

SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu

WP B1 Odezva lesních ekosystémů na změnu klimatu

WA B1.1 Hodnocení stavu a ohrožení lesních ekosystémů, predikce vývoje

Predikce klimatického limitování přírůstu kmenové biomasy hlavních dřevin ČR v období 2030-2060

SS02030018-V15

Václav Trembl¹, Jan Tumajer¹, Michaela Lebedová¹, Jan Altman², Jiří Doležal², Monika Vejpustková³, Miloš Rydval⁴, Nela Altmanová², Lukáš Brůha¹, Vojtěch Čada⁴, Pavel Fibich², Ryszard Kaczka¹, Jakub Kašpar⁵, Tomáš Kolář⁶, Jan Krejza⁷, Jiří Mašek¹, Sergei Mikhailov⁷, Pavel Šamonil⁵, Michal Rybníček⁶, Marko Stojanovič⁷, Miroslav Svoboda⁴, Iva Vašíčková⁵

¹Univerzita Karlova

²Botanický ústav AV ČR, v. v. i.

³Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

⁴Česká zemědělská univerzita v Praze

⁵Výzkumný ústav pro krajinu, v. v. i.

⁶Mendelova univerzita

⁷Ústav globální změny AV ČR, v. v. i.

2025

**T A
Č R**

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz

Predikce klimatického limitování přírůstu kmenové biomasy hlavních dřevin ČR v období 2030–2060

SS02030018-V15

Specializovaná mapa s odborným obsahem

1. Úvod

Mění se klima postupně proměňuje sezónní růstovou dynamiku dřevin (Tumajer et al. 2025). Postupně může tak docházet k tomu, že se druhy posunují v rámci své klimatické niky k jejím okrajům, případně za její hranice a stanoviště se tak stávají pro konkrétní druh nevhodnými (Popa et al. 2025).

Lesní dřeviny poskytují důležité ekosystémové služby, zejména služby zásobovací (ekonomické) a služby regulační v rámci cyklu vody a ostatních biogeochemických cyklů (Forests Europe 2020). Zásadní proměnnou určující míru poskytování ekosystémových služeb je přírůst kmenové biomasy. Ten bezprostředně ovlivňuje jak bonitu lesních stanovišť, tak množství sekvestrovaného uhlíku z atmosféry a kapacitu bělové části dřeva odvádět vodu do atmosféry (Tyree et Zimmermann 2013). Biomasa kmene tvoří v průměru 70–80% celkové biomasy stromů a zhruba 30% ročního přírůstu biomasy stromu (Pallardy 2008). Velmi těsně korelovaným ukazatelem přírůstu kmenové biomasy jsou letokruhy, resp. přírůsty v ploše (Klesse et Bigler 2025). Přírůst kmenové biomasy je ovlivňován kompeticí, disturbancemi a dostupností zdrojů včetně zajištění tepelných podmínek pro fyziologické procesy a dostatku vody (Speer 2011). V lesích střední Evropy je intenzita kompetice a disturbancí ovlivňována souhrou antropogenních (hospodářská opatření) a přírodních událostí. Tepelné podmínky a dostupnost vody jsou hlavně řízeny meteorologickými faktory. Vliv meteorologických podmínek na růst dřevin se tradičně označuje termínem „klimatické limitování růstu“ (Fritts 1976). To je zpravidla nízké v oblastech klimatického optima výskytu dané dřeviny. Zde mají meteorologické faktory malý vliv na dlouhodobé trendy i meziroční variability přírůstu, dominuje vliv disturbancí a hospodářských zásahů. Naopak, na okrajích klimatické niky daného druhu je vliv meteorologických podmínek určující. Dynamika přírůstu a jeho meziroční variabilita i růstové trendy zde silně korelují s časovými řadami klimatických veličin. Z toho také vyplývá, že zatímco v oblasti klimatického optima je role lesnického managementu v moderování a usměrňování růstu zásadní, tak v blízkosti okrajů klimatické niky je zásadním řídicím faktorem klima a prostor pro podporu kmenového přírůstu managementovými zásahy je nižší.

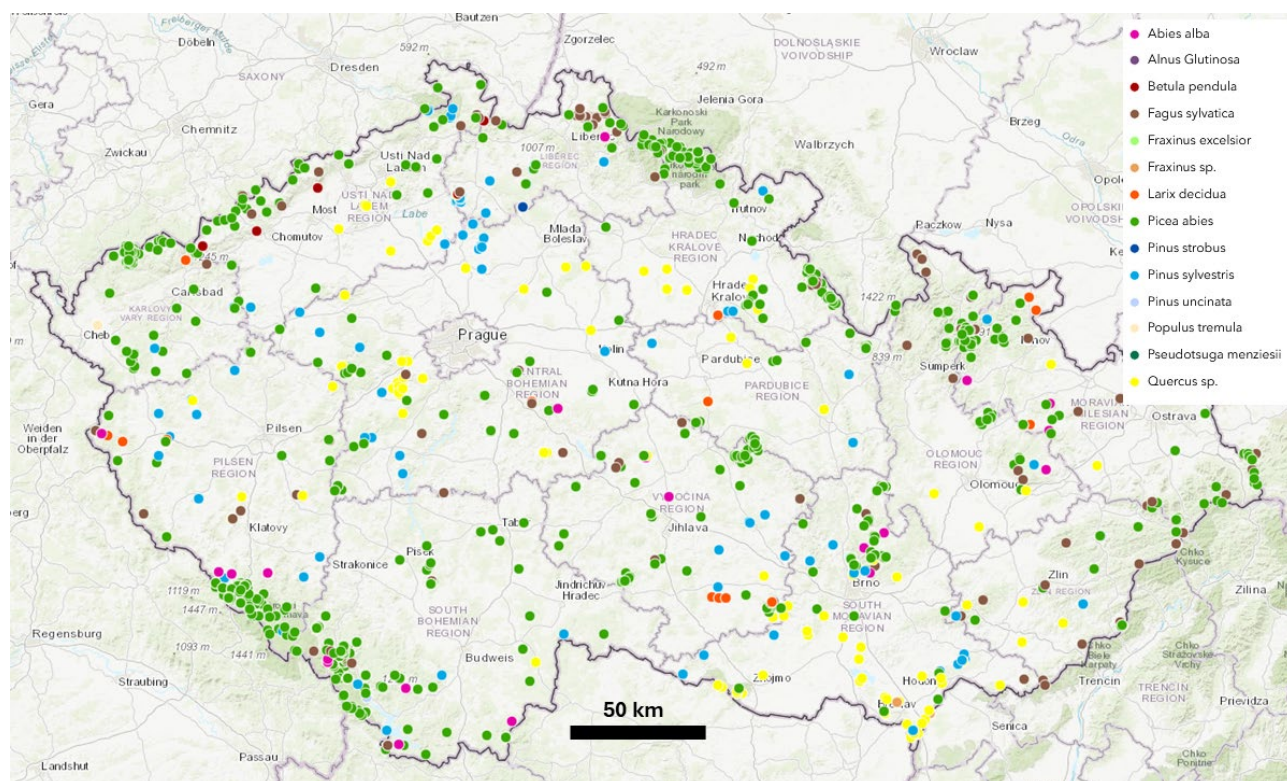
Výše uvedeného principu jsme využili při tvorbě map predikovaného klimatického limitování přírůstu kmenové biomasy pro roky 2030–2060. Termínem klimatické limitování označujeme část ročního přírůstu kmenové biomasy, která je řízena meteorologickými faktory, tj. část přírůstu statisticky neovlivnitelnou aktivními managementovými zásahy nebo disturbancemi. V rámci výstupu V14 byly kalibrovány modely závislosti míry klimatického limitování kmenového přírůstu na klimatické vodní bilanci 1990–2020. Tyto nakalibrované modely byly s určitými úpravami použity k predikci klimatického limitování přírůstu na základě modelové klimatické vodní bilance pro období 2030–2060.

