

# VÝZNAM BUKU LESNÍHO VE STŘEDNÍ EVROPĚ V OBDOBÍ KLIMATICKÉ ZMĚNY: PŘEHLED SOUČASNÝCH POZNATKŮ

## THE SIGNIFICANCE OF EUROPEAN BEECH IN CENTRAL EUROPE IN THE PERIOD OF CLIMATE CHANGE: AN OVERVIEW OF CURRENT KNOWLEDGE

JAKUB ČERNÝ<sup>1,2</sup>✉ - ONDŘEJ ŠPULÁK<sup>1</sup> - PETR SÝKORA<sup>2</sup> - KATEŘINA NOVOSADOVÁ<sup>2</sup> - JIŘÍ KADLEC<sup>2</sup> - MARTIN KOMÁNEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73 Opočno, Czech Republic

<sup>2</sup>Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav zakládání a pěstění lesů, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic

✉ e-mail: [cerny@vulhmop.cz](mailto:cerny@vulhmop.cz)

ORCID: J. Černý	0000-0002-9954-1506	K. Novosadová	0000-0002-5207-762X
O. Špulák	0000-0002-4924-3068	J. Kadlec	0000-0002-0355-6456
P. Sýkora	0000-0001-7005-0407	M. Kománek	0000-0001-6057-5197

### ABSTRACT

In the period of ongoing global climate change, ecosystems, including Central European forests, face significant challenges such as summer droughts and heat waves, which increase the climate risks also for the European beech (*Fagus sylvatica* L.), an important and dominant broadleaved tree species in this region. This article provides a comprehensive review of current knowledge on the adaptation strategies of European beech in response to changing climatic conditions, highlighting its ecological demands, development of taxonomy, ecological and economic importance and exploring its resilience, growth characteristics, and challenges such as water regime, pests, diseases, and the impact of climate change. A key finding is that despite the various stressors affecting European beech, adaptive management and the use of mixed forest stands can significantly contribute to its conservation and sustainable use. The importance of integrating the genetic diversity and adaptive capacity of European beech into forestry practices is emphasised. The review of 203 studies highlights the need for further research focused on understanding the interactions between European beech and a changing climate in order to develop more effective strategies for its conservation and sustainable management in the future.

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

**Klíčová slova:** adaptační strategie; lesní hospodářství; odolnost; vodní režim; přísušek; udržitelné hospodaření

**Key words:** adaptation strategies; forest management; resistance; water regime; drought; sustainable forestry

### ÚVOD

Ekosystémy po celém světě čelí stále větším výzvám v důsledku probíhající globální klimatické změny (LEUSCHNER et al. 2023) charakterizované především zvýšením průměrných teplot vzduchu a změnou v distribuci srážek během vegetačního období (CAVIN et al. 2013; SEIDL et al. 2017), která se v posledních letech negativně projevuje především silnými letními přísušky (RAHMSTORF, COUMOU 2011; PETERS et al. 2020; KASPER et al. 2022; VACEK Z. et al. 2023). Ty mají za následek plošné odumírání lesních porostů (KOLÁŘ et al. 2017) a sekundárně i pokles rozmanitosti poskytovaných ekosystémových služeb (BO-

TERO et al. 2021). Klimatické prognózy pro střední Evropu uvedené v Mezivládním panelu pro klimatickou změnu (IPCC) naznačují trend zvyšujících se teplot vzduchu, které by mohly způsobit zvýšení četnosti a délky trvání intenzivních letních dešťů (BEDNAR-FRIEDL et al. 2022). V České republice se v období 1961–2021 v důsledku klimatické změny zvýšila průměrná roční teplota vzduchu o 2 °C (ČHMÚ 2022), přičemž se předpokládá, že do roku 2047 mohou v jižní a střední Evropě vzrůst teploty o další 2 °C (GESSLER et al. 2007). Mezi lety 2018 a 2020 byla střední Evropa sužována extrémními horky doprovázenými suchem (FREI et al. 2022; MATHES et al. 2024), které vážně zasáhly i lesní ekosystémy (SÁNCHEZ-SALGUERO et al. 2017; BUSSOTTI et al. 2024).

Dostupnost vody je pak hlavním limitujícím faktorem pro vitalitu a produktivitu lesních dřevin, včetně buku lesního. Působením sucha mohou být navíc ovlivněny nejen fyziologické procesy, ale i konkurenceschopnost buku, jelikož sucho snižuje míru dostupnosti živin v lesních půdách (PEUKE et al. 2002; RENNENBERG et al. 2009). V důsledku toho bukové porosty trpí časným opadem listoví a ztrátou tloušťkového i výškového přírůstu (RENNENBERG et al. 2006). Ztráta asimilačního aparátu pak může výrazně ovlivnit fotosyntézu, následkem čehož strom nedostává potřebné zásobní látky (sacharidy, lipidy, proteiny, sekundární metabolity) a může dojít k jeho tzv. vyhladovění a následné ztrátě na produkci (LEUSCHNER 2020). Kvůli těmto problémům, kterým buk v současné době čelí a v budoucnu čelit nejspíš bude (ČERMÁK et al. 2021), je na místě zabývat se otázkou vhodné adaptační strategie. Pěstování buku ve směsi např. s dubem (*Quercus* sp.) či s javorů (*Acer* sp.) se zatím zdá být jako nejvhodnější adaptační strategie (PRETZSCH 2022) nejen s ohledem na objemovou produkci, ale i pro udržení buku v nižších polohách (PRETZSCH et al. 2013; ČERMÁK et al. 2021). Alternativou může být i pěstování buku formou strukturně bohatých porostů, kdy podúrovňové stromy často nevykazují téměř žádnou negativní reakci na zvýšenou teplotu vzduchu (BOŠEĀ et al. 2016). Ale na druhou stranu podúrovňové stromy s vyšší kompeticí mohou být v budoucnu náchylnější na působení sucha (PRIMICIA et al. 2015). Proto problematika vhodného obhospodařování bukových porostů může pomoci zmírnit dopady klimatické změny.

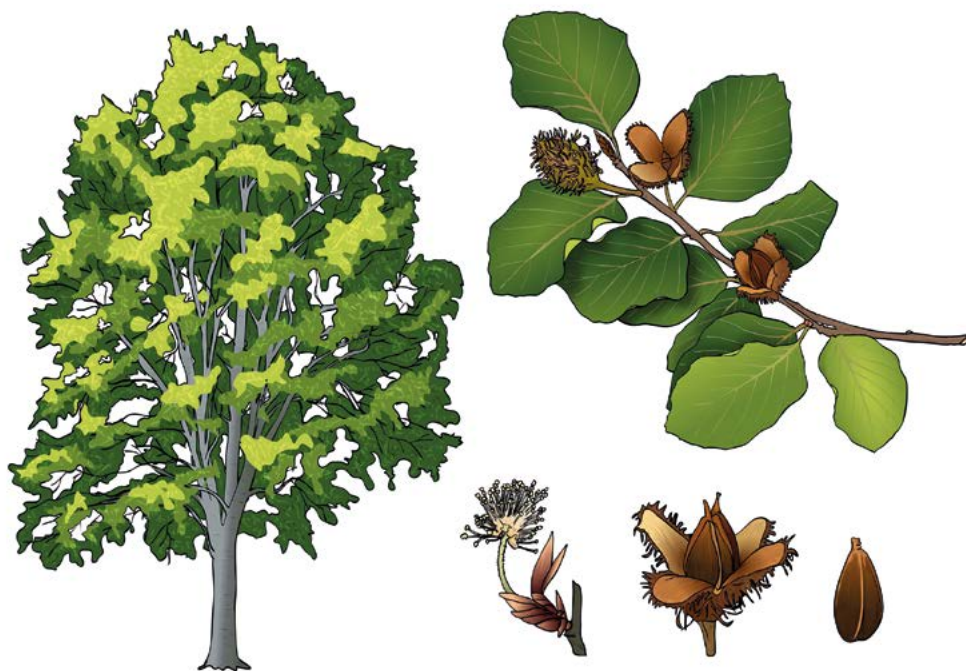
Hlavním cílem článku je poskytnutí komplexního přehledu stávajících poznatků o adaptačních strategiích buku lesního v reakci na měnící se podmínky prostředí. Přehledový článek je zaměřen na (i) charakteristiku a morfologii, (ii) areál výskytu, (iii) taxonomické zařazení, (iv) ekologické nároky, (v) vodní režim, (vi) stresové faktory a onemocnění, (vii) adaptační opatření a produkci a (viii) vlastnosti a využití dřeva buku lesního.

### Charakteristika a morfologie buku lesního

Buk lesní běžně dorůstá výšky 30–40 m, ale za velmi příhodných podmínek není výjimkou i výška 50 m (DEGEN 2001). Dožívá se i více než 250 let, běžná doba obmýti je ovšem 80–120 let (WÜHLISH 2008). V Evropě je průměrná zásoba bukových porostů 591 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> s průměrnou hustotou 317 stromů na hektar (FUCHS et al. 2023). Listy jsou střídavě dvouřadé 5–10 cm, výjimečně 15 cm, dlouhé (AAS, RIEDMILLER 2005). Řapík je krátký 10–15 mm a chlupatý (AAS, RIEDMILLER 2005; KREMER 2006). Buk má samostatné samčí i samičí květy na stejném stromě a je opylován větrem. Lesklá hnědá semena (bukvice) jsou umístěna ve zdřevnatělé osinaté čišce. Semena se mohou skladovat až 5 let, nicméně s dobou skladování se značně snižuje jejich klíčivost. Dormance osiva je silná, ale může být přerušena jeho udržováním při teplotě 3 °C po dobu nejméně šesti týdnů (WÜHLISH 2008; obr. 1).

Buk má velmi dobré meliorační schopnosti, protože produkuje velké množství opadu (cca 900 g m<sup>-2</sup> za rok), což odpovídá průměrné hodnotě indexu listové plochy (LAI) v rozmezí 5,2 až 9,5 (LEUSCHNER et al. 2006; ČERNÝ et al. 2019, 2020). Nepřevyšování této hodnoty je přisuzováno schopnosti autoredukce (BARTELINK 1997). Buk má navíc rozsáhlý kořenový systém s bohatým kořenovým vlášením (WÜHLISH 2008), což umocňuje jeho příznivý meliorační efekt.

Buk se velmi dobře a snadno přirozeně zmlazuje (AMMER et al. 2008) díky až 20m účinnému bočnímu doletu semen (WAGNER et al. 2010), kdy je i poměrně nízká intenzita difuzního záření pro bukovou přirozenou obnovu dostatečná (WILKENS et al. 2023). Přirozenou obnovu a její odrůstání přitom výrazně ovlivňují vlastnosti mikrostanoviště (VACEK Z. et al. 2015a, 2017). Volně rostoucí je schopen plodit již od 20 až 40 let (až 50 let). Za příznivých podmínek je interval semených let 5–10 let, za nepříznivých podmínek se prodlužuje na 9–12 let. S ohledem na klimatickou změnu se ovšem jejich frekvence zvyšuje (BOGDZIEWICZ et al. 2020). Např. ÖVERGAARD (2010) zaznamenal,



Obr. 1.

Habitus, letorost s listy, květ, oplodí a semeno buku lesního (*Fagus sylvatica* L.; autor Josef Macek)

Fig. 1.

Habit, annual shoot, bloom, pericarp, and seed of European beech (*Fagus sylvatica* L.; author Josef Macek)

že se ve Švédsku od roku 1974 interval mezi semennými roky v průměru zkrátí z 5 na 2,5 roku. Vysoká úroda bukovic, která při silném semenném roce představuje až 8 milionů bukovic na hektar porostu (SANIGA, KRAJOVIČ 2009), je tedy velmi nepravidelná a je zároveň závislá na trofnosti stanoviště a suchu v předchozím roce (PROVESAN, ADAMS 2001). Během let vykazuje vysokou variabilitu. Zatímco během 20. století bylo let s vysokou úrodou pouze šest, úrod se slabou

produkcí bylo od roku 1900 celkem 71 (HILTON, PACKHAM 1997; HILTON, PACKHAM 2003). I v polohách při horní hranici lesa se periodicitu semenných let buku v důsledku klimatických změn výrazně zkracuje (VACEK S., HEJCMAN 2012). Semenné roky navíc pozitivně ovlivňuje i změna klimatu a depozice dusíku (ØVERGAARD et al. 2007; PROVESAN, ADAMS 2001). Ačkoliv se v posledních letech jeví spárkatá zvěř jako jeden z nejvýznamnějších limitujících faktorů přirozené obnovy (VACEK Z. et al. 2014; VACEK Z. 2017), je buk v porovnání s jinými listnatými dřevinami vůči loupání či okusu odolnější (AMMER 1996; FUCHS et al. 2021). Přesto je na řadě lokalit pro iniciaci přirozeného zmlazení nutná mechanická ochrana před škodami spárkatou zvěří oplocením (WÜHLISH 2008; AMBROŽ et al. 2015).

