

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA EKOLOGIE LESA



**VLIV DRUHOVÉ SKLADBY STROMOVÉHO PATRA NA
MIKROKLIMA STŘEDOEVROPSKÉHO LESA**
**THE EFFECT OF TREE SPECIES COMPOSITION ON
MICROCLIMATE OF CENTRAL EUROPEAN FOREST**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Bc. Jakub Žilák

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jakub Žilák

Aplikovaná ekologie

Název práce

Vliv druhové skladby stromového patra na mikroklima středoevropského lesa

Název anglicky

The effect of tree species composition on microclimate of Central European forest

Cíle práce

Stromové patro lesů může významně omezit negativní vlivy globálního oteplování na lesní mikroklima, čímž snižuje dopady na biodiverzitu a stabilitu těchto lesů. Vliv lesů na mikroklima se však liší dle druhové skladby a smíšené stromového patra, avšak empirická informace o tom, jak hlavní dřeviny středoevropského 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 v 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 s pomocí k tomu vytvořeného skriptu. 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.

Doporučený rozsah práce

40

Klíčová slova

mikroklima, druhová skladba lesů, temperátní les, BIOTREE, TreeDivNet

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., Petřík, 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

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

doc. Ing. Radim Matula, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ekologie lesa

Elektronicky schváleno dne 22. 12. 2021

prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 1. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2022

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Vliv druhové skladby stromového patra na mikroklima středoevropského lesa* 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 diplomové 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: Podpis autora:

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat především doc. Ing. Radimovi Matulovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, cenné rady, osobní přístup a za čas, který mi byl věnován při konzultacích. Dále chci poděkovat Ing. Ivě Ulbrichové, Ph.D. a Ing. Janovi Vítámváši, Ph.D. za velkou pomoc při sběru dat v Německu. Nakonec děkuji mé rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

Abstrakt

Evropské lesy čelí v důsledku klimatické změny stále častějším a vážnějším hydroklimatickým extrémům. Lesy jsou však schopné mírnit část těchto negativních dopadů změny klimatu díky tlumícímu efektu stromového patra, které dle své struktury a podoby může měnit lokální mikroklima. Diplomová práce měla za cíl pomocí mikroklimatických čidel TMS4 zjistit, jak hlavní druhy dřevin střeoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost. Měření byla provedena v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu. Nad každým čidlem byla provedena hemisférická fotografie pro určení otevřenosti stromového patra a indexu listové plochy.

Bylo zjištěno, že půdní vlhkost během vegetačního období nejméně klesala v listnatých porostech. V rámci druhové skladby nejlépe uchovávala půdní vlhkost monokultura dubu zimního a jeho směsi s dalšími dřevinami, především s bukem lesním. Ukázalo se, že smrk ztepilý v monokultuře během letních měsíců uchovával půdní vlhkost hůře než douglaska tisolistá. Teploty půdy a vzduchu během vegetačního období byly nejvyšší v listnatých porostech. Nejvyšší denní teplotní maxima pak byla naměřena v dubových monokulturách. Na základě obecných lineárních modelů bylo prokázáno, že průměrná teplota půdy i vzduchu klesá s rostoucím indexem listové plochy (LAI) a že je vyšší na plochách s managementem.

Výsledky této práce ukazují, že je možné pomocí změny struktury a kompozice stromového patra, způsobem lesnického managementu nebo výběrem druhů dřevin ovlivnit lesní mikroklima. Při porovnání s kontrolními plochami mimo les se ukázal významný tlumící efekt lesních porostů, díky kterému lesní organismy zažívají menší teplotní extrémy, než které předpokládají data z klimatických stanic. Bez lokálních mikroklimatických dat tak není možné kvantifikovat dopady klimatické změny na lesní ekosystémy.

Klíčová slova: mikroklima, druhová skladba lesů, sucho, temperátní les, BIOTREE

Abstract

Europe's forests are facing increasingly frequent and severe hydroclimatic extremes due to climate change. However, forests are able to mitigate some of these negative impacts of climate change thanks to the buffering effect of the tree canopy, which, depending on its structure and form, can alter the local microclimate. The aim of this thesis was to use TMS4 microclimatic sensors to investigate how the main tree species of Central European forests and their mixtures affect air temperature, soil temperature and soil moisture. The measurements were carried out within the BIOTREE planting experiment in Germany. A hemispherical photograph was taken over each sensor to determine tree canopy openness and leaf area index.

It was found that soil moisture decreased the least during the growing season in deciduous stands. Within the species composition, the monoculture of sessile oak and its mixtures with other tree species, especially beech, conserved soil moisture best. It appeared that spruce in monoculture retained soil moisture less well than Douglas-fir during the summer months. Soil and air temperatures during the growing season were highest in deciduous stands. The highest daily temperature maxima were measured in oak monocultures. Based on general linear models, mean soil and air temperatures were shown to decrease with increasing leaf area index (LAI) and to be higher in plots with management.

The results of this work show that it is possible to influence the forest microclimate by changing the structure and composition of the tree canopy, the method of forest management or the choice of tree species. When compared to control plots outside the forest, the buffering effect of forest stands was found to be significant, allowing forest organisms to experience fewer temperature extremes than predicted by climate station data. Thus, without local microclimatic data, it is not possible to quantify the impacts of climate change on forest ecosystems.

Keywords: microclimate, forest species composition, drought, temperate forest, BIOTREE

Obsah

1. Úvod	10
2. Cíle práce	11
3. Metodika	11
3.1 Charakteristika studovaného území	11
3.2 Zpracování dat	13
3.2.1 Mikroklimatická čidla TMS4.....	13
3.2.2 Postup práce v terénu.....	13
3.2.3 Čištění dat	14
3.2.4 Zpracování hemisférických fotografií.....	15
3.2.5 Analýza dat.....	15
4. Literární rešerše.....	16
4.1 Temperátní lesy v kontextu klimatické změny.....	16
4.2 Lesní mikroklima	17
4.2.1 Faktory ovlivňující lesní mikroklima.....	17
4.2.2 Význam lesního mikroklimatu	18
4.2.3 Les jako útočiště před dopady klimatické změny.....	19
4.3 Druhovú skladbu stromového patra	20
5. Výsledky práce	21
5.1 Půdní vlhkost.....	21
5.1.1 Denní vlhkost	21
5.1.2 Měsíční minimální vlhkost.....	24
5.1.3 Průměrná vlhkost za vegetační období	25
5.2 Teplota půdy (T1) a na povrchu půdy (T2).....	26
5.2.1 Denní teplotní hodnoty.....	26
5.2.2 Měsíční průměrné teploty.....	30
5.2.3 Průměrné teploty za vegetační období.....	32
5.3 Teplota vzduchu (T3)	34

5.4.1 Denní teplotní hodnoty	34
5.4.2 Měsíční průměrné a maximální teploty.....	38
5.4.3 Průměrné teploty za vegetační období.....	40
5.4 Rozdíly mezi lesem a bezleším	41
5.4.1 Denní vlhkost půdy	41
5.4.2 Teplota půdy (T1) a teplota na povrchu půdy (T2).....	43
5.4.3 Teplota vzduchu (T3)	44
6. Diskuse.....	45
6.1 Půdní vlhkost.....	45
6.2 Teploty půdy a vzduchu.....	46
6.4 Význam lesního mikroklimatu v kontextu klimatické změny	47
7. Závěr a přínos práce.....	49
8. Přehled literatury a použitých zdrojů	50
9. Přílohy	56

1. Úvod

Globální klimatická změna způsobuje rozsáhlé změny napříč ekosystémy a tempo i měřítko probíhajících změn klimatu nemá za poslední stovky až tisíce let obdoby (IPPC, 2021). V lesních ekosystémech jsou díky rostoucím teplotám a častějším obdobím sucha negativně ovlivněny jejich základní funkce (Reich et al., 2018), spolu se zvýšenou mortalitou stromů (Moyes et al., 2013; Qie et al., 2017). Ačkoliv jsou lesy schopné přirozeně vázat značné množství oxidu uhličitého (Reich et al., 2018), a tím tak pomoci v boji s neustále se zvyšujícími koncentracemi CO₂ v atmosféře (IPPC, 2021), v důsledku působení sucha a lidské činnosti se naopak mohou stát zdrojem uhlíku (Gatti et al., 2014; Mitchard, 2018).

Stromové patro je však schopné mírnit některé negativní dopady změny klimatu (De Frenne et al., 2013). V lese oproti bezlesí panují menší klimatické extrémy, díky schopnosti lesního porostu tlumit teplotní rozdíly oproti otevřeným plochám a tvořit tak lokální lesní mikroklima (Aussenac, 2000), které je ale velmi citlivé na změny ve struktuře stromového patra (Chen et al., 1999). V porostech s hustším zápojem panují menší teplotní extrémy, tedy nižší teploty během letního období (De Frenne et al., 2013) a naopak během zimy nebo jarních mrazů teploty vyšší, což má zásadní dopad na lesní organismy (Zellweger et al., 2019).

Organismy v lesním podrostu nejsou vystaveny teplotním extrémům v takové míře, v jaké to předpokládají makroklimatická data z klimatických stanic (Zellweger et al., 2019), ze kterých vycházejí modely druhové distribuce zkoumající vliv klimatické změny na organismy (Elith et Leathwick, 2009; Lembrechts et al., 2019). Pomalejší reakce některých rostlinných společenstev na globální oteplování (Alexander et al., 2018; De Frenne et al., 2013; Lenoir et al., 2017) ukazují, že tyto organismy jsou ovlivněny především změnami lokálního mikroklimatu, než celkového makroklimatu (Zellweger et al., 2020). Druhové distribuční modely založené na lokálních mikroklimatických datech ukazují, že druhy ohrožené klimatickou změnou mohou v lesním podrostu, jako útočišti s mírnějšími teplotami, přežít oteplení makroklimatu daleko lépe, než se předpokládalo (Stark et Fridley, 2021).

Mikroklimatické podmínky v lesích jsou přímo závislé na podobě a struktuře lesního porostu a na uzavřenosti stromového patra (Aussenac, 2000; Chen et al., 1999). Chybí však informace o tom, jak jednotlivé hlavní dřeviny střeoevropských lesů a jejich směsi lesní mikroklima ovlivňují. Tato diplomová práce má tedy za cíl zjistit vliv druhů hlavních střeoevropských dřevin na teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost.

2. Cíle práce

Cílem diplomové práce bylo zjistit, jak hlavní druhy dřevin střeoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost. Měření byla provedena pomocí mikroklimatických čidel TMS4 v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu, který je součástí mezinárodní experimentální sítě TreeDivNet. Nad každým čidlem byla provedena hemisférická fotografie pro určení otevřenosti stromového patra a indexu listové plochy.

3. Metodika

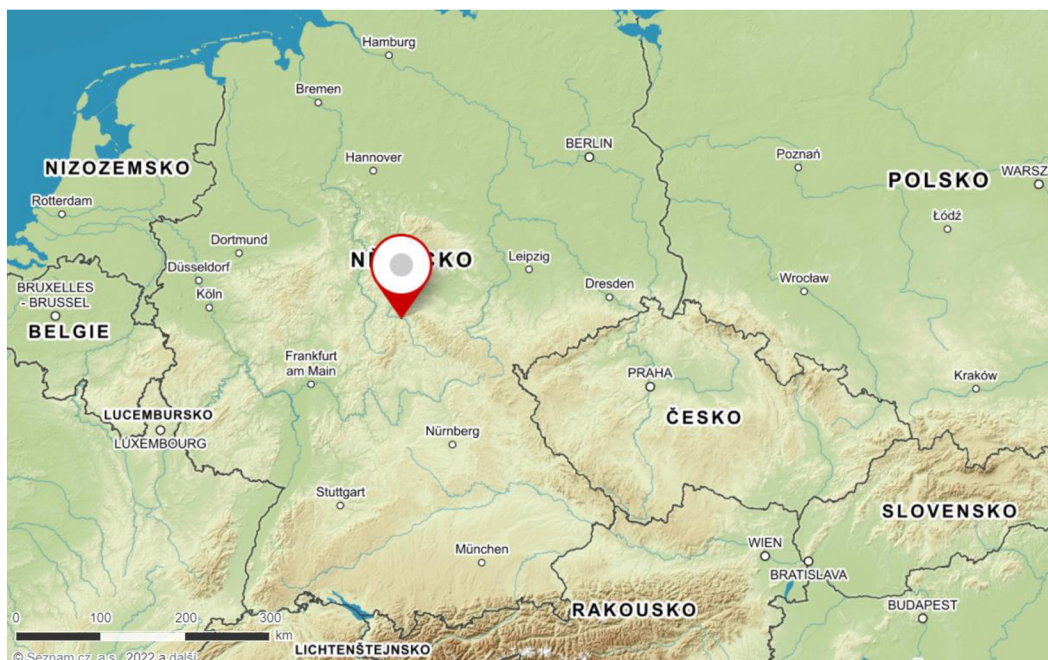
3.1 Charakteristika studovaného území

Měření byla provedena na výzkumné ploše Kaltenborn v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu jižně od města Bad Salzungen v Durynsku (obr. 1). Studované území se nachází mezi pohořím Durynský les a horami Rhön. Podnebí zde panuje subatlantické, ovlivněné údolím řeky Werra a okolním pohořím. Podloží je tvořeno pískovcem s několika břidlicovými vrstvami. Výzkumná lokalita má rozlohu 20 hektarů, do roku 1975 byla využívána jako orná půda a dnes sousedí s borovo-bukovým lesem. Přirozenou vegetací by zde byl listnatý les s převahou buku. Jehličnany se zde přirozeně nevyskytovaly, ale byly do oblasti zavlečeny před více jak 200 lety (Scherer-Lorenzen et al., 2007).

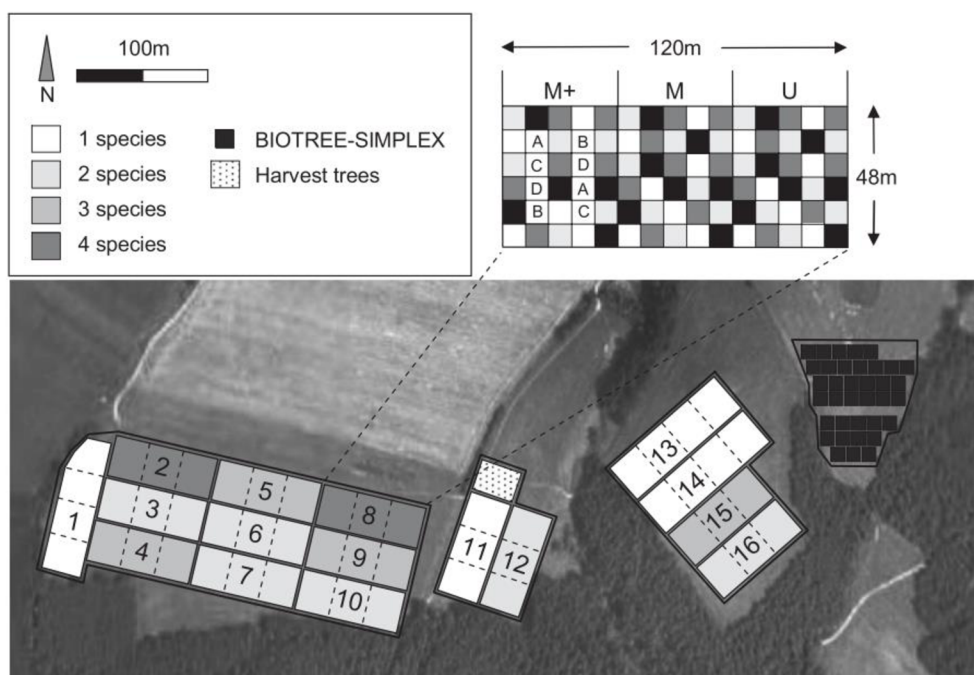
Dřeviny zde byly vysazeny do řádků o šířce 30 centimetrů a délce 60 centimetrů. Výsadba byla provedena mezi lety 2003–2004 dřevinami s věkem 3-4 let. Experimentální plocha je rozdělena na 16 ploch, které byly dále rozděleny na plochy s managementem a bez managementu (obr. 2). Vysazeny byly na každé úrovni druhové bohatosti všechny možné kombinace z celkem čtyř druhů dřevin. Vysazen byl buk lesní (*Fagus sylvatica*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii*) a dub zimní (*Quercus petraea*) (Scherer-Lorenzen et al., 2007).

Mikroklimatická čidla byla instalována do každé ze šestnácti ploch po čtyřech, dvě do části s managementem a dvě do části bez managementu. Management spočíval v probírce provedené na konci roku 2020, při které bylo odstraněno přibližně 30 % stromů na každé ploše. 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, z toho důvodu jsou

v práci prezentovány výsledky především za vegetační období od poloviny dubna do začátku října 2021.



Obrázek 1: Mapa zobrazující umístění experimentální plochy Kaltenborn v Německu, které je označeno bodem (Mapy.cz).



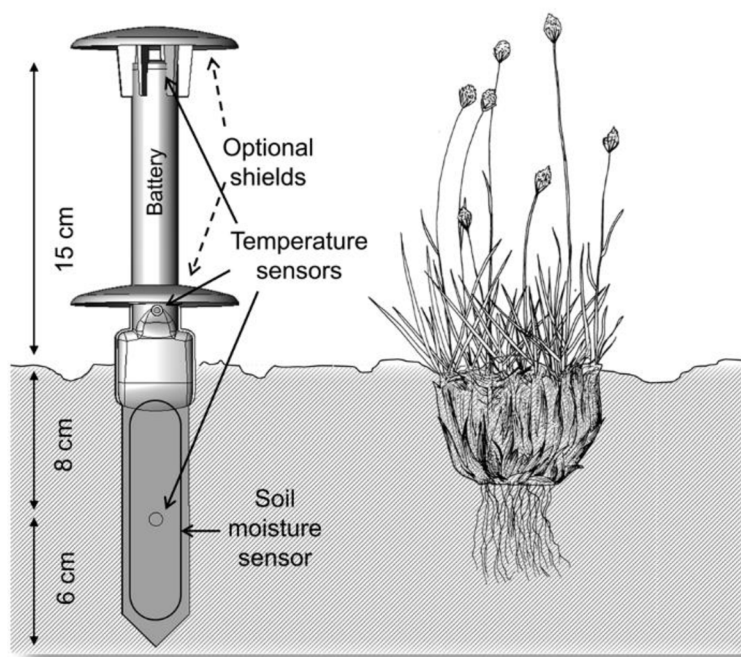
Obrázek 2: Rozložení výzkumných ploch na lokalitě Kaltenborn. Jednotlivé plochy rozděleny dle druhové bohatosti (1-4 druhy) a členěny dále na části bez managementu (U) s managementem (M) a s managementem s dalšími přidanými druhy (M+). Mikroklimatická čidla byla instalována pouze na částech M a U (Scherer-Lorenzen et al., 2007).

3.2 Zpracování dat

3.2.1 Mikroklimatická čidla TMS4

Mikroklimatické čidlo TMS4 je zařízení obsahující senzory pro měření teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkosti. Vyvinuté bylo pro měření klimatických podmínek v blízkosti země a ve vrchní části půdy. Zařízení má napodobovat rostlinu 15 centimetrů vysokou a je umístěno do vrchní části půdy v hloubce 14 cm (obr. 3). Teplota vzduchu (T3) je měřena ve výšce 15 centimetrů nad zemí, další senzor zaznamenává teplotu těsně nad povrchem (T2) a teplota půdy je měřena v hloubce 10 centimetrů pod povrchem půdy (T1). Půdní vlhkost je měřena senzorem v části pod půdním povrchem. Základním intervalem měření je 15 minut, při kterém je čidlo schopno zaznamenávat data až po dobu 15 let (Wild et al., 2019)

Přesto, že čidlo TMS4 bylo sestaveno tak, aby svou velikostí a umístěním napodobovalo rostlinu, využití získaných dat je daleko širší, vhodné i pro ostatní organismy žijící blízko povrchu nebo ve vrchní části půdy a ekologické procesy s tím spojené (Wild et al., 2019).



Obrázek 3: Schéma mikroklimatického čidla TMS4 (Wild et al., 2019).