2. Metodika

Sestavení růstových modelů

Hlavním zdrojem informací o meziroční růstové variabilitě a růstových trendech hlavních lesních dřevin byla databáze letokruhových sérií, která postupně vznikala od r. 2021 mj. v rámci projektu DivLand (Machová et al. 2024, Treml et al. 2025).

Z databáze bylo využito celkem 1210 lokalit s letokruhovými řadami (údaje celkem za 31 tis. Strom; Obr. 1). Lokality byly nejdříve filtrovány tak, že byla odstraněna extrémní stanoviště a silně vodou-ovlivněná stanoviště jejichž klimatický signál je do značné míry nezávislý na zonálním klimatu.



Obrázek 1. Přehled vstupních lokalit pro analýzu klimatického limitování přírůstu.

Letokruhové série byly na každém stanovišti konvertovány na přírůsty v ploše, které mají lepší vztah k přírůstu kmenové biomasy (Klesse et Bigler 2025). Velikostní/věkový trend přírůstu kmenové biomasy byl odstraněn pomocí využití proměnné kambiálního stáří jako prediktoru zobecněného aditivního modelu (Kašpar et al. 2024). Následně byla zprůměrováním všech sérií přírůstu kmenové biomasy na stanovišti vytvořena chronologie přírůstu kmenové biomasy.

Pro všechna stanoviště byly odvozeny časové řady teplot vzduchu a srážek v jednotlivých měsících roku. Ty pak představovaly spolu s chronologií přírůstu kmenové biomasy vstup do modelu VS-Lite, což je klimaticky řízený nelineární model kmenového přírůstu (Tolwinski-Ward a kol. 2011). Model byl nařizován pomocí iterací s nastavením v intervalu parametrů, tak aby byla získána co největší shoda mezi modelem a pozorováním (chronologie). Míra shody byla vyjádřena jako koeficient determinace (R^2). Koeficient determinace vyjadřuje, jak silný je vztah růstu dřeviny ke klimatu a jaká část přírůstu je naopak klimaticky nelimitovaná. Výhodou modelu VS-Lite je, že dokáže zachytit nelineární odezvu růstu na prahové hodnoty klimatických proměnných a jejich interakce.

V dalším kroku byly koeficienty determinace pro jednotlivé druhy dřevin predikovány do plochy pro území České republiky pomocí zobecněného aditivního modelu. Do modelu vstupovala klimatická vodní bilance území 1990-2020 reprezentující klimatický gradient a dále hlavní komponenty půdního chemismu reprezentující gradienty mezi kyselými a zásaditými půdami (PC1), půdami bohatými a chudými na fosfor (PC2; Treml et al. 2025), topografický vlhkostní index a polohové proměnné (zeměpisná šířka a délka).

U modelu byly implicitně nastaveny 3 stupně volnosti umožňující simulovat unimodální reakci na environmentální podmínky (podmínky s optimem v centrální části gradientu). Model měl následující strukturu:

$$R^2 = s(\text{CWB}) + \text{TWI} + \text{PC1} + \text{PC2} + \text{Lat} + \text{Lon},$$

kde R^2 klimatické limitování kmenového přírůstu, CWB klimatická vodní balance, TWI topografický vlhkostní index, PC1 první hlavní komponenta pedochemie, PC2 druhá hlavní komponenta pedochemie, Lat zeměpisná šířka a Lon zeměpisná délka.

Predikce míry klimatického limitování přírůstu 2030-2060

Nafitované prostorové modely z výstupu V14 byly následně použity pro predikci míry klimatického limitování kmenového přírůstu pro období 2030–2060 na základě změněné klimatické vodní balance. Tato změněná klimatická vodní balance byly spočtena na základě výstupů modelu ALADIN-CLIMATE a scénáře RCP 4.5. Pro dřeviny, které jsou soustředěny v teplejší a sušší části našeho území (duby, borovice lesní) byla kalibrace na současných datech (1990–2020) provedena znovu s přidáním teplejších a sušších lokalit z jihu Slovenska, tak aby se snížila plocha území, kde bude predikováno mimo kalibrační interval klimatické vodní balance. Následně byly opět vytvořeny mapy jak v kontinuální, tak reklasifikované podobě (Tab. 1). Hodnoty hranic intervalů R^2 byly stanoveny arbitrárně na základě rozložení dat a na základě typické síly klimatického signálu. $R^2 = 0,0,5$ je silný klimatický signál na okraji klimatické niky druhu, hodnoty R^2 0,1–0,25 jsou prakticky nejběžnější hodnoty klimatického limitování v lokalitách blízkých klimatickému optimu druhů.

