Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ekologie lesa

Vliv druhové bohatosti dřevin a struktury lesa na variabilitu mikroklimatu v boreálním lese ve Finsku

Diplomová práce

Autor: Bc. Romana Pilařová

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

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Romana Pilařová

Lesní inženýrství
Lesní inženýrství

Název práce

Vliv druhové bohatosti dřevin a struktury lesa na variabilitu mikroklimatu v boreálním lese ve Finsku

Název anglicky

The effects of tree species richness and structure on the microclimate variability in boreal forests in Finland

---

Cíle práce

Stromové patro lesů může významně omezit negativní vlivy globálního oteplování na lesní mikroklima, čímž snižuje dopady na biodiverzitu a stabilitu těchto lesů. Tento pozitivní vliv lesů na mikroklima se liší dle druhové skladby, smíšení druhů a porostní struktury, avšak doposud chybějí empirická informace o tom, jak tyto faktory ve vzájemné interakci ovlivňují lesní mikroklima boreálních lesů severní Evropy. Cílem práce tak bude zjistit, jak druhová bohatost stromového patra a jeho struktura ovlivňují teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkost v podrostu lesa na výzkumných plochách FunDivEUROPE ve Finsku.

Metodika

Měření budou prováděna pomocí mikroklimatických čidel TMS4 na síti ploch FunDivEUROPE (1 čidlo na plochu) v okolí Joensuu ve Finsku. V rámci diplomové práce budou plochy navštíveny, zkontrolována a případně doinstalována čidla a stažena data. Nad každým čidlem bude zhotovena hemisférická fotografie pro určení pokryvnosti stromového patra a změřeny základní strukturní parametry.

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 vlivy druhové bohatosti a struktury na jednotlivé mikroklimatické proměnné.

Harmonogram práce:

duben 2021 – leden 2022 – studium literatury, zpracování literární rešerše

září 2021 – listopad 2021 – návštěva výzkumných ploch, stažení dat z mikroklimatických čidel, doplňková měření

listopad 2021 – leden 2022 – čištění a zpracování dat z mikroklimatických čidel

prosinec 2021 – leden 2022 – statistické analýzy mikroklimatických dat

únor 2022 – předložení výsledků analýz a literární rešerše ke kontrole

březen 2022 – předložení textových částí ke kontrole

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

mikroklima, boreální les, druhová bohatost, porostní struktura, FunDivEUROPE

Doporučené zdroje informací

Aussenac, G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. Ann. For. Sci. 57, 287–301.

Baeten, L., Verheyen, K., Wirth, C., Bruelheide, H. et al., 2013. A novel comparative research platform designed to determine the functional significance of tree species diversity in European forests. Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst. 15, 281–291.

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., Hédl, 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.J., Aalto, J., Ashcroft, M.B., De Frenne, P., Kopecký, M., Lenoir, J., Luoto, M., Maclean, I.M.D., Roupsard, O., Fuentes-Lillo, E., García, R.A., Pellissier, L., Pitteloud, C., Alatalo, J.M., Smith, S.W., Björk, R.G., Muffler, L., Ratier Backes, A., Cesarz, S., Gottschall, F., Okello, J., Urban, J., Plichta, R., Svátek, M., Phartyal, S.S., Wipf, S., Eisenhauer, N., Puşcaş, M., Turtureanu, P.D., Varlagin, A., Dimarco, R.D., Jump, A.S., Randall, K., Dorrepaal, E., Larson, K., Walz, J., Vitale, L., Svoboda, M., Finger Higgens, R., Halbritter, A.H., Curasi, S.R., Klupar, I., Koontz, A., Pearse, W.D., Simpson, E., Stemkovski, M., Jessen Graae, B., Vedel Sørensen, M., Høye, T.T., Fernández Calzado, M.R., Lorite, J., Carbognani, M., Tomaselli, M., Forte, T.G.W., Petraglia, A., Haesen, S., Somers, B., Van Meerbeek, K., Björkman, M.P., Hylander, K., Merinero, S., Gharun, M., Buchmann, N., Dolezal, J., Matula, R., Thomas, A.D., Bailey, J.J., Ghosn, D., Kazakis, G., de Pablo, M.A., Kemppinen, J., Niittynen

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.

