

EKONOMICKÁ HODNOTA UHLÍKU: PARAMETR MĚNÍCÍ OPTIMÁLNÍ OBMÝTÍ POROSTŮ

ECONOMIC VALUE OF CARBON: A PARAMETER CHANGING THE OPTIMAL ROTATION OF FOREST STANDS

JAN MELICHAR ✉ - HANA ŠKOPKOVÁ - KATEŘINA MÁCOVÁ

Univerzita Karlova, Centrum pro otázku životního prostředí, José Martího 407/2, 162 00 Praha 6, Czech Republic

✉ e-mail: jan.melichar@czp.cuni.cz

ORCID: J. Melichar 0000-0003-1688-3752

H. Škopková 0009-0000-1027-6113

K. Mácová 0000-0003-4104-4184

ABSTRACT

Sequestering carbon in forest ecosystems is an important nature-based solution for mitigating climate change. One way to assess the effectiveness of carbon uptakes in forestry is to determine the effect that the inclusion of carbon price has on the length of economic rotation period of forest stands. Whether and until when forests should be left unharvested and store carbon in living biomass and deadwood, or harvested and store carbon in harvested wood products is the issue, which is investigated in this study by computing rotation ages that consider both commercial timber and carbon prices. The optimization is carried out with an economic-ecological model that includes size-structured matrix growth model and accounts for climate effects on forest dynamics. The study concerns with uneven-aged mixed-species forests consisting of Norway spruce (*Picea abies* L.), European beech (*Fagus sylvatica* L.) and silver fir (*Abies alba* Mill.). The data on forest initial distributions comes from the Czech National Forest Inventory. The results showed that inclusion of carbon pricing to economic criteria for determining optimal rotation ages prolongs the rotation period. An increase in the carbon prices postpones optimal harvest age and leads to higher total net carbon sinks. However, the optimal solutions are sensitive not only to the discount rate, but also to the growth conditions of forest site and future climate evolution.

For more information see Summary at the end of the article.

Klíčová slova: sekvestrace uhlíku; růstový model; ekonomická doba obmýtní; cena uhlíku; klimatická změna; Národní inventarizace lesů

Key words: carbon sequestration; growth model; economic rotation period; carbon price; climate change; National Forest Inventory

ÚVOD

Lesní ekosystémy z pohledu ekonomické teorie představují významné přírodní aktivum, které poskytuje společnosti obchodovatelnou dřevní hmotu, reguluje ekologické procesy, je zdrojem rekreačních hodnot při procházce lesem či sběru lesních plodů a neužitných hodnot spojených s existencí živočišných či rostlinných druhů vázaných na lesní biotop. Lesy hrají také důležitou úlohu při regulaci klimatického systému Země, zejména ovlivňováním toků skleníkových plynů v atmosféře prostřednictvím poutání uhlíku v živé a odumřelé biomase stromů, lesní půdě a výrobcích ze dřeva. Sekvestraci uhlíku v lesích lze podpořit tzv. zlepšenými způsoby lesnického hospodaření, které jsou Mezivládním panelem pro změnu klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) považovány za biologická řešení pohlcování

CO₂ z atmosféry. Mezi tyto formy hospodaření je, kromě lesnictví s kontinuálním pokryvem lesa či lesnictví s nižší intenzitou těžeb, zařazeno prodloužení doby obmýtní, které může vést ke zvýšení zásob uhlíku v lesním ekosystému (NABUURS et al. 2022).

Obmýtní doba je jedním ze základních kritérií časové úpravy lesů obhospodařovaných pasečným způsobem (les věkových tříd), které ovlivňuje rozhodujícím způsobem celkovou produkci dříví. Jak vyplývá z řady studií, pokud jsou do výpočtu ekonomické doby obmýtní kromě čistých výnosů z dřevní produkce zahrnuty také společenské přínosy z poutání uhlíku, prodlouží se optimální mýtní věk pro těžbu porostu (VAN KOOTEN et al. 1995; ASSMUTH et al. 2018). Prodloužení doby obmýtní může mít pozitivní vliv na zásobu uhlíku v lesní biomase a půdě (ASSMUTH et al. 2021; PARKATTI et al. 2023). Z tohoto důvodu

Výnosy jsou počítány pro jednotlivé sortimenty dřeva a to výřezy I.–III.D jakosti, dříví pro výrobu dřevoviny, buničiny a palivové dříví. Výnosy pozitivně korelují s rostoucí výčetní tloušťkou těžebního stromu a jsou dány:

$$R(\mathbf{h}_t) = \sum_{i=1}^n h_{i,t} \cdot \sum_{j=1}^s v_{j,i}(d_i) \cdot p_{s,j} \quad (3)$$

kde $h_{i,t}$ je počet odtěžených stromů v jednotlivých tloušťkových třídách v čase t . Objem zásoby j -tého sortimentu [m^3] z odtěženého stromu z tloušťkové třídy i je $v_{j,i}$, a je závislý na výčetní tloušťce stromu d_i . Jednotková cena j -tého sortimentu je $p_{s,j}$ [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$].

Variabilní těžební náklady negativně korelují s výčetní tloušťkou těžebního stromu a jsou dány:

$$C(\mathbf{h}_t) = \sum_{i=1}^n h_{i,t} \cdot v_i \cdot c_i \quad (4)$$

kde c_j jsou jednotkové náklady [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$] diferencované podle tloušťkové třídy odtěženého stromu.

Ekonomická hodnota ze sekvestrace uhlíku

Kromě čistých výnosů z produkce dřeva zahrneme do výpočtu délky obmytí společenskou hodnotu ze sekvestrace uhlíku. Ukládáním uhlíku do živé biomasy porostu jsou společnosti generovány pozitivní externality, uvolňováním CO_2 do atmosféry v důsledku těžby, rozkladu odumřelé organické hmoty (Dead Organic Matter, DOM) a oxidací produktů dřevozpracovatelského sektoru (Harvested Wood Products, HWP) jsou naopak působeny negativní externality. Uvolňování uhlíku ze zásobníků DOM a HWP je však postupně, nedochází k jeho okamžité respiraci z odumřelého dřeva či odtěžené hmoty. Proto prodloužení sekvestrace uhlíku v zásobnících DOM a HWP budeme při výpočtu doby obmytí reflektovat.

Proces ukládání uhlíku je řešen pro zásobníky živé biomasy (B). Ta je tvořena biomasou jednotlivých nadzemních orgánů (frakcí) stromu: hroubí bez kůry (průměr nad 7 cm), kůra hroubí, nehroubí s kůrou, pařezy bez kůry, kůra pařezů, listový (listí a jehlice), a biomasou podzemních orgánů stromu: jemné kořeny (pod 5 mm průměru) a hrubé kořeny (nad 5 mm průměru). Proces uvolňování uhlíku je řešen pro zásobníky DOM z přirozené mortality stromů (D_μ) a z mýtní těžby (těžební zbytky) (D_φ) a pro zásobníky výrobků ze dřeva (H_ψ).

V zásobníku D_μ z přirozené mortality stromů jsou zahrnuty všechny frakce stromu jako v případě živé biomasy. V případě těžebních zbytků jsou v D_φ ponechány všechny frakce stromu mimo hroubí (vč. kůry). Tato část odtěženého stromu je přesunuta do zásobníku H_ψ . Z pohledu rychlosti rozkladu hmoty je zásobník H_ψ rozdělen na kategorii výřezy, buničina společně s dřevovinou, palivové dříví a kůra hroubí.

Ekonomická hodnota z čisté sekvestrace uhlíku [$\text{Kč} \cdot \text{rok}^{-1}$] během roku t ve struktuře jednotlivých zásobníků je dána:

$$Q_t = p_{c,t} \cdot \phi \cdot \{B_{t+1}(y_{t+1}) - B_t(y_t) + [1 - \alpha_j(r)] \cdot [D_{\mu,t}(y_t) + D_{\varphi,t}(\mathbf{h}_t) + H_{\psi,t}(\mathbf{h}_t)]\} \quad (5)$$

kde $p_{c,t} \geq 0$ je cena uhlíku. Pro $p_{c,t}$ budeme předpokládat, že se mění v čase a reflektuje současné a budoucí škody působené uvolněním emisí CO_2 v roce t . Dále ϕ je koeficient konverze zásoby suché biomasy na hmotnostní zásobu uhlíku.