Navíc byly vytvořené mapy změnové zachycující rozdíl v míře klimatického limitování mezi obdobími 1990–2020 a 2030–2060. Změnové mapy byly rovněž vytvořeny v reklasifikované podobě v kategoriích „beze změny“ (nesignifikanční změna klimatického limitování), „výrazný nárůst klimatického limitování“ a „výrazný pokles klimatického limitování“ kmenového přírůstu (v obou případech změna $|R^2| > 0,15$).

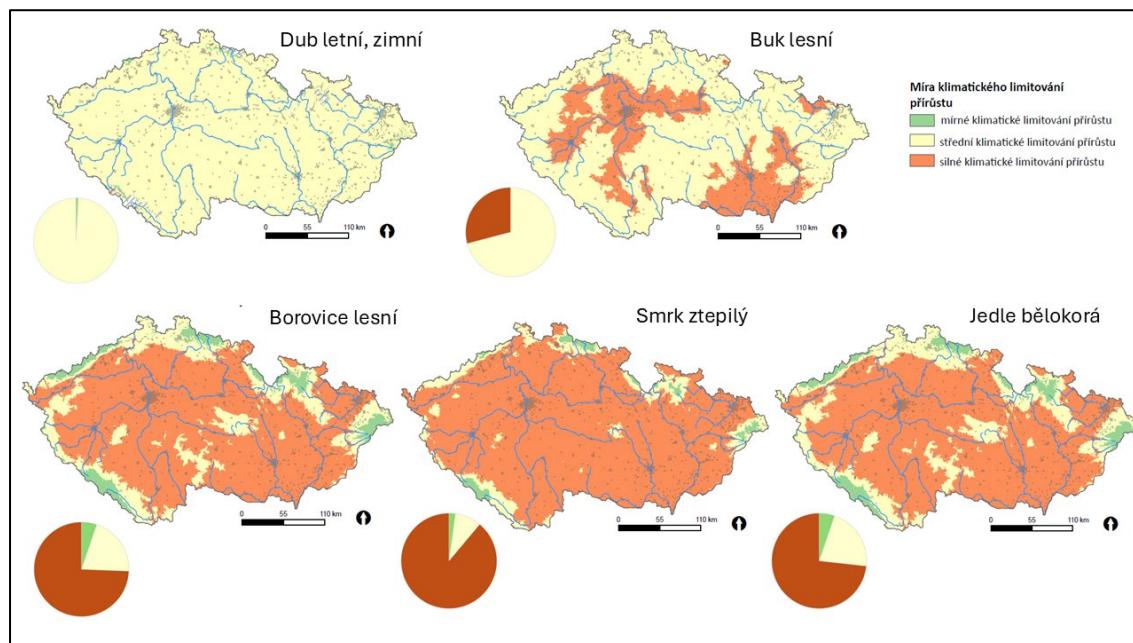
Celkem bylo v rámci výstupu V15 vytvořeno 20 map (mapy stavu a změnové mapy, 5 druhů, mapy s kontinuální škálou, mapy s kategoriální reklasifikovanou škálou). Barevná stupnice kontinuálních map byla koncipována tak, aby byly mapy porovnatelné s mapami vzniklými v rámci výstupu V14 (mapy stavu 1990–2020).

Tabulka 1. Hodnoty reklasifikovaných kategorií klimatického limitování kmenového přírůstu.

Kategorie	Rozmezí R^2
Slabé klimatické limitování	< 0,25
Střední klimatické limitování	0,25–0,5
Silné klimatické limitování	> 0,5

3. Výsledky

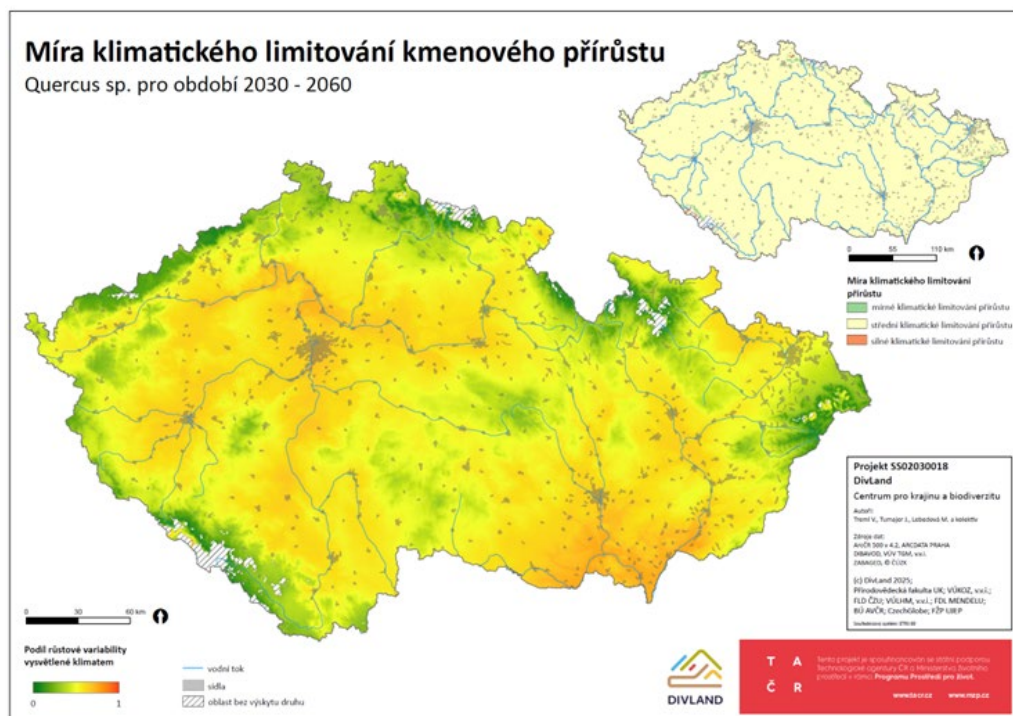
Z hlediska zastoupení jednotlivých kategorií klimatického limitování v období 2030–2060 vykazují všechny jehličnany určitý podíl území s predikovaným nejnižším klimatickým stresem, a to v nejvyšších polohách okrajových pohoří, o velikosti zhruba 5–10% území (Obr. 2). Všechny jehličnany ale také vykazují vysoký podíl území s nejvyšší intenzitou klimatického limitování přírůstu, a to v rozsahu od 82 % (smrk) po 70 % (jedle, borovice). Listnáče jsou buď téměř výlučně (duby) nebo z velké části v kategoriích středního klimatického limitování přírůstu (Obr. 2). V nejnižších polohách zhruba pod 300 m n. m. vykazují všechny druhy kromě dubů silné klimatické limitování přírůstu.