**Areál výskytu**

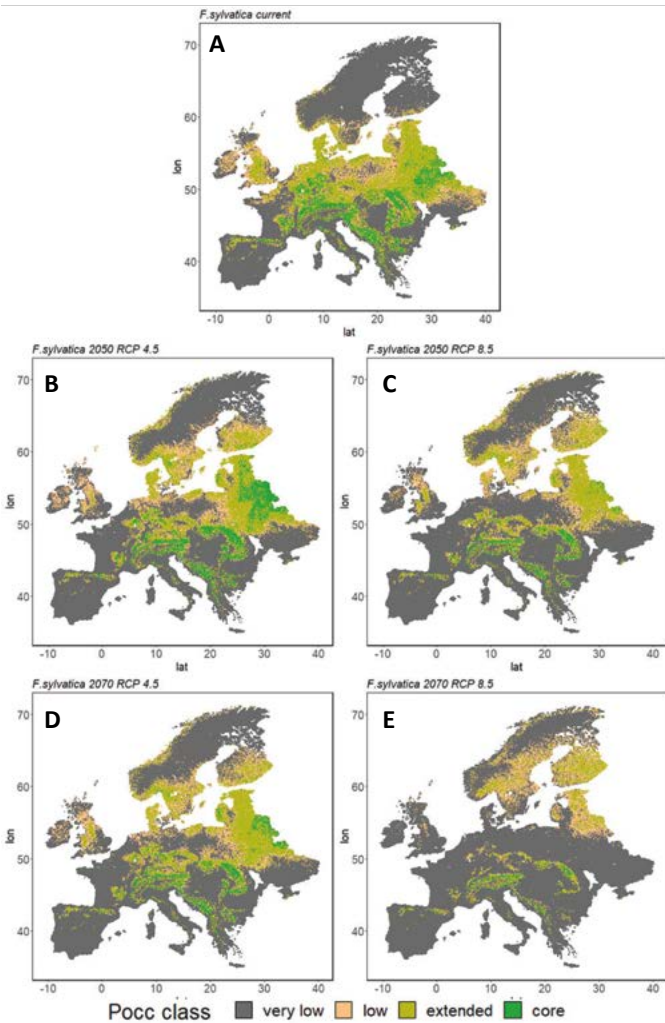
Buk lesní je nejrozšířenější listnatou dřevinou ve střední Evropě (BOHN et al. 2004; LEUSCHNER, ELLENBERG 2017) a zároveň patří mezi nejvýznamnější hospodářské dřeviny v celé Evropě, kde za optimálních růstových podmínek vytváří stejnověké nesmíšené porosty (monokultury) díky svým ekologickým nárokům na světlo a vysoké konkurenceschopnosti (LEUSCHNER, ELLENBERG 2017). Přirozený areál buku lesního pokrývá více než 920 000 km<sup>2</sup> od Sicílie v jižní Itálii (38° severní zeměpisné šířky) po norský Bergen (60° severní zeměpisné šířky) a od severního Španělska (5° západní zeměpisné délky) po východní Rumunsko (28° východní zeměpisné délky; BOHN et al. 2004) a představuje 11,9 % celkové zásoby lesů v Evropě (FOREST EUROPE 2020). Buk roste od nižších poloh v severní části svého areálu (Norsko) až do 1000 m n. m. na Apeninském poloostrově (WÜHLISH 2008). V západní a střední Evropě je charakterizován oceánickým až středoevropským kontinentálním klimatem (MEUSEL 1965). Na základě klimatických scénářů lze ovšem v Evropě předpokládat posun areálu buku (THULLER et al. 2008; obr. 2).

**Taxonomické zařazení**

Buk lesní je dřevina z čeledi *Fagaceae*, rodu *Fagus*. Tento rod čítá asi 10 druhů s rozšířením v mírném pásmu severní polokoule. Vědecké pojmenování druhu *Fagus sylvatica* sahá do roku 1753, kdy jej popsal ve své knize *Species Plantarum* Carl Linné. V rámci střední Evropy se jedná o prakticky jediný vyskytující se druh. Do evropského areálu však sahá ještě druh *Fagus orientalis* Lipsky, což způsobilo v taxonomii jisté nejednoznačnosti s jejich poddruhy a jejich vzájemným vztahem zejména v oblasti Balkánu a jižní Itálie (DENK 1999a, 1999b; GÖMÖRY et al. 1999), kde byla zaznamenána jejich nejvyšší alelická bohatost (COMPS et al. 2001; VETTORI et al. 2004). Terminologická jednodušnost nebyla vždy jednoznačně chápána při označování a vylišování poddruhů a v moderním pojetí genetických a paleobotanických analýz byly tyto nejednoznačnosti zpřesňovány (DENK et al. 2002; MAGRI et al. 2006).

Po popsání *Fagus sylvatica* a jeho asijského příbuzného *Fagus orientalis* Lipsky v roce 1911, který svým areálem rozšíření sahá přes Turecko a Řecko až do jižní části Bulharska, nastalo ve 20. století několik taxonomických střetů a zpřesňování jejich areálu. Jedna z největších nejasností však vzešla z vylišení *Fagus moesiaca* Czeczottem v roce 1933 a krymského *Fagus taurica* Popl., který byl determinován Dutym v roce 1985. Možnost, že by byl *F. orientalis* poddruhem *F. sylvatica*, nebyla odbornou veřejností akceptována (DENK et al. 2002).

Nové poznatky objevilo například první analyzování populací buku lesního pomocí plastidové DNA (cp DNA) v roce 1996 (DEMESURE et al. 1996). DENK et al. (2002) prováděl analýzu buku lesního v oblastech napříč Evropou a považoval *F. moesiaca* za synonymum *F. sylvatica*. Podobné závěry uvádí i MAGRI et al. (2006), který zaznamenal až 600 evropských populací *Fagus sylvatica* pomocí analýzy chloroplasto-



**Obr. 2.** Současný areál výskytu (A) a predikce změny areálu výskytu buku lesního v Evropě při RCP 4.5 (B, D) a RCP 8.5 (C, E) scénářích používaných v klimatických modelech v letech 2050 a 2070. RCP 4.5 představuje mírný scénář, který předpokládá koncentraci cca 650 ppm CO<sub>2</sub> v atmosféře v roce 2100, zatímco RCP 8.5 je negativní scénář s očekávanou koncentrací nad 1370 ppm CO<sub>2</sub> na konci 21. století (Moss et al. 2010). Pocc class – třída pravděpodobnosti výskytu; very low – velmi nízká; low – nízká; extended – rozšířená; core – jádrová. Modifikováno podle KOCH et al. (2022)

**Fig. 2.** Current range (A) and projected range change of European beech (*Fagus sylvatica*) in Europe under RCP 4.5 (B, D) and RCP 8.5 (C, E) scenarios used in climate models for the years 2050 and 2070. RCP 4.5 represents a moderate scenario assuming an atmospheric CO<sub>2</sub> concentration of about 650 ppm by 2100, whereas RCP 8.5 is a pessimistic scenario with an expected concentration of more than 1370 ppm CO<sub>2</sub> by the end of the 21<sup>st</sup> century (Moss et al. 2010); Pocc class – class of occurrence probability. Modified according to KOCH et al. (2022)



vých markerů. Kromě studia lokalit populací buku lesního v poslední době ledové a jeho následného šíření do Evropy byly hodnoceny i genetické rozdíly populací a zmíněná studie mimo jiné zásadně rozporuje tvrzení, že přeživší populace buku lesního byly pouze na Pyrenejském, Apeninském a Balkánském poloostrově. Lokality, kde populace buku přeživaly poslední dobu ledovou, byly nerovnoměrně distribuovány napříč Evropou, kdy byl mimo jiné zaznamenán jeho výskyt na jižní Moravě a v jižních Čechách, dále pak na Istrii a v Alpách. Z těchto oblastí se buk šířil napříč střední Evropou. Populace mediteránu zůstaly buďto ostrovně izolovány, nebo se rozšířily v rámci blízkého okolí Středozemního moře (GÖMÖRY et al. 1999; MAGRI et al. 2006).

### Ekologické nároky buku lesního

Jedná se o stín snášenlivou dřevinu, která je schopna růst na celé řadě stanovištních podmínek. Je schopen odrůstat ve snížených podmínkách ozářenosti pod porostním zápojem, a to často až pod 5 % ozářenosti volné plochy (EMBOG 1998; COLLET et al. 2001). To z něj v porovnání s jinými dřevinami činí vysoce konkurenceschopný druh, protože buk lesní je prakticky jediná listnatá dřevina, která dokáže regenerovat v takto extrémních světelných podmínkách (ELLENBERG 2009).

Z pohledu stresu suchem je v porovnání s jinými listnatými dřevinami (např. DB, HB, JS, LP) citlivější (LEUSCHNER 2020; KASPER et al. 2022), kdy zejména nižší zásoba vody v půdě zvyšuje citlivost jeho růstu na klima (LEUSCHNER et al. 2023). V regionu střední Evropy se přísušek negativně projevil především mezi roky 2018 a 2020 sníženým přírůstem, zvýšenou mortalitou a defoliací buku (FREI et al. 2022; KULLA et al. 2023; MATHES et al. 2024), což naznačuje zvýšenou náchylnost buku vůči suchu v otevřenějším porostním zápoji (MATHES et al. 2024). V důsledku sucha je očekávána ztráta na produkci buku především na jižní hranici jeho rozšíření (JUMP et al. 2006; MARTINEZ DEL CASTILLO et al. 2022; viz obr. 2), kdy ovšem i ve střední Evropě způsobilo suchu v letech 2018 (NEYCKEN et al. 2024) a 2022 předčasný opad listů (SCHMIED et al. 2023).

Buk lesní přežívá až do teplot vzduchu  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (PACKHAM et al. 2012). Jarní teploty vzduchu také výrazně ovlivňují výškový růst buku. Např. ve Francii bylo zjištěno, že květnové teploty od  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  s maximy  $17\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$  byly optimální pro výškový růst, který byl během vysokých červencových teplot doprovázených přísuškem značně omezen (SEYNAVE et al. 2008). Mezi výrazné klimatické signály, které jsou spjaty s tloušťkou ročních letokruhů (tloušťkovým přírůstem), patří především letní teploty vzduchu (červenec–srpen) a úhrn srážek (červen–srpen) předchozího roku (GRUNDMANN et al. 2008; ŠIMŮNEK et al. 2019) a též solární cykly (ŠIMŮNEK et al. 2020, 2021). Je prokázáno, že zvýšení teplot vzduchu o  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  způsobí snížení přírůstu buku o 20–40 %, které může být navíc v případě nízkého úhrnu srážek umocněno až k 50 % poklesu (MARTINEZ DEL CASTILLO et al. 2022).

Jedná se o dřevinu, která není příliš náročná na půdní aciditu, živiny a humusový typ (ELLENBERG 2009). Nejlépe prosperuje na bohatých a středně vlhkých kambizemích (MAYER 1984) s pH od 3,5 do 8,5, ale ne na příliš kyselých stanovištích (GRIME et al. 2007). Pro růst buku jsou naopak nejméně příznivá extrémně vysychavá stanoviště nebo stanoviště s vysokou hladinou podzemní vody (ELLENBERG 2009).

Kořenový systém je poměrně mělký (PETERKEN, MOUNTFORD 1996) s velkým množstvím krátkých postranních kořenů s velmi jemným kořenovým vlášením, kdy jsou přibližně 2/3 celkové biomasy těchto jemných kořenů v mytné zralých porostech obsaženy ve vnějších 30 cm kořenového systému (KIRFEL et al. 2019), což umožňuje velmi efektivní využití poměrně malého množství půdy. Ovšem snížená schopnost rychlého rozšíření kořenového systému do čerstvé půdy jej činí poměrně náchylným ke stresu suchem (PACKHAM et al. 2012). Množství biomasy jemných kořenů buku v evropských podmín-

kách se průměrně pohybuje v rozmezí  $5,3\text{--}6,4\text{ t ha}^{-1}$  v mladých (15–30 let) a okolo  $3,3\text{ t ha}^{-1}$  ve starších porostech (60 let; CLAU, GEORGE 2005).

Buk lesní je typický svojí symbiotickou mykorrhizou, která se vyskytuje nejčastěji v podobě ektomykorrhizy s bazidiomycety rodu *Russula* (HARLEY, HARLEY 1987), nicméně u něj byly zaznamenány i druhy jako *Laccaria amethystina* (ROY et al. 2008), *Tomentella* Pat. ssp. či aktinomycety *Cenococcum geophilum* (KJØLLER 2006; GOICOECHEA et al. 2009).

### Vodní režim buku lesního

Pro ekosystém lesa jsou důležité efektivní srážky, které zahrnují podkorunové srážky a stok po kmeni (HANCHI, RAPP 1997). Efektivní srážky jsou tedy veškeré srážky, které nebyly zachyceny intercepční (CROCKFORD, RICHARDSON 2000) a jsou ovlivňovány např. druhovým složením (VERRY, TIMMONS 1977; BELLOT et al. 1999; NOVOSADOVÁ et al. 2023) a věkem porostu (PARKER 1983; STEVENS 1987).