Přírůst zásoby živé biomasy během roku t je v rovnici (5) vyjádřen $B_{t+1}(y_{t+1}) - B_t(y_t)$. Zásoba biomasy B_t je vyjádřena hmotností suché biomasy [tuný]. Člen rovnice $[1 - \alpha_j(r)] \cdot [D_{\mu,t}(y_t) + D_{\varphi,t}(\mathbf{h}_t) + H_{\psi,t}(\mathbf{h}_t)]$

zohledňuje transfery uhlíku do zásobníků DOM a HWP a uvolňování uhlíku z těchto zásobníků během daného období. Změny zásob uhlíku v jednotlivých zásobnících rovnice (5) se během daného období řídí růstem lesa podle rovnice (1) a (2) a závisí na stavu lesa y_t a intenzitě těžeb \mathbf{h}_t .

Pro parametr $\alpha_j(r)$ rovnice (5) platí:

$$\alpha_j(r) = \frac{q_j}{q_j + r} \quad (6)$$

kde r je roční diskontní sazba a q_j představuje roční míru dekompozice pro odumřelou organickou hmotu a výrobky ze dřeva q_j ($j = \mu, \varphi, \psi$). Jak uvádí ASSMUTH et al. (2018), $p_{c,t} \cdot \alpha_j(r)$ vyjadřuje současnou hodnotu budoucích emisí CO_2 v důsledku rozkladu a oxidace těchto zásobníků uhlíku.

Optimalizační úloha

Cílem optimalizační úlohy je maximalizovat současně ekonomickou hodnotu, jak z produkce dřeva $\pi(\mathbf{h}_t)$, tak z akumulace uhlíku $Q_t(y_t, \mathbf{h}_t)$, a to za jedno období obmytí. Budeme hledat délku obmytí porostu, pro kterou suma čistých současných výnosů z těžby dřeva a z čisté akumulace uhlíku dosahuje maxima. Pro daný výchozí stav porostu y_0 nalezneme věk porostu T , při kterém mýtní zralost odpovídá ekonomickému optimu. Tedy optimalizační úlohu lze formulovat následovně:

$$\max_{T \in [t_1, \infty)} J(\mathbf{y}_0, T) = \pi(\mathbf{h}_T) \cdot \gamma^T + \sum_{t=0}^T Q_t(\mathbf{y}_t, \mathbf{h}_T) \cdot \gamma^t \quad (7)$$

kde γ je diskontní faktor $1 / (1 + r)$ a r je roční diskontní sazba. Pokud bude úloha (7) řešena pro $p_c = 0$, pak obmytní doba bude maximalizovat mýtní výtěž z produkce dřeva, hodnota z akumulace uhlíku bude zanedbána (VAN KOOTEN 2023).

Hodnoty ekologických a ekonomických parametrů

Pro predikci dynamiky růstu lesa je použit maticový růstový model pro smíšené smrko-jedlo-bukové porosty parametrizovaný pro střeoevropské lesy (CONDÉS et al. 2022), kdy jednotlivé parametry modelu jsou ovlivňovány vnitrodruhovou a mezidruhovou kompeticí SM, BK a JD a klimatickými podmínkami reprezentovanými roční průměrnou teplotou vzduchu. Tloušťková struktura porostu je zadaná 8 tloušťkovými třídami v širší intervalu 10 cm každé třídy a s 7,5 cm jako dolní hranici 1. tloušťkové třídy. Vývoj porostu je při simulacích modelu sledován v časovém kroku 10 let a počty stromů dle jednotlivých druhů dřevin (SM, BK, JD) jsou vyjádřeny v hektarových hodnotách.

Ostatní veličiny v růstovém modelu – výška stromu, objem hroubí stromu a zásoba jednotlivých frakcí biomasy vyjádřená hmotností suché biomasy – byly odvozeny na základě vztahů a hodnot parametrů publikovaných v literatuře. Výška stromu byla dopočítána na základě výčetní tloušťky stromu matematickou funkcí podle WOLFA (1957) a hodnoty parametrů výškové funkce pro SM, BK, JD byly převzaty z odhadů publikovaných MERGANIČEM et al. (2011). Pro výpočet objemu kmene bez kůry byly využity objemové funkce publikované PETRÁŠEM, PAJTÍKEM (1991). Pro odhad frakcí biomasy nadzemní části pro SM, BK a JD (kromě listoví pro BK) byly použity alometrické vztahy publikované VONDERACHEM et al. (2018). Biomasa listů pro BK byla dopočítána na základě vztahů odhadnutých WUTZLEREM et al. (2008). Alometrické vztahy pro odhad biomasy hrubých kořenů byly převzaty z FORRESTERA et al. (2017). Biomasa jemných kořenů tvořila 5 % z biomasy hrubých kořenů (WEGLER et al. 2012).

Podíl uhlíku na hmotnosti suché biomasy jednotlivých orgánů stromu byl stanoven na $\phi = 0,5$. Parametr roční míry dekompozice pro

odumřelou organickou hmotu z přirozené mortality a těžebních zbytků byl stanoven na $q_{u,p} = 0,019$ (PARKATTI, TAHVONEN 2021) a pro výrobky ze dřeva činil $q_{1,p} = 0,06611$ pro sortimenty výřezů a $q_{2,p} = 0,4707$ pro sortimenty buničiny a dřevoviny (PARKATTI et al. 2023). Pro palivové dříví byl stanoven předpoklad okamžitého uvolňování CO₂ do atmosféry.

Výchozí stav lesa – počáteční tloušťková struktura a zastoupení SM, BK, JD v jednotlivých tloušťkových třídách – pro následné projekce vývoje stavu porostu a zásob uhlíku byl odvozen z dat Národní inventarizace lesů (NIL) z 1. inventarizačního cyklu v období 2001–2004 (ÚHÚL 2003). Datový soubor o 13 423 inventarizačních plochách byl omezen na plochy (1 744 ploch) s více jak 70% zastoupením SM, BK nebo JD nacházejících se v nadmořské výšce nad 700 m n. m. proto, aby druhové zastoupení, věková struktura a teplotní podmínky odpovídaly podmínkám horských lesů, pro které byl odhadnut původní růstový model (CONDÉS et al. 2022). Plochy datového souboru byly následně rozčleněny podle příslušnosti jednotlivých ploch ke klimaticko-vegetačním pásmům na lesní stanoviště podhorských, horských a vysokohorských poloh (DUJKA, KUSBACH 2023), aby při simulacích růstu lesa byl zohledněn vliv výškového klimatu. Základní porostní charakteristiky uvádí tab. 1.

Budoucí vývoj klimatu, který determinuje dynamiku růstu lesa (1) a ekonomickou hodnotu z čisté sekvestrace uhlíku (5), je založen na klimatických projekcích, které se řídí možnými cestami celosvětového socioekonomického vývoje (Shared Socioeconomic Pathway, SSP). SSP jako scénáře klimatické změny byly zavedeny IPCC v 6. hodnotící zprávě. SSP scénáře vycházejí z rozdílných socioekonomických předpokladů, především demografického vývoje a ekonomického a technologického rozvoje, uplatňují rozdílné nároky na adaptační a mitigační klimatická opatření a předpokládají rozdílný nárůst globální teploty ke konci 21. století ve srovnání s obdobím před průmyslovou revolucí (IPCC 2021). Pro účely naší studie používáme čtyři klimatické scénáře, které lze přiblížit následovně (RIAHI et al. 2017; RENNERT et al. 2022):

- SSP1 je cesta udržitelného rozvoje s nízkou materiálovou spotřebou a účinnou mezinárodní spoluprací v oblasti ochrany klimatu, nárůst globální teploty se předpokládá o 1,6 °C,

- SSP2 je střední cesta založená na současných vzorcích ekonomického a sociálního rozvoje, při které, i když dochází ke snižování materiálové a energetické náročnosti výroby, jsou klimatické cíle plněny jen částečně, nárůst teploty je o 2,6 °C,
- SSP3 je cesta charakterizovaná regionální rivalitou, při které překážky mezinárodního obchodu a orientace politik na řešení národní bezpečnosti a národních ekonomických otázek bez širší mezinárodní spolupráce umožňují pouze pomalý růst ekonomik a vedou k regionálním rozdílům, dochází k nárůstu teploty o 3,8 °C,
- SSP5 je cesta vývoje spojená s využíváním fosilních zdrojů s důrazem na konkurenční trhy, která vede k rychlému rozvoji technologií a růstu globální ekonomiky, dochází k nárůstu globální teploty o 4,6 °C.

Při simulacích růstu lesa byla využita pozorovaná historická klimatická data a projekce budoucího vývoje klimatu – průměrná roční teplota vzduchu – dle jednotlivých scénářů klimatické změny SSP, které byly připraveny z hlediska vhodnosti Ústavem výzkumu globální změny Akademie věd ČR pro území ČR (MEITNER et al. 2023). Klimatické projekce v rozlišení 0,5 km byly zpracovány na základě dat simulací z globálních cirkulačních modelů z evropského programu EURO-CORDEX. Meteorologická data klimatických projekcí byla přiřazena na základě odpovídajících pásem nadmořských výšek jednotlivým inventarizačním plochám datového souboru. Trajektorie vývoje průměrných ročních teplot vzduchu, jež jsou odstupňovány podle jednotlivých klimaticko-vegetačních pásem v teplotním rozpětí klimatických scénářů SSP, jsou zobrazeny na obr. 1.