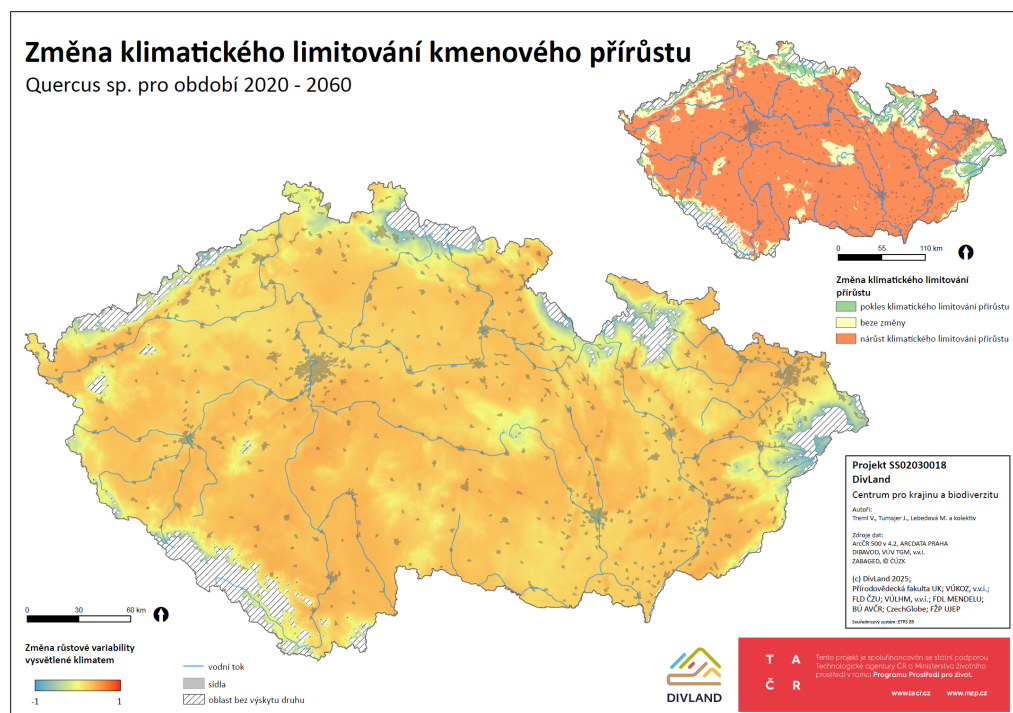
Obrázek 2. Porovnání plošného zastoupení jednotlivých kategorií intenzity klimatického limitování kmenového přírůstu v období 2030–2060. Koláčové grafy ukazují podíly území v jednotlivých kategoriích klimatického limitování přírůstu.

Dub letní a zimní

Maximální hodnoty klimatického limitování přírůstu jsou predikovány na jižní Moravě ($R^2 > 0,7$). Naopak, nejnižší míru klimatického limitování vykazují vyšší nadmořské výšky 700–900 m n. m. ($R^2 < 0,3$; Obr. 3). Změnové mapy pak ukazují celkový nárůst klimatického limitování kmenového přírůstu s výjimkou středních nadmořských výšek (600–800 m n. m.), kde byl stav stabilní a nejvyšších poloh (ca nad 800 m n. m.), kde se klimatické limitování kmenového přírůstu snížilo (Obr. 4).



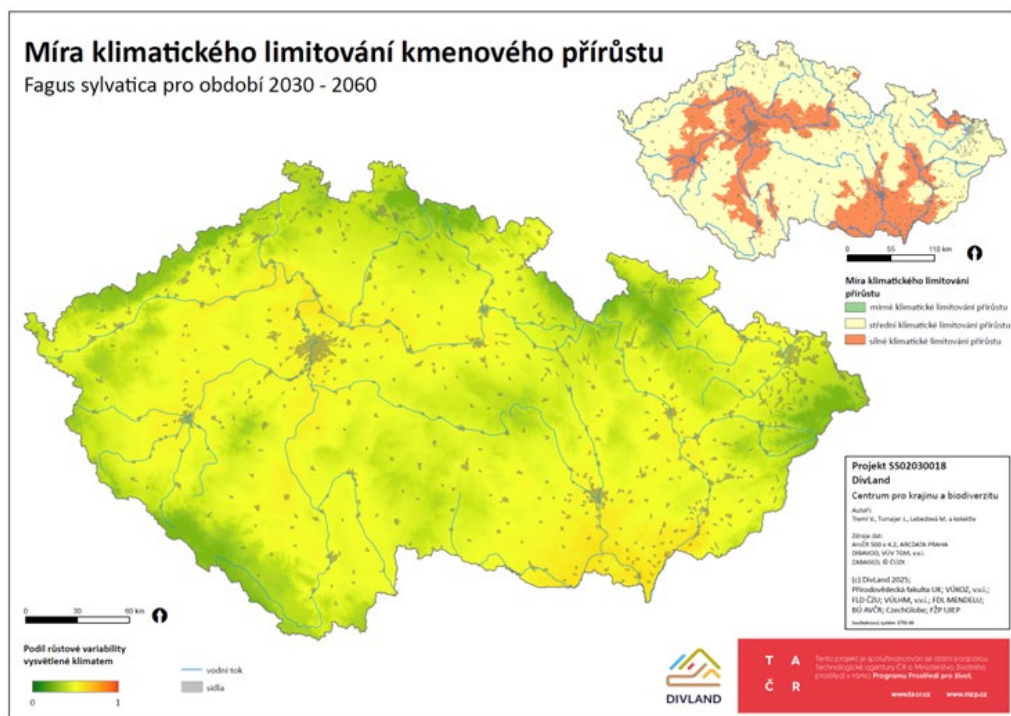
Obrázek 3. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu dubu letního a zimního 2030–2060.