Zellweger, F. et al., 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. Science. 368, 772–775.

Předběžný termín obhajoby
2021/22 LS – FLD

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

Garantující pracoviště
Katedra ekologie lesa

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2022
prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2022
prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.
Děkan

V Praze dne 05. 04. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv druhové bohatosti dřevin a struktury lesa na variabilitu mikroklimatu v boreálním lese ve Finsku" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne: _____ Podpis autora:_____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Radim Matula, Ph.D. za vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce a poskytnutí dat pro zpracování práce. Dále chci poděkovat mé rodině a především příteli, který mě po celou dobu podporoval. Nakonec děkuji týmu z oddělení lesní produkce z Bernské univerzity aplikovaných věd za podporu i cenné rady.

Vliv druhové bohatosti dřevin a struktury lesa na variabilitu mikroklimatu v boreálním lese ve Finsku

Abstrakt

Specifické mikroklima lesů ovlivňuje nejen rychlost růstu dřevin a biodiverzitu na stanovišti, ale má také vliv na makroklima okolního prostředí. V současném zvyšujícím se zájmu o problematiku globální změny klimatu se dostává mikroklimatu vyšší pozornosti. Potvrzený vliv mikroklimatu na lokální snížení extrémních klimatických podmínek prohlubuje zájem o prozkoumávání této tématiky.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověřit vliv jednotlivých druhových směsí dřevin a struktury těchto porostů na lesní mikroklima se zaměřením na boreální lesy ve Finsku. Zkoumány byly tři druhy dřevin, typické pro tuto oblast, a to smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth). Dřeviny byly pozorovány jak v jedno druhovém zastoupení, tak i ve dvou druhové a tří druhové porostní směsi. Mikroklima bylo měřeno mikroklimatickým čidlem TMS-4, které měřilo půdní teplotu, půdní vlhkost a teplotu vzduchu. Struktura porostu byla vyhodnocena na základě pořízených hemisférických fotografií, ze kterých byla stanovena hodnota LAI a pokryvnost stromového patra. Následně byla data zpracována v grafickém rozhraní R Studio, využitím potřebných balíčků.

Z výsledných dat získaných z celkem 28 zkusných ploch bylo zjištěno, že počet druhů v porostu má zásadní vliv na půdní teplotu i vlhkost. Smrkové monokulturní porosty byly nejsuššími stanovišti a zároveň zde byly naměřeny velmi nízké teploty v zimních obdobích. Jako nejlepší druhová skladba vzhledem k udržování půdní vlhkosti byla tří druhová kombinace smrk-borovice-bříza, ve které byly naměřeny vysoké a stabilní hodnoty půdní vlhkosti a chladnější teploty v letních měsících.
Struktura porostu prokázala významný vztah k půdní teplotě a půdní vlhkosti, a však s odlišnými hodnotami oproti výsledkům dostupné literatury.

Výsledky práce splnily její záměr, kterým bylo ověření vlivu porostních směsí a jejich struktury na mikroklima a svými daty přispívají k tématice ovlivňování makroklimatu mikroklimatem.

Klíčová slova: mikroklima, boreální les, druhová bohatost, porostní struktura, FunDivEUROPE

The effects of tree species richness and structure on the microclimate variability in boreal forests in Finland

Abstract

The specific microclimate of forests affects not only the growth rate of trees and biodiversity in the habitat but also the macroclimate of the surrounding environment. With the current increasing interest in the issue of global climate change, microclimate is receiving more attention. The confirmed influence of microclimate on the local reduction of extreme climatic conditions is a growing interest in exploring this topic.

The main aim of this thesis was to examine the influence of different tree species mixtures and their stand structure on forest microclimate, with a focus on boreal forests in Finland. Three tree species typical for this region were investigated, namely Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and white birch (*Betula pendula* Roth). The tree species were observed in both single-, two- and three-species stand mixtures. Microclimate was measured with a TMS-4 microclimate sensor that measured soil temperature, soil moisture, and air temperature. Stand structure was evaluated by taking hemispherical photographs, from which LAI and tree canopy cover were determined. Subsequently, the data were processed in the R Studio graphical interface, using the necessary packages.