Ceny v rozlišení jednotlivých sortimentů dřeva byly převzaty z dat ČSÚ o průměrných cenách surového smrkového a bukového dříví při prodeji na odvozním místě (OM) pro rok 2024. Ceny sortimentů JD byly oceněny cenou sortimentů pro SM. Cena dřeva se pohybovala od 975 Kč.m³ (1 564 Kč.m³) za palivové dříví po 3 468 Kč.m³ (3 461 Kč.m³) za výřezy I. třídy jakosti pro SM, resp. BK. Objem dřeva daného sortimentu byl stanoven v závislosti na výčetní tloušťce stromu pomocí stromových sortimentačních tabulek pro SM a BK (PAŘEZ, MICHALEC 1987). Sortimentace JD byla provedena podle sortimentačních tabu-

Tab. 1.

Popisné statistiky porostních charakteristik na úrovni inventarizačních ploch podle klimaticko-vegetačních pásem. Descriptive statistics of stand characteristics for inventory plot data according to climatic-vegetation zones.

KVP/ CVZ ¹	LVS/ FVZ ²	Plochy/ Plots ³	A ⁴ [m n. m.]	T ⁵ [°C]	gd ⁶ [cm]	BA ⁷ [m ² .ha ⁻¹]	Věk/ Age ⁸	Podíl dřeviny/ Species share ⁹ [%]		
								SM	BK	JD
sbm	6	1 262	810	5,84	30,19	43,45	75	85	13	2
mon	7	417	963	5,08	28,92	38,98	81	95	5	0
sup	8	65	1 165	3,82	31,68	31,98	119	100	0	0

¹KVP – Klimaticko-vegetační pásmo: sbm – stanoviště podhorských poloh (submontánní), mon – stanoviště horských poloh (montánní), sup – stanoviště vysokohorských poloh (supramontánní)/CVZ – Climatic-vegetation zone: sbm – forest site at the submontane altitudes, mon – forest site at the montane altitudes, sup – forest site at the supramontane altitudes, ²LVS – Převládající lesní vegetační stupeň/FVZ – Prevailing forest vegetation zone, ³Počet inventarizačních ploch/Number of inventory plots, ⁴A – Nadmořská výška/Altitude [m a.s.l.], ⁵T – Průměrná roční teplota vzduchu/Annual mean air temperature, ⁶gd – Kvadratický průměr výčetních tlouštěk stromů na ploše/Quadratic mean diameter at breast height of trees on the plot, ⁷BA – Výčetní základna stromů na ploše/Basal area of trees on the plot, ⁸Průměrný věk stromů na ploše rostoucích v hlavní porostní vrstvě/Average age of trees growing in the main stand layer on the plot, ⁹Podíl dřeviny na výčetní základně plochy/Species share on the basal area of the plot

SM – Norway spruce, BK – European beech, JD – Silver fir

lek pro SM. Přímé těžební náklady zahrnují náklady na těžbu, manipulaci a přibližování dříví na OM a jsou odvislé od hmotnosti těžebního stromu (se zvyšující se hmotností jednotkový náklad klesá). Těžební náklady dle hmotnosti byly stanoveny jako průměr nákladů za těžbu prováděnou harvesterovou technologií a za klasickou těžbu s potahem. Náklady za tyto dvě těžební technologie byly převzaty od REMEŠE et al. (2016) a upraveny na cenovou úroveň roku 2024.

Cena uhlíku v ekonomické analýze představuje hypotetickou peněžní jednotku přiřazenou antropogenním emisím CO_2 , jež jsou podle ekonomické teorie považovány za globální negativní externalitu. V optimalizačním modelu (7) je cena uhlíku stanovena na základě přístupu společenských nákladů uhlíku (Social Cost of Carbon, SCC). Cena uhlíku v pojetí přístupu SCC představuje současnou hodnotu budoucích globálních ekonomických škod, které vzniknou společnosti v důsledku vypuštění 1 tuny emise CO_2 do atmosféry v daném časovém okamžiku. Pro účely hodnocení byly převzaty odhady SCC ze simulací integrovaného modelu hodnocení Greenhouse Gas Impact Value Estimator (GIVE). Původní odhady hodnot SCC ze studie RENNERTA et al. (2022) vyjádřené pro 1 tCO_2 v USD roku 2020 byly přepočteny na 1 tC v Kč pro ceny roku 2024 těmito korekcemi: (i) hmotnostní přepočítání CO_2 na C na základě poměru jejich molárních hmotností 44 : 12, (ii) převod měn z USD na CZK kurzem zohledňujícím paritu kupní síly z ekonomických dat publikovaných OECD, a (iii) úpravou cenové hladiny z roku 2020 na cenovou úroveň roku 2024 pomocí evropského harmonizovaného indexu spotřebitelských cen pro ČR z databáze Eurostat.

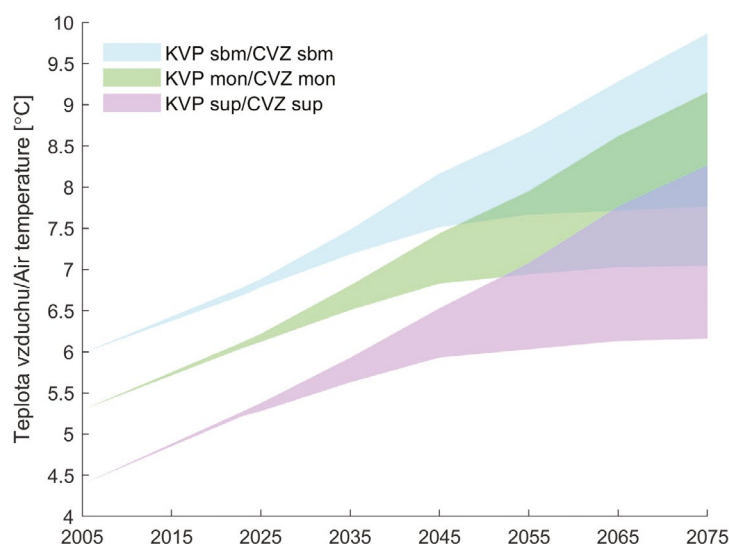
Hodnoty SCC jsou simulovány modelem GIVE pro jednotlivé SSP scénáře za období 2020–2100. Jak je patrné na obr. 2, hodnota SCC roste v čase, což je ovlivněno tím, jak dochází k nárůstu globální teploty

a působených škod vlivem globálního oteplování ke konci 21. století. Trajektorie vývoje hodnot SCC se však napříč jednotlivými scénáři klimatické změny liší vlivem jejich rozdílných socioekonomických předpokladů. I když je nárůst globální teploty u scénáře SSP3 oproti SSP2 vyšší, ve výsledku je vývoj hodnot SCC u SSP3 oproti SSP2 příznivější. Důvodem je především předpoklad pomalejšího ekonomického růstu ve scénáři SSP3 a celkově chudší společnost. Ekonomická hodnota vzniklých škod, která se odvíjí od bohatství a produktivity společnosti, je proto také celkově nižší (RENNERT et al. 2022).

Pro zadanou optimalizační úlohu (7) je optimální délka obmytí počítána variantně pro roční diskontní sazbu ve výši 1 %, 1,5 % a 2 %. V souladu s MATĚJČEKEM et al. (2013) a MATĚJČEKEM, ZÁDRAPOU (2014) používáme nízké hodnoty diskontní sazby, jež jsou charakteristické pro tzv. lesní úrokovou míru. Ta je uplatňována při výpočtech hodnoty lesní půdy podle teorie čistých výnosů z půdy, na jejíž princip byl formulována optimalizační úloha (7).

VÝSLEDKY

Průměrná ekonomická obmytní doba pro TF hospodaření činí 127 let, pro CTF hospodaření je doba obmytí v průměru 146 let. Lesnické hospodaření s CTF oproti TF v průměru prodlouží dobu obmytí odpovídající ekonomickému optimu pro mýtní těžbu porostu o 19 let ($SD = 52$) a zvýší celkovou zásobu uhlíku za jednotlivé zásobníky živé biomasy, DOM a HWP o 15 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($SD = 53$). Vysoká směrodatná odchylka tohoto odhadu naznačuje, že obmytní doba je ovlivněna volbou hodnot ekonomických parametrů modelu jako je diskontní míra, růstovými podmínkami lesního stanoviště a budoucím vývojem klimatu.