STAELENS et al. (2007) uvádí při srážkovém úhrnu v rozmezí 2 a 5 mm podíl podkorunových srážek v bukových porostech nad 50 % srážek volné plochy a při úhrnu srážek větším než 5 mm podíl narůstá na více než 65 %. Roční průměrný podíl podkorunových srážek v bukových porostech je literaturou zmiňován ve značném rozpětí, kdy MATTAJI et al. (2012) uvádí 48 %, avšak podle PECK (2004) se hodnoty pohybují v rozmezí 60–95 % v závislosti na věku porostu. Také NOVOSADOVÁ et al. (2023) uvádí, že průměrný roční podíl podkorunových srážek v bukové monokultuře byl 61,1 %, což bylo méně než v porostu s 50% zastoupením buku (76,3 %). Vysoký podíl podkorunových srážek v dubo-bukovém porostu zjistili i ÖZHAN et al. (2011), a to 75,4 % v zimním období a 82,7 % během vegetačního období.

Díky svému habitatu je buk řazen mezi dřeviny s vysokým podílem stoku po kmeni. Metlovitá koruna zadržuje velké množství srážek na větvích, trychtýřovitý tvar postavení silných větví umožňuje rychlý stok po kmeni k půdnímu povrchu a hladká kůra zároveň vytváří menší vsakovací plochu (BARBIER et al. 2009; XIAO, MCPHERSON 2011). I přes tuto skutečnost se hodnoty, které popisují jednotlivé autoři, velmi liší. STAELENS et al. (2007) zjistili, že podíl stoku po kmeni je okolo 3 % při úhrnu srážek mezi 2 až 5 mm a 6 % při srážkách nad 5 mm. LEVIA, FROST (2003) odhadují, že stok po kmeni tvoří 5 % efektivních srážek a VAN STAN, GORDON (2018) popisují, že stok po kmeni je menší než 2 % ve více než dvou třetinách případů na celém světě. MATTAJI et al. (2012) uvedli, že stok po kmeni představuje dokonce pouhé 1,2 %. Na rozdíl od těchto udávaných velmi nízkých hodnot NOVOSADOVÁ et al. (2023) odhadují, že ve vegetačním období je průměrný stok po kmeni 8 %. MITSCHERLICH (1981) zaznamenal, že stok po kmeni se v bukových porostech pohybuje průměrně okolo 12 % a PECK (2004) zjistil hodnoty mezi 15–18 %.

Velikost intercepce je výrazně ovlivněna množstvím spadlých srážek. Podle REYNOLDSE, HENDERSONA (1967) intercepce dosahuje okolo 40 % při 5mm srážce, zatímco, pokud srážky dosáhnou 35 mm, je pouze 14%. RAHMANI et al. (2011) dokonce popisují, že při 5 mm je intercepce 100%, avšak podle STAELENS et al. (2007) se výše intercepce pohybuje pod 50 % při úhrnu srážek 2–5 mm. Při intenzitě srážek se střední hodnotou 7,5 mm může dosahovat až téměř 35 % a při úhrnu větším než 30 mm se zachytává okolo 17,5 % srážek (AHMADI et al. 2009). Průměrná roční hodnota intercepce je udávána mezi 20 a 30 % v závislosti na geografickém umístění výzkumu: 20 % v Německu, 28 % ve Francii a 22 % v rámci celé evropské temperátní zóny (FORGEARD et al. 1980; AUGUSTO et al. 2002; PECK 2004). Tyto hodnoty zpravidla korelují i se studii, u kterých byla zjištěna intercepce efektivních srážek v rozmezí 8 až 31 % (AHMADI et al. 2009; NOVOSADOVÁ et al. 2023). Věk porostu hraje také důležitou roli v množství intercep-

ce. Podle PECK (2004) se dle věku pohybuje intercepce od 5 do 48 %. Pozitivní vliv směsi dřevin na snížení intercepce uvedla NOVOSADOVÁ et al. (2023) studií, ve které se při 50% zastoupení buku ve směsi s dubem a lípou hodnota intercepce snížila o 10 % než v jeho monokultuře.

Další důležitou výdejovou složkou ve vodním režimu porostu je transpirace (MAITI et al. 2016). Transpirace navrácí kolem 39 % srážek zpět do atmosféry, což je společně s množstvím vypařené vody díky intercepci jedna z největších výdejových složek (STŘELCOVÁ, KUČERA 2005; ŠVEC, HALOUNOVÁ 2010; NALEVANKOVÁ et al. 2020). Podle KLAASSEN et al. (1998) nebo JASECHKO et al. (2013) transpirace tvoří až 60 % evapotranspirace (tj. součet transpirace, intercepce a výparů z půdy). NOVOSADOVÁ et al. (2023) odhadli, že transpirací bylo využito v bukovém porostu cca 70 % efektivních srážek, kdežto ve smíšeném dubo-bukovém porostu mezi 70 a 100 %. Zároveň poukázali na možnost přijímání podzemní vody hlubokokořenicími dřevinami a následné předání této vody skrz hydraulický lift (RICHARDS, CALDWELL 1987; ŠACH, ČERNOHOUS 2015) buku rostoucímu v mělčích vrstvách. Také GEBAUER et al. (2012) popsali, že v roce s průměrnými srážkami smíšené porosty několika listnatých druhů transpirovaly více než nesmíšené bučiny, avšak v roce s menšími srážkami neexistoval rozdíl v transpiraci mezi monokulturou buku a smíšenými porosty. SCHUME et al. (2004) zaznamenal, že smíšený buko-smrkový porost vytranspiroval stejné množství vody jako buková monokultura a zároveň upozornil, že ve smíšeném porostu měly buky daleko větší transpirační proud než v bukovém porostu, přičemž smrk ve smíšeném porostu trpěl nedostatkem vody.

### Stresové faktory a onemocnění buku lesního

Ačkoliv se o buku někdy hovoří jako o tolerantní dřevině vůči suchu, vlivem něj a zvýšené teploty vzduchu již byly zaznamenány případy poklesu růstu bukových porostů na jižní hranici jeho výskytu (JUMP et al. 2006; PEÑUELAS et al. 2008). Na druhé straně se buk v posledním desetiletí vlivem měnících se podmínek prostředí začal vyskytovat i ve vyšších vegetačních stupních (VACEK, HEJCMAN 2012). Z provenienčních pokusů sice vyplývá, že různé ekotypy buku jsou různě odolné vůči suchu (PEUKE et al. 2002; ROSE et al. 2009), ovšem jeho konkurenceschopnost proti jiným dřevinám (např. *Quercus* sp.) je tím menší, čím déle sucho přetrvává (GÄRTNER et al. 2008), i přestože je známo, že buk má schopnost redistribuovat vlhkost půdy prostřednictvím svého kořenového systému za účelem jejího zvýšení napříč půdním profilem v období přísušku, což je proces známý jako hydraulický lift (ŠACH, ČERNOHOUS 2015).

Buk je na přísušek nejvíce citlivý na začátku vegetačního období (LEBOURGEOIS et al. 2005). Pokud na buk působí krátkodobě, způsobuje časný opad listů (RENNENBERG et al. 2006). Prosušování korun buku se děje nejen v roce výskytu sucha, ale takovéto oslabení stromů doznívá delší dobu, a to až 15 let po přísušku (PETERKEN, MOUNTFORD 1996). Toto pozdní doznívání může být spojené s vyčerpáním uhlíku v zásobních látkách, často provázaným se zvýšeným napadením patogeny (LEUSCHNER 2020). Dlouhé po sobě jdoucí vlny veder doprovázených suchem způsobují u buku nevratné poškození a někdy i odumření jedince, případně porostu (BERKI et al. 2009). Sucho negativně ovlivňuje tloušťkový přírůst, porosty vystavené suchu po zotavení stabilizují přírůst na 75 % původní úrovně (CAVIN et al. 2013). Jarní dřevo buku také reaguje na suchu mnohem citlivěji než dřevo letní a deficit půdní vláhy během vrcholu vegetačního období je základním limitujícím faktorem růstu buku (LEBOURGEOIS et al. 2005). Extrémní sucho má současně negativní vliv na výškový přírůst. Stromy vystavené extrémnímu suchu vykazují kratší přírůsty než v letech s normálními srážkami (ROLOFF 1988; THIEL et al. 2014). Celkově lze pak říci, že negativní reakce buku na působení sucha je větší na stanovištích živných a vodou ovlivněných než na stanovištích chudých (WEBER et al. 2013).

Buk je relativně rezistentní vůči většině chorob. Příliš netrpí masivním predačním tlakem biotických škůdců, který způsobuje odumírání celých porostů. Za zmínku ovšem stojí *Taphrorychus bicolor*, *Agrilus viridis* a *Nectria*, jejichž populace se v důsledku změny klimatu budou pravděpodobně zvyšovat (ZACH et al. 2002; JUNG 2009; BRÜCK-DYCKHOFF et al. 2019). Mladé výsadby a semenáčky jsou poměrně náchylné k pozdním jarním mrazům (KREYLING et al. 2012), kdy dochází k poškození květů a čerstvě vyrašených listů (ZOHNER et al. 2020). Buk je také relativně citlivý vůči korní spále po náhlém vystavení kmenů intenzivnímu slunečnímu záření (např. po vzniku porostního okraje po pěstebním zásahu; WÜHLISH 2008).

U buku bylo zjištěno celkem 94 hmyzích škůdců, což je v porovnání s dubem výrazně méně (421 hmyzích škůdců), ale stále více než u ostatních listnáčů (KENNEDY, SOUTHWOOD 1984). V rámci rozsáhlých studií v Německu bylo ovšem zjištěno, že množství saproxylického hmyzu výrazně klesá se zvyšující se intenzitou hospodářských opatření (MÜLLER et al. 2007, 2008). Na úspěšnost přirozené obnovy buku lesního má výrazný vliv predační tlak ptáků konzumujících bukvice (JENNI 1987). Bylo zjištěno, že významnými konzumenty bukvic jsou jak lesní, tak i zahradní druhy ptáků, jako např. strakapoud velký, sýkora koňadra, sýkora uhelníček, brhlík lesní, sojka obecná či pěnkava obecná (CHAMBERLINE et al. 2007). Mimoto jsou bukvice často vyhledávány celou řadou hlodavců, mezi které patří především veverky, norník rudý, myšice či plch velký (MORRIS et al. 1997; ABT, BOCK 1998). Významná je rovněž predace semen černou zvěří. Ta je ovšem v posledních letech silně ovlivněna africkým morem prasat (CUKOR et al. 2020), což vede k potenciálně vyšší přirozené obnově buku (BONGI et al. 2017).

Parazitů buku lesního je malé množství a patří mezi ně především hnilák smrkový (čeleď vřesovcovití), hlístník hnízdák a místy i sklenobýl bezlistý (TAYLOR, ROBERTS 2011). Z hub jsou v bukových porostech nejčastěji zastoupeny druhy rodu *Phytophthora* sp. (např. JUNG 2009; FLEISCHMANN et al. 2010).

Další vady struktury dřeva vznikají náchylností buku k vidličnatosti (rozdvojení kmene) či křivosti kmene stromu (CUKOR et al. 2022).

### Adaptační opatření a produkce buku lesního v podmínkách globální klimatické změny

Tloušťkový přírůst buku lesního je ovlivněn řadou vnitřních i vnějších faktorů, mezi které patří věk jedince, struktura porostu, managementová opatření, znečištění ovzduší, dostupnost vody, teplota vzduchu (i délka vegetačního období), množství a intenzita dopadajícího slunečního záření i zásobením dusíkem a fosforem (BOŠELA et al. 2016; LEUSCHNER, ELLENBERG 2017; SHARMA et al. 2019; HÁJEK et al. 2021). Bylo zjištěno, že tloušťkový přírůst závisí především na fotosyntetické aktivitě listů, tedy na jeho kvantitě i kvalitě (MICHELOT et al. 2012). Důležitým aspektem pro udržení zdravého ekosystému lesa je také přítomnost mrtvého dřeva, jehož významné zastoupení je především v lesích s určitou mírou ochrany (např. VACEK S. et al. 2015), kde dosahuje v průměru 130 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (CHRISTENSEN et al. 2005). Mrtvé dřevo podporuje biodiverzitu především tím, že poskytuje habitaty pro mnoho druhů hmyzu, hub a ptáků (LEŠO et al. 2019; ATRENA et al. 2020; HARDERSEN et al. 2020).

Významnou složkou tolerance stromu vůči stresovému faktoru je schopnost obnovení tloušťkového růstu a vitality po působení tohoto faktoru. V bukových porostech byla zaznamenána vysoká resilience tloušťkového růstu jak po působení přísušku (např. PRETZSCH et al. 2020), tak i po pozdních jarních mrazech v dospělých porostech (PRÍNCIPE et al. 2017; ŠIMŮNEK et al. 2019).

Efektivita růstu kmene buku je ovlivněna jak věkem jedince, tak i jeho sociálním postavením (LE GOFF, OTTORINI 2022). V regionu střední

Evropy byl v téměř celém 20. století zaznamenán zvýšený přírůst kruhové výčetní základny bukových porostů (např. VACEK S. et al. 2014; VACEK Z. 2015b; BOŠELA et al. 2018). Tato skutečnost bývá přičítána zejména vlivu atmosférické depozice dusíku, narůstajícím koncentracím CO<sub>2</sub>, delšímu vegetačnímu období či změně hospodaření (GESSLER et al. 2007; KEENAN et al. 2014). V horských oblastech ovšem v 50. až 80. letech minulého století převládal negativní růstový trend kvůli znečištění ovzduší, kyselým depozicím a jejich následnému vlivu na půdní vlastnosti a také vysoké depozici dusíku (DITTMAR et al. 2003; BULUŠEK et al. 2016; BRAUN et al. 2017).