3.2.2 Postup práce v terénu

Výzkumné plochy byly navštíveny a mikroklimatická čidla zkontrolována. K získání dat byl použit notebook s nainstalovaným softwarem Lolly Manager (verze 1.29). Mikroklimatická čidla jsou vybavena ve své vrchní části po sejmutí ochranného

kloboučku konektorem, který slouží pro načtení dat pomocí USB adaptéru, který je připojen k notebooku. Po propojení notebooku s adaptérem a konektoru byl nejprve aktualizován systém v čidlech na stejnou verzi, kterou byl opatřen počítač. Poté byla data z čidel stažena a uložena ve formátu csv. Po stažení se v záložce Log view v aplikaci Lolly Manager zobrazil graf, pomocí kterého bylo možné ihned zkontrolovat, zda jsou data v pořádku a čidlo po celou dobu zaznamenávalo všechny údaje (Příloha 1). Nad každým mikroklimatickým čidlem byla pořízená hemisférická fotografie, tzv. rybí oko, pomocí fotoaparátu se speciálním objektivem k tomu určeným.

3.2.3 Čištění dat

Data byla zpracována v programu R ve verzi 4.1.2 (R Core Team, 2021) v grafickém rozhraní R Studio. Nejprve bylo třeba data z čidel upravit a vyčistit. Byl k tomu využit balíček PLOTer ve verzi 0.0.1, pomocí kterého se spustila aplikace *Shiny*, která slouží právě k vizualizaci a úpravě dat (obr. 4). Pomocí záložky *Upload Tomst* byla nahrána data z jednotlivých čidel a byl vytvořen data frame. V záložce *Data* se zobrazily jednotlivě sondy a pomocí možnosti *Render plot* bylo možné vizualizovat grafy dle volby pro vlhkost, teploty půdy, povrchu a vzduchu. Data byla vizuálně zkontrolována, pro případ, zda některé naměřené hodnoty nesprávné nebo příliš extrémní. Takové hodnoty vznikaly v případě, kdy na začátku měření sondy ještě nebyly instalovány na lokalitě, ale byly například v kanceláři. Dalším případem měření nesprávných hodnot mohlo být vykopnutí sondy ze země. Všechna nesprávná měření byla v záložce *Plot* označena myší a pomocí příkazu *Data* a *Delete selected data* odstraněna. Data po kontrole a čištění byla exportována přes příkaz *Data* a *Export data* do souboru csv.



Obrázek 4: Ukázka aplikace pro čištění dat pomocí balíčku PLOTer v programu R.

3.2.4 Zpracování hemisférických fotografií

Hemisférické fotografie byly zpracovány v programu R ve verzi 4.1.2 (R Core Team, 2021) v grafickém rozhraní R Studio pomocí balíčku Hemiphot.R (ter Steege, 2018). Je to balíček obsahující skript, pomocí kterého je možné z barevných hemisférických fotografií vypočítat otevřenost stromového patra a index listové plochy (LAI). Balíček obsahuje skript HemiphotTest.R, který slouží k analýzám pro jednotlivé fotografie a HemiphotBatch.R, který slouží 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. Pro nejpřesnější hodnoty bylo třeba snímky prahovat po jednom. Následně byla vypočítána hodnota otevřenosti stromového patra a index listové plochy.

3.2.5 Analýza dat

Statistické analýzy byly provedeny v programu R ve verzi 4.1.2 (R Core Team, 2021) v grafickém rozhraní R Studio. Po načtení byla vyčištěná data ve formátu csv spojena s vytvořenou tabulkou, která obsahovala id každého čidla, číslo plochy a zkoumané proměnné. Mezi zkoumané proměnné patřily údaje o způsobu managementu, údaje o druhové skladbě, hodnoty otevřenosti stromového patra, hodnoty indexu listové plochy (LAI) a údaje o druhu lesa. Po spojení dat s těmito proměnnými byly vypočítány denní průměry, maxima a minima teplot pro hodnoty ze všech teplotních čidel, denní minima vlhkosti půdy, průměrné teploty za vegetační období ze všech teplotních čidel, průměrná vlhkost za vegetační období a měsíční průměrné teploty pro všechna teplotní čidla a minimální měsíční vlhkost půdy pro vybrané měsíce červen a červenec.

K vyhodnocení dynamiky byly do dat nafitovány zobecněné aditivní modely (GAM), které byly znázorněny graficky pomocí balíčku „ggplot2“. Byly vytvořeny GAM pro všechny předem vypočítané denní hodnoty teplot a vlhkosti v závislosti na jednotlivých zkoumaných veličinách. Šedými zónami okolo křivek byl zobrazen 95% interval spolehlivosti modelů.

GAM modely byly také vytvořeny pro data obsahující tři čidla umístěná mimo les pro porovnání dynamiky mezi lesním porostem a bezlesím. Pro malý počet čidel mimo les ale tyto rozdíly nebyly dále statisticky testovány.

Nakonec byly sestaveny obecné lineární modely pomocí funkce lm pro měsíční minimální vlhkost, průměrnou vlhkost za vegetační období a pro průměry za vybrané měsíce a průměry za vegetační období pro teplotu půdy, povrchu půdy a vzduchu. Pomocí těchto modelů byla analyzována závislost těchto proměnných na druhové skladbě, diverzitě, managementu, LAI a pokryvnosti stromového patra. Hladina významnosti byla $p = 0.05$. Proměnné s $p > 0.05$ % byly z modelu odstraněny jako nevýznamné. Výsledné modely byly zobrazeny pomocí balíčku „effects“.

4. Literární rešerše

4.1 Temperátní lesy v kontextu klimatické změny

Jak uvádí Scheffers et al (2016), dopady klimatické změny lze pozorovat v širokém měřítku, od genetických změn až po vlivy na celé ekosystémy, a to už při zvýšení průměrné globální teploty o 1 °C oproti předindustriálnímu období. Častější hydroklimatické extrémy mají negativní dopad i na lesní ekosystémy (Seager et al., 2014). Déle trvající suchá období zvyšují mortalitu stromů (Qie et al., 2017) a stres způsobený nízkou půdní vlhkostí a vysokou teplotou půdy negativně ovlivňuje úspěšnost přežití stromů v nejranější fázi vývoje (Moyes et al., 2013).

Lesní ekosystémy, díky schopnosti vázat významné množství atmosférického oxidu uhličitého, jsou schopny pomoci v boji s klimatickou změnou (Lewis et al., 2019), která je poháněna lidskou činností a vypouštěním skleníkových plynů do atmosféry (IPPC, 2021). Klimatické extrémy v podobě sucha ale schopnost lesů ukládat uhlík snižují (Reich et al., 2018). Během suchých let se tak lesy stávají významným zdrojem uhlíku (Gatti et al., 2014). Způsobeno je to pravděpodobně poklesem fotosyntézy vlivem nízké půdní vlhkosti (Gatti et al., 2014, Reich et al., 2018). I přes to, že s rostoucí teplotou se schopnost fotosyntézy a ukládání uhlíku zvyšuje, limitujícím faktorem je vlhkost půdy, jelikož při nízké půdní vlhkosti se tyto pozitivní efekty snižují, či dokonce je efekt nízké vlhkosti půdy na fotosyntézu a ukládání uhlíku negativní (Reich et al., 2018). Negativní vliv na to, jestli se lesy stanou zdrojem uhlíku, má také odlesňování a degradace lesů vlivem činností člověka (Mitchard, 2018). Scheffers et al (2016) uvádí, že velkou roli v překonávání výzev spojených s klimatickou změnou budou mít

neporušené přírodní ekosystémy, především ty zabírající velké oblasti, působící jako úložiště uhlíku se schopností regulovat místní klimatické podmínky.

Temperátní lesy, jinak také opadavé širokolisté lesy, jsou biotem mírného pásma zaujímající tři velké oblasti. První zabírá území Evropy mimo velké části Skandinávie, Středomoří a severovýchodního Ruska, druhá zabírá východní část Severní Ameriky a třetí východní část Asie (Podrázský, 2014).

Klimatické podmínky jsou závislé především na vzdálenosti od oceánu. Podnebí je charakteristické průměrnou roční teplotou kolem 10 °C, úhrn srážek za rok mezi 500-1500 mm s maximálními úhrny během letních měsíců. Hlavním faktorem ovlivňující růst dřevin je zde roční periodicitu teploty a změny v délce doby denního světla, ve které jsou rostliny schopny fotosyntézy. Dřeviny musejí být adaptovány na velké poklesy pod bod mrazu během zimního období (Podrázský, 2014).

Ve středoevropských lesích je značná výšková zonace, podle které se rozlišují vegetační stupně. Převažuje zde dub zimní (*Quercus petraea*), buk lesní (*Fagus sylvatica*), jedle bělokorá (*Abies alba*) s prvním výskytem smrku ztepilého (*Picea abies*) (Podrázský, 2014).

4.2 Lesní mikroklima

4.2.1 Faktory ovlivňující lesní mikroklima

Lesní porost významně ovlivňuje lokální klimatické podmínky, jako jsou teplota vzduchu a půdy, půdní vlhkost nebo míra slunečního záření dopadajícího na zem, kterými tak definujeme specifické lesní mikroklima (Aussenac, 2000). Mikroklima zahrnuje podmínky panující v blízkosti země, často odlišné od hodnot, které klimatické stanice měří ve výšce 2 metry nad zemí v otevřených oblastech (Geiger, 1965).

Podoba lesního mikroklimatu závisí na obecném klimatu dané oblasti, struktuře a fyzických charakteristikách lesního pokryvu (Aussenac, 2000). Jakékoliv změny ve struktuře porostu pak vedou ke změnám mikroklimatu (Chen et al., 1999). Hlavním faktorem ovlivňující mikroklima je uzavřenost stromového patra a hodnota indexu listové plochy (LAI) (Aussenac, 2000). Uzavřenost stromového patra je definována jako podíl oblohy, který je zakryt při pohledu z jednoho bodu (Jennings et al., 1999). LAI je podíl zelené listové plochy na jednotku povrchu půdy (Chen et al., 1997).

Nejvýznamnější vliv na lesní mikroklima mají porosty s uzavřeným stromovým patrem a s vysokým LAI, protože hustý zápoj tlumí denní a sezónní teplotní extrémů oproti

bezlesí nebo holosečím (Aussenac, 2000) a zvyšuje relativní vzdušnou vlhkost (De Frenne et al., 2013). Čím je LAI vyšší, tím více je stromové patro uzavřenější a na půdu tak dopadá méně světla, teplota vzduchu zde tedy bude nižší oproti otevřeným plochám (Hardwick, et al., 2015). Díky tlumící kapacitě stromového patra tak v lese panují menší teplotní extrémy a je zde menší teplotní variabilita oproti otevřené ploše (De Frenne et al., 2019), to znamená, že v zimním období jsou obecně v lese teploty vyšší a v letním období teploty nižší oproti otevřeným oblastem (Aussenac, 2000). Na regulaci maximálních teplot v podrostu lesa mají vliv i rozdíly ve složení listnatých dřevin, díky druhově specifickým schopnostem vrhat stín (Zellweger et al., 2019).

Hofmeister et al (2019) tvrdí, že dalším významným faktorem ovlivňujícím lesní mikroklima je tzv. okrajový efekt. Jde o to, že teplota směrem od okraje lesa směrem ke vnitřní části klesá. Podle něj je efekt pozorovaný nejméně 100 metrů od okraje směrem ke vnitřní části lesa. Okrajové úseky lesa se tak vlivem globálních změn teplot oteplují rychleji než vnitřní části. Vzhledem k velké fragmentaci lesů ve střední Evropě, může okrajový efekt podporovaný změnou klimatu vést k homogenizaci lesů (Hofmeister et al., 2019).

4.2.2 Význam lesního mikroklimatu

Porozumění tomu, jaký vliv budou mít klimatické změny na fungování organismů, považuje Schwenk et al (2009) za jednu z největších výzev moderní biologie organismů. K predikci následků těchto změn jsou často využívány druhové distribuční modely (Elith et Leathwick, 2009; Lembrechts et al., 2019). Potter et al (2013) ale poukazuje na to, že použití těchto modelů založených na klimatických datech získaných z meteorologických stanic je problematické, vzhledem k prostorovému měřítku, v jakém jsou klimatická data, uspořádaná do mřížek, používána. Podle něj jsou délky mřížek v modelech mnohonásobně větší než studované rostliny a zvířata, a proto nemohou zohledňovat mikroklimatické podmínky, ve kterých organismy žijí. Díky tomu nelze modelovat vlivy globálního oteplování na organismy pouze pomocí údajů z meteorologických stanic (Zellweger et al., 2019).

Naproti tomu druhové distribuční modely založené na lokálních mikroklimatických datech ukazují, že druhy ohrožené klimatickou změnou mohou odolávat oteplování lépe, než předpokládají modely založené na datech interpolovaných z meteorologických stanic. Druhy rostlin ohrožené zvyšováním globální teploty mohou v lesním podrostu přežít oteplení makroklimatu až o 4 °C (Stark et Fridley, 2021). Lesní organismy totiž zažívají menší teplotní extrémy, než předpokládají

makroklimatická data (Zellweger et al., 2019). Studium lesního mikroklimatu má tak zásadní význam pro znalost dopadů globálního oteplování na organismy, jelikož lesní ekosystémy hostí většinu suchozemské biodiverzity (De Frenne et al., 2021).

Pro dřeviny spočívá význam specifického mikroklimatu například v ochraně před jarními mrazy, jelikož vyšší jarní denní absolutní teplotní minima vlivem tlumící kapacity stromového patra snižují riziko poškození mrazem během jarních měsíců (Kollas et al., 2013). Vyšší relativní vzdušná vlhkost pod hustým stromovým patrem zase chrání mladé stromky před letními obdobími sucha, čímž snižuje jejich mortalitu a zmírňuje dopady klimatické změny na lesy (De Frenne et al., 2013). Lesní mikroklima a interakce mezi mikroklimatem a strukturou porostu ovlivňují také důležité ekologické procesy, jako jsou fotosyntéza, transpirace nebo transport asimilátů (Aussenac, 2000). Vlhkost a teplota půdy ovlivňují například dekompozici organického materiálu (Chen et al., 1999).

4.2.3 Les jako útočiště před dopady klimatické změny

Schopnost stromového patra tlumit teplotní extrémny je pravděpodobně příčinou pomalejší reakce druhů lesního podrostu na globální oteplování, než která byla očekávaná (De Frenne et al., 2013). Rychlost termofilizace podrostu, tedy procesu, kdy se zvyšuje dominance druhů lépe adaptovaných na stoupající teploty, je tak ovlivněna primárně změnami v mikroklimatu pod zápojem, než změnami v okolním makroklimatu (Zellweger et al., 2020). V porostech s hustším stromovým patrem je díky chladnějším teplotám v podrostu zpomalen úbytek rostlin, které jsou adaptovány na chladnější podmínky. Termofilizace je proto pomalejší v lesích s hustým zápojem oproti lesům s řídkým zápojem, uzavřenější stromové patro zpomaluje změny v druhové kompozici a mírní dopady globálního oteplování na lesní vegetaci (De Frenne et al., 2013). Lenoir et al (2017) tvrdí, že druhy, které žijí v mírnějších lesních mikroklimatických podmínkách, s vyšší pravděpodobností vytrvají v těchto lokálních útočištích i přes negativní změny makroklimatu a dopady zvýšení globální teploty.

Kromě celkově mírnějšího mikroklimatu pod lesním porostem je pro organismy důležité i množství mikrohabitátů, jako jsou stromové dutiny, padlé kmeny nebo epifyty. Ty mají schopnost tlumit nepříznivé účinky oteplování a snižují mortalitu organismů během vln horka a sucha (Scheffers et al., 2014).

S řidnoucím zápojem ale tlumící kapacita lesního mikroklimatu klesá a v období sucha v řídkém zápoji může úplně chybět (von Arx et al., 2013). Za předpokladu pokračování oteplování a naplnění predikcí ohledně klimatické změny (IPPC, 2021),

může v lesích s řídkým stromovým patrem docházet k překročení kritických prahových hodnot a vlivem častějších období sucha ke snížení odolnosti mladých stromků, což povede ke zhoršení podmínek k usazení a přežití některých druhů dřevin (von Arx et al., 2013).

Navzdory pozitivním vlivům lesního mikroklimatu ve zmírnění dopadů klimatické změny na organismy Luysaert et al (2018) tvrdí, že v evropských lesích budou dopady udržitelného lesního managementu na celkové makroklima mírné, spíše lokální, a proto by cílem managementu lesů v Evropě měla být adaptace na budoucí klimatické podmínky za zachování důležitých funkcí lesa, než aby se staly samotným prostředkem pro boj se zvyšujícími se globálními teplotami.

4.3 Druhá skladba stromového patra

Změna klimatu a ztráta biodiverzity ovlivňuje produktivitu dřevin a snižuje míru absorpce uhlíku v lesních ekosystémech (Liang et al., 2016, Morin et al., 2018). Druhá diverzita stromového patra může negativní dopady klimatické změny, mezi které patří pokles růstu mladých stromů způsobený extrémním suchem, zmírnit. Dřeviny špatně snášející sucha mají totiž prospěch z druhově bohatého okolí a během období největšího sucha se pozitivní efekt druhové rozmanitosti zvyšuje. Je to dáno mezidruhovými interakcemi, které ovlivňují dostupnost vody v půdě (Fichtner et al., 2020).

Paquette et al (2011) uvádí, že druhová i funkční biodiverzita má pozitivní vliv na lesní produktivitu, tento efekt se však mezi biomy liší. V temperátních lesích je vliv biodiverzity na lesní produktivitu významný, přesto ale menší než v případě boreálních lesů. Dáno je to podle něj tím, že temperátní lesy dosahují vysoké produktivity i při menší druhové bohatosti díky příhodným podmínkám a bohatým půdám, a proto je pozorovaný efekt biodiverzity menší, než u boreálních lesů s menší produktivitou a více stresovými faktory prostředí.

Dostupnost půdní vlhkosti je pro dřeviny během léta limitujícím faktorem a vzhledem k častějším obdobím sucha díky změnám klimatu, bude vliv dostupnosti vlhkosti na růst ve vegetační sezóně nadále růst (Harvey et al., 2019). Jak uvádí Pretzsch et al (2013), druhová bohatost stromového patra může ovlivnit rezistenci některých druhů dřevin vůči suchu. Podle něj má smrk ztepilý nižší rezistenci vůči suchu v monokulturách oproti monokulturám dubu zimního nebo buku lesního a ve směsích je zase buk a dub významně odolnější oproti monokultuře.

Druhová bohatost stromového patra může mít i pozitivní vliv na biodiverzitu jiných lesních organismů, zejména ve smíšených lesích s vyšším zastoupením listnatých dřevin (Matevski et al., 2021).

5. Výsledky práce

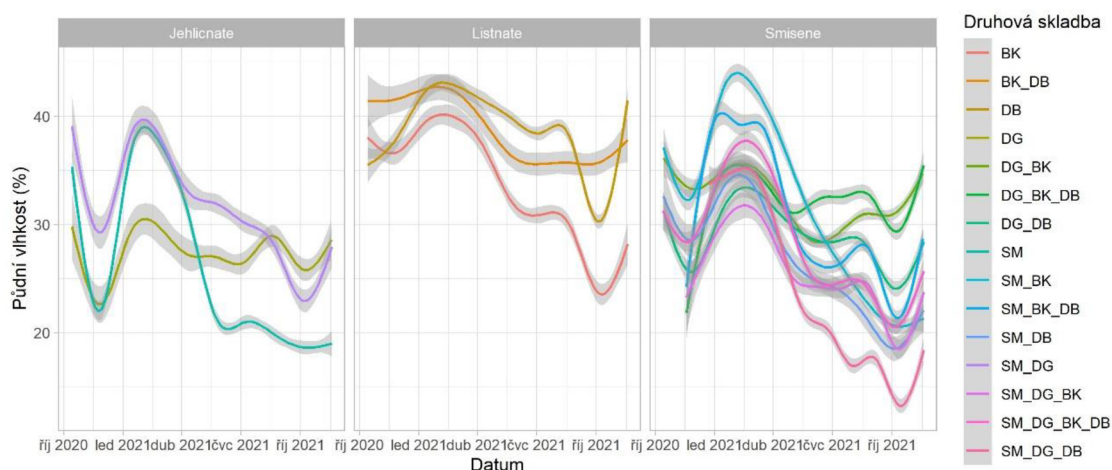
5.1 Půdní vlhkost

5.1.1 Denní vlhkost

V případě půdní vlhkosti se ukázalo, že v rámci ploch se smíšenou druhovou skladbou vykazovala nejvyšší denní minima během jarních měsíců roku 2021 směs smrku a buku. V letním období byla nejvyšší denní vlhkost ve směsi douglaska-buk-dub a poté ve směsích douglaska-dub a douglaska-buk (obr. 5).