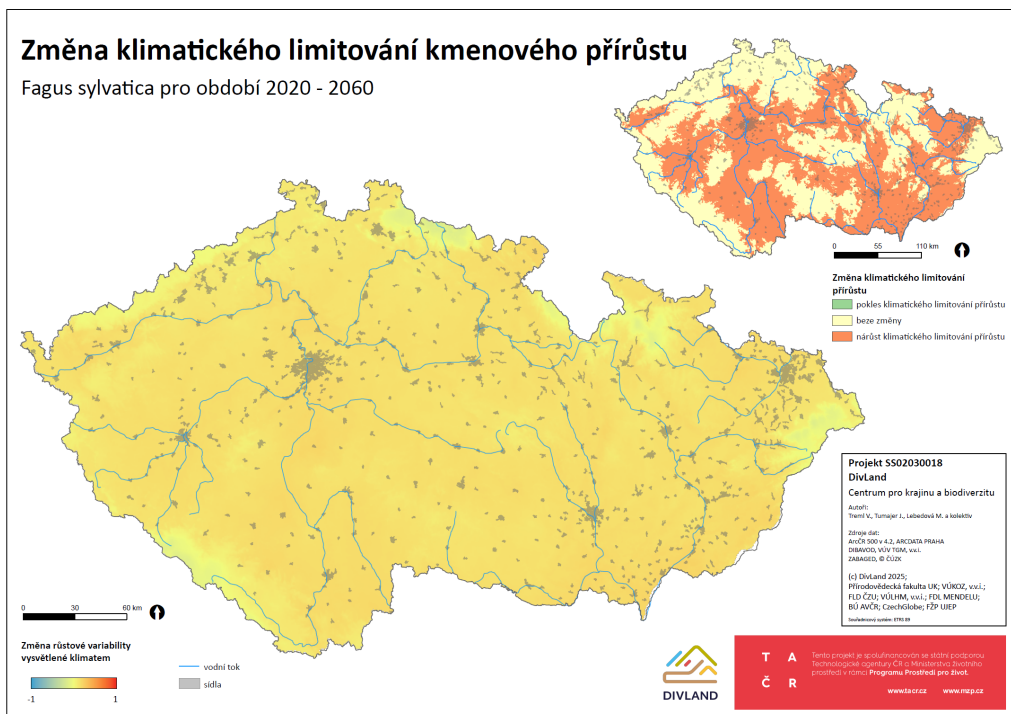
Obrázek 4. Mapa změn klimatického limitování kmenového přírůstu dubu letního a zimního mezi obdobími 1990–2020 a 2030–2060.

Buk lesní

Buk vykazuje relativně nejnižší míru klimatického limitování přírůstu v horských oblastech nad 1000 m n. m. ($R^2 < 0,27$). Nejvyšší míra klimatického limitování kmenového přírůstu je predikována v oblasti jižní Moravy ($R^2 > 0,55$; Obr. 5). Změnová mapa ukazuje na relativně nejmenší změnu klimatického limitování přírůstu v porovnání s ostatními druhy (Obr. 6). Převažuje mírný nárůst, největší v nejnižších polohách. V nejvyšších polohách je pozorován mírný pokles klimatického limitování kmenového přírůstu (Obr. 6).



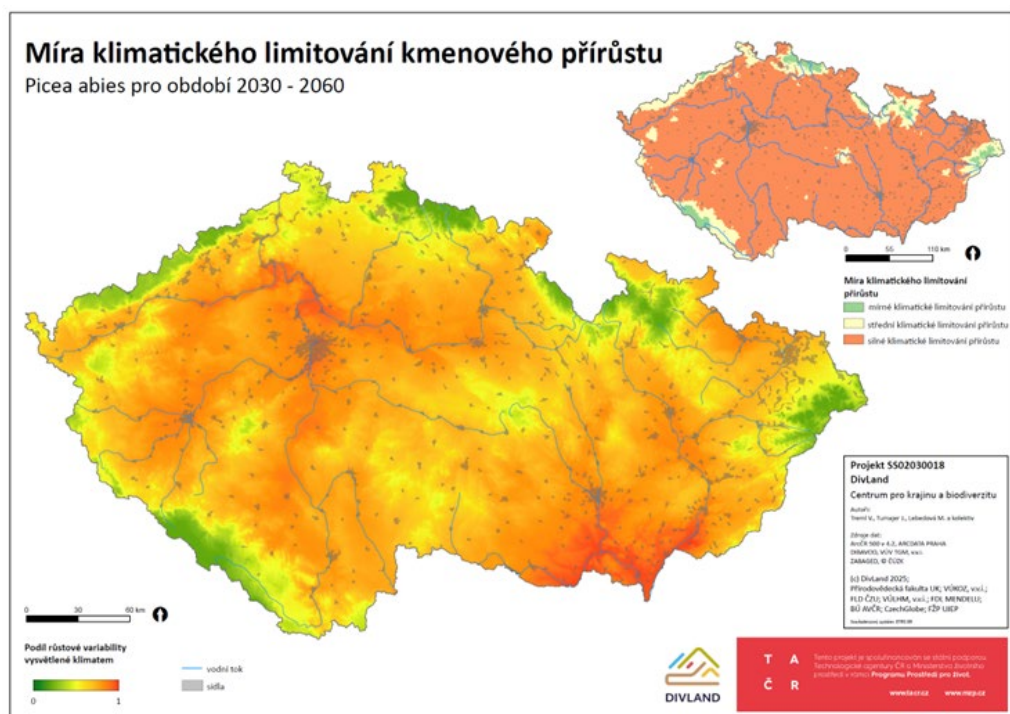
Obrázek 5. Mapa predikovaného klimatického limitování kmenového přírůstu buku lesního 2030-2060.



