

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

Klimatické limitování přírůstu kmenové biomasy hlavních dřevin v období 1990-2020

SS02030018-V14

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

Klimatické limitování přírůstu kmenové biomasy hlavních dřevin v období 1990–2020

SS02030018-V14

Specializovaná mapa s odborným obsahem

1. Úvod

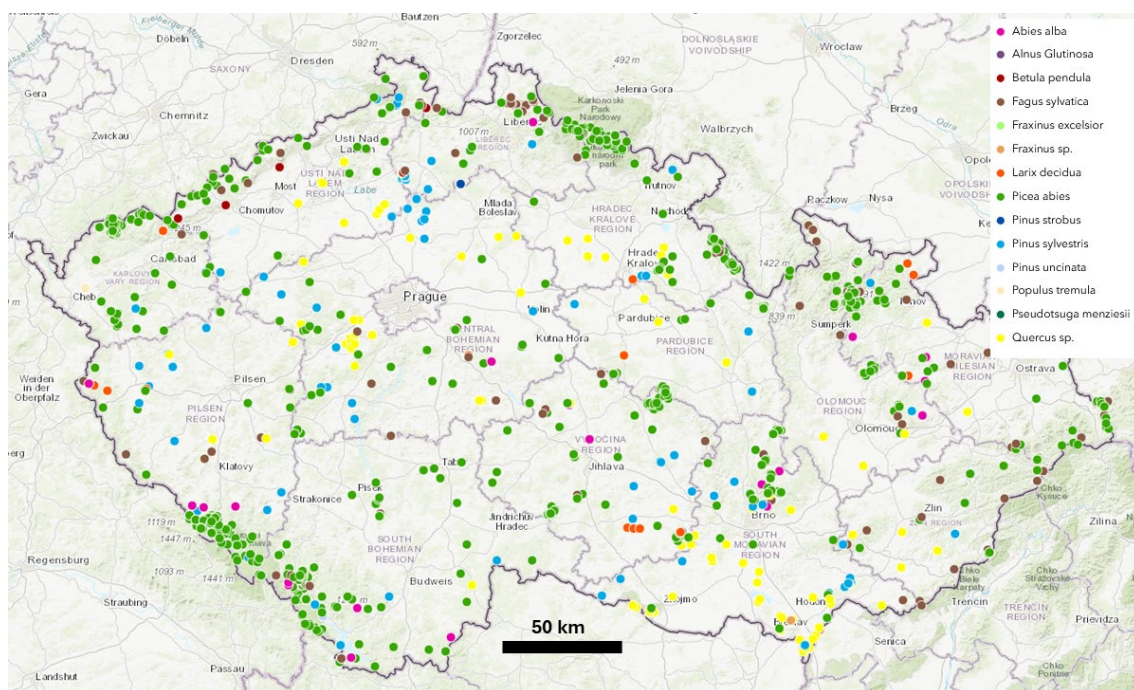
Lesní dřeviny poskytují důležité ekosystémové služby, zejména služby zásobovací (ekonomické) a služby regulační v rámci cyklu vody a ostatních biogeochemických cyklů (Forests Europe 2020). S klimatickou změnou se schopnost dřevin poskytovat tyto služby proměňuje, a to v závislosti na druhovém složení lesa a environmentálních gradientech (Thrippleton et al. 2023 Reg Env Ch). 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 zpravidla ovlivňována souhrou antropogenních (hospodářská opatření) a přírodních událostí. Tepelné podmínky a dostupnost vody je hlavně řízena meteorologickými podmínkami. Vliv meteorologických podmínek na růst dřevin se tradičně označuje termínem „klimatické limitování růstu“ (Fritts 1976). To je typicky 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 většinou vliv meteorologických podmínek určující pro dynamiku přírůstu a meziroční variabilita i růstové trendy 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 klimatického limitování přírůstu kmenové biomasy. Termínem klimatické limitování označujeme část ročního přírůstu kmenové biomasy, která je řízena meteorologickými faktory, tj. část přírůstu statisticky neovlivnitelnou aktivními managementovými zásahy nebo disturbancemi.

2. Metodika

Použitá data

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. stromů; 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.