V listnatých porostech byla nejnižší denní půdní vlhkost na plochách s monokulturami buku téměř po celou dobu měření, nejvyšší byla v dubových porostech s výjimkou října 2021, kdy zde vlhkost klesla a nejvyšší vlhkost byla ve směsi buk-dub (obr. 5).

V rámci jehličnatých porostů, nejvyšší denní půdní vlhkosti byla od ledna 2021 až do začátku léta naměřena v monokulturách smrku a douglasky, během léta 2021 ale půdní vlhkost v monokultuře smrku klesla a vyšší minima vykazovala směs smrk-douglaska (obr. 5).

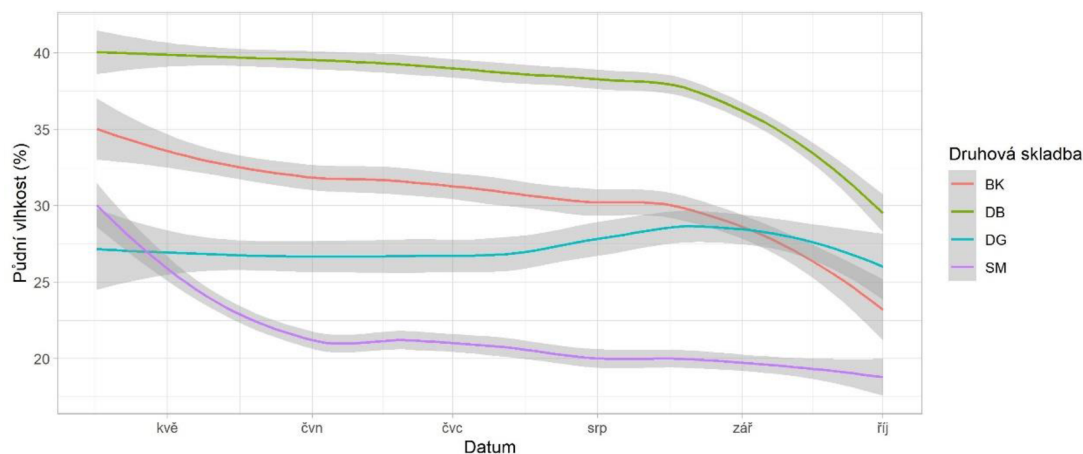


Obrázek 5: Denní půdní vlhkost dle druhové skladby (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) a dle druhu lesa. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nařizován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

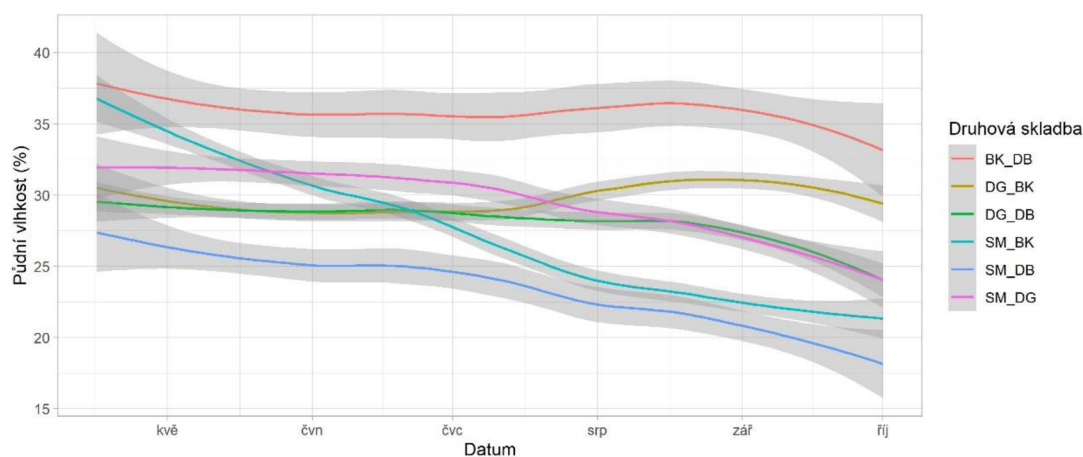
V rámci monokultur byla nejvyšší denní půdní vlhkost během vegetačního období roku 2021 naměřena na plochách s dubem a nejnižší na plochách se smrkem.

V monokultuře buku zase byla denní vlhkost vyšší než u ploch s douglaskou až do srpna 2021 (obr. 6).

U směsí dvou druhů dřevin panovala nejvyšší půdní vlhkosti téměř po celé vegetační období ve směsi buk-dub a nejnižší především v letních měsících ve směsích smrk-buk a smrk-dub (obr. 7).



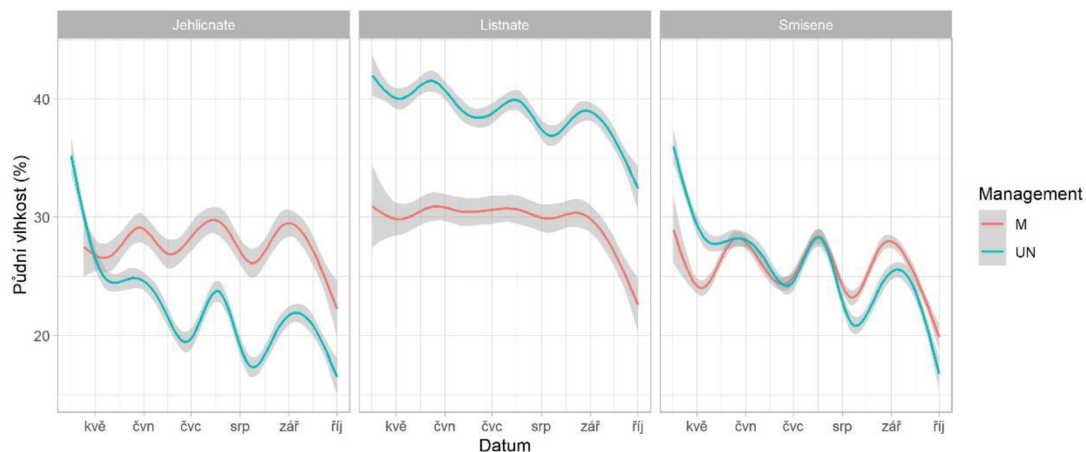
Obrázek 6: Denní vlhkost půdy na plochách s monokulturami (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.



Obrázek 7: Denní vlhkost půdy na plochách s dvěma druhy dřevin (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

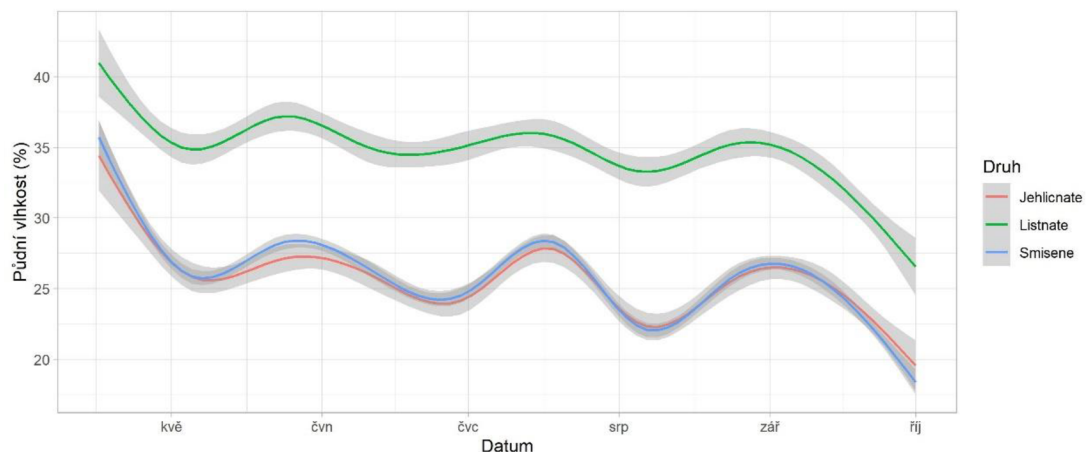
V závislosti na způsobu managementu se ukázalo, že denní půdní vlhkosti během vegetačního období byla u jehličnatých porostů vyšší na plochách s managementem,

u listnatých porostů na plochách bez managementu a u smíšených porostů se mezi způsoby managementu od června do srpna 2021 nelišila, v květnu byla vyšší na plochách bez managementu a v srpnu a září byla vyšší na plochách s managementem (obr. 8).



Obrázek 8: Denní vlhkost půdy podle způsobu managementu (M = s managementem, UN = bez managementu) a podle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

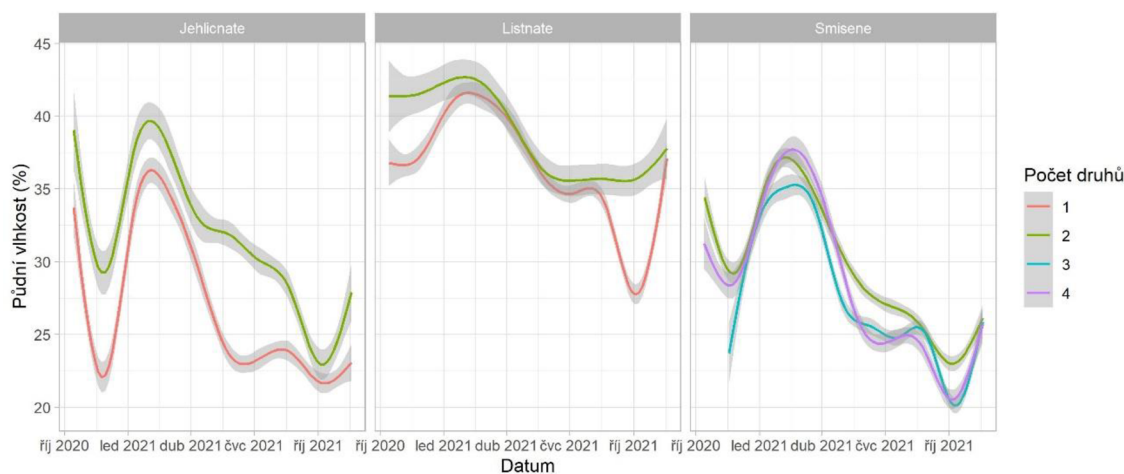
Denní půdní vlhkost byla po celé vegetační období vyšší v listnatých porostech, porosty smíšené a jehličnaté se významně nelišily (obr. 9).



Obrázek 9: Denní vlhkost půdy dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

V závislosti na počtu druhů dle druhu lesa se ukázalo, že denní půdní vlhkost byla v jehličnatých porostech vyšší na plochách s dvěma druhy, v listnatých porostech se

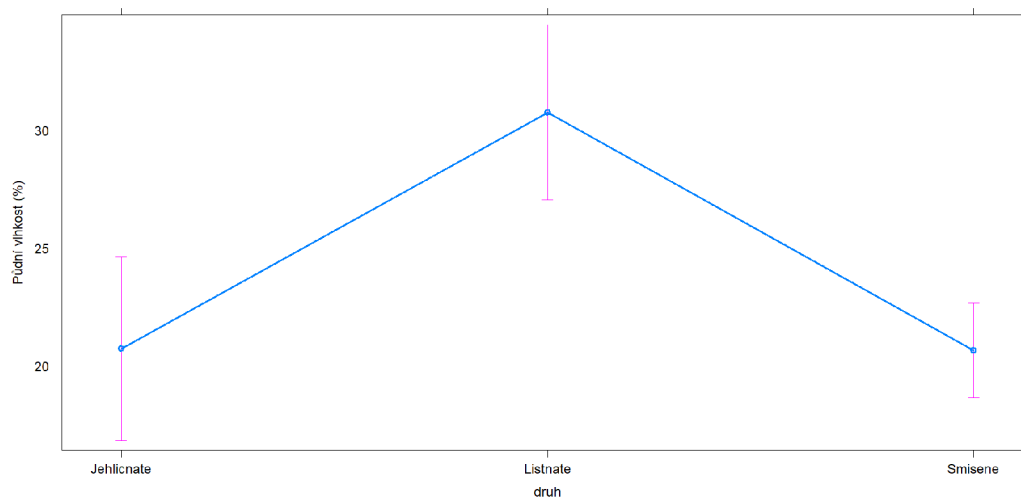
lišila jen na konci roku 2020 a v říjnu 2021, kdy byla vyšší na plochách se dvěma druhy a ve smíšených porostech se lišila především v létě 2021, kdy byla vyšší také na plochách s dvěma druhy (obr. 10).



Obrázek 10: Denní vlhkost půdy dle počtu druhů a dle druhu lesa během vegetačního období Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

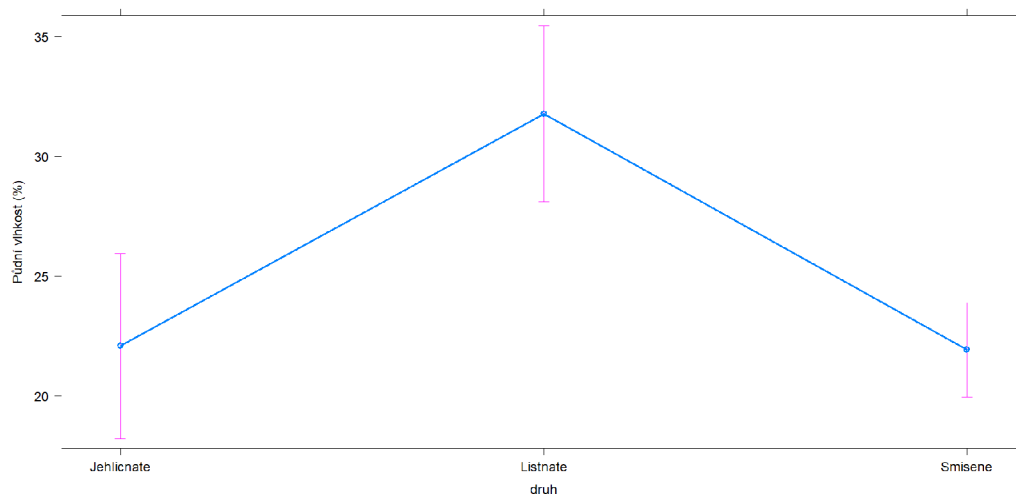
5.1.2 Měsíční minimální vlhkost

Na základě obecného lineárního modelu se ukázalo, že významný vliv na měsíční minimální vlhkost půdy měl druh lesa, kdy listnaté porosty měly vyšší měsíční minimální vlhkost oproti ostatním druhům lesa ($P < 0.05$; $R^2 = 0.27$) v měsíci červnu (obr. 11).



Obrázek 11: Graf zobrazující závislost minimální půdní vlhkosti za měsíc červen 2021 na druhu lesa, vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

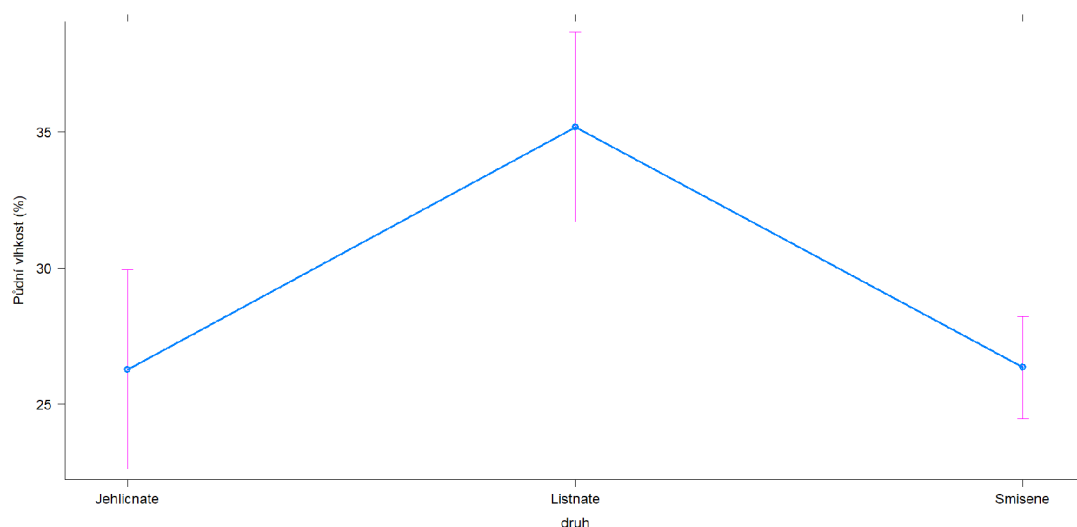
Závislost měsíční minimální vlhkosti půdy byla prokázána i v měsíci červenci ($P < 0.05$; $R^2 = 0.26$), listnaté porosty měly vyšší minimální vlhkost oproti ostatním druhům porostů (obr.12). V případě obou měsíců nebylo prokázáno, že byl vlhkost byla ovlivněna managementem, indexem listové plochy nebo počtem druhů ($P > 0.05$).



Obrázek 12: Graf zobrazující závislost minimální půdní vlhkosti za měsíc červenec 2021 na druhu lesa, vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

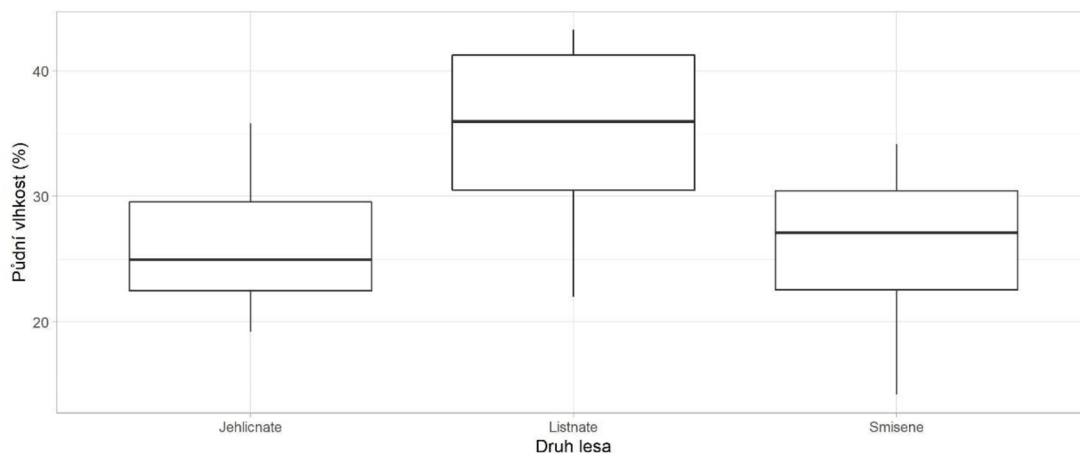
5.1.3 Průměrná vlhkost za vegetační období

Průměrná vlhkost půdy za celé vegetační období byla ovlivněna druhem lesa ($P < 0.05$; $R^2 = 0.24$), kdy v lese listnatém stejně jako u měsíčních minim byla vlhkost vyšší v listnatých porostech oproti ostatním druhům lesa (obr. 13).



Obrázek 13: Graf zobrazující závislost průměrné půdní vlhkosti za vegetační období na druhu lesa, vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

Pro lepší znázornění závislosti byl vytvořen krabicový graf (obr. 14). Nebyla prokázána závislost s dalšími proměnnými ($P > 0.05$).

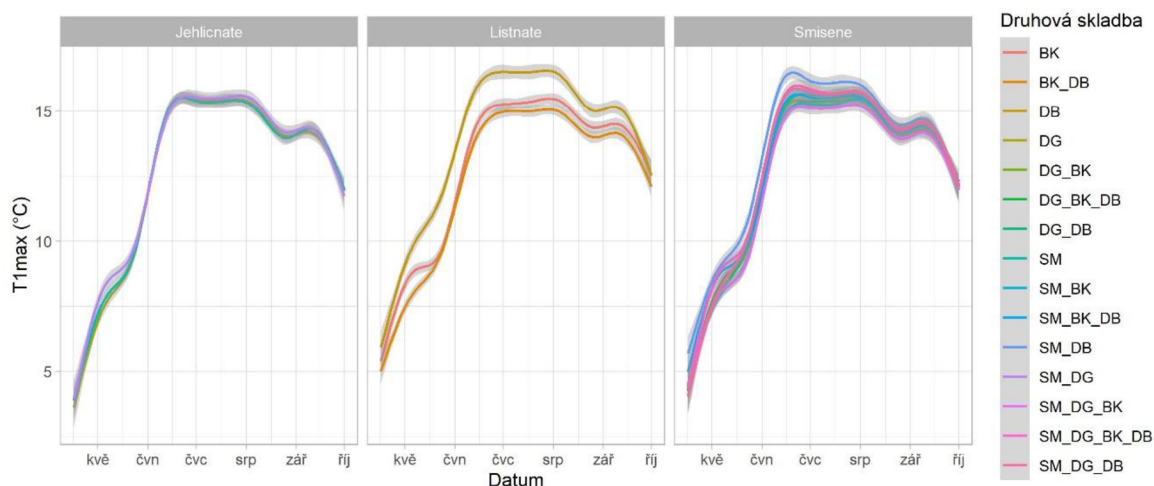


Obrázek 14: Krabicový graf zobrazující závislost průměrné půdní vlhkosti za vegetační období na druhu lesa.