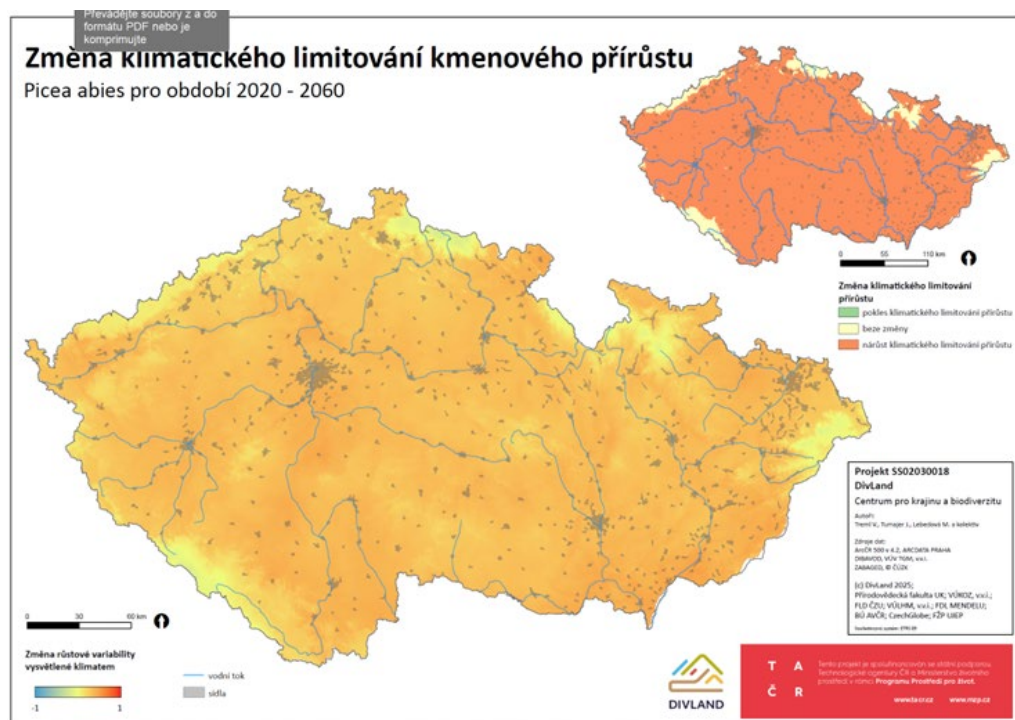
Obrázek 6. Mapa změn klimatického limitování kmenového přírůstu buku lesního mezi období 1990-2020 a 2030-2060.

Smrk ztepilý

Pro smrk se predikované klimatické limitování kmenového přírůstu v nejteplejších oblastech blíží 1, což jsou podmínky pravděpodobně vylučující jeho dlouhodobé přežívání na běžných stanovištích (Obr. 7). Oblasti s nejnižším klimatickým limitováním se nachází v nejvyšších polohách Krkonoš, Jeseníků, Šumavy a Beskyd ($R^2 < 0,25$). Změnová mapa ukazuje plošně převažující silný nárůst klimatického limitování (Obr. 8). Výjimkou jsou nejvyšší horské oblasti, kde dochází k poklesu.



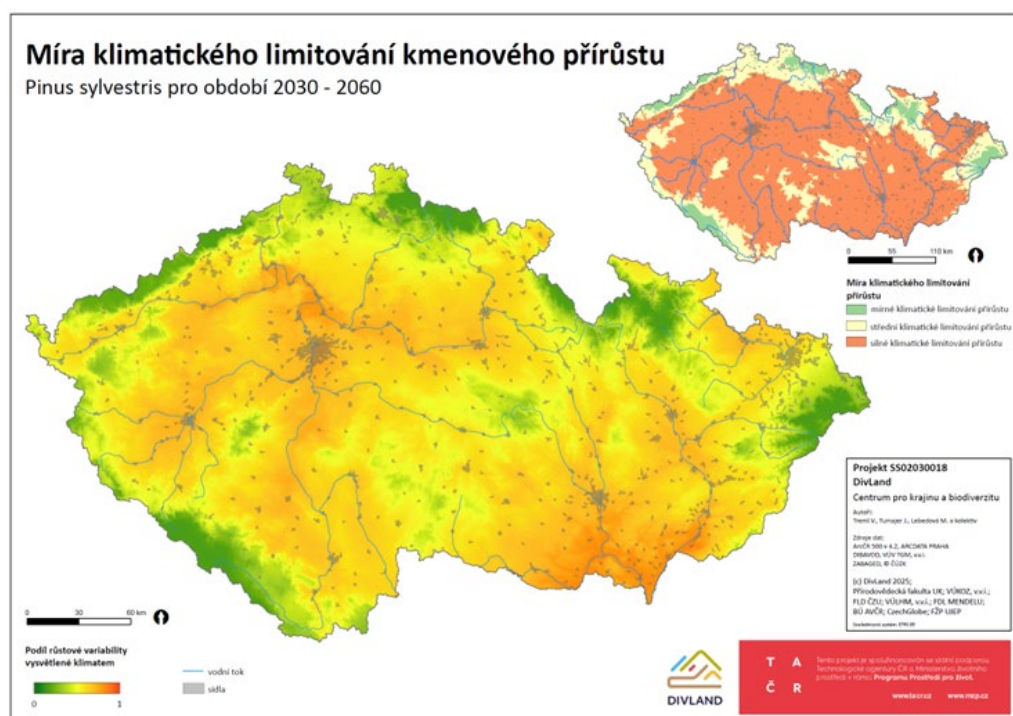
Obrázek 7. Mapa predikovaného klimatického limitování kmenového přírůstu smrku ztepilého 2030–2060.



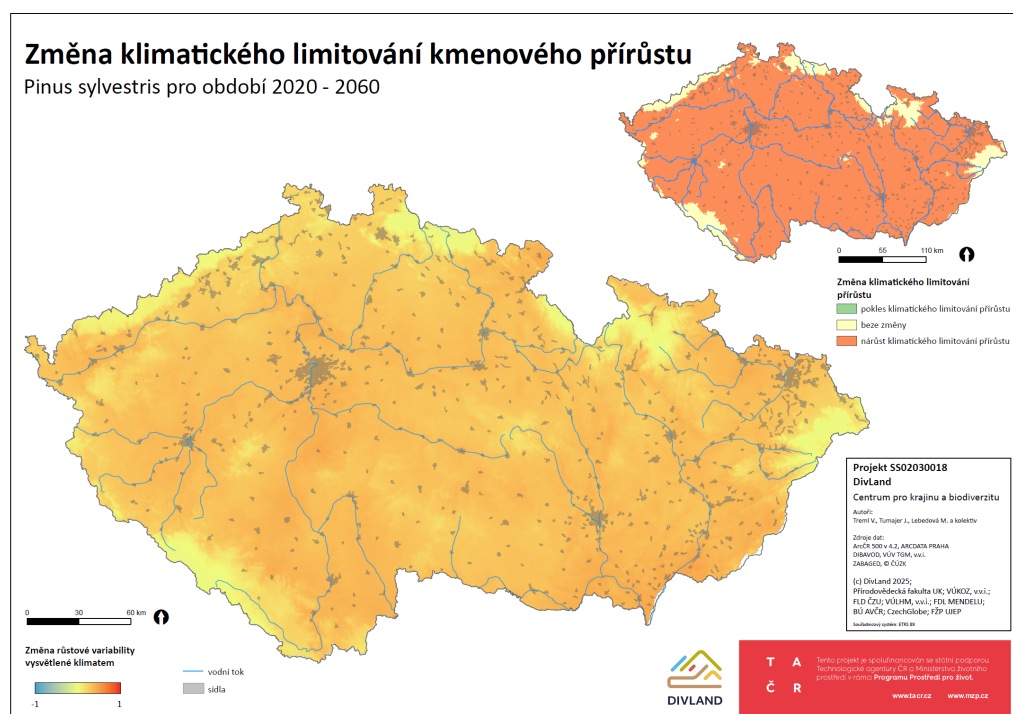
Obrázek 8. Mapa změn klimatického limitování kmenového přírůstu smrku ztepilého mezi obdobími 1990–2020 a 2030–2060.

Borovice lesní

Pro borovici se oblasti s nejvyšším klimatickým limitováním přírůstu nachází na jižní Moravě ($R2 > 0,80$; Obr. 9). Veškerá území pod ca 500 m n. m. ukazují predikované $R2 > 0,5$. Nejnížší klimatické limitování kmenového přírůstu je v nadmořských výškách nad 800 m n. m. ($R2 < 0,25$). Změnová mapa ukazuje na celkový výrazný nárůst klimatického limitování kmenového přírůstu, zpravidla v rozmezí +0,2–0,5 s výjimkou poloh nad ca 800 m n. m. (Obr. 10).



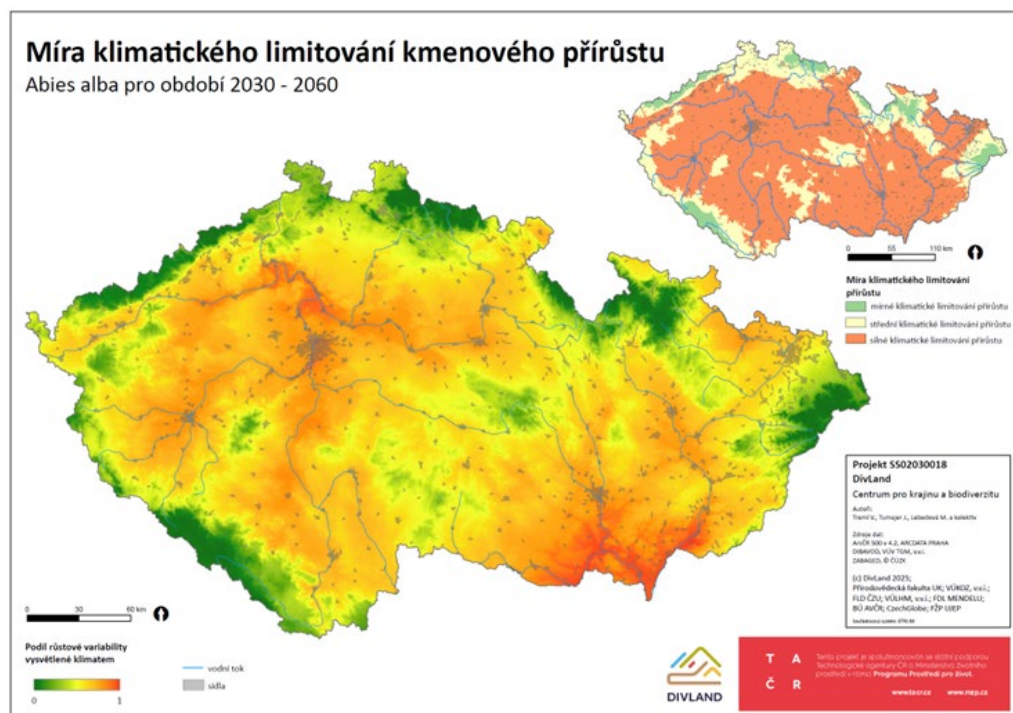
Obrázek 9. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu borovice lesní v období 2030–2060.



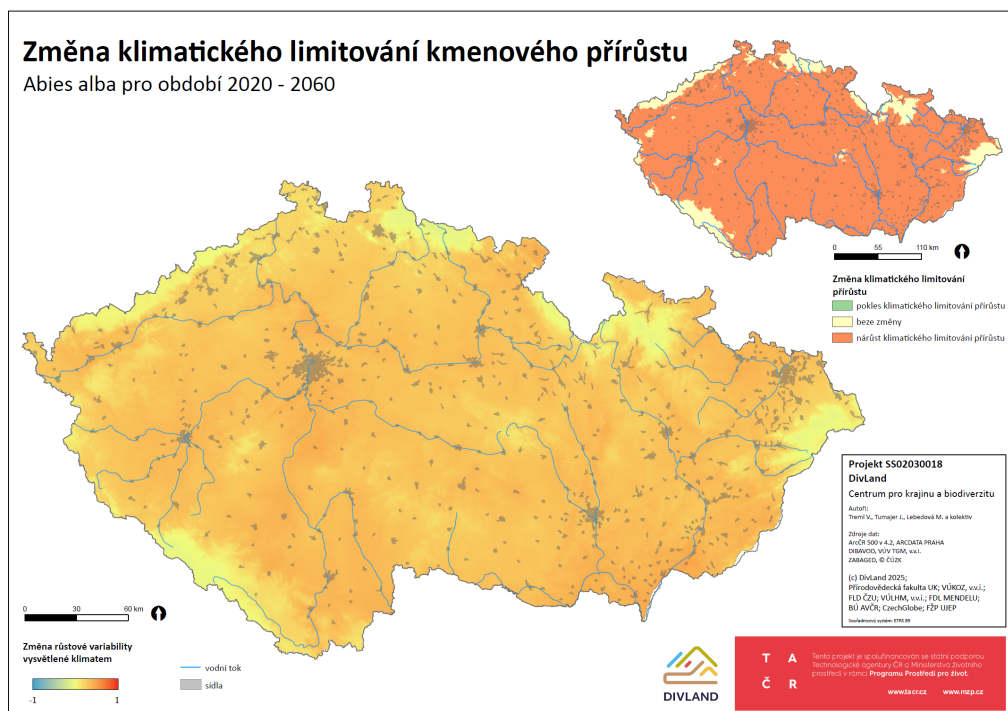
Obrázek 10. Mapa změn klimatického limitování kmenového přírůstu borovice lesní mezi obdobími 1990-2020 a 2030-2060.