Vzhledem k tomu, že konkurence může ovlivňovat citlivost jedinců ke klimatu a zároveň může pěstební management upravovat kompetiční vztahy porostu a podstatně ovlivňovat biodiverzitu, dostává lesní hospodář možnost usměrňovat reakci jednotlivých stromů i celého porostu ke klimatickým podmínkám prostřednictvím výchovy porostů (CESCATTI, PIUTTI 1998; ŠTEFANČÍK et al. 2014, 2018; REMEŠ et al. 2015). Informace, jak management, tvar lesa či ponechání samovolnému vývoji ovlivňuje diverzitu bukových lesů, což je v kontextu klimatické změny a zvyšování diverzity kruciólní, ukazují, že adaptace na změnu klimatu vyžaduje promyšlené hospodaření (VACEK S. et al. 2019a). Pěstování buku ve smíšených porostech představuje efektivní adaptační opatření z pohledu zvýšení objemové produkce, tlumení negativního vlivu sucha i dalších rizik, efektivnějšího využití zdrojů (hlavně světlo a voda) a stability porostů v rámci probíhající globální klimatické změny (PRETZSCH et al. 2015; KRÁLÍČEK et al. 2017; VACEK S. et al. 2019b; DEL RÍO et al. 2022). Jedinci buku ve směsi mají širší korunu, a tím i lépe využívají korunový prostor oproti monokulturám (SHARMA et al. 2016, 2017). Smíšené bukové porosty tak dosahují vyššího počtu stromů, kruhové výčetní základny, zásoby porostu a sekvestrace uhlíku v biomase (VACEK Z. et al. 2021). Při pěstování bukových a smíšených porostů s bukem lesním jsou vhodné především přírodně blízké způsoby s důrazem na vertikální i horizontální diferenciaci (SLANAŘ et al. 2017; VACEK Z. et al. 2019, 2020; HÁJEK et al. 2020). Jak uvádí VEJPUŠTKOVÁ et al. (2018), v podmínkách České republiky se jeví jako velmi vhodná směs buku lesního se smrkem ztepilým, protože se jedná o dřeviny s odlišnými ekologickými nároky a odlišnou morfologií kořenového systému, díky čemuž dochází k lepšímu využití výše uvedených zdrojů i celého půdního profilu. Z pohledu tloušťkového přírůstu nebyly prokázány signifikantní rozdíly mezi smíšenými a nesmíšenými porosty. To potvrdil i PRETZSCH et al. (2015) v rámci rozsáhlé celoevropské studie směsi buku lesního s borovicí lesní či PRETZSCH, BIBER (2016) pro smíšené porosty buku a modřínu, kde, i přestože se tloušťkový i výškový přírůst příliš neliší mezi smíšenými a nesmíšenými porosty, smíšené porosty vykazovaly vyšší produkční úroveň zejména díky vyšší hustotě porostu a modifikaci kmene i koruny (PRETZSCH, SCHÜTZE 2005; PRETZSCH 2019). Naproti tomu RAIS et al. (2020) zjistili, že smíšení buku se slunnými dřevinami (borovice lesní, dub zimní) snižuje pevnost jeho dřeva.

### Vlastnosti dřeva a jeho využití

Dřevo je bílé nebo světle hnědé s roztroušeně pórovitou strukturou, kde jsou cévy rovnoměrně rozmístěny, i přestože cévy vytvořené časně na jaře jsou trochu větší a četnější, a pod mikroskopem mají dobře zřetelné letokruhy. Dřevo buku je vyzrálé, což znamená, že kromě obvodové běle obsahuje i středovou část s vyzrálým dřevem (POŽGAJ et al. 1997). Průměrná hustota bukového dřeva, která je obecně vyšší u juvenilního než vyzrálého dřeva, se pohybuje okolo 750 kg m<sup>-3</sup> při vlhkosti 12 % (GRYC et al. 2008a, 2008b). Zvýšená dynamika růstu hlavních hospodářských dřevin (včetně buku), způsobená především projevy globální klimatické změny, ovšem způsobila ve střední Evropě za posledních 100 let pokles hustoty dřeva o 8–12 % (PRETZSCH et al. 2018). Mimoto bylo zjištěno, že dřevo buku rostoucí

v monokultuře má vyšší pevnost než bukové řezivo pocházející z porostních směsí (RAIS et al. 2020, 2021, 2022). Bukové dřevo je odolné vůči abrazi (oděru), ale je náchylné k napadení dřevokaznými houhami, a proto musí být v případě jeho využití v exteriéru chemicky nebo tepelně ošetřeno (MUBAROK et al. 2019). Dřevo buku lesního je zejména v nábytkářství jedním z nejhodněji využívaných ve střední Evropě (PRAMREITER, GRABNER 2023). Je také vynikajícím materiálem pro dřevěné podlahy (DÖMÉNY et al. 2014). Vzhledem k jeho vysoké plasticitě (GAFF et al. 2017) je hojně využíváno k výrobě ohýbaného nábytku (židle, křesla, věšáky, lustry apod.). Buk je rovněž široce využíván pro produkci buničiny, celulózy, řeziva, dýh, překližek a dalších kompozitních materiálů (HEIN et al. 2007; TANUŠEV et al. 2009; BAUMANN et al. 2021). Díky jeho vysoké výhřevnosti je buk používán jako palivo, např. ve formě pelet (LUNGULEASA et al. 2015). Od věku 100 let se u bukového dřeva často vyskytuje nepravé jádro, které způsobuje změnu zbarvení dřeva, což omezuje jeho další využití (WÜHLISH 2008). Zdravé nepravé jádro však nesnižuje mechanické vlastnosti dřeva (PÖHLER et al. 2006), nicméně při výskytu hýř hub se tyto vlastnosti výrazně zhoršují (NEČESANÝ 1958). Dřevo buku je snadno impregnovatelné (s výjimkou dřeva nepravého jádra) a z tohoto důvodu bylo rovněž využíváno k výrobě železničních pražců (STARCK et al. 2022).

### ZÁVĚR

Tento článek zdůrazňuje několik důležitých aspektů, které se týkají role buku lesního ve střední Evropě, a to ve světle nejnovějších poznatků a v kontextu globální klimatické změny. Buk lesní, jakožto dominantní a ekologicky významná listnatá dřevina, čelí v podmínkách měnícího se prostředí významným výzvám. Změna klimatu (zvýšení průměrných teplot vzduchu, změna distribuce srážek) nejen ovlivňuje jeho růst, obnovu i areál rozšíření, ale způsobuje i častější tlak biotických škůdců (např. hmyzí škůdci). Adaptace buku lesního na tyto změny, společně s managementovými strategiemi, které tyto adaptace podporují, jsou zásadní pro jeho ochranu a udržitelné využití. Smíšené lesní porosty, efektivní hospodaření a výzkum zaměřený na genetickou diverzitu i adaptabilní schopnosti buku lesního mohou pomoci zajistit jeho trvalou a bezpečnou produkci a vést k posílení jeho adaptace a udržitelného využití. Budoucí výzkum by měl pokračovat v prohlubování porozumění interakcím mezi bukem lesním a měnícím se klimatem, aby bylo možné vyvinout ještě účinnější strategie pro jeho ochranu a management.

### Poděkování:

Příspěvek byl finančně podpořen z prostředků specifického vysokoškolského výzkumu MENDELU (projekty č. IGA-LDF-22-TP-102 a č. IGA-LDF-22-IP-005), projektem Technologické Agentury České republiky (projekt č. TQ03000107) a institucionální podporou MZE-RO0123. Autoři rovněž děkují Josefu Mackovi za grafické návrhy obrázků a v neposlední řadě patří dík dvěma anonymním oponentům za jejich konstruktivní připomínky.

## LITERATURA

- AAS G., RIEDMILLER A. 2005. Kapesní atlas – stromy. Praha, Slovart: 255 s.
- ABT K.F., BOCK W.F. 1998. Seasonal variation of diet composition in farmland mice *Apodemus* ssp. and bank voles *Clethrionomys glaerolus*. *Acta Theriologica*, 43: 379–389.
- AHMADI M.T., ATTAROD P., MOHADJER M.R.M., RAHMANI R., FATHI J. 2009. Partitioning rainfall into throughfall, stemflow, and interception loss in an oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest during the growing season. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 33 (6): 557–568. DOI: 10.3906/tar-0902-3
- AMBROŽ R., VACEK S., VACEK Z., KRÁL J., ŠTEFANČÍK I. 2015. Current and simulated structure, growth parameters and regeneration of beech forests with different game management in the Lány Game Enclosure. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 61 (2): 78–88. DOI: 10.1515/forj-2015-0016
- AMMER C. 1996. Impacts of ungulates on structure and dynamics of natural regeneration of mixed mountain forests in the Bavarian Alps. *Forest Ecology and Management*, 88: 43–53. DOI: 10.1016/S0378-1127(96)03808-X
- AMMER C., BICKEL E., KÖLLING C. 2008. Converting Norway spruce stands with beech: a review of arguments and techniques. *Austrian Journal of Forest Science*, 125 (1): 3–26.
- ATRENA A., BANELYTĖ G.G., LÆSSØE T., RIIS-HANSEN R., BRUUN H.H., RAHBK C., HEILMANN-CLAUSEN J. 2020. Quality of substrate and forest structure determine macrofungal richness along a gradient of management intensity in beech forests. *Forest Ecology and Management*, 478: 118512. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118512
- AUGUSTO L., RANGER J., BINKLEY D., ROTHE A. 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59 (3): 233–253. DOI: 10.1051/forest:2002020
- BARBIER S., BALANDIER P., GOSSELIN F. 2009. Influence of several tree traits on rainfall partitioning in temperate and boreal forests: A review. *Annals of Forest Science*, 66 (6): 602. DOI: 10.1051/forest2009041
- BARTELINK H. 1997. Allometric relationships for biomass and beech leaf area (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, 54 (1): 39–50. DOI: 10.1051/forest:19970104
- BAUMANN G., BRANDNER R., MÜLLER U., STADLMANN A., FEIST F. 2021. A comparative study on the temperature effect of solid birch wood and solid beech wood under impact loading. *Materials*, 14: 7616. DOI: 10.3390/ma14247616
- BEDNAR-FRIEDL B., BIESBROEK R., SCHMIDT D.N., ALEXANDER P., BØRSHEIM K.Y., CARNICER J., GEORGOPOULOU E., HAASNOOT M., LE COZANNET G., LIONELLO P., LIPKA O., MÖLLMANN C., MUCCIONE V., MUSTONEN T., PIEPENBURG D., WHITMARSH L. 2022. Europe. In: Pörtner H.-O. et al. (eds.): *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press: 1817–1927. DOI:10.1017/9781009325844.015
- BELLOT J., ÀVILA A., RODRIGO A. 1999. Throughfall and stemflow. In: Rodá F. et al. (eds.): *Ecology of Mediterranean evergreen oak forests*. New York, Springer: 209–222.
- BERKI I., RASZTOVITS E., MÓRICZ N., MÁTYÁS C.S. 2009. Determination of the drought tolerance limit of beech forests and forecasting their future distribution in Hungary. *Cereal Research Communications*, 37: 613–616.
- BOGDZIEWICZ M., KELLY D., THOMAS P.A., LAGEARD J.G.A., HACKETT-PAIN A. 2020. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech. *Nature Plants*, 6: 88–94. DOI: 10.1038/s41477-020-0592-8
- BOHN U., GOLLUB G., HETTWER C., NEUHÄUSLOVÁ Z., RAUS T., SCHLÜTER H. 2004. Map of the Natural Vegetation of Europe. Map, scale 1 : 2 500 000. Bonn, Federal Agency for Nature Conservation.
- BONGI P., TOMASELLI M., PETRAGLIA A., TINTORI D., CARBOGNANI M. 2017. Wild boar impact on forest regeneration in the northern Apennines (Italy). *Forest Ecology and Management*, 391: 230–238. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.02.028
- BOŠELA M., LUKAČ M., CASTAGNERI D., SEDMÁK R., BIBER P., CARRER M., KONŮPKA B., NOLA P., NAGEL T.A., POPA I., ROIBU C.C., SVOBODA M., TROTSIUK V., BÜNTGEN U. 2018. Contrasting effects of environmental change on the radial growth of co-occurring beech and fir trees across Europe. *Science of the Total Environment*, 615: 1460–1469. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.092
- BOŠELA M., ŠTEFANČÍK I., PETRÁŠ R., VACEK S. 2016. The effects of climate warming on the growth of European beech forests depend critically on thinning strategy and site productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 222: 21–31. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.03.005
- 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 (18): 4403–4419. DOI: 10.1111/gcb.15737
- BRAUN S., SCHINDLER C., RIHM B. 2017. Growth trends of beech and Norway spruce in Switzerland: The role of nitrogen deposition, ozone, mineral nutrition and climate. *Science of the Total Environment*, 599–600: 637–646. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.230
- BRÜCK-DYCKHOFF C., PETERCORD R., SCHOPF R. 2019. Vitality loss of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and infestation by the European beech splendour beetle (*Agrilus viridis* L., Buprestidae, Coleoptera). *Forest Ecology and Management*, 432: 150–156. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.09.001
- BULUŠEK D., VACEK Z., VACEK S., KRÁL J., BÍLEK L., KRÁLÍČEK I. 2016. Spatial pattern of relict beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in the Sudetes of the Czech Republic and Poland. *Journal of Forest Science*, 62 (7): 293–305. DOI: 10.17221/22/2016-JFS
- BUSSOTTI F., POTOČIĆ N., TIMMERMANN V., LEHMANN M.M., POLLASTRINI M., FASSNACHT F. 2024. Tree crown defoliation in forest monitoring: concepts, findings, and new perspectives for a physiological approach in the face of climate change. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2024 (2): 194–212. DOI: 10.1093/forestry/cpad066
- CAVIN L., MOUNTFORD E.P., PETERKEN G.F., JUMP A.S. 2013. Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. *Functional Ecology*, 27 (6): 1424–1435. DOI: 10.1111/1365-2435.12126
- CESCATTI A., PIUTTI E. 1998. Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. *Forest Ecology and Management*, 102(2–3): 213–223. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00163-1
- CLAUS A., GEORGE E. 2005. Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences.

