

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ekologie lesa



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Vliv smíšení dřevin, druhové skladby a porostní
struktury na mikroklima lesa ve středním Německu**

Diplomová práce

Autor: Jiří Ledvinka

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

2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. et Bc. Jiří Ledvinka

Lesní inženýrství

Název práce

Vliv smíšení dřevin, druhové skladby a porostní struktury na mikroklima lesa 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 snižuje jeho dopady na biodiverzitu a stabilitu těchto lesů. Vliv lesů na mikroklima se však liší dle druhové skladby a smíšení stromového patra. Empirické informace však o tom, jak hlavní dřeviny střeoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima, doposud chybějí. Cílem práce tak bude zjistit, jak hlavní druhy dřevin a jejich vzájemné směsi ovlivňují teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkost v podrostu experimentálních výsadeb temperátního lesa BIOTREE ve středním Německu.

Metodika

Měření budou prováděna pomocí mikroklimatických čidel TMS4 v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu, který je součástí mezinárodní experimentální sítě TreeDivNet. V rámci diplomové práce budou jednotlivé experimentální bloky navštíveny, zkontrolována a případně doinstalována čidla a stažena data. Nad každým čidlem bude zhotovena hemisférická fotografie pro určení pokryvnosti stromového patra.

Analýza 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 testovány rozdíly a vlivy druhové skladby.

Harmonogram

květen – listopad 2023 : 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 stran

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 7. 6. 2023

prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2024

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 01. 04. 2024

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Vliv smíšení dřevin, druhové skladby a porostní struktury na mikroklima lesa ve středním Německu* vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou 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 vědom, že odevzdáním diplomovou 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 Praze dne: 5.4. 2024

Podpis autora:



Poděkování:

Rád bych poděkoval doc. Ing. Radimovi Matulovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za pomoc při konzultacích, cenné rady a za čas, který mi věnoval. Dále chci poděkovat Ing. Janovi Vítámvásovi, Ph.D. za pomoc při sběru dat v Německu.

Vliv smíšení dřevin, druhové skladby a porostní struktury na mikroklima lesa ve středním Německu

Abstrakt

Zvyšování teplot a častější a intenzivnější období sucha jsou stále větší hrozbou. Lesní ekosystém má potenciál snížit dopady těchto globálních změn. Mikroklima vytvořené vhodnou dřevinnou skladbou může pomoci organismům adaptovat se na změny klimatu a zároveň zlepšit podmínky pro růst a stabilitu porostů. Cílem této práce je porozumět tomu, jak různé dřeviny stredoevropského temperátního lesa a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima. Měření probíhalo na výsadbovém experimentu BIOTREE Kaltenborn ve středním Německu. Vysázeny byly monokultury buku lesního (*Fagus sylvatica*), smrku ztepilého (*Picea abies*), douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*) a dubu zimního (*Quercus petraea*) a směsi se všemi možnými kombinacemi těchto druhů. Část porostů byla ponechána bez zásahu a v části byla provedena probírka. Data byla měřena v letech 2021 až 2023 půdními čidly TMS-4. Měřena byla vlhkost a teplota půdy a teplota vzduchu. Data byla zpracována v softwaru R. Výsledky ukázaly rozdíly ve vlhkostech půdy mezi listnatými a jehličnatými porosty. Největší rozdíly byly mezi dubovými a smrkovými porosty. Ve studeném a vlhkém roce 2021 byla půdní vlhkost v listnatých porostech významně vyšší. Po výrazně suchém roce 2022 se tento trend obrátil. Významně vyšší vlhkosti půdy byly naměřeny v monokulturách oproti porostům s 3 a 4 dřevinami. Rozdíl mezi listnatými a jehličnatými porosty byl také v teplotách vzduchu, ta byla v listnatých porostech významně vyšší. Nejvyšší teploty byly naměřeny v dubových monokulturách. Vliv probírky byl patrný jak na teplotách vzduchu (vyšší teploty v porostech po probírce), tak na půdní vlhkosti. Byla naměřena nižší vlhkost půdy po probírce v listnatých porostech a zvýšená vlhkost v jehličnatých porostech po zásahu. Vliv probírky z roku 2020 byl ale patrný pouze do poloviny roku 2022. Je evidentní, že zásadním faktorem vlivu na mikroklima je typ porostu, tj. zda se jedná o porosty jehličnaté či listnaté. Jehličnaté porosty jsou chladnější, z pohledu vlhkosti půdy byly rozdíly také významné, ale dalším faktorem byly zřejmě klimatické podmínky v jednotlivých letech. Pro optimalizaci pozitivních funkcí lesa na mikroklima, se tak jeví jako optimální kombinace těchto dvou typů dřevin ve smíšených porostech. Je ale třeba brát v úvahu potenciální negativní vliv efektu komplementarity při kombinaci více dřevin.

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

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

Abstract

Increasing temperatures and more frequent and intense periods of drought are becoming a greater threat. The forest ecosystem has the potential to mitigate the impacts of these global changes. The microclimate created by a suitable tree composition can help organisms adapt to climate changes and at the same time improve conditions for growth and stability of stands. The aim of this work is to understand how different tree species and their mixtures affect the Central European temperate forest microclimate. Measurement was performed on the BIOTREE Kaltenborn planting experiment in central Germany. Monocultures of European beech (*Fagus sylvatica*), Norway spruce (*Picea abies*), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and sessile oak (*Quercus petraea*) and mixtures with all possible combinations of these species were planted. Part of the stands was left without intervention and thinning was carried out in other part. Data were measured in 2021 to 2023 by TMS-4 microclimatic sensors. Soil moisture and temperature and air temperature were measured. The data were processed in R software. The results showed differences in soil moisture between deciduous and coniferous stands. The biggest differences were between oak and spruce stands. In the cold and wet year 2021, soil moisture in deciduous stands was significantly higher. After a distinctly dry year 2022, this trend reversed. Significantly higher soil moistures were measured in monocultures compared to stands with 3 and 4 tree species. The difference between deciduous and coniferous stands was also in air temperatures, which were significantly higher in deciduous stands. The highest temperatures were measured in oak monocultures. The effect of thinning was apparent both on air temperatures (higher temperatures in stands after thinning) and on soil moisture. Lower soil moisture was measured after thinning in deciduous stands and increased moisture in coniferous stands after intervention. The effect of thinning from 2020 was only apparent until mid-2022. It is evident that the crucial factor influencing the microclimate is the type of stand, i.e., whether it is coniferous or deciduous. Coniferous stands are colder, and from the perspective of soil moisture, the differences were also significant, but another factor was apparently the climatic conditions in individual years. For optimizing the positive functions of the forest on the microclimate, a combination of these two types of tree species in mixed stands seems optimal. However, it is necessary to take into account the potential negative impact of the complementarity effect when combining more tree species.

Keywords: microclimate, tree species composition, climate change, BIOTREE

Obsah

1	Úvod	10
2	Cíle práce.....	11
3	Rešerše	12
3.1	Mikroklima	12
3.1.1	Činitele ovlivňující mikroklima	12
3.1.2	Vliv druhové skladby na mikroklima	13
3.1.3	Vztah mikroklimatu a biodiverzity.....	14
3.1.4	Vliv diverzity stromového patra na lesní ekosystém	15
3.1.5	Mikroklima a změna makroklimatu.....	15
4	Metodika	16
4.1	Charakteristika výzkumné plochy.....	16
4.2	Sběr dat	18
4.2.1	Čidlo TMS-4	18
4.2.2	Práce v terénu	19
4.3	Zpracování dat.....	19
4.3.1	Čištění dat.....	19
4.3.2	Analýza dat	20
4.3.3	Zpracování hemisférických fotografií	20
5	Výsledky	21
5.1	Vlhkost půdy.....	21
5.1.1	Vlhkost půdy v jednotlivých letech.....	21
5.1.2	Vlhkost půdy v jednotlivých směsích.....	22
5.1.3	Vlhkost půdy v porostech dle počtu zastoupených druhů	24
5.1.4	Vlhkost půdy v monokulturách	25
5.1.5	Vlhkost půdy jehličnatých, listnatých a smíšených porostů	26
5.1.6	Vliv probírek na půdní vlhkost.....	27
5.1.7	Závislost vlhkosti půdy na LAI a zápoji.....	28
5.2	Teplota vzduchu.....	29
5.2.1	Teplota vzduchu v jednotlivých letech	29
5.2.2	Teplota vzduchu v jednotlivých směsích	30
5.2.3	Teplota vzduchu v porostech dle počtu zastoupených druhů	32
5.2.4	Teplota vzduchu jehličnatých, listnatých a smíšených porostů.....	33
5.2.5	Vliv managementu na teplotu vzduchu	34

5.2.6	Závislost teploty vzduchu na LAI a zápoji	35
5.3	Teplota půdy.....	35
5.3.1	Závislost teploty půdy na LAI a zápoji	37
6	Diskuze	38
7	Závěr.....	40
8	Přehled literatury a použitých zdrojů	42

1 Úvod

Lesní ekosystémy mají velký potenciál zmírnit negativní dopady změny klimatu. Velké množství biomasy nad i pod terénem ovlivňuje podmínky v porostu, které se pak liší od makroklimatu (Zellweger et. al., 2020). Tento rozdíl mezi vnitřkem a vnějškem lesa může mít zásadní vliv na život mnoha organismů a fungování celého ekosystému (De Frenne et. al., 2013). Lesy po celém světě mají různé účely. Pro lidskou společnost to byly doposud z velké části funkce produkční. Čím dál více se, ale ukazuje, že tento přístup není dlouhodobě udržitelný, a upřednostnění produkce dřeva před ostatními funkcemi lesních ekosystémů vede k jejich nestabilitě (Führer E., 2000). Důležitost dřeva, jako zdroje paliva a materiálu pro lidskou společnost je nepopiratelná. Přिřazení části pozornosti na mimoprodukční funkce, nemusí ale vždy znamenat snížení produkčního či finančního zisku (Jucker et. al., 2017). V době, kdy velkoplošné disturbance nastávají s čím dál tím vyšší frekvencí (Senf a Seidl, 2020), je stabilita a odolnost hospodářských lesů stále více důležitá a z dlouhodobého hlediska může strategie zaměřující se pouze na zisk být i nevýhodná (Führer E., 2000). Právě schopnost lesa ovlivňovat hlavně teplotu a vlhkost má výrazný dopad na veškeré organismy, vodní režim, kvalitu půdy a také na lidskou společnost. I když jakýkoliv druh lesa vytváří určité mikroklima, ne vždy je využit plný potenciál na konkrétní lokalitě. Tato práce se zaměřuje na porozumění vlivu dřevinné skladby na podmínky uvnitř porostu. Ať už je význam lesa v určitém regionu jakýkoliv, cílem je vždy využít jeho potenciál na maximum, ať už jde o produkci dřeva, ochranu biodiversity nebo ostatní ekosystémové funkce. Porozumění toho, jak jednotlivé dřeviny a jejich směsi mají vliv na mikroklima je důležitým předpokladem k co možná nejlepšímu hospodaření v lesích za účelem dosažení našich cílů. Málokdy se podaří najít takovou dřevinnou skladbu, která bude mít pozitivní vliv na veškeré funkce lesa, které od něho požadujeme. S dostatečnými znalostmi, ale můžeme ovlivnit ten faktor, který považujeme za kritický, a jehož změna může odvrátit potenciální hrozbu. Jednou z takovýchto hrozeb může být negativní dopad snižování biodiverzity, ať už v lesích nebo mimo něj. Vymírání druhů může vyvolat dominový či lavinový efekt a způsobit výraznou změnu celého ekosystému a tím vyvolat další negativní dopady na okolní krajinu či člověka (Chapin et. al., 1998). Příznivější podmínky v porostu mohou organismům pomoci v adaptaci na probíhající změnu (De Frenne et. al., 2019; Lenoir et. al., 2017). Další hrozbou je degradace a eroze půdy. Vhodnou druhovou skladbou může dojít k omezení či zastavení těchto nežádoucích procesů (Wen et. al., 2021). Velkým rizikem jsou také velkoplošné disturbance. Vytvořením vhodných podmínek je možno přispět k větší vitalitě a odolnosti lesa vůči biotickým a abiotickým hrozbám. Všechny výše zmíněné faktory jsou spolu úzce spojeny. Lepší mikroklimatické podmínky v porostu mají vliv jak na veškeré organismy, tak na půdu a vodu v ní. To následně ovlivňuje celou floru a faunu, schopnost lesa ukládat uhlík (Reich et al., 2018), regulovat teplotu a vlhkost uvnitř i vně porostů. Za účelem porozumění vlivu druhové skladby na diverzitu, byl vytvořen celosvětový projekt TreeDivNet (Paquette et. al., 2018), součástí kterého je i výsadbový experiment BIOTREE Kaltenborn (Scherer-Lorenzen et. al. 2007). Jedním z výzkumů na tomto experimentu je také sběr dat z čidel měřící vlhkost půdy, teplotu půdy a teplotu vzduchu. Tato data spolu s informacemi o porostech jsou zpracována v této práci.

2 Cíle práce

Cílem této práce bylo zjistit, jak hlavní druhy dřevin středoevropského lesa a jejich vzájemné směsi ovlivňují lesní mikroklima. Zkoumány byly monokultury buku lesního (*Fagus sylvatica*), smrku ztepilého (*Picea abies*), douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*) a dubu zimního (*Quercus petraea*) a směsi se všemi možnými kombinacemi těchto druhů. Cílem bylo pozorovat vliv těchto porostů na teplotu a vlhkost půdy a teplotu vzduchu. Dalším cílem bylo zjistit, jak na tyto veličiny má vliv zápoj a index listové plochy. Za tímto účelem byly v porostech pořízeny hemisférické fotografie.

3 Rešerše

3.1 Mikroklima

Lesní organismy žijící pod nebo uvnitř korun stromů jsou ovlivňovány podmínkami, které se výrazně liší od klimatu mimo les. Pod korunami stromů je sluneční záření dopadající na zemi a rychlost větru výrazně snížena, což vede ke snížení výkyvů teplot a vlhkostí. Lesní mikroklima má zásadní vliv na veškeré organismy a jejich interakci. Schopnost lesních ekosystémů snižovat klimatické extrémy hraje důležitou roli při poskytování klimatických mikrorefugií během globálního oteplování (von Arx et al., 2013; De Frenne et al., 2019) a může dočasně snižovat negativní dopady na organismy přizpůsobené chladnějším podmínkám (Ashcroft et al., 2012). Na úrovni ekosystému mikroklima reguluje základní funkce, jako je rozklad opadu, ukládání uhlíku a ovlivňuje koloběh veškerých látek v půdě.

3.1.1 Činitele ovlivňující mikroklima

Faktory ovlivňující lesní mikroklima je možno rozdělit na biotické a abiotické. Zásadním abiotickým faktorem je klima dané oblasti. Geografická poloha porostu a jeho nadmořská výška určuje charakter klimatu, a tím i mikroklima, které se od klimatu liší vlivem dalších faktorů. Klima v konkrétní oblasti je ovlivněno také regionálními faktory, jako je morfologie terénu, velké vodní plochy a typ vegetace v širokém okolí. Klima lze charakterizovat veličinami, jako je průměrná roční teplota a vlhkost, průměrný roční úhrn srážek a množství srážek v jednotlivých částech roku. Dalšími ukazateli mohou být doba slunečního svitu, množství sluneční energie dopadené na povrch nebo průměrná rychlost a průměrný směr větru. Abiotické faktory, které ovlivňují mikroklima přímo v konkrétním lesním ekosystému jsou například typ půdy a její povrch, orientace na světovou stranu a úhel svahu. Dalším faktorem ovlivňující mikroklima je rychlost větru. Vysoké rychlosti větru snižují vliv ostatních faktorů a tím se snižuje i rozdíl mezi podmínkami v porostu a mimo něj. Při nízkých rychlostech větru a vysoké intenzitě slunečního záření je vliv porostu na mikroklima výraznější. Při těchto podmínkách může být mikroklima ovlivněno až do výše několika metrů nad povrchem (Aussenac, 2000). Množství vody v půdě má zásadní vliv na intenzitu výparu, a tedy i na vlhkost vzduchu.

Zásadním biotickým faktorem je charakter vegetace v daném místě. Mikroklima je porostem ovlivněno snížením slunečního záření dopadající na povrch, snížením rychlosti větru aerodynamickým odporem vegetace, intercepací a transpirací (Poleno et al., 2011). Zastínění lze charakterizovat zápojem nebo indexem listové plochy (LAI). LAI je definován jako podíl zelené listové plochy na jednotku povrchu půdy, počítá se pouze s jednou stranou listu. (Myneni, 1997). S větším pokrytím povrchu vegetací se snižují extrémy teplot v porostu. De Frenne (2019) uvádí rozdíl v teplotních maximech oproti podmínkám otevřené krajiny 4,1 °C. Naopak minimální teploty byly v porostech naměřeny vyšší o 1°C. V důsledku zastínění se ve dne snižuje teplota prostředí. Poleno (2011) uvedl nižší průměrnou roční teplotu povrchu v lese o 1,2 °C v porovnání s vedlejší zemědělsky obdělávanou půdou. V noci je naopak tepelná energie zadržována v porostu díky zachycení části radiační složky energie (Geiger et al., 2009). Intercepce, a následný

výpar vody z povrchu vegetace snižuje teplotu okolního vzduchu odebráním skupenského tepla. Výpar zachycené vody a transpirace zvyšuje relativní vlhkost vzduchu v porostu (Poleno et al., 2011). Dalším vstupem do problematiky mikroklimatu je struktura porostu. Hustota, dřevinná skladba, rozsah a druh podrostu má výrazný vliv na výše zmíněné faktory a tím pádem i na mikroklima samotné. Kovács et. al. (2017) tvrdí, že vertikální struktura a heterogenita porostu má podobný nebo i větší vliv na mikroklima než druhová skladba horní etáže. Vyvinutá spodní etáž a bylinné patro jsou hlavními příčinami stabilního klimatu v porostu. Jiný výzkum vliv strukturní variability na průměrnou teplotu vzduchu v porostu nepotvrdil (Ehbrecht et al. 2019), ale byl patrný vliv na rozsah denních teplot. Více patrný byl tento vliv v sušších oblastech.

