

**Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská**

Katedra ekologie lesa



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Vliv smíšení dřevin na mikroklima v mladých
výsadbách ve středním Německu**

Bakalářská práce

Autor: Adéla Hozáková

Vedoucí práce: doc. Ing. Radim Matula, Ph.D.

2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adéla Hozáková

Lesnictví

Ochrana a pěstování lesních ekosystémů

Název práce

Vliv smíšení dřevin na mikroklima v mladých výsadbách ve středním Německu

Název anglicky

The effect of tree species composition on microclimate in a young planted forest in Central Germany

Cíle práce

Stromové patro lesů může významně omezit negativní vlivy globálního oteplování na lesní mikroklima, čímž jeho snižuje dopady na biodiverzitu a stabilitu těchto lesů. Vliv lesů na mikroklima se však liší dle druhové skladby a smíšení, avšak empirická informace o tom, jak hlavní dřeviny střeoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima na gradientu diverzity stromového patra doposud chybějí. Cílem bakalářské práce tak bude zjistit, jak buk lesní (*Fagus sylvatica*), dub letní (*Quercus robur*), smrk ztepilý (*Picea abies*) a douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) v monokulturách a vzájemných směsích ovlivňují teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkost v podrostu experimentálních výsadeb temperátního lesa BIOTREE Kaltenborn ve středním Německu.

Metodika

Měření budou prováděna pomocí mikroklimatických čidel TMS4 v rámci výsadbového experimentu BIOTREE Kaltenborn v Německu, který je součástí mezinárodní sítě TreeDivNet. V rámci bakalářské práce budou jednotlivé experimentální bloky navštíveny, stažena data z nainstalovaných čidel a případně doinstalována čidla nová.

Analýza získaných dat bude prováděna v programu R pomocí balíčku PLOTer. V první fázi budou vypočítány průměry, maxima, minima a variabilita v rámci vybraných časových období (např. denní či měsíční průměry teplot a maxima během vegetační sezóny, půdní vlhkost v létě apod.). Následně budou pomocí statistických modelů (lineární, GAM modely) testovány rozdíly a vlivy druhové skladby a taky mezi jednotlivými roky.

Harmonogram

květen – listopad 2022 : studium literatury, formulace cílů, konzultace

květen – říjen 2023: terénní měření, zpracování dat z minulých let

červenec – prosinec 2023: analýzy dat, tvorba výsledků

leden – duben 2024: psaní práce, finalizace výsledků

Doporučený rozsah práce

30

Klíčová slova

mikroklima, druhová skladba lesa, klimatická změna, BIOTREE,

Doporučené zdroje informací

- Aussenac, G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann. For. Sci.* 57, 287–301.
- De Frenne, P., Rodríguez-Sánchez, F., Coomes, D.A., Baeten, L., Verstraeten, G., Vellend, M., Bernhardt-Römermann, M., Brown, C.D., Brunet, J., Cornelis, J., Decocq, G.M., Dierschke, H., Eriksson, O., Gilliam, F.S., Hédli, R., Heinken, T., Hermy, M., Hommel, P., Jenkins, M.A., Kelly, D.L., Kirby, K.J., Mitchell, F.J.G., Naaf, T., Newman, M., Peterken, G., Petrík, P., Schultz, J., Sonnier, G., Van Calster, H., Waller, D.M., Walther, G.-R., White, P.S., Woods, K.D., Wulf, M., Graae, B.J., Verheyen, K., 2013. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 110, 18561–5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1311190110>
- Lembrechts, J. et al. 2020. SoilTemp: A global database of near-surface temperature. *Glob. Chang. Biol.* 26, 6616–6629. <https://doi.org/10.1111/gcb.15123>
- Von Arx, G., Graf Pannatier, E., Thimonier, A., Rebetez, M., 2013. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: Potential implications for seedling establishment in a changing climate. *J. Ecol.* 101, 1201–1213. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12121>
- Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J., Haase, T., 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agric. For. Meteorol.* 268, 40–47. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.12.018>
- Zellweger, F., Coomes, D., Lenoir, J., Depauw, L., Maes, S.L., Wulf, M., Kirby, K.J., Brunet, J., Kopecký, M., Máliš, F., Schmidt, W., Heinrichs, S., den Ouden, J., Jaroszewicz, B., Buyse, G., Spicher, F., Verheyen, K., De Frenne, P., 2019. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 1–13.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Radim Matula, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ekologie lesa

Elektronicky schváleno dne 27. 2. 2024

prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2024

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 03. 04. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv smíšení dřevin na mikroklima v mladých výsadbách ve středním Německu“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila, a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V dne.....

Podpis autora

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Radimovi Matulovi, Ph.D. za vedení této práce, cenné rady a za čas, který mi byl věnován při konzultacích.

Vliv smíšení dřevin na mikroklima v mladých výsadbách ve středním Německu

Abstrakt

V posledních letech dochází ke globálním změnám klimatu, které ovlivňují planetu napříč všemi ekosystémy a v neposlední řadě se klimatické změny dotýkají i lesních porostů. Evropské lesy čelí stále častějším a intenzivnějším obdobím sucha, v jejichž důsledku dochází k odumírání stromů a mnohdy až destabilizaci celých lesních porostů. Lesy jsou však schopny tlumit klimatické extrémy díky přítomnosti korunového patra a vytvářet pro ně typické mikroklima, které je značně odlišné od klimatu mimo les.

Tato bakalářská práce měla za cíl zjistit, jak hlavní dřeviny střeoevropského lesa buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), dub zimní (*Quercus petraea* Liebl.), smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.) a douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima, konkrétně půdní vlhkost, teplotu půdy a teplotu vzduchu. Měření byla provedena na výzkumné ploše Kaltenborn v Německu, v rámci výsadbového experimentu BIOTREE pomocí mikroklimatických čidel TMS4.

Vyhodnocení dat ukázalo, že půdní vlhkost si po celou dobu měření nejlépe udržely porosty listnaté. Při bližším pohledu na konkrétní druhovou skladbu byla nejvyšší půdní vlhkost v dubových porostech, následované porosty buku lesního a obecně si vyšší hodnoty půdní vlhkosti udržely právě směsi s výskytem dubu a buku. Z jehličnatých porostů si půdní vlhkost nejhůře zachovaly smrkové monokultury, nejvyšších hodnot půdní vlhkosti dosahovala směs smrku a douglasky.

Teploty půdy a vzduchu dosahovaly nejvyšších hodnot v listnatých porostech, především v porostech dubových. Nejvyšší teploty panovaly v monokulturách, naopak nejchladnější byly směsi tří druhů. Porosty se sníženou hodnotou indexu listové plochy (LAI) v důsledku managementu vykazovaly vyšší maxima teplot než porosty bez provedení výchovného zásahu.

Výsledky této bakalářské práce ukazují, že druhová skladba lesních porostů významně ovlivňuje mikroklimatické funkce lesa a že vhodným výběrem dřevin lze vytvářet optimální mikroklimatické podmínky. Pro podporu půdní vlhkosti se jako nejlepší jeví listnaté porosty, ale pro omezení teplotních extrémů naopak porosty jehličnaté nebo smíšené.

Klíčová slova: druhová skladba lesa, střeoevropské lesy, mikroklima, klimatická změna, BIOTREE

The effect of tree species composition on microclimate in a young planted forest in Central Germany

Abstract

In recent years, global climate change is affecting the planet across all ecosystems, and not least climate change is also affecting forest ecosystems. Europe's forests are facing increasingly frequent and intense droughts, resulting in tree death and often destabilizing entire forest stands. However, forests are able to buffer climatic extremes due to the presence of the canopy and create a typical microclimate that is very different from the climate outside the forest. The aim of this bachelor thesis was to investigate how the main tree species of Central European forests, *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Picea abies* and *Pseudotsuga menziesii*, and their mixtures, influence forest microclimate, namely soil moisture, soil temperature and air temperature. Measurements were made at the Kaltenborn research site in Germany, as part of the BIOTREE planting experiment, using TMS4 microclimate sensors.

Data evaluation showed that soil moisture was best retained by deciduous stands throughout the measurement period. When looking more closely at the specific species composition, the highest soil moisture was found in stands of winter oak, followed by stands of beech, and in general it was the oak-beech mixtures that maintained higher soil moisture values. Of the coniferous stands, spruce monocultures had the worst soil moisture retention, while the best soil moisture values were achieved by a mixture of spruce and Douglas-fir. Soil and air temperatures were highest in deciduous stands, especially in oak stands. The highest temperatures were in monocultures, while the coldest were in mixtures of three species. Stands with reduced leaf area index (LAI) values due to management showed higher temperature peaks than stands without management intervention.

The results of this bachelor thesis show that the species composition of forest stands significantly influences the microclimatic functions of the forest and that optimal microclimatic conditions can be created by appropriate selection of tree species. Deciduous stands appear to be the best for soil moisture support, but coniferous or mixed stands appear to be the best for limiting temperature extremes.

Keywords: forest species composition, Central European forests, microclimate, climate change, BIOTREE

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod | 8 |
| 2 Cíl práce | 9 |
| 3 Literární rešerše | 9 |
| 3.1 Temperátní lesy | 9 |
| 3.2 Středoevropské lesy | 9 |
| 3.2.1 Přírozená druhová skladba..... | 9 |
| 3.2.2 Současná struktura | 10 |
| 3.3 Dopady klimatické změny na lesní ekosystémy | 12 |
| 3.3.1 Předpokládaný dopad klimatické změny na středoevropské lesy..... | 12 |
| 3.4 Lesní mikroklima | 13 |
| 3.4.1 Faktory určující mikroklima | 14 |
| 3.4.2 Význam lesního mikroklimatu..... | 14 |
| 4 Metodika | 15 |
| 4.1 Charakteristika vybraného území Kaltenborn | 16 |
| 4.2 Mikroklimatická čidla TMS4 | 17 |
| 4.3 Zpracování dat | 17 |
| 4.3.1 Sběr dat v terénu | 17 |
| 4.3.2 Kontrola a čištění dat | 18 |
| 4.3.3 Zpracování dat a tvorba výsledků..... | 18 |
| 5 Výsledky | 19 |
| 5.1 Půdní vlhkost | 19 |
| 5.2 Teplota půdy (T1) a na povrchu půdy (T2) | 22 |
| 5.2.1 Teplota půdy T1 | 22 |
| 5.2.2 Teplota na povrchu půdy (T2) | 25 |
| 5.3 Teplota vzduchu T3 | 27 |
| 6 Diskuse | 29 |
| 6.1 Půdní vlhkost | 29 |
| 6.2 Teploty půdy T1, T2 a teplota vzduchu T3 | 31 |
| 7 Závěr | 32 |
| 8 Literatura | 33 |

1 Úvod

V posledních letech dochází ke globálním změnám klimatu, které ovlivňují planetu napříč všemi ekosystémy a v neposlední řadě se klimatické změny dotýkají i lesních porostů. Lesy se stále častěji a ve větším rozsahu potýkají s lesními disturbancemi jako jsou požáry, extrémní vlny veder a sucha, sesuvy půdy, invaze hmyzích škůdců a epidemie houbových patogenů (Vacek et al., 2023), v jejichž důsledku dochází ke zvýšené mortalitě stromů (Allen et al., 2010) a mnohdy i rozvrácení celých lesních porostů.

Lesy však mohou sehrát důležitou roli v boji s klimatickou změnou. Jsou schopny v sobě uložit značné množství uhlíku (Lewis et al., 2019), regulovat vodní režim a kvalitu ovzduší (Vacek et al., 2023) a dokonce zmírňovat působení klimatických extrémů (Luyssaert et al., 2018).

Změna klimatu je stále závažnější a lze očekávat, že její dopady budou i nadále zesilovat (IPCC, 2023), a proto je důležitým úkolem nynějšího lesnictví vytvářet lesy, které budou schopny čelit klimatickým změnám dnes i v následujících desetiletích, a stejně tak plnit jejich ekologické a sociální funkce.

Klimatická změna je však obecně hodnocena z hlediska makroklimatu, které reprezentuje dlouhodobější atmosférické podmínky v širším měřítku, a ignoruje klimatické procesy, které neustále probíhají mezi lesním porostem a klimatem a vedou k tvorbě lesního mikroklimatu (Lembrechts et al., 2020). Mikroklima se snad nikde neprojevuje tak zřetelně jako v lesích, a to především díky přítomnosti korun, které regulují sluneční záření, proudění vzduchu a evapotranspiraci (Zellweger et al., 2020). V závislosti na jejich struktuře a na uzavřenosti stromového patra jsou lesní porosty schopny tlumit klimatické extrémy, a tím výrazně omezit negativní vlivy klimatické změny (Aussenac, 2000).

Vliv lesů na mikroklima se však liší dle druhové skladby a smíšení, avšak empirické informace o tom, jak hlavní dřeviny střeoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima na gradientu diverzity stromového patra doposud chybějí. Cílem této bakalářské práce je tedy zjistit, jak hospodářsky významné druhy Evropy v monokulturách a vzájemných směsích ovlivňují lesní mikroklima, konkrétně teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkost.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, jak hlavní dřeviny střeoevropského lesa buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), dub zimní (*Quercus petraea* Liebl.), smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.) a douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) v monokulturách a vzájemných směsích ovlivňují lesní mikroklima, konkrétně půdní vlhkost, teplotu půdy a teplotu vzduchu. Tyto veličiny byly měřeny pomocí mikroklimatických čidel TMS4 v podrostu experimentálních výsadeb temperátního lesa BIOTREE Kaltenborn ve středním Německu.

3 Literární rešerše

3.1 Temperátní lesy

Temperátní listnaté lesy lze také nazývat tzv. opadavými širokolistými lesy. Tento biom je potenciálně dominantním zonobiomem mírného temperátního pásma na severní polokouli. Ve světě zaujímá tři význačné oblasti. Předně území Evropy mimo většiny Skandinávie, severovýchodního Ruska a Středomoří, dále východní oblast Severní Ameriky a závěrem oblast východní Asie. (Podrázský, 2014)

Charakter klimatu je silně ovlivňován vzdáleností od oceánu, kdy lze pozorovat výrazné přechody mezi oceánským a subkontinentálním klimatem, které se projevují rozdílným množstvím srážek, a především zimními teplotami. Vždy je však podnebí charakterizováno 4–6 teplými měsíci a průměrnou červencovou teplotou kolem 20 °C. Průměrná roční teplota se pohybuje kolem 10 °C a roční úhrn srážek mezi 500 až 1500 mm. (Podrázský, 2014)

Střeoevropská oblast temperátních lesů je přibližně vymezena územím Německa, Švýcarska, Rakouska, České republiky, Slovenska a Polska. Klima této oblasti se vyznačuje střídáním mírně teplého léta a chladné zimy, která znamená pro většinu rostlin několikaměsíční období klidu. V létě teplota zřídka přesahuje 30 °C a v zimě jen výjimečně klesá pod –20 °C. Delší období sucha se neprojevují nikdy nebo jen v katastrofických letech. Takové klima podporuje růst stromů a nebýt vlivů člověka, téměř celé území, s výjimkou mnohých rašelinišť, skal, suťových polí, stejně tak hor nad klimatickou lesní hranicí, by bylo pokryto lesem. (Chytrý, 2012)

3.2 Střeoevropské lesy

3.2.1 Přírozená druhová skladba

Střeoevropské smíšené a opadavé lesy se vyznačují výraznou variabilitou v poměrně malých měřítcích, což přispívá k jejich značné stabilitě v přírodních podmínkách. Přesto lze ve stádiu optima pozorovat typickou strukturu porostů s dominancí jednoho patra

růstově poměrně vyrovnaných jedinců. Rovněž je vytvořena výrazná výšková zonace, jež se odráží i ve vylíšení výškových vegetačních stupňů – dubového, bukodubového, dubobukového, bukového, jedlobukového a smrkobukového (Podrázský, 2014).