From the results of the data obtained from a total of 28 plots, it was found that the number of species in the stand has a significant effect on soil temperature and moisture. The spruce monoculture stands were the driest sites and had very low temperatures in winter. The best species composition concern soil moisture retention was a three-species combination of spruce-pine-birch, in which high and stable soil moisture values and cooler temperatures in summer were measured.

Stand structure showed a significant relationship with soil temperature and soil moisture, but with different values compared to the results of the available literature.

The results of this study fulfilled the verification of the influence of stand mixtures and their structure on microclimate and data contribute to the topic of macroclimate influences on microclimate.

Keywords: microclimate, boreal forest, tree species richness, stand structure, FunDivEUROPE

Obsah

1 Úvod **12**

2 Cíl práce **14**

3 Literární rešerše **15**

3.1 Mikroklima lesa **15**

3.1.1 Topografie a struktura lesa jako ovlivňující faktory mikroklimatu 15

3.1.1.1 Struktura lesa 15

3.1.1.2 Topografie stanoviště 17

3.1.2 Limitující faktory měření mikroklima 18

3.2 Boreální les **19**

3.2.1 Charakteristika dřevin boreálního lesa ve Finsku 20

3.3 Vliv globální změny klimatu na boreální lesy **21**

3.4 Projekt FunDivEUROPE **22**

4 Metodika **24**

4.1 Přírodní poměry **24**

4.2 Zkusné plochy **29**

4.3 Měřicí čidla **32**

4.4 Průběh stahování dat **33**

4.5 Zpracování dat **34**

5 Výsledky **36**

5.1 Půdní teplota T1 ..... **36**

5.2 Půdní teplota T2 ..... **37**

5.3 Teplota vzduchu T3 ..... **39**

5.4 Půdní vlhkost **42**

5.5 Struktura lesních porostů a jejich vztah s mikroklimatem **45**

5.5.1 Půdní vlhkost 45

5.5.2 Teplota T1, T2, T3 47

6 Diskuse **48**

6.1 Půdní teplota **48**

6.2 Teplota vzduchu **49**

6.3 Půdní vlhkost **50**

6.4 Struktura lesních porostů a jejich vztah s mikroklimatem **51**

7 Závěr **52**

8 Literatura **54**

1 Úvod

Mikroklima lesů se může jevit, z hlediska velikosti, jako zanedbatelný činitel. Přesto zájem o prozkoumávání této oblasti je v posledních letech na vzestupu (de Frenne et al. 2021). Tento narůstající trend byl podpořen zejména s nastávajícími globálními změnami klimatu, kdy vystupuje do popředí hlavní otázka, a to do jaké míry je mikroklima lesů schopno ovlivnit oteplování makroklimatu a na opak (de Frenne et al. 2021; Zellweger et al. 2020).

Jak se prokázalo, v lesním porostu vzniká unikátní mikroklima, které se vytváří na základě struktur a vlastností porostu (Aussenac 2000). I přesto, že mimo lesní porost mohou panovat vysoké denní teploty během léta či silné mrazy během zimních měsíců, v lesních porostech můžeme pozorovat mírnější výkyvy a menší extrémy mezi teplotami i vzdušnou vlhkostí (Zellweger et al. 2020; de Frenne et al. 2019). V případě přívětivého počasí bez povětrnostních vlivů, mají mírnější klimatické podmínky tendenci rozšiřovat se do širšího okolí lesního porostu (Litschmann a Hadaš 2003), čímž se mikroklima stává nadějným nástrojem v podpoře zpomalování globální změně klimatu (Zellweger et al. 2020).

Detailní porozumění, jak jednotlivé lesní faktory mění mikroklimat je nutným krokem pro chápání rozsahu ovlivňování lesního mikroklima makroklimatem (de Frenne et al. 2021a). V odborné literatuře můžeme najít různou řadu článků zabývající se problematikou do jaké míry má struktura lesa vliv na mikroklima (Gilbert et al. 2022; Vanwalleghem a Meentemeyer 2009; Aussenac 2000; Gholz et al. 1990), avšak je stále nedostatečné množství empirických dat zaměřujících se detailněji na jednotlivé druhy dřevin a jejich impaktu na okolní klima. A to nejen z důvodu zodpovězení otázek ohledně zmírňování nynějších změn klimatu. Mikroklimat hraje důležitou roli také v jiných odvětvích vedle ekologických oborů zabývajících se změnou klimatu.