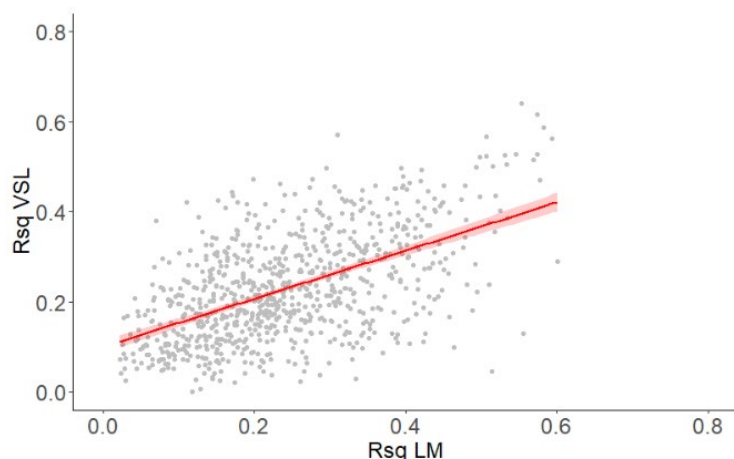


Obrázek 1. Přehled vstupních lokalit pro analýzu klimatického limitování přírůstu.

Letokruhové série byly na každém stanovišti konvertovány na přírůsty v ploše (mají lepší vztah 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 nabitován pomocí iterací s nastavením v intervalu parametrů, tak aby byla získána co největší shoda mezi modelem a pozorováním (chronologie přírůstu v ploše). 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.

Alternativně byly pro každé stanoviště nabitovány ještě lineární modely popisující dynamiku přírůstu v závislosti na měsíčních klimatických proměnných. Opět byl model sestaven tak, aby měl co nejvyšší shodu s pozorováním (R^2) a zároveň byla omezena kolinearita vysvětlujících proměnných. Následně byly parametry shody obou typů modelů porovnány (Obr. 2). Koeficienty determinace byly podobné, což ukazuje na robustnost našeho přístupu.



Obrázek 2. Porovnání dosažených koeficientů determinace lineárních modelů a modelu VS-Lite.

V dalším kroku byly koeficienty determinace pro jednotlivé druhy dřevin predikované pro plochu 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; Tremli et al. 2025), topografický vlhkostní index a polohové proměnné (zeměpisná šířka a délka). U modelů 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 je míra klimatického limitování přírůstu kmenové biomasy, CWB klimatická vodní bilance, TWI topografický vlhkostní index, PC1 první hlavní komponenta pedochemie, PC2 druhá hlavní komponenta pedochemie, Lat zeměpisná šířka a Lon zeměpisná délka.

Na základě nafitovaného modelu byly pak hodnoty koeficientu determinace plošně znázorněny pro území České republiky. V některých případech byla predikce koeficientu omezena jen na část environmentálního gradientu, který je pokryt daty (dub letní a zimní). Hodnoty koeficientu determinace byly pro názornost ještě alternativně reklasifikovány do následujících kategorií: slabé klimatické limitování, střední klimatické limitování a silné klimatické limitování (Tab. 1). Hranice intervalů hodnot R^2 byly stanoveny arbitrárně na základě rozložení dat a na základě typické síly klimatického signálu. $R^2 = 0,5$ 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.