Nejcharakterističtější lesní vegetací střední Evropy jsou společenstva, ve kterých dominuje buk lesní (*Fagus sylvatica* L.). V horském a podhorském stupni převažují na hlubokých, čerstvě vlhkých a humózních půdách eutrofní bučiny. Zde se vedle buku může ve smíšených porostech vyskytovat jedle bělokora (*Abies alba* Mill.). Dále se v submontánním stupni nachází horské klenové bučiny, kde je příměsí javor klen (*Acer pseudoplatanus* L.). V rámci vápencových pohoří, zejména Alp a Karpat, se objevují vápnomilné bučiny, na chudých půdách silikátových hornin se vytváří, s ohledem na bylinné patro, značně odlišné acidofilní bučiny.

Větší část střeoevropských lesů tvoří lesy s převahou rodů javor (*Acer*), habr (*Carpinus*), buk (*Fagus*), jasan (*Fraxinus*), lípa (*Tilia*) a dalších náročnějších druhů. Tyto lesy se kromě pravých podzolů a extrémně zamokřených půd vyskytují prakticky na všech půdních typech střední Evropy. (Chytrý, 2012)

Na stanovištích sutí a roklín, v polohách vlhkých a chráněných před větrem, jsou vyvinuty mezofilní lesy s druhy javor klen a javor mléč (*Acer platanoides* L.), lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.), jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.) aj.

V teplejších a kontinentálnějších oblastech, především východu střední Evropy, jsou rozšířeny dubohabřiny. V teplých pahorkatinách na suchých, výslunných svazích se rozkládají teplomilné doubravy v čele s dubem pýřitým (*Quercus pubescens* Willd.) a dubem zimním (*Quercus Petraea* Liebl.), které často vytvářejí porosty s xerothermními křovinami.

Ve střeoevropských pohořích, kde se kvůli chladným zimám a krátkému jaru nemohou prosadit listnaté dřeviny, dominuje svým výskytem smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.). (Chytrý, 2012)

Na písčitéch půdách a vátých píscích se vyskytují acidofilní bory, kde se v přirozených porostech vyskytuje borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) vždy v kombinaci s duby (*Quercus*), zatímco čisté bory jsou pouze antropogenním produktem.

V neposlední řadě se lze ve střeoevropské oblasti setkat s lužními lesy, svou strukturou závislými na charakteru řeky. Průtoky horských potoků jsou dřevinami doprovázeny sporadicky, horním a středním tokům řek dominují horské a podhorské olšiny, se zastoupením druhů rodu olše (*Alnus*) a jasanem ztepilým v doprovodu vrbových křovin. Podél nížinných řek, kde jsou záplavy jen v předjaří a v létě hladina klesá, se rozrůstají tvrdé luhy v zastoupení dubu letního (*Quercus robur* L.), jasanu ztepilého, jilmu vazu (*Ulmus laevis* Pallas) a jilmu habrolistého (*Ulmus minor* Mill.). Na tvrdé luhy navazují luhy měkké, v nichž převládá rod vrb (*Salix*) a topol černý (*Populus nigra* L.). (Chytrý, 2012)

3.2.2 Současná struktura

V západní a střední Evropě je však současné druhové složení většiny lesů i jejich prostorová struktura dána více hospodařením v lesích v posledních stoletích než

přírodními faktory (Janouš, 2002). Postupným vznikem od 18. století, kdy vzrostla potřeba technického dřeva, mají dnes lesní porosty u nás častěji strukturu velmi rozsáhlých, stejnověkých a stejnorodých jehličnatých jednoetážových monokultur, na úkor lesů listnatých a smíšených. Tyto monokultury si však i ve střední Evropě zachovávají svoji přirozenou tendenci k plošným kolapsům (Vacek and Mikeska, 2007). Typickým příkladem, který uvádí Klimo et al. (2000) je výskyt smrku ztepilého na 25-30 % lesní půdy na území České republiky, Slovenska, Švýcarska a Německa, kde byl vysazován v rámci svého přirozeného areálu v horách, ale častěji také mimo něj v pahorkatinách a nížinách.

V důsledku rychlého růstu světové populace a ekonomik jsou však přírodní lesy celosvětově pod rostoucím tlakem. Měly by pokrýt poptávku po surovém dříví a zároveň neustále poskytovat širokou škálu sociálních a ekologických služeb (Brown and Ball, 2009). Ačkoli hospodářské lesy nemohou a neměly by zcela nahradit všechny přírodní lesy, bude nezbytné s nimi v budoucnosti nadále hospodařit. V současnosti je plantážním hospodařením pokryto 33 % celkové světové produkce průmyslové kulatiny a předpokládá se, že do roku 2040 bude představovat 50 % celosvětové produkce (Liu et al., 2018).

V minulosti špatný výběr pěstovaných druhů, špatně zvolená výchova porostů a nezhledněné stanovištní podmínky často vedly k problémům a na postavení monokultur se začalo pohlížet negativně (Freer-Smith et al., 2019). K nežádoucím vlivům čistých porostů na životní prostředí patří ztráta produktivity a úrodnosti půdy, zvýšení rizika šíření škůdců a chorob, vyšší rizika nepříznivých účinků bouří a požárů a také nežádoucí dopady na biologickou rozmanitost (Baltodano, 2000).

Naproti tomu hospodaření ve smíšených lesích obvykle vede k větší odolnosti porostů vůči řadě rizik a může také poskytnout zvýšenou ekonomickou hodnotu ve srovnání s monokulturami, zejména s ohledem na klimatickou změnu (Pretzsch et al., 2013; Vacek et al., 2021).

Je doloženo, že míšení druhů často zlepšuje dostupnost zdrojů, jejich příjem, efektivitu jejich využití a v důsledku toho i růst stromů a celých porostů (Pretzsch et al., 2013). Jako jednu z příčin lze uvést komplementaritu nik, která může snížit konkurenci o zdroje ve smíšených porostech oproti monokulturám (Morin et al., 2011). Další významnou příčinou je vzájemné ovlivnění dvou druhů či populací takovým způsobem, že jeden působí pozitivně na druhý a zlepšuje tomu druhému podmínky, tzv. facilitace (Vandermeer, 1989).

Jedním z nejdůležitějších rozhodnutí při dnešním hospodaření v lesích bude optimální volba dřevinné skladby (Neuner et al., 2013). Touto tematikou se dnes zabývá značná část autorů a doplňují se potřebné poznatky, např. Pretzsch et al. (2015) potvrzuje, že vhodnými kombinacemi dřevin lze zvýšit produktivitu porostů, zmírnit dopady sucha a další rizika a připravit cestu k systémům lesní produkce, které mohou být efektivnější z hlediska využívání zdrojů a stabilnější tváří v tvář změně klimatu.

3.3 Dopady klimatické změny na lesní ekosystémy

Změny klimatu se staly hlavní hybnou silou přeměny životního prostředí v důsledku výrazného nárůstu průměrné globální povrchové teploty a extrémních povětrnostních jevů (Bolte et al., 2009).

S globálním klimatem se mění a budou měnit i lesní ekosystémy, dochází ke snížení fyziologické tolerance druhů a ke zrychlování biofyzikálních lesních procesů (Olesen et al., 2007). Nyní se počítá, že planeta je průměrně o 1,2 °C teplejší než v tzv. předindustriálním období a Thompson et al. (2009) uvádí, že obecně se rychlost biochemických procesů zdvojnásobuje s každým stupněm Celsia.

Hlavní vliv na oteplování klimatu má zvýšené množství CO₂ produkovaného lidskou činností. Člověk způsobuje nerovnováhu globálního cyklu uhlíku tím, že zvyšuje množství skleníkových plynů v atmosféře rychleji, než se může snižovat odstraňováním CO₂ prostřednictvím přírodních procesů (Thompson et al., 2009). V roce 2019 vzrostlo množství skleníkových plynů, vzniklých pouze antropogenní činností, o 54 % oproti roku 1990, přičemž největší podíl připadá na emise ze spalování fosilních paliv a průmyslových procesů (IPPC, 2023).

Klimatické změny představují i pozitivní účinky na lesní ekosystémy, např. zvýšení růstu a produkce stromů (Allen et al., 2010), nicméně je třeba se zaměřovat na silně alarmující negativní účinky. Stále častěji zaznamenáváme výskyt velkoplošných lesních disturbancí jako jsou požáry, extrémní vlny veder a sucha, sesuvy půdy, invaze hmyzích škůdců a epidemie houbových patogenů (Vacek et al., 2023). V důsledku ústupu ledovců a rozsáhlého tání permafrostu dochází k nevratným změnám v arktických ekosystémech (IPPC, 2023), jsou pozorovány značné posuny v rozšíření vegetace (Kelly and Goulden, 2008) a v neposlední řadě kvůli zvýšenému suchu a tepelnému stresu dochází ke zvýšené mortalitě stromů (Allen et al., 2010).

3.3.1 Předpokládaný dopad klimatické změny na střeoevropské lesy

Pro střeoevropské lesy bude limitujícím faktorem především dostupnost vody. Snížení ročního úhrnu srážek nebo změna jeho rozložení do ročních období s následkem déle trvajících sucha povede k vodnímu deficitu. Změna klimatu může ovlivnit náchylnost střeoevropských lesů k rozsáhlejším disturbancím, zejména k napadení hmyzími škůdci a patogenními organismy. V důsledku toho se pravděpodobně zvýší množství nahodilých těžeb (Lindner et al., 2010).

V reakci na oteplování klimatu se předpokládá posun hlavních evropských dřevin na sever nebo do vyšších nadmořských výšek. Smrk ztepilý v nižších polohách značně trpí, v těchto lokalitách se mohou v důsledku klimatických změn klimatické podmínky posunout na hranici jeho ekologického optima růstu nebo dokonce za ni (Hanewinkel et al., 2013). Příznačně z tohoto důvodu dochází v posledních letech k rozsáhlému odumírání smrkových porostů ve střední Evropě (Vacek et al., 2023).

Ačkoli borovice lesní vykazuje minimální reakci na změnu klimatu, rovněž se očekává úbytek jejího stávajícího areálu, a to na extrémních stanovištích a na jižním okraji areálu. U listnatých dřevin, zejména dubů a buku lesního dojde k posunu jejich areálů z nižších nadmořských výšek a dominance buku se posune do podhůří a hor, zatímco jeho výskyt v nížinách a nižších pahorkatinách nahradí dub (Silva et al., 2012; Dulamsuren et al., 2017; Machar et al., 2017; Z. Vacek et al., 2023).

Pokud bude splněna podmínka dostatku vody a optimální dostupnosti živin, lze přepokládat, že vyšší koncentrace CO₂ v atmosféře povede ke zvýšení rychlosti růstu a produkce, zmírní nepříznivé účinky klimatických změn na porosty lesních dřevin (Vacek et al., 2023) a v krátkodobém až střednědobém horizontu bude mít pozitivní přínos pro sekvestraci uhlíku (Eggers et al., 2008; Lindner et al., 2010).

Ačkoli jsou lesní ekosystémy vystaveny klimatickým změnám a jsou jimi ohroženy, jsou lesy zároveň schopny ovlivňovat průběh klimatických změn. Dokáží regulovat vodní režim, kvalitu ovzduší, sekvestraci uhlíku, a dokonce snižovat klimatické extrémy. Proto je zásadní vnímat změnu klimatu nejen jako riziko způsobující narušení lesů, ale také jako příležitost pro inovativní přístupy k lesnímu hospodaření, ochraně a pěstování lesů.

Je důležité se zaměřit na příčiny klimatických změn a následně na adaptační strategie, mezi které může úspěšně patřit vytváření druhově rozmanitých, prostorově a věkově strukturovaných porostů (Vacek et al., 2023).

3.4 Lesní mikroklima

Mezi lesním porostem a klimatem neustále dochází ke vzájemným interakcím, které jsou typické výměnami energie, změnami charakteru, složení a vlastností porostů, vytvářením mikroklimatických podmínek a v neposlední řadě mají vliv na přežívání, růst stromů a vývoj porostů (Aussenac, 2000).

Hlavní složky klimatu, jako je sluneční záření, teplota vzduchu a půdy, srážky, vlhkost vzduchu a vítr jsou výrazně ovlivňovány a přetvářeny lesním porostem (Aussenac, 2000), který tímto působením vytváří lesní mikroklima v silném kontrastu odlišné od klimatu mimo les (De Frenne et al., 2021).

V kontextu změny klimatu se stále více zkoumají a vyhodnocují klimatické údaje. Ty jsou však zjišťovány z běžných meteorologických stanic, které reprezentují dlouhodobější atmosférické podmínky v širším měřítku, a tím ignorují mnoho klimatických procesů, které působí v blízkosti zemského povrchu, v jemnějším časoprostorovém rozlišení a v prostředí ovlivňovaném mikroklimatem (Lembrechts et al., 2020).

Ačkoli právě mikroklima ovlivňuje atmosférické procesy v nejmenším prostorovém měřítku, je schopno svým působením přetvářet ekologické vztahy jak v lokálním, tak globálním měřítku (Lenoir et al., 2016) a může tak potenciálně chránit biotu žijící na zemi před změnami klimatu (Lembrechts et al., 2020). Proto se nelze spokojit s klimatickými údaji v hrubém měřítku, ale je nezbytné pochopit rozsah, hnací síly a důsledky mikroklimatu na lesní porosty pro lepší hospodaření v lesích a podporu udržitelného

hospodaření a pro zajištění stabilních lesních ekosystémů pro budoucí generace v teplejším klimatu (De Frenne et al., 2021).

3.4.1 Faktory určující mikroklima

Charakter mikroklimatu závisí na několika různých faktorech. Nejobecněji je mikroklima určováno regionálním makroklimatem a topografickými podmínkami (Holst et al., 2004), tyto faktory udávají edafické podmínky a strukturu přirozené vegetace (Kovács et al., 2017). Dále se na charakteru podílí například struktura porostu, druhové složení a přítomnost bylinného patra (Kovács et al., 2017).