Specifické mikroklima úzce ovlivňuje a souvisí s výskytem flory a fauny na témže místě (Aussenac 2000). Schopnost stromů zmírňovat extrémní teploty je hojně využívaná v městském prostředí (Edmondson et al. 2016). Vhodné lesní klimatické podmínky mohou mít pozitivní vliv fotosyntézu a transpiraci, a s tím související růst dřevní hmoty (Meier a Leuschner 2008). Tato data mají důležitou roli také v oborech kulturních a ekonomických, a zejména důležitá jsou pro správný vývoj a přizpůsobování odvětví lesního hospodářství nově nastávajícím klimatickým podmínkám (Schmitt et al. 2004).

Tato diplomová práce se zaobírá empirickými daty ohledně vlivu různých směsí stromových druhů na mikroklima, a to se zaměřením na lokalitu boreálních lesů. Výzkum je aplikován na 3 druhy stromů, a to jehličnany smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a jeden listnatý druh bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth). Tyto druhy jsou jedny z nejtypičtěji se vyskytujících druhů v boreálních oblastech po celém světě. Aktuální rozloha boreálních lesů, která se nyní pohybuje okolo 27 % ukazuje, že boreální porosty jsou druhou největší lesní oblastí světa (FAO a UNEP 2020). To může přidávat této diplomové práci na důležitosti, co se možnosti využití výsledků týče. Výzkumem prováděným v rámci této diplomové práce jsou zprostředkována nová empirická data k jednotlivým druhům dřevin, i jejich možným kombinacím získanými na 28 zkusných plochách, které byly vybrány na základě přísných kritérií projektu FunDivEUROPE.

2 Cíl práce

Tato diplomová práce má za cíl zjistit, jak jednotlivé druhové směsi dřevin a struktura těchto porostů ovlivňují mikroklima lesů, které jsou situovány v boreálních lesích ve východním Finsku. Tento cíl byl objasňován na následujících 3 druzích dřevin: smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth), které byly pozorovány v 7 odlišných druhových kombinacích, a to jednak monokulturní porosty, dále dvou druhové směsi lesů smrk-borovice, smrk-bříza, borovice-bříza, a také les smíšený se všemi třemi druhy smrk-borovice-bříza.

Dílčí cíle práce byly pak následovné. Zjistit, jaké mikroklimatické podmínky panují v jednotlivých kombinacích a monokulturách, a to pomocí 3 zkoumaných faktorů: teplota vzduchu (ve výšce 50 cm nad povrchem půdy), 2 odlišné teploty půdy (2 a 10 cm pod povrchem půdy) a objemová půdní vlhkost (v hloubce 10 cm svrchní vrstvy půdy). Ověřit do jaké míry dochází k podobnosti kolísání zjištěných dat u pozorovaných faktorů v průběhu roku mezi jednotlivými typy druhových směsí a monokultur a zaměřit se na možné faktory, které by potenciálně mohly způsobit odlišná výsledná data jednotlivých ploch. Dále vyhodnotit strukturu porostu na jednotlivých plochách, pomocí naměřených hodnot indexu listové plochy a stromové pokryvnosti a využitím regresní funkce ověřit závislost naměřených mikroklimatických dat na indexu listové plochy a stromové pokryvnosti.

Pro ověření zmíněných cílů bude využito celkem 28 výzkumných ploch ve východním Finsku, které vznikly jako součást projektu FunDivEUROPE. Na každé ploše budou data získávána pomocí mikroklimatických čidel, které na ploše byla instalována v roce 2019 a od téhož roku byla k dispozici data pro tuto diplomovou práci.

3 Literární rešerše

3.1 Mikroklima lesa

Mikroklima je označováno jako klima nacházející se u povrchu země (Rosenberg et al. 1983). U zemského povrchu dochází k menšímu proudění vzduchu, čímž se vytváří specifické mikroklimatické podmínky, s minimálním narušováním slunečního záření (Monin a Obukhov 1954). Klima je v takovém prostředí ovlivněno zejména typem povrchu, od kterého se sluneční záření odráží (Monin a Obukhov 1954).