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

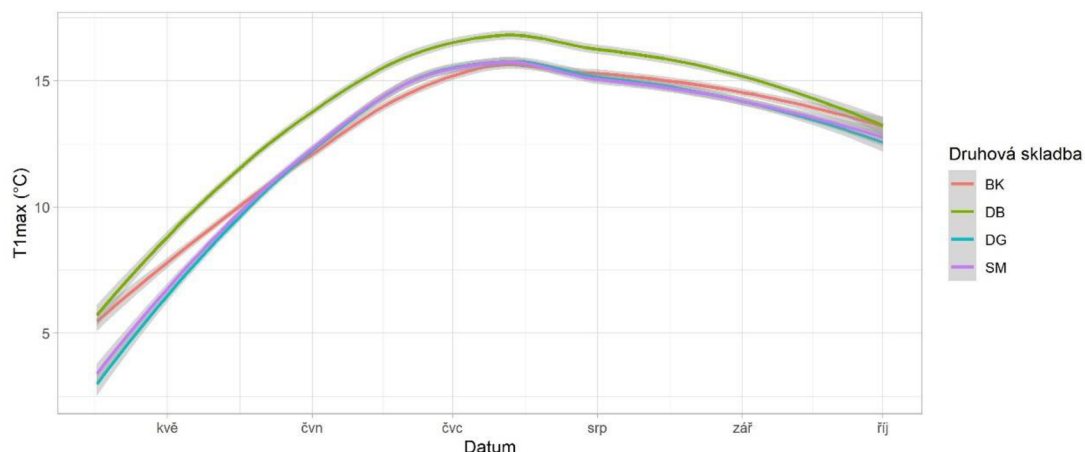
5.2.1 Denní teplotní hodnoty

Denní maximální teploty půdy v jehličnatých porostech se v rámci druhové skladby významně nelišily. V listnatých porostech byla naměřena vyšší denní maxima v monokulturách dubu téměř po celé vegetační období. Ve smíšených porostech panovala mírně vyšší maxima během měsíce června a července ve směsi smrk-dub (obr. 15).



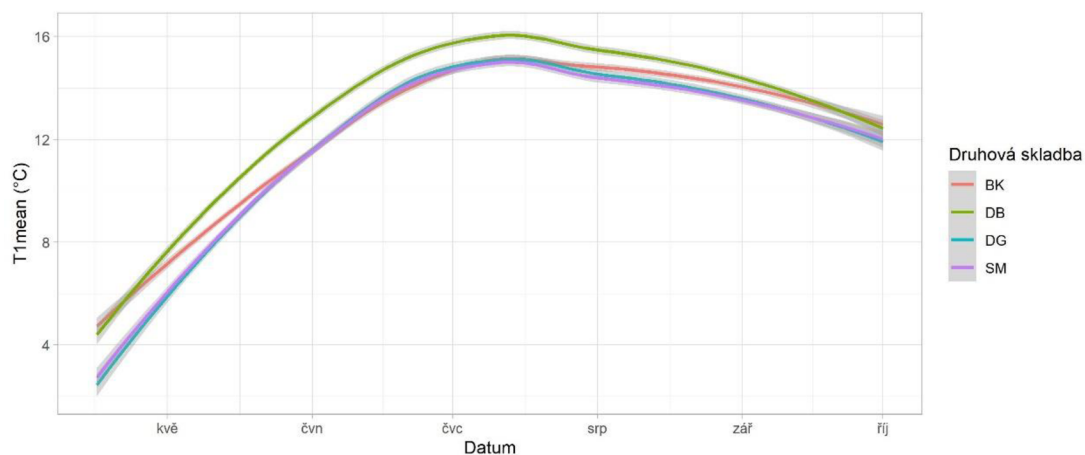
Obrázek 15: Denní maximální teploty půdy dle druhové skladby (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

V monokulturách byly denní maximální teploty půdy téměř celé vegetační období nejvyšší na plochách s duby. Na plochách s bukem byly denní maxima do června vyšší než v monokulturách smrku nebo douglasky, po zbytek vegetačního období se monokultury těchto tří druhů významně v denních maximech teploty půdy nelišily (obr. 16).



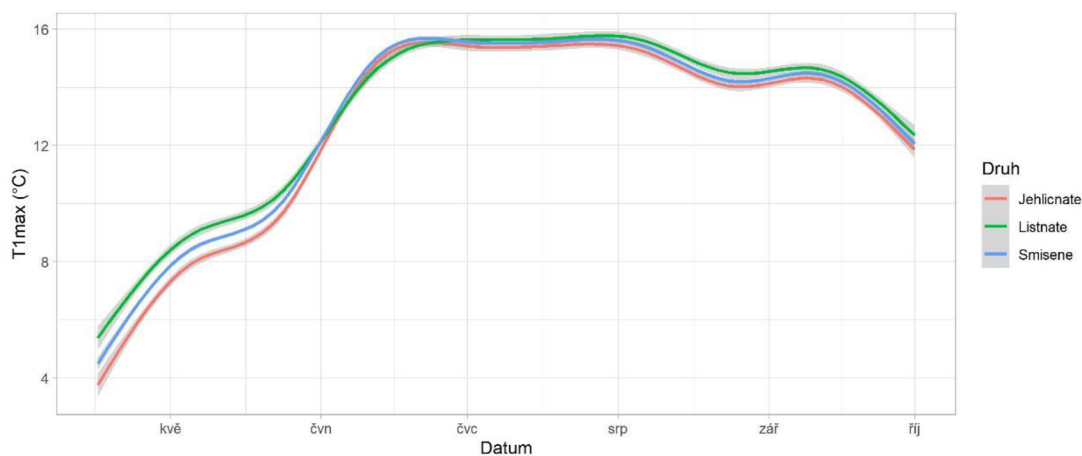
Obrázek 16: Denní maximální teploty půdy na plochách s monokulturami (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nařizován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Téměř po celé vegetační období byly denní průměry teploty půdy vyšší v monokulturách dubu (obr. 17).



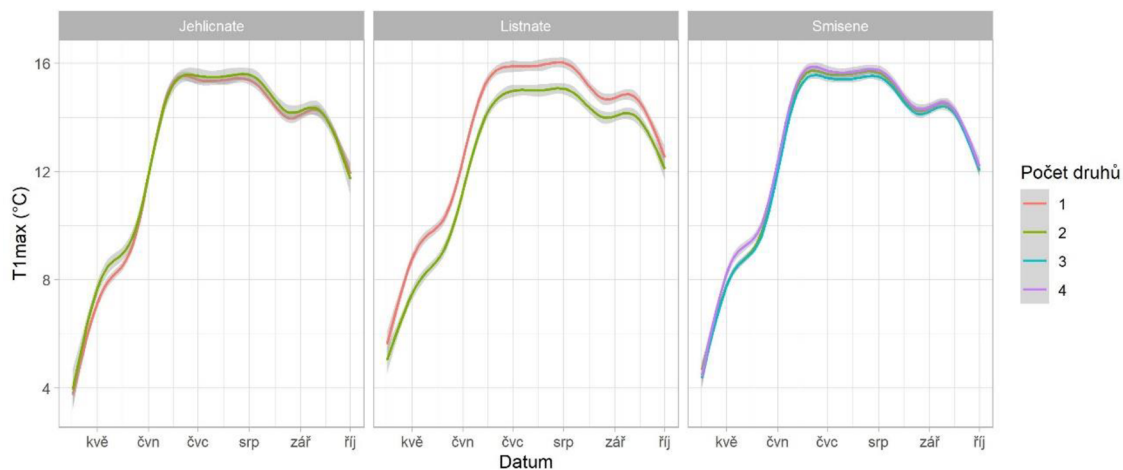
Obrázek 17: Denní průměrné teploty půdy na plochách s monokulturami (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nařizován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Denní maxima teploty půdy se dle druhu lesa se v rámci vegetačního období lišily jen od dubna do června, kdy byla nejvyšší maxima pozorována listnatých porostech a nejnižší v jehličnatých. Zbylé období se druhy lesa významně nelišily (obr. 18).



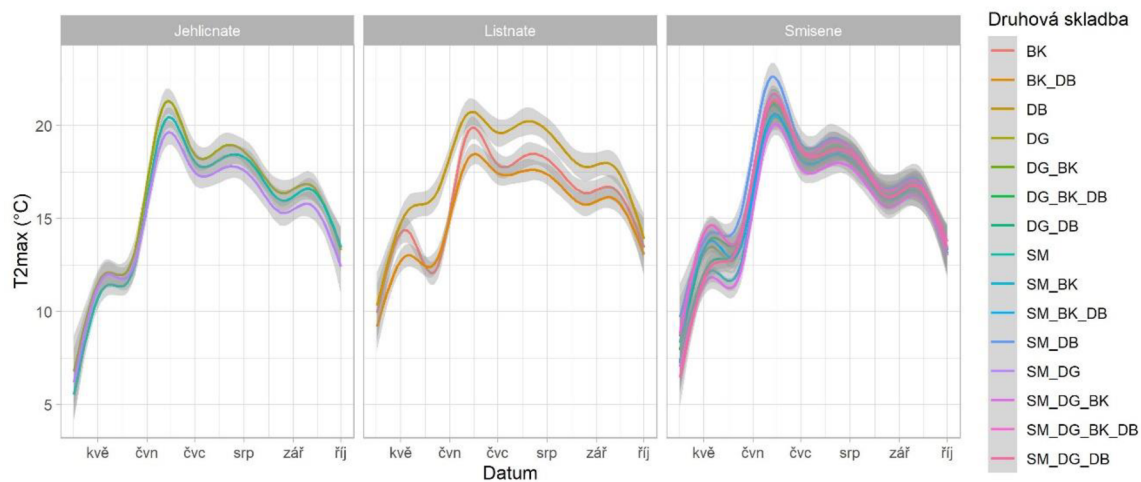
Obrázek 18: Denní maximální teploty půdy dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Denní maximální teploty půdy se dle počtů druhů významně nelišily, jen u listnatých porostů byly maxima vyšší v porostech s jedním druhem (obr. 19).



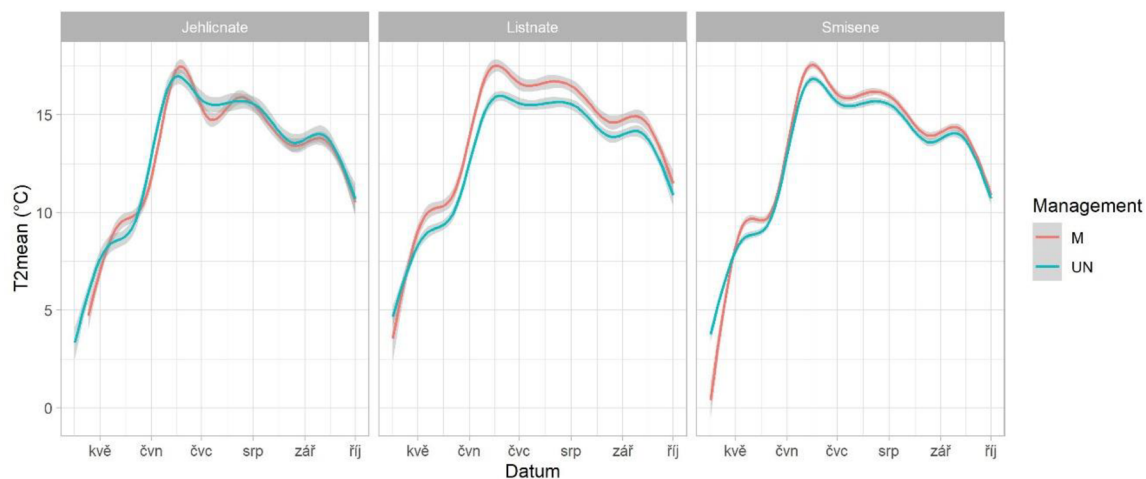
Obrázek 19: Denní maximální teploty půdy dle počtu druhů a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Denní maxima teploty na povrchu půdy v jehličnatých a smíšených porostech v rámci druhové skladby významně nelišila. U listnatých porostů byla maxima vyšší v monokulturách dubu téměř po celou dobu vegetačního období (obr. 20).



Obrázek 20: Denní maximální teploty na povrchu půdy dle druhové skladby (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

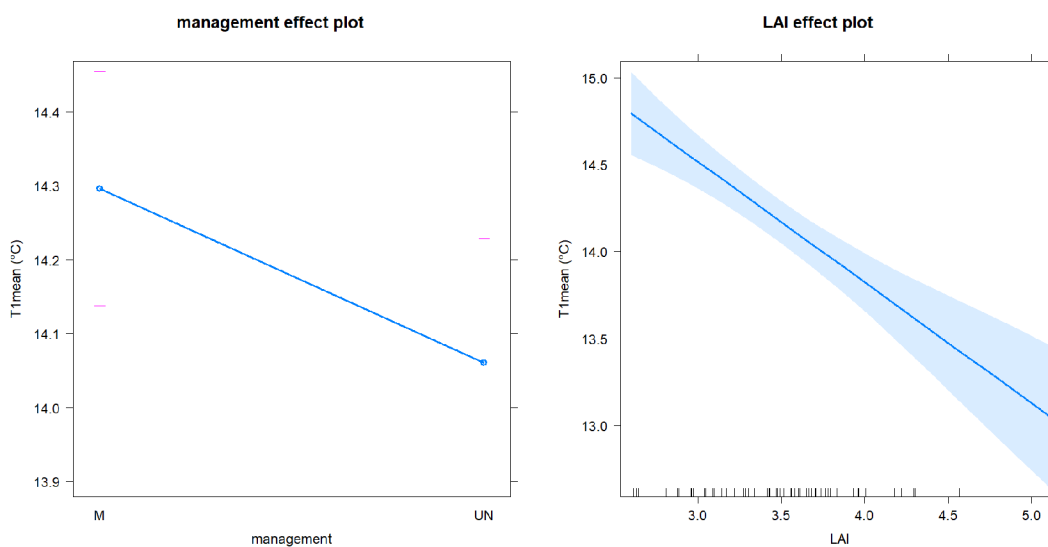
U jehličnatých porostů se maxima teploty na povrchu půdy v rámci způsobu managementu nelišila, v listnatých porostech byla maxima vyšší na plochách s managementem téměř po celou dobu a ve smíšených porostech byla maxima vyšší v první polovině května a poté v červnu také na plochách s managementem (obr. 21)



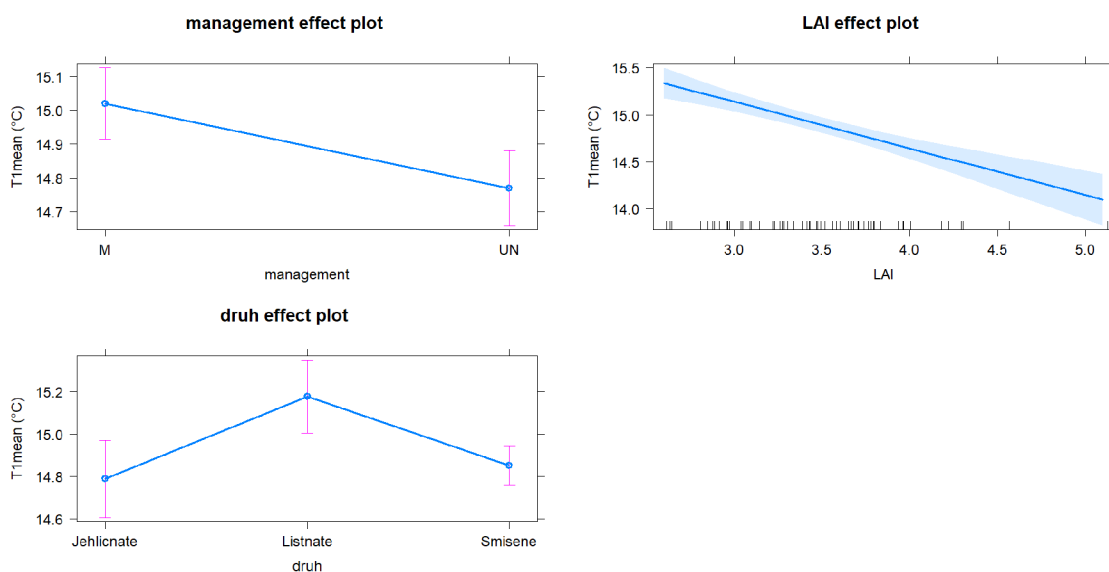
Obrázek 21: Denní průměrné teploty na povrchu půdy podle způsobu managementu (M = s managementem, UN = bez managementu) a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

5.2.2 Měsíční průměrné teploty

Pro průměrné měsíční teploty půdy v červnu (obr. 22) prokázal obecný lineární model závislost teploty na způsobu managementu, kdy byla teplota nižší na plochách bez managementu a na indexu listové plochy, kdy teplota s vyšším LAI klesala ($P < 0.05$; $R^2 = 0.45$). Nebyl zde prokázán významný vliv druhu lesa ($P > 0.05$). V červenci (obr. 23) měl na průměrnou teplotu půdy vliv management, LAI a druh lesa ($P < 0.05$; $R^2 = 0.54$).

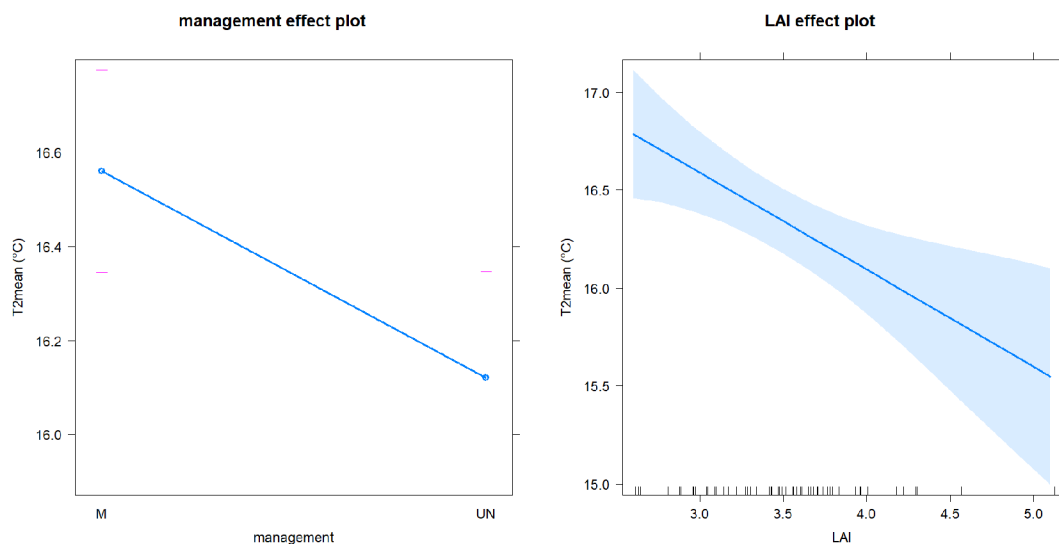


Obrázek 22: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty půdy v měsíci červnu 2021 na způsobu managementu a LAI vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

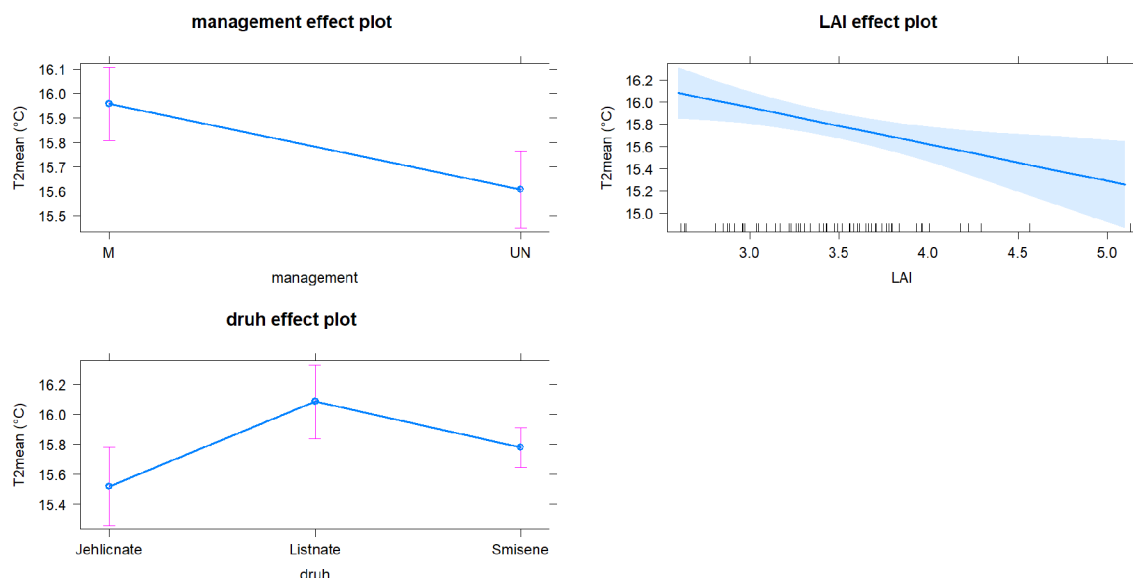


Obrázek 23: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty půdy v měsíci červenci 2021 na způsobu managementu, LAI a druhu lesa vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

Pro průměrné měsíční teploty na povrchu půdy v červnu (obr. 24) prokázal obecný lineární model závislost teploty na způsobu managementu, kdy byla teplota nižší na plochách bez managementu a na indexu listové plochy, kdy teplota s vyšším LAI klesala ($P < 0.05$; $R^2 = 0.28$). Nebyl zde prokázán významný vliv druhu lesa ($P > 0.05$). V červenci (obr. 25) měl na průměrnou teplotu půdy vliv management, LAI a druh lesa ($P < 0.05$; $R^2 = 0.34$).