Avšak nejvýznamnějším prvkem ovlivňujícím mikroklima je uzavřenost stromového patra a hodnota indexu listové plochy LAI (Aussenac, 2000; De Frenne et al., 2021). Přirozené zásahy (např. odumření jednoho či několika stromů) a umělé zásahy (např. prořezávky a probírky) mění charakteristiky mikroklimatu v závislosti na míře snížení LAI a otevření korun (Aussenac, 2000).

Přítomnost korun ovlivňuje výměnu energie, vodních par a uhlíku mezi porostem a atmosférou, stejně tak i snižuje proudění vzduchu (Chen et al., 1999). Způsobuje pohlcení či odrazení velké části dopadajícího slunečního záření, což má za následek nižší hodnotu maximální teploty vně porostu, oproti bezlesí v průměru o 4 °C, stejně tak jsou minimální teploty v průměru o 1 °C vyšší (De Frenne et al., 2021). Lesní porosty jsou tedy v závislosti na stromovém patře schopny tlumit denní i sezónní teplotní rozdíly ve srovnání s bezlesím (Aussenac, 2000).

3.4.2 Význam lesního mikroklimatu

Mikroklima se snad nikde neprojevuje tak zřetelně jako v lesích, a to především díky přítomnosti korun, které regulují sluneční záření, proudění vzduchu a evapotranspiraci (Zellweger et al., 2020). Lesní organismy žijící pod korunami stromů nebo v nich jsou vystavovány klimatickým podmínkám, které se výrazně liší od podmínek mimo les (Chen et al., 1999).

Lesní mikroklima a nespočet mikrostanovišť umožňují organismům vyhnout se extrémnímu horku a suchu (Scheffers et al., 2014) a tato tlumící schopnost lesního mikroklimatu by mohla poskytovat klimatická mikrorefugia během oteplování makroklimatu (De Frenne et al., 2021).

U mnoha druhů jsou v dnešní době pozorovány posuny k vyšším zeměpisným šířkám a vyšším nadmořským výškám s ohledem na jejich teplotní optimum, očekává se dominance druhů schopných se přizpůsobit stoupajícím teplotám, a naopak úbytek méně flexibilních druhů. Tyto změny ekosystémů ve prospěch teplomilných druhů se souhrnně označují jako termofilizace (Zellweger et al., 2020). Rychlost termofilizace však v lesních ekosystémech výrazně zaostává za změnami makroklimatu a Zellweger et al. (2020) potvrzuje myšlenku, že míra termofilizace je přímo ovlivňována působením mikroklimatu. Lesní mikroklima je tudíž schopné ovlivňovat rozšíření jedinců, populací

a druhů (De Frenne et al., 2021) a jeho zahrnutí do modelů předpovědí by mohlo výrazně zpřesnit predikce dopadů klimatické změny (Lembrechts et al., 2020).

Dále je lesní mikroklima faktorem ovlivňujícím vzájemné vztahy mezi organismy, kdy limitovaná dostupnost světla a vlhkost mohou zvyšovat konkurenci rostlin, je ale také schopno v některých případech usnadňovat koexistenci druhů (De Frenne et al., 2021).

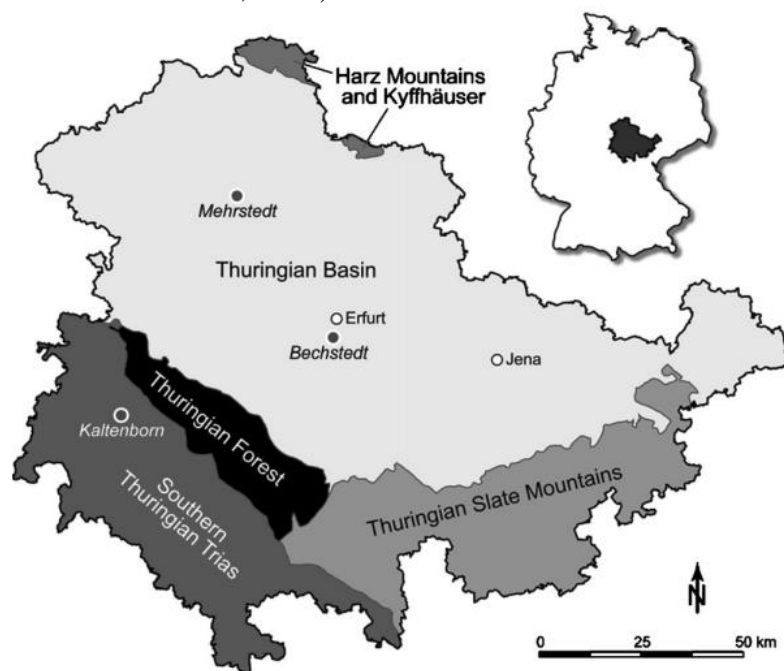
Na úrovni ekosystému má mikroklima zásadní vliv při usměrňování ekosystémových funkcí, jako je tvorba humusu, sekvestrace uhlíku a mikrobiální aktivity. Jejich průběh je rychlejší než na stanovištích mimo les (Chen et al., 2018). Pro dřeviny má lesní mikroklima význam také pro vývoj a přežití semenáčků, stejně tak poskytuje ochranu před jarními mrazy (Aussenac, 2000).

4 Metodika

Výzkum vlivu druhové skladby a smíšení porostů na mikroklima, potažmo teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost byl zjišťován na výzkumné ploše Kaltenborn v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu.

Projekt BIOTREE je jedním z 31 experimentů prováděných po celém světě, pod záštitou nejvýznamnější celosvětové sítě experimentálních výzkumů biodiverzity lesů TreeDivNet.

Projekt je realizován od roku 2000 v rámci tří lokalit ležících ve spolkové zemi Durynsko, v Německu. Lokality "Mehrstedt", "Bechstedt" a "Kaltenborn" jsou od sebe vzdáleny v okruhu 70 km. Každá z lokalit byla v minulosti využívána jako zemědělská půda až do let 2003-2004, kdy zde byla dokončena výsadba téměř 200 000 sazenic na ploše přibližně 70 ha. (Scherer-Lorenzen et al., 2007)



Obr. 1 Poloha tří výzkumných lokalit Mehrstedt, Bechstedt a Kaltenborn spolu s významnými geomorfologickými prvky oblasti. (Scherer-Lorenzen et al., 2007)

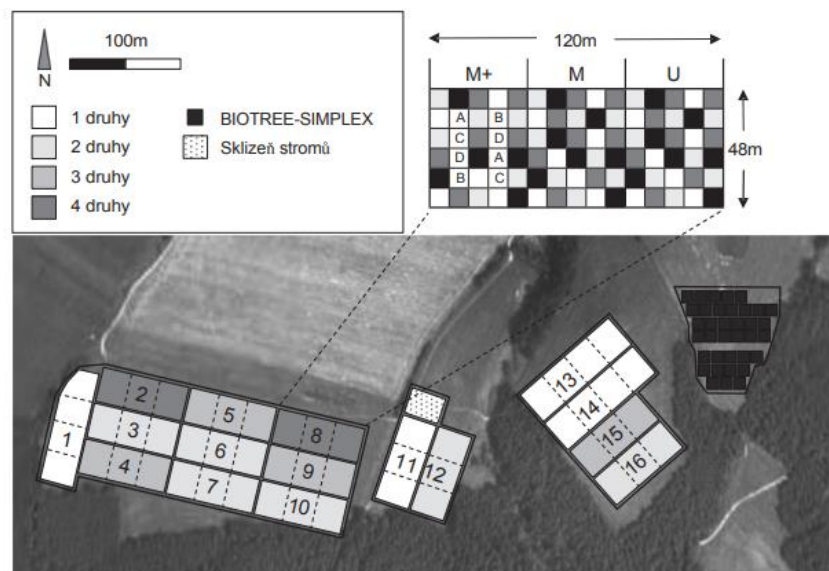
Potenciální přirozenou vegetací by zde byly listnaté lesy s převahou buku, jehličnaté dřeviny by se nevyskytovaly. V rámci experimentu zde byly vysazeny stanovištně vhodné, hospodářsky významné druhy střední Evropy, v zastoupení buku lesního, dubu zimního a smrku ztepilého a jeden zástupce druhů introdukovaných, douglaska tisolistá, jakožto druh s potenciálním hospodářským významem. (Scherer-Lorenzen et al., 2007)

4.1 Charakteristika vybraného území Kaltenborn

Měření v rámci této bakalářské práce byla prováděna v BIOTREE experimentu Kaltenborn. Lokalita Kaltenborn se nachází mezi horskými oblastmi Durynský les a Rhön (obr. 1) a rozkládá se na rozloze 20 ha. Podnebí je subatlantského charakteru, ovlivněné údolím nedaleké řeky Werra a blízkým pohořím. Podloží tvoří pískovec narušený několika břidlicovými vrstvami, na kterém se vytvořily slabě vyvinuté propustné půdy typu arenosolů. (Scherer-Lorenzen et al., 2007)

Do roku 1975 byla lokalita využívána jako orná půda, poté přeměněna na travní porost zužitkovaný pastvou a kosením. Výsadba se uskutečnila v průběhu jara a podzimu v letech 2003-2004 sazenicemi se stářím 3-4 let.

Lokalita byla rozdělena na 16 výzkumných ploch, které se dále rozčlenily na dílčí úseky (obr. 2) obhospodařované s doplňkovými druhy (M+), úseky pouze obhospodařované (M) a úseky bez managementu (U). Jednotlivé výše uvedené druhy byly vysazeny v monokulturách a všech možných 2, 3 a 4 druhových kombinacích. (Scherer-Lorenzen et al., 2007)

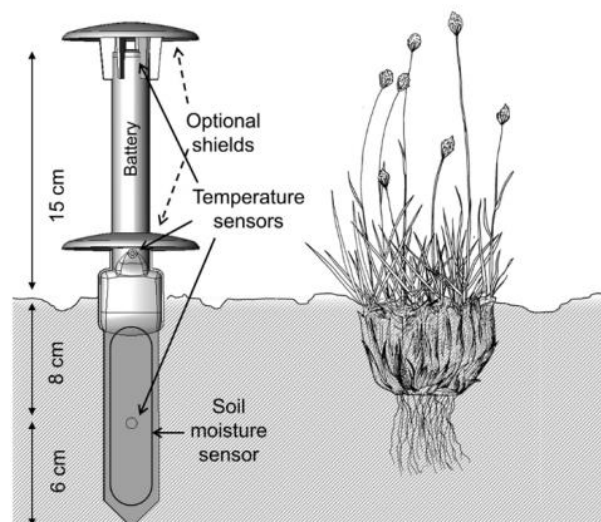


Obr. 2 Uspořádání lokality Kaltenborn do 16 výzkumných ploch. Přiblížen je dílčí úsek pro směs 4 druhů, kde různé škály šedé barvy políček představují různé hlavní druhy; písmena představují různé doplňkové druhy. Dále je přidáno členění na M+: obhospodařované s doplňkovými druhy, M: obhospodařované, U: neobhospodařované. (Scherer-Lorenzen et al., 2007)

Mikroklimatická čidla TMS4 (TOMST s.r.o.), zaznamenávající teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost byla v březnu 2021 nainstalována na všech 16 výzkumných plochách v počtu po čtyřech, vždy dvě do úseku s managementem a dvě do úseku bez managementu. Data z celkem 64 čidel byla stažena v listopadu 2022 a následně zpracována (viz níže).

4.2 Mikroklimatická čidla TMS4

Temperature-Moisture-Sensor (TMS) v sobě ukládá senzory pro měření teploty vzduchu, povrchu půdy a půdní vlhkosti a je navržen tak, aby simuloval a zachycoval klimatické podmínky, kterým je vystavena rostlina o výšce 15 cm, zakořeněná v horní vrstvě půdy (obr. 3; Wild et al., 2019).



Obr. 3 Mikroklimatické čidlo TMS nesoucí tři čidla měřící teplotu vzduchu, povrchu a půdy a jedno čidlo měřící vlhkost půdy. (Wild et al., 2019)

Tři teplotní čidla snímají hodnoty ve třech různých výškách vzhledem k povrchu půdy. Teplota půdy (T1) je měřena 8 cm pod povrchem, teplota na povrchu (T2) těsně nad povrchem země a teplota vzduchu (T3) ve výšce 15 centimetrů nad zemí. Výchozím intervalem pro sběr dat je 15 minut, při kterém by zařízení mělo být schopno provádět záznam dat po dobu 15 let.

4.3 Zpracování dat

4.3.1 Sběr dat v terénu

Stažení dat z mikroklimatických čidel rozmístěných na výzkumné ploše bylo provedeno v listopadu roku 2022 pro měřené období od května 2021 do listopadu 2022. Jednotlivé dataloggery byly zkontrolovány a následně z nich byla stažena data. Ve vrchní části, pod ochrannou krytkou, je umístěn konektor, který slouží pro stažení dat pomocí USB kabelu

za pomoci notebooku s instalovaným kontrolním softwarem Lolly Manager. Pomocí tohoto softwaru bylo možné ihned provést kontrolu stažených dat.

4.3.2 Kontrola a čištění dat

Zpracování dat probíhalo pomocí statistického programu R verze 4.3.2, ve vývojovém prostředí R Studio. Data z jednotlivých dataloggerů bylo nejprve potřeba překontrolovat a odstranit viditelně chybná měření. Nesprávné hodnoty měla například počáteční měření čidel, která ještě nebyla umístěna na výzkumné ploše nebo případně čidla poškozená či vytažená z půdy.

K čištění dat byl použit balíček PLOTer, ve spolupráci s aplikací Shiny, která v rámci internetového prohlížeče provedla vizualizaci stažených dat. V záložce „Data“ byly vypsané číselné kódy jednotlivých čidel a při rozlišení dat pro T1, T2, T3 a vlhkost se za pomoci funkce „Render plot“ zobrazily grafy průběhu měření.

V případě výskytu chybných dat byla v záložce „Plot“ část grafu označena a políčkem „Data“, dále „Delete selected data“ odstraněna (obr. 4). Kompletní vyčištěná data byla opět pomocí políčka „Data“, dále „Export data“ exportována do souboru ve formátu csv.



Obr. 4. Průběh čištění dat za pomoci balíčku PloTeR. Data v modrém výběru bylo nutno odstranit z důvodu viditelně chybných hodnot způsobených měřeními čidel ještě před umístěním na výzkumnou plochu.

4.3.3 Zpracování dat a tvorba výsledků

Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno rovněž ve statistickém programu R. Zkontrolovaná a vyčištěná data ve formátu csv byla nejprve propojena se souborem obsahujícím metadata, který v jednotlivých řádcích specifikoval id čidla, kód plochy a zkoumané parametry, kterými jsou druhová skladba, počet druhů, druh lesa a způsob managementu.