KVP – Klimaticko-vegetační pásmo/CVZ – Climatic-vegetation zone
sbm – podhorské (submontánní)/submontane, mon – horské (montánní)/montane, sup – vysokohorské (supramontánní)/supramontane
SSP – Scénář socioekonomického vývoje/Shared socioeconomic pathway scenario

Obr. 1.

Porovnání vývoje průměrných ročních teplot vzduchu podle klimaticko-vegetačních pásem a klimatických scénářů SSP. Dolní mez rozpětí představuje trajektorii teploty podle SSP1, horní mez trajektorii teploty podle SSP5 (zdroj: ClimRisk, www.climrisk.cz).

Fig. 1.

Comparison of the development of annual mean air temperature according to climatic-vegetation zones and SSP climate scenarios. Lower bound of the range represents the temperature trajectory according to SSP1, upper limit represents the temperature trajectory according to SSP5 (source: ClimRisk, www.climrisk.cz).

Průměrné hodnoty optimální doby obmýetí pro TF a CTF, a dodatečného zvýšení celkových zásob uhlíku vlivem posunutí optima při změně hospodaření z TF na CTF v rozlišení pro různé diskontní míry, klimaticko-vegetační pásma a SSP scénáře vývoje klimatu jsou uvedeny v tab. 2. Pro TF se průměrná doba obmýetí pohybuje v rozmezí 115–176 let a pro CTF je optimem v rozmezí 119–237 let. Rozdílová hodnota v optimech mezi CTF a TF se nalézá v intervalu (–6, 75). Hodnota průměrné změny zásoby uhlíku vlivem posunutí optimální doby obmýetí se nachází v intervalu (–6, 64). Maximální posun optima doby obmýetí, které odpovídá maximálnímu dodatečnému zvýšení zásob uhlíku, při změně hospodaření z TF na CTF lze pozorovat při 2% diskontní míře pro stanoviště podhorských poloh a vývoji klimatu dle SSP5. Naopak při 1% diskontní míře pro stanoviště podhorských poloh a vývoji klimatu dle SSP2 dochází pro CTF oproti TF k poklesu optima o 6 let a snížení zásob uhlíku o 6 t.ha⁻¹.

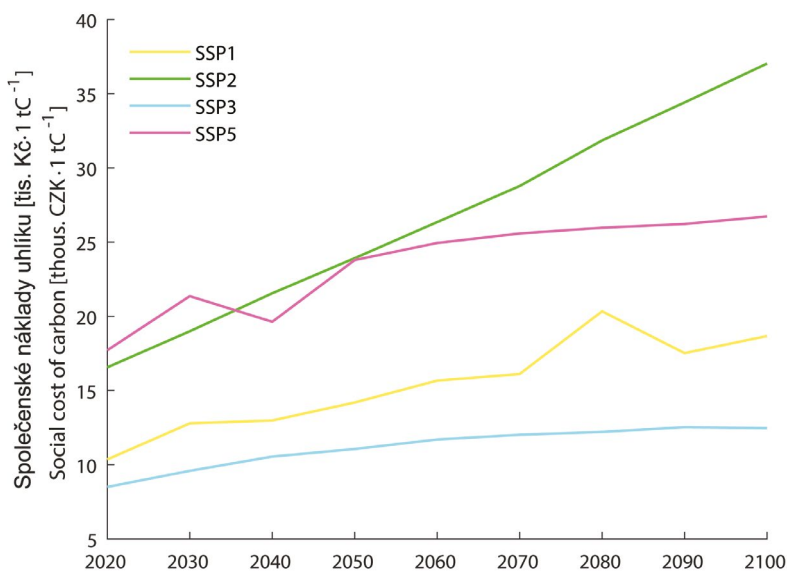
V souladu s předchozími studiemi se optimální ekonomická doba obmýetí s rostoucí diskontní mírou pro TF zkracuje, zatímco vliv diskontní míry na dobu obmýetí pro CTF není jednoznačný (VAN KOOTEN, JOHNSTON 2016). Doba obmýetí pro CTF je o 14 let delší než pro TF při 1% diskontní míře, o 21 let při 1,5% diskontní míře a o 22 let při 2% diskontní míře. Tomu odpovídá zvýšení zásob uhlíku o 7 t.ha⁻¹, resp. 16 t.ha⁻¹ a 21 t.ha⁻¹.

Podle očekávání platí, že se zvyšující se nadmořskou výškou stanoviště se prodlužuje doba obmýetí pro TF i CTF (viz obr. 3). Například při 1,5% diskontní míře je doba obmýetí 119 let (TF) a 141 let (CTF) pro stanoviště podhorských poloh, 135 let, resp. 154 let pro stanoviště horských poloh a 167 let, resp. 189 let pro stanoviště vysokohorských

poloh. Rozdílová hodnota v bodech optima mezi CTF a TF je pro stanoviště uvedených klimaticko-vegetačních pásem podobná, pohybuje se kolem 21 let. K vyšší akumulaci uhlíku při změně z TF na CTF hospodaření dochází u stanovišť podhorských poloh, při 1,5% diskontní míře se jedná o 19 t.ha⁻¹. Pro stanoviště horských a vysokohorských poloh dochází ke zvýšení zásob uhlíku o 10 t.ha⁻¹, resp. 12 t.ha⁻¹.

Obmýetní doba pro CTF a následně rozdíl v optimech mezi CTF a TF jsou ovlivněny rovněž budoucím vývojem klimatu dle SSP scénářů. Zřetelný vliv na prodloužení doby obmýetí při změně hospodaření z TF na CTF lze pozorovat u klimatického scénáře SSP3, k výrazně delšímu posunu oproti ostatním scénářům dochází u SSP5 (viz obr. 3). Významný rozdíl mezi optimy obou způsobů hospodaření není naopak pozorován pro klimatické scénáře SSP1 a SSP2. Například při 1,5% diskontní míře dochází při CTF k posunu optima z 126 let (TF) na 142 let a 186 let u vývoje klimatu a vývoje ceny uhlíku podle scénáře SSP3, resp. SSP5. Prodloužením doby obmýetí dochází pro SSP3 a SSP5 ke zvýšení zásob uhlíku o 15 t.ha⁻¹, resp. 43 t.ha⁻¹.

Pro CTF hospodaření z předchozích studií vyplývá (ASSMUTH 2018; VAN KOOTEN 2023), že při zvýšení ceny uhlíku dochází u tohoto typu lesnického managementu k prodloužení ekonomické doby obmýetí. U těchto studií – oproti naší analýze, kdy předpokládáme, že cena uhlíku a klimatické podmínky jsou v čase variabilní – platí předpoklad, že klima a cena uhlíku jsou v čase konstantní. V rámci naší studie lze předpoklad v čase konstantního klimatu a ceny uhlíku ilustrovat na následujícím příkladu, kdy budeme předpokládat, že cena uhlíku je stanovena na základě ceny emisní povolenky systému EU pro obchodování s emisemi (EU Emissions Trading System, EU ETS) za vypuštění



SSP – Scénář socioekonomického vývoje/Shared socioeconomic pathway scenario

Obr. 2.

Porovnání vývoje hodnot společenských nákladů uhlíku pro jednotlivé klimatické scénáře SSP. Odhady hodnot jsou odvozeny ze simulací integrovaného modelu hodnocení GIVE a jsou vyjádřeny v současné hodnotě peněz pro 1,5% diskontní míru v cenách roku 2024 (zdroj: RENNERT et al. 2022).

Fig. 2.

Comparison of the development of the values of the social costs of carbon for SSP climate scenarios. Value estimates are derived from the simulations of the integrated assessment model GIVE and are expressed in a present value of money for 1.5% discount rate in 2024 prices (source: RENNERT et al. 2022).

tění 1 tuny CO₂. Využijeme 3 úrovně cen emisních povolenek, které budou v čase fixní: (i) 10letý průměr cen povolenek: 3 250 Kč.tC, (ii) aktuální cenu emisní povolenky k prosinci 2025: 6 150 Kč.tC, (iii) maximální cenu povolenky z března 2023: 8 461 Kč.tC. Dále budeme předpokládat, že teplota je rovněž v čase konstantní a odpovídá současnému klimatu. Pro tyto účely byly převzaty hodnoty průměrných ročních teplot vzduchu, které byly k dispozici pro jednotlivé inventarizační plochy z dat šetření NIL1 (tab. 1). Výsledky odhadů na příkladu 1,5% diskontní sazby jsou představeny na obr. 4. Oproti odhadům, které vycházejí z předpokladu v čase variabilních klimatických podmínek a cen uhlíku (viz obr. 3), jsou zde patrné výraznější rozdíly mezi jednotlivými klimaticko-vegetačními pásmy a úrovněmi cen emisních povolenek v dodatečné akumulaci uhlíku při změně hospodaření z TF na CTF. Napříč klimaticko-vegetačními pásmy platí, že růst ceny emisní povolenky zvyšuje rozdílovou hodnotu optimální doby obmytí mezi CTF a TF, a zvyšuje tak dodatečné množství zásob uhlíku při změně hospodaření z TF na CTF. Vyšší cenová úroveň emisních povolenek současně zvýrazňuje rozdíly v době obmytí a dodatečné akumulaci uhlíku pro CTF mezi jednotlivými klimaticko-vegetačními pásmy ve prospěch stanovišť podhorských a horských poloh oproti vysokohorským lesům.