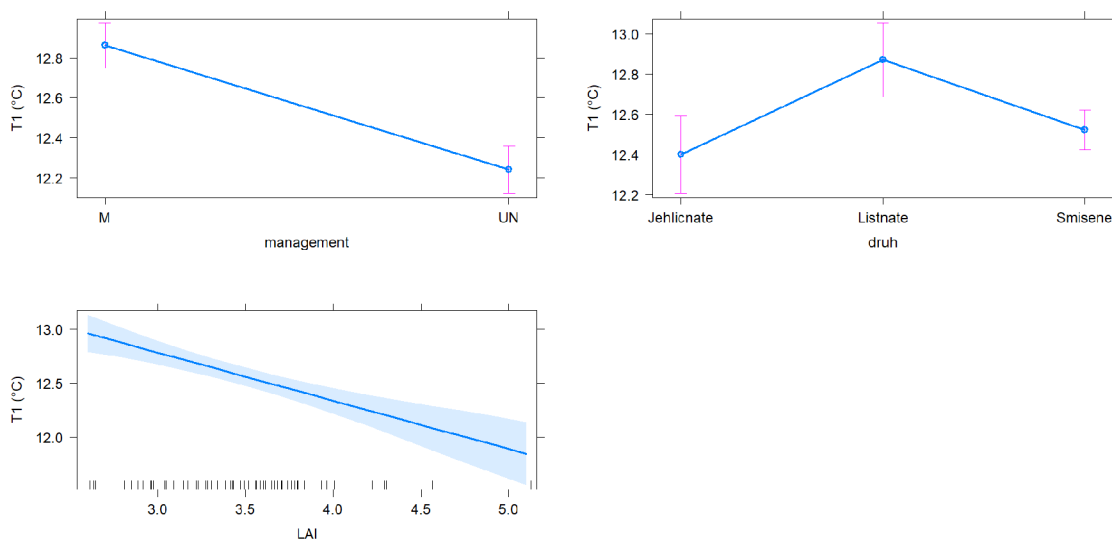
Obrázek 24: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty na povrchu půdy v měsíci červnu 2021 na způsobu managementu a LAI vytvořený na základě obecného lineárního modelu.



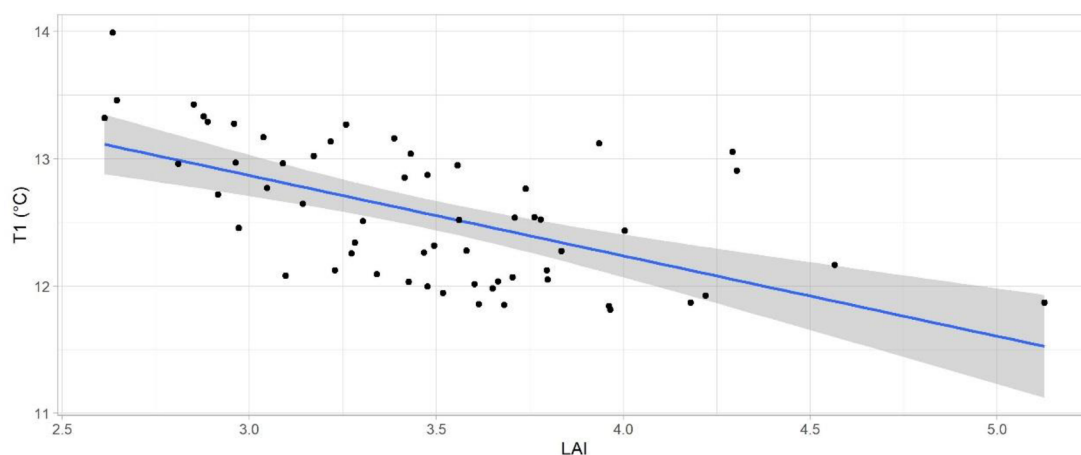
Obrázek 25: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty na povrchu půdy v měsíci červenci 2021 na způsobu managementu, LAI a druhu lesa vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

5.2.3 Průměrné teploty za vegetační období

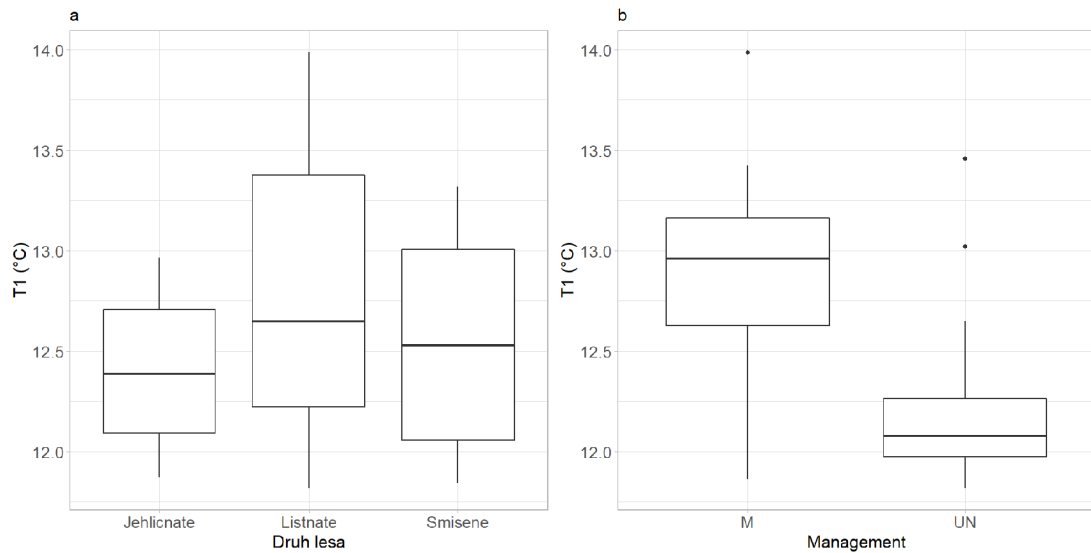
Průměrná teplota půdy za celé vegetační období byla ovlivněna způsobem managementu, kdy byla teplota nižší na plochách bez managementu, druhem lesa, kdy byla teplota půdy nejvyšší v listnatých porostech a LAI, kdy s vyšším LAI teplota klesala ($P < 0.05$; $R^2 = 0.68$) (obr. 26). Pro lepší znázornění závislosti byl vytvořen graf závislosti teploty půdy na LAI (obr. 27) a krabicový graf závislosti teploty půdy na druhu lesa (obr. 28a) a managementu (obr. 28b).



Obrázek 26: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty půdy za vegetační období na způsobu managementu, LAI a druhu lesa vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

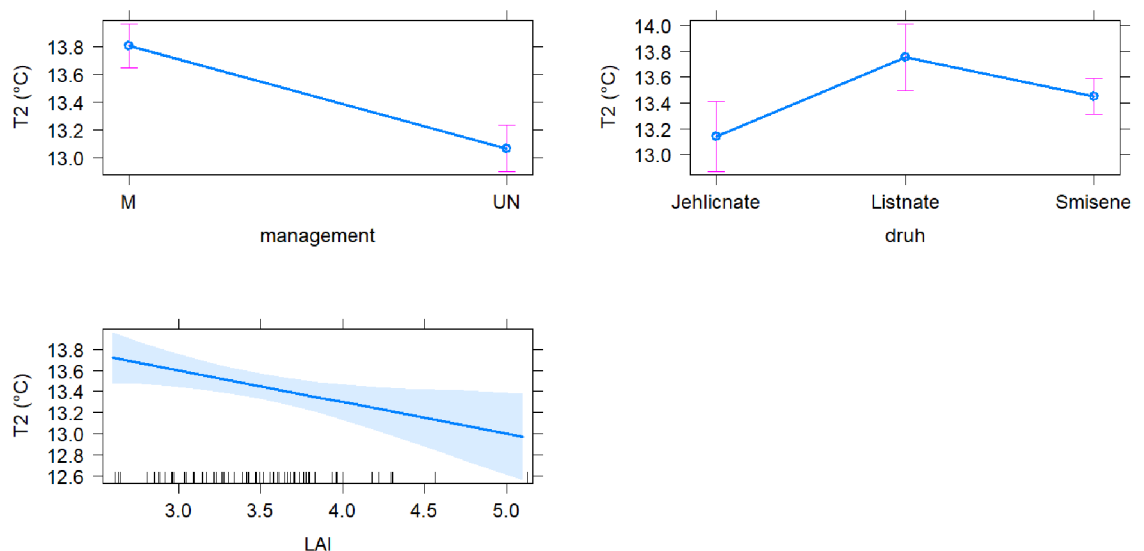


Obrázek 27: Graf zobrazující závislost průměrné teploty půdy za vegetační období na LAI.



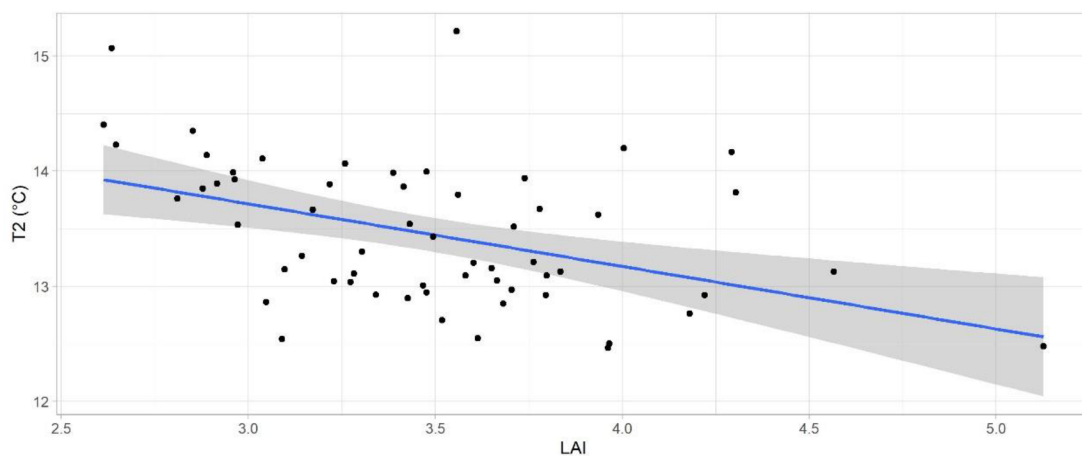
Obrázek 28: Krabicové grafy zobrazující závislost průměrné teploty půdy za vegetační období na druhu lesa a způsobu managementu.

Průměrná teplota na povrchu půdy za celé vegetační období byla ovlivněna způsobem managementu, kdy byla teplota nižší na plochách bez managementu, druhem lesa, kdy byla teplota půdy nejvyšší v listnatých porostech a ve smíšených porostech vyšší než v jehličnatých a LAI, kdy s vyšším LAI teplota klesala ($P < 0.05$; $R^2 = 0.53$) (obr. 29).

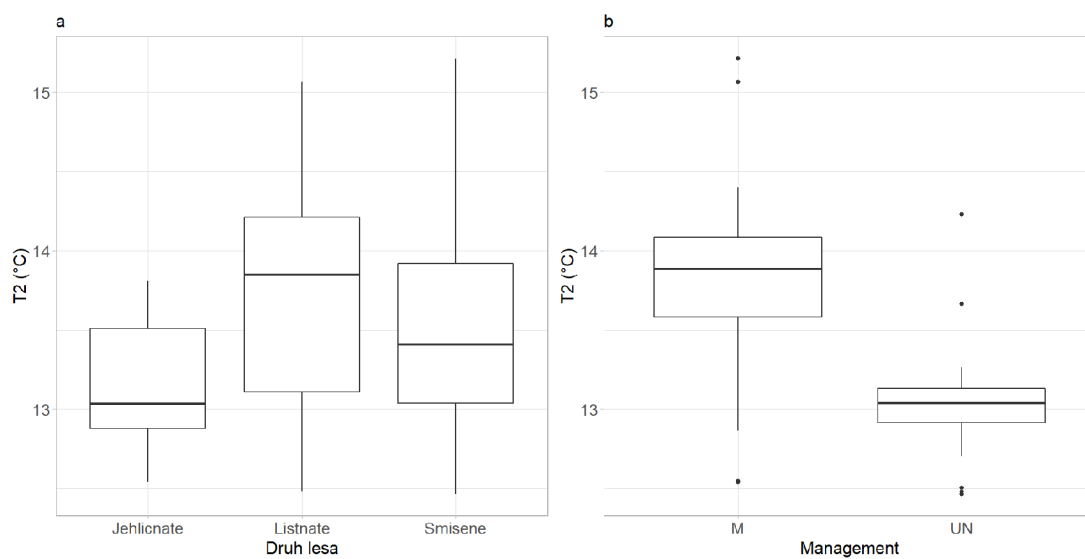


Obrázek 29: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty na povrchu půdy za vegetační období na způsobu managementu, LAI a druhu lesa vytvořený na základě obecného lineárního modelu.

Pro lepší znázornění závislosti byl vytvořen graf závislosti teploty na povrchu půdy na LAI (obr. 30) a krabicový graf závislosti teploty půdy na druhu lesa (obr. 31a) a managementu (obr. 31b).



Obrázek 30: Graf zobrazující závislost průměrné teploty na povrchu půdy za vegetační období na LAI.

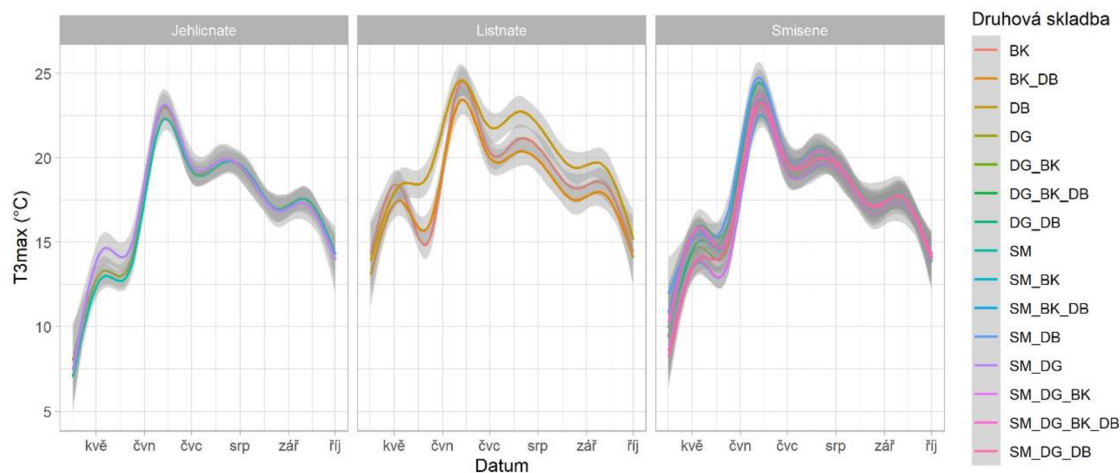


Obrázek 31: Krabicové grafy zobrazující závislost průměrné teploty na povrchu půdy za vegetační období na druhu lesa a způsobu managementu.

5.3 Teplota vzduchu (T3)

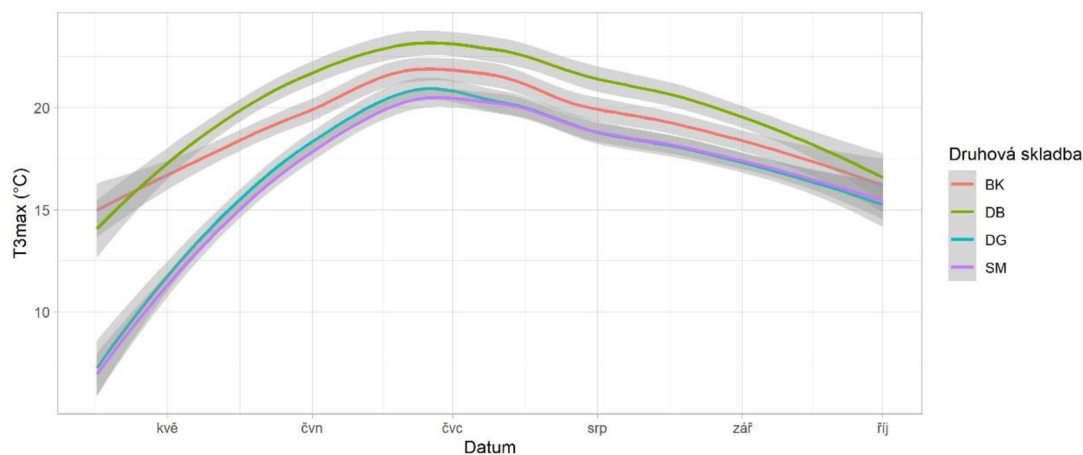
5.4.1 Denní teplotní hodnoty

Denní maximální teploty vzduchu se v jehličnatých a smíšených porostech v rámci druhové skladby významně nelišily. U listnatých porostů panovala vyšší maxima od poloviny května do září v na plochách s dubem (obr. 32).



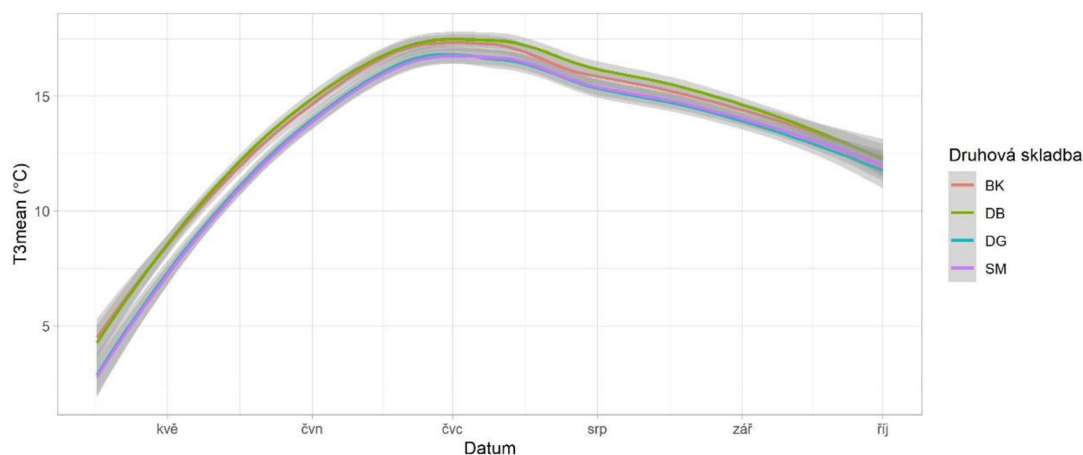
Obrázek 32: Denní maximální teploty vzduchu dle druhové skladby (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

V monokulturách byly nejvyšší denní maxima teploty vzduchu naměřena na plochách s dubem, v monokulturách buku byla maxima vyšší od dubna do června a poté se od ploch s douglaskou a smrkem významně nelišila (obr. 33).