- Canadian Journal of Forest Research, 35 (7): 1617–1625. DOI: 10.1139/x05-079
- COLLET C., LANTER O., PARDOS M. 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. *Annals of Forest Science*, 58 (2): 127–134. DOI: 10.1051/forest:2001112
- COMPS B., GÖMÖRY D., LETOUZEY J., THIÉBAUT B., PETIT R.J. 2001. Diverging trends between heterozygosity and allelic richness during postglacial colonization in the European beech. *Genetics*, 157 (1): 389–397. DOI: 10.1093/genetics/157.1.389
- CROCKFORD R.H., RICHARDSON D.P. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14 (16–17): 2903–2920. DOI: 10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6
- ČUKOR J., LINDA R., VÁCLAVEK P., ŠATRÁN P., MAHLEROVÁ K., VACEK Z., KUNCA T., HAVRÁNEK F. 2020. Wild boar deathbed choice in relation to ASF: Are there any differences between positive and negative carcasses? *Preventive Veterinary Medicine*, 177: 104943. DOI: 10.1016/j.prevetmed.2020.104943
- ČUKOR J., VACEK Z., VACEK S., LINDA R., PODRÁZSKÝ V. 2022. Biomass productivity, forest stability, carbon balance, and soil transformation of agricultural land afforestation: A case study of suitability of native tree species in the submontane zone in Czechia. *Catena*, 210: 105893. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105893
- ČERMÁK P., MIKITA T., KADAVÝ J., TRNKA M. 2021. Evaluating recent and future climatic suitability for the cultivation of Norway spruce in the Czech Republic in comparison with observed tree cover loss between 2001 and 2020. *Forests*, 12 (12): 1687. DOI: 10.3390/f12121687
- 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., HANINEC P., POKORNÝ R. 2020. 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
- ČHMÚ 2022. Fakta o klimatu: Trend nárůstu teplot v ČR v jednotlivých měsících. Dostupné na/Available on: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/trend-teplot-cr> (19. 3. 2024)
- DEGEN T. 2001. Contribution à l'Etude de la Biodiversité dans une Hêtraie Naturelle en Roumanie, et à l'Etude des Relations Existant Entre celle-ci et la Structure de la Forêt. Mémoire de fin d'étude, Unité des Eaux et Forêts, Faculté des Sciences Agronomiques, UCL, France.
- DEL RÍO M., PRETZSCH H., RUIZ-PEINADO R., JACTEL H., COLL L., LÖF M., ALDEA J., AMMER C., AVDAGIĆ A., BARBEITO I., BIELAK K., BRAVO F., BRAZAITIS G., ČERNÝ J., COLLET C., CONDÉS S., DRÖSSLER L., FABRIKA M., HEYM M., HOLM S.O., HYLEN G., JANSONS A., KURYLYAK V., LOMBARDI F., MATOVIĆ B., METSLAID M., MOTTA R., NORD-LARSEN T., NOTHDURFT A., DEN OUDEN J., PACH M., PARDOS M., POEYDEBAT C., PONETTE Q., PÉROT T., REVENTLOW D.O.J., SITKO R., ŠRÁMEK V., STECKEL M., SVOBODA M., VERHEYEN K., VOSPERNIK S., WOLFF B., ZLATANOV T., BRAVO-OVIEDO A., 2022. Emerging stability of forest productivity by mixing two species buffers temperature destabilizing effect. *Journal of Applied Ecology*, 59 (11): 2730–2741. DOI: 10.1111/1365-2664.14267
- DEMASURE B., COMPS B., PETIT J. 1996. Chloroplast DNA phylogeography of the common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Europe. *Evolution*, 50 (6): 2515–2520. DOI: 10.2307/2410719
- DENK T. 1999a. The taxonomy of *Fagus* in western Asia, 1: *Fagus sylvatica* subsp. *orientalis* (= *Fagus orientalis*). *Feddes Repertorium*, 110 (3–4): 177–200. DOI: 10.1002/fedr.19991100305
- DENK T. 1999b. The taxonomy of *Fagus* in western Eurasia. 2: *Fagus sylvatica* subsp. *sylvatica*. *Feddes Repertorium*, 110 (5–6): 379–410. DOI: 10.1002/fedr.19991100510
- DENK T., GRIMM G., STÖGERER K., LANGER M., HEMLEBEN V. 2002. The evolutionary history of *Fagus* in western Eurasia: Evidence from genes, morphology and the fossil record. *Plant Systematics and Evolution*, 232: 213–236. DOI: 10.1007/s006060200044
- DITTMAR C., ZECH W., ELLING W. 2003. Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environment conditions in Europe – a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173 (1–3): 63–78. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00816-7
- DÖMÉNY J., KOIŠ V., ZAPLETAL M. 2014. Application of microwave treatment for the plastification of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) and its densification for flooring system purposes. *Bioresources*, 9 (4): 7519–7528
- ELEENBERG H. 2009. *Vegetation ecology of Central Europe*. 4<sup>th</sup> edition. Cambridge, Cambridge University Press: 731 s.
- EBERT H-P. 1996. Klimaänderung und Baumartenentwicklung. *Forst und Holz*, 51: 802–804.
- EMBOG J. 1998. Understorey light conditions and regeneration with respect to the structural dynamics of a near-natural deciduous forest in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 106 (2–3): 83–95. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00299-5
- FLEISCHMANN F., RAIDL S., OSSWALD W.F. 2010. Changes in susceptibility of beech (*Fagus sylvatica*) seedlings towards *Phytophthora citricola* under the influence of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and nitrogen fertilization. *Environmental Pollution*, 158: 1051–1060. DOI: 10.1016/j.envpol.2009.10.004
- FOREST EUROPE 2020. State of Europe's Forests. Zvolen, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe – FOREST EUROPE. Bratislava, Liaison Unit: 392 s.
- FORGEARD F., GLOAGUEN J.C., TOUFFET J. 1980. Interception des précipitations et apport au sol d'éléments minéraux par les eaux de pluie et les pluviolossivats dans une hêtraie atlantique et dans quelques peuplements résineux en Bretagne. *Annales des Sciences Forestières*, 37: 53–71 [in French]
- FREI E.R., GOSSNER M.M., VITASSE Y., QUELOZ V., DUBACH V., GESSLER A., GINZLER C., HAGEDORN F., MEUSBURGER K., MOOR M., SAMBLÁS VIVES E., RIGLING A., UTTENTUIS I., VON ARX G., WOHLGEMUTH T. 2022. European beech dieback after premature leaf senescence during the 2018 drought in northern Switzerland. *Plant Biology*, 24: 1132–1145. DOI: 10.1111/plb.13467
- FUCHS Z., VACEK Z., VACEK S., GALLO J. 2021. Effect of game browsing on natural regeneration of European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in the Krušné hory Mts. (Czech Republic and Germany). *Central European Forestry Journal*, 67 (3): 166–180. DOI: 10.2478/forj-2021-008
- FUCHS Z., VACEK Z., VACEK S., ČUKOR J., ŠIMŮNEK V., ŠTEFANČÍK I., BRABEC P., KRÁLÍČEK I. 2023. European beech (*Fagus sylvatica* L.): A promising candidate for future forest ecosystems in Central



- Europe amid climate change. *Central European Forestry Journal*, 69: 1–15. DOI: 10.2478/forj-2023-0020
- GAFF M., GAŠPARÍK M., BABIAK M., VOKATÝ V. 2017. Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region. *Composite Structures*, 163: 410–422. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.052
- GÄRTNER S., REIF A., XYSTRAKIS F., SAYER U., BENDAGHA N., MATZARAKIS A. 2008. The drought tolerance limit of *Fagus sylvatica* forest on limestone in southwestern Germany. *Journal of Vegetation Science*, 19 (6): 757–768. DOI: 10.3170/2008-8-18442
- GEBAUER T., HORNA V., LEUSCHNER C. 2012. Canopy transpiration of pre and mixed forest stands with variable abundance of European beech. *Journal of Hydrology*, 442–443: 2–14. DOI: 10.1016/j.hydrol.2012.03.009
- GESSLER A., KEITEL C., KREUZWIESSER J., MATYSSEK R., SEILER W., RENNENBERG H. 2007. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees*, 21: 1–11. DOI: 10.1007/s00468-006-0107-x
- GOICOECHEA N., CLOSA I., DE MIGUEL A.M. 2009. Ectomycorrhizal communities within beech (*Fagus sylvatica* L.) forests that naturally regenerate from clear-cutting in northern Spain. *New Forests*, 38: 157–175. DOI: 10.1007/s11056-009-9137-8
- GÖMÖRY D., PAULE L., BRUS R., ZHELEV P., TOMOVIĆ Z., GRAČAN J. 1999. Genetic differentiation and phylogeny of beech on the Balkan Peninsula. *Journal of Evolutionary Biology*, 12 (4): 746–754. DOI: 10.1046/j.1420-9101.1999.00076.x
- GRIME J.P., HODGSON J.G., HUNT R. 2007. *Comparative plant ecology: a functional approach to common British species*. Dalbeattie, Castlepoint Press: 748 s.
- GRUNDMANN B.M., BONN S., ROLOFF A. 2008. Cross-dating of highly sensitive common beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring series with numerous missing rings. *Dendrochronologia*, 26: 82–88. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.05.002
- GRYC V., VAVRČÍK H., GOMOLA Š. 2008a. Selected properties of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Forest Science*, 54 (9): 418–425.
- GRYC V., VAVRČÍK H., RYBNÍČEK M., PŘEMYSLOVSKÁ E. 2008b. The relation between the microscopic structure and the wood density of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Forest Science*, 54: 170–175
- HÁJEK V., VACEK Z., VACEK S., BÍLEK L., PRAUSOVÁ R., LINDA R., BULUŠEK D., KRÁLÍČEK I. 2020. Changes in diversity of protected scree and herb-rich beech forest ecosystems in Central Europe over 55 years. *Central European Forestry Journal*, 66 (4): 202–217. DOI: 10.2478/forj-2020-0011
- HÁJEK V., VACEK S., VACEK Z., CUKOR J., ŠIMŮNEK V., ŠIMKOVÁ M., PROKŮPKOVÁ A., KRÁLÍČEK I., BULUŠEK D. 2021. Effect of climate change on the growth of endangered scree forests in Krkonoše National Park (Czech Republic). *Forests*, 12 (8): 1127. DOI: 10.3390/f12081127
- HANCHI A., RAPP M. 1997. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management*, 97 (3): 231–235. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00066-2
- HARDERSEN S., MACAGNO A.L.M., CHIARI S., AUDISIO P., GASPARINI P., GIUDICE G. LO, NARDI G., MASON F. 2020. Forest management, canopy cover and geographical distance affect saproxylic beetle communities of small-diameter beech deadwood. *Forest Ecology and Management*, 467: 118152. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118152
- HARLEY J.J., HARLEY E.L. 1987. A check-list of mycorrhiza in the British flora – addenda, errata and index. *New Phytologist*, 107 (4): 741–749. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1987.tb00912.x
- HEIN S., LENK E., KLÄDTKE J., KOHNLE U. 2007. Effect of crop tree selective thinning on beech (*Fagus sylvatica* L.) on wood quality, timber assortment and value production. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 178 (1): 8–20.
- HILTON G.M., PACKHAM J.R. 1997. Sixteen-year record of regional and temporal variation in the fruiting of beech (*Fagus sylvatica* L.) in England (1980–1995). *Forestry*, 70 (1): 7–16. DOI: 10.1093/forestry/70.1.7
- HILTON G.M., PACKHAM J.R. 2003. Variation in the masting of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in northern Europe over two centuries (1800–2001). *Forestry*, 76 (3): 319–328. DOI: 10.1093/forestry/76.3.319
- CHAMBERLINE D.E., GOSLER A.G., GLUE D.E. 2007. Effects of the winter beechmast crop on bird occurrence in British gardens. *Bird Study*, 54 (1): 120–126. DOI: 10.1080/00063650709461463
- CHRISTENSEN M., HAHN K., MOUNTFORD E.P., ÓDOR P., STANDOVÁR T., ROZENBERGAR D., DIACI J., WIJDEVEN S., MEYER P., WINTER S., VRŠKA T. 2005. Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. *Forest Ecology and Management*, 210 (1–3): 267–282. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.02.032
- JASECHKO S., SHARP Z.D., GIBSON J.J., BIRKS S.J., YI Y., FAWCETT P.J. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 496: 347–350. DOI: 10.1038/nature11983
- JENNI L. 1987. Mass concentrations of bramblings, *Fringilla montifringilla*, in Europe 1900–1983: their dependence upon beech mast and the effect of snow cover. *Ornis Scandinavica*, 18 (2): 84–94. DOI: 10.2307/3676843
- JUMP A.S., HUNT J.M., PEÑUELAS J. 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12: 2163–2174. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x
- JUNG T. 2009. Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climate extremes. *Forest Pathology*, 39 (2): 73–94. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2008.00566.x
- KASPER J., LEUSCHNER C., WALENTOWSKI H., PETRITAN A.M., WEIGEL R. 2022. Winners and losers of climate warming: Declining growth in *Fagus* and *Tilia* vs. stable growth in three *Quercus* species in the natural beech–oak forest ecotone (western Romania). *Forest Ecology and Management*, 506: 119892. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119892
- KEENAN T.F., GRAY J., FRIEDL M.A., TOOMEY M., BOHRER G., HOLLINGER D.Y., MUNGER J.M., O’KEEFE J., SCHMID H.P., WING I.S., YANG B., RICHARDSON A.D. 2014. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, 4: 598–604. DOI: 10.1038/nclimate2253
- KENNEDY C.E.J., SOUTHWOOD T.R.E. 1984. The number of species of insects associated with British trees: a re-analysis. *Journal of Animal Ecology*, 53 (2): 455–478. DOI: 10.2307/4528
- KIRFEL K., HERTEL D., HEINZE S., LEUSCHNER C. 2019. Effects of bedrock type and soil chemistry on the fine roots of European beech – A study on the belowground plasticity of trees. *Forest Ecology and Management*, 444: 256–268. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.04.022

- KJØLLER R. 2006. Disproportionate abundance between ectomycorrhizal root tips and their associated mycelia. *FEMS Microbiology Ecology*, 58 (2): 214–224. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2006.00166.x
- KLAASSEN W., BOSVELD F., DE WATER E. 1998. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212–213: 36–50. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00200
- KOCH O., DE AVILA A.L., HEINEN H., ALBRECHT A.T. 2022. Retreat of major European tree species distribution under climate change – Minor natives to the rescue? *Sustainability*, 14 (9): 5213. DOI: 10.3390/su14095213
- KOLÁŘ T., ČERMÁK P., TRNKA M., ŽID T., RYBNÍČEK M. 2017. Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239: 24–33. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.028
- KRÁLÍČEK I., VACEK Z., VACEK S., REMEŠ J., BULUŠEK D., KRÁL J., ŠTEFANČÍK I., PUTALOVÁ T. 2017. Dynamics and structure of mountain autochthonous spruce-beech forests: impact of hilltop phenomenon, air pollutants and climate. *Dendrobiology*, 77: 121–139. DOI: 10.12657/denbio.077.010
- KREMER B.K. 2006. *Stromy*. Praha, Euromedia Group: 288 s.
- KREYLING J., THIEL D., NAGY L., JENTSCH A., HUBER G., KONNERT M., BEIERKUHNEIN C., 2012. Late frost sensitivity of juvenile *Fagus sylvatica* L. differs between southern Germany and Bulgaria and depends on preceding air temperature. *European Journal of Forest Research*, 131: 717–725. DOI: 10.1007/s10342-011-0544-y
- KULLA L., ROESSIGER J., BOŠEEA M., KUCBEL S., MURGAS V., VENCURIK J., PITTNER J., JALOVIAK P., ŠUMICHRÁST L., SANIGA M. 2023. Changing patterns of natural dynamics in old-growth European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests can inspire forest management in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 529: 120633. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120633
- LEBOURGEOIS F., BRÉDA N., ULRICH E., GRANIER A. 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19: 385–401. DOI: 10.1007/s00468-004-0397-9
- LE GOFF N., OTTORINI J.M. 2022. Biomass distribution, allocation and growth efficiency in European beech trees of different ages in pure even-aged stands in northeast France. *Central European Forestry Journal*, 68 (3): 117–138. DOI: 10.2478/forj-2022-0008
- LEŠO P., KROPIL R., KAJTOCH L. 2019. Effects of forest management on bird assemblages in oak-dominated stands of the Western Carpathians – Refuges for rare species. *Forest Ecology and Management*, 453: 117620. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117620
- LEUSCHNER C., VOSS S., FOETZI A., CLASSES Y. 2006. Variation in leaf area index and stand leaf mass of European beech across gradients of soil acidity and precipitation. *Plant Ecology*, 186: 247–258. DOI: 10.1007/s11258-006-9127-2
- LEUSCHNER C., ELLENBERG H. 2017. *Ecology of Central European forests. Vegetation ecology of Central Europe*. Cham, Springer: 971 s.
- LEUSCHNER C. 2020. Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) – a review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 47: 125576. DOI: 10.1016/j.ppees.2020.125576
- LEUSCHNER C., WEITHMANN G., BAT-ENEREL B., WEIGEL R. 2023. The future of European beech in Northern Germany – Climate change vulnerability and adaptation potential. *Forests*, 14: 1448. DOI: 10.3390/f14071448
- LEVIA D.F. JR., FROST E.E. 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*, 274 (1–4): 1–29. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00399-2
- LUNGULEASA A., SPIRCHEZ C., GRIU T. 2015. Effects and modeling of sawdust torrefaction for beech pellets. *Bioresources*, 10 (3): 4726–4739.
- MAGRI D., VENDRAMIN G.G., COMPS B., DUPANLOUP I., GEBUREK T., GÖMÖRY D., LATAŁOWA M., LITT T., PAULE L., ROURE J.M., TANTAU I., VAN DER KNAAP W.O., PETIT R.J., DE BEAULIEU J-L. 2006. A new scenario for the Quaternary history of European beech populations: palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*, 171: 199–221. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2006.01740.x
- MAITI R.K., GONZÁLEZ RODRIGUEZ H., IVANOVA N.S. (eds.) 2016. *Autoecology and ecophysiology of woody shrubs and trees: concepts and applications*. Chichester, Wiley Blackwell: 355 s.
- MARTINEZ DEL CASTILLO E., ZANG C.S., BURAS A., HACKET-PAIN A., ESPER J., SERRANO-NOTIVOLI R., HARTL C., WEIGEL R., KLESSE S., RESCO DE RIOS V., SCHARNWEBER T., DORADO-LIÑÁN I., VAN DER MAATEN-THEUNISSEN M., VAN DER MAATEN E., JUMP A., MIKAC S., BANZRAGH B-E., BECK W., CAVIN L., CLAESSENS H., ČADA V., ČUFAR K., DULAMSUREN C., GRIČAR J., GIL-PELEGRÍN E., JANDA P., KAZIMIROVIC M., KREYLING J., LATTE N., LEUSCHNER C., LONGARES L.A., MENZEL A., MERELA M., MOTTA R., MUFFLER L., NOLA P., PETRITAN A.M., PETRITAN I.C., PRISLAN P., RUBIO-CUADRADO Á., RYDVAL M., STAJIĆ B., SVOBODA M., TOROMANI E., TROTSIUK V., WILMKING M., ZLATANOV T., DE LUIS M. 2022. Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology*, 5: 163. DOI: 10.1038/s42003-022-03107-3
- MATHES T., SEIDEL D., KLEMMT H-J., THOM D., ANNIGHÖFER P. 2024. The effect of forest structure on drought stress in beech forests (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management*, 554: 121667. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121667
- MATTAJI A., AKEF M., SASAN B-K., HEMMATI V. 2012. Throughfall, stemflow and canopy interception loss by central beech trees (*Fagus orientalis* Lipsky) in North Forests of Iran. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 10 (3): 1183–1187.
- MAYER H. 1984. *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage*. Stuttgart, Fisher: 513 s.
- MEUSEL H. 1965. *Vergleichende Chorologie der zentral-europäischen Flora*, Bd. 1. Jena, Fischer: 583 s.
- MICHELOT A., SIMARD S., RATHGEBER C., DUFRÈNE E., DAMESIN C. 2012. Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree Physiology*, 32 (8): 1033–1045. DOI: 10.1093/treephys/tps052
- MITSCHERLICH G. 1981. *Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums*. Bd. 2: *Waldklima und Wasserhaushalt (Forest, Growth and Environment. Volume 2: Forest climate and water balance)*. Frankfurt am Main, Sauerländer's Verlag: 402 s. [In German]
- MORRIS P.A., TEMPLE R.K., JACKSON J.E. 1997. Studies of the edible dormouse (*Glis glis*) in British woodlands – some preliminary results. *Quarterly Journal of Forestry*, 97: 321–326.

- MOSS R.H., EDMONDS J.A., HIBBARD K.A., MANNING M.R., ROSE S.K., VAN VUUREN D.P., CARTER T.R., EMORI S., KAINUMA M., KRAM T., MEEHL G.A., MITCHELL J.F.B., NAKICENOVIC N., RIAHI K., SMITH S.J., STOUFFER R.J., THOMSON A.M., WEYANT J.P., WILKBANS T.J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463: 747–756. DOI: 10.1038/nature08823
- MUBAROK M., DUMARCAY S., MILITZ H., CANDELIER K., THEVENON M.F., GÉRARDIN P. 2019. Comparison of different treatments based on glycerol or polyglycerol additives to improve properties of thermally modified wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77 (5): 799–810. DOI: 10.1007/s00107-019-01429-4
- MÜLLER J., HOTHORN T., PRETZSCH H. 2007. Long-term effects of logging intensity on structures, birds, saproxylic beetles and wood-inhabiting fungi in stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management*, 242 (2–3): 297–305. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.01.046
- MÜLLER J., BUSSLER H., KNEIB T. 2008. Saproxylic beetle assemblages related to silvicultural management intensity and stand structures in a beech forest in Southern Germany. *Journal of Insect Conservation*, 12: 107–124. DOI: 10.1007/s10841-006-9065-2
- NALEVANKOVÁ P., SITKOVÁ Z., KUČERA J., STŘELCOVÁ K. 2020. Impact of water deficit on seasonal and diurnal dynamics of European beech transpiration and time-lag effect between stand transpiration and environmental drivers. *Water*, 12 (12): 3437. DOI: 10.3390/w12123437
- NEČESANÝ V. 1958. Jádru buku, struktúra, vznik a vývoj. Bratislava, Vydavateľstvo slovenskej akadémie vied: 231 s.
- NEYCKEN A., WOHLGEMUTH T., FREI E.R., KLESSE S., BALTENSWELER A., LÉVESQUE M. 2024. Slower growth prior to the 2018 drought and a high growth sensitivity to previous year summer conditions predisposed European beech to crown dieback. *Science of the Total Environment*, 912: 169068. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169068
- NOVOSADOVÁ K., KADLEC J., ŘEHOŘKOVÁ Š., MATOUŠKOVÁ M., URBAN J., POKORNÝ R. 2023. Comparison of rainfall partitioning and estimation of the utilisation of available water in a monoculture beech forest and a mixed beech-oak-linden forest. *Water*, 15 (2): 285. DOI: 10.3390/w15020285
- ÖVERGAARD R., GEMMEL P., KARLSSON M. 2007. Effects of weather conditions on mast year frequency in beech (*Fagus sylvatica* L.) in Sweden. *Forestry*, 80 (5): 553–563. DOI: 10.1093/forestry/cpm020
- ÖVERGAARD R. 2010. Seed production and natural regeneration of beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. Dissertation. Alnarp, Swedish University of Agricultural Sciences: 74 s.
- ÖZHAN S., HIZAL A., YURTSEVEN İ. 2011. Throughfall in a mature oak-beech forest ecosystem. *Journal of the Faculty of Forestry, Istanbul University*, 61(1): 33–40. [In Turkey with English abstract]
- PACKHAM J.P., THOMAS P.A., ATKINSON M.D., DEGEN T. 2012. Biological flora of the British Isles: *Fagus sylvatica*. *Journal of Ecology*, 100 (6): 1557–1608. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2012.02017.x
- PARKER G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 13: 57–133. DOI: 10.1016/S0065-2504(08)60108-7
- PECK A.K. 2004. Hydrometeorologische und mikroklimatische Kennzeichen von Buchenwäldern. Freiburg, Meteorologisches Institutes der Universität Freiburg: 188 s. Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 10. [In German]
- PEÑUELAS J., HUNT J.M., OGAYA R., JUMP A.S. 2008. Twentieth century changes of tree-ring  $\delta^{13}C$  at the southern range-edge of *Fagus sylvatica*: increasing water-use efficiency does not avoid the growth decline induced by warming at low altitudes. *Global Change Biology*, 14 (5): 1076–1088. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01563.x
- PETERKEN G.F., MOUNTFORD E.P. 1996. Effects of drought on beech in Lady Park Wood, an unmanaged mixed deciduous woodland. *Forestry*, 69 (2): 117–128. DOI: 10.1093/forestry/69.2.125
- PETERS W., BASTOS A., CIAIS P., VERMEULEN A. 2020. A historical, geographical and ecological perspective on the 2018 European summer drought. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B: Biological Sciences*, 375: 20190505. DOI: 10.1098/rstb.2019.0505
- PEUKE A.D., HARTUNG W., SCHRAML C., RENNENBERG H. 2002. Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters. *New Phytologist*, 154 (2): 373–388. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2002.00400.x
- PIOVESAN G., ADAMS J.M. 2001. Masting behaviour in beech: linking reproduction and climatic variation. *Canadian Journal of Botany*, 79 (9): 1039–1047. DOI: 10.1139/b01-089
- PÖHLER E., KLINGNER R., KÜNNIGER T. 2006. Beech (*Fagus sylvatica* L.) – Technological properties, adhesion behaviour and colour stability with and without coatings of the red heartwood. *Annals of Forest Science*, 63 (2): 129–137. DOI: 10.1051/forests:2005105
- POŽGAJ A., CHOVANEC D., KURJATKO S., BABIAK M. 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava, Príroda: 448 s. ISBN: 80-07-00960-4
- PRAMREITER M., GRABNER M. 2023. The utilization of European beech wood (*Fagus sylvatica* L.) in Europe. *Forests*, 14 (7): 1419. DOI: 10.3390/f14071419
- PRETZSCH H., SCHÜTZE G. 2005. Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands. *Plant Biology*, 7 (6): 628–639. DOI: 10.1055/s-2005-865965
- PRETZSCH H., BIELAK K., BLOCK J., BRUCHWALD A., DIELER J., EHRHART H.P., ZINGG A. 2013. Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. *European Journal of Forest Research*, 132 (2): 263–280. DOI: 10.1007/s10342-012-0673-y
- PRETZSCH H., DEL RÍO M., AMMER C., AVGADIČ A., BARBEITO I., BIELAK K., BRAZAITIS G., COLL L., DIRNBERGER G., DRÖSSLER L., FABRIKA M., FORRESTER D.I., GODVOD K., HEYM M., HURT V., KURYLYAK V., LÖF M., LOMBARDI F., MATOVIĆ B., MOHREN R., MOTTA R., DEN OUDEN J., PACH M., PONNETE Q., SCHÜTZE G., SCHWEIG J., SKRZYSZEWSKI J., ŠRÁMEK V., STERBA H., STOJANOVIĆ D., SVOBODA M., VANHELLEMONT M., VERHEYEN K., WELLHAUSEN K., ZLATANOV T. 2015. Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *European Journal of Forest Research*, 134: 927–947. DOI: 10.1007/s10342-015-0900-4
- PRETZSCH H., BIBER P. 2016. Tree species mixing can increase maximum stand density. *Canadian Journal of Forest Research*, 49 (10): 1179–1193. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0413

- PRETZSCH H., BIBER P., SCHÜTZE G., KEMMERER J., UHL U. 2018. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. *Forest Ecology and Management*, 429: 589–616. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.07.045
- PRETZSCH H. 2019. The effect of tree crown allometry on community dynamics in mixed-species stands versus monocultures. A review and perspectives for modeling and silvicultural regulation. *Forests*, 10 (9): 810. DOI: 10.3390/f10090810
- PRETZSCH H., GRAMS T.E.E., HÄBERLE K.-H., PRITSCH K., BAUERLE T., RÖTZER T. 2020. Growth and mortality of Norway spruce and European beech in monospecific and mixed-species stands under natural episodic and experimentally extended drought. Results of the KROOF throughfall exclusion experiment. *Trees*, 34: 957–970. DOI: 10.1007/s00468-020-01973-0
- PRETZSCH H. 2022. Facilitation and competition reduction in tree species mixtures in Central Europe: Consequences for growth modelling and forest management. *Ecological Modelling*, 464: 109812. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109812
- PRIMICIA I., CAMARERO J.J., JANDA P., ČADA V., MORRISSEY R.C., TROTSIUK V., BAČE R., TEODOSIU M., SVOBODA M. 2015. Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate. *Forest Ecology and Management*, 354: 77–86. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.06.034
- PRÍNCIPE A., VAN DER MAATEN E., VAN DER MAATEN-THEUNISSEN M., STRUWE T., WILMKING M., KREYLING J. 2017. Low resistance but high resilience in growth of a major deciduous forest tree (*Fagus sylvatica* L.) in response to late spring frost in southern Germany. *Trees*, 31: 743–751. DOI: 10.1007/s00468-016-1505-3
- RAHMANI R., SADODDIN A., GHORBANI S. 2011. Measuring and modelling precipitation components in an Oriental beech stand of the Hyrcanian region, Iran. *Journal of Hydrology*, 404 (3–4): 294–303. DOI: 10.1016/j.hydrol.2011.04.036
- RAHMSTORF S., COUMOU D. 2011. Increase of extreme events in a warming world. The proceedings of the National Academy of Sciences, 108 (44): 17905–17909. DOI: 10.1073/pnas.1101766108
- RAIS A., VAN DE KUILEN J.-W. G., PRETZSCH H. 2020. Impact of species mixture on the stiffness of European beech (*Fagus sylvatica* L.) sawn timber. *Forest Ecology and Management*, 461: 117935. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.117935
- RAIS A., JACOBS M., VAN DE KUILEN J.-W. G., PRETZSCH H. 2021. Crown structure of European beech (*Fagus sylvatica*): a noncausal proxy for mechanical-physical wood properties. *Canadian Journal of Forest Research*, 51 (6): 834–841. DOI: 10.1139/cjfr-2020-0382
- RAIS A., KOVRYGA A., PRETZSCH H., VAN DE KUILEN J.-W. G. 2022. Timber tensile strength in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Wood Science and Technology*, 56: 1239–1259. DOI: 10.1007/s00226-022-01398-7
- REMEŠ J., BÍLEK L., NOVÁK J., VACEK Z., VACEK S., PUTALOVÁ T., KOUBEK L. 2015. Diameter increment of beech in relation to social position of trees, climate characteristics and thinning intensity. *Journal of Forest Science*, 61 (10): 456–464. DOI: 10.17221/75/2015-JFS
- RENNENBERG H., LORETO F., POLLE A., BRILLI F., FARES S., BENIWAL R.S., GESSLER A. 2006. Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology*, 8 (5): 556–571. DOI: 10.1055/s-2006-924084
- RENNENBERG H., DANNENMANN M., GESSLER A., KREUZWIESER J., SIMON J., PAPAN H. 2009. Nitrogen balance in forest soils: nutritional limitation of plants under climate change stresses. *Plant Biology*, 11 (1): 4–23. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2009.00241.x
- REYNOLDS E.R.C., HENDERSON C.S. 1967. Rainfall interception by beech, larch and Norway spruce. *Forestry*, 40 (2): 165–184. DOI: 10.1093/forestry/40.2.165
- RICHARDS J.M., CALDWELL M.M. 1987. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. *Oecologia*, 73: 486–489. DOI: 10.1007/BF00379405
- ROLOFF A. 1988. Morphology of crown development of *Fagus sylvatica* L. (beech) in consideration of new modifications. II. Strategy of airspace conquest and modifications by environmental influences. *Flora*, 180: 297–338.
- ROSE L., LEUSCHNER C., KOCKERMANN B., BUSCHMANN H. 2009. Are marginal beech (*F. sylvatica* L.) provenances a source for drought-tolerant ecotypes? *European Journal of Forest Research*, 128: 335–343. DOI: 10.1007/s10342-009-0268-4
- ROY M., DUBOIS M.-P., PROFFIT M., VINCENOT L., DESMARAIS E., SELOSSE M.-A. 2008. Evidence from population genetics that the ectomycorrhizal basidiomycete *Laccaria amethystina* is an actual multihost symbiont. *Molecular Ecology*, 17 (12): 2825–2838. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2008.03790.x
- SÁNCHEZ-SALGUERO R., CAMARERO J.J., GRAU J.M., DE LA CRUZ A.C., GIL P.M., MINAYA M., FERNÁNDEZ-CANCIO A. 2017. Analysing atmospheric processes and climatic drivers of tree defoliation to determine forest vulnerability to climate warming. *Forests*, 8 (1): 13. DOI: 10.3390/f8010013
- SANIGA M., KRAEOVIČ Š. 2009. Počiatkové fázy prirodzenej obnovy buka v skupine lesných typov *Fagetum pauper* v Malých Karpatoch. *Facultatis Forestalis Zvolen*, 51: 29–42.
- SEIDL R., THOM D., KAUTZ M., MARTIN-BENITO D., PELTONIEMI M., VACCHIANO G., WILD J., ASCOLI D., PETR M., HONKANIEMI J., LEXER M.J., TROTSIUK V., MAIROTA P., SVOBODA M., FABRIKA M., NAGEL T.A., REYER C.P.O. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395–402. DOI: 10.1038/nclimate3303
- SEYNAVE I., GÉGOUT J.-C., HERVÉ J.-C., DHÔTE J.-F. 2008. Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth? *Journal of Biogeography*, 35 (10): 1851–1862. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2008.01930.x
- SHARMA R.P., VACEK Z., VACEK S. 2016. Individual tree crown width models for Norway spruce and European beech in Czech Republic. *Forest Ecology and Management*, 366: 208–220. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.01.040
- SHARMA R.P., VACEK Z., VACEK S. 2017. Modelling tree crown-to-bole diameter ratio for Norway spruce and European beech. *Silva Fennica*, 51(5): 1740. DOI: 10.14214/sf.1740
- SHARMA R.P., ŠTEFANČÍK I., VACEK Z., VACEK S. 2019. Generalized nonlinear mixed-effects individual tree diameter increment models for beech forests in Slovakia. *Forests*, 10 (5): 451. DOI: 10.3390/f10050451
- SCHMIED G., PRETZSCH H., AMBS S., UHL E., SCHMUCKER J., FÄTH J., BIBER P., HOFFMANN Y.-D., ŠEHO M., MELLERT K.H., HILMERS T. 2023. Rapid beech decline under recurrent drought stress: Individual neighborhood structure and soil properties matter. *Forest Ecology and Management*, 545: 121305. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121305

- SCHUME H., JOST G., HAGER H. 2004. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce. *Journal of Hydrology*, 1–4: 258–274. DOI: 10.1016/j.hydrol.2003.11.036
- SLANAŘ J., VACEK Z., VACEK S., BULUŠEK D., CUKOR J., ŠTEFANČÍK I., BÍLEK L., KRÁL J. 2017. Long-term transformation of submontane spruce-beech forests in the Jizerské hory Mts.: dynamics of natural regeneration. *Central European Forestry Journal*, 63 (4): 212–224. DOI: 10.1515/forj-2017-0023
- STAELENS J., DE SCHRIJVER A., VERHEYEN K., VERHOEST N.E.C. 2007. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22 (1): 33–45. DOI: 10.1002/hyp.6610
- STARCK M., HEIDEL A., BRISCHKE C., MILITZ H. 2022. Incising and double impregnation of beech sleepers – Investigation of an alternative preservation system for wooden railway sleepers. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5: 814049. DOI: 10.3389/ffgc.2022.814049
- STEVENS P.A. 1987. Throughfall chemistry beneath Sitka spruce of four ages in Beddgelert Forest, North Wales, UK. *Plant and Soil*, 101: 291–294. DOI: 10.1007/BF02370658
- STŘELCOVÁ K., KUČERA J. 2005. Stanovenie evapotranspirácie smrekového porastu metódou s dendrometrickým prístupom. In: Rožnovský J., Litschmann T. (ed.): *Evaporace a evapotranspirace: Sborník z mezinárodního vědeckého semináře*. Brno, ČHMÚ: 71–75. [In Slovak]
- ŠACH F., ČERNOHOUS V. 2015. Hydraulický lift buku pro smrk: potenciálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování. [Hydraulic lift by beech to spruce: potentially important ecosystem process for spruce stand silviculture in connection with climatic change of warming]. *Zprávy lesnického výzkumu*, 60 (1): 53–63.
- ŠIMŮNEK V., VACEK Z., VACEK S., KRÁLÍČEK I., VANČURA K. 2019. Growth variability of European beech (*Fagus sylvatica* L.) natural forests: Dendroclimatic study from Krkonoše Mountains National Park. *Central European Forestry Journal*, 65 (2): 92–102. DOI: 10.2478/forj-2019-0010
- ŠIMŮNEK V., SHARMA R.P., VACEK Z., VACEK S., HŮNOVÁ I. 2020. Sunspot area as unexplored trend inside radial growth of European beech in Krkonoše Mountains: a forest science from different perspective. *European Journal of Forest Research*, 139 (6): 999–1013. DOI: 10.1007/s10342-020-01302-7
- ŠIMŮNEK V., VACEK Z., VACEK S., RIPULLONE F., HÁJEK V., D'ANDREA G. 2021. Tree rings of European beech (*Fagus sylvatica* L.) indicate the relationship with solar cycles during climate change in Central and Southern Europe. *Forests*, 12: 259. DOI: 10.3390/f12030259
- ŠTEFANČÍK I., VACEK S., PODRÁZSKÝ V., KLOUČEK T. 2014. Dopad výchovy na kvantitatívnu produkciu bukovej (*Fagus sylvatica* L.) žrdkoviny v oblasti Vihorlatských vrchov (Slovensko). *Zprávy lesnického výzkumu*, 59 (3): 198–204
- ŠTEFANČÍK I., VACEK S., PODRÁZSKÝ V. 2018. The most significant results of long-term research on silviculture experiments focusing on spruce and beech in the territory of the former Czechoslovakia. *Central European Forestry Journal*, 64: 180–194. DOI: 10.1515/forj-2017-0042
- ŠVEC M., HALOUNOVÁ L. 2010. Určení vlivu evapotranspirace pro zpřesnění srážko-odtokových modelů. In: Růžička J., Pešková K. (ed.): *Sborník – Symposium GIS Ostrava 2011*. 24.–27. 1. 2010. Ostrava, VŠB – Technická univerzita: Ostrava: 155.
- TANUŠEV V., IŠTVANIĆ J., MORO M., BUTKOVIĆ J. 2009. Yield of low quality and small-sized diameter Common beech (*Fagus sylvatica* L.) logs in rough dimension stock production. *Šumarski list*, 133 (9–10): 483–492
- TAYLOR L., ROBERTS D.L. 2011. Biological flora of the British Isles: *Epipogium aphyllum* Sw. *Journal of Ecology*, 99 (3): 878–890. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01839.x
- THIEL D., KREYLING J., BACKKAUS S., BEIERKUHNLEIN C., BUHK C., EGEN K., HUBER G., KONNERT M., NAGY L., JENTSCH A. 2014. Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. *European Journal of Forest Research*, 133: 247–260. DOI: 10.1007/s10342-013-0750-x
- THULLER W., ALBERT C., ARAUJO M.B., BERRY P.M., CABEZA M., GUIBAN A., HICKLER T., MIDGLEY G.F., PATERSON J., SCHURR F.M., SYKES M.T., ZIMMERMANN N.E. 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9 (3–4): 137–152. DOI: 10.1016/j.ppees.2007.09.004
- VACEK S., HEJCMAN M. 2012. Natural layering, foliation, fertility and plant species composition of a *Fagus sylvatica* stand above the alpine timberline in the Giant (Krkonoše) Mts., Czech Republic. *European Journal of Forest Research*, 131: 799–810. DOI: 10.1007/s10342-011-0553-x
- VACEK S., VACEK Z., PODRÁZSKÝ V., BÍLEK L., BULUŠEK D., ŠTEFANČÍK I., REMEŠ J., ŠTÍCHA V., AMBROŽ R. 2014. Structural diversity of autochthonous beech forests in Broumovské Stěny National Nature Reserve, Czech Republic. *Austrian Journal of Forest Science*, 131 (4): 191–214.
- VACEK S., VACEK Z., BÍLEK L., HEJCMANOVÁ P., ŠTÍCHA V., REMEŠ J. 2015. The dynamics and structure of dead wood in natural spruce-beech forest stand—a 40 year case study in the Krkonoše National Park. *Dendrobiology*, 73: 21–32. DOI: 10.12657/denbio.073.003
- VACEK S., VACEK Z., ULBRICHOVÁ I., BULUŠEK D., PROKŮPKOVÁ A., KRÁL J., VANČURA K. 2019a. Biodiversity dynamics of differently managed lowland forests left to spontaneous development in Central Europe. *Austrian Journal of Forest Science*, 136 (3): 249–281.
- VACEK S., PROKŮPKOVÁ A., VACEK Z., BULUŠEK D., ŠIMŮNEK V., KRÁLÍČEK I., PRAUSOVÁ R., HÁJEK V. 2019. Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *Journal of Forest Science*, 65 (9): 331–345. DOI: 10.17221/82/2019-JFS
- VACEK Z., VACEK S., BÍLEK L., KRÁL J., REMEŠ J., BULUŠEK D., KRÁLÍČEK I. 2014a. Ungulate impact on natural regeneration in spruce-beech-fir stands in Černý důl nature reserve in the Orlické Hory Mountains, case study from Central Sudetes. *Forests*, 5: 2929–2946. DOI: 10.3390/f5112929
- VACEK Z., VACEK S., PODRÁZSKÝ V., BÍLEK L., ŠTEFANČÍK I., MOSER W.K., BULUŠEK D., KRÁL J., REMEŠ J., KRÁLÍČEK I. 2015a. Effect of tree layer and microsite on the variability of natural regeneration in autochthonous beech forests. *Polish Journal of Ecology*, 63 (2): 233–246. DOI: 10.3161/15052249PJE2015.63.2.007
- VACEK Z., VACEK S., BÍLEK L., REMEŠ J., ŠTEFANČÍK I. 2015b. Changes in horizontal structure of natural beech forests on an altitudinal gradient in the Sudetes. *Dendrobiology*, 73: 33–45. DOI: 10.12657/denbio.073.004



- VACEK Z. 2017. Structure and dynamics of spruce-beech-fir forests in Nature Reserves of the Orlické hory Mts. in relation to ungulate game. *Central European Forestry Journal*, 62: 23–34. DOI: 10.1515/forj-2017-0006
- VACEK Z., BULUŠEK D., VACEK S., HEJCMANOVÁ P., REMEŠ J., BÍLEK L., ŠTEFANČÍK I. 2017. Effect of microrelief and vegetation cover on natural regeneration in European beech forests in Krkonoše national parks (Czech Republic, Poland). *Austrian Journal of Forest Science*, 134 (1): 75–96.
- VACEK Z., VACEK S., SLANAŘ J., BÍLEK L., BULUŠEK D., ŠTEFANČÍK I., KRÁLÍČEK I., VANČURA K. 2019. Adaption of Norway spruce and European beech forests under climate change: from resistance to close-to-nature silviculture. *Central European Forestry Journal*, 65 (2): 129–144. DOI: 10.2478/forj-2019-0013
- VACEK Z., PROKŮPKOVÁ A., VACEK S., CUKOR J., BÍLEK L., GALLO J., BULUŠEK D. 2020. Silviculture as a tool to support stability and diversity of forests under climate change: study from Krkonoše Mountains. *Central European Forestry Journal*, 66 (2): 116–129. DOI: 10.2478/forj-2020-0009
- VACEK Z., PROKŮPKOVÁ A., VACEK S., BULUŠEK D., ŠIMŮNEK V., HÁJEK V., KRÁLÍČEK I. 2021. Mixed vs. monospecific mountain forests in response to climate change: structural and growth perspectives of Norway spruce and European beech. *Forest Ecology and Management*, 488: 119019. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119019
- 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.envman.2023.117353
- VAN STAN J.T., GORDON D.A. 2018. Mini-review: Stem flow as a resource limitation to near-stem soil. *Frontiers in Plant Science*, 9: 248. DOI: 10.3389/fpls.2018.00248
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2018. Tloušťkový přírůst smrku (*Picea abies* (L.) Karst.) a buku (*Fagus sylvatica* L.) ve stejnorodých a smíšených porostech. [The radial increments of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands]. *Zprávy lesnického výzkumu*, 63 (4): 272–280.
- VERRY E.S., TIMMONS D.R. 1977. Precipitation nutrients in the open and under two forests in Minnesota. *Canadian Journal of Forest Research*, 7: 112–119. DOI: 10.1139/x77-016
- VETTORI C., VENDRAMIN G.G., ANZIDEI M., PASTORELLI R., PAFFETTI D., GIANNINI R. 2004. Geographic distribution of chloroplast variation in Italian populations of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 109: 1–9. DOI: 10.1007/s00122-004-1609-9
- WAGNER S., COLLET C., MADSEN P., NAKASHIZUKA T., NYLAND R.D., SAGHEB-TALEBI K. 2010. Beech regeneration research: from ecological to silvicultural aspects. *Forest Ecology and Management*, 259 (11): 2172–2182. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.02.029
- WEBER P., BUGMANN H., PLUESS A.R., WALTHERT L., RIGLING A. 2013. Drought response and changing mean sensitivity of European beech close to the dry distribution limit. *Trees*, 27: 171–181. DOI: 10.1007/s00468-012-0786-4
- WILKENS J.F., SCHLICHT R., WAGNER S. 2023. Resource-based growth models reveal opportunities to mitigate climate change effects on beech regeneration by silvicultural measures. *Forest Ecology and Management*, 532: 120815. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.120815
- WÜHLISH G. VON 2008. EUFORGEN Technical guidelines for genetic conservation and use for European beech (*Fagus sylvatica*). Rome, Biodiversity International: 6 s.
- XIAO Q., MCPHERSON E.G. 2011. Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystems*, 14 (4): 755–769. DOI: 10.1007/s11252-011-0192-5
- ZACH P., HARZ B., KULFAN J., TOPP W., ZELINKOVÁ D., ANDERSON J. 2002. Dispersal of *Taphrorychus bicolor* (Coleoptera, Scolytidae): Males as more active dispersers and unsuccessful colonizations of the beetle on beech trees. *Ekológia – Bratislava*, 21: 152–158.
- ZOHNER C.M., MO L., SEBALD V., RENNER S.S. 2020. Leaf-out in northern ecotypes of wide-ranging trees requires less spring warming, enhancing the risk of spring frost damage at cold range limits. *Global Ecology and Biogeography*, 29 (6): 1065–1072. DOI: 10.1111/geb.13088

## THE SIGNIFICANCE OF EUROPEAN BEECH IN CENTRAL EUROPE IN THE PERIOD OF CLIMATE CHANGE: AN OVERVIEW OF CURRENT KNOWLEDGE

### SUMMARY

The importance of the European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe is indisputable in the context of ongoing global climate change. This comprehensive review of current knowledge shows that the European beech not only plays a pivotal role in the ecosystems of Central European forests as the dominant broadleaved species but also faces significant challenges due to climate change. Undoubtedly, extreme temperatures, droughts, and changes in water regimes, which are becoming more frequent and intense, are affecting the survival, growth, and regeneration of the European beech, requiring adaptation both from the trees themselves and from a forest management perspective.

The European beech reaches heights of 30–40 metres and even over 50 metres in optimal conditions, demonstrating its robustness and adaptability to different environmental conditions. This species, which can live for more than 250 years, has a remarkable long-term presence in European forests. It is characterised by alternating bifoliate leaves that span 5–10 cm, occasionally up to 15 cm with short 10–15 mm petioles that are hairy. The tree's reproductive strategy is highlighted by its wind-pollinated, separate male and female flowers on the same tree. Glossy brown seeds are enclosed in a woody, spiny capsule (Fig. 1). These seeds, which can be stored for up to five years, demonstrate the resilience of the species through its reproductive cycle. In addition, European beech's extensive root system, complemented by a rich network of root hairs, enhances its ameliorative capacity, thereby increasing its environmental value and ecological functionality.

Predominant in Central Europe and valued for its economic importance throughout the continent, the natural range of European beech covers more than 920,000 km<sup>2</sup>, from the southern reaches of Italy to the northern expanses of Norway, and from the western fringes of Spain to eastern Romania. This wide distribution, from lower altitudes in the north to up to 1000 m above sea level in the Apennine Peninsula, underlines the species' adaptability to a range of climatic conditions, from oceanic to central European continental climates. However, climate projections suggest an imminent shift in the distribution of European beech, possibly shrinking in southern areas and expanding northwards (Fig. 2), highlighting the urgent need for adaptive forest management strategies. Such adaptations are essential to maintain the genetic diversity and adaptive capacity of the species, thus ensuring the resilience of European beech in the face of climate change. As global temperatures rise and precipitation patterns shift, promoting mixed-species stands and improving habitat connectivity will be crucial to maintaining the role of European beech in European forestry and the ecosystem services it provides.

The European beech is characterised as a shade-tolerant broadleaved tree with a long lifespan, and the ability to reach old age. Due to its high representation, it contributes significantly to the provision of ecosystem services, such as oxygen production, carbon storage, soil protection, and biodiversity. The morphology of the beech allows the species to adapt to a wide range of conditions, and its root system and mycorrhizal associations help the tree to use water and soil resources efficiently.

The adaptive strategies of the European beech, including its regeneration capacity, stress tolerance and interactions with mycorrhizal fungi, are crucial for its ability to withstand climate-related stresses and maintain its ecosystem services. Research suggests that although the European beech is more sensitive to drought than other tree species, its adaptive capacity and high genetic variability may help it to adapt to climate change. However, the increasing frequency and intensity of extreme climate events may make this adaptation more difficult.

Therefore, it is crucial for forestry management in the Central European region to adapt its management strategies to reflect these challenges. Mixed forest stands, combining the European beech with other tree species, have proven to be an effective way to increase the resilience of forests to climate-related stresses while maintaining their productivity and biodiversity. Integrating research focused on the genetic diversity of the European beech and its interactions with the environment may also provide new approaches to adaptation and forest management.

Given the socio-economic importance of the European beech for forestry, the furniture industry, timber production, and other uses, research, forestry policy, and management practices need to be closely linked and responsive to the challenges associated with climate change. This review highlights the need for continued research and monitoring of the effects of changing environmental conditions on the European beech and the importance of adaptive management.

Zasláno/Received: 20. 02. 2024

Přijato do tisku/Accepted: 21. 03. 2024