DISKUSE

Z řady studií je doloženo, že zahrnutí ekonomické hodnoty poutání uhlíku do výpočtu doby obmytí prodlužuje optimální mýtní věk pro těžbu porostu (PARKATTI, TAHVONEN 2021; VAN KOOTEN 2023), což může pozitivně ovlivňovat zásobu uhlíku v lesním ekosystému (ASSMUTH et al. 2021; PARKATTI et al. 2023). I když výsledky naší analýzy podporují tato zjištění, na rozdíl od předešlých výzkumů bereme při optimalizaci obmytní doby v potaz růstové podmínky porostu a mění se klimatické podmínky, které ovlivňují dynamiku růstu lesa, a dále předpokládáme, že cena uhlíku se mění v čase a reflektuje budoucí vývoj a variabilitu klimatu.

Naše výsledky ukazují, že růstové podmínky v kombinaci s budoucím vývojem klimatu a rostoucí cenou uhlíku mohou hrát při nalezení ekonomického optima doby obmytí a vyhodnocení mitigačního efektu změny hospodaření důležitou roli. Patrné to je pro lesní stanoviště podhorských poloh a klimatický scénář SSP5, jež je charakterizován vyšším nárůstem teplot během 21. století (obr. 1) a rovněž vyššími hodnotami cen uhlíku (obr. 2). Zvýšení zásob uhlíku pro CTF oproti TF při vývoji teplot a cen uhlíku dle SSP5 je pro toto stanoviště s nižší klimatickou polohou, a tedy vyšší produktivitou (ŠRÁMEK et al. 2024) výrazně vyšší v porovnání s porosty horských a vysokohorských poloh.

Tab. 2.

Optimální doba obmytí pro TF a CTF, a dodatečné zvýšení zásoby uhlíku vlivem CTF oproti TF: porovnání pro různá klimaticko-vegetační pásma, klimatické scénáře a diskontní míry.
Optimal rotation period for TF and CTE, and additional increase in carbon stock due to CTF compared to TF: comparison for different climatic-vegetation zones, climate scenarios and discount rates.

Diskontní míra/ Discount rate [%]	Doba obmytí/Rotation period				
	TF [roky/years]	CTF [roky/years]/[t.ha ⁻¹] ¹			
		SSP1	SSP2	SSP3	SSP5
Stanoviště podhorských poloh/Site of submontane altitudes					
1	127	125 / -2	121 / -6	144 / 14	180 / 30
1,5	119	123 / 3	121 / 1	136 / 18	184 / 52
2	115	119 / 4	120 / 4	129 / 19	180 / 64
Stanoviště horských poloh/Site of montane altitudes					
1	144	143 / -1	139 / -5	155 / 6	176 / 10
1,5	135	140 / 5	141 / 4	148 / 10	186 / 23
2	130	137 / 7	139 / 7	142 / 11	187 / 32
Stanoviště vysokohorských poloh/Site of supramontane altitudes					
1	176	181 / 3	172 / -3	185 / 6	205 / 10
1,5	167	178 / 9	178 / 6	180 / 10	219 / 23
2	161	173 / 14	178 / 13	180 / 16	237 / 36

¹Druhá hodnota u CTF udává dodatečné zvýšení zásoby uhlíku vlivem prodloužení doby obmytí oproti TF hospodaření/The second value for CTF indicates an additional increase in carbon stock due to the extension of the rotation period compared to TF management

TF – Lesnické hospodaření s produkcí dřeva/Timber forestry

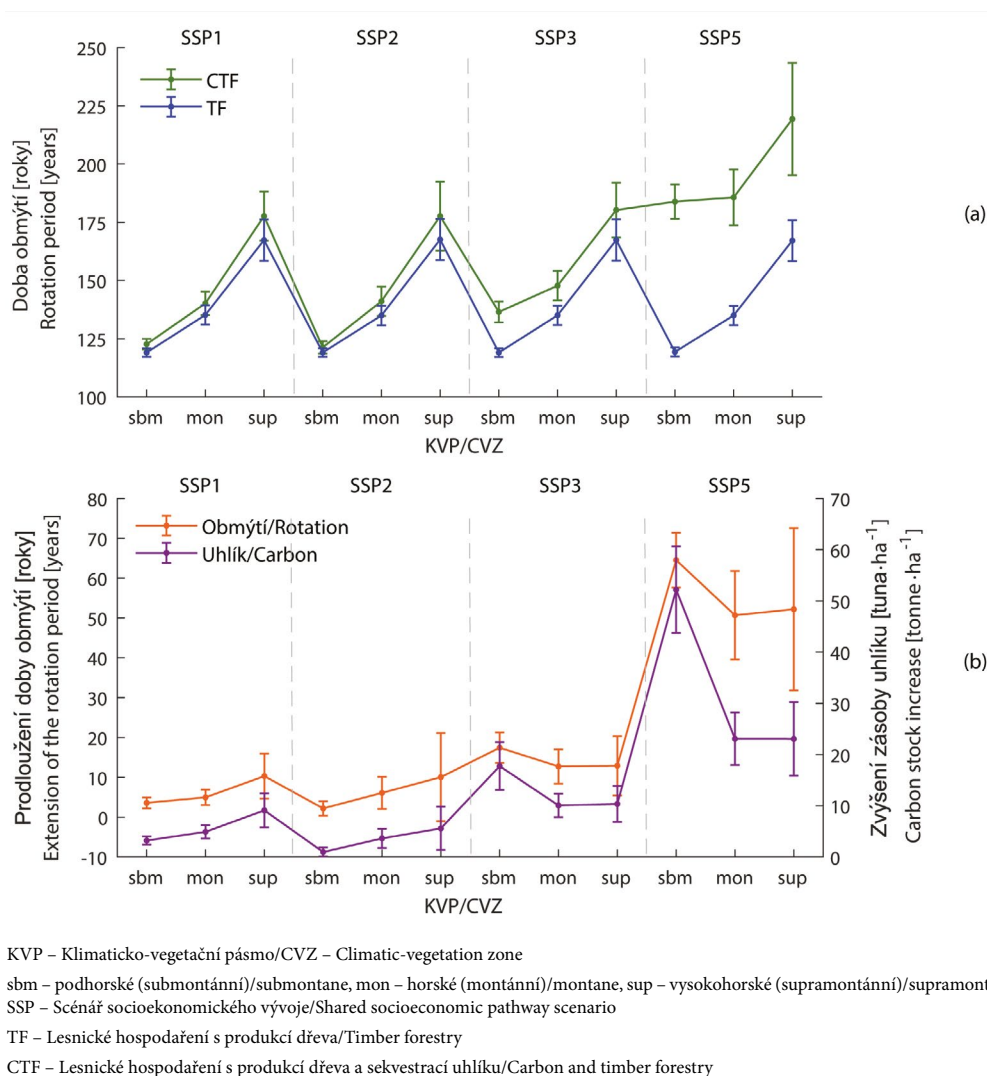
CTF – Lesnické hospodaření s produkcí dřeva a sekvestrací uhlíku/Carbon and timber forestry

SSP – Scénář socioekonomického vývoje/Shared socioeconomic pathway scenario

Při interpretaci výsledků je třeba mít na zřeteli to, že optimum ekonomické mýtní zralosti bylo hledáno pro jedno období obmýti, jednalo se o tzv. Fisherův model obmýti pro jednu mýtní těžbu. Vhodné rozšíření modelu je Faustmannův model se zahrnutím sekvestrace uhlíku (VAN KOOTEN et al. 1995; CHANG 2020), který při hledání řešení bere v potaz čisté výnosy plynoucí z dalších období obmýti opakujících se periodicky v nekonečném časovém horizontu. V tomto modelu lze zohlednit náklady na opakovaná zalesnění po mýtní těžbě, náklady na péči o lesní kultury a ochranu lesa, dále pak výnosy a náklady z výchovné těžby porostu. V porovnání s Fisherovým modelem, nicméně pouze pro maximalizaci dřevní produkce, Faustmannův model zkracuje délku doby obmýti (VAN KOOTEN et al. 1995). Pro maximalizaci hodnoty jak z produkce dřeva, tak sekvestrace uhlíku toto srovnání

v literatuře chybí. Jaký vliv by měla aplikace Faustmannova modelu se sekvestrací uhlíku na výsledky naší studie, nelze tedy odhadovat, bližší poznatky by umožnil navazující výzkum.