Obrázek 33: Denní maximální teploty vzduchu v monokulturách (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

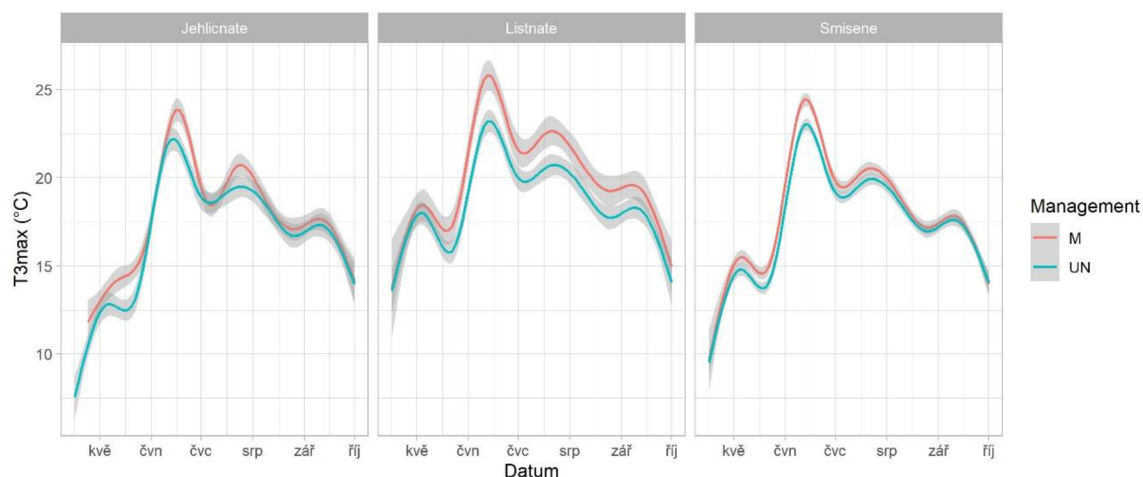
V monokulturách buku a dubu byly v květnu vyšší průměrné denní teploty vzduchu oproti plochám se smrkem a douglaskou, zbytek vegetačního období se významně nelišily (obr. 34).



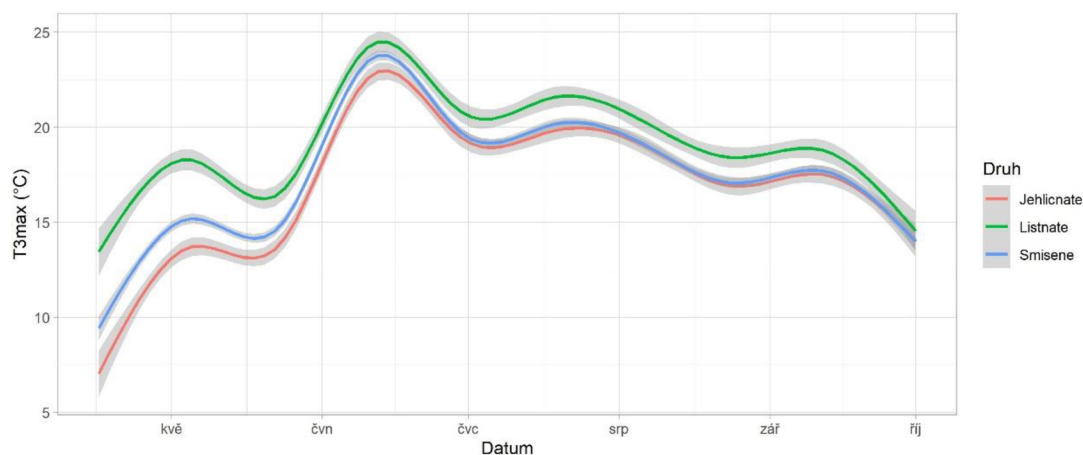
Obrázek 34: Denní průměrné teploty vzduchu v monokulturách (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Denní maximální teploty vzduchu v jehličnatých a smíšených porostech v rámci způsobů managementu byly vyšší během května a června na plochách s managementem. V listnatých porostech byla maxima vyšší od června do srpna (obr. 35).

Téměř celé vegetační období byla vyšší denní maxima teploty vzduchu v rámci druhu lesa naměřena v listnatých porostech. Ve smíšených porostech byla maxima vyšší oproti jehličnatým od dubna do poloviny června (obr. 36).

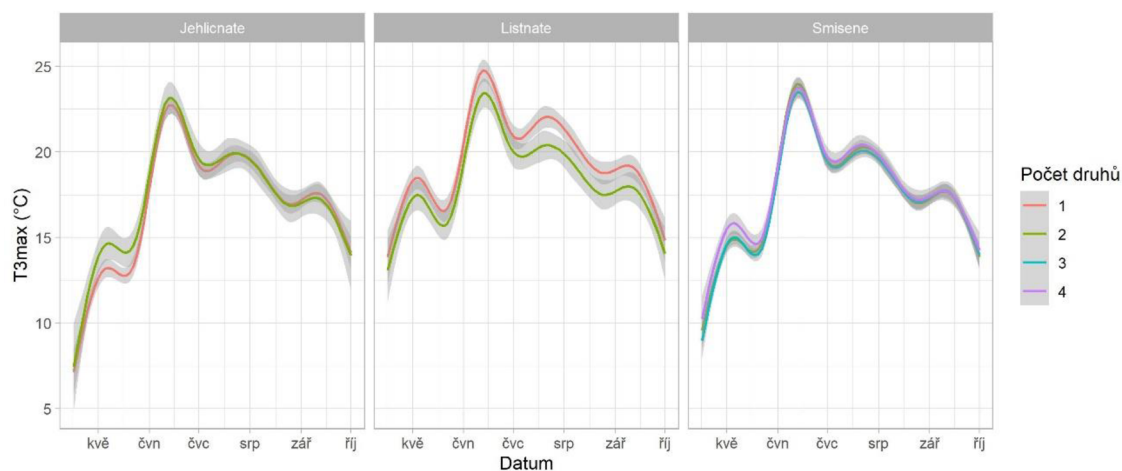


Obrázek 35: Denní maximální teploty vzduchu podle způsobu managementu (M = s managementem, UN = bez managementu) a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.



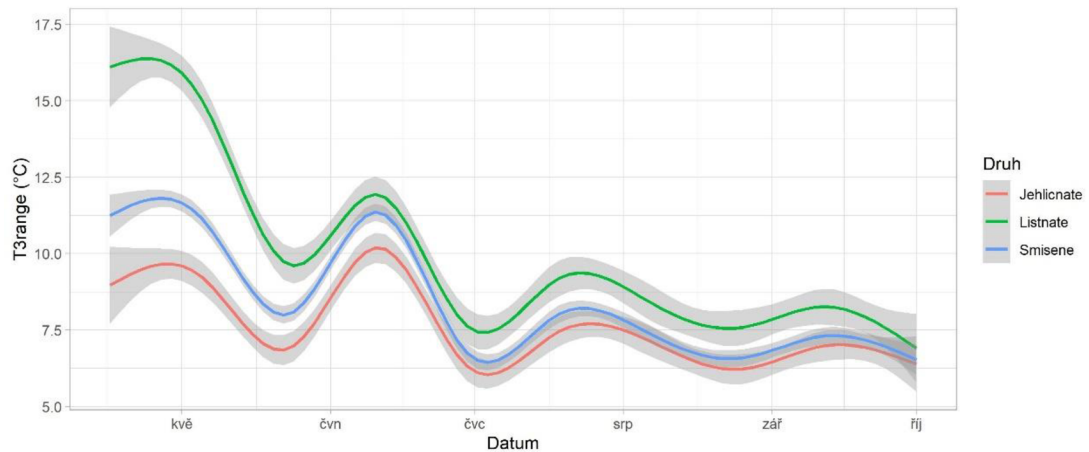
Obrázek 36: Denní maximální teploty vzduchu podle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Denní maximální teploty vzduchu se v jehličnatých a smíšených porostech v rámci počtu druhů významně nelišily, v listnatých porostech byla vyšší maxima naměřena během měsíce července u ploch s jedním druhem oproti plochám se dvěma druhy (obr. 37).



Obrázek 37: Denní maximální teploty vzduchu dle počtu druhů a druhové skladby (SM = smrk ztepilý, DG = douglaska tisolistá, BK = buk lesní a DB = dub zimní) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

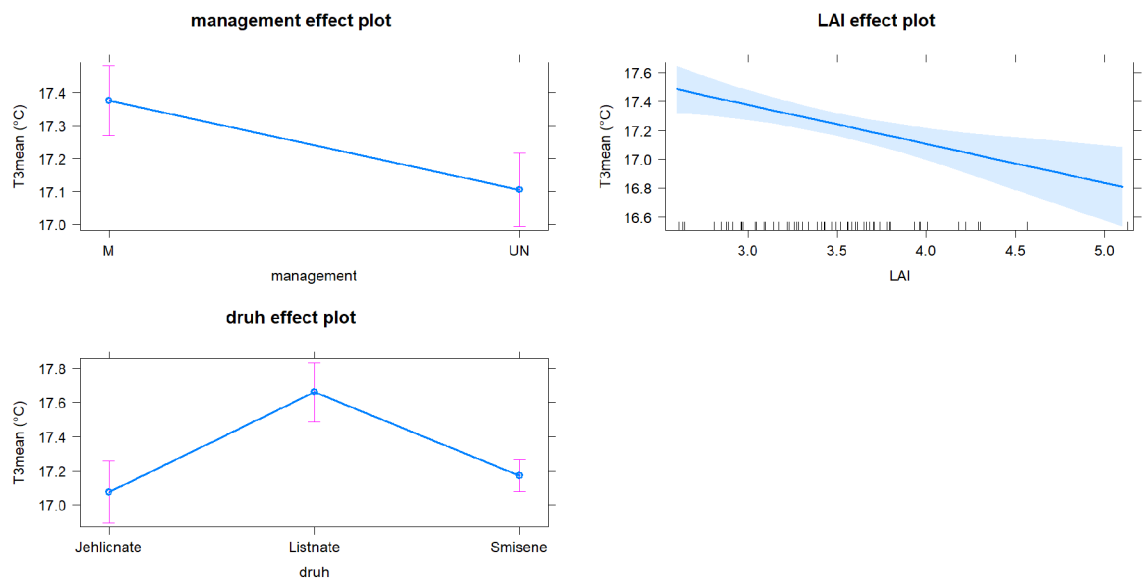
Denní variabilita teploty vzduchu byla nejvyšší po celé vegetační období v listnatých porostech s největšími rozdíly od dubna do června. Od dubna do poloviny června byla variabilita teplot vyšší ve smíšených porostech oproti jehličnatým (obr. 38).



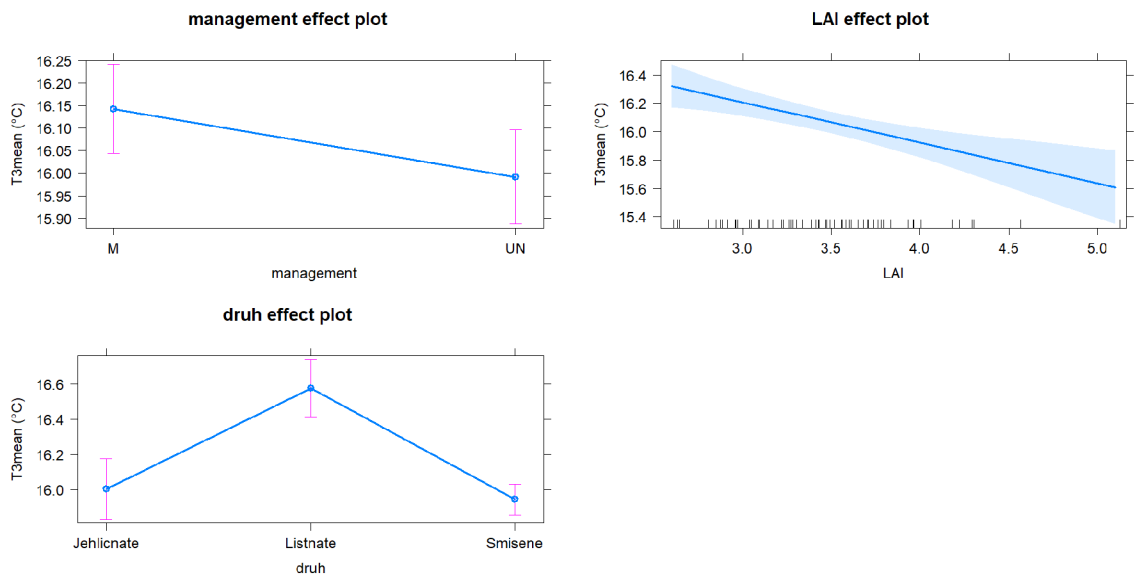
Obrázek 38: Denní variabilita teploty vzduchu dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

5.4.2 Měsíční průměrné a maximální teploty

Pro průměrné měsíční teploty vzduchu v červnu (obr. 39) prokázal obecný lineární model závislost teploty na způsobu managementu, kdy byla teplota nižší na plochách bez management, na indexu listové plochy, kdy teplota s vyšším LAI klesala a na druhu lesa, byla teplota vzduchu nejvyšší v listnatých porostech ($P < 0.05$; $R^2 = 0.48$). V červenci (obr. 40) měl na průměrnou teplotu vzduchu vliv management, LAI a druh lesa ($P < 0.05$; $R^2 = 0.51$).

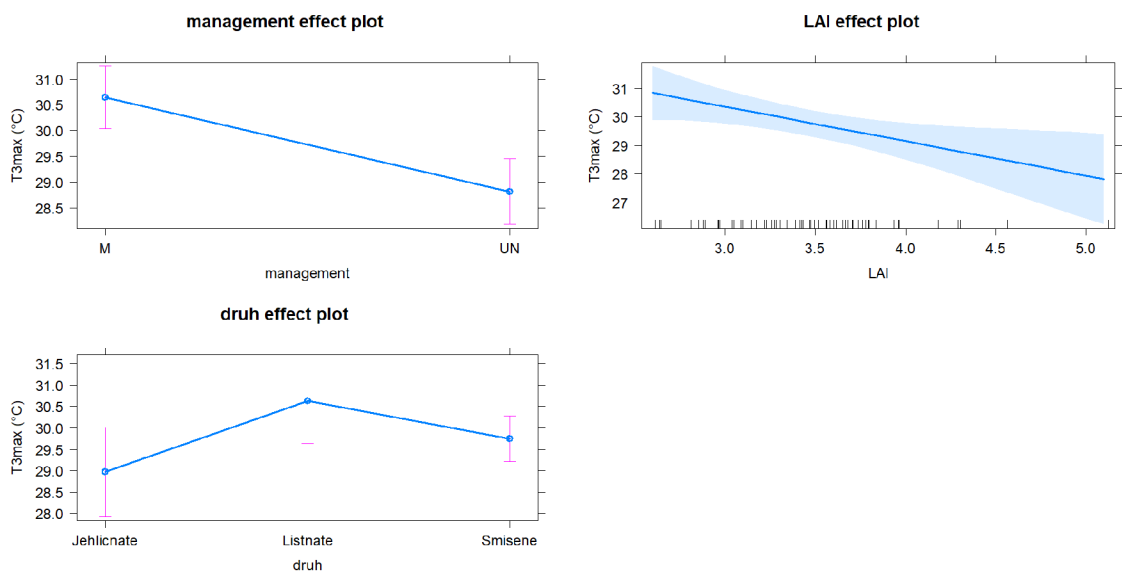


Obrázek 39: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu v měsíci červnu 2021 na způsobu managementu, LAI a druhu lesa.

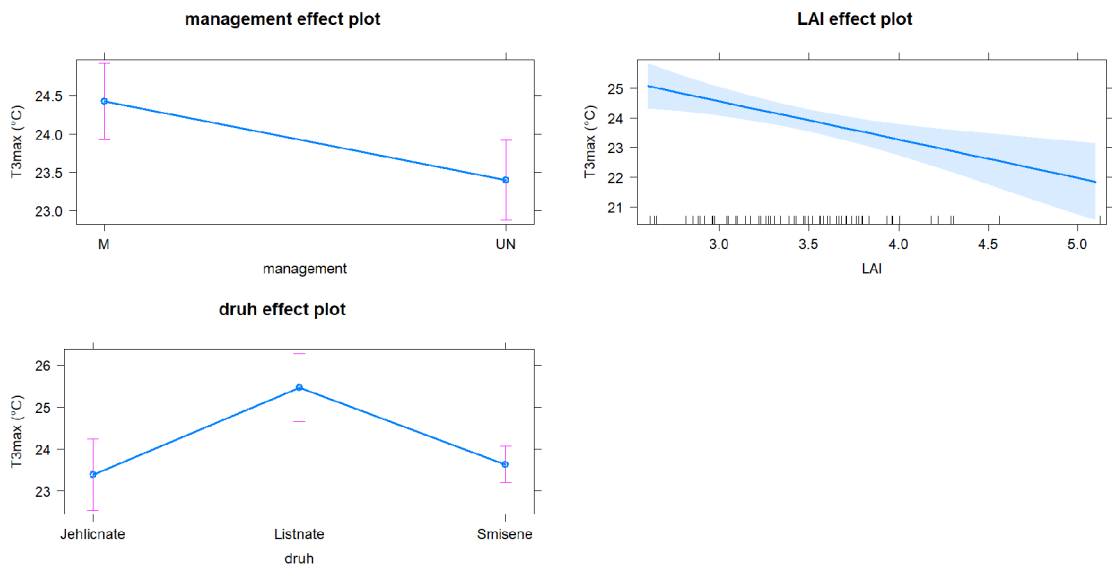


Obrázek 40: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu v měsíci červenci 2021 na způsobu managementu, LAI a druhu lesa.

Pro maximální měsíční teploty vzduchu v červnu (obr. 41) byla prokázána závislost teploty na způsobu managementu, kdy byla maxima nižší na plochách bez managementu, na indexu listové plochy, kdy maxima s vyšším LAI klesala a na druhu lesa, byla maxima teploty vzduchu byla nejvyšší v listnatých porostech ($P < 0.05$; $R^2 = 0.36$). V červenci (obr. 42) měl na maximální teplotu vzduchu vliv management, LAI a druh lesa ($P < 0.05$; $R^2 = 0.39$).



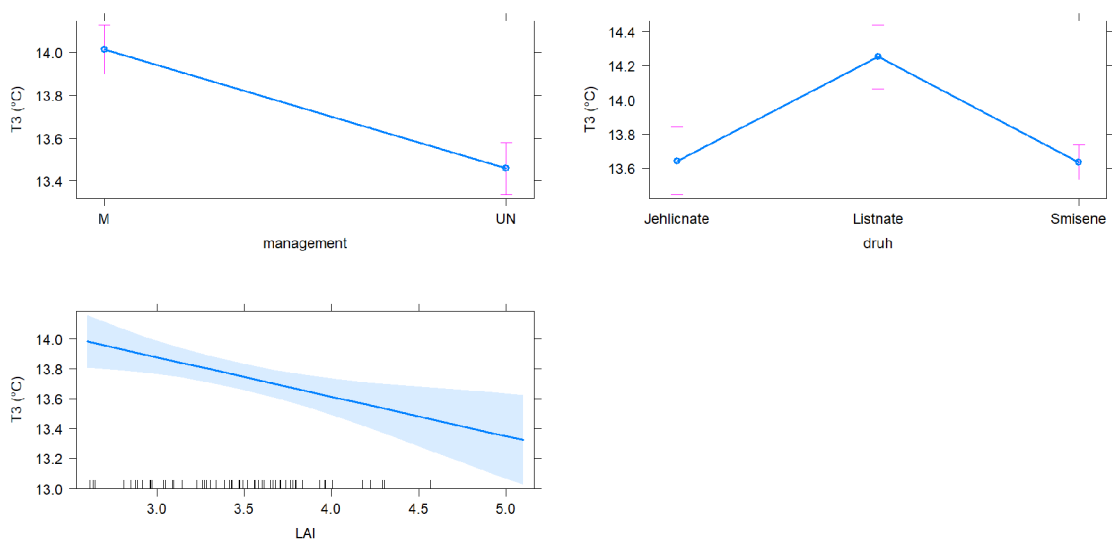
Obrázek 41: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu v měsíci červnu 2021 na způsobu managementu, LAI a druhu lesa.



Obrázek 42: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu v měsíci červenci 2021 na způsobu managementu, LAI a druhu lesa.

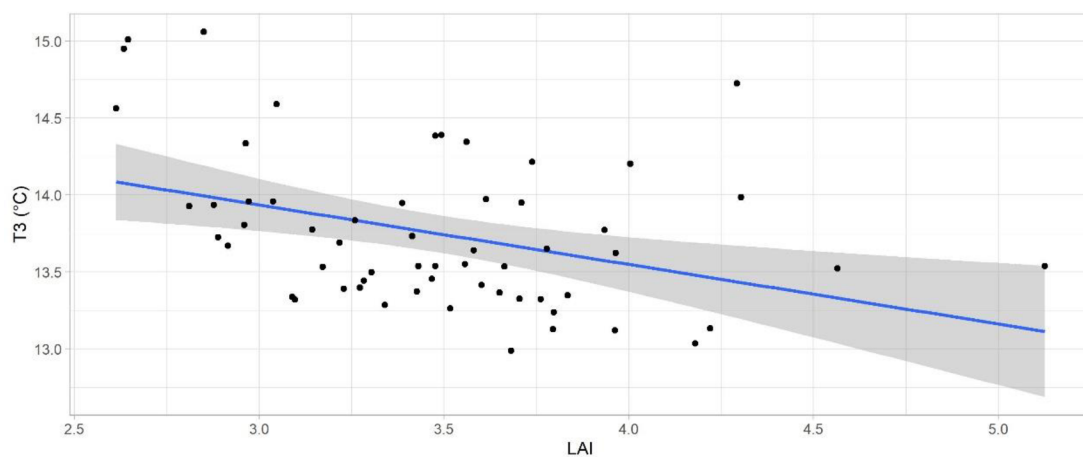
5.4.3 Průměrné teploty za vegetační období

Průměrná teplota vzduchu za celé vegetační období byla ovlivněna způsobem managementu, kdy byla teplota nižší na plochách bez managementu, druhem lesa, kdy byla teplota půdy nejvyšší v listnatých porostech a LAI, kdy s vyšším LAI teplota klesala ($P < 0.05$; $R^2 = 0.61$) (obr. 43).

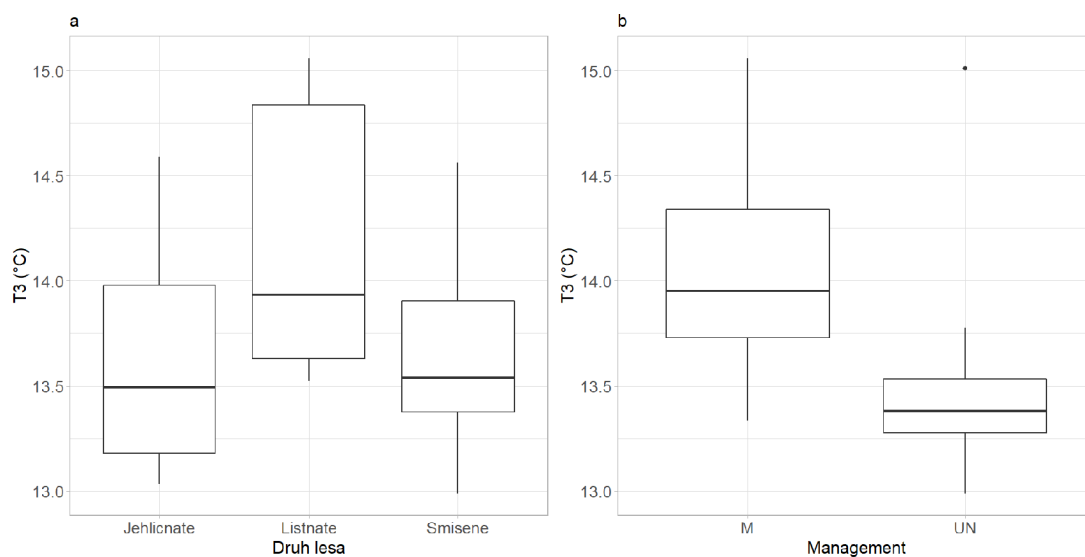


Obrázek 43: Grafy zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu za vegetační období na způsobu managementu, LAI a druhu lesa vytvořené na základě obecného lineárního modelu.

Pro lepší znázornění závislosti byl vytvořen graf závislosti teploty půdy na LAI (obr. 44) a krabicový graf závislosti teploty půdy na druhu lesa (obr. 45a) a managementu (obr. 45b).



Obrázek 44: Graf zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu za vegetační období na LAI.



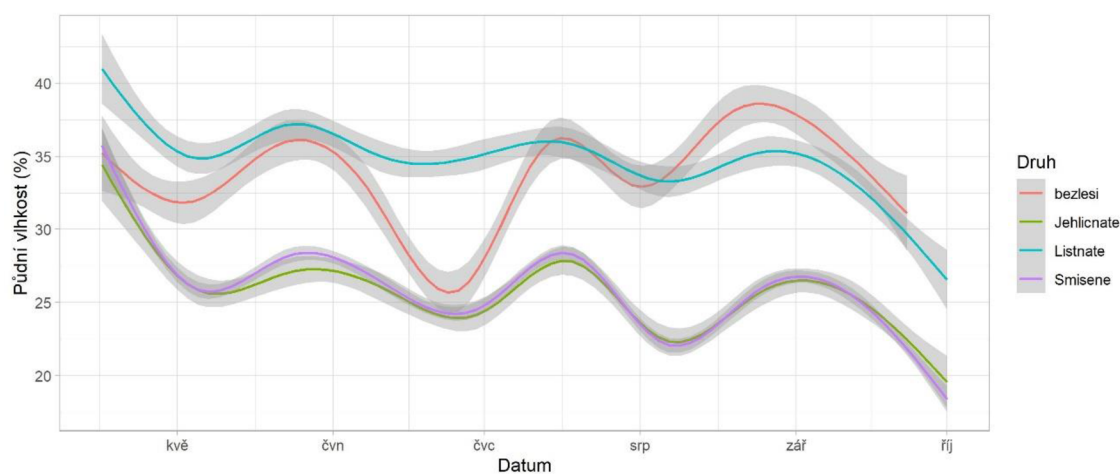
Obrázek 45: Krabicové grafy zobrazující závislost průměrné teploty vzduchu za vegetační období na druhu lesa a způsobu managementu.

5.4 Rozdíly mezi lesem a bezleším

5.4.1 Denní vlhkost půdy

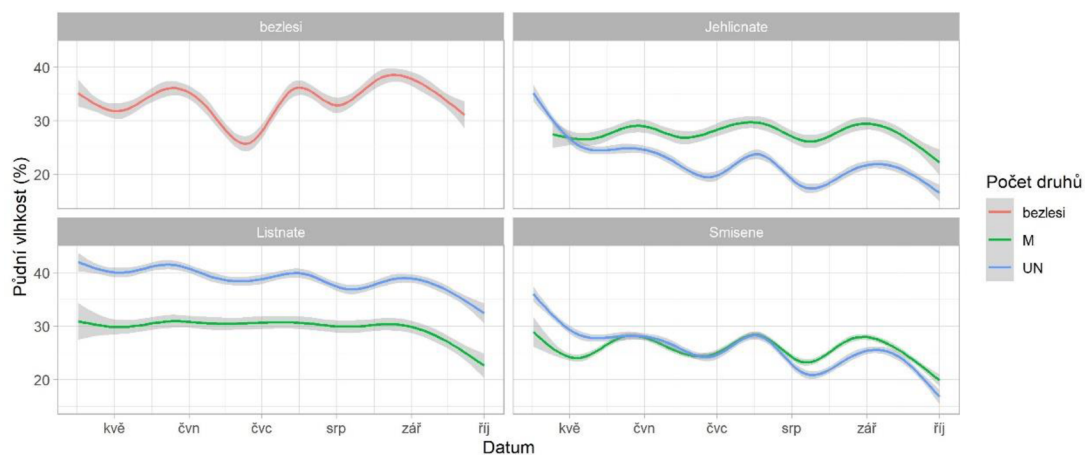
Mimo les byla naměřena nižší denní vlhkost půdy než v listnatých porostech od dubna do května a během června, zatímco byla vlhkost mimo les téměř vždy vyšší než

v jehličnatých nebo smíšených porostech v rámci vegetačního období. Pouze od poloviny srpna do září byla vlhkost vyšší mimo les než ve všech lesních porostech (obr. 46).



Obrázek 46: Denní půdní vlhkost dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

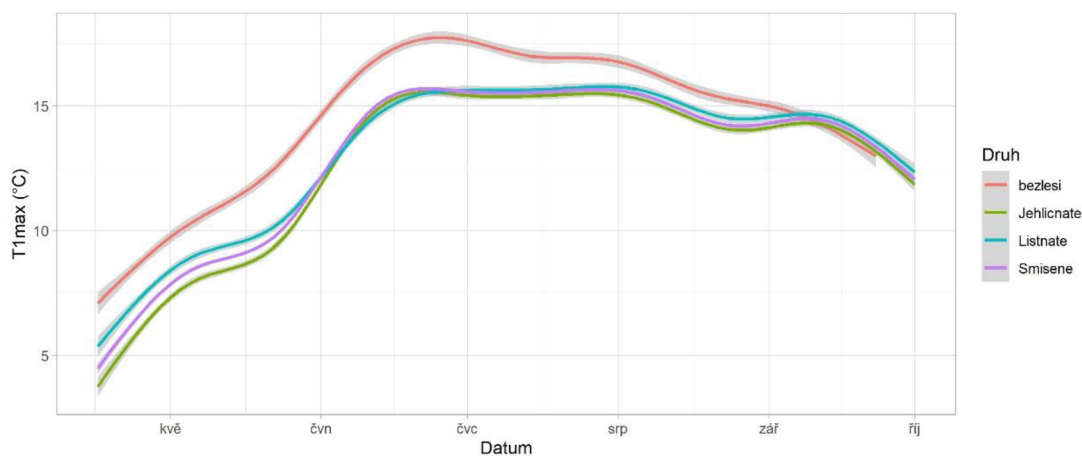
Denní vlhkost půdy byla vyšší mimo les oproti plochám s managementem u všech porostů, pouze u listnatých porostů bez managementu byla vlhkost vyšší než mimo les (obr. 47).



Obrázek 47: Denní půdní vlhkost dle způsobu managementu a druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

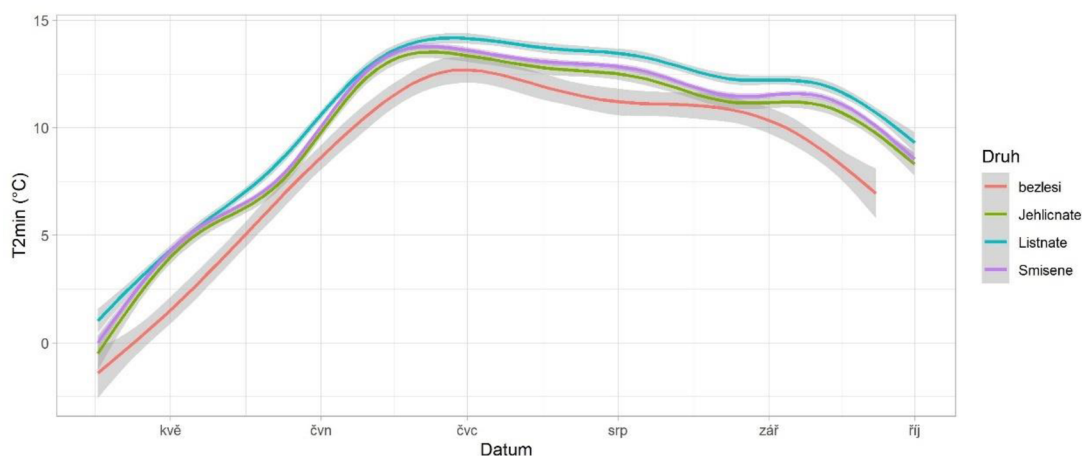
5.4.2 Teplota půdy (T1) a teplota na povrchu půdy (T2)

Denní maximální teploty půdy byly mimo les vyšší než v lesních porostech téměř celé vegetační období (obr. 48).



Obrázek 48: Denní maximální teploty půdy dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

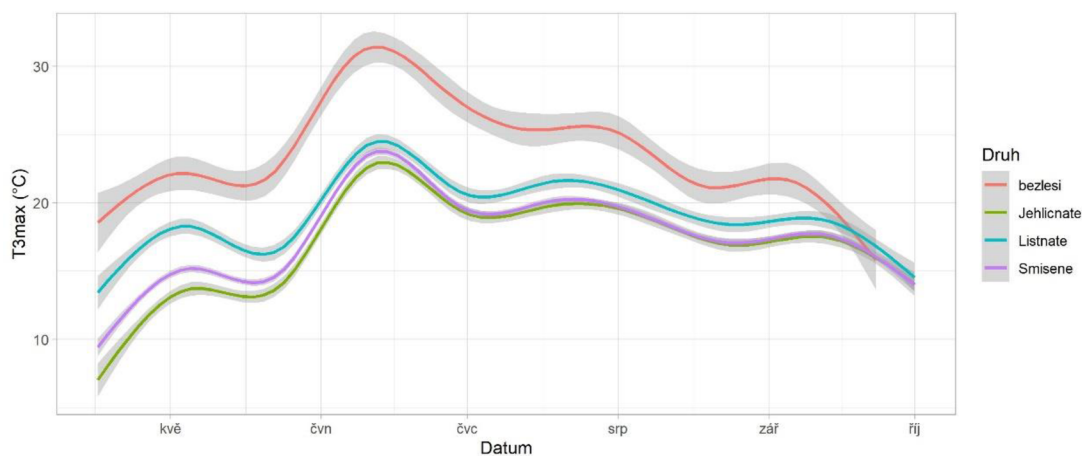
Denní minimální teploty na povrchu půdy byly většinou během vegetačního období nižší mimo les oproti lesním porostům, s výjimkou konce května, konce června a začátku července a druhé poloviny srpna, kdy se významně nelišily od jehličnatých a smíšených porostů. Během celého vegetačního období byla denní minima na povrchu půdy mimo les nižší než v listnatých porostech (obr. 49).



Obrázek 49: Denní minimální teploty na povrchu půdy dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

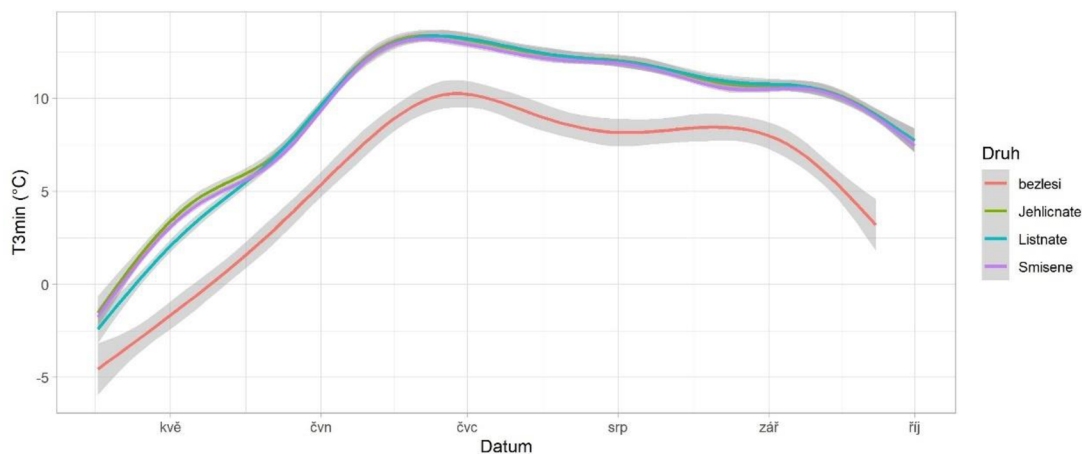
5.4.3 Teplota vzduchu (T3)

Denní maximální teploty vzduchu byly celé vegetační období až do poloviny září vyšší mimo les oproti všem druhům lesních porostů (obr. 50).



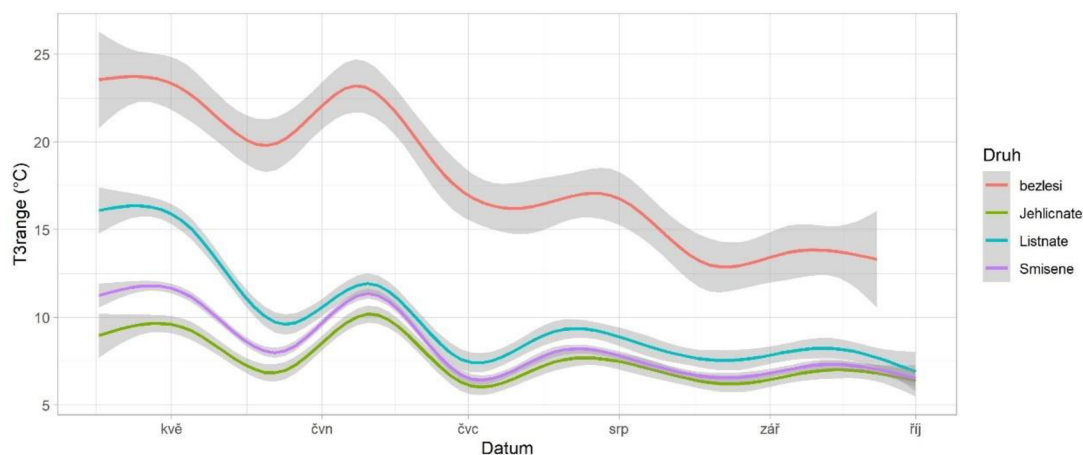
Obrázek 50: Denní maximální teploty vzduchu dle druhu lesa během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

Denní minimální teploty vzduchu byly během celého vegetačního období nižší mimo les oproti všem druhům lesních porostů (obr. 51).



Obrázek 51: Denní maximální teploty půdy dle způsobu managementu (M = s managementem, UN = bez managementu) během vegetačního období. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl naitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

V bezlesí panovala větší variabilita teplot vzduchu oproti všem druhům lesních porostů během vegetačního období (obr. 52).



Obrázek 52: Denní variabilita teplot vzduchu dle druhu lesa. Křivky jsou výsledkem GAM modelu, který byl nafitován do dat. Kolem křivek je šedá zóna, která znázorňuje 95% intervaly spolehlivosti modelů.

6. Diskuse

6.1 Půdní vlhkost

Při vyhodnocení dynamiky pomocí GAM v rámci druhové skladby vyšlo najevo, že na plochách s dubem a bukem půdní vlhkost klesala během vegetačního období méně oproti plochám se smrkem nebo douglaskou, a to jak v monokulturách (obr. 6), tak i ve směsích dvou druhů (obr. 7). Při porovnání všech směsí nezávisle na počtu druhů se ukázalo, že nejméně během léta vysychala monokultura dubu následované směsí dubu a buku (obr. 5). Ve smíšených porostech méně vysychaly směsi dub-buk-douglaska a dub-douglaska. Tyto výsledky ukazují pozitivní vliv dubu zimního na udržení vyšší půdní vlhkosti především během letních měsíců. Způsobeno je to pravděpodobně jeho kořenovým systémem. Jak uvádí Zapater et al (2011), kořeny dubu zasahují do hlubších vrstev půdy a pomocí hydraulického zdvihání přerozdělují vodu do sušších vrstev půdy. Dub tak může zásadně přispět k udržení druhové rozmanitosti ve smíšených lesích, které budou vystaveny silnému suchu. Zjištění, že ve směsi dubu a buku byla pozorována vyšší minimální půdní vlhkost než v bukové monokultuře, odpovídá výsledkům, ke kterým dospěl i Pretzsch et al (2013), jenž zjistil, že buk byl významně odolnější vůči suchu ve směsi spolu s dubem oproti jeho monokulturám. Buk také ve směsích díky zmírnění dopadu sucha dosahuje i větší produkce (Metz et al., 2016).

U monokultury smrku došlo v letních měsících oproti začátku vegetačního období k značnému poklesu minimální půdní vlhkosti (obr. 5). Smrk se proto zdá jako méně vhodná dřevina pro zmírnění dopadů suchých období na lesy, zejména v kontextu již

publikovaných výsledků, že smrk má oproti buku nebo dubu významně nižší rezistenci vůči suchu v monokulturách i ve směsích (Pretzsch et al., 2013). Dle výsledků GAM se jako vhodnější dřevina z hlediska půdní vlhkosti zdá douglaska. Denní minima půdní vlhkosti obecně nejméně klesala v listnatých porostech oproti porostům smíšeným a jehličnatým.

Měsíční minima půdní vlhkosti v měsíci červnu a červenci spolu s průměry za celé vegetační období byly ovlivněny druhem lesa, kde statisticky významný vliv dle obecných lineárních modelů měly listnaté porosty s vyšší půdní vlhkostí oproti ostatním druhům porostů.