V lesních porostech, kde se lesním opadem a flórou vytváří zvýšená heterogenita zemského povrchu, vznikají v rámci mikroklimatu variabilnější teplotní a vlhkostní poměry (Monin a Obukhov 1954). Prouděním vzduchu, které je v lesním porostu významně ovlivněno stavební strukturou lesa (Aussenac 2000) se zmenšuje vliv odrazu slunečního záření od povrchu země a současně se také zmenšuje vertikální velikost mikroklimatu (Holmes a Nelson Dingle 1965). Velikost mikroklimatu, jak vertikální, tak horizontální, úzce souvisí s povětrnostními podmínky (Holmes a Nelson Dingle 1965). Velikost vertikální je obzvláště závislá na prostředí, ve kterém je měřena. Porostní výška porostu, či pokud je mikroklimat měřen na nezalesněné ploše, tak výška travin, udává primární vertikální velikost mikroklimatu. Rozměry se tak mohou pohybovat v řádu několika metrů, ale také pouze několik centimetrů. (Holmes a Nelson Dingle 1965).

3.1.1 Topografie a struktura lesa jako ovlivňující faktory mikroklimatu

3.1.1.1 Struktura lesa

Struktura lesních ekosystémů je jedním z hlavních faktorů tvořících lesní mikroklima. Veškeré strukturální změny v porostu, ať již se jedná o zásahy člověkem v rámci hospodaření (probírka, těžba) či o přirozené změny (vývraty, zlomy stromů), ovlivňují proudění větru, teplotní podmínky i vlhkost mikroklimatu (Aussenac 2000; Forman a Godron 1986). Tyto změny také ovlivňují organismy žijící v těchto mikroklimatických podmínkách (Baker et al. 2014). Korunový zápoj, věk porostu a index listové pokryvnosti jsou nejvíce zmiňované faktory ovlivňující mikroklima lesa (Gilbert et al. 2022; Lindenmayer et al. 2022; Aussenac 2000; Vanwalleghem a Meentemeyer 2009).

3.1.1.1.1 Korunový zápoj

Korunový zápoj porostu je převážně kladně spojován se stabilizací teplotních poměrů v porostu, jelikož v případě vysokého stupně zápoje dochází k menším teplotním výkyvům, a to jak v nejchladnějších, tak i nejteplejších dnech. Teploty jsou také vyrovnanější v průběhu celého roku (Gilbert et al. 2022; Lindenmayer et al. 2022; Aussenac 2000). Zápoj také ovlivňuje vlhkostní půdní podmínky, stín korunovým zápojem snižuje množství evapotranspirace a zmírňuje tím vysýchání půdy (Aalto et al. 2013). Tyto změny tak mohou působit tlumivým efektem na oteplování makroklimatu (de Frenne et al. 2013).

3.1.1.1.2 Index listové plochy

Index listové plochy (LAI z anglické zkratky Leaf Area Index), je nejčastěji definován jako poměr celkové listové plochy na velikost povrchu (Chen a Black 1992). LAI nesouvisí jen se stupněm zápoje, ale především s druhovou strukturou lesa. LAI se totiž v převážné většině výrazně liší pro jehličnaté a listnaté porosty z důvodu hustějšího olistění u jehličnatých stromů (Teske a Thistle 2004). Teske a Thistle (2004) se pokusili zobecnit hodnotu LAI pro jehličnaté a listnaté porosty a výsledkem bylo zjištění, že LAI je téměř dvakrát vyšší u jehličnatých porostů než u listnatých.

Listová plocha, jakožto jeden z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících biogeochemické procesy porostů (Meier a Leuschner 2008), má hlavní podíl na zadržování a přijímání srážek a svou velikostí přímo ovlivňuje velikost transpirační plochy, čímž ovlivňuje vodní bilanci prostředí, a tudíž i mikroklima (Gholz et al. 1990). Velikost LAI je závislá na zásobě vody, v případě jejího nedostatku se listová plocha úměrně zmenšuje pro zabránění nadbytečné transpiraci rostlin (Grier a Running 1977). Velikost LAI tak odráží vodní poměry stanoviště, a zároveň charakterizuje i zdravotní stav stromů v porostu.

Von Arx et al. (2013) se ve svém výzkumu podrobněji zabývali, jaký vliv má LAI porostu na okolní prostředí bez zápoje a zda půdní vlhkost tyto