Významným zásobníkem uhlíku v lesních ekosystémech je vedle živé biomasy a DOM také organický uhlík v lesní půdě, který nebyl v optimalizačním modelu zahrnut. Uhlíku vázaného v půdě je zhruba stejné množství jako uhlíku v živé biomase (FAO 2020), celosvětově je téměř 45 % uhlíku v lesních ekosystémech poutáno v lesních půdách (ŠRÁMEK et al. 2024). Uhlík poutaný v půdě, především v jejích hlubších minerálních vrstvách, je z dlouhodobého hlediska stabilním zásobníkem. Ukládání uhlíku v půdě je dlouhodobý proces, pro který je důležité především minimální narušení půdního pokryvu a struktury lesa (AMERAY et al. 2021). Výchovné zásahy a zejména obnovní těžba



Obr. 3.

Optimální doba obmýti pro TF a CTF, a změna doby obmýti a zásoby uhlíku vlivem CTF oproti TF hospodaření: porovnání pro různé SSP klimatické scénáře a klimaticko-vegetační pásma při 1,5% diskontní míře.

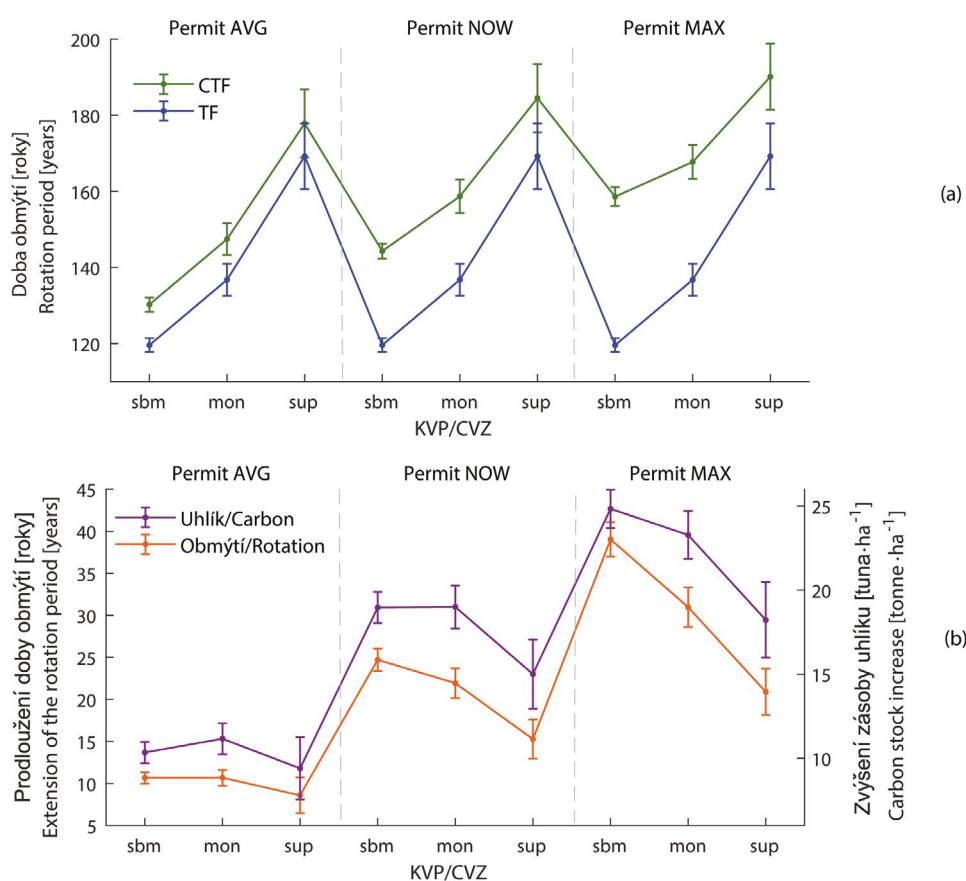
Fig. 3.

Optimal rotation period for TF and CTF, and change in the rotation period and carbon stock due to CTF compared to TF management: comparison for different SSP climate scenarios and climatic-vegetation zones at a 1.5% discount rate.

může výrazně ovlivnit půdní zásoby uhlíku, a tak dynamiku celkové uhlíkové bilance lesního ekosystému. Proces ukládání a dekompozice odumřelé organické hmoty v lesních půdách byl předmětem výzkumu PARKATTI et al. (2023), která ukázala, že zahrnutí půdního uhlíku do výpočtu délky obmytí prodlouží optimální dobu ekonomické mytní zralosti.

Při řešení naší studie bylo optimum ekonomické mytní zralosti hledáno v deterministických podmínkách bez existence rizik poškození lesního porostu biotickými či abiotickými činiteli. Stochastická formulace optimalizační úlohy (7) by umožnila zohlednit při výpočtu mytní zralosti porostu náhodný charakter velkoplošných disturbancí, jakými jsou lesní požáry, hmyzí a větrné kalamity. Prodloužením

doby obmytí se zvyšuje riziko výskytu kalamitních těžeb a požárů, což může vést ke zvyšování podílu nahodilých těžeb a nárůstu ztrát na dřevní produkci lesa (EKHOLM 2020). Pro TF hospodaření obvykle platí, že vyšší riziko přírodních disturbancí je kompenzováno kratší dobou obmytí (RED 1984). Stanovení optima je však pro CTF hospodaření komplikovanější, protože riziko disturbancí a cena uhlíku působí na dobu obmytí opačně, což může vést k odlišným výsledkům. EKHOLM (2020) ukázal, že vyššími cenami uhlíku lze kompenzovat ekonomické ztráty na produkci dřeva způsobené zvýšením kalamitních rizik. SIEBEL-MCKENNA et al. (2020) však poukazují, že zvýšení cen uhlíku z pohledu sekvestrace uhlíku nemusí být dostatečné, aby kompenzovalo zvýšené úniky CO₂ v důsledku kalamit.



KVP – Klimaticko-vegetační pásmo/CVZ – Climatic-vegetation zone

sbm – podhorské (submontánní)/submontane, mon – horské (montánní)/montane, sup – vysokohorské (supramontánní)/supramontane

TF – Lesnické hospodaření s produkcí dřeva/Timber forestry

CTF – Lesnické hospodaření s produkcí dřeva a sekvestrací uhlíku/Carbon and timber forestry

Permit AVG – 10letý průměr cen povolenek/10-year average of allowance prices, Permit NOW – Aktuální cena povolenky: prosinec 2025/Current allowance price: December 2025, Permit MAX – Maximální cena povolenky: březen 2023/Price allowance maximum: March 2023

Obr. 4.

Optimální doba obmytí pro TF a CTF, a změna doby obmytí a zásoby uhlíku vlivem CTF oproti TF hospodaření: porovnání pro různé ceny emisních povolenek EU ETS a klimaticko-vegetační pásma při 1,5% diskontní míře.

Fig. 4.

Optimal rotation period for TF and CTF, and change in the rotation period and carbon stock due to CTF compared to TF management: comparison for different prices of carbon allowances of EU ETS and climatic-vegetation zones at a 1.5% discount rate.

ZÁVĚR

Veřejná schémata plateb za ekosystémové služby lesa (novela lesního zákona č. 250/2025 Sb.) nebo dobrovolné programy uhlíkových kreditů (sdělení Evropské komise o udržitelných uhlíkových cyklech) jsou v současnosti ekonomickými nástroji lesnické politiky, kterými lze ovlivňovat lesnické hospodaření ve prospěch poutání uhlíku (tzv. uhlíkové lesnictví). Důležitým prvkem při tvorbě návrhu a implementaci těchto ekonomických nástrojů by mělo být posouzení, zda podporovaná změna lesnického managementu přináší očekávaný mitigační účinek (VAN KOOTEN, JOHNSTON 2016; ASSMUTH et al. 2021; EU 2024/3012).

Ekonomickými pobídkami lze podpořit zlepšené způsoby lesnického hospodaření, mezi které lze zařadit prodloužení doby obmýti. Posunutím mýtního věku do pozdějších let je možné podpořit sekvestraci uhlíku v lesním ekosystému (NABUURS et al. 2022). Při vyhodnocení mitigačního účinku je však potřeba brát v úvahu řadu parametrů, protože výsledky se mohou významně lišit v závislosti na růstových podmínkách konkrétního stanoviště, výchozím stavu porostu či přijatých ekonomických předpokladech dané úlohy (VAN KOOTEN 2023).