Míra vlivu činitelů na mikroklima v porostu je výrazně dána vzdáleností od okraje lesa. Část lesa, která již není ovlivněna vnějším prostředím může přesahovat i 100 m (Schmidt et al., 2017). Tato hodnota je dána charakterem samotných faktorů, jako jsou teplota vzduchu, směr a rychlost větru, orientace okraje lesa ke světovým stranám (Hylander, 2005) a struktura porostu.

3.1.2 Vliv druhové skladby na mikroklima

Jedním z mechanismů vlivu druhů dřevin na mikroklima je intercepce. Hustota asimilačních orgánů a jejich tvar mají vliv na množství zachycené srážkové vody, a tím pádem i na množství vody dopadající na půdu. Tím je ovlivněna vlhkost půdy i vzduchu (Augusto et al., 2001). Jehličnaté porosty mají obecně větší intercepci, v těchto porostech je tedy menší vsak srážkové vody (Augusto et al., 2002). Vlhkost půdy je obecně nižší v jehličnatých porostech v brzkém jaře, důvodem může být dřívější start transpirace. Toto se potvrdilo při měření vlhkosti půdy v porostech smrku a buku, kde v bukových porostech byla v zimě a brzy na jaře vlhkost půdy o více než 15 % vyšší (Kuželková et. al., 2023). V létě může být naopak nižší vlhkost půdy v listnatých porostech vlivem vyšších nároků na transpiraci (Lischeid G., 1995). Kuželková (2023) uvedla, že vyšší vlhkost bukových porostů oproti smrkovým z jara přetrvala i do letních měsíců. Při měření vlhkosti vzduchu Nihlgard (1969) zjistil vyšší vlhkosti ve smrkových porostech než v bukových. Dalším aspektem ovlivňující vlhkost půdy může být tvar kořenového systému. Hlubokokořenné dřeviny jako například dub čerpá vlhkost z větších hloubek než smrk (Augusto et. al., 2002). Důležitý je potom vliv kombinace různých dřevin na mikroklima. Z jednoho pohledu vyšší diverzita umožňuje efektivnější využití dostupné půdy, a tím se porost stává odolnějším vůči suchu. Pretzsch et al (2013) zjistil vyšší odolnost buku proti suchu ve směsi s dubem v porovnání s bukovými monokulturami. Grossiord et al., (2014) uvedl pozitivní vliv diverzity v bukovém temperátním lese na odolnost vůči suchu. Ve stejném článku, ale autor uvedl, že v horských bukových lesích se tento pozitivní vliv diverzity neprokázal. Naopak různí autoři uvádějí negativní vliv diverzity dřevin v porostu na odolnost. Kombinace různých kořenových systémů může při nedostatku srážek rychleji vyčerpat vodu z půdy a ohrozit tím méně odolné druhy. Jak uvádí Forrester et. al., (2016) i Grossiord et al., (2014), odolnost nemusí vždy korelovat s diverzitou a vždy záleží na místních podmínkách a směsi dřevin. V některých případech mohou monokultury vykazovat větší odolnost oproti směsi s jinou dřevinou, a naopak. K podobnému výsledku došel

i Zhang et al. (2022), podle kterého nelze říci, že vliv porostu na mikroklima je úměrné počtu druhů ve stromovém patře.

Vlivem různé morfologie korun má dřevinná skladba vliv i na teplotu půdy a vzduchu v porostu. Například Nihlgard (1969) naměřil nižší teploty ve smrkovém porostu oproti bukovému. Jiná práce zase ukázala vyšší teploty v borových porostech než ve smrkových (Aussenac et. al., 1975). Hlavním faktorem vlivu na teplotu bude pravděpodobně míra zastínění povrchu u jednotlivých dřevin. Druh dřeviny nemá vliv pouze na snižování teplot, ale obecně na snížení denního rozsahu teplot, tedy i zvýšení teplotních minim (Aussenac, 2000). Pasak (1960) poukazuje na menší amplitudy denních teplot ve smrkových porostech než ve dubových a borových. Ehbrecht et al. (2019) uvádí menší schopnost regulovat teplotní extrémy borových porostů v porovnání s porosty buku a dubu. Jiný zdroj, ale například u porovnání smrku a buku rozdíl neprokázal (Vanseveren, 1975). Při studiu mladých porostů se jako nejúčinnější v potlačování teplotních výkyvů prokázaly porosty modřínu a douglasky, ale také směsi buku a břízy (Zhang et. al., 2022). Autor uvádí, že důvodem je patrně rychlý růst v mladém věku těchto dřevin a tato schopnost se bude v přibývajícím věku snižovat. Pro zajištění této schopnosti po celou dobu života porostu je třeba kombinace dřevin.

3.1.3 Vztah mikroklimatu a biodiverzity

Mikroklima zásadně ovlivňuje život organismů, čím menší a méně pohyblivý organismus, tím více ho ovlivňují malé odchylky v prostředí. Velcí živočichové si poradí s většími výkyvy, zatímco pro malé živočichy jsou důležité i malé změny (De frenne et. al., 2021). Dá se tedy předpokládat, že i malé změny podmínek v porostu vlivem úpravy druhové skladby, mohou mít výrazný vliv na některé organismy jako je hmyz. Například Ganault et. al. (2021) uvedl pozitivní vliv smíšených lesů na půdní makrofaunu. Strukelj et. al. (2021) zase uvedl velký vliv druhové skladby dřevin na biomasu mikrobiomu, ale pouze v místech s dostatkem vody. V podmínkách s nedostatkem vody se korelace neprokázala. Důležitost vlhkosti a teploty půdy na aktivitu mikroorganismů v půdě zmiňuje Fernandez-Alonso et. al. (2018), a to bez ohledu na druh dřeviny v porostu. Hmyz je klíčovým prvkem světového ekosystému. Jeho početnost se celosvětově snižuje, nejvíce v oblastech silně ovlivněné člověkem. Mezi největší faktory tohoto úbytku patří degradace a ztráta přirozených habitatů, znečišťování ovzduší a klimatická změna (Bali et. al., 2021). Všechny tyto faktory se dají ovlivnit správným managementem v lesích, ale i v ostatních ekosystémech.

Lesní mikroklima a jeho diverzita také ovlivňuje rozmístění živočichů a rostlin. Gradient podmínek může být horizontální (např. mezi okrajem porostu a jeho středem) nebo vertikální (od země po korunu stromů) (De frenne et. al., 2021). Každý druh preferuje specifické podmínky a díky širšímu rozsahu těchto podmínek umožní ekosystém existenci rozmanitější fauny a flory. Pro organismy je také zásadní časové hledisko. Mikroklimatické podmínky se mění v denních a ročních cyklech, horizontální a vertikální diverzita pomáhá těmto organismům reagovat na výkyvy podmínek. Vrchol denní aktivity je často vázán na určitou teplotu a závisí na teplotních limitech druhů

(Wikström et al., 2009). Lesní ekosystém, ve kterém je velký rozptyl mikroklimatických podmínek, pomáhá organismům lépe reagovat na změny prostředí a klimatu.

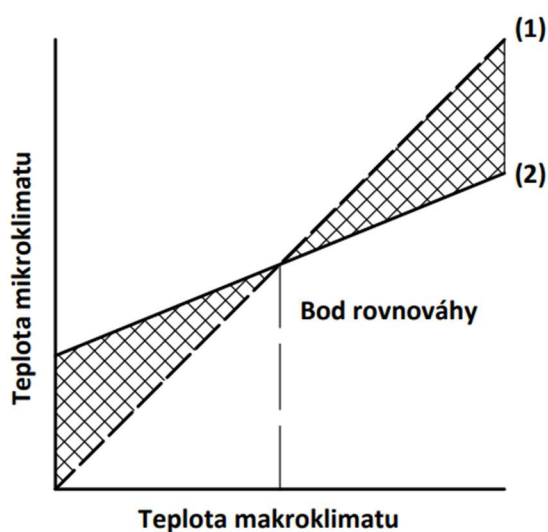
3.1.4 Vliv diverzity stromového patra na lesní ekosystém

Studie ukázaly pozitivní vliv na ekosystém v určitých typech smíšených lesů vlivem rozdílných nároků na světlo, vlhkost a živiny u jednotlivých dřevin. V těchto případech se ukázalo, že mimodruhová konkurence je méně výrazná než vnitrodruhová. Pretzsch (2005) uvedl pozitivní vliv směsi na produkci dřeva, dalšími příklady jsou například pozitivní vliv na koloběh látek (Rothe, Binkley (2001) a snížené poškození hmyzími škůdci (Jactel et. al., 2005). V určitých případech byl, ale také pozorován negativní efekt interakce různých druhů. Vždy je třeba zohlednit jednotlivé druhy a konkrétní podmínky. Historie využití dané půdy nebo management může také ovlivnit studované porosty. Dalším faktorem může být vnitrodruhová variabilita s ohledem na nároky dřevin. Plastické dřeviny s vysokou variabilitou mohou mít stejný nebo i vyšší komplementární efekt než směs méně plastických dřevin. To by mohlo vést k lepším výsledkům v monokulturách než ve směsích (Scherer-Lorenzen et. al. 2007).

Observační studie podporují pozitivní účinek diverzity na produktivitu ekosystému (Liang et al., 2016). Tyto studie mají velkou relevanci v poznávání této problematiky, ale faktory jako klima, půda, morfologie terénu a historie managementu omezují schopnost izolovat vliv druhové diverzity. Další možností je odstranění některých druhů a následné pozorování vlivu těchto změn na ekosystém. Takový druh experimentu zajistí větší kontrolu, ale tyto zásahy mohou zkreslit výsledky. Třetí možností jsou experimenty, které uměle vytvářejí gradienty v diverzitě lesa, a to sázením stromů do jednoduchých a lehce replikovatelných schémat. Nevýhodou této možnosti je dlouhá doba mezi počátkem experimentu a získáním potřebných dat vlivem dlouhověkosti pozorovaného objektu. Experiment, ve kterém jsou eliminovány ostatní faktory, je ale z hlediska získaných dat velice přínosný. Za tímto účelem také vznikla celosvětová síť experimentů studující biodiverzitu TreeDivNet (Paquette et. al., 2018). Součástí tohoto projektu je také experiment BIOTREE, na jehož výzkumných plochách byla získána data pro tuto práci (viz. kapitola Metodika).

3.1.5 Mikroklima a změna makroklimatu

Bylo potvrzeno, že schopnost lesa snižovat teplotní extrémů vůči okolnímu prostředí závisí právě na teplotě makroklimatu (De Frenne et. al., 2021). Při vyšších teplotách je rozdíl teplot mezi porostem a okolním prostředím vyšší (Obr. 1), to ale platí pouze při dostatku vody pro výpar a evapotranspiraci při níž dochází ke chlazení prostředí (Davis et al., 2019, De Frenne et al., 2019). Na rozdíl od tropických lesů, kde množství vody není limitem, může v boreálních lesích a lesích mírného pásu dojít při vyšších teplotách k nedostatku vody a snížení tohoto chladícího efektu. Z toho vyplývá důležitost půdní vlhkosti nejen z hlediska její dostupnosti pro vegetaci, ale také pro regulaci teplotních extrémů.



Obrázek 1: Závislost teploty makroklimatu na potlačení teplotních výkyvů lesním ekosystémem. (1) Křivka závislosti bez vlivu lesa ($T_{\text{makro}} = T_{\text{mikro}}$). (2) Křivka závislosti při ovlivnění lesním ekosystémem. Bod rovnováhy je stav, při kterém je teplota v porostu rovna teplotě mimo něj. Šrafovaná plocha znázorňuje rozdíl teploty makroklimatu a mikroklimatu (De Frenne et. al., 2021).

Boisvenue a Running (2006) uvedli zvýšení růstu u mnoha lesů mírného pásu vlivem globálního oteplení. Při dostatku vody a půdních živin by mohlo u těchto porostů dojít ke zvýšení jejich hustoty a díky tomu i ke zvýšení rozdílu teplot mezi mikroklimatem a makroklimatem (Zellweger et al., 2020). Opačný efekt mohou mít stále častěji se objevující disturbance, při kterých se obnažuje povrch a klesá regulační funkce lesa (Senf a Seidl, 2020). Další dopad může mít nárůst teplot makroklimatu na vegetaci ve spodním patře lesa. Vlivem vyšších teplot se urychlí jarní pučení pupenů a růst listů a tím se zkrátí vegetační období rostlin spodního patra (Heberling et al., 2019).

4 Metodika

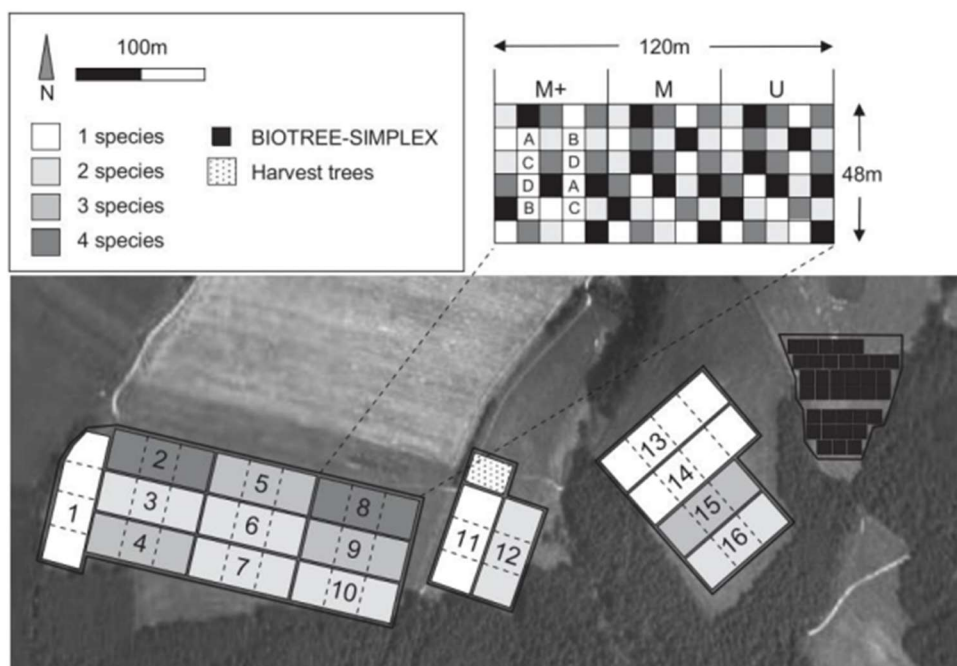
4.1 Charakteristika výzkumné plochy

Území, na kterém byly sbírány data je součástí výsadbového experimentu BIOTREE. Tento projekt se zabývá studiem vlivu biodiverzity v lesních ekosystémech. Celkem tři výzkumné plochy se nacházejí v Německém Durynsku. Experiment BIOTREE Kaltenborn, z které byly získány data pro tuto práci, se nachází jižně od města Bad Salzungen. Oblast se nachází na písčivcovém podloží a leží v nadmořské výšce kolem 340 m n.m. Podle nejbližší meteorologické stanice je 30letý průměrný roční úhrn srážek 650 mm a průměrná roční teplota 7,8 °C (tab. 1). V přirozené dřevinné skladbě dominuje buk, jehličnany se zde přirozeně nevyskytují, ale byly do této lokality introdukovány před více než 200 lety. Do roku 1975 byla plocha zemědělsky obhospodařována, poté byla přeměněna na louku, která byla pravidelně sečena a částečně spásána dobyt看em (Scherer-Lorenzen et. al. 2007).

Tabulka 1: Základní informace o výzkumných plochách experimentu BIOTREE (průměrná data z období mezi lety 1961 až 1990) (Scherer-Lorenzen et. al. 2007).

Experiment	Souřadnice	Nadmořská výška (m n.m.)	Podloží	Průměrná roční teplota (°C)	Roční srážky (mm)
"Mehrstedt"	10°39'E, 51°16'N	270-315	Vápenec	8	547
"Kaltenborn"	10°13'E, 50°47'N	320-350	Pískovec	7,8	650
"Bechstedt"	11°05'E, 50°54'N	400-415	Vápenec	7,9	553

Výsadba byla provedena v letech 2003 a 2004. Vysazeny byly následující dřeviny: buk lesní (*Fagus sylvatica*), smrk ztepilý (*Picea abies*), douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) a dub zimní (*Quercus petraea*). Z těchto druhů byly vysazeny monokultury a směsi se všemi možnými kombinacemi těchto druhů (2-4). Stromy byly vysazeny do řad s 2 m rozstupem, v rámci řady měly stromy rozstup 1 m v případě listnatých dřevin a 2 m v případě jehličnanů. Vysazeny byly 3 až 4leté stromy do půdy upravené hlubokou orbou (Scherer-Lorenzen et. al. 2007). Území se skládá z 16 ploch o rozměrech 120x48 m. Každá tato plocha je rozdělena na třetiny dle provedeního managementu (Obr. 2). Jedna třetina byla ponechána bez managementu, u jedné byla provedena probírka a u poslední byla provedena probírka a dosazeny další druhy dřevin. Probírka byla provedena v roce 2020 v intenzitě 30 % (Žilák 2022). Čidla byla instalována do každé ze šestnácti ploch po čtyřech, dvě do části s provedenou probírkou a dvě do části bez managementu. Byly také určeny dvě kontrolní plochy mimo les, kde do každé byla instalována dvě čidla pro porovnání lesního porostu a bezlesí. Část čidel byla instalována v říjnu 2020 a zbylá čidla v polovině dubna 2021.