Výsledky této práce také podporují tvrzení, že vyšší diverzita stromového patra nemusí vždy znamenat vyšší odolnost vůči suchu (Grossiord et al., 2014). V rámci celé Evropy panují rozdíly mezi jednotlivými typy lesa a jejich vztahu mezi odolností vůči suchu a diverzitou stromů. Ukázalo se například, že temperátním bukovým lesům vyšší diverzita z hlediska odolnosti vůči suchu prospívá, ale u horských bukových lesů již diverzita žádný vliv neměla (Grossiord et al., 2014). Forrester et al (2016) také poukazuje na rozdíly ve vlivu diverzity stromů na stres ze sucha mezi regiony a tvrdí, že jsou případy kdy směsi ze dvou druhů odolávaly suchu lépe, stejně jako případy, kdy lépe odolávaly monokultury. Proto je třeba brát v potaz rozdíly ve vlastnostech mezi stanovišti. Nelze tedy zobecňovat a tvrdit, že větší diverzita stromového patra zajistí zmírnění dopadů klimatické změny na evropské lesy jako celek.

6.2 Teploty půdy a vzduchu

V případě denní maximální teploty půdy v závislosti na druhové skladbě byly na základě GAM pozorovány jen malé rozdíly. Významně vyšší maxima byla pozorována jen u monokultury dubu zimního v listnatých porostech a u směsi dubu a smrku ve smíšených (obr. 15). Mezi druhy lesa se denní maxima teploty půdy lišila jen na začátku vegetačního období, kdy byla nejvyšší v listnatých porostech. To mohlo být způsobeno ještě neúplným olistěním a tím menším indexem listové plochy.

Průměrné teploty půdy a na povrchu půdy byly ovlivněné způsobem managementu, kdy byly průměry nižší na plochách bez managementu, indexem listové plochy, kdy s vyšším LAI teplotní průměry klesaly a druhem lesa, kdy nejvyšší průměry panovaly v listnatých porostech. Pozorovaný rozdíl ve vlivu druhu lesa mezi měsíci červnem a červencem pravděpodobně souvisí s tím, že v červnu nebyl tak velký rozdíl v maximech teplot půdy a na povrchu půdy mezi dubovou monokulturou a zbytkem ploch.

Při teplotě vzduchu byly denní maxima v rámci druhové skladby nejvyšší v monokultuře dubu oproti ostatním plochám a celkově byly vyšší teploty naměřeny u listnatých druhů. Vyšší průměrné teploty panovaly v porostech s nižším LAI, na plochách s managementem a v listnatých porostech. Tyto výsledky odpovídají obecným poznatkům, že schopnost lesa tlumit teplotní extrém je dána fyzickými charakteristikami a strukturou porostu, tedy že největší vliv budou mít plochy s vysokým LAI a s vyšší uzavřeností stromového patra (Aussenac, 2000). Disturbance ve formě managementu tak teploty v podrostu zvyšovaly. Vliv LAI v této práci odpovídá výsledkům, které publikoval Hardwick et al (2015), který uvádí, že s rostoucím LAI na půdu dopadá méně světla a teplota vzduchu zde tedy bude nižší než na plochách s nižším LAI. Zároveň rozdíly teplot na povrchu půdy a vzduchu jsou podle něj způsobené tím, že většina světla je absorbována ve vyšších částech stromového patra, proto teplota od země vzhůru bude stoupat. Rozdíly v teplotách mezi jednotlivými druhy mohou být způsobeny rozdíly ve tvaru koruny a listů. (Yi et al., 2020).

Naproti tomu Macek et al (2019) uvádí, že ve své studii nepozoroval významný vliv stromového patra na denní maxima teploty vzduchu. Variabilitu denních maxim vysvětluje nadmořskou výškou a topografií, nicméně přiznává, že část nevysvětlené variability může náležet struktuře lesa, především hustotě kmenů a výšce koruny stromů. Vysvětlením proč v této práci byl LAI významným faktorem ovlivňující teplotu podrostu může být, že byla zkoumána experimentální výsadba s předem definovanou šířkou mezi kmeny, stejně starými stromy a co nejvíce homogenními podmínkami prostředí, které se v běžných přírodě blízkých porostech odlišují.

6.4 Význam lesního mikroklimatu v kontextu klimatické změny

Tlumící schopnost stromového patra potvrzuje vyhodnocení dynamiky mezi kontrolními čidly mimo les a zkoumanými porosty. V bezlesí panovaly výrazně vyšší denní maxima a nižší minima teploty vzduchu oproti lesním porostům, například v červenci byly mimo les denní maxima až o 10 °C vyšší. To potvrzuje, že organismy v podrostu lesa zažívají menší teplotní extrém, než které předpokládají makroklimatická data naměřená mimo les a že stromové patro hraje důležitou roli v regulaci maximálních teplot během klimatických extrémů (Frenne et al., 2019; Zellweger et al., 2019).

Podoba lesního mikroklimatu je ale proměnlivá a závisí na podobě a struktuře stromového patra (Aussenac, 2000) a na jakékoliv změně fyzických charakteristik je

velmi citlivá (Chen et al., 1999). Proto je třeba v kontextu klimatické změny a zmírňování jejích dopadů vědět, jak složení stromového patra a jeho struktura lesní mikroklima ovlivňuje. Von Arx et al (2013) tvrdí, že existuje prahová hustota stromového patra, nad kterou je vliv tlumící kapacity na lesní podrost podporující, ale pod kterou se již tento efekt ztrácí nebo zcela chybí. Je tak podle něj možné, že překročení této hodnoty může vést ke zhoršení podmínek pro přežití některých druhů pod vlivem klimatické změny a s ní spojených častějších klimatických extrémů.

Tato práce ukázala rozdíly mezi druhovým složením stromového patra a dopady na půdní vlhkost. Vyšší vlhkost obecně byla pozorována u listnatých porostů, ve kterých také docházelo k největším teplotním maximům. Především se ukázalo že porosty s dubem byly méně náchylnější k vysychání, což se ukázalo například u směsi s bukem, který jinak v monokultuře vysychal více. Pozorována byla i vyšší náchylnost k vysychání u smrku, který se tak zdá méně vhodnou dřevinou ke zvládnutí budoucích klimatických extrémů. Alternativou zde je douglaska, která byla v monokultuře i ve směsích méně náchylná k vysychání.

Kombinace vyšší vlhkosti a vyšších teplot v listnatých porostech může být pro některé druhy žádoucí a může podpořit diverzitu podrostu. Navíc i přes to, že v listnatých porostech byly naměřeny vyšší teplotní maxima, stále byl tlumící efekt oproti bezlesí vysoký. To se zdá být klíčové, jelikož maximální denní teploty vzduchu se ukazují jako nejlepší prediktor druhového složení lesního podrostu, a pomalejší nárůst maximálních teplot v lesích může vysvětlovat nižší rychlost změn v lesní vegetaci podrostu napříč lesy mírného pásma (Macek et al., 2019).

7. Závěr a přínos práce

Diplomová práce měla za cíl zjistit, jak hlavní druhy dřevin střeoevropského lesa a jejich směsi ovlivňují teplotu vzduchu, půdy a půdní vlhkost. Měření byla provedena v rámci výsadbového experimentu BIOTREE v Německu, kde byly vysazeny na každé úrovni druhové bohatosti všechny možné kombinace buku lesního (*Fagus sylvatica*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*) a dubu zimního (*Quercus petraea*). Na jednotlivých plochách byla instalována mikroklimatická čidla TMS4 a nad každým čidlem byla provedena hemisférická fotografie pro určení otevřenosti stromového patra a indexu listové plochy.

Bylo zjištěno, že půdní vlhkost během vegetačního období nejméně klesala v listnatých porostech. V rámci druhové skladby nejlépe uchovávala půdní vlhkost monokultura dubu zimního a jeho směsi s dalšími dřevinami, především s bukem lesním. Ukázalo se, že smrk v monokultuře během letních měsíců uchovával půdní vlhkost hůře než douglaska, která tak může být vhodnější alternativou. Možným vysvětlením vyšší půdní vlhkosti na plochách s duby je hlubší kořenový systém dubu oproti ostatním zkoumaným dřevinám, který je schopný pomocí hydraulického zdvihání přerozdělit vodu do sušších vrstev půdy a pomoci tak dřevinám s mělkými kořeny. Tento vztah je však ještě nedostatečně prozkoumaný.

Teploty půdy a vzduchu během vegetačního období panovaly nejvyšší v listnatých porostech. Nejvyšší denní maxima pak byla naměřena v dubových monokulturách. Bylo prokázáno, že teplota půdy i vzduchu klesá s rostoucím indexem listové plochy (LAI) a že je vyšší na plochách s managementem. Pomocí změny struktury a kompozice stromového patra a způsobem lesnického managementu je tedy možné upravovat lesní mikroklima.

Na základě porovnání s kontrolními plochami mimo les byla potvrzena schopnost lesního porostu tlumit teplotní extrémů okolního makroklimatu. V bezlesí panovaly výrazně vyšší denní maxima a nižší minima teploty vzduchu oproti lesním porostům. V kontextu klimatické změny a jejích dopadů na lesní organismy je to klíčový faktor, jelikož lesní organismy v podrostu zažívají menší teplotní extrémů, než které předpokládají měření z klimatických stanic mimo les. Bez lokálních dat o mikroklimatu tedy není možné kvantifikovat dopady klimatických extrémů na organismy.

Práce odpovídá na důležité a aktuální otázky ohledně vlivu druhové skladby na lesní mikroklima a zmírnění dopadů probíhající klimatické změny na lesy.

8. Přehled literatury a použitých zdrojů

Alexander, J. M., Chalmandrier, L., Lenoir, J., Burgess, T. I., Essl, F., Haider, S., Kueffer, Ch., McDougall, K., Milbau, A., Nuñez, M. A., Pauchard, A., Rabitsch, W., Rew, L. J., Sanders, N. J., Pellissier, L. (2018): Lags in the response of mountain plant communities to climate change. *Global Change Biology*, 24, 563-579.

Aussenac, G. (2000): Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57, 287–301.

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.

De Frenne, P., Rodriguez-Sanchez, F., Coomes, D. A., Baeten, L., Verstraeten, G., Vellend, M., Bernhardt-Romermann, M., Brown, C. D., Brunet, J., Cornelis, J., Decocq, G. M., Dierschke, H., Eriksson, O., Gilliam, F. S., Hedl, 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, 18561–18565.

De Frenne, P., Zellweger, F., Rodriguez-Sanchez, 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, 744–749.

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. *Global Change Biology*, 27, 2279-2297.

Elith, J., Leathwick, J.R. (2009): Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 40, 677-697.

Fichtner, A., Schnabel, F., Bruelheide, H., Kunz, M., Mausolf, K., Schuldt, A., Härdtle, W., von Oheimb, G. (2020): Neighbourhood diversity mitigates drought impacts on tree growth. *Journal of Ecology*, 108 (3), 865-875.

Forrester, D. I., Bonal, D., Dawud, S., Gessler, A., Granier, A., Pollastrini, M., Grossiord, Ch. (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.

Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., Basso, L. S., Martinewski, A., Correia, C. S. C., Borges, V. F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L. O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O. L., Lloyd, J. (2014): Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. *Nature*, 506 (7486), 76-80.

Geiger R. (1965): *The Climate Near the Ground*. Harvard, University Press Cambridge, 611 s.

Grossiord, Ch., Granier, A., Ratcliffe, S., Bouriaud, O., Bruelheide, H., Chečko, E., Forrester, D. I., Dawud, S. M., Finér, L., Pollastrini, M., Scherer-Lorenzen, M., Valladares, F., Bonal, D., Gessler, A., Schlesinger, W. H. (2014): Tree diversity does not always improve resistance of forest ecosystems to drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (41), 14812-14815.

Hardwick, S. R., Toumi, R., Pfeifer, M., Turner, E. C., Nilus, R., & Ewers, R. M. (2015): The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 187–195.

Harvey, J. E., Smiljanić, M., Scharnweber, T., Buras, A., Cedro, A., Cruz-García, R., Drobyshev, I., Janecka, K., Jansons, Ā., Kaczka, R., Klisz, M., Läänelaid, A., Matisons, R., Muffler, L., Sohar, K., Spyt, B., Stolz, J., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., Vitas, A., Weigel, R., Kreyling, J., Wilmking, M. (2020): Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. *Global Change Biology*, 26 (4), 2505-2518.

Hofmeister, J., Hošek, J., Brabec, M., Stráalková, R., Mýlová, P., Bouda, M., Pettit, J. L., Rydval, M., Svoboda, M. (2019): Microclimate edge effect in small fragments of temperate forests in the context of climate change. *Forest Ecology and Management*, 448, 48-56.

Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., Plummer, S. (1997): Microclimate in Forest Ecosystem the effects of different management regimes. *BioScience*, 49 (4), 288-297.

Chen, J. Q., 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. *BioScience*, 49, 288–297.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Jennings, S. B., Brown, N. D., Sheil, D. (1999): Assessing forest canopies and understorey illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72 (1), 59-73.

Kollas, C., Körner, C., Randin, C. F. (2013): Spring frost and growing season length co-control the cold range limits of broad-leaved trees. *Journal of Biogeography*, 41, 773–783.

Lembrechts, J. J., Nijs, I., Lenoir, J. (2019): Incorporating microclimate into species distribution models. *Ecography*, 42, 1267–1279.

Lenoir, J., Hattab, T., Pierre, G. (2017): Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: Implications for species redistribution. *Ecography*, 40, 253–266.

Lewis, S. L., Wheeler, C. E., Mitchard, E. T. A., and Koch, A. (2019): Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 568, 25–28.

Liang, J., Crowther, T. W., Picard, N., Wisser, 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, Ch. B., ... Reich, P. B. (2016): Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 354, aaf8957.

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 (7726), 259-262.

Macek, M., Kopecký, M., Wild, J., (2019): Maximum air temperature controlled by landscape topography affects plant species composition in temperate forests. *Landscape Ecology*, 34 (11), 2541–2556.

- Matevski, D., Schuldt, A. (2021): Tree species richness, tree identity and non-native tree proportion affect arboreal spider diversity, abundance and biomass. *Forest Ecology and Management*, 483, 118775.
- Metz, J., Annighöfer, P., Schall, P., Zimmermann, J., Kahl, T., Schulze, E. D., Ammer, Ch. (2016): Site-adapted admixed tree species reduce drought susceptibility of mature European beech. *Global Change Biology*, 22 (2), 903-920.
- Mitchard, E. (2018): The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*, 559 (7715), 527-534.
- Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., Bugmann, H. (2018): Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8 (1), 1-12.
- Moyes, A. B., Castanha, C., Germino, M. J., Kueppers, L. M. (2013): Warming and the dependence of limber pine (*Pinus flexilis*) establishment on summer soil moisture within and above its current elevation range. *Oecologia*, 171 (1), 271-282.
- Paquette, A., Messier, Ch. (2011): The effect of biodiversity on tree productivity: From temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 20 (1), 170-180.
- Podrázský, V. (2014): *Základy ekologie lesa*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 144 s.
- Potter, K. A., Arthur Woods, H., Pincebourde, S. (2013): Microclimatic challenges in global change biology. *Global Change Biology*, 19, 2932–2939.
- 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 Biology*, 15 (3), 483-495.
- Qie, L., Lewis, S. L., Sullivan, J.P., Lopez-Gonzalez, G., Pickavance, G. C., Sunderland, T., Ashton, P., Hubau, W., Abu Salim, K., ... Phillips, O. L. (2017): Long-term carbon sink in Borneo's forests halted by drought and vulnerable to edge effects. *Nature Communications*, 8 (1), 1966.
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- 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.

- Seager, R., Neelin, D., Simpson, I., Liu, H., Henderson, N., Shaw, T., Kushnir, Y., Ting, M., Cook, B. (2014): Dynamical and thermodynamical causes of large-scale changes in the hydrological cycle over North America in response to global warming. *Journal of Climate*, 27 (20), 7921-7948.
- Scheffers, B. R., Edwards, D. P., Diesmos, A., Williams, S. E., Evans, T. A. (2014): Microhabitats reduce animal's exposure to climate extremes. *Global Change Biology*, 20, 495–503.
- Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, T. C. L., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., Butchart, S. H. M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K. M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W. B., Martin, T. G., Mora, C., Bickford, D., Watson, J. E. M. (2016): The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354(6313), aaf7671.
- 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). *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9 (2), 53-70.
- Schwenk, K., Padilla, D. K., Bakken, G. S., Full, R. J. (2009): Grand challenges in organismal biology. *Integrative and Comparative Biology*, 49 (1), 7-14.
- Stark, J. R., Fridley, J. D., Gill, J. (2021): Microclimate-based species distribution models in complex forested terrain indicate widespread cryptic refugia under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 1-14.
- ter Steege, H. (2018): Hemiphot. R: free R scripts to analyse hemispherical photographs for canopy openness, leaf area index and photosynthetic active radiation under forest canopies. *Naturalis Biodiversity Center*, 25 s.
- von Arx, G., Graf Pannatier, E., Thimonier, A., Rebetez, M., Gilliam, F. (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.
- Wild, J., Kopecký, M., Svoboda, M., Zenahlikova, J., Edwards-Jonasova, M., Herben, T. (2014): Spatial patterns with memory: Tree regeneration after stand-replacing disturbance in *Picea abies* mountain forests. *Journal of Vegetation Science*, 25, 1327–1340.

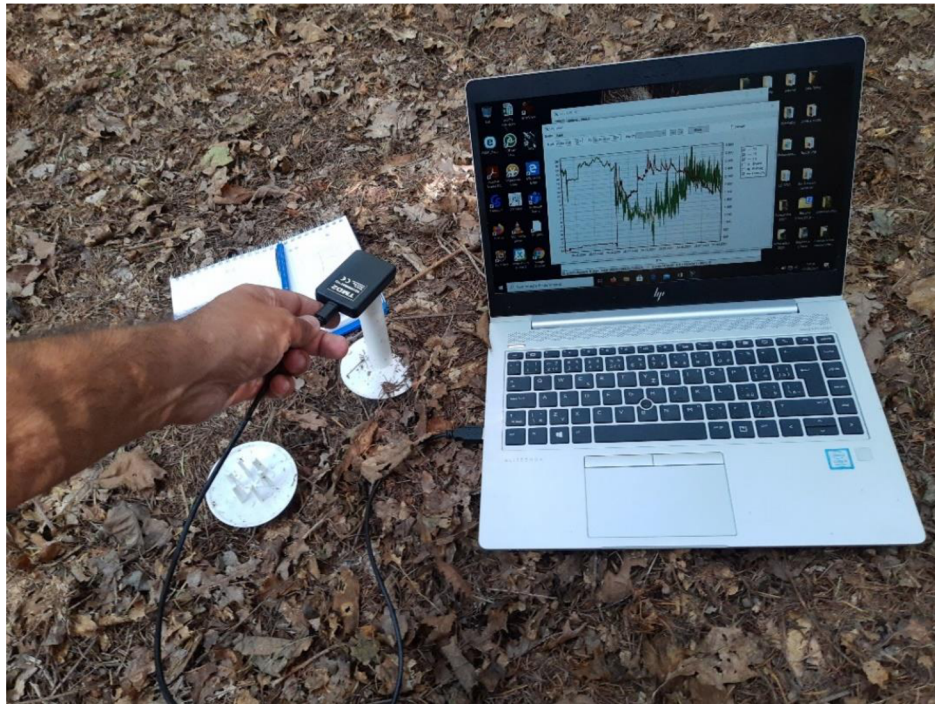
Yi, K., Smith, J. W., Jablonski, A. D., Tatham, E. A., Scanlon, T. M., Lerdau, M. T., Novick, K. A., Yang, X. (2020): High Heterogeneity in Canopy Temperature Among Co-occurring Tree Species in a Temperate Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125 (12), 1-14.

Zapater, M., Hossann, Ch., 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 (5), 885-894.

Zellweger, F., Coomes, D., Lenoir, J., Depauw, L., Maes, S. L., Wulf, M., Kirby, K. J., Brunet, J., Kopecky, M., Malis, 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. *Global Ecology and Biogeography*, 28, 1774–1786.

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, 772–775.

9. Přílohy



Příloha 1: Sběr dat z mikroklimatického čidla TMS4 v terénu pomocí notebooku s aplikací Lolly Manager a USB adaptéru.



Příloha 2: Mikroklimatické čidlo TMS4 umístěné v půdě.



Příloha 3: Buková monokultura, jedna ze zkoumaných ploch.