Předmětem našeho výzkumu bylo studium ekonomické mýtní zralosti porostu – při různých stanovištních podmínkách a měnícím se klimatu – s cílem ukázat, jaký vliv na změnu optima a jaký mitigační efekt může mít, pokud při časové úpravě lesa kromě produkčního cíle budeme uvažovat klimatickou službu lesa, kterou v ekonomice lesního hospodaření mohou představovat ekonomické přínosy z poutání uhlíku. Ty mohou lesnímu podniku či vlastníku lesa plynout z plateb za podporu sekvestrace uhlíku nebo z prodeje uhlíkových kreditů.

Výsledky výzkumu přes svoje úzké zaměření na smíšené smrko-jedlo-bukové porosty podhorských, horských a vysokohorských poloh ukázaly, že lesnické hospodaření maximalizující jak produkci dřeva, tak sekvestraci uhlíku prodlužuje dobu obmýti odpovídající ekonomickému optimu v průměru o 19 let ($SD = 52$) a zvýší zásobu uhlíku o $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($SD = 53$) oproti hospodaření, jehož cílem je maximalizace dřevní produkce. Je však potřeba konstatovat, že ekonomická obmýtní doba a mitigační efekt CTF hospodaření je ovlivněn celou řadou tradičních ekonomických (diskontní míra, ceny sortimentů, těžební náklady) a růstových parametrů (výšková poloha stanoviště, výchozí věková a druhová struktura lesa), ale významnou roli hraje také budoucí vývoj klimatu, který určuje dynamiku růstu lesa (v růstovém modelu podmiňuje procesy přírůstu, mortality a obnovy) a dynamiku cen uhlíku, které reflektují budoucí globální škody antropogenní klimatické změny.

Poděkování:

Příspěvek vznikl při řešení projektu "Platby za ekosystémové služby lesa a lesního hospodářství" (QK23020008) za podpory Národní agentury pro zemědělský výzkum Ministerstva zemědělství ČR a projektu Jedna příroda s názvem "Integrovaný projekt LIFE pro soustavu Natura 2000 v České republice" (LIFE-IP: N2K Revisited, LIFE17/IPE/CZ/000005) podpořeného z finančního nástroje Evropské unie LIFE. Poděkování patří též oběma anonymním recenzentům za jejich podnětné připomínky a doporučení, které přispěly ke zvýšení odborné úrovně článku.

LITERATURA

- AMERAY A., BERGERON Y., VALERIA O., MONTORO G.M., CAVARD X. 2021. Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 7: 245–266. DOI: 10.1007/s40725-021-00151-w
- ASSMUTH A., RÄMÖ J., TAHVONEN O. 2018. Economics of size-structured forestry with carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(1): 11–22. DOI: 10.1139/cjfr-2017-0261
- ASSMUTH A., RÄMÖ J., TAHVONEN O. 2021. Optimal Carbon Storage in Mixed-Species Size-Structured Forests. *Environmental and Resource Economics*, 79: 249–275. DOI: 10.1007/s10640-021-00559-9
- CHANG S.J. 2020. Twenty one years after the publication of the generalized Faustmann formula. *Forest Policy and Economics*, 118: 102238. DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102238
- CONDÉS S., DEL RÍO M., FORRESTER D.I., AVDAGIĆ A., BIELAK K., BONČINA A., BOSELA M., HILMERS T., IBRAHIMPAHIĆ A., DROZDOWSKI S., JAWORSKI A., NAGEL T.A., SITKOVÁ Z., SKRZYŚZEWSKI J., TOGNETTI R., TONON G., ZLATANOV T., PRETZSCH H. 2022. Temperature effect on size distributions in spruce-fir-beech mixed stands across Europe. *Forest Ecology and Management*, 504: 119819. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119819
- DUJKA P., KUSBACH A. 2023. Klasifikace vegetační stupňovitosti v České republice: review. *Zprávy lesnického výzkumu*, 68(1): 1–14. DOI: 10.59269/zlv/2023/1/685
- EKHOLM T. 2020. Optimal forest rotation under carbon pricing and forest damage risk. *Forest Policy and Economics*, 115: 102131. DOI: 10.1016/j.forpol.2020.102131
- FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome. DOI: 10.4060/ca8753en
- FORRESTER D.I., TACHAUER I.H., ANNIGHOEFFER P., BARBEITO I., PRETZSCH H., RUIZ-PEINADO R., STARK H., VACCHIANO G., ZLATANOV T., CHAKRABORTY T., SAHA S., SILESHI G.W. 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*, 396: 160–175. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.04.011
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- KURZ W.A., BEUKEMA S.J., APPS M.J. 1998. Carbon Budget Implications of the Transition from Natural to Managed Disturbance Regimes in Forest Landscapes. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2: 405–421. DOI: 10.1023/B:MITI.0000004486.62808.29
- LIANG J., PICARD N. 2013. Matrix Model of Forest Dynamics: An Overview and Outlook. *Forest Science*, 59: 359–378. DOI: 10.5849/forsci.11-123
- MATĚJÍČEK J., ŠAFAŘÍK D., VALA V., SEBERA J., LENOCH J. 2013. Úroková míra v lesnictví. 1. vydání. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy: 159 s.
- MATĚJÍČEK J., ZÁDRAPA R. 2014. Oceňování lesa. Studijní materiál. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta: 161 s.
- MEITNER J., ŠTĚPÁNEK P., SKALÁK P., DUBROVSKÝ M., LHOTKA O., PENČEVOVÁ R., ZAHRADNÍČEK P., FARDA A., TRNKA M. 2023.