Jedle bělokorá

Oblasti s nejvyšším klimatickým limitováním přírůstu jedle bělokoré se nachází na jižní Moravě, v Polabí a v dolním Poohří ($R^2 > 0,80$; Obr. 11). Nejnižší klimatické limitování přírůstu je v nadmořských výškách nad 900 m n. m. ($R^2 < 0,20$). Změnová mapa naznačuje celkové zesílení klimatického limitování přírůstu o 0,2–0,4 s výjimkou horských oblastí nad ca 800 m n. m. (Obr. 12).



Obrázek 11. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu jedle bělokoré v období 2030–2060.



Obrázek 12. Mapa změn klimatického limitování kmenového přírůstu jedle bělokoré mezi obdobími 1990–2020 a 2030–2060.

4. Dostupnost a doporučení využití výstupu

Mapy jsou k dispozici ve formátu geotiff na webovém serveru projektu. Mapy přináší plošnou generalizovanou informaci o tom, jak silný bude vliv klimatických podmínek na kmenový přírůst dřevin v období 2030–2060. Z toho rovněž vyplývá informace, v jakých oblastech bude prostor pro aktivní hospodářské usměrňování kmenového přírůstu a v jakých oblastech bude kmenový přírůst řízen dominantně meteorologickými faktory. Mapy ukazují, že lze očekávat výrazný nárůst území, kde bude růst dominantně řízen klimatickými podmínkami stanoviště s malým potenciálem pro aktivní hospodaření, a to zejména v případě smrku ztepilého, a následně s určitým odstupem pro borovici lesní a jedli bělokorou. Menší nárůst plochy takových území je predikován pro buk lesní a nejmenší pro duby. Využití map je zamýšleno společně – s výstupem V14 (mapy současného stavu) a změnovými mapami, které ukazují intenzitu nárůstu limitujícího vlivu klimatických podmínek na kmenový přírůst. Mapy jsou podkladem pro koncepční rozhodování ohledně druhové skladby lesa.

5. Citovaná literatura

Forests Europe 2020, *State of Europe's Forests* 2020.

Fritts, H.C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press.

Kašpar, J., Tumajer, J., Altman, J., Altmanová, N., Čada, V., Čihák, T., Doležal, J., Fibich, P., Janda, P., Kaczka, R., Kolář, T., Lehejček, J., Mašek, J., Hellebrandová, K., Rybníček, M., Rydval, M., Shetti, R., Svoboda, M., Šenfeldr, M. ... Tremł, V. (2024). Major tree species of Central European forests differ in their proportion of positive, negative, and nonstationary growth trends. *Global Change Biology*, 30, e17146.

Klesse, S., Bigler, Ch. 2025. Growth trends in basal area increments: The underlying problem, consequences for research and best practices. *Dendrochronologia* 90, 126296.

Machová, D., Kašpar, J., Kolář, T., Rybníček, M., Svoboda, M., Šamonil, P., Tremł, V., Tumajer, J., Vašíčková, I., Vejpusťková, M., Brůha, L. (2024): Spatial patterns in recent forest growth trends across the Czech Republic. *Journal of Maps*, 20(1).

Pallardy S. 2008. *Physiology of Woody Plants* 3rd ed. Academic Press.

Popa, A., J. Jevšenak, M. Dyderski, et al. 2025. Spatiotemporal Variability of Dendroecological Indicators in Pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) Tree-Rings Across Europe in Relation to Species Distribution Models. *Global Change Biology* 31, 11: e70567.

Speer J.H. (2011) *Fundamentals of Tree-Ring Research*. University of Arizona Press.

Thrippleton, T., Temperli, C., Krumm, F. et al. (2023) Balancing disturbance risk and ecosystem service provisioning in Swiss mountain forests: an increasing challenge under climate change. *Reg Environ Change* 23, 29.

Tolwinski-Ward, S.E., Evans, M.N., Hughes, M.K., Anchukaitis, K.J., 2011. An efficient forward model of the climate controls on interannual variation in tree-ring width. *Climate Dynamics* 36, 2419–2439.

Tremł, V., Tumajer, J., Oulehle, F., Altman, J., Doležal, J., Vejpusťková, M., Rydval, M., Altmanová, N., Brůha, L., Čada, V., Fibich, P., Kaczka, R., Kašpar, J., Kolář, T., Krejza, J., Mašek, J., Mikhailov, S., Šamonil, P., Rybníček, M., Stojanović, M., Svoboda, J., Svoboda, M., Vašíčková, I., (2025). Rapid trend towards larger and more moisture-limited trees in Central-European temperate forests. *Environmental Research Letters* 20, 084033

Tumajer, J., Kašpar, J., Altman, J., Altmanová, N., Camarero, J. Julio, Cienciala, E., Čada, V., Čihák, T., Doležal, J., Fibich, P., Janda, P., Kaczka, R., Kolář, T., Lehejček, J., Mašek, J., Matula, R., Hellebrandová, K. N., Plavcová, L., Rybníček, M., Rydval, M., Shetti, R., Svoboda, M., Šenfeldr, M., Šamonil, P., Vašíčková, I., Vejpusťková, M., Tremł, V. (2025). Longer growing seasons will not offset growth loss in drought-prone temperate forests of Central-Southeast Europe. *Nature Communications* 16, 9535

Tyree, M.T., Zimmermann, M.H. 2013. *Xylem Struktura and the Ascent of Sap*, 3rd edition, Springer.