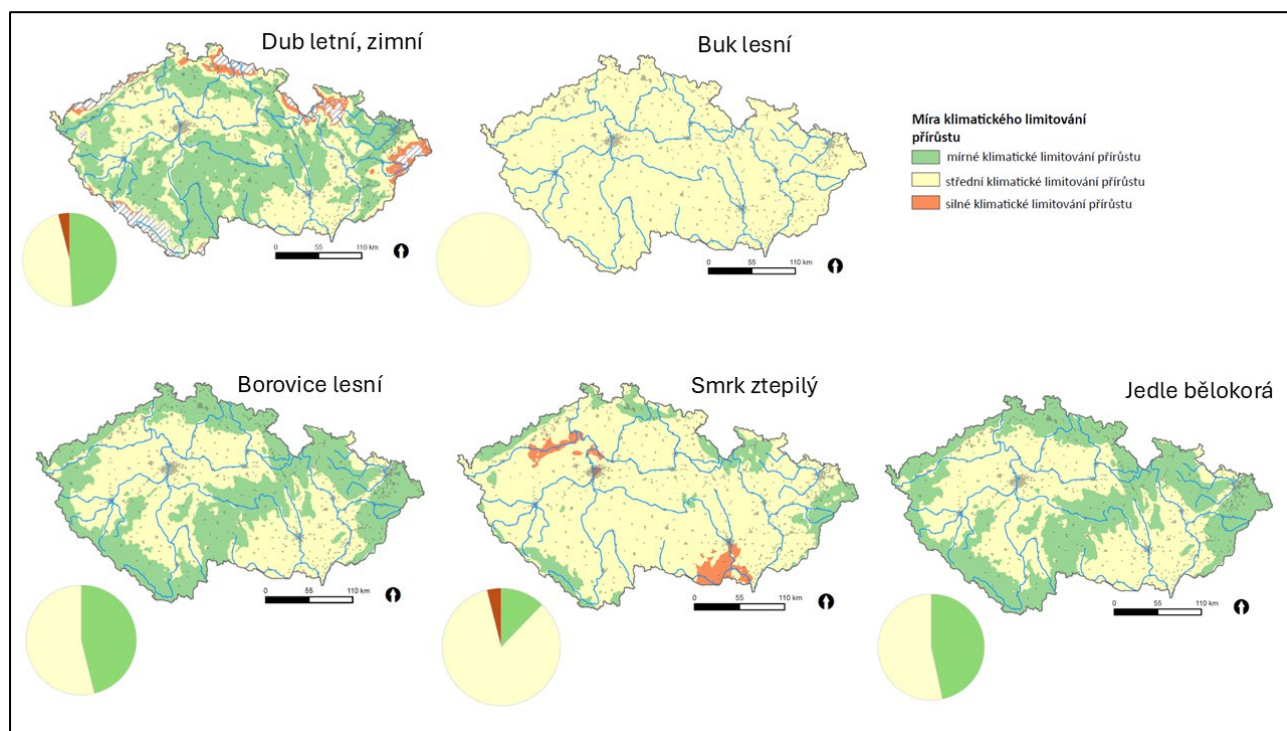
Tabulka 1. Hodnoty kategorií klimatického limitování kmenového přírůstu.

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

Celkem bylo v rámci výstupu V14 vytvořeno 10 map (5 druhů, alternativně s kontinuální škálou a kategoriální mapy s reklasifikovanou stupnicí). Barevná stupnice kontinuálních map byla koncipována tak, aby byly mapy porovnatelné s mapami vzniklými v rámci výstupu V15 (predikční mapy).

3. Výsledky

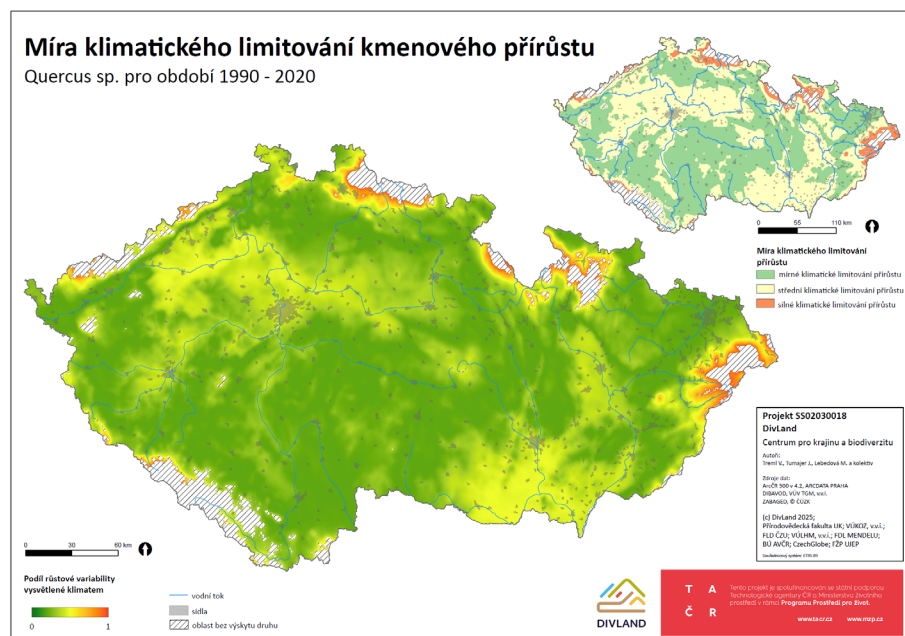
Z hlediska zastoupení jednotlivých kategorií klimatického limitování v současnosti vykazuje celkově nejvyšší podíl ploch s nejnižším klimatickým stresem duby a další dřeviny v následujícím pořadí: jedle bělokorá, borovice lesní, smrk ztepilý, buk lesní (Obr. 3). Dřeviny s nejvyšším podílem ploch se silným klimatickým limitováním přírůstu jsou smrk ztepilý (nízké polohy) a duby (vysoké polohy).



Obrázek 3. Porovnání plošného zastoupení jednotlivých kategorií intenzity klimatického limitování kmenového přírůstu. Koláčové grafy ukazují zastoupení jednotlivých kategorií.

Dub letní a zimní

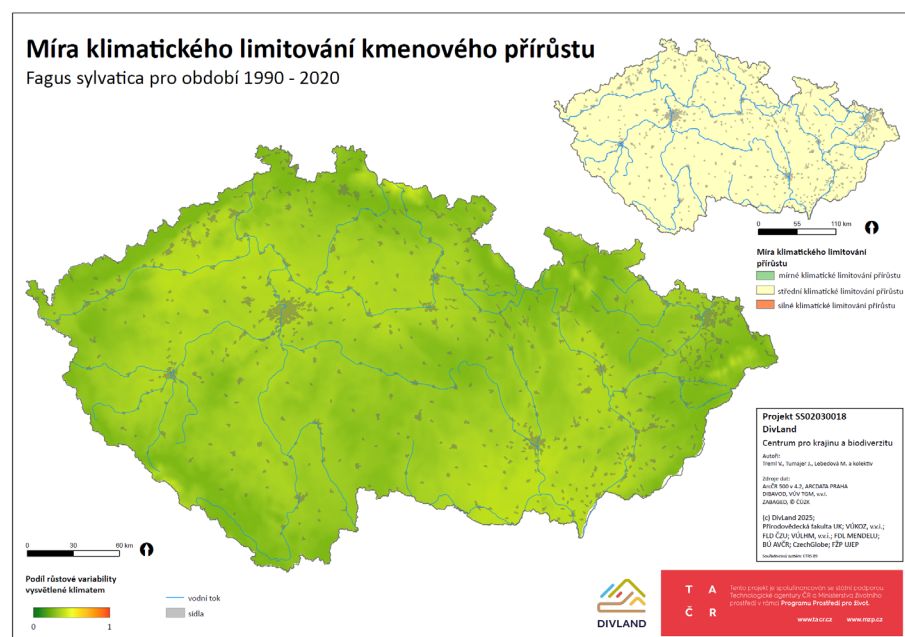
Modely pro dub letní a zimní byly vytvořeny na základě 67 lokalit (1870 stromů). Maximální hodnoty klimatického limitování přírůstu byly dosaženy v nejvyšších nadmořských výškách (800–1000 m n. m., $R^2 = 0,8$), nejnižší pak v polohách mezi 300 a 500 m n. m. ($R^2 = 0,2$). Plošně nejrozsáhlejší oblasti s nízkým klimatickým limitováním přírůstu se nachází zejména v jižních a středních Čechách a na severní Moravě.



Obrázek 4. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu dubu letního a zimního.

Buk lesní

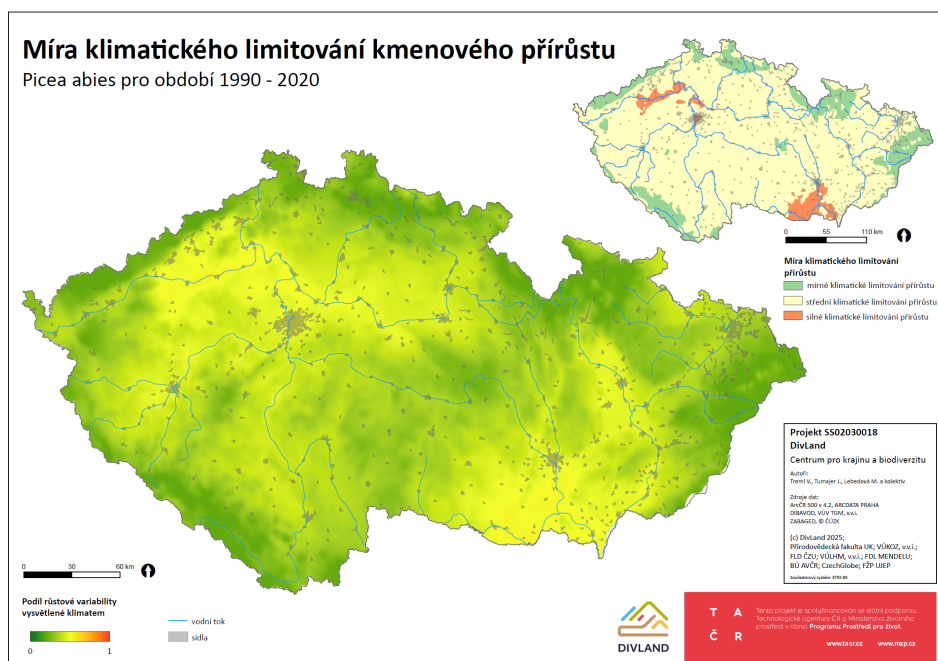
Modely pro buk lesní byly vytvořeny na základě 212 lokalit (5512 stromů). Buk vykazuje relativně nejплоší reakci ke klimatické vodní bilanci s pesimem v nejteplejších regionech a v nechládnějších regionech ($R^2 = 0,46$) a optimem v nadmořských výškách kolem 600 m ($R^2 = 0,25$). Největší plochy s oblastmi s nejnižším klimatickým limitováním jsou v nižších polohách všech okrajových pohoří a na Českomoravské vrchovině.



Obrázek 5. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu buku lesního.

Smrk ztepilý

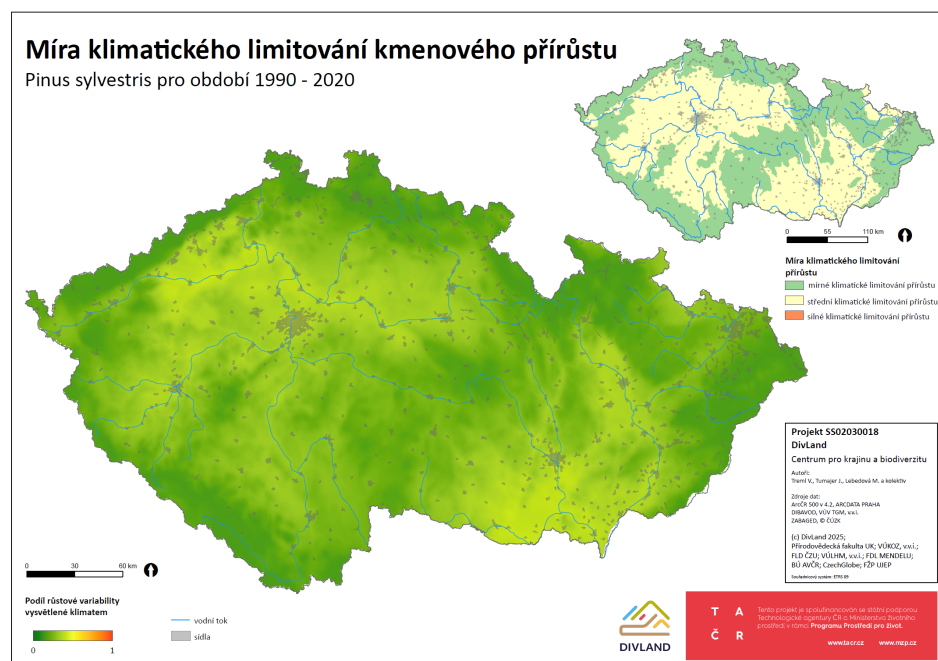
Modely pro smrk ztepilý byly vytvořeny na základě 521 lokalit (16 670 stromů). Oblasti s největším klimatickým limitováním se nachází v nejsušších a nejteplejších regionech ($R^2 = 0,55$, dolní Poohří, jižní Morava). Naopak oblasti s nejnižším klimatickým limitováním se nachází v nadmořských výškách kolem 800 m zejména v okrajových pohořích ($R^2 = 0,20$, Šumava, Jizerské hory a Krkonoše, Orlické hory, Jeseníky a Beskydy).



Obrázek 6. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu smrku ztepilého.

Borovice lesní

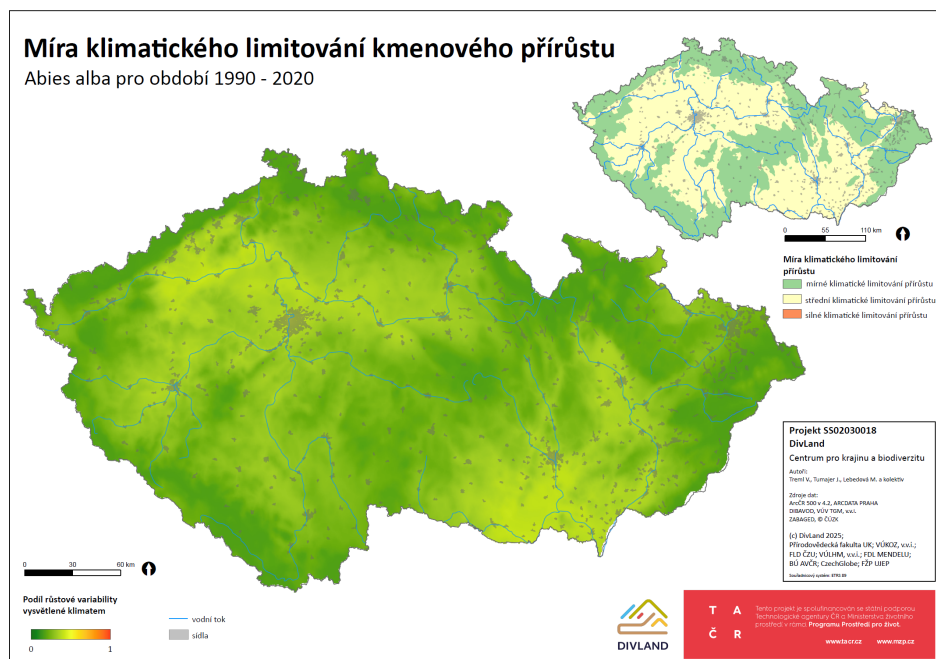
Modely pro borovici lesní byly vytvořeny na základě 98 lokalit (3528 stromů). Oblasti s nejvyšším klimatickým limitováním přírůstu se nachází na jižní Moravě a v dolním Poohří ($R^2 = 0,40$). Naopak nejnižší klimatické limitování přírůstu je v nadmořských výškách 700–1000 m n. m. ($R^2 = 0,20$).



Obrázek 7. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu borovice lesní.

Jedle bělokorá

Modely pro jedli bělokorou byly vytvořeny na základě 73 lokalit (1820 stromů). Oblasti s nejvyšším klimatickým limitováním přírůstu se nachází na jižní Moravě a v dolním Poohří ($R^2 = 0{,}40$). Naopak nejnižší klimatické limitování přírůstu je v nadmořských výškách 700–900 m n. m. ($R^2 = 0{,}20$). Prostorové rozložení klimatického limitování je podobné borovici s tím, že oblast s optimálním růstem je užší.



Obrázek 8. Mapa klimatického limitování kmenového přírůstu jedle bělokoré.

4. Dostupnost a doporučení využití výstupu

Mapy jsou k dispozici ve formátu geotiff na webovém serveru projektu. Mapy přinášejí plošnou generalizovanou informaci o tom, jak silný je vliv klimatických podmínek na kmenový přírůst dřevin. Mapy ukazují, že v současné době lze identifikovat v rámci území ČR pro všechny hlavní dřeviny oblasti s optimálními podmínkami z hlediska vlivu klimatu na přírůst kmenové biomasy. Největší plochu zaujímají tyto oblasti pro dub letní a zimní, následně pro jedli bělokorou, borovici lesní a smrk ztepilý. Ten se zároveň vyznačuje největší plochou území se silným klimatickým limitováním kmenového přírůstu v sušších oblastech, která již téměř vylučuje výrazné aktivní podporování přírůstu lesnickým hospodařením. Specifickým případem je buk lesní, který vykazuje relativně slabší vztah k environmentálním gradientům. Využití map je zamýšleno společně s výstupem V15 (predikční mapy), který ukazuje na změnu klimatického limitování kmenového přírůstu v blízké budoucnosti.

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. ... Tremel, 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., Tremel, V., Tumajer, J., Vašíčková, I., Vejputsková, 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.

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.

Tremel, V., Tumajer, J., Oulehle, F., Altman, J., Doležal, J., Vejputsková, 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

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