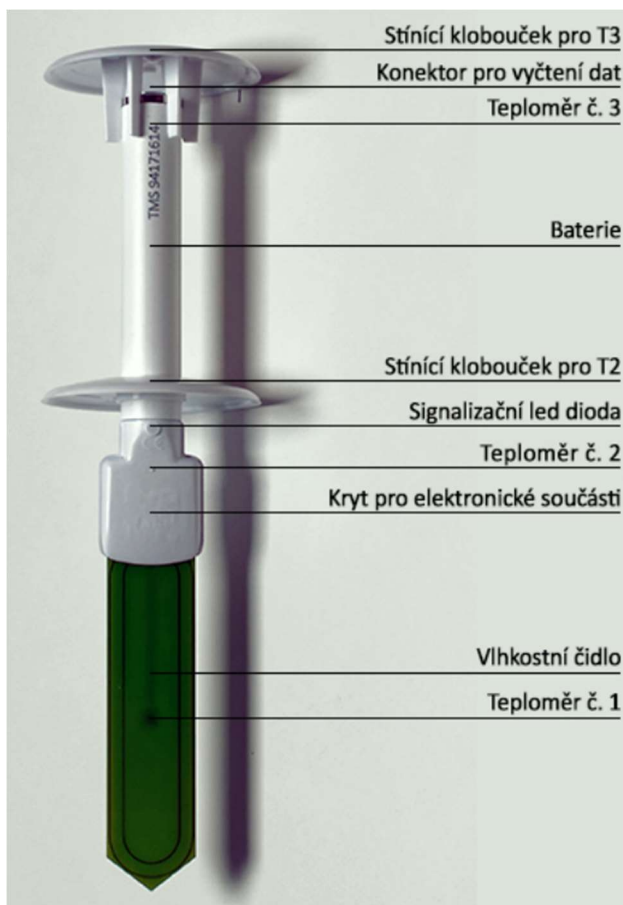


Obrázek 2: Poloha a rozdělení výzkumných ploch na lokalitě Kaltenborn. U – Bez managementu, M – provedena probírka, M+ - provedena probírka s přidáním dalších dřevin. (Scherer-Lorenzen et. al. 2007).

4.2 Sběr dat

4.2.1 Čidlo TMS-4

K měření mikroklimatických údajů byla použita čidla TMS-4 od firmy TOMST s.r.o. (Obr. 3) Na vývoji se podílel Botanický ústav Akademie věd České republiky, Katedra botaniky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy a Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství Fakulty stavební ČVUT v Praze (Wild et al., 2019). Čidlo je opatřeno třemi senzory teploty a senzorem půdní vlhkosti. Dva senzory snímají teplotu vzduchu, a to ve výšce 15 cm a v prostoru těsně nad zemí. Senzory teploty a půdní vlhkosti jsou v hloubce 6 cm. Senzory teplot jsou schopny měřit v rozmezí -40 až 60 °C s přesností $\pm 0,5$ °C. Surová data ze senzoru vlhkosti jsou konvertována na hodnoty objemové půdní vlhkosti nástrojem TMS Calibr utility. Čidla zaznamenávala data do interní paměti každých 15 min, paměť je schopna uchovat až 524288 záznamů. Čidlo dále disponuje lithiovou baterií s výdrží okolo 10 let. Pro stažení dat přes USB adaptér slouží doteková sonda (Tomst.com).



Obrázek 3: Čidlo TMS-4 (Tomst.com)

4.2.2 Práce v terénu

Čidla byla nainstalována v březnu 2021. V každém ze 16 bloků byla umístěna 4 čidla, 2 v podploše s managementem (probírkami) a 2 v podploše bez managementu. Každé čidlo bylo v porostech nalezeno a byla z nich stažena data. Pomocí USB adaptéru byla data stažena do terénního tabletu se softwarem Lolly Manager (obr. 4). Po stažení byla data v softwaru graficky zobrazena pro kontrolu správné funkce čidel. V případě nefunkčnosti či poškození bylo čidlo vyměněno za nové. Data byla stažena v prosinci 2023. Měření byla tedy k dispozici pro roky 2021 až 2023. Při předchozím sběru dat v roce 2021 byla nad každým čidlem pořízená hemisférická fotografie, tzv. rybí oko, pomocí fotoaparátu Canon EOS 1100D se speciálním objektivem Sigma 105 mm f/2,8 EX.



Obrázek 4: Sběr dat do terénního tabletu pomocí USB adaptéru.

4.3 Zpracování dat

4.3.1 Čištění dat

Exportovaná data z programu Lolly manager byla zpracovávána v softwaru R (R Core Team, 2023). Čištění dat bylo provedeno pomocí balíčku PLOTer. V tomto grafickém prostředí je možno zobrazovat naměřená data pro jednotlivá čidla a jednotlivé měřené veličiny. Určování chybných dat probíhalo porovnáváním hodnot dané veličiny z více čidel najednou. Při větším počtu

vzájemně se překrývajících křivek lze vidět trend závislosti veličin v čase. Data výrazně vymykající se tomuto trendu byla odstraněna (obr. 5). Nepoužitelná data mohla vzniknout poškozením čidla nebo obnažením půdních čidel a jejich vystavení vzduchu. Odstranila se také data, která byla zaznamenána při skladování a přepravě čidel (měření nelze vypnout). Po kontrole a čištění byla data exportována do souboru csv.



Obrázek 5: Příklad grafického zobrazení dat z několika čidel v rozhraní balíčku PLOTer.

4.3.2 Analýza dat

Vyčištěná data byla v softwaru R spojena s metadaty, ve kterých byly informace o jednotlivých plochách (druhy dřevin, management, počet dřevin ve směsi, hodnoty indexu listové plochy LAI, hodnoty otevřenosti stromového patra). Z hodnot teplot byly vypočteny denní maxima, minima a průměry. Pro vlhkost půdy byly vypočteny pouze denní minima. Důvodem byla eliminace případných extrémních naměřených hodnot v době dočasného nasycení půdy vodou při dešti. Tyto vysoké hodnoty jsou zaznamenávány pouze krátce a mohly by zkreslit průměrné denní hodnoty. Pro vyhodnocení průběhu teplot a půdní vlhkosti v čase byly do těchto dat nafitovány zobecněné aditivní modely (GAM), jejichž vizualizace byla následně provedena v grafech vytvořených pomocí balíčku „ggplot2“. V grafech je zobrazena zóna, která udává 95% interval spolehlivosti modelů. Všechny GAM modely v kapitole Výsledky byly statisticky významné ($P < 0.001$).

Dále byly sestaveny obecné lineární modely pro testování rozdílů v ročních a měsíčních průměrech a průměrech za vegetačním obdobím (květen až září) a rovněž pro vyhodnocení závislosti mikroklimatu na druhové skladbě a počtu druhů stromů. Pomocí obecných lineárních modelů byly také zjišťovány závislosti veličin měřených půdními čidly na LAI a zápoji. Zvláště byly testovány průměrné měsíční hodnoty za celé měřené období a hodnoty ve vegetačním období. Všechny statistické analýzy byly rovněž provedeny v programu R.

4.3.3 Zpracování hemisférických fotografií

Hemisférické fotografie byly zpracovány v programu R pomocí balíčku Hemiphot.R. Balíček obsahuje skript, pomocí kterého je možné z barevných hemisférických fotografií vypočítat otevřenost stromového patra a LAI (Žilák J. 2022). Balíček obsahuje skript HemiphotTest.R, který slouží k analýzám pro jednotlivé fotografie a HemiphotBatch.R, sloužící k analýzám více fotografií

najednou. Po načtení skriptu byla dle předpřipravených příkazů nahrána barevná hemisférická fotografie. Dalším příkazem byl vykreslen kruh, jehož velikost bylo třeba upravit tak, aby odpovídal velikosti kruhového výřezu hemisférické fotografie. Po vizuální kontrole, zda vykreslený kruh odpovídá výřezu fotografie, je možno snímek zobrazit ve 3 barevných kanálech (červený, zelený, modrý). Pro analýzu byl použit modrý kanál, který poskytuje nejlepší kontrast mezi oblohou a listy (Brusa et Bunker, 2014). Dále byl snímek převeden na černobílý pomocí prahové hodnoty, kterou lze ručně upravit dle potřeby fotografie. Následně byla vypočítána hodnota otevřenosti stromového patra a index listové plochy (Žilák J. 2022).

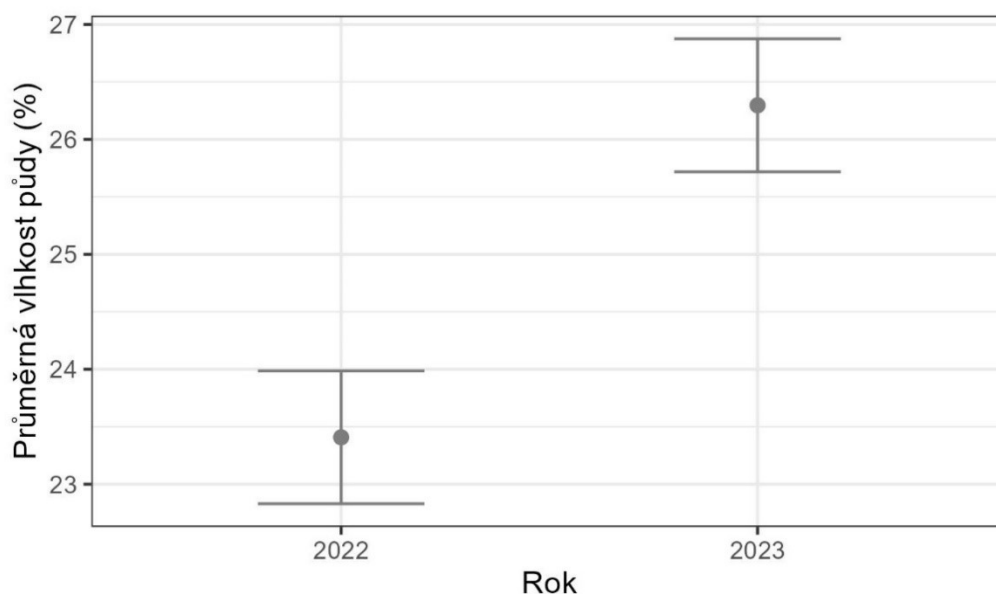
5 Výsledky

5.1 Vlhkost půdy

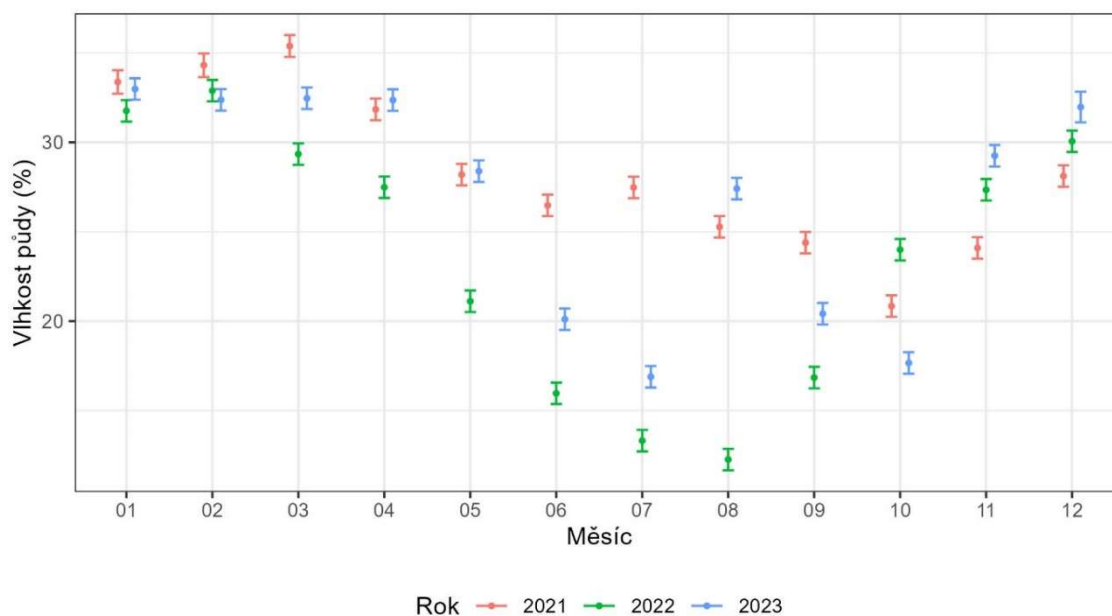
5.1.1 Vlhkost půdy v jednotlivých letech

Průměrná vlhkost půdy byla významně vyšší v roce 2023 než v roce 2022 ($P < 0,001$; obr. 6). V roce 2022 dosáhla 23,4 °C a v roce 2023 to bylo 26,3 °C. Pro rok 2021 nebyla průměrná hodnota vypočtena. Důvodem je pozdější instalace některých čidel v tomto roce, porovnání této hodnoty s následujícími roky by tedy nebylo relevantní.

Z obrázku 7 je patrné, že v roce 2022 byla vlhkost půdy nejnižší téměř po celý rok. Pouze od října do konce roku byly hodnoty vyšší oproti roku 2021. V roce 2021 byly naměřeny nejvyšší hodnoty hlavně ve vegetační sezóně. V roce 2023 je patrný výrazný výkyv vlhkosti půdy v srpnu, který byl nejvlhčím ze všech měřených let.



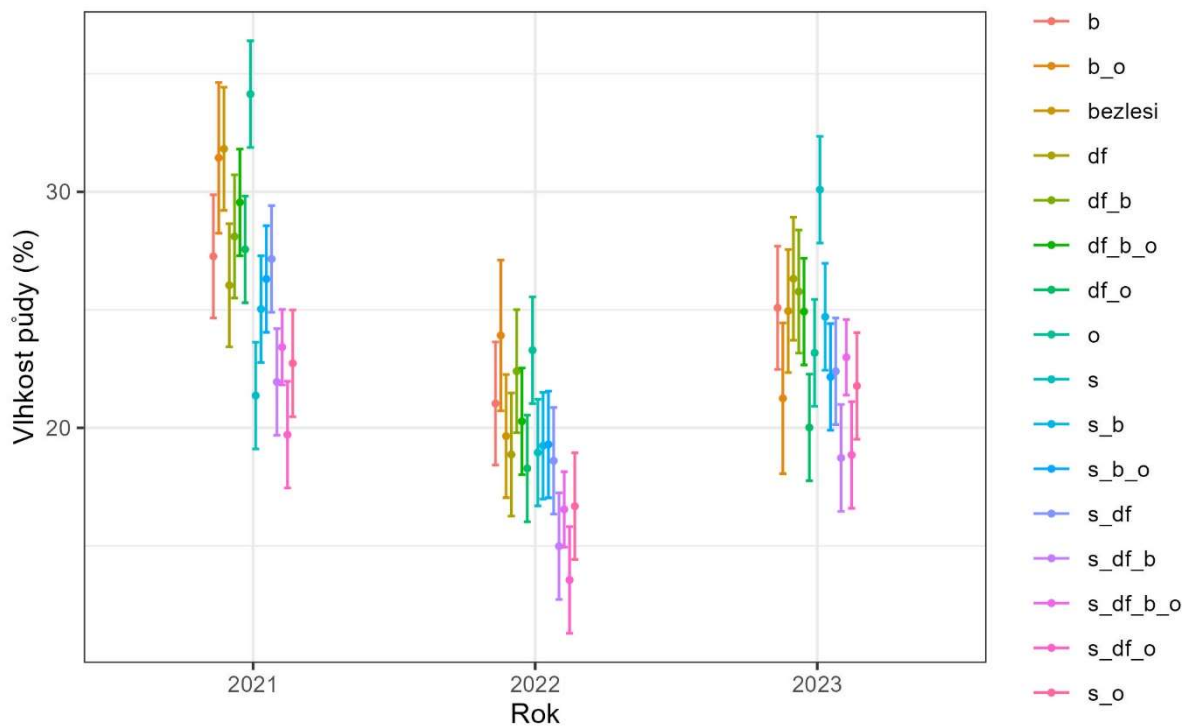
Obrázek 6: Průměrná roční vlhkost půdy s 95 % intervalem spolehlivosti.



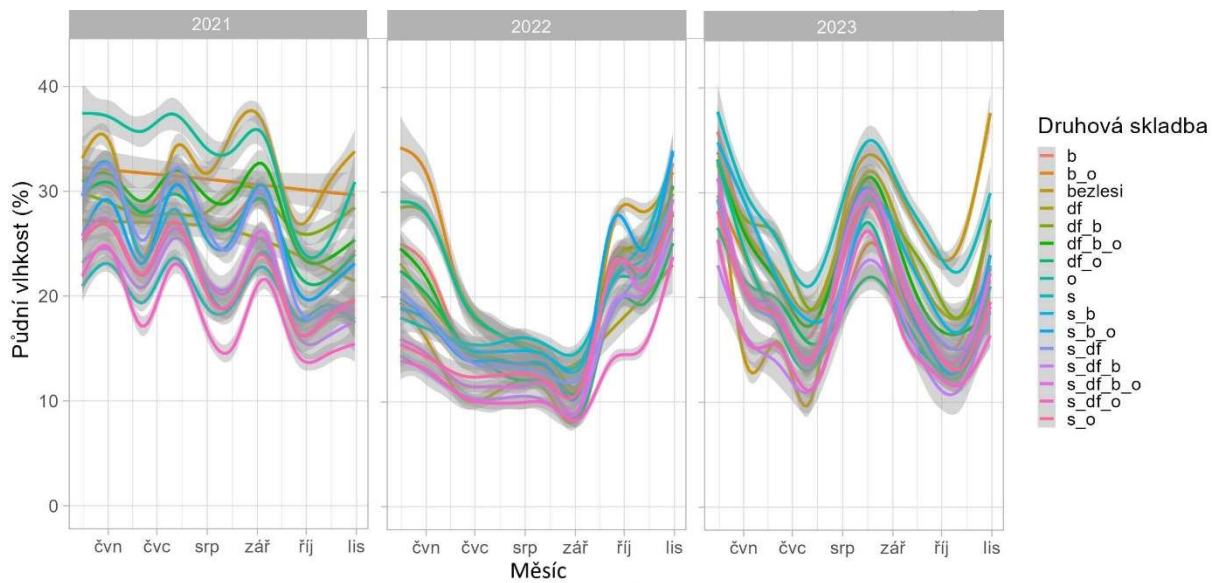
Obrázek 7: Průměrná půdní vlhkost v jednotlivých měsících s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.1.2 Vlhkost půdy v jednotlivých směsích

V letech 2021 a 2022 byly naměřeny nejvyšší hodnoty vlhkosti u směsi buku a dubu, a také u monokultury dubu ($P < 0,005$). Vlhkost ve smrkových porostech se mezi jednotlivými lety výrazně lišila. V roce 2023 byly nejvlhčí, v roce 2021 naopak patřily mezi nejsušší. Nejnižší vlhkosti byly naměřeny v porostech s druhovou skladbou smrk-douglaska-buk a smrk-douglaska-dub, a to ve všech letech. Průměrné roční půdní vlhkosti na nezalesněných plochách byly mírně nadprůměrné (obr. 8) Z obrázku 9 je ale patrné, že v nejsušších obdobích roku byla vlhkost na těchto plochách nejnižší. Ve vlhčích obdobích patřila naopak k těm nejvyšším.



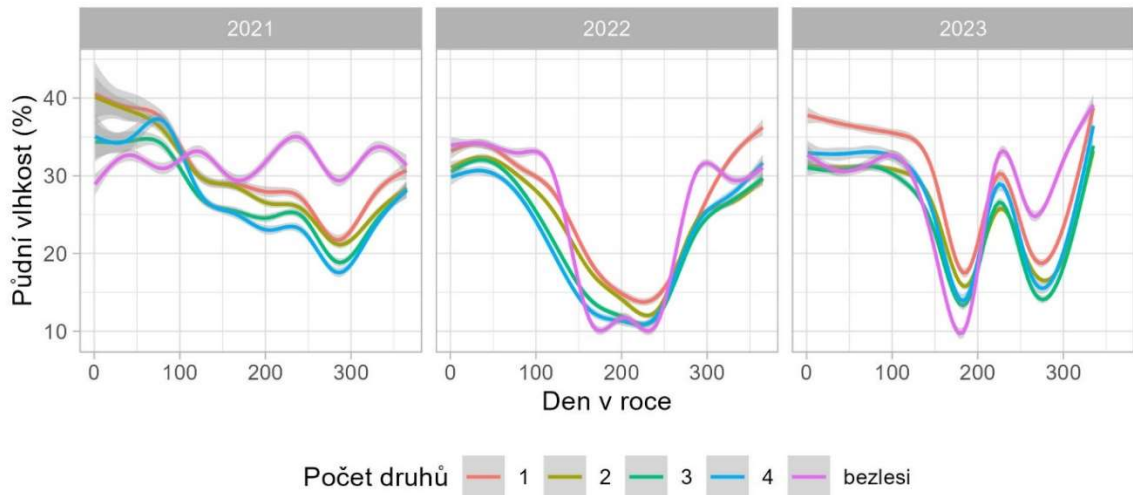
Obrázek 8: Průměrná vlhkost půdy ve vegetačním období v jednotlivých směsích s 95 % intervalem spolehlivosti.



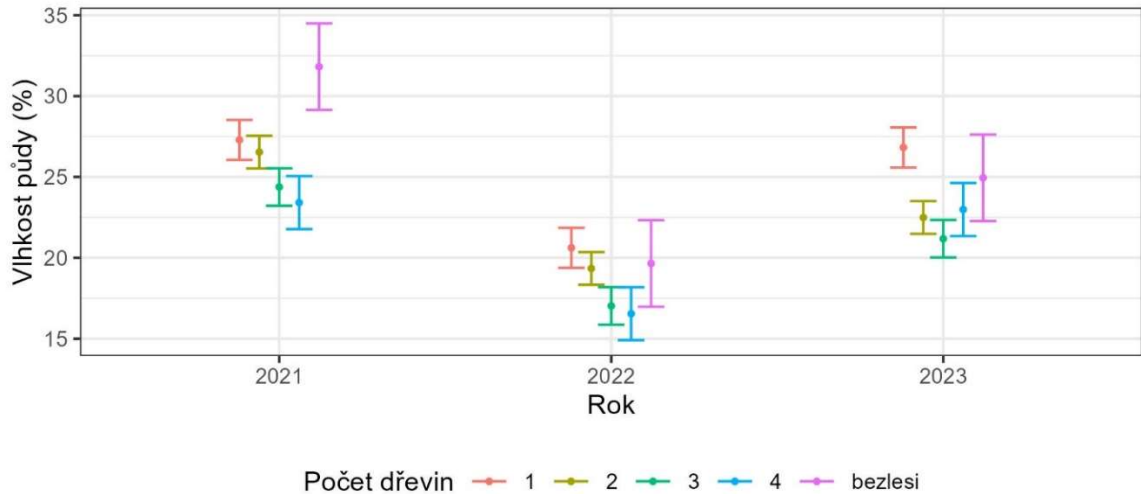
Obrázek 9: Vývoj půdní vlhkosti ve vegetačních obdobích 2021-2023 (b = buk lesní, o = dub zimní, s = smrk ztepilý, dg = douglaska tisolistá).

5.1.3 Vlhkost půdy v porostech dle počtu zastoupených druhů

Z obrázků 11 a 12 je patrné, že čím více bylo druhů ve směsi, tím nižší byla vlhkost v těchto porostech. Statisticky významné jsou rozdíly v průměrných ročních hodnotách monokultur v porovnání s porosty se 3 a 4 druhy dřevin. Směsi 4 druhů dřevin vykazovaly největší rozptyl hodnot. V suchých obdobích roku byly v těchto porostech naměřeny nejnižší hodnoty vlhkosti, ale ve vlhkých obdobích byla často vlhkost vyšší než ve směsích 2 a 3 dřevin.



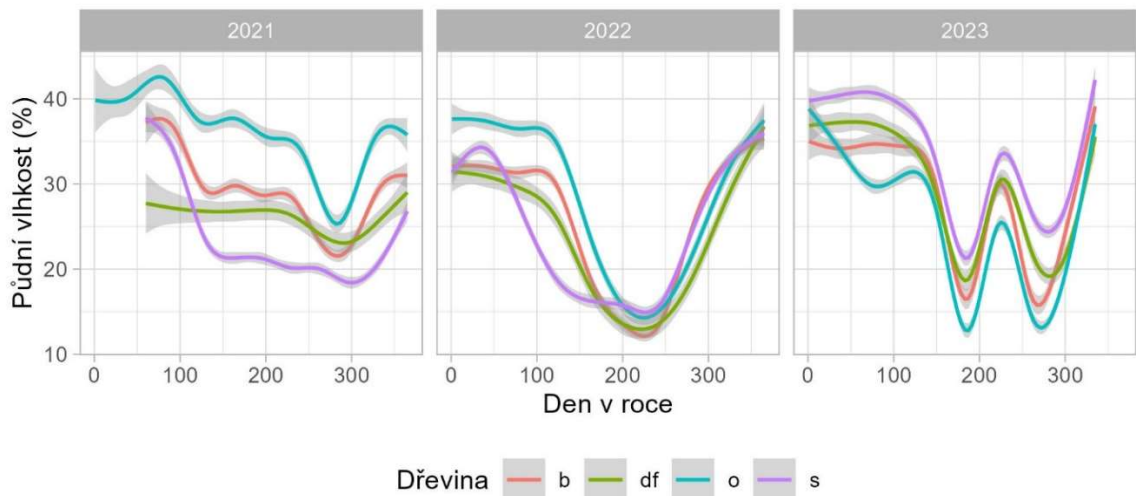
Obrázek 10: Vývoj půdní vlhkosti podle počtu druhů ve směsi v letech 2021–2023.



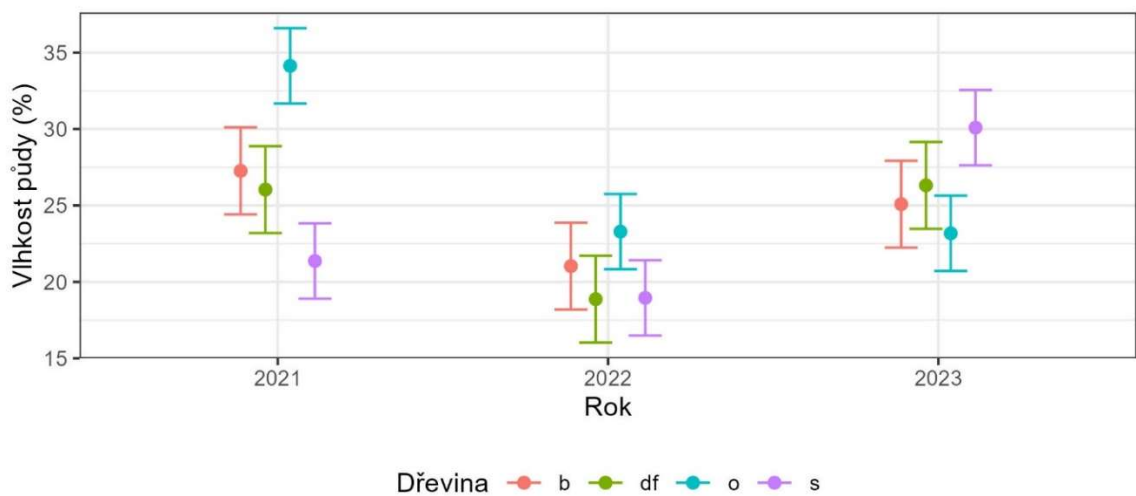
Obrázek 11: Průměrná půdní vlhkost ve vegetačním období podle počtu druhů ve směsi s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.1.4 Vlhkost půdy v monokulturách

V roce 2021 dosahovala vlhkost půdy u dubových porostů významně vyšších hodnot oproti ostatním monokulturám, naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u smrkových monokultur. Opačný trend je v roce 2023, kdy smrkové porosty byly v průběhu celého roku nejvlhčí a dubové nejsušší. V roce 2022 byly vlhkosti všech druhů monokultur podobné, a to zejména v 2. polovině roku (obr. 12). V letech 2021 a 2022 je patrný rychlejší pokles vlhkosti začátkem vegetační sezóny u smrkových monokultur oproti ostatním porostům. Průměrné hodnoty ve vegetačním období v roce 2021 ukázaly významně vyšší vlhkost půdy dubových porostů ($P < 0,001$). Naopak v roce 2023 byla průměrná hodnota dubových monokultur podobná jako u ostatních porostů s výjimkou porostů smrkových, které byly významně vlhčí ($P = 0,042$; obr.13).



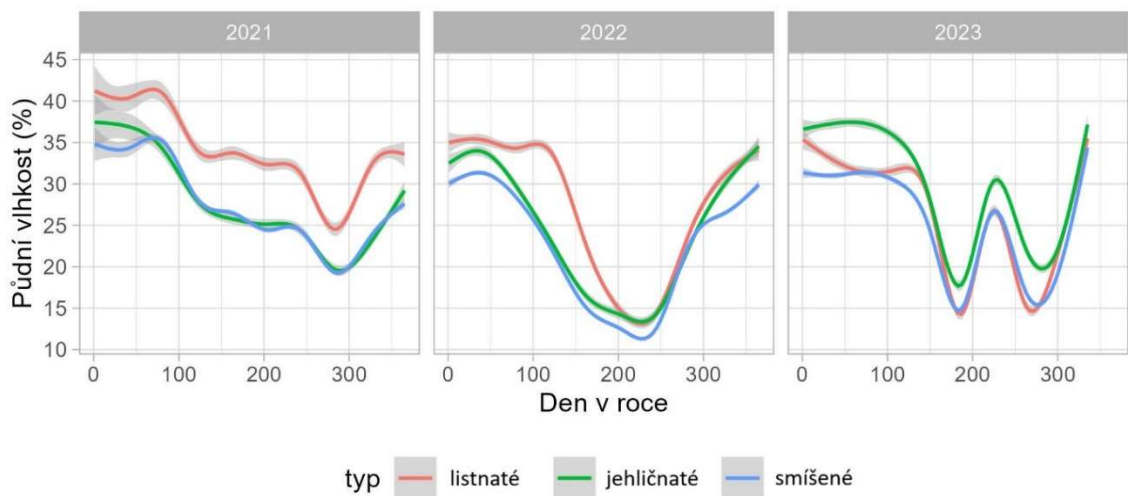
Obrázek 12: Průběh půdní vlhkosti v průběhu let 2021-2023 v monokulturách (*b = buk lesní, o = dub zimní, s = smrk ztepilý, dg = douglaska tisolistá*).



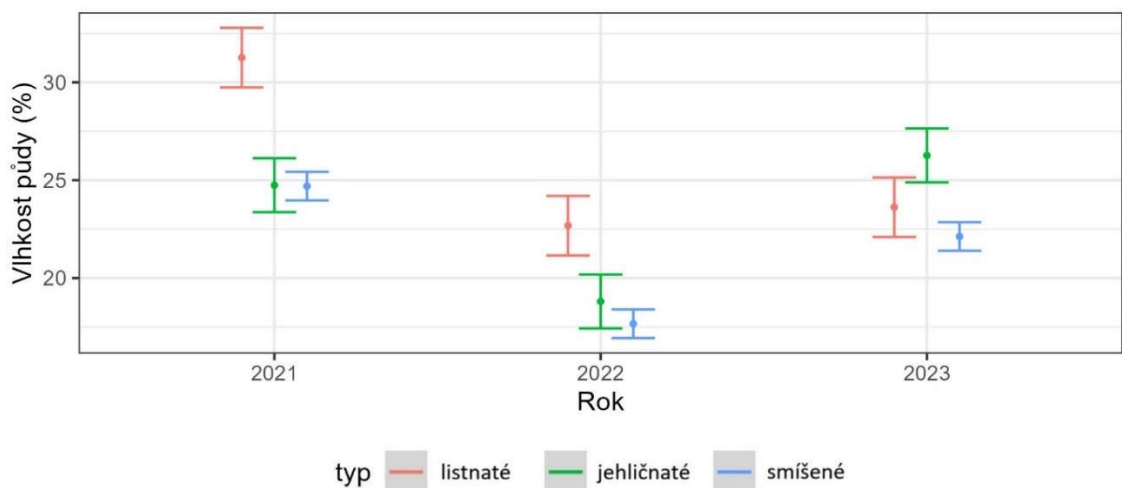
Obrázek 13: Průměrná půdní vlhkost ve vegetačním období v monokulturách s 95 % intervalem spolehlivosti (*b = buk lesní, o = dub zimní, s = smrk ztepilý, dg = douglaska tisolistá*).

5.1.5 Vlhkost půdy jehličnatých, listnatých a smíšených porostů

V listnatých porostech byla vlhkost půdy v roce 2021 výrazně vyšší než u ostatních typů porostu ($P < 0,001$; obr. 14 a 15). Podobný trend je patrný začátkem roku 2022. V nejušším období už ale rozdíl mezi listnatými a jehličnatými porosty není. V roce 2023 byly naopak nejvyšší hodnoty naměřeny u jehličnatých porostů ($P = 0,031$; obr. 14). Obrázek 15 také ukazuje vyšší průměrné vlhkosti v listnatých porostech v letech 2021 a 2022. V obou letech je průměrná vlhkost významně vyšší než u jehličnatých a smíšených porostů ($P < 0,05$). V roce 2023 byla průměrná vlhkost jehličnatých porostů nejvyšší a smíšených porostů nejnižší.



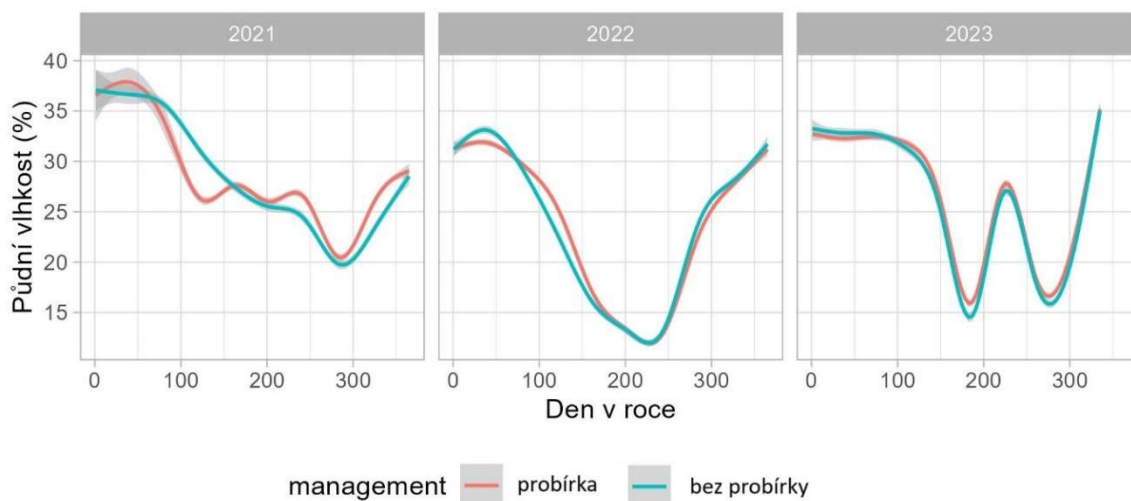
Obrázek 14: Průběh půdní vlhkosti v průběhu let 2021-2023 v různých typech porostů.



Obrázek 85: Průměrná roční půdní vlhkost v různých typech porostů s 95 % intervalem spolehlivosti.

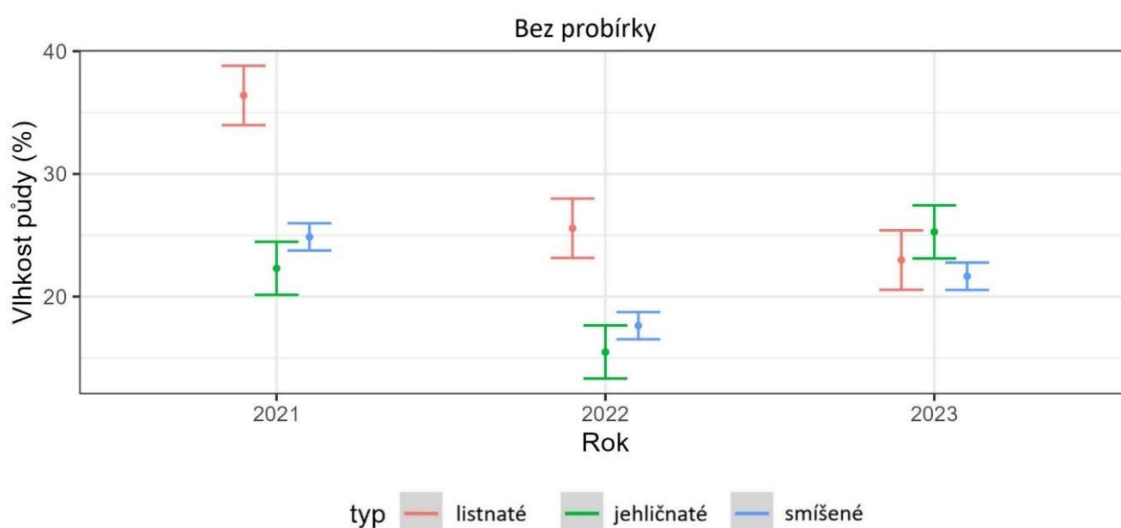
5.1.6 Vliv probírek na půdní vlhkost

V porostech, kde byla provedena probírka, byla naměřena mírně vyšší vlhkost půdy. Výjimkou je duben a květen roku 2021 kdy došlo k výraznějšímu poklesu vlhkosti u těchto porostů. Nižší hodnoty v porostech s probírkou byly naměřeny také na podzim roku 2022 (obr. 16).

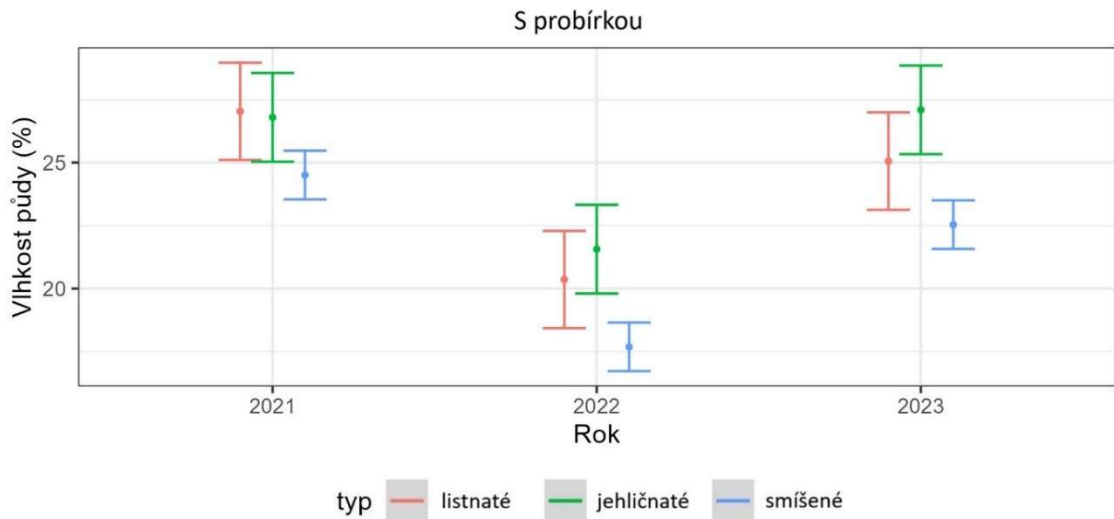


Obrázek 16: Půdní vlhkost v průběhu let 2021–2023 v porostech s různým managementem.

Při porovnání vlivu managementu na listnaté a jehličnaté porosty se ukázalo, že v listnatých porostech po probírce byla naměřena nižší vlhkost než bez ní ($P < 0.001$). U jehličnatých porostu tomu bylo naopak. Porosty po probírce vykazovaly vyšší vlhkost. Vliv probírky je patrný hlavně v roce 2021, kdy bez probírky (obr.17) jsou listnaté porosty o 14 % vlhčí oproti jehličnatým. V porostech, kde byla provedena probírka (obr. 18) není v průměrných hodnotách v roce 2021 téměř rozdíl.



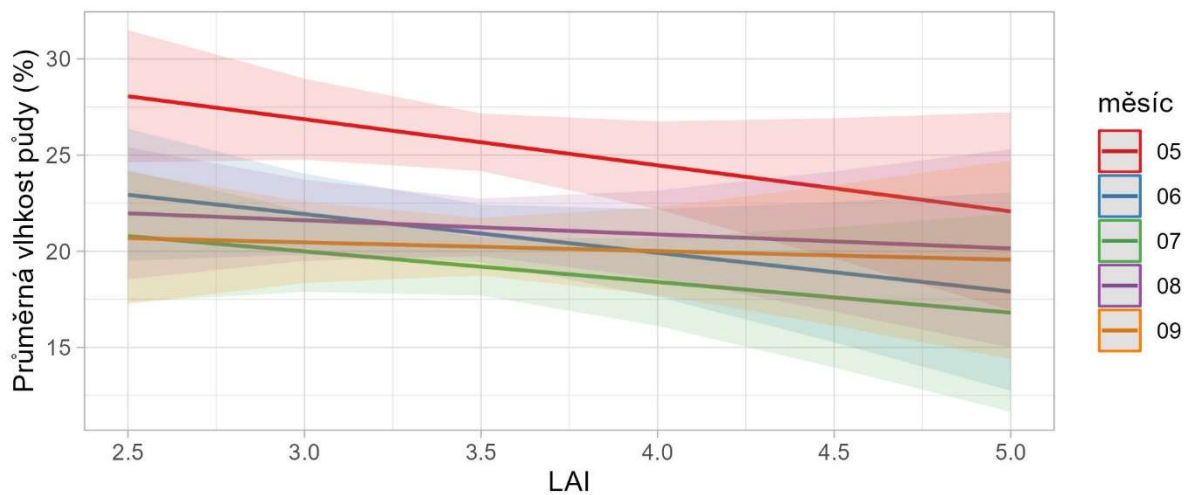
Obrázek 179: Průměrná roční půdní vlhkost v různých typech porostů bez probírky s 95 % intervalem spolehlivosti



Obrázek 18: Průměrná roční půdní vlhkost v různých typech porostů s probírkou s 95 % intervalem spolehlivosti

5.1.7 Závislost vlhkosti půdy na LAI a zápoji

Při testování vlivu LAI na průměrnou půdní vlhkost se závislost neprokázala ($P = 0,461$). Na obrázku 19 je vidět závislost LAI a průměrné vlhkosti půdy ve vegetačním období, ani zde se významnost neprokázala ($P = 0,150$). Korelace mezi zápojem a vlhkostí půdy se také neprokázala. V případě závislosti na průměrné vlhkosti byla hodnota $P = 0,641$. V případě závislosti na vlhkosti ve vegetačním období byla hodnota $P = 0,770$.

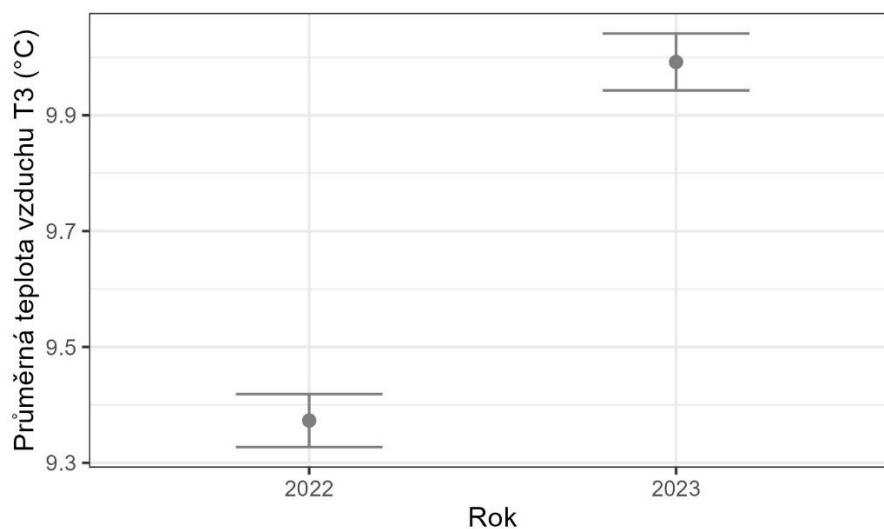


Obrázek 19: Závislost průměrné vlhkosti půdy ve vegetačním období (květen-září) na LAI.

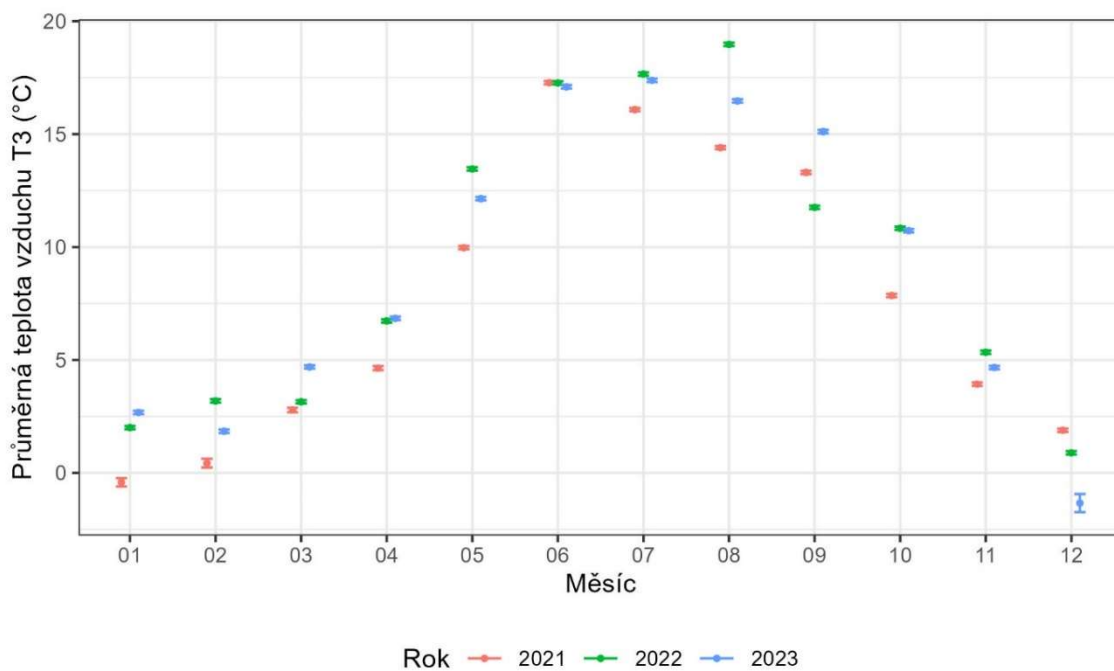
5.2 Teplota vzduchu

5.2.1 Teplota vzduchu v jednotlivých letech

Průměrná teplota vzduchu byla významně vyšší v roce 2023 než v roce 2022 ($P < 0.001$). V roce 2022 dosáhla 9,4 °C a v roce 2023 to bylo 10,0 °C (obr. 19). Pro rok 2021 nebyla průměrná hodnota vypočtena. Důvodem je pozdější instalace některých čidel v tomto roce, porovnání této hodnoty s následujícími roky by tedy nebylo relevantní. Z pohledu průměrných měsíčních teplot (obr. 20) je patrné, že rok 2021 byl nejchladnějším. Pouze v červnu, září a prosinci nebyly měsíční teploty v tomto roce nejnižší. Teploty v letech 2022 a 2023 byly podobné. Velké rozdíly byly pouze v srpnu, kdy průměrná měsíční teplota v roce 2022 byla o 2,5 °C vyšší, a naopak září tohoto roku bylo o 3,3 °C chladnější než v roce 2023 (obr. 21).



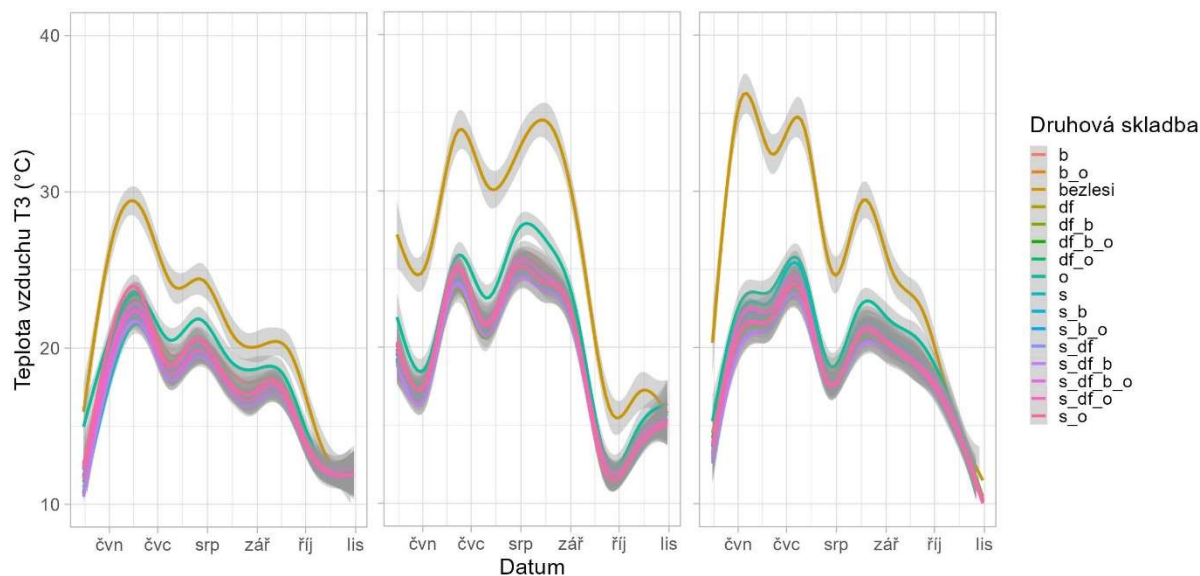
Obrázek 20: Průměrná roční teplota vzduchu v letech 2022 a 2023 s 95 % intervalem spolehlivosti.



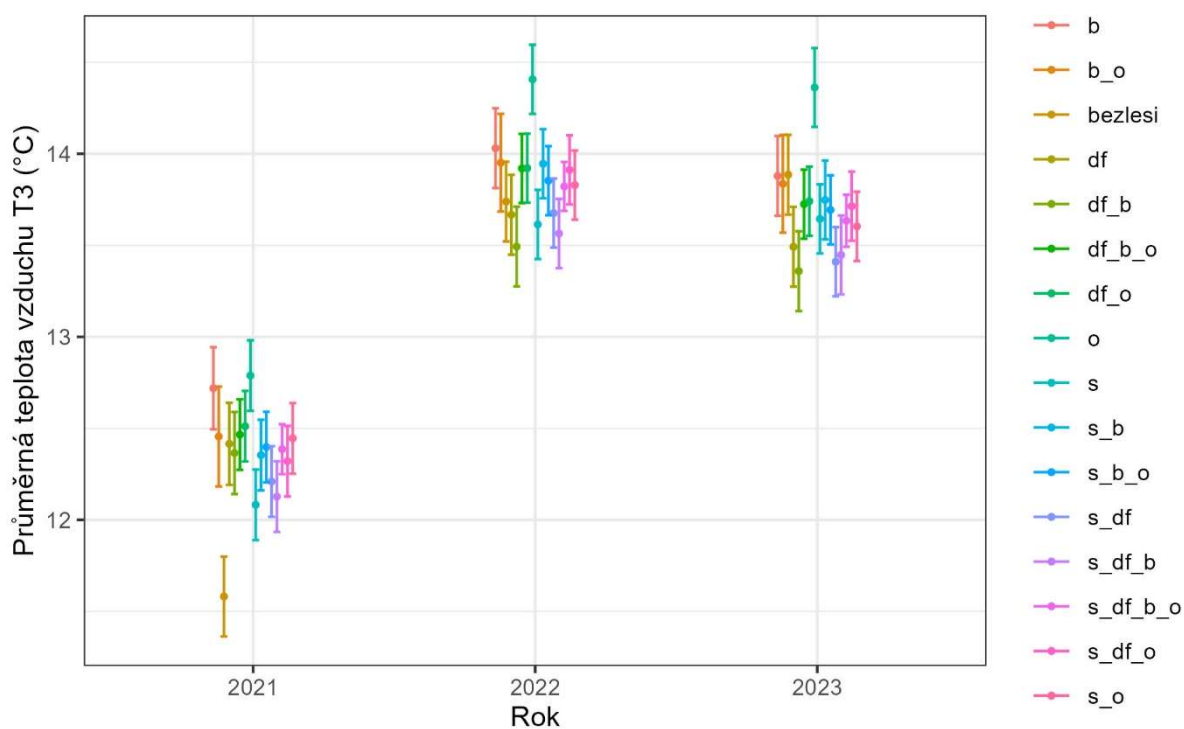
Obrázek 2110: Průměrná měsíční teplota vzduchu v letech 2021-2023 s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.2.2 Teplota vzduchu v jednotlivých směsích

Z obrázku 22 je patrný velký rozdíl maximálních denních teplot vzduchu na nezalesněných plochách oproti lesním porostům. Denní maxima se mezi jednotlivými směsmi příliš neliší. Pouze dubové porosty vykazovaly významně vyšší hodnoty než většina směsí, a to v průběhu všech měřených let (obr. 22). Podobný výsledek je patrný při porovnání průměrných teplot vegetačního období (obr. 23). Dubové monokultury patřily ve všech měřených letech k nejteplejším. Relativně vysoké hodnoty byly naměřeny v bukových monokulturách a porostech dub-buk. Nejnižší průměrné teploty byly naměřeny v porostech se zastoupením smrku a douglasky.



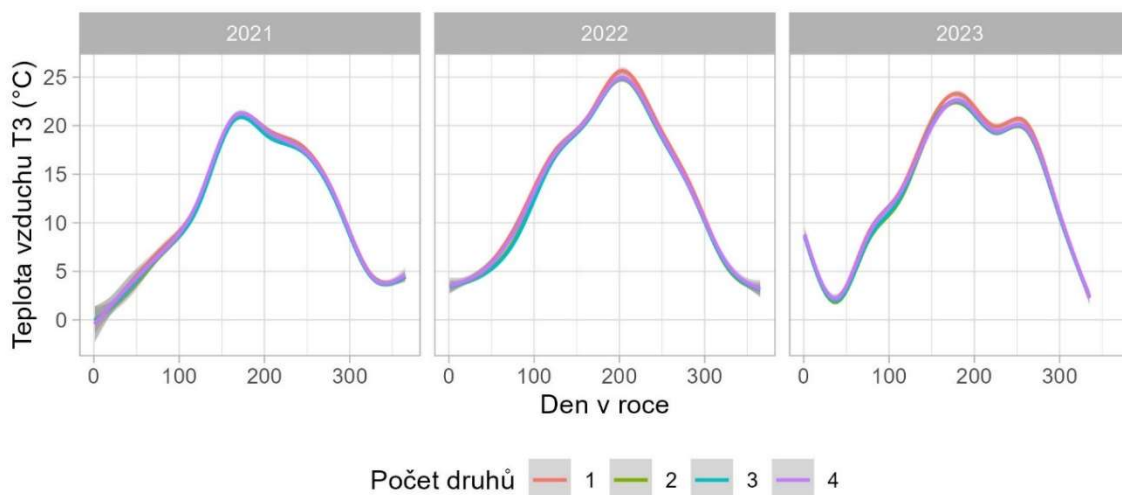
Obrázek 22: Průběh maximální denní teploty vzduchu ve vegetačním období v letech 2021–2023 (*b* = buk lesní, *o* = dub zimní, *s* = smrk ztepilý, *dg* = douglaska tisolistá).



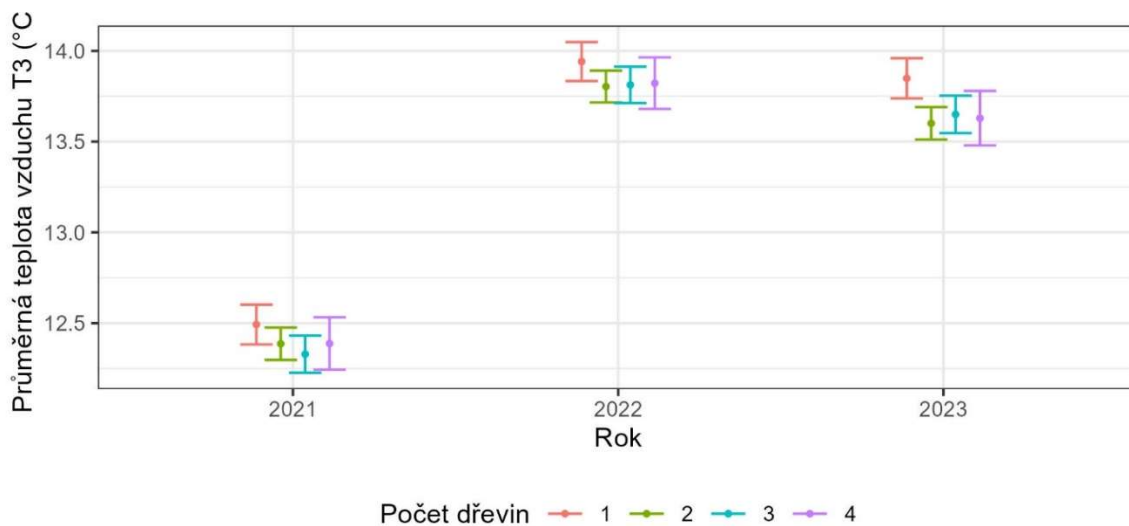
Obrázek 23: Průměrná teplota vzduchu ve vegetačním období v letech 2021–2023 s 95 % intervalem spolehlivosti (*b* = buk lesní, *o* = dub zimní, *s* = smrk ztepilý, *dg* = douglaska tisolistá).

5.2.3 Teplota vzduchu v porostech dle počtu zastoupených druhů.

Maximální denní teploty v monokulturách byly mírně vyšší oproti ostatním porostům. Rozdíl je patrný hlavně v nejteplejších obdobích roku a v maximech dosahoval 1 °C (Obr. 24). Průměrné teploty monokultur ve vegetačním období patřily také k nejvyšším. Významný rozdíl byl, ale zaznamenán pouze v roce 2023, a to mezi porosty s jednou a dvěma dřevinami (Obr. 25).



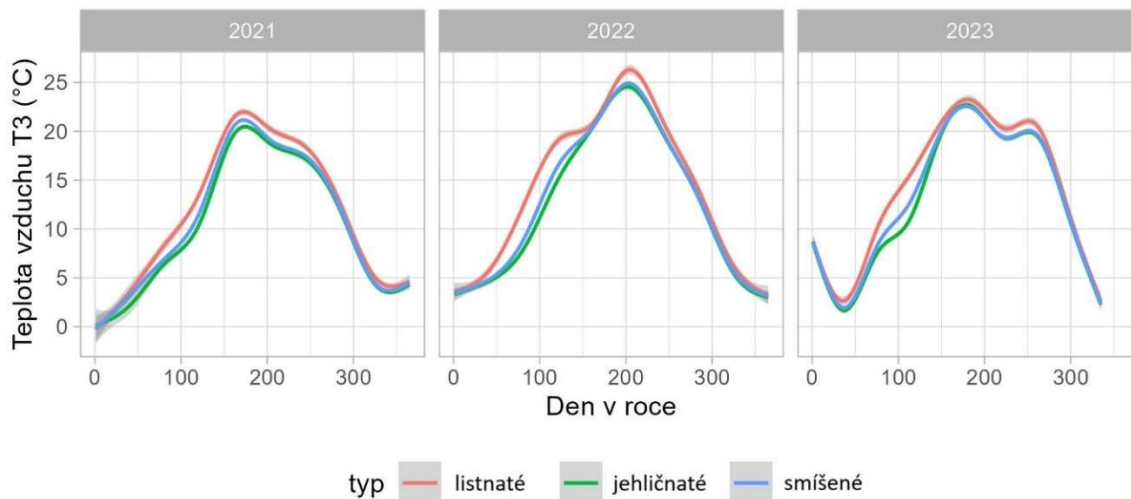
Obrázek 24: Průběh maximální denní teploty vzduchu v porostech dle počtu zastoupených druhů.



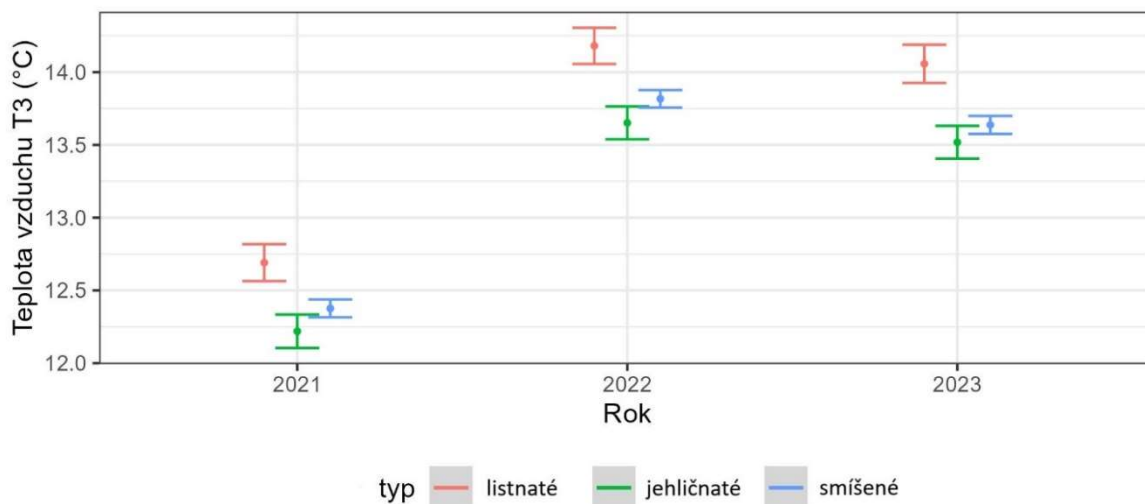
Obrázek 115: Průměrná teplota vzduchu ve vegetačním období dle počtu zastoupených druhů s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.2.4 Teplota vzduchu jehličnatých, listnatých a smíšených porostů

Denní maxima teplot v listnatých porostech dosahovaly vyšších hodnot oproti jehličnatým a smíšeným v průběhu celého měření ($P < 0,001$). Rozdíl se pohyboval mezi 1 a 3 °C (obr. 26). Podobné výsledky jsou patrné z obrázku 27, kde průměrné teploty ve vegetačním období u listnatých porostů byly v průměru o 0,4 °C vyšší oproti smíšeným porostům a o 0,5 °C vyšší než porosty jehličnaté.



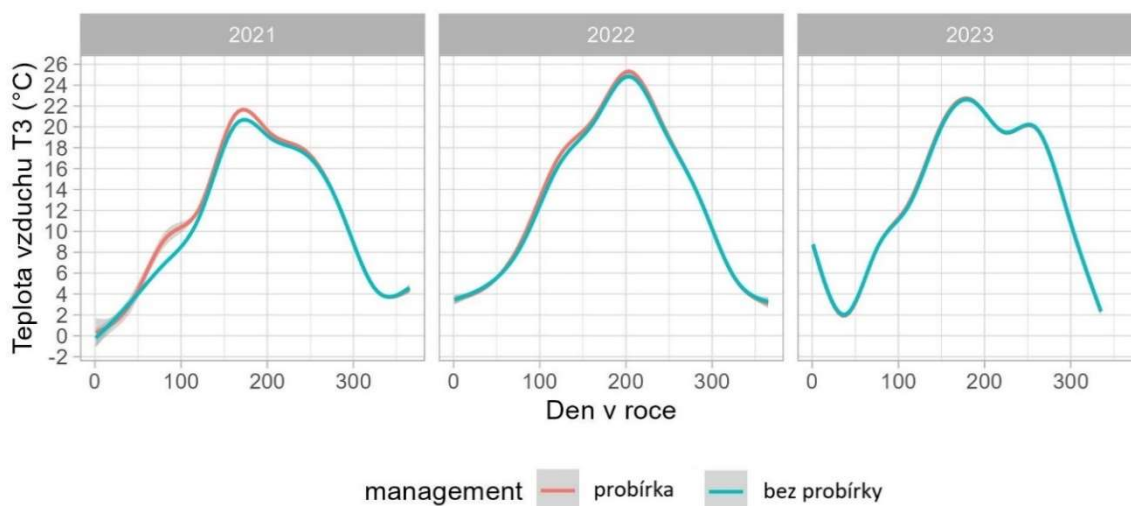
Obrázek 26: Průběh maximální denní teploty vzduchu jehličnatých, listnatých a smíšených porostů v letech 2021–2023.



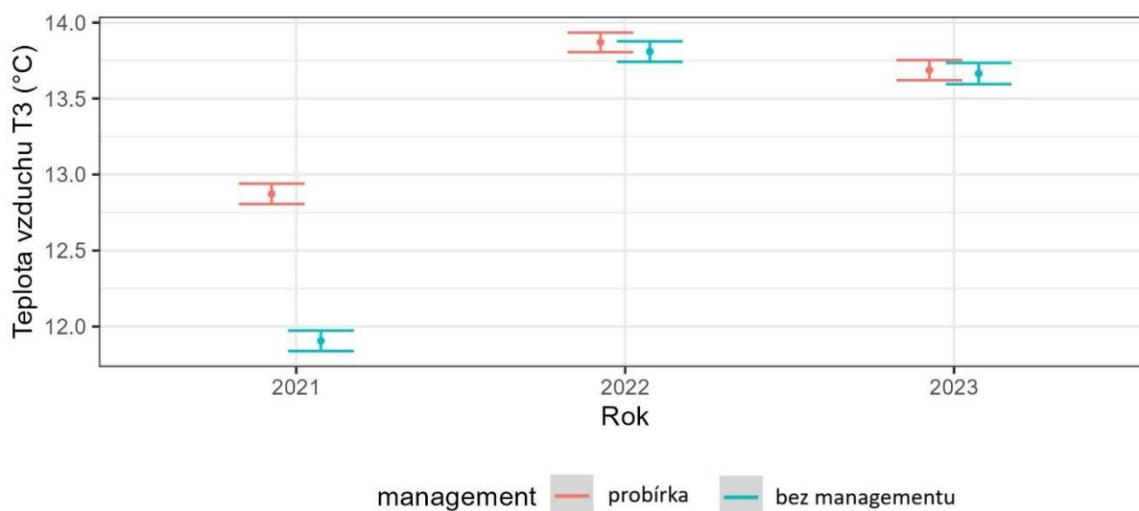
Obrázek 2712: Průměrná teplota vzduchu ve vegetačním období jehličnatých, listnatých a smíšených porostů s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.2.5 Vliv managementu na teplotu vzduchu

Denní maximální teploty v porostech, ve kterých byla provedena probírka, byly znatelně vyšší hlavně na jaře a v létě roku 2021. Rozdíl dosahoval až 2 °C. Rozdíl teplot na jaře je, ale vzhledem k omezeným datům v tomto období diskutabilní (pozdější instalace některých čidel). V následujícím roce byly rozdíly v managementu také viditelné, nepřesáhly ale 1 °C. V roce 2023 již rozdíl nebyl téměř pozorován (obr. 28). Podobný vliv managementu je patrný také z průměrných teplot ve vegetačním období. V roce 2021 byl rozdíl v porostech po probírce a bez ní 1 °C, kdežto v roce 2023 nedosahoval ani 1 desetiny stupně (obr. 29).



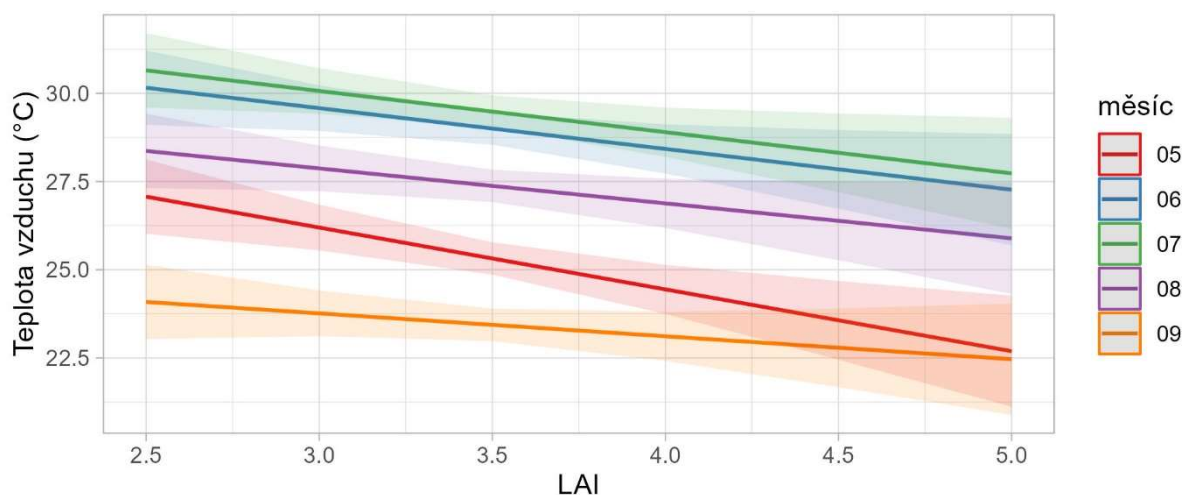
Obrázek 28: Průběh maximální denní teploty vzduchu v porostech s různým managementem.



Obrázek 29: Průměrná teplota vzduchu ve vegetačním období v porostech s různým managementem s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.2.6 Závislost teploty vzduchu na LAI a zápoji

Při testování se prokázalo, že LAI má vliv na průměrnou denní teplotou vzduchu a maximální denní teplotu vzduchu ve vegetačním období (obr. 30; tab. 2). Závislost LAI a průměrné denní teploty vzduchu ve vegetačním období není významná. Zápoj nekoreluje s žádnou veličinou teploty vzduchu.



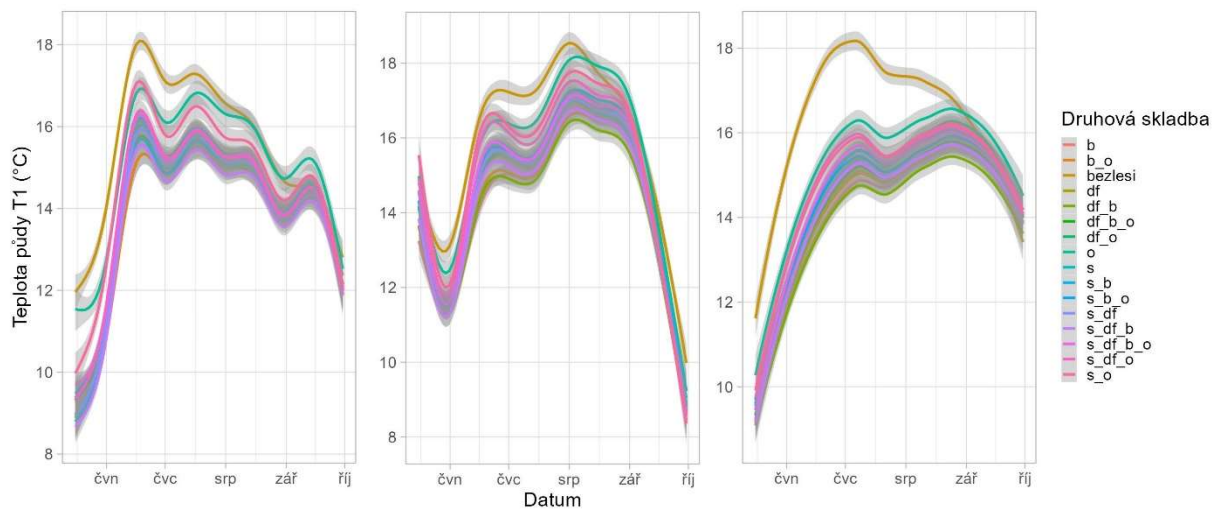
Obrázek 30: Závislost průměrné hodnoty denního maxima teploty vzduchu ve vegetačním období (květen-září) na LAI.

Tabulka 2: P-hodnoty závislosti veličin teploty vzduchu na LAI a zápoji.

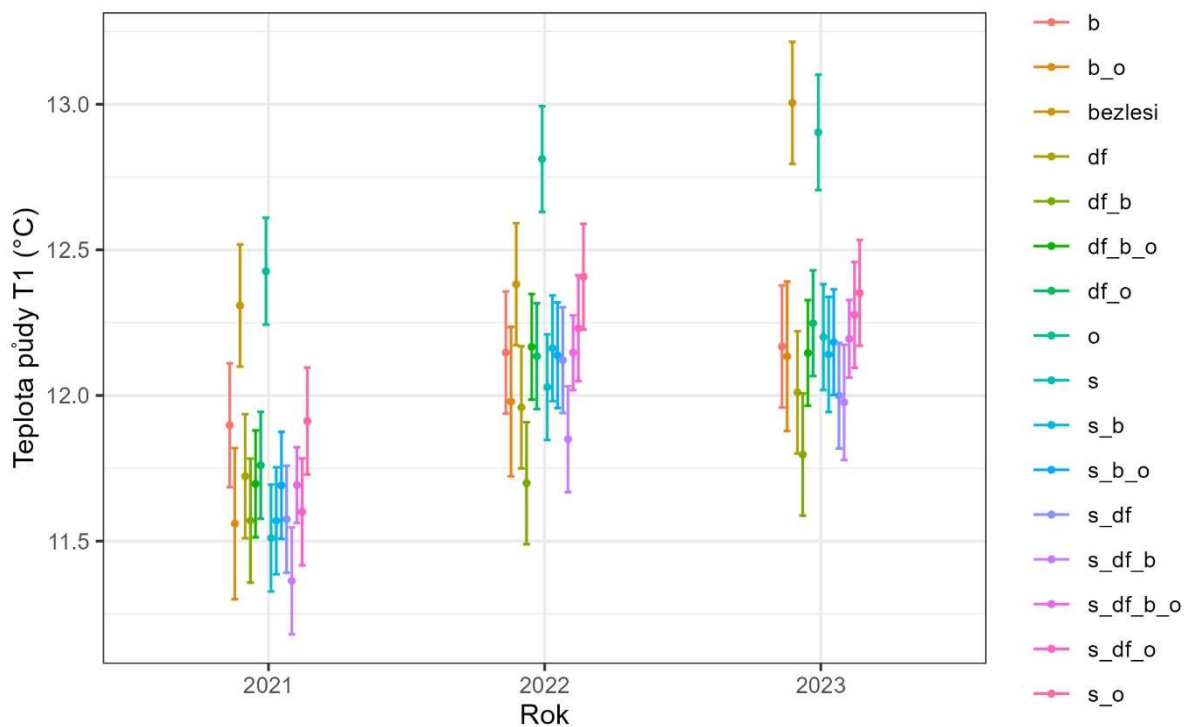
Veličina	LAI	Zápoj
Průměrná denní teplota vzduchu	<0,01	0,82
Průměrná denní teplota vzduchu ve veg. období	0,07	0,61
Maximální denní teplota vzduchu ve veg. období	<0,01	0,78

5.3 Teplota půdy

Výsledky teplot půdy ve směsích jsou podobné teplotám vzduchu. Jak denní maxima (obr. 31), tak i průměrné teploty byly naměřeny u dubové monokultury (obr. 32). Mezi nejteplejší patřily také bukové porosty. Rozdílné výsledky oproti teplotám vzduchu byly zaznamenány u porostů smrk-dub. Z pohledu teploty vzduchu patřily tyto porosty k průměrným, ale teplota půdy byla u nich naměřena jedna z nejvyšších. Nejnížší průměrné teploty byly naměřeny v porostech douglaska-buk a smrk-douglaska-buk (obr. 31).

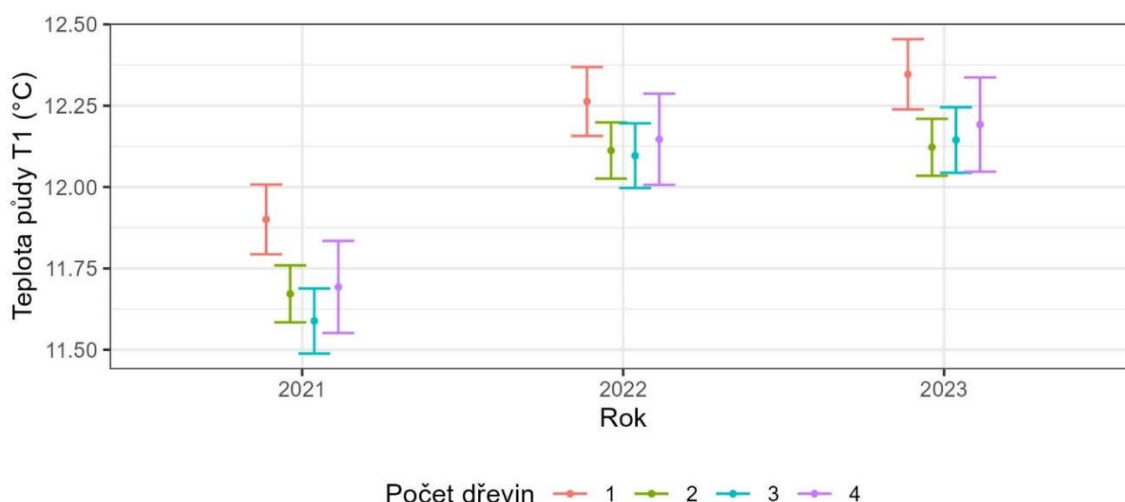


Obrázek 31: Průběh maximální denní teploty půdy ve vegetačním období v letech 2021–2023 (b = buk lesní, o = dub zimní, s = smrk ztepilý, dg = douglaska tisolistá).



Obrázek 32: Průměrná teplota půdy ve vegetačním období s 95 % intervalem spolehlivosti (b = buk lesní, o = dub zimní, s = smrk ztepilý, dg = douglaska tisolistá).

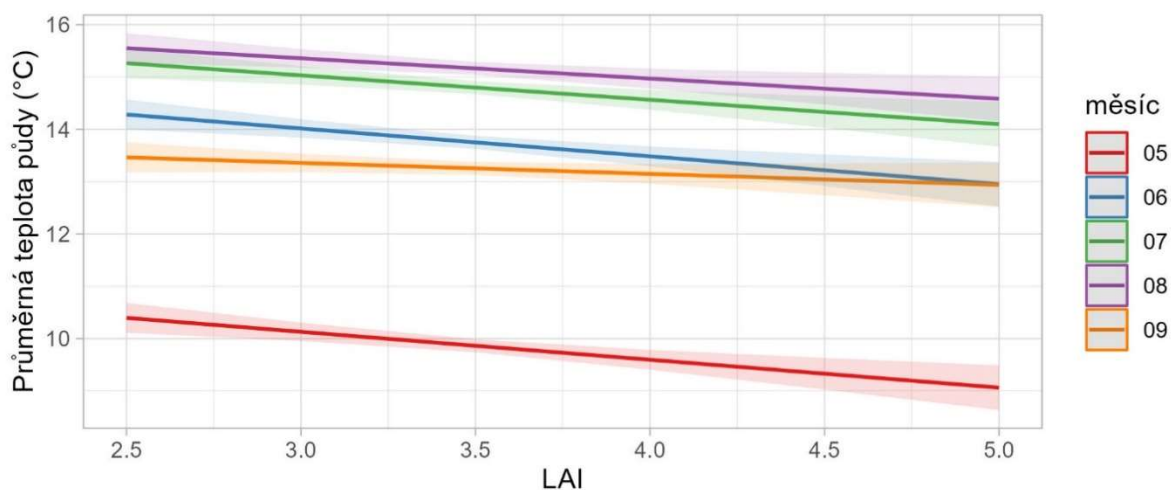
Stejně jako u teplot vzduchu dosahovaly teploty půdy nejvyšších hodnot u monokultur. Rozdíly jsou patrné hlavně porovnáním s porosty se zastoupením 2 a 3 dřevin (obr. 33). Při porovnání jednotlivých monokultur, porovnání listnatých a jehličnatých porostů, a také zhodnocení vlivu managementu bylo dosaženo stejných výsledků jako u teplot vzduchu.



Obrázek 33: Průměrná teplota půdy ve vegetačním období dle počtu zastoupených druhů s 95 % intervalem spolehlivosti.

5.3.1 Závislost teploty půdy na LAI a zápoji

V rámci této bakalářské práce byla testována závislost LAI na průměrné teplotě půdy, průměrné teplotě půdy ve vegetačním období (obr. 34) a na maximální denní teplotě půdy ve vegetačním období. Ve všech případech byla korelace významná (tab. 3). Naopak vliv zápoje na ani jednu veličinu teploty půdy se nepotvrdil.



Obrázek 34: Závislost průměrné teploty půdy ve vegetačním období (květen-září) na LAI.

Tabulka 3: P-hodnoty závislosti LAI a zápoje na veličinách teploty půdy.

Veličina	LAI	Zápoj
Průměrná denní teplota půdy	<0,01	0,82
Průměrná denní teplota půdy ve veg. období	<0,01	0,50
Maximální denní teplota půdy ve veg. období	<0,01	0,10

6 Diskuze

Tato diplomová práce měla za cíl studovat mikroklima v porostech s různou dřevinnou skladbou ve výsadbovém experimentu ve středním Německu. Z výsledků měření vlhkosti půdy je nejvíce patrný rozdíl dubových a smrkových monokultur. V roce 2021 byly dubové porosty společně se směsí buk-dub nejvlhčí. V roce 2023 byly tyto porosty průměrné. U smrkových monokultur byl trend v průběhu času opačný. V roce 2021 patřily smrkové porosty k těm nejsušším a v roce 2023 byly výrazně nejvlhčí (obr. 9, 13). Podobné výsledky jdou vidět i při porovnání listnatých a jehličnatých porostů (obr. 14, 15). V roce 2021 byly listnaté porosty významně vlhčí a v roce 2023 tomu bylo naopak. Vysvětlením může být výrazně vlhký a studený rok 2021. Potřeba vody v tomto roce byla relativně nízká a hlubší kořenový systém dubu a buku odebíral vlhkost spíše z větších hloubek na rozdíl od smrku. To by mohlo vysvětlit vyšší vlhkost půdy měřenou pod povrchem v listnatých porostech. Rok 2022 byl naopak nejsušším měřeným rokem. Na začátku roku byla vlhkost listnatých porostů také vyšší, to ale bylo pravděpodobně způsobeno předešlým vlhkým rokem, je vidět že vlhkost listnatých porostů během vegetačního období klesá rychleji než u jehličnatých a v nejsušším období jsou již vlhkosti vyrovnány (obr.14). V průběhu celého roku 2023 jsou již vlhkosti půdy v jehličnatých porostech vyšší. Z toho vyplývá, že při dostatku srážek jsou zejména dubové porosty schopny udržet v půdě více vody a akumulovat ji. V opačném případě se, ale tato schopnost ztrácí zřejmě vlivem vyšší teploty v porostu (obr. 23), a tedy i většího odparu z půdy a větší evapotranspirace. To odpovídá tvrzení Lischeida (1995), který uvádí vyšší nároky na transpiraci u listnatých porostů v letních měsících.

Při porovnání jehličnatých a listnatých porostů, kde nebyla provedena probírka, se tento rozdíl ukázal také (obr. 17). Naopak tam, kde byla provedena probírka, nebyl rozdíl mezi typy porostů patrný (obr. 18). Z toho lze usoudit, že probírka způsobila vyšší vlhkost půdy v listnatých porostech, významný rozdíl v půdní vlhkosti mezi listnatými a jehličnatými porosty je v letech 2021 a 2022. Faktorem mohla být morfologie kořenového systému smrku. Mělké kořeny odebírají vlhkost právě z hloubky, kde byla vlhkost měřena (Augusto et. al., 2002). Odstraněním části stromů se více snížila spotřeba vody u jehličnatých než u listnatých porostů. Vyrovnání vlhkosti mezi listnatými a jehličnatými porosty po probírce nebylo způsobeno pouze zvýšenou vlhkostí u jehličnanů, ale významné bylo i snížení vlhkosti u listnatých porostů, a to v roce 2021 i 2022. Hlubší kořenový systém dubu a buku zřejmě neměl takový vliv na vlhkost půdy na povrchu. Snížení vlhkosti mohlo být způsobeno vyšším výparem vlivem vyšších teplot v porostech po probírce.

Při porovnání obecného vlivu managementu na vlhkost půdy byla naměřena vyšší vlhkost u porostů s provedenou probírkou ve většině měřeného období. Snížení potřeby vody porostu vlivem redukce hustoty stromů a snížená intercepce zřejmě přispěla k vyšší vlhkosti v těchto porostech. V nejsušším období (červenec, srpen 2022) nebyl ve vlhkosti na plochách s probírkou a bez ní rozdíl. Důvodem může být větší výpar a evapotranspirace vlivem vyšší intenzity sluneční

energie v porostech po probírce, a tedy kompenzace výše zmíněných faktorů zvyšující půdní vlhkost.

Dalším zjištěním je vliv počtu druhů ve směsi na vlhkost půdy. Ve všech vegetačních obdobích byly průměrné hodnoty nejvyšší u monokultur, a ty byly významně vyšší než u porostů se 3 a 4 dřevinami (obr. 11). To podporuje tvrzení, že ne vždy je vyšší diverzita druhové skladby lepší pro mikroklimatické podmínky v porostu. (Forrester et. al., 2016; Grossiord et al., 2014; Zhang et al. 2022). Kombinace různých kořenových systémů využívá dostupný prostor lépe a odčerpá vodu z půdy rychleji. Důležité je zmínit, že čidla měřila vlhkost jen několik centimetrů pod povrchem a není tedy zcela jasné, jaké jsou podmínky ve větších hloubkách. Při slabém dešti, kdy se voda dostane jen na povrch, může být využita jen dřevinami s mělkými kořeny a tím omezit přísun ostatním dřevinám. Naopak při dlouhodobějším suchu mohou hlubokokořenné dřeviny odebírat vodu, která by jinak kapilární silou vzlínala z hloubky k povrchu. Měření vlhkosti půdy v různých hloubkách by mohlo přispět k většímu pochopení vlivu různých dřevin na půdní vlhkost a naopak.

Při testování vztahu LAI a zápoje s vlhkostí půdy se významná závislost neprokázala. Důvodem může být dostatečné množství vody během měřeného období. Závislost LAI na teplotě vzduchu a teplotě půdy se, ale potvrdila. Při vyšší teplotě roste výpar i evapotranspirace, ale díky dostatečnému množství vody v systému zřejmě nedošlo k významnému poklesu vlhkosti půdy, který by se dal statisticky prokázat. Dalším faktorem může být snížená intercepce ve více otevřených porostech, a tedy větší množství srážek kompenzující ztráty výparem.

Výsledky měření teploty vzduchu ukázaly významně vyšší hodnoty u listnatých porostů (průměrně o 0,5 °C oproti jehličnatým; obr. 27), nejvíce patrné to bylo u dubových porostů (obr. 23). Největší rozdíl dubových monokultur oproti ostatním porostům byl v nejteplejším období měření, tedy v srpnu 2022 (obr. 22). To bude pravděpodobně zapříčiněno řídkou korunou dubu oproti ostatním dřevinám a většímu množství sluneční energie dopadající na povrch půdy. Snížená schopnost těchto porostů tlumit maximální teploty makroklimatu je zřejmě příčinou vyšších rozdílů v teplotě v nejteplejších obdobích. Vliv většího zápoje na snížení teplotních výkyvů potvrzují i jiní autoři. Pasak (1960) poukazuje na menší amplitudy denních teplot ve smrkových porostech než ve dubových. Ehbrecht et al. (2019) uvádí menší schopnost regulovat teplotní extrémy borových porostů v porovnání s porosty buku a dubu. Aussenac (1975) uvádí vyšší teploty v borových porostech než ve smrkových.

Vliv hustoty korun na teplotu v porostu potvrzuje také test závislosti teplot vzduchu na LAI. Významná korelace ($p < 0,01$) vyšla mezi LAI a průměrnou teplotou vzduchu a také mezi LAI a maximální denní teplotou vzduchu ve vegetačním období.

Vliv probírky na maximální denní teplotu vzduchu byl významný pouze v roce 2021, tedy následující rok po provedeném zásahu, a to o 1 °C při porovnání průměrných hodnot ve vegetačním období (obr. 29). Zde se také pravděpodobně projevila vyšší intenzita sluneční energie pronikající do porostu. V roce 2022 byla vyšší teplotní maxima v porostech s probírkou pouze v první polovině roku, poté se teploty obou porovnávaných variant srovnaly. V roce 2023

již rozdíl nebyl patrný. Koruny zřejmě vyplnily mezery způsobené probírkou a snížily množství pronikajícího světla tak, že vliv na teplotu již nebyl patrný.

7 Závěr

Struktura a druhová skladba lesního ekosystému ovlivňuje mimo jiné i teplotu a vlhkost vzduchu a půdy a tím vytváří specifické mikroklima, které se liší od podmínek mimo les. Koruny snižují množství sluneční energie dopadající na povrch půdy, vlivem intercepce ovlivňují srážky dopadající na zem a snižují rychlost větru. Vegetace spotřebovává půdní vlhkost a transpirací zvyšuje vlhkost vzduchu. V době klimatické změny, kdy se zvyšují průměrné teploty a suchá období jsou delší a intenzivnější, jsou lesy důležitým prostředkem, jak s těmito změnami bojovat. Kromě pozitivních dopadů na člověka, vodní režim či erozi půdy, může mít schopnost lesa regulovat makroklimatické podmínky významný vliv na pomoc ohroženým organismům při adaptaci na změny klimatu. Cílem této práce je přispět k porozumění vlivu jednotlivých dřevin a jejich směsí na mikroklima.

Území, na kterém byla sbírána data je součástí výsadbového experimentu BIOTREE, který se zabývá studiem vlivu biodiverzity na fungování lesních ekosystémů. Experiment BIOTREE Kaltenborn, ze kterého byla získána data, se nachází jižně od města Bad Salzungen. Výsadba byla provedena v letech 2003 a 2004. Vysazeny byly následující dřeviny: buk lesní (*Fagus sylvatica*), smrk ztepilý (*Picea abies*), douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) a dub zimní (*Quercus petraea*). Z těchto druhů byly vysazeny monokultury a směsi se všemi možnými kombinacemi těchto druhů (2-4). Jedna třetina byla ponechána bez managementu, u jedné byla v roce 2020 provedena probírka v intenzitě 30 %. V březnu 2021 byla instalována čidla TMS-4 od firmy TOMST s.r.o. snímající teplotu a vlhkost půdy a teplotu vzduchu. V každém ze 16 bloků byla umístěna 4 čidla, 2 v podploše s managementem a 2 v podploše bez managementu. Byly také určeny dvě kontrolní plochy mimo les, kde byla instalována dvě čidla pro porovnání lesního porostu a bezlesí. Data byla stažena v prosinci 2023. Měření byla tedy k dispozici pro roky 2021 až 2023. V roce 2021 byla nad každým čidlem pořízená hemisférická fotografie. Stažená data byla vyčištěna a dále zpracována v softwaru R. Pro vyhodnocení průběhu teplot a půdní vlhkosti v čase byly do dat naitovány zobecněné aditivní modely (GAM), které byly následně vizualizovány v grafech. Dále byly sestaveny obecné lineární modely pro testování rozdílů v ročních a měsíčních průměrech a průměrech za vegetačním obdobím (květen až září) a rovněž pro vyhodnocení závislosti mikroklimatu na druhové skladbě a počtu druhů stromů. Zvláště byly testovány průměrné měsíční hodnoty za celé měřené období a hodnoty ve vegetačním období. Z hemisférických fotografií byla pomocí softwaru R vypočítána hodnota otevřenosti stromového patra a index listové plochy LAI. Pomocí obecných lineárních modelů byly také zjišťovány závislosti veličin měřených půdními čidly na LAI a zápoji.

Výsledky ukázaly nejvyšší vlhkost půdy v dubových monokulturách v roce 2021. V tomto vlhkém a chladném roce zřejmě hluboký kořenový systém dubu odebíral vodu z půdy z větších hloubek, než byla vlhkost měřena. Ve smrkových porostech, který má mělký kořenový systém, byla vlhkost

v tomto roce relativně nízká. V následující vegetační sezóně, která byla výrazně suchá, vlhkost půdy v dubových a smrkových porostech srovnala. Vlivem vyšších teplot v dubových porostech se zřejmě zvýšil výpar a evapotranspirace, a to vedlo k výraznějšímu úbytku půdní vlhkosti. V roce 2023, který byl z pohledu vlhkosti a teploty průměrný, byla již vlhkost v dubových porostech významně nižší než ve smrkových. Stejně výsledky byly patrné z porovnání listnatých a jehličnatých porostů. Dále byl pozorován vliv probírky na vlhkost půdy. V jehličnatých porostech po probírce byla naměřena významně vyšší vlhkost půdy. Faktorem mohla být morfologie kořenového systému smrku. Mělké kořeny odebírají vlhkost právě z hloubky, kde byla vlhkost měřena a odstraněním části stromů se snížila spotřeba vody. Naopak listnaté porosty po probírce vykazovaly významně nižší vlhkosti půdy oproti porostům bez zásahu. Hlubší kořenový systém patrně neměl takový vliv na vlhkost půdy na povrchu a ke snížení potřeby vody v porostech po probírce nedošlo, na rozdíl od jehličnatých porostů. Naopak zvýšená teplota po probírce v listnatých porostech mohla způsobit vyšší výpar vody z půdy a potřebu vody na transpiraci a tím snížit půdní vlhkost. Při porovnání obecného vlivu managementu na vlhkost půdy byla naměřena vyšší vlhkost u porostů s provedenou probírkou ve většině měřeného období. Snížení potřeby vody porostu vlivem redukce jedinců a snížená intercepce zřejmě přispěla k vyšší vlhkosti v těchto porostech. Výjimkou bylo pouze nejsušší období, kde rozdíl v porostech s probírkou a bez ní nebyl pozorován. Větší výpar a evapotranspirace vlivem vyšší teploty v porostech po probírce, zřejmě kompenzoval výše zmíněné faktory. Dalším zjištěním byly významně vyšší průměrné hodnoty vlhkosti půdy u monokultur oproti porostům se 3 a 4 dřevinami. Kombinace různých kořenových systémů zřejmě využívá dostupný prostor lépe a odčerpá vodu z půdy rychleji.

Výsledky měření teploty vzduchu ukázaly významně vyšší hodnoty u listnatých porostů, nejvíce patrné to bylo u dubových porostů. U dubových porostů byla také pozorována nejmenší schopnost tlumit teplotní extrém. To bude pravděpodobně zapříčiněno řídkou korunou dubu oproti ostatním dřevinám a většímu množství sluneční energie dopadající na povrch půdy. Vliv hustoty korun na teplotu v porostu potvrdil také test závislosti teplot vzduchu na LAI. Vliv probírky na maximální denní teplotu vzduchu byl významný pouze v roce 2021, tedy následující rok po provedeném zásahu, a na začátku roku 2022. Poté koruny zřejmě vyplnily mezery způsobené probírkou a vliv na teplotu již nebyl patrný.

Z výsledků vyplynul významný vliv jednotlivých dřevin a jejich směsí na mikroklima. Hustota korun měla vliv na teplotu půdy a vzduchu, na vlhkost půdy měla zase patrně vliv morfologie kořenového systému jednotlivých dřevin. Měření půdní vlhkosti v celém dosahu vlivu kořenů by pomohlo komplexnějšímu porozumění této problematice. Tato mikroklimatická data v kombinaci s údaji o růstu stromů například z dendrometrů mohou objasnit, jak mikroklima zpětně ovlivňuje porost. Dále se ukázalo, že efekt komplementarity různých dřevin nemusí mít vždy pozitivní efekt na vodní režim a v určitých podmínkách je menší diverzita stromového patra z pohledu vlhkosti půdy vhodnější.

8 Přehled literatury a použitých zdrojů

- Ashcroft, M. B., & Ramp, D. (n.d.). *A novel approach to quantify and locate potential microrefugia using topoclimate, climate stability, and isolation from the matrix*. <https://www.researchgate.net/publication/223956060>
- Augusto, L., & Ranger, J. (2001). Impact of tree species on soil solutions in acidic conditions. *Annals of Forest Science*, 58(1), 47–58. <https://doi.org/10.1051/FOREST:2001102>
- Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D., & Rothe, A. (2002). Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. In *Annals of Forest Science* (Vol. 59, Issue 3, pp. 233–253). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/forest:2002020>
- Aussenac G., Couverts forestiers et facteurs du climat:Leurs interactions, conséquences écophysiological chez quel-ques résineux (1975), Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 234 p.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57(3), 287–301. <https://doi.org/10.1051/forest:2000119>
- Bali, G. P. K., Kaleka, A. S., Bali, G. P. K., & Kaleka, A. S. (2021). Potential Reasons for Insect Decline. *Global Decline of Insects*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.100065>
- Boisvenue, C., & Running, S. W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12(5), 862–882. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2006.01134.X>
- Brusa, A., Bunker, D. E. (2014): Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 102-107
- Chapin, F. S., Sala, O. E., Burke, I. C., Grime, J. P., Hooper, D. U., Lauenroth, W. K., Lombard, A., Mooney, H. A., Mosier, A. R., Aem, S. N., Pacala, S. W., Roy, J., Steffen, W. L., & Tilman, D. (n.d.). *Ecosystem Consequences of Changing Biodiversity Experimental evidence and a research agenda for the future*. Retrieved March 23, 2024, from <https://academic.oup.com/bioscience/article/48/1/45/322806>
- Davis, K. T., Dobrowski, S. Z., Holden, Z. A., Higuera, P. E., & Abatzoglou, J. T. (2019). Microclimatic buffering in forests of the future: the role of local water balance. *Ecography*, 42(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/ECOG.03836>
- 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., Klings, D. H., Koelemeijer, I. A., Lembrechts, J. J., Marrec, R., ... Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research

- agenda. In *Global Change Biology* (Vol. 27, Issue 11, pp. 2279–2297). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- De Frenne, P., Rodríguez-Sánchez, F., Coomes, D. A., Baeten, L., Verstraeten, G., Vellen, 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., ... Verheyen, K. (2013). Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(46), 18561–18565. <https://doi.org/10.1073/pnas.1311190110>
- De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B. R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., & Lenoir, J. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, *3*(5), 744–749. <https://doi.org/10.1038/S41559-019-0842-1>
- Ehbrecht, M., Schall, P., Ammer, C., Fischer, M., & Seidel, D. (2019). Effects of structural heterogeneity on the diurnal temperature range in temperate forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, *432*, 860–867. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2018.10.008>
- Fernández-Alonso, M. J., Díaz-Pinés, E., Ortiz, C., & Rubio, A. (2018). Disentangling the effects of tree species and microclimate on heterotrophic and autotrophic soil respiration in a Mediterranean ecotone forest. *Forest Ecology and Management*, *430*, 533–544. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.046>
- Forrester, D. I., Bonal, D., Dawud, S., Gessler, A., Granier, A., Pollastrini, M., & Grossiord, C. (2016). Drought responses by individual tree species are not often correlated with tree species diversity in European forests. *Journal of Applied Ecology*, *53*(6), 1725–1734. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12745>
- Führer, E. (2000). Forest functions, ecosystem stability and management. *Forest Ecology and Management*, *132*(1), 29–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00377-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00377-7)
- Ganault, P., Nahmani, J., Hättenschwiler, S., Gillespie, L. M., David, J. F., Henneron, L., Iorio, E., Mazzia, C., Muys, B., Pasquet, A., Prada-Salcedo, L. D., Wambsganss, J., & Decaëns, T. (2021). Relative importance of tree species richness, tree functional type, and microenvironment for soil macrofauna communities in European forests. *Oecologia*, *196*(2), 455–468. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04931-w>
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2009). *The climate near the ground*. Rowman & Littlefield.
- Heberling, J. M., McDonough MacKenzie, C., Fridley, J. D., Kalisz, S., & Primack, R. B. (2019). Phenological mismatch with trees reduces wildflower carbon budgets. *Ecology Letters*, *22*(4), 616–623. <https://doi.org/10.1111/ELE.13224>

- Hylander, K. (2005). Aspect modifies the magnitude of edge effects on bryophyte growth in boreal forests. *Journal of Applied Ecology*, 42(3), 518–525. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2664.2005.01033.X>
- Jactel, H., Brockerhoff, E. G., & Duelli, P. (2005). A Test of the Biodiversity-Stability Theory: Meta-analysis of Tree Species Diversity Effects on Insect Pest Infestations, and Re-examination of Responsible Factors. *Forest Diversity and Function*, 235–262. https://doi.org/10.1007/3-540-26599-6_12
- Jucker, T., Bouriaud, O., Avacaritei, D., & Coomes, D. A. (2014). Stabilizing effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes. *Ecology Letters*, 17(12), 1560–1569. <https://doi.org/10.1111/ELE.12382>
- Kovács, B., Tinya, F., & Ódor, P. (2017). Stand structural drivers of microclimate in mature temperate mixed forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234–235, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.268>
- Kuželková, M., Jačka, L., Kovář, M., Hradilek, V., & Máca, P. (2023). Tree trait-mediated differences in soil moisture regimes: a comparative study of beech, spruce, and larch in a drought-prone area of Central Europe. *European Journal of Forest Research*, 143(1). <https://doi.org/10.1007/S10342-023-01628-Y>
- Lenoir, J., Hattab, T., & Pierre, G. (2017). Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography*, 40(2), 253–266. <https://doi.org/10.1111/ECOG.02788>
- Liang, J., Crowther, T. W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E. D., McGuire, A. D., Bozzato, F., Pretzsch, H., De-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C. B., Glick, H. B., Hengeveld, G. M., Nabuurs, G. J., Pfautsch, S., ... Reich, P. B. (2016). Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 354(6309). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAF8957>
- Lischeid G. (1995). Prozeßorientierte hydrologische Untersuchungen am kleinen Gudenberg bei Zierenberg (Nordhessen) in verschiedenen Skalenbereichen, Berichte d. Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A Bd 128.
- Myneni, R. B. (1997). Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6), 1380–1393. <https://doi.org/10.1109/36.649788>
- Nihlgård B., The microclimate in a beech and a spruce forest – a comparative study from Kongalund, Scania, Sweden, *Botanica Notiser* 122 (1969) 333–352.
- Paquette, A., Hector, A., Vanhellefont, M., Koricheva, J., Scherer-Lorenzen, M., Verheyen, K., Abdala-Roberts, L., Auge, H., Barsoum, N., Bauhus, J., Baum, C., Bruehlheide, H.,

- Castagneyrol, B., Cavender-Bares, J., Eisenhauer, N., Ferlian, O., Ganade, G., Godbold, D., Gravel, D., ... Zemp, D. C. (2018). A million and more trees for science. *Nature Ecology & Evolution* 2:5, 2(5), 763–766. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0544-0>
- Pasak V., Effect of tree species composition on air and soil temperatures in stands (1960), Sborn. cs. Akad. Zemed. Ved (Lesn.) 6 603–614.
- Poleno, Z., Vacek, S. (2011) *Ekologické základy pěstování lesů*. 2. vyd. Lesnická práce s.r.o. Kostelec nad Černými lesy 2011. ISBN 978-80-87154-99-1
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Pretzsch, H. (2005). Diversity and Productivity in Forests: Evidence from Long-Term Experimental Plots. *Forest Diversity and Function*, 41–64. https://doi.org/10.1007/3-540-26599-6_3
- Reich, P. B., Sendall, K. M., Stefanski, A., Rich, R. L., Hobbie, S. E., & Montgomery, R. A. (2018). Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature*, 562(7726), 263–267. <https://doi.org/10.1038/S41586-018-0582-4>
- Rothe A., Influence of tree species composition on rooting patterns, hydrology, elemental turnover and growth in a mixed spruce – beech stand in Southern Germany Höglwald (1997), Ph.D. Thesis, University of Munich Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 163.
- Rothe, A., & Binkley, D. (2001). Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(11), 1855–1870. <https://doi.org/10.1139/CJFR-31-11-1855>
- Rothe, A., Huber, C., Kreutzer, K., & Weis, W. (2002). Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil*, 240(1), 33–45. <https://doi.org/10.1023/A:1015846906956>
- Scherer-Lorenzen, M., Schulze, E. D., Don, A., Schumacher, J., & Weller, E. (2007a). Exploring the functional significance of forest diversity: A new long-term experiment with temperate tree species (BIOTREE). *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9(2), 53–70. <https://doi.org/10.1016/J.PPEES.2007.08.002>
- Scherer-Lorenzen, M., Schulze, E. D., Don, A., Schumacher, J., & Weller, E. (2007b). Exploring the functional significance of forest diversity: A new long-term experiment with temperate tree species (BIOTREE). *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9(2), 53–70. <https://doi.org/10.1016/J.PPEES.2007.08.002>
- Schmidt, M., Jochheim, H., Kersebaum, K. C., Lischeid, G., & Nendel, C. (2017). Gradients of microclimate, carbon and nitrogen in transition zones of fragmented landscapes – a review.

- In *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 232, pp. 659–671). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.022>
- Senf, C., & Seidl, R. (n.d.). *Mapping the forest disturbance regimes of Europe*. <https://doi.org/10.1101/2020.03.30.015875>
- Strukelj, M., Parker, W., Corcket, E., Augusto, L., Khelifa, R., Jactel, H., & Munson, A. D. (2021). Tree species richness and water availability interact to affect soil microbial processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 155. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2021.108180>
- Tomst s.r.o., [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://tomst.com/web/cz/systemy/tms/tms-4/>
- 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. *Journal of Ecology*, 101(5), 1201–1213. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12121>
- Vanseveren J.P., Étude comparative du microclimat dans une hêtraie, une pessière et une prairie. *Bull* (1975). Soc. Roy. Bot. Belg. 108 243–259.
- Wen, Z., Zheng, H., Zhao, H., Liu, L., & Ouyang, Z. (2021). Species compositional, structural and functional diversity exerts different effects on soil erosion caused by increased rainfall intensity in Chinese tropical forests. *Plant and Soil*, 465(1–2), 97–108. <https://doi.org/10.1007/S11104-021-04980-3>
- Wikström, L., Milberg, P., & Bergman, K. O. (2009). Monitoring of butterflies in semi-natural grasslands: diurnal variation and weather effects. *Journal of Insect Conservation*, 13(2), 203–211. <https://doi.org/10.1007/S10841-008-9144-7>
- 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268(January), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>
- 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., ... Coomes, D. (2020). Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, 368(6492), 772–775. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABA6880>
- Zhang, S., Landuyt, D., Verheyen, K., & De Frenne, P. (2022). Tree species mixing can amplify microclimate offsets in young forest plantations. *Journal of Applied Ecology*, 59(6), 1428–1439. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14158>

Žilák, J. (2022) Vliv druhové skladby stromového patra na mikroklima středoevropského lesa
[Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská]
(Identifikační číslo: 204045) doc. Ing. Radim Matula, Ph.D.