELHAAS M.-J., SVOBODA M., VIIRI H., SEIDL R. 2021. Bark beetle outbreaks in Europe: State of knowledge and ways forward for management. *Current Forestry Reports*, 7: 138–165. DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x
- JARČUŠKA B. 2011. Morphological plasticity of leaves in natural regeneration of *Fagus sylvatica* L.: Effects of direct and diffuse light, ontogeny and shoot type. *Polish Journal of Ecology*, 59 (2): 339–353.
- JARVIS P.G., LEVERENZ J.W. 1983. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: Lange O.L. et al. (eds.): *Physiological plant ecology IV*. New York, Springer: 233–280.
- KINANE S.M., MONTES C.R., ALBAUGH T.J., MISHRA D.R. 2021. A model to estimate leaf area index in loblolly pine plantations using Landsat 5 and 7 images. *Remote Sensing*, 13: 1140. DOI: 10.3390/rs13061140
- KORPEL Š., PEŇÁZ J., SANIGA M., TESAŘ V. 1991. *Pestovanie lesa*. Bratislava, Príroda: 472 s.
- KUMARATHUNGE D.P., DRAKE J.E., TJOELKER M.G., LÓPEZ R., PFLAUTSCH S., VÁRHAMMAR A., MEDLYN B.E. 2020. The temperature optima for tree seedling photosynthesis and growth depend on water inputs. *Global Change Biology*, 26 (4): 2544–2560. DOI: 10.1111/gcb.14975
- LANDSBERG J.J., SANDS P.J. 2011. *Physiological ecology of forest production*. Amsterdam, Academic Press: 331 s.
- LARCHER W. 2003. *Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Berlin, Springer: 513 s. ISBN: 978-3-540-43516-7
- LEDERMANN T., BRAUN M., KINDERMANN G., JANDL R., LUDVIG A., SCHADAUER K., SCHWARZBAUER P., WEISS P. 2022. Effects of silvicultural adaptation measures on carbon stock of Austrian forests. *Forests*, 13 (4): 565. DOI: 10.3390/f13040565
- LICHTENTHALER H.K., AČ A., MAREK M.V., KALINA J., URBAN O. 2007. Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45 (8): 577–588. DOI: 10.1016/j.plaphy.2007.04.006
- MÄKINEN H., ISOMÄKI A. 2004. Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of Norway spruce trees. *Forest Ecology and Management*, 201 (2–3): 295–309. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.07.017
- MÄKINEN H., ISOMÄKI A., HONGISTO T. 2005. Effect of half-systematic and systematic thinning on the increment of Scots pine and Norway spruce in Finland. *Forestry*, 79 (1): 103–121. DOI: 10.1093/forestry/cpi061
- MAREK M.V., ŠPRTOVÁ M., URBAN O., ŠPUNDA L., KALINA J. 1999. Response of sun versus shade foliage photosynthesis to radiation in Norway spruce. *Phyton (Austria)*, 39 (4): 131–138.
- METSLAID M., JÖGISTE K., NIKINMAA E., MOSER W.K., PORCAR-CASTELL A. 2007. Tree variables related to growth response and acclimation of advance regeneration of Norway spruce and other coniferous species after release. *Forest Ecology and Management*, 250 (1–2): 56–63. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.03.009
- MISSON L., VINCKE C., DEVILLEZ F. 2003. Frequency responses of radial growth series after different thinning intensities in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. *Forest Ecology and Management*, 177 (1–3): 51–63. DOI: 10.1016/S0378-1127(02)00324-9
- MONTEITH J.L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9 (3): 747–766. DOI: 10.2307/2401901

- MONTEITH J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 281 (980): 277–294. DOI: 10.1098/rstb.1977.0140
- MONTEITH J.L., UNSWORTH M.H. 2013. *Principles of environmental physics: Plants, animals, and the atmosphere*. 4th edition. Amsterdam, Elsevier: 401 s.
- MZE. 2022. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství v České republice v roce 2021. Praha, Ministerstvo zemědělství České republiky: 47 s.
- NAUDTS K., CHEN Y., MCGRATH M.J., RYDER J., VALADE A., OTTO J., LUYSSAERT S. 2016. Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 351: 597–600. DOI: 10.1126/science.aad7270
- NORBY R.J. 1996. Forest canopy productivity index. *Nature*, 381: 564. DOI: 10.1038/381564a0
- NUUTINEN T., MATALA J., HIRVELÄ H., HÄRKONEN K., PELTOLA H., VÄISÄNEN H., KELLOMÄKI S. 2006. Regionally optimized forest management under changing climate. *Climatic Change*, 79 (3–4): 315–333. DOI: 10.1007/s10584-006-9098-2
- O'HARA K.L., LAHDE E., LAIHO O., NOROKORPI Y., SAKSA T. 1999. Leaf area and tree increment dynamics on a fertile mixed conifer site in southern Finland. *Annals of Forest Science*, 56 (3): 237–247. DOI: 10.1051/forest:19990306
- OLASCOAGA B., MACARTUR A., ATHERTON J., PORCAR-CASTELL A. 2016. A comparison of methods to estimate photosynthetic light absorption in leaves with contrasting morphology. *Tree Physiology*, 36 (3): 368–379. DOI: 10.1093/treephys/tpv133
- PETERKOVÁ A., ČERNÝ J. 2022. Dynamika přírůstu kruhové výčetní základny mladých smrkových porostů a jejich stabilita v závislosti na intenzitě výchovného zásahu. In: Belko M. et al. (eds.): *Pestovanie lesa v strednej Európe. Zborník vedeckých prác na tému. Zvolen, Národné lesnícke centrum: 99–106. Proceedings of Central European silviculture*. [Vol. 11] – ISBN 978-80-8093-338-8
- POKORNÝ R., TOMÁŠKOVÁ I., HAVRÁNKOVÁ K. 2008. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research*, 127 (5): 359–367. DOI: 10.1007/s10342-008-0212-z
- POKORNÝ R. 2015. Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin. *Uherské Hradiště, L. V. Print: 38 s.*
- RAHMSTORF S., COUMOU D. 2011. Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108: 17905–17909. DOI: 10.1073/pnas.1101766108
- RAJSNEROVÁ P., KLEM K., HOLUB P., NOVOTNÁ K., VEČEŘOVÁ K., KOZÁČIKOVÁ M., RIVAS-URBACH A., SARDANS J., MAREK M.V., PEÑUELAS J., URBAN O. 2015. Morphological, biochemical, and physiological traits of upper and lower canopy leaves of European beech tend to converge with increasing altitude. *Tree Physiology*, 35 (1): 47–60. DOI: 10.1093/treephys/tpu104
- SALOMÓN R.L., PETERS R.L., ZWEIFEL R., SASS-KLAASSEN U.G.W., STEGEHUIS A.I., SMILJANIC M., POYATOS R., BABST F., CIENCIALA E., FONTI P., LERINK B.J.W., LINDNER M., MARTINEZ-VILALTA J., MENCUCCINI M., NAABURS G.-J., VAN DER MAATEN E., VON ARX G., BÄR A., AKHMETZANOV L., BALANZATEGUI A., BELLAN M., BENDIX J., BERVEILLER D., BLAŽENEC M. et al. 2022. The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests. *Nature Communications*, 13: 28. DOI: 10.1038/s41467-021-27579-9
- SEIDL R., SCHELHAAS M.-J., RAMMER W., VERKERK P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4: 806–810. DOI: 10.1038/nclimate2318
- SHI D., HUANG Q., LIU Z., LIU T., SU Z., GUO S., BAI F., SUN S., LIN X., LI T., YANG X. 2022. Radiation use efficiency and biomass production of maize under optimal growth conditions in Northeast China. *Science and the Total Environment*, 836: 155574. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155574
- SHINOZAKI K., YODA K., HOZUMI K., KIRA T. 1964. A quantitative analysis of plant form – The pipe theory model. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology*, 14 (3): 133–139. DOI: 10.18960/seitai.14.3_97
- SIMS D.A., PEARCY R.W. 1994. Scaling sun and shade photosynthetic acclimation of *Alocasia macrorrhiza* to whole-plant performance. I. Carbon balance and allocation at different daily photon flux densities. *Plant, Cell and Environment*, 17 (8): 881–887. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1994.tb00317.x
- STOCKLE C.O., KINIRY J.R. 1990. Variability in crop radiation-efficiency associated with vapour-pressure deficit. *Field Crops Research*, 25 (3–4): 171–181. DOI: 10.1016/0378-4290(90)90001-R
- ŠIMŮNEK V., VACEK Z., VACEK S. 2020. Solar cycles in salvage logging: National data from the Czech Republic confirm significant correlation. *Forests*, 11: 973. DOI: 10.3390/f11090973
- TAIZ L., ZEIGER E. 2010. *Plant physiology*. 5th ed. Sunderland, Sinauer Associates Inc.: 782 s.
- TAYLOR C.S. 1993. Kenaf: an emerging new crop industry. In: Janick J., Simon J.E. (eds.): *New crops*. New York, Wiley Press: 402–407.
- URBAN O., KOŠVANCOVÁ M., MAREK M.V., LICHTENTHALER H.K. 2007. Induction of photosynthesis and importance of limitations during the induction phase in sun and shade leaves of five ecologically contrasting tree species from temperate zone. *Tree Physiology*, 27: 1207–1215. DOI: 10.1093/treephys/27.8.1207
- VACEK Z., VACEK S., CUKOR J. 2023. European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. *Journal of Environmental Management*, 332: 117353. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117353
- VEJPUŠTKOVÁ M., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2017. Kvantifikace nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) KARST.). *Recenzovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 28 s. Lesnický průvodce 3/2017.*
- VIEWEGH J., KUSBACH A., MIKESKA M. 2003. Czech forest ecosystem classification. *Journal of Forest Science*, 49 (2): 74–82.
- VOSE J.M., ALLEN H.L. 1988. Leaf-area, stemwood growth, and nutrition relationships in loblolly-pine. *Forest Science*, 34 (3): 547–563. DOI: 10.1093/forestscience/34.3.547
- WALLENTIN C., NILSSON U. 2011. Initial effect of thinning on stand gross stem-volume production in a 33-year-old Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) stand in Southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26 (S11): 21–35. DOI: 10.1080/02827581.2011.564395
- WULDER M.A., LE DREW E.F., FRANKLIN S.E., LAVIGNE M.B. 1998. Aerial image texture information in the estimation of the northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). *Remote Sensing and Environment*, 64: 64–76. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00169-7
- ZHENG G., MOSKAL M. 2009. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors. *Sensors*, 9 (4): 2719–2745. DOI: 10.3390/s90402719

PRE-COMMERCIAL THINNING IN YOUNG NORWAY SPRUCE STANDS AS A TOOL MITIGATING GLOBAL CLIMATE CHANGE?

SUMMARY

Although Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) stands significantly suffer from the ongoing global climate change (GCC) that is characterised by the increase of mean annual air temperatures and changes in the distribution of the precipitation amount during the growing season (SEIDL et al. 2014), the tree species is still economically and ecologically important in Central European region (ALBRECHT et al. 2012; MZE 2022).

The availability of resources for autotrophic terrestrial plants, including forest tree species, significantly influences foliage production. It affects the interception of photosynthetically active radiation (PAR) needed for the photosynthetic uptake process, representing the primary production process of plants. However, the actual production of the plant communities at specific sites is not determined by the amount of absorbed PAR (APAR) but also by the efficiency of light energy conversion into biomass within the photosynthetic assimilation process. It depends on both site conditions (water and soil nutrient availability; CENDRERO-MATEO et al. 2015; KUMARATHUNGE et al. 2020) and stands structure (leaf area index – LAI, foliage quality, stand density), which can be controlled by silvicultural treatments (LEDERMANN et al. 2022).

The paper aims to determine seasonal maximum LAI values (LAI_{max}) at the stand level, increment of the total above-ground dry mass and stand basal area of the studied stands, and compare the effect of differently intensive pre-commercial thinning on solar radiation use efficiency by the stand canopy as assessed through (i) Canopy Production Index (CPI) calculated as the total above-ground dry biomass increment and LAI_{max} values, and (ii) Leaf Area Effectivity (LAE) calculated as stand basal area increment and LAI_{max} .

In the presented article, hypothesis H1 has been tested:

H1: The highest solar radiation use efficacy (CPI, LAE) will be found in the Norway spruce stand after heavy pre-commercial thinning (plot C) due to reducing competition in the canopy and the increased canopy irradiation of not felled trees.

All measurements were performed in young 15-year-old (2021) pure Norway spruce stands at the Křivina site (50°12' 55.376" N; 16°06'50.669" E; Fig. 1 left) at an altitude of 402 m above sea level where severe stress of Norway spruce elicited by adverse climatic factors is expected. Three spruce stands (each with an area of 2,600 m²) with various forest tending management were studied. The initial stand density (3,500 tree/ha) of the studied research plots was reduced by pre-commercial thinning with various intensities in winter 2019/2020 to stand densities of (i) 1,800 trees/ha (mild pre-commercial thinning; plot A), (ii) 1,300 trees/ha (heavy pre-commercial thinning; plot C), and (iii) plot B was left with no silvicultural interventions as a control variant (i.e. 3,500 trees/ha; Fig. 1 right). All harvest residuals were removed after pre-commercial thinning application. Regular forest inventories were performed annually (2018, 2019, 2020, and 2021), measuring DBHs and heights of all trees in the research plot. Subsequently, above-ground dry biomass was calculated according to allometric relationships for Norway spruce growing in the Czech Republic (VEJPUŠTKOVÁ et al. 2017).

LAI values were measured before (30/07/2029) and after (18/07/2020) pre-commercial thinning applications using a LaiPen LP 110 device (PSI, CR) in dual mode 1.3 m above the ground surface in a regular grid containing 18 measurement points (spacing of 10 m × 10 m) below the canopy in each studied spruce stand. Thus, one device measuring incident radiation above the canopy was placed in the sufficiently extensive clearing (open area) near the studied spruce stands (FLECK et al. 2020). The second instrument was used for simultaneous measurements below the canopy at the identical field of view for both sensors (i.e. perpendicularly to the north). All measurements were conducted under suitable synoptic conditions (i.e. windless and uniform cloudiness; ČERNÝ et al. 2019). For more details about the methodological approach, inter-calibration of the used the LaiPen LP 110 device pair, and LAI calculation based on Beer-Lambert law see ČERNÝ, POKORNÝ (2021).

The pre-commercial thinning has favourably affected the solar radiation use efficiency evaluated through CPI, and LAE parameters (Fig. 2 and 3), where the spruce stand with mild pre-commercial thinning (plot A) achieved a 4-fold higher increase in efficiency than stand with no silvicultural intervention (plot B). However, the highest increase of both analysed parameters was recorded in the spruce stand after heavy pre-commercial thinning (plot C) with a more than 5-fold increase of CPI and LAE than in plot B (with no silvicultural intervention). If comparing spruce stands with applied pre-commercial thinning with various intensities, there was a 34% and 27% higher increase in CPI and LAE, respectively, in the stand with heavy pre-commercial thinning (plot C) than in moderately thinned one (plot A), which confirms the tested hypothesis H1. Overall, the presented results indicate a positive effect of heavy pre-commercial thinning on CPI and LAE in pure young Norway spruce stands. However, more effort should be devoted to studying the impact of different pre-commercial thinning intensities on solar radiation use efficacy across a broader gradient of site conditions, and future work should also be extended to other tree species.

Based on the four-year measurement campaign and data analysis, it can preliminarily be concluded:

- The highest solar radiation use efficiency assessed through CPI and LAE was found in the Norway spruce stand with heavy pre-commercial thinning applied, reducing the initial stand density of 3,500 trees/ha to 1,300 trees/ha in winter 2019/2020.
- The heavy pre-commercial thinning increased the solar radiation use efficiency (CPI, LAE) 5 times compared to the control plot (B) with no silvicultural intervention.

- The Norway spruce stand with applied heavy pre-commercial thinning increased CPI and LAE values by 34% and 27%, respectively, to the moderately thinned one (i.e. reducing stand density from 3,500 trees/ha to 1,800 trees/ha).
- From the viewpoint of mitigation of ongoing GCC, the heavy pre-commercial thinning application seems to be most appropriate in pure Norway spruce stands. However, further analysis of the effect of various silvicultural treatment intensities in a broader range of site conditions is necessary.

Zasláno/Received: 04. 07. 2023

Přijato do tisku/Accepted: 21. 08. 2023