- Validation and Selection of a Representative Subset from the Ensemble of EURO-CORDEX EUR11 Regional Climate Model Outputs for the Czech Republic. *Atmosphere*, 14: 1442. DOI: 10.3390/atmos14091442
- MELICHAR J., CIENCIALA E., ALBERT J., BRAUN KOHLOVÁ M., MÁČA V., PAVELČÍK P. 2022. Dynamics and Management of Restored Forests in Post-Mining Sites with Respect to Their Recreation Value: A Matrix Growth Model. *Forests*, 13(9): 1519. DOI: 10.3390/f13091519
- MERGANIČ J., FABRIKA M., MERGANIČOVÁ K. 2011. Submodel of height-diameter function for climatic-site strata of the model of natural regeneration in the growth simulator SIBYLA. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, 53(1): 155–168.
- NABUURS G.-J., MRABET R., ABU HATAB A., BUSTAMANTE M., CLARK H., HAVLÍK P., HOUSE J., MBOW C., NINAN K.N., POPP A., ROE S., SOHNGEN B., TOWPRAYOON S. 2022. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In: IPCC: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. DOI: 10.1017/9781009157926.009
- PARKATTI V.P., TAHVONEN O. 2021. Economics of multifunctional forestry in the Sámi people homeland region. *Journal of Environmental Economics and Management*, 110: 102542. DOI: 10.1016/j.jeem.2021.102542
- PARKATTI V.P., TAHVONEN O., VISKARI T., LISKI J. 2023. Including soil alters the optimization of forestry with carbon sinks. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(8): 591–604. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0226
- PAŘEZ J., MICHALEC M. 1987. Procentické sortimentační tabulky pro stromy hlavních dřevin v ČSSR: (smrk, borovice, buk, dub). *Lesnický průvodce*, 1/1987. Jiloviště-Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti.
- PETRÁŠ R., PAJTÍK J. 1991. Sústava československých objemových tabuliek dřevín. *Lesnícky časopis*, 37: 49–56. ISSN 0323-1046
- PUKKALA T. 2018. Carbon forestry is surprising. *Forest Ecosystems*, 5: 11. DOI: 10.1186/s40663-018-0131-5
- REED W.J. 1984. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of Environmental Economics and Management*, 11(2): 180–190. DOI: 10.1016/0095-0696(84)90016-0
- REMEŠ J., NOVÁK J., ŠTEFANČÍK I., DUŠEK D., SLODIČÁK M., BÍLEK L., PULKRAB K. 2016. Postupy výchovy k dosažení pěstebně-ekologického a ekonomického optima ve smrkových porostech na CHS 43 a 45. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM 2016. *Lesnický průvodce* 14/2016. ISBN 978-80-7417-124-6
- RENNERT K., ERRICKSON F., PREST B.C., RENNELS L., NEWELL R.G., PIZER W., KINGDON C., WINGENROTH J., COOKE R., PARTHUM B., SMITH D., CROMAR K., DIAZ D., MOORE F.C., MÜLLER U.K., PLEVIN R.J., RAFTERY A.E., ŠEVČÍKOVÁ H., SHEETS H., STOCK J.H., TAN T., WATSON M., WONG T.E., ANTHOFF D. 2022. Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature*, 610: 687–692. DOI: 10.1038/s41586-022-05224-9
- RIAHI K., VAN VUUREN D.P., KRIEGLER E., EDMONDS J., O'NEILL B.C., FUJIMORI S., BAUER N., CALVIN K., DELLINK R., FRICKO O., LUTZ W., POPP A., CUARESMA J.C., K.C., S., LEIMBACH M., JIANG L., KRAM T., RAO S., EMMERLING J., EBI K., HASEGAWA T., HAVLIK P., HUMPENÖDER F., DA SILVA L.A., SMITH S., STEHFEST E., BOSETTI V., EOM, J., GERNAAT D., MASUI T., ROGELJ J., STREFLER J., DROUET L., KREY V., LUDERER G., HARMSSEN M., TAKAHASHI K., BAUMSTARK L., DOELMAN J.C., KAINUMA M., KLIMONT Z., MARANGONI G., LOTZE-CAMPEN H., OBERSTEINER M., TABEAU A., TAVONI M. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42: 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- SIEBEL-MCKENNA A., JOHNSTON C.M.T., VAN KOOTEN G.C. 2020. Knock on wood: managing forests for carbon in the presence of natural disturbance risk. *Spatial Economic Analysis*, 15(3): 299–310. DOI: 10.1080/17421772.2019.1701700
- ŠRÁMEK V., FADRHOŇSOVÁ V., NEUDERTOVÁ HELLEBRANDOVÁ K., CIENCIALA E., BORŮVKA L. 2024. Zásoby uhlíku v lesních půdách a lesní hospodářství – review. *Zprávy lesnického výzkumu*, 69(1): 22–36. DOI: 10.59269/zlv/2024/1/716
- ÚHŮL. 2003. Inventarizace lesů v České republice 2001-2004: Inventarizace lesů v České republice, Metodika venkovního sběru dat, Verze: 6.0 - platnost od 1. 7. 2003 [online]. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, [cit. 2023-09-14]. Dostupné na: <https://nil.uhul.cz/ke-stazeni>
- VAN KOOTEN G.C., BINKLEY C.S., DELCOURT G. 1995. Effect of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2): 365–374. DOI: 10.2307/1243546
- VAN KOOTEN G.C., JOHNSTON C.M.T. 2016. The Economics of Forest Carbon Offsets. *Annual Review Resource Economics*, 8: 227–246. DOI: 10.1146/annurev-resource-100815-095548
- VAN KOOTEN G.C. 2023. Determining Optimal Forest Rotation Ages and Carbon Offset Credits: Accounting for Post-Harvest Carbon Storehouses. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 71: 255–272. DOI: 10.1111/cjag.12333
- VONDERACH C., KÄNDLER G., DORMANN C.F. 2018. Consistent set of additive biomass functions for eight tree species in Germany fit by nonlinear seemingly unrelated regression. *Annals of Forest Science*, 75: 49. DOI: 10.1007/s13595-018-0728-4
- WEGGLER K., STEINMANN K., KAUFMANN E., THÜRIG E. 2012. Modeling soil carbon stock including dead wood and l, f, h-horizon using the models Massimo and Yasso07. Final report bafu contract-nr. 04.1140.pj / k283-0072. Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL.
- WOLF J. 1957. Časové a bezčasové směrové pole vývoje. *Sborník VŠZL Brno, řada C, č. 1.*, 1–10.
- WUTZLER T., WIRTH C., SCHUMACHER J. 2008. Generic biomass function for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. *Canadian Journal of Forest Research*, 38: 1661–1675. DOI: 10.1139/X07-194

Právní předpisy

Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2024/3012 ze dne 27. listopadu 2024, kterým se zřizuje rámec Unie pro certifikaci trvalého pohlcování uhlíku, uhlíkového zemědělství a ukládání uhlíku do produktů.

Sdělení Komise Evropskému parlamentu a Radě COM(2021) 800 ze dne 15. prosince 2021 o udržitelných uhlíkových cyklech.

Zákon č. 250/2025 Sb., kterým se mění zákon č. 289/1995 Sb., o lesích a o změně a doplnění některých zákonů (lesní zákon).

ECONOMIC VALUE OF CARBON: A PARAMETER CHANGING THE OPTIMAL ROTATION OF FOREST STANDS

SUMMARY

Forest ecosystems represent an important natural asset that provides commercial timber, regulates ecological processes, is a source of recreational values while hiking or picking forest fruits, and non-use values associated with the existence of species. Forests also play an important role in regulating the Earth's climate system, especially as a carbon sink in living biomass and forest soil and as a source of CO₂ emissions. Therefore, sequestering carbon in forests is an important nature-based solution for mitigating climate change. One way to determine the effectiveness of carbon uptakes in forest management is to examine the effect that the inclusion of carbon price has on the length of economic rotation period of forest stand. As VAN KOOTEN et al. (1995) and ASSMUTH et al. (2018) show, the optimal rotation period is lengthened if both the economic value of commercial timber and carbon sequestration are considered when optimising the economic rotation age. Simultaneously, the extension of the rotation period can have a positive effect on the carbon stock in forest biomass and soil (ASSMUTH et al. 2021; PARKATTI et al. 2023).

The aim of this research is to study optimal rotations of forest stands while simultaneously optimizing timber production and carbon sink and releases (Carbon and Timber Forestry, CTF) under different growth conditions of forest site and future climate trajectories, and to compare CTF rotation optima with optimal solutions for forestry with pure timber production (Timber Forestry, TF). We also pay attention to the possible mitigation effect of CTF, i.e. whether a possible shift in economic optima of rotation period will lead to higher total net carbon sinks. We maximize the sum of net timber revenues and the value of net carbon uptake by optimizing the timing of one rotation period. The economic-ecological optimization model integrates a size-structured matrix growth model that accounts for climate effects on forest dynamics with dynamic prices of carbon that evolve depending on different temperature projections and Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Our carbon pools include carbon dynamics in the whole-tree biomass (with components such as needles/leaves, coarse wood, small wood, bark, stump wood, coarse and fine roots), in dead tree matter formed through natural mortality and from harvest residues, and in harvest wood products with distinct decay rates for different wood assortment (fuel wood, pulpwood, sawlog).

Our study applies an empirically validated matrix growth model developed by CONDÉS et al. (2022) for uneven-aged mixed-species mountain forests consisting of Norway spruce (*Picea abies* L.), European beech (*Fagus sylvatica* L.) and silver fir (*Abies alba* Mill.). Stand initial distributions used as starting points for the simulation of forest growth were derived on data from the first cycle of the Czech National Forest Inventory (NFI1, 2001–2004) from 1,744 inventory plots (ÚHÚL 2003). Summary statistics of stand characteristics for basic plot-level variables from NFI1 data according to climatic-vegetation zones are given in Tab. 1. The forest growth was simulated for forest sites under different elevation-dependent climate conditions represented by 3 different climatic-vegetation zones: forest sites at the submontane, montane, and supramontane altitudes. The projections of air temperature for 3 different climatic-vegetation zones (see Fig. 1) considered four climate change scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) based on EURO-CORDEX simulations prepared for the Czech Republic by CzechGlobe (MEITNER et al. 2023).

The carbon price in the optimization model is represented by the social cost of carbon (SCC), of which estimates for the given SSP climate scenarios were taken from the simulations of the integrated assessment model GIVE (RENNERT et al. 2022). SCC is the present value of the future economic damages that result from emitting one additional ton of CO₂ at a given point in time. The trajectories of SCC values under different future climate conditions (SSP scenarios) used in this study are depicted in Fig. 2.

The results confirmed that forest management with CTF compared to TF will on average lengthen the economic rotation period by 19 years ($SD = 52$) and increase the total carbon stock across all carbon pools – living biomass, dead organic matter and harvest wood products – by 15 t.ha⁻¹ ($SD = 53$). We showed that optimal solution is influenced by the economic parameters of the model (discount rate), and growth and climatic conditions of the forest site (see Tab. 2). In line with previous studies (VAN KOOTEN 2023), the optimal rotation is shortened by a higher discount rate and lengthened by a higher carbon price (Fig. 4). With a 1.5% discount rate, a higher rate of increase in air temperature during the 21st century represented by climate evolution under the SSP5 scenario, significantly lengthens the optimal rotations and leads to higher total net carbon sinks for CTF compared to TF management (see Fig. 3).

The optimization model does not consider changes in carbon sequestration in forest soils, which represent an important carbon pool and significantly affect the dynamics of the carbon balance in forests. In line with previous studies (PARKATTI et al. 2023), the inclusion of soil carbon will lengthen the optimal rotations for CTF management.

Zasláno/Received: 13. 12. 2025

Přijato do tisku/Accepted: 19. 12. 2025