Po propojení dat byly vypočítány denní hodnoty půdní vlhkosti a průměry, maxima a minima jednotlivých teplot v závislostech na jednotlivých proměnných. Zkoumaly se jak trendy vývoje proměnných v čase, tak i jejich vztah k druhové skladbě porostů a počtu druhů v porostu. Pro vyhodnocení těchto trendů byly do dat pro jednotlivé proměnné

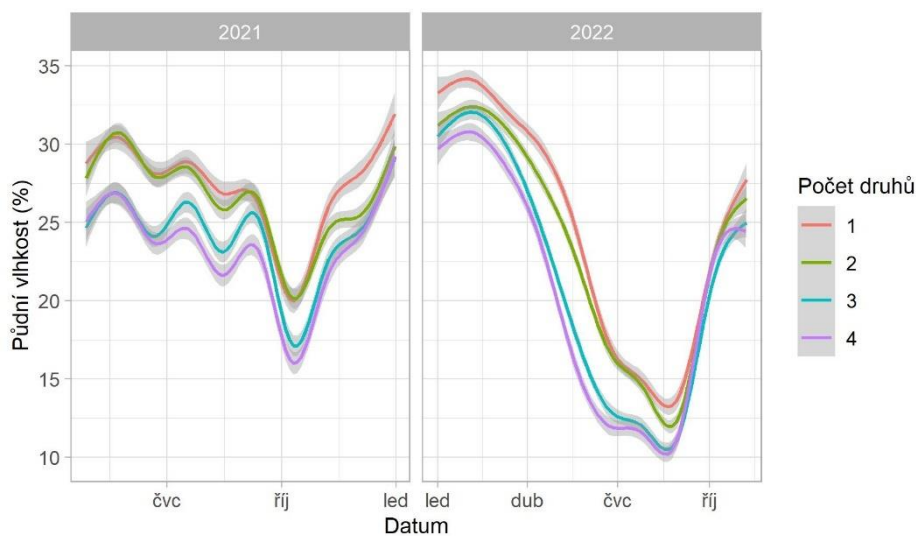
nařítovány zobecněné aditivní modely (GAM). Ty byly vytvořeny pro všechny předem vypočítané hodnoty půdní vlhkosti, teploty půdy a vzduchu v denním časovém kroku. Všechny zobrazené GAM modely byly statisticky významné ($P < 0,001$), tudíž jejich hodnoty v kapitole Výsledky již nejsou zobrazovány.

Kromě trendů v čase byly rovněž testovány vlivy druhové skladby a druhové bohatosti na průměrné hodnoty těchto proměnných. K tomu bylo využito lineárních modelů se smíšenými efekty. V těchto modelech tvořily mikroklimatické faktory proměnnou závislou a druhová skladba, druhová bohatost a management proměnnou nezávislou. Jako nahodilá proměnná bylo použito číslo dataloggeru, čímž došlo k omezení nežádoucího efektu pseudoreplikace. Výsledky byly následně zobrazeny v grafech pomocí balíčku ggplot2.

5 Výsledky

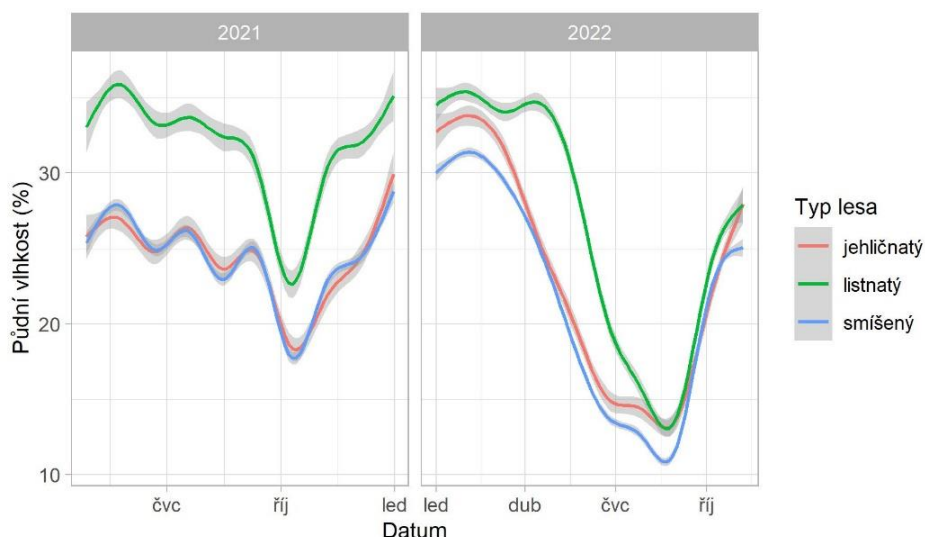
5.1 Půdní vlhkost

Průběh půdní vlhkosti v závislosti na počtu druhů ve směsích obecně ukázal, že půdní vlhkost byla konstantně nejvyšší v jednodruhových směsích, a naopak nejnižší ve směsích čtyřdruhových (obr. 5). Dále se ukázalo, že v roce 2022 došlo k výraznému poklesu půdní vlhkosti rovnoměrně ve všech variantách směsí (obr. 5).



Obr. 5. Půdní vlhkost v letech 2021 a 2022 v závislosti na počtu druhů dřevin ve směsi.

Z hlediska typu lesa byla trvale nejvyšší půdní vlhkost v porostech listnatých (obr. 6). Porosty smíšené a jehličnaté se hodnotami v roce 2021 příliš nelišily, v roce 2022 vykazovaly jehličnaté porosty znatelně vyšší půdní vlhkost než porosty listnaté. Dále byl zaznamenán výrazný pokles půdní vlhkosti v létě roku 2022, kdy nejnižší hodnoty vlhkosti vykazovaly lesy smíšené (obr. 6).

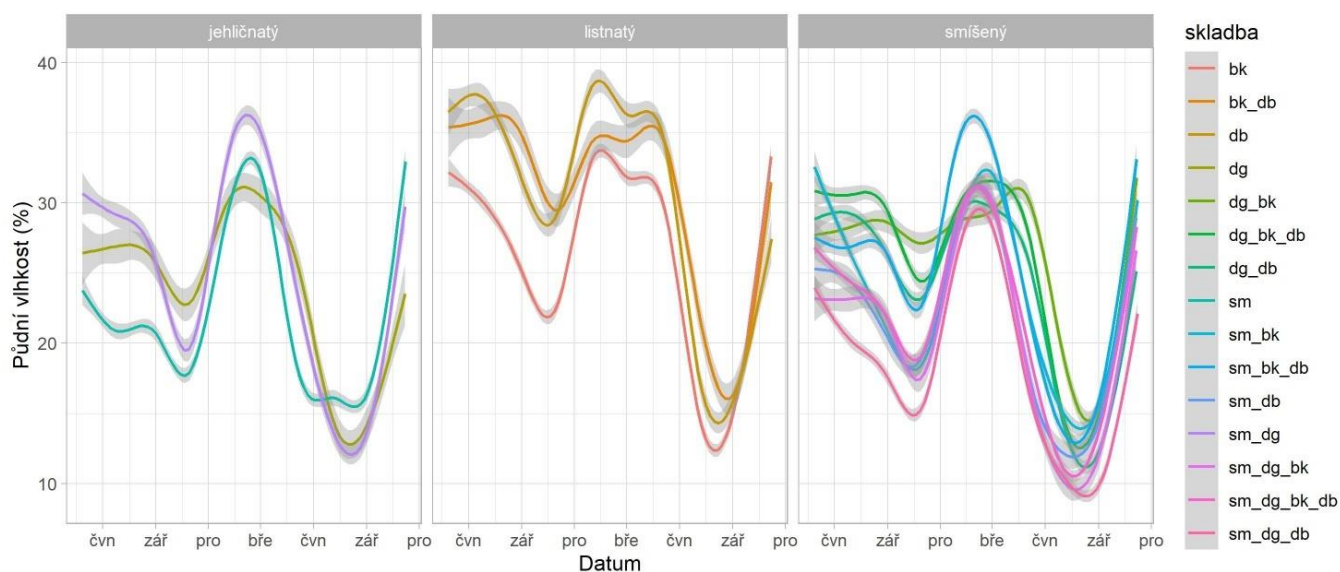


Obr. 6. Půdní vlhkost v letech 2021 a 2022 v závislosti na typu lesa.

Při pohledu na konkrétní druhovou skladbu se v jehličnatých porostech nejvíce vlhkosti průměrně drželo ve smíšených porostech smrku a douglasky, ale hodnoty vlhkosti značně klesaly v letních obdobích (obr. 7). Naopak průměrně nejnižší hodnoty vlhkosti ukazyvaly porosty čistě smrkové, které si však v letních měsících, především roku 2022, udržely více vlhkosti než porosty douglasky a směs smrk-douglaska (obr. 7).

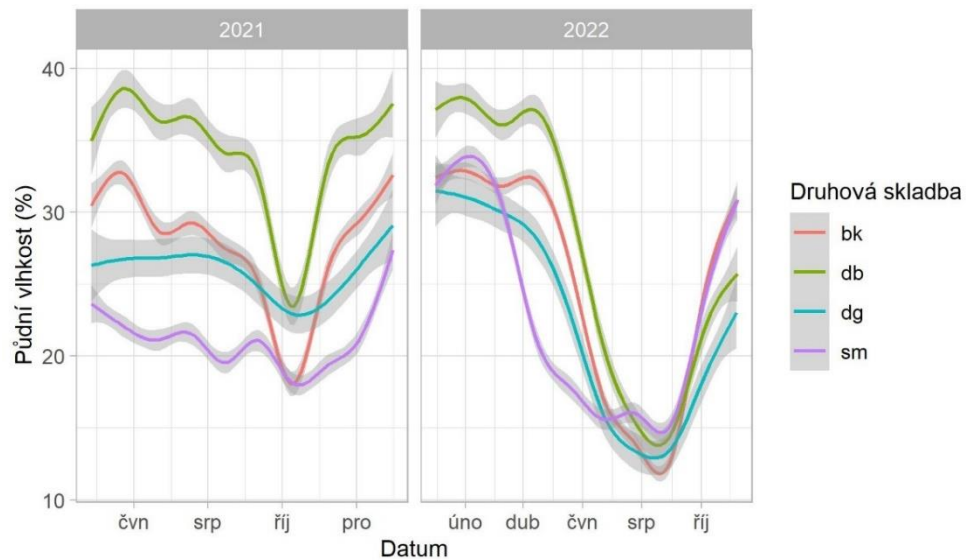
V porostech listnatých byla nejvyšší půdní vlhkost v dubových porostech, které v letních měsících vyšší hodnotou předčily porosty směsi buk-dub. Trvale nejnižší vlhkost byla naměřena v bukových porostech (obr. 7).

Smíšené porosty vykazovaly nejvyšší hodnotu vlhkosti ve směsi smrk-buk v jarních a podzimních měsících, v letním období si maximum vlhkosti udržely porosty se směsí douglaska-buk-dub (obr. 7).



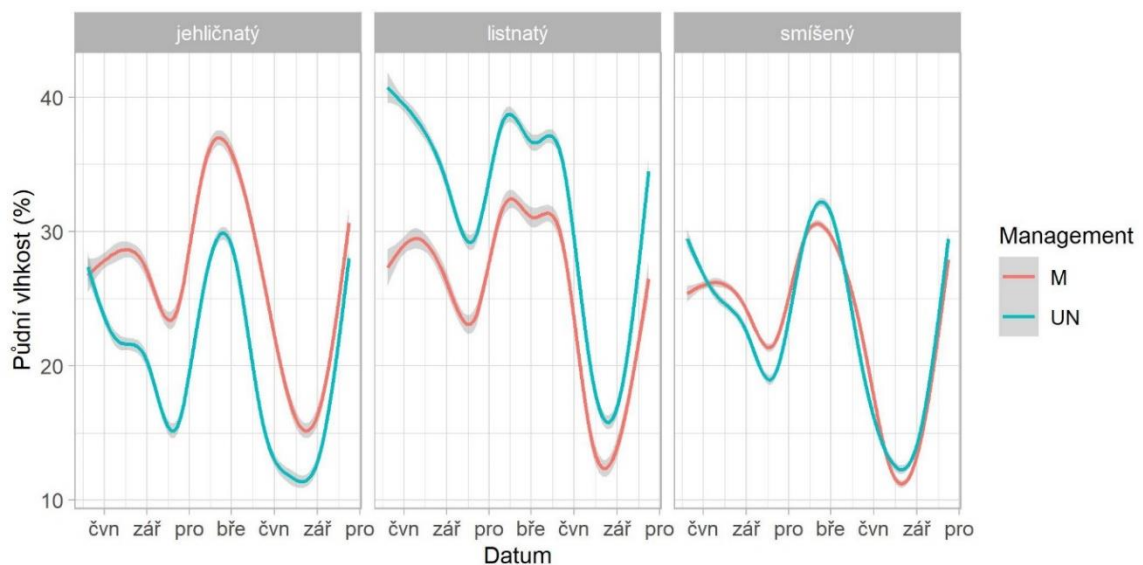
Obr. 7. Půdní vlhkost v letech 2021 a 2022 rozčleněna dle druhu lesa a druhové skladby (sm = smrk ztepilý, dg = douglaska tisolistá, bk = buk lesní a db = dub zimní).

V monokulturách byla maxima půdní vlhkosti zaznamenána v dubových porostech (obr. 8). Nejnižší hodnoty vykázaly porosty smrkové. U porostů listnatých dřevin lze vidět trend výrazného poklesu vlhkosti v říjnu roku 2021, stejně tak v srpnu roku 2022. Naopak porosty jehličnatých dřevin neměly takto výrazně průběh, dokonce v srpnu a v podzimních měsících v roce 2022 si smrkové porosty zachovaly nejvyšší míru půdní vlhkosti (obr. 8).



Obr. 8. Půdní vlhkost na výzkumných plochách v zastoupení jedné dřeviny (monokultury).

Půdní vlhkost v závislosti na způsobu hospodaření vykazovala značné rozdíly mezi porosty jehličnatými, listnatými a smíšenými. Zatímco v jehličnatých porostech byla vlhkost po celou dobu měření výrazně vyšší v porostech s managementem, v listnatých porostech byla naopak její hodnota značně vyšší v porostech bez managementu. Smíšené porosty vykazovaly podobné hodnoty půdní vlhkosti v obou způsobech hospodaření (obr. 9).

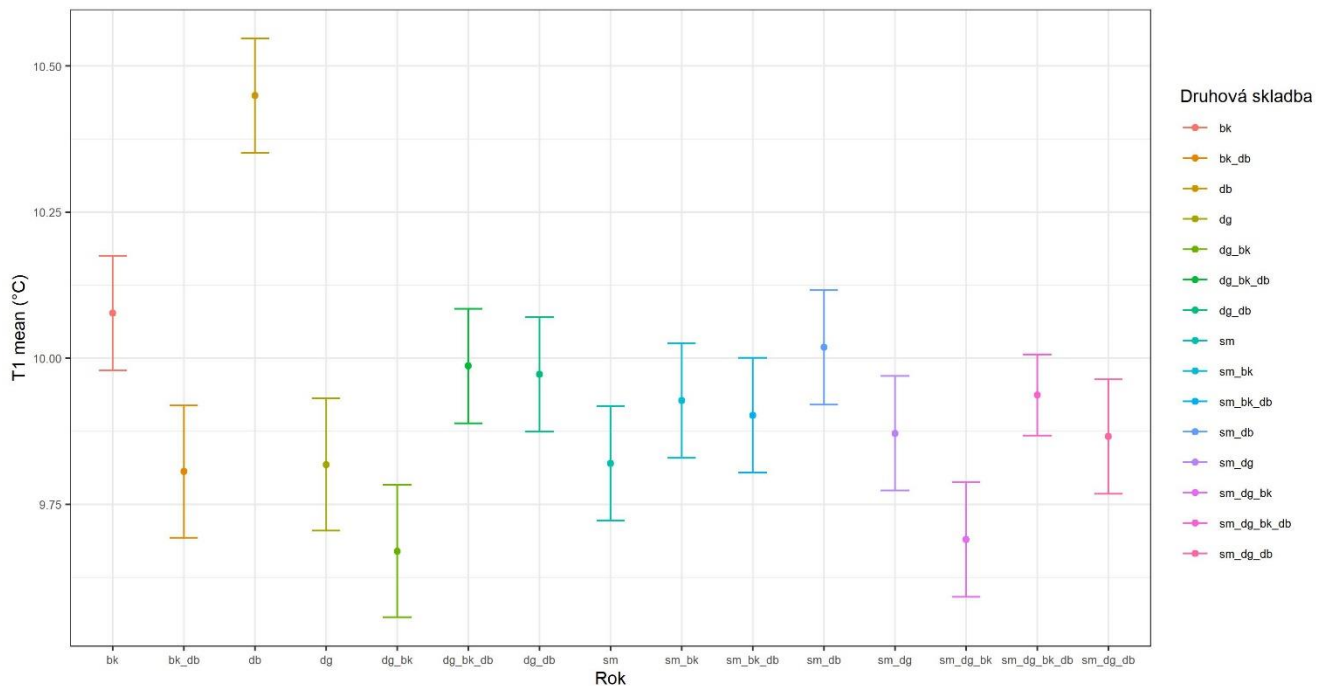


Obr. 9. Půdní vlhkost v závislosti na způsobu hospodaření v porostech jehličnatých, listnatých a smíšených. M označuje porosty obhospodařované, UN označuje porosty bez hospodaření.

5.2 Teplota půdy (T1) a na povrchu půdy (T2)

5.2.1 Teplota půdy T1

Průměrná teplota T1 se statisticky významně lišila mezi směsmi druhů ($P < 0,001$). Za období jednoho roku při pohledu na druhovou skladbu porostů byla nejvyšší průměrná teplota půdy T1 v dubových porostech ($P < 0,001$), od ostatních porostů se v průměru lišila téměř o 0,5 °C. Vyšší hodnoty průměrné půdní teploty zaznamenaly i porosty bukové, naopak nejchladnější v průběhu celého roku byla směs douglaska-buk a směs smrk-douglaska-buk (obr. 10).

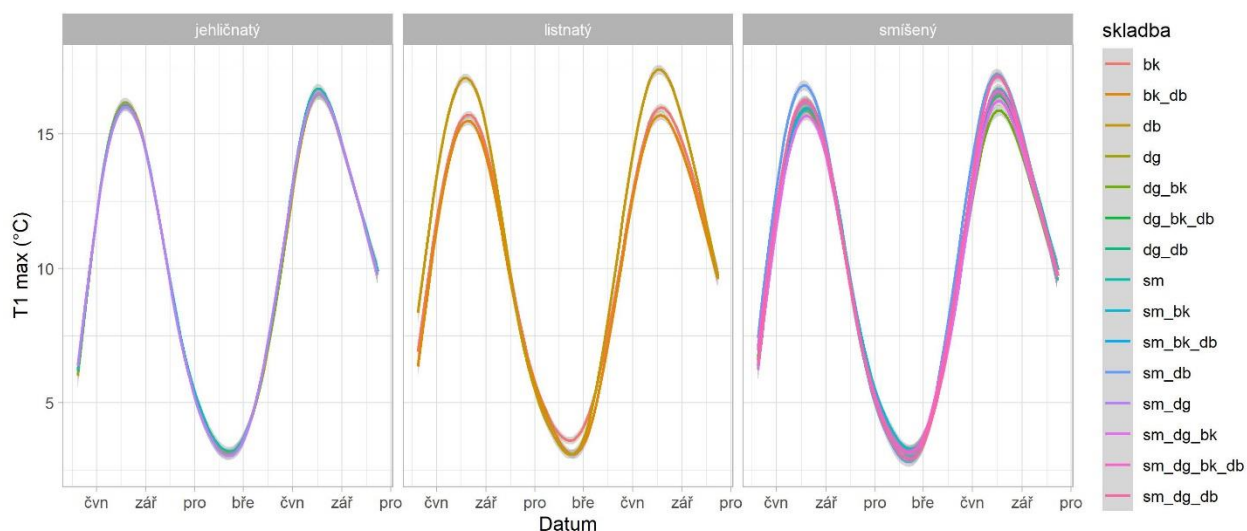


Obr. 10. Průměrná teplota půdy T1 (°C) v porostech s různou druhovou skladbou za období jednoho roku.

Při pohledu na průběh teplot v rámci měřeného období se maxima teploty půdy T1 v jehličnatých porostech s ohledem na druhovou skladbu téměř nelišila. Smíšené porosty už vykazovaly znatelné výkyvy, kdy maximálních teplot půdy dosahovala směs smrk-dub, ostatní směsi měly srovnatelné hodnoty (obr. 11).

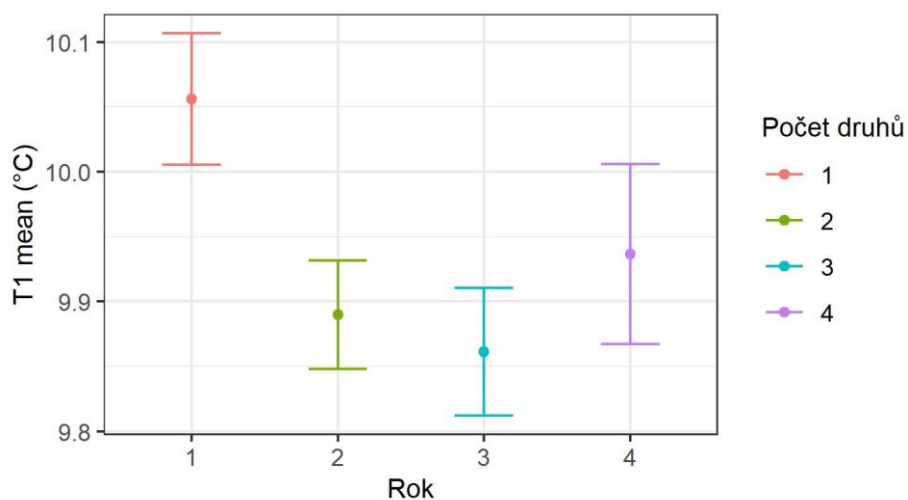
Nejvíce viditelný byl rozdíl v maximálních teplotách v listnatých porostech, kde si téměř po celý rok, kromě zimních měsíců, nejvyšší maximální teplotu udržely porosty dubové. V zimní měsících maximální teplotu ze všech typů porostů vykazovaly porosty buku (obr. 11).

Lze také vyzorovat, že ve vegetačním období byla teplota T1 viditelně vyšší v roce 2022 (obr. 11).



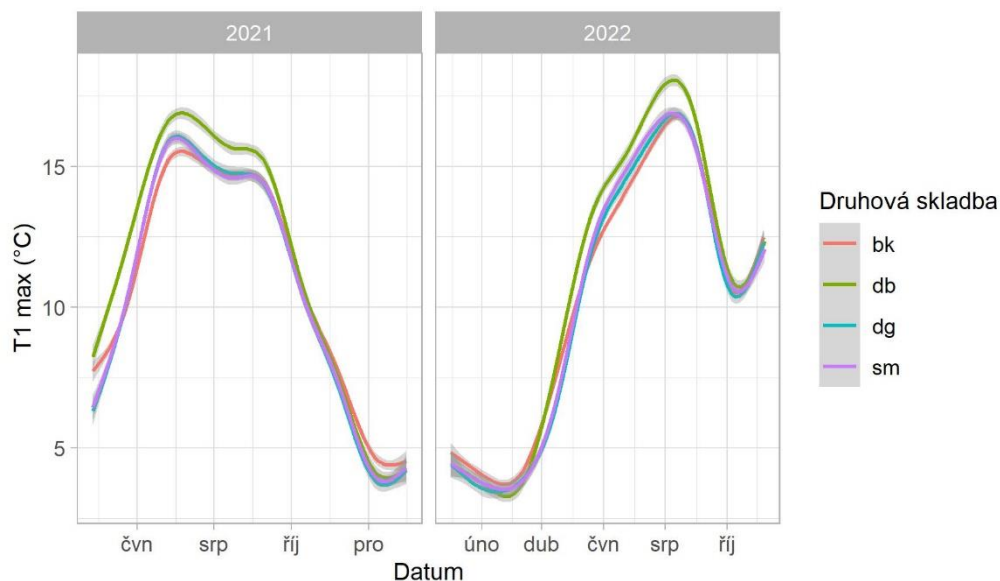
Obr. 11. Denní maxima teploty půdy T1 (°C) v průběhu měření s ohledem na typy lesa a jejich druhovou skladbu.

V závislosti na počtu druhů v porostu se ukázalo, že průměrná teplota půdy T1 za období jednoho roku dosahovala nejvyšších hodnot v jednodruhových porostech ($P < 0,001$) a nejchladnější se projevíly porosty se směsí tří dřevin (obr. 12).



Obr. 12. Průměrná hodnota teploty půdy T1 za období jednoho roku v závislosti na počtu druhů ve směsi.

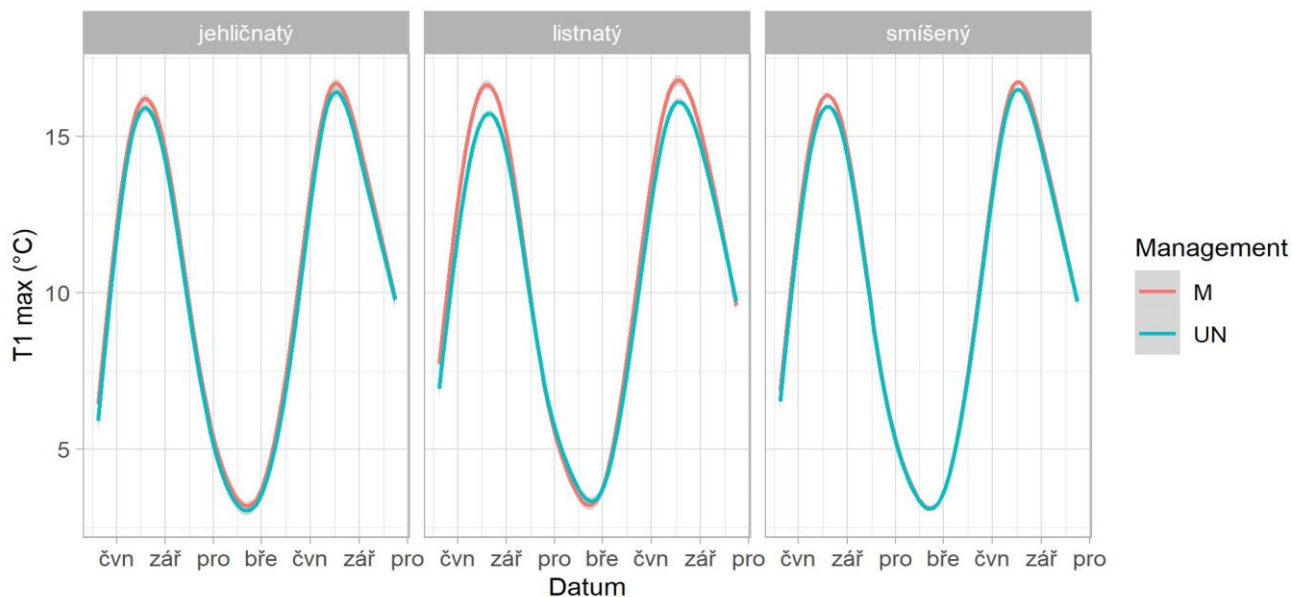
Při porovnání monokultur a zhodnocení denního maxima teploty T1 nejvyšších hodnot dosahovaly porosty dubové ($P < 0,001$), a to především v letních měsících, ostatní porosty s jednou hlavní dřevinou vykazovaly rovnoměrné hodnoty a statisticky se významně nelišily ($P > 0,05$; obr. 13).



Obr. 13. Maxima teploty půdy T1 se zaměřením na porosty s jednou hlavní dřevinou.

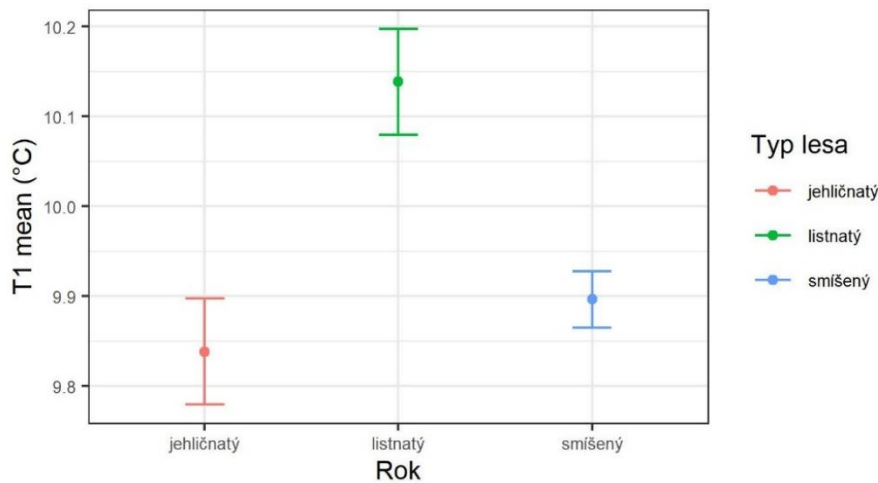
S ohledem na způsob hospodaření se v jehličnatých a smíšených porostech příliš neprojevil vliv managementu na teplotu půdy T1, pouze ve vegetačním období byla teplotní maxima mírně vyšší v porostech obhospodařovaných (obr. 14).

Větší rozdíly se ukázaly v porostech listnatých, kdy porosty s managementem v letních měsících vykazovaly vyšší teplotní maxima než porosty bez managementu (obr. 14).



Obr. 14. Vliv managementu v porostech jehličnatých, listnatých a smíšených na teplotu půdy T1. M označuje porosty obhospodařované, UN porosty bez hospodaření.

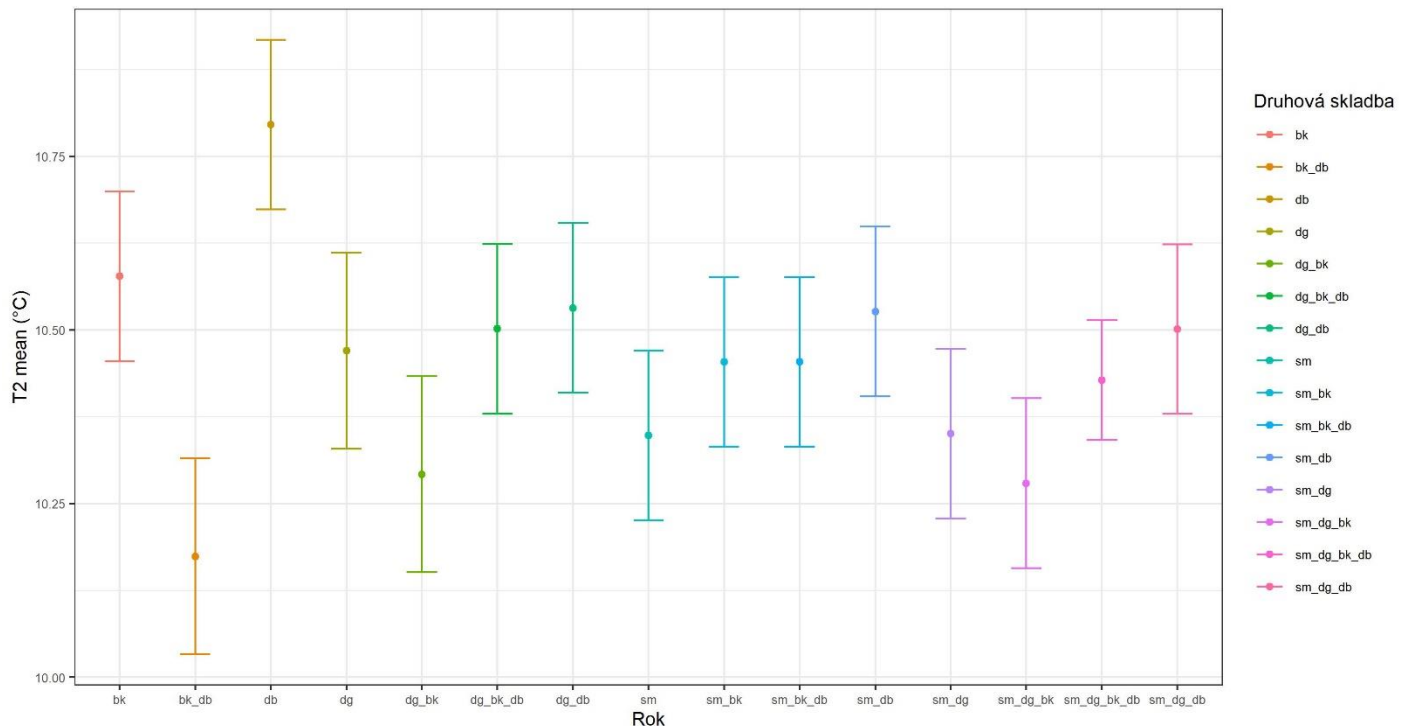
Dle typu lesa byla za období jednoho roku průměrná teplota půdy T1 nejvyšší v listnatých porostech ($P < 0,001$), naopak nejnižší byla v porostech jehličnatých (obr. 15).



Obr. 15. Průměrná teplota T1 (°C) za období jednoho roku v závislosti na typu lesa.

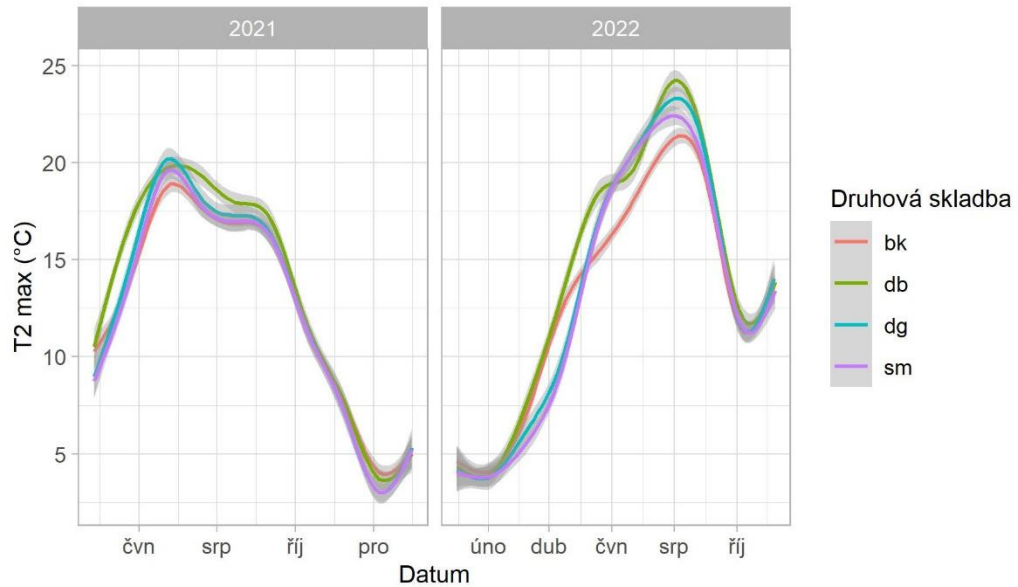
5.2.2 Teplota na povrchu půdy (T2)

Většina naměřených hodnot teplot T1 a T2 byla srovnatelná a vykazovala stejné tendence. V porovnání s teplotou půdy T1 byla průměrná teplota na povrchu půdy T2 za období jednoho roku přibližně o 0,5 °C vyšší (obr. 10, 16). Dubové porosty při teplotě T2 měly stále nejvyšší hodnoty, nicméně rozdíl s ostatními porosty jiné druhové skladby již nebyl tak patrný. Viditelně nižší průměrnou teplotu T2 prokázaly směsi buku a douglasky (obr. 16).

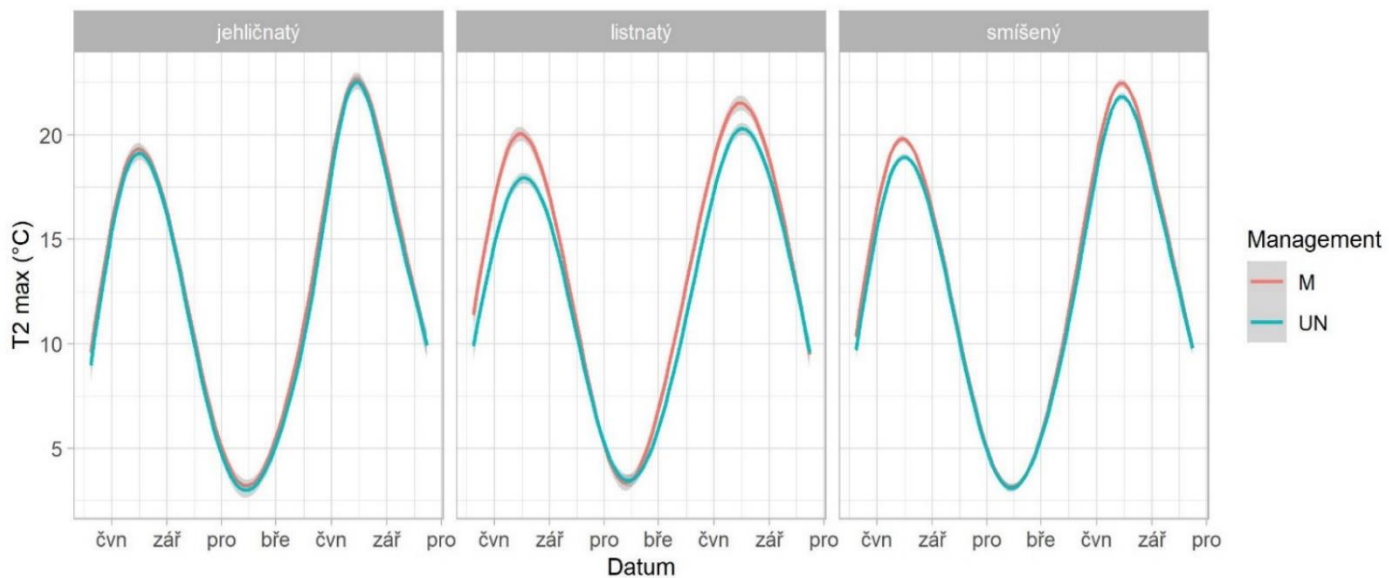


Obr. 16. Průměrné hodnoty teploty na povrchu půdy T2 v závislosti na různé druhové skladbě porostů.

V porovnání teplot T1 a T2 v jednodruhových porostech byly viditelné rozdíly. Maxima teploty půdy T1 si po celou dobu měření zachovávaly dubové porosty (obr. 13). V případě teploty půdy na povrchu T2 již rozdíl v maximálních hodnotách nebyl tak patrný, dokonce v červnu roku 2021 i 2022 byly maxima teploty T2 naměřena v monokulturách douglasky a smrku. Bukové porosty si v průběhu letních měsíců, ztatečně především v roce 2022, zachovávaly nejnižší hodnoty teplot T2 (obr. 17).



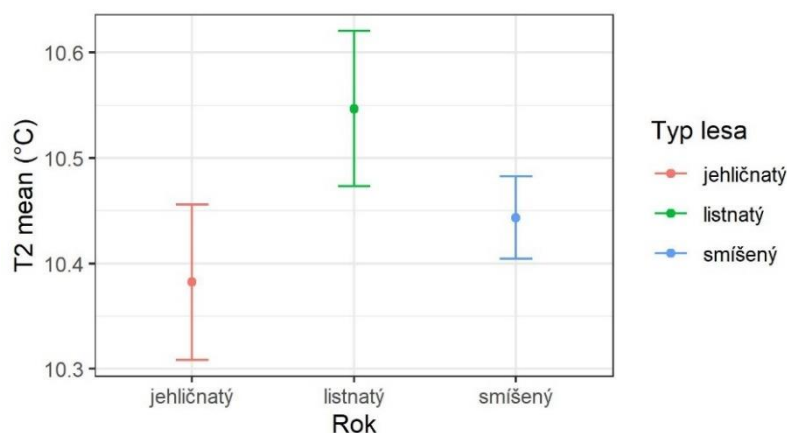
Obr. 17. Teplota na povrchu půdy T2 měřená v letech 2021 a 2022 v monokulturách buku lesního, dubu zimního, douglasky tisolisté a smrku ztepilého.



Obr. 18. Vliv managementu v porostech jehličnatých, listnatých a smíšených na teplotu na povrchu půdy T2. M označuje porosty obhospodařované, UN porosty bez hospodaření.

S ohledem na způsob hospodaření se v jehličnatých porostech neprojevil téměř žádný vliv teploty na povrchu půdy T2. Značný vliv mělo hospodaření na porosty listnaté, kdy porosty s managementem vykazovaly teplotu půdy v roce 2021 přibližně o 2 °C vyšší v letních měsících než porosty bez managementu. Porosty smíšené ukázaly shodnou tendenci s porosty listnatými, nicméně s menším teplotním rozdílem (obr. 18).

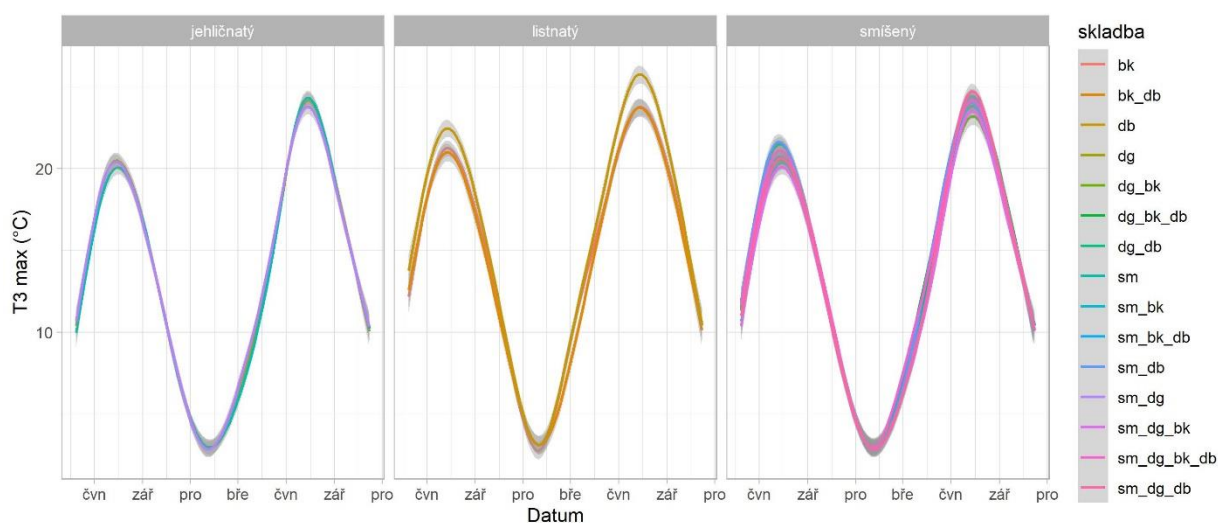
V porovnání s teplotou T1 se způsob hospodaření v listnatých a smíšených porostech projevoval na teplotě T2 více a způsoboval větší teplotní rozdíly, především v letních měsících (obr. 18).



Obr. 19. Průměrná teplota na povrchu půdy T2 (°C) za období jednoho roku v závislosti na typu lesa.

Průměrná teplota na povrchu půdy T2 v závislosti na typu lesa nabývala nejvyšších hodnot v listnatých porostech a nejnižších v porostech jehličnatých. V porovnání s teplotou T1 se však rozdíl mezi hodnotami viditelně snížil (obr. 19).

5.3 Teplota vzduchu T3

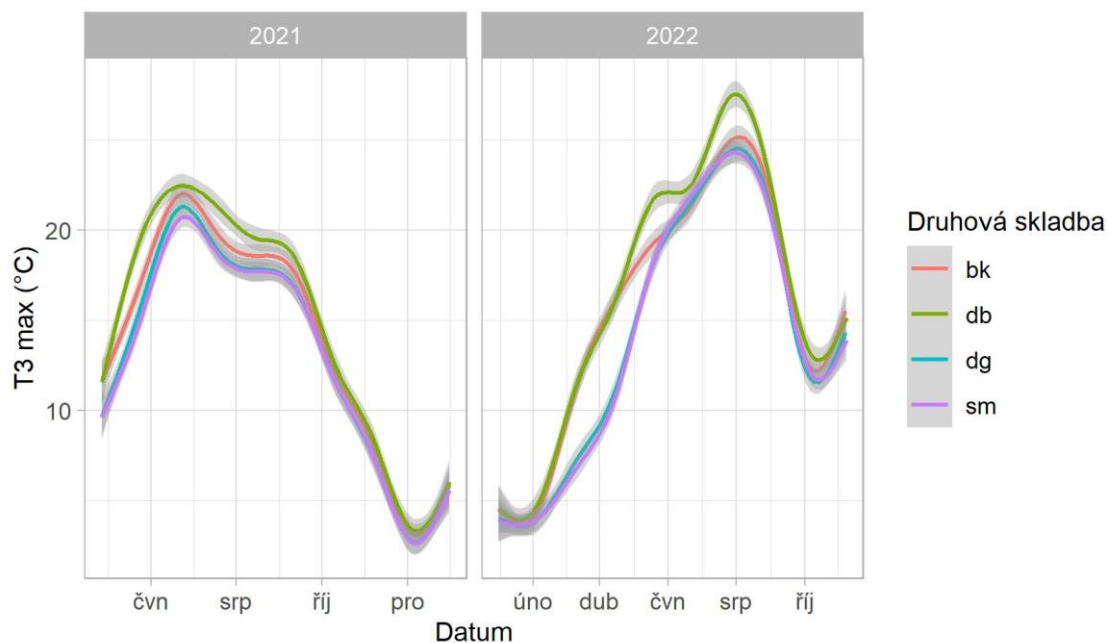


Obr. 20. Maximální hodnoty teploty vzduchu T3 (°C) v jehličnatých, listnatých a smíšených porostech.

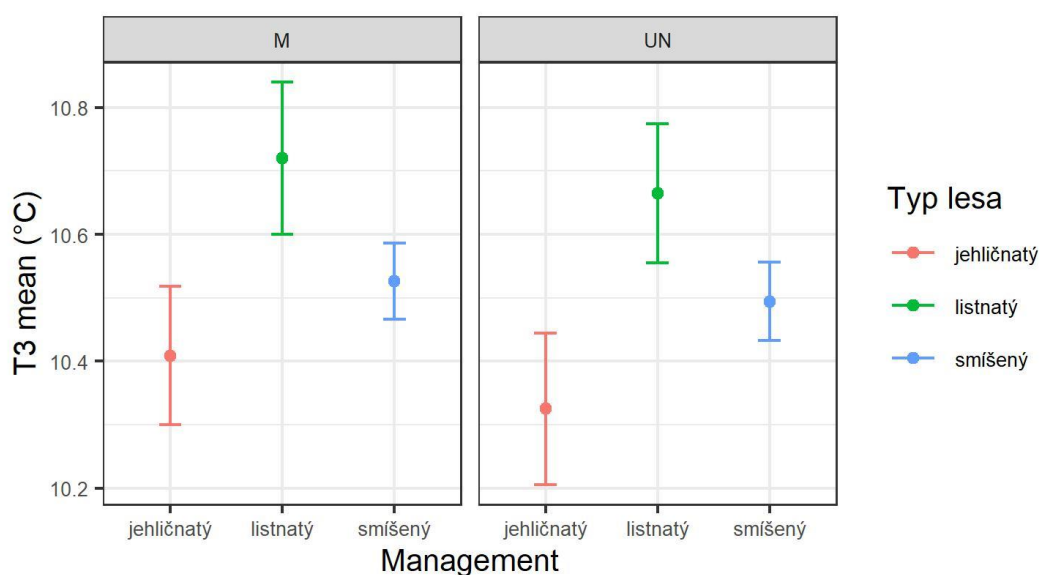
Maximální hodnoty teploty vzduchu T3 se v jehličnatých a smíšených porostech téměř nelišily. V porostech listnatých panovaly v období od května do října v obou letech nejvyšší teploty vzduchu v dubových porostech (obr. 20).

V rámci jednodruhových porostů byla v průběhu vegetačního období maxima teploty T3 naměřena v dubových porostech, druhé nejvyšší hodnoty byla měřeny v porostech buku. Porosty smrku a douglasky vykazovaly nejnižší teploty vzduchu (obr. 21).

Lze také vypožorovat, že v červenci a srpnu roku 2022 byla teplota T3 výrazně vyšší než v roce 2021 (obr. 21).



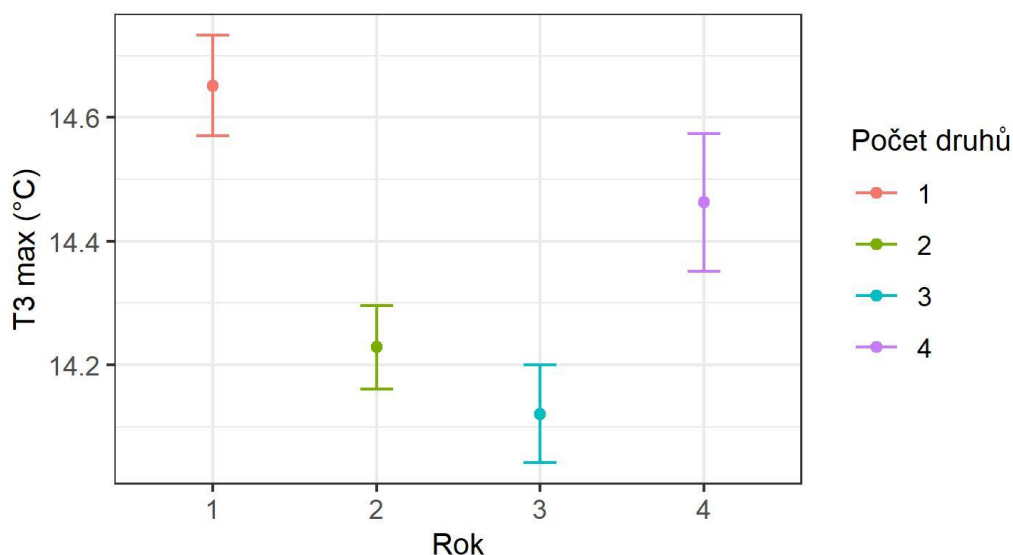
Obr. 21. Maximální hodnoty teploty T3 (°C) v rámci jednodruhových porostů buku, dubu, douglasky a smrku.



Obr. 22. Průměrná teplota vzduchu T3 (°C) v jehličnatých, listnatých a smíšených porostech v závislosti na způsobu hospodaření. M označuje porosty s managementem, UN označuje porosty bez managementu.

Při pohledu na způsob hospodaření v jehličnatých, listnatých a smíšených porostech, ovlivňující teplotu vzduchu T3, vykazovaly porosty s managementem vyšší průměrné teploty ve všech typech porostů. Nejvýraznější rozdíl průměrných teplot se projevil v porostech listnatých (obr. 22).

V závislosti na počtu druhů byla maxima teploty T3 naměřena v jednodruhových porostech a významně se lišila od vícedruhových směsí ($P < 0,001$), naopak nejnižší maximální hodnoty teploty vzduchu zaznamenaly směsi tří druhů dřevin (obr. 23).



Obr. 23. Maximální hodnoty teploty T3 (°C) za období jednoho roku v závislosti na počtu druhů v porostu.

6 Diskuse

6.1 Půdní vlhkost

Výsledná data půdní vlhkosti zkoumaná v závislosti na typu lesa ukázala, že trvale nejvyšší půdní vlhkost v rámci měřeného období byla v porostech listnatých. Porosty smíšené a jehličnaté se hodnotami v roce 2021 příliš nelišily, v roce 2022 vykazovaly jehličnaté porosty znatelně vyšší půdní vlhkost než porosty smíšené (obr. 6).

Při bližším pohledu na konkrétní druhovou skladbu se jako porosty s nejvyšší mírou půdní vlhkosti projevíly dubové porosty, následované porosty bukovými a obecně si vyšší hodnoty půdní vlhkosti udržely právě směsi s výskytem dubu a buku (obr. 7).

Značné množství vlhkosti si v zimních měsících také ponechávala směs smrku, buku a dubu v rámci smíšených porostů a směs smrku a douglasky z porostů jehličnatých (obr. 7).

Tyto výsledky ukazují na dub jako na dřevinu schopnou udržet velké množství půdní vlhkosti, a to pravděpodobně díky jeho kořenovému systému. Zapater et al. (2011) potvrzuje silnou schopnost hluboce kořenicího dubu využívat tzv. hydraulický zdvih, tedy přenos vody pomocí kořenů z vlhčích a hlubších vrstev půdy do mělkých a sušších vrstev.

Tato schopnost může přispívat k vodní bilanci celého ekosystému a zajišťovat přerozdělování vody mezi ostatní druhy. Jako vhodné se tedy z tohoto hlediska jeví směsi dubů s mělčejí kořenícími dřevinami, které by díky hydraulickému zdvihu měly přísun většího množství vody.

Monokultury smrku, následně douglasky, vykazovaly v porovnání s jednodruhovými porosty dubu a buku nejnižší hodnoty půdní vlhkosti (obr. 8). Důvodem u smrkových porostů by mohl být kořenový systém rozložený do horních vrstev půdy, omezující přísun vody z nižších vrstev, a zároveň silné nároky smrku na vzdušnou i půdní vlhkost.

Také bylo pozorováno, že jehličnaté porosty při výraznějším suchu v září a říjnu roku 2021 a především v létě roku 2022 nereagovaly tak výrazným poklesem vlhkosti, jako porosty listnatých dřevin. Možným důvodem by mohla být rozdílná struktura porostů, kdy smrk a douglaska vytváří husté, zapojené porosty s menší propustností slunečního záření, a tím jsou schopny zadržet půdní vlhkost po určitou dobu i v teplotních extrémech, zatímco především porosty dubové jsou otevřenější a na ztrátu půdní vlhkosti tak klimatické faktory působí mnohem více. Bylo prokázáno, že právě korunová vrstva je schopna výrazně ovlivňovat mikroklimatické podmínky porostu, především regulací slunečního záření a výměnou vzduchu (De Frenne et al., 2021; Zellweger et al., 2019) a Ehbrecht et al. (2019) uvádí, že čím mohutnější a rozmanitější korunová vrstva je, tím je výraznější její tlumící schopnost.

Z hlediska počtu druhů ve směsích byla nejvyšší půdní vlhkost konstantně v jednodruhových porostech, téměř stejných hodnot dosahovaly směsi dvou druhů. Naopak nejméně vlhkosti si ponechávaly směsi čtyřdruhové (obr. 5). Vysoké hodnoty půdní vlhkosti v monokulturách zapříčinily zřejmě porosty dubu. S ohledem na nejistý vývoj klimatu do budoucna však není možné s jistotou vybrat jeden druh dřeviny, který by byl schopen zajistit veškeré ekosystémové funkce. Jako nejvhodnější se tedy z hlediska půdní vlhkosti jeví dvoudruhové směsi a například Pretzsch et al. (2014) uvádí, že přechod monokultur na směsi dvou druhů má největší vliv na zvýšení produktivity, zatímco s každým dalším druhem se míra produktivity snižuje. Za příčinu nejnižší hodnoty půdní vlhkosti v porostech čtyř druhů lze považovat různý tvar kořenových systémů jednotlivých druhů a rozdílné schopnosti využívat půdní vodu. V těchto porostech je tedy voda využívána maximálně efektivně ve všech vrstvách půdy a její množství oproti směsím s menším počtem druhů značně klesá. Pretzsch (2014) dále konstatuje, že smíšené porosty vytváří větší pestrost stanoviště, lepší půdní poměry, podporují biodiverzitu ostatních rostlin a živočichů, stejně tak zvyšují odolnost vůči disturbancím, nicméně tyto výhody mohou být také spojeny s úbytkem půdní vody a ztrátou kvality dřeva.

Mnoho studií dokázalo pozitivní vliv biologické rozmanitosti na produktivitu lesů (Paquette and Messier, 2011, Pretzsch et al., 2015), nicméně funkce rozmanitějších ekosystémů na zmírnění negativních dopadů klimatické změny není zcela jednoznačná (Paquette et al., 2018). Je tedy důležité se nejen zaměřit na tvorbu druhově bohatých lesů, ale především na funkčnost daných směsí s ohledem na charakteristiky stanoviště.

6.2 Teploty půdy T1, T2 a teplota vzduchu T3

V případě průměrné teploty půdy v závislosti na druhové skladbě dosahovaly nejvyšších hodnot porosty dubu, které se od ostatních porostů lišily téměř o 0,5 °C. Vyšší hodnoty průměrné půdní teploty zaznamenaly i porosty bukové, naopak nejchladnější v průběhu celého roku byla směs douglaska-buk a směs smrk-douglaska-buk (obr. 10).

Z hlediska jednodruhových směsí byla maxima teploty půdy i teploty vzduchu naměřena v dubových porostech po celé vegetační období, porosty buku, smrku a douglasky vykazovaly podobné hodnoty po celou dobu měření (obr. 13, 21).

Dle typu lesa byla v rámci měřeného období průměrná teplota půdy T1 a teplota na povrchu půdy T2 nejvyšší v listnatých porostech, naopak nejnižší byla v porostech jehličnatých (obr. 15, 19).

Nejvyšší hodnoty teplot v dubových porostech pravděpodobně odráží charakteristiku jejich korunové vrstvy. Duby vytváří koruny s poměrně hustým olistěním na povrchu, zatímco vnitřní prostor koruny je olistěn méně. Hustota olistění, potažmo hodnota LAI, je tedy výrazně nižší v porovnání například s porosty bukovými a vnitřek porostu se obvykle vyznačuje větší otevřeností (Leuschner et al., 2023). Do porostu tak proniká více slunečního záření a je umožněno větší proudění vzduchu.

Obecně lze poznamenat, že schopnost porostu ovlivňovat teplotní extrémy se odvíjí od jeho charakteru a struktury, a že s ohledem na korunovou vrstvu mají největší vliv porosty s vysokým LAI a s vyšší uzavřeností stromového patra (Aussenac, 2000).

V závislosti na počtu druhů byla maxima teploty půdy a vzduchu nejvyšší v jednodruhových porostech, nejnižší byla naměřena ve směsích tří druhů (obr. 12, 23). Ačkoli je vždy vhodnější hodnotit konkrétní druhovou skladbu, tyto výsledky podporují hodnocení vícedruhových porostů jako schopnějších lépe plnit ekosystémové i ekonomické funkce v porovnání s monokulturami. Pretzsch (2014) uvádí, že struktura korun ve smíšených porostech je vlivem mezidruhové konkurence mnohem rozmanitější a může mít za následek vyšší hustotu porostu a hustší korunový zápoj. Tato vlastnost může mít zásadní vliv na teplotu půdy a vzduchu, stejně tak na ostatní hodnoty mikroklimatu.

Maxima všech teplot byla v jednotlivých typech lesa různě ovlivňována managementem. V jehličnatých porostech neměl způsob managementu na teploty T1 a T2 téměř žádný vliv. Listnaté porosty reagovaly v letních měsících výrazným zvýšením teplot na plochách s managementem, stejně tak v menší míře porosty listnaté (obr. 14, 18). Tyto výsledky se opět odvíjí od struktury korunového patra, kdy plochy s vyšším LAI byly schopné tlumit maximální teploty, naproti tomu v porostech se sníženým LAI způsobeným managementem se teploty zvyšovaly.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jak hlavní dřeviny středoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima, konkrétně půdní vlhkost, teplotu půdy a teplotu vzduchu. Měření byla prováděna na výzkumné ploše Kaltenborn v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu pod záštitou nejvýznamnější celosvětové sítě experimentálních výzkumů biodiverzity lesů TreeDivNet. V rámci experimentu zde byly vysazeny hospodářsky významné druhy střední Evropy buk lesní, dub zimní a smrk ztepilý a jeden zástupce druhů introdukovaných s potenciálním významem, douglaska tisolistá, ve všech možných kombinacích v rámci 1-4 druhových směsí. Do dílčích úseků výzkumné plochy byla nainstalována mikroklimatická čidla TMS4 zaznamenávající teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost.

Vyhodnocení dat ukázalo, že půdní vlhkost si po celou dobu měření nejlépe udržely porosty listnaté. Při pohledu na konkrétní druhovou skladbu byla nejvyšší půdní vlhkost v dubových porostech, následovaných porosty bukovými a obecně si vyšší hodnoty půdní vlhkosti udržely právě směsi s výskytem dubu a buku. Možným důvodem vysoké půdní vlhkosti v dubových porostech může být hluboký kořenový systém dubů s významnou schopností přenosu vody z hlubších vrstev půdy do mělkých pomocí hydraulického zdvihu. Z jehličnatých porostů si půdní vlhkost nejhůře zachovaly smrkové monokultury, zatímco douglaska v čistých porostech vykazovala vyšší hodnoty. Tyto výsledky podporují předpoklady využití douglasky tisolisté jako vhodné náhrady za smrk ztepilý, také však ukazují, že nejlepších hodnot půdní vlhkosti dosahovala směs těchto druhů, jako nejvhodnější se tedy nabízí jejich kombinace.

Teploty půdy a vzduchu dosahovaly nejvyšších hodnot v listnatých porostech, především v porostech dubových. To odráží výstavbu jejich korunové vrstvy, kdy porosty dubu jsou v porovnání s bukovými porosty otevřenější a mají nižší hodnotu LAI, kvůli tomu do porostu proniká více slunečního záření a je umožněno větší proudění vzduchu. Nejvyšší teploty také panovaly v monokulturách, naopak nejchladnější byly směsi tří druhů zřejmě z důvodu složitější a hustší výstavby korunového patra. Toto zjištění z pohledu snížení teplotních extrémů podporuje snahu posledních desetiletí přeměnit jednodruhové porosty na smíšené. Způsob managementu také dokázal, především v porostech listnatých a smíšených, významný vliv výchovných zásahů na teplotní maxima. Porosty s managementem, tedy se sníženou hodnotou LAI, vykazovaly vyšší maxima teplot než porosty bez provedení výchovného zásahu.

Výsledky této bakalářské práce ukazují, že druhová skladba lesních porostů významně ovlivňuje mikroklimatické funkce lesa a že vytvářením vhodných kombinací druhů například s jinými světelnými nároky, jinou stavbou kořenových systémů nebo odlišnou morfologií korun lze vytvářet optimální mikroklimatické podmínky porostu. Pro podporu půdní vlhkosti se jako nejlepší jeví listnaté porosty, ale pro omezení teplotních extrémů naopak porosty jehličnaté nebo smíšené.

8 Literatura

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manage* 259, 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Aussenac, G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture, *For. Sci.*
- Baltodano, J., 2000. Monoculture forestry: a critique from an ecological perspective. *Tree trouble: a compilation of testimonies on the negative impact of large-scale monoculture tree plantations prepared for the 6th COP of the FCCC.*
- Bolte, A., Ammer, C., Löf, M., Madsen, P., Nabuurs, G.J., Schall, P., Spathelf, P., Rock, J., 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res.* <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>
- Brown, C., Ball, J., 2009. World view of plantation grown wood 1 by.
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P.W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W.W.L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F.E.L., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D.C., Roy, J., Ruane, A.C., Skea, J., Shukla, P.R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A.A., Tignor, M., van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F.X., Pachauri, S., Simpson, N.P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., van der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Chen, J., Saunders, S.C., Crow, T.R., Naiman, R.J., Brosofske, K.D., Mroz, G.D., Brookshire, B.L., Franklin, J.F., 1999. Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes Microclimate directly influences ecological processes and reflects subtle changes in ecosystem function and landscape structure across scales.
- Chen, Y., Liu, Y., Zhang, J., Yang, W., He, R., Deng, C., 2018. Microclimate exerts greater control over litter decomposition and enzyme activity than litter quality

in an alpine forest-tundra ecotone. *Sci Rep* 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33186-4>

- Chytrý, M., 2012. Modularizace výuky evoluční a ekologické biologie vegetace evropy.
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B.R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M.B., Christiansen, D.M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klinges, D.H., Koelemeijer, I.A., Lembrechts, J.J., Marrec, R., Meeussen, C., Ogée, J., Tyystjärvi, V., Vangansbeke, P., Hylander, K., 2021. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Glob Chang Biol*. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- E Silva, D., Rezende Mazzella, P., Legay, M., Corcket, E., Dupouey, J.L., 2012. Does natural regeneration determine the limit of European beech distribution under climatic stress? *For Ecol Manage* 266, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.031>
- Eggers, J., Lindner, M., Zudin, S., Zaehle, S., Liski, J., 2008. Impact of changing wood demand, climate and land use on European forest resources and carbon stocks during the 21st century. *Glob Chang Biol* 14, 2288–2303. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01653.x>
- Ehbrecht, M., Schall, P., Ammer, C., Fischer, M., Seidel, D., 2019. Effects of structural heterogeneity on the diurnal temperature range in temperate forest ecosystems. *For Ecol Manage* 432, 860–867. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.008>
- Freer-Smith, P., Muys, B., Bozzano, M., Drössler, L., Farrelly, N., Jactel, H., Korhonen, J., Minotta, G., Nijnik, M., Orazio, C., 2019. Plantation forests in Europe: challenges and opportunities. <https://doi.org/10.36333/fs09>
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E., 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat Clim Chang* 3, 203–207. <https://doi.org/10.1038/nclimate1687>
- Holst, T., Mayer, H., Schindler, D., 2004. Microclimate within beech stands - Part II: Thermal conditions. *Eur J For Res* 123, 13–28. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0019-5>
- Janouš, D., 2002. Pravděpodobný dopad klimatické změny na evropské lesy. Lesnická práce.
- Kelly, A.E., Goulden, M.L., 2008. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change.
- Klimo, Emil., Hager, Herbert., Kulhavý, J., European Forest Institute., 2000. Spruce monocultures in Central Europe: problems and prospects. European Forest Institute.
- Kovács, B., Tinya, F., Ódor, P., 2017. Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agric For Meteorol* 234–235, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.268>
- Lembrechts, J.J., Aalto, J., Ashcroft, M.B., De Frenne, P., Kopecký, M., Lenoir, J., Luoto, M., Maclean, I.M.D., Roupsard, O., Fuentes-Lillo, E., García, R.A.,

- Pellissier, L., Pitteloud, C., Alatalo, J.M., Smith, S.W., Björk, R.G., Muffler, L., Ratier Backes, A., Cesarz, S., Gottschall, F., Okello, J., Urban, J., Plichta, R., Svátek, M., Phartyal, S.S., Wipf, S., Eisenhauer, N., Puşcaş, M., Turtureanu, P.D., Varlagin, A., Dimarco, R.D., Jump, A.S., Randall, K., Dorrepaal, E., Larson, K., Walz, J., Vitale, L., Svoboda, M., Finger Higgens, R., Halbritter, A.H., Curasi, S.R., Klupar, I., Koontz, A., Pearse, W.D., Simpson, E., Stemkovski, M., Jessen Graae, B., Vedel Sørensen, M., Høye, T.T., Fernández Calzado, M.R., Lorite, J., Carbognani, M., Tomaselli, M., Forte, T.G.W., Petraglia, A., Haesen, S., Somers, B., Van Meerbeek, K., Björkman, M.P., Hylander, K., Merinero, S., Gharun, M., Buchmann, N., Dolezal, J., Matula, R., Thomas, A.D., Bailey, J.J., Ghosn, D., Kazakis, G., de Pablo, M.A., Kemppinen, J., Niittynen, P., Rew, L., Seipel, T., Larson, C., Speed, J.D.M., Ardö, J., Cannone, N., Guglielmin, M., Malfasi, F., Bader, M.Y., Canessa, R., Stanisci, A., Kreyling, J., Schmeddes, J., Teuber, L., Aschero, V., Čiliak, M., Máliš, F., De Smedt, P., Govaert, S., Meeussen, C., Vangansbeke, P., Gigauri, K., Lamprecht, A., Pauli, H., Steinbauer, K., Winkler, M., Ueyama, M., Nuñez, M.A., Ursu, T.M., Haider, S., Wedegärtner, R.E.M., Smiljanic, M., Trouillier, M., Wilmking, M., Altman, J., Brůna, J., Hederová, L., Macek, M., Man, M., Wild, J., Vittoz, P., Pärtel, M., Barančok, P., Kanka, R., Kollár, J., Palaj, A., Barros, A., Mazzolari, A.C., Bauters, M., Boeckx, P., Benito Alonso, J.L., Zong, S., Di Cecco, V., Sitková, Z., Tielbörger, K., van den Brink, L., Weigel, R., Homeier, J., Dahlberg, C.J., Medinets, S., Medinets, V., De Boeck, H.J., Portillo-Estrada, M., Verryckt, L.T., Milbau, A., Daskalova, G.N., Thomas, H.J.D., Myers-Smith, I.H., Blonder, B., Stephan, J.G., Descombes, P., Zellweger, F., Frei, E.R., Heinesch, B., Andrews, C., Dick, J., Siebicke, L., Rocha, A., Senior, R.A., Rixen, C., Jimenez, J.J., Boike, J., Pauchard, A., Scholten, T., Scheffers, B., Klinges, D., Basham, E.W., Zhang, J., Zhang, Z., Géron, C., Fazlioglu, F., Candan, O., Sallo Bravo, J., Hrbacek, F., Laska, K., Cremonese, E., Haase, P., Moyano, F.E., Rossi, C., Nijs, I., 2020. SoilTemp: A global database of near-surface temperature. *Glob Chang Biol* 26, 6616–6629. <https://doi.org/10.1111/gcb.15123>
- Leuschner, C., Hohnwald, S., Petriřan, A.M., Walentowski, H., 2023. Vertical temperature and air humidity gradients in beech and oak forests, and the forest interior climate created by beech. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 305. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152317>
- Lewis, S., Wheeler, C.E., Mitchard, E.T., Koch, A., n.d. Regenerate natural forests to store carbon.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For Ecol Manage* 259, 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Liu, C.L.C., Kuchma, O., Krutovsky, K. V., 2018. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. *Glob Ecol Conserv*. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00419>
- Luyssaert, S., Marie, G., Valade, A., Chen, Y.Y., Njakou Djomo, S., Ryder, J., Otto, J., Naudts, K., Lansø, A.S., Ghattas, J., McGrath, M.J., 2018. Trade-offs in

- using European forests to meet climate objectives. *Nature* 562, 259–262. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- Morin, X., Fahse, L., Scherer-Lorenzen, M., Bugmann, H., 2011. Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecol Lett* 14, 1211–1219. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01691.x>
- Neuner, S., Beinhofer, B., Knoke, T., 2013. The optimal tree species composition for a private forest enterprise - applying the theory of portfolio selection. *Scand J For Res* 28, 38–48. <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.683038>
- Olesen, J.E., Carter, T.R., Díaz-Ambrona, C.H., Fronzek, S., Heidmann, T., Hickler, T., Holt, T., Minguuez, M.I., Morales, P., Palutikof, J.P., Quemada, M., Ruiz-Ramos, M., Rubæk, G.H., Sau, F., Smith, B., Sykes, M.T., 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Clim Change* 81, 123–143. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9216-1>
- Paquette, A., Messier, C., 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: From temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography* 20, 170–180. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00592.x>
- Paquette, A., Vayreda, J., Coll, L., Messier, C., Retana, J., 2018. Climate Change Could Negate Positive Tree Diversity Effects on Forest Productivity: A Study Across Five Climate Types in Spain and Canada. *Ecosystems* 21, 960–970. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0196-y>
- Podrázský, V., 2014. *Základy ekologie lesa*. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Pretzsch, H., 2014. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *For Ecol Manage*. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.027>
- Pretzsch, H., del Río, M., Ammer, C., Avdagic, 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, F., Motta, R., den Ouden, J., Pach, M., Ponette, Q., Schütze, G., Schweig, J., Skrzyszewski, J., Sramek, V., Sterba, H., Stojanović, D., Svoboda, M., Vanhellemont, M., Verheyen, K., Wellhausen, K., Zlatanov, T., Bravo-Oviedo, A., 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. *Eur J For Res* 134, 927–947. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0900-4>
- Pretzsch, H., Rötzer, T., Matyssek, R., Grams, T.E.E., Häberle, K.H., Pritsch, K., Kerner, R., Munch, J.C., 2014. Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees - Structure and Function*. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1035-9>
- Pretzsch, H., Schütze, G., Uhl, E., 2013. Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol* 15, 483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>

- Roger Michel Henri Lenoir, J., Hattab, T., Pierre, G., 2016. Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography* 40, 253–266. <https://doi.org/10.1111/ecog.02788i>
- Scheffers, B.R., Edwards, D.P., Diesmos, A., Williams, S.E., Evans, T.A., 2014. Microhabitats reduce animal's exposure to climate extremes. *Glob Chang Biol* 20, 495–503. <https://doi.org/10.1111/gcb.12439>
- Scherer-Lorenzen, M., Schulze, E.D., Don, A., Schumacher, J., Weller, E., 2007. Exploring the functional significance of forest diversity: A new long-term experiment with temperate tree species (BIOTREE). *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 9, 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.08.002>
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., Mosseler, A., Secretariat of the convention on the biological diversity, n.d. Forest resilience, biodiversity, and climate change: a synthesis of the biodiversity, resilience, stability relationship in forest ecosystems.
- Vacek, S., Mikeska, M., 2007. Struktura porostů a trvale udržitelné hospodaření v lese. *Lesnické práce* č. 11/07.
- Vacek, Z., Prokúpková, 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. *For Ecol Manage* 488. <https://doi.org/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. *J Environ Manage*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117353>
- Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J., Haase, T., 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agric For Meteorol* 268, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>
- Zapater, M., Hossann, C., Bréda, N., Bréchet, C., Bonal, D., Granier, A., 2011. Evidence of hydraulic lift in a young beech and oak mixed forest using ^{18}O soil water labelling. *Trees – Structure and Function* 25, 885–894. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0563-9>
- Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Vangansbeke, P., Verheyen, K., Bernhardt-Römermann, M., Baeten, L., Hédli, R., Berki, I., Brunet, J., Van Calster, H., Chudomelová, M., Decocq, G., Dirnböck, T., Durak, T., Heinken, T., Jaroszewicz, B., Kopecký, M., Máliš, F., Macek, M., Malicki, M., Naaf, T., Nagel, T.A., Ortmann-Ajkai, A., Petřík, P., Pielech, R., Reczyn, K., Schmidt, W., Standovár, T., Teleki, B., Vild, O., Wulf, M., Coomes, D., n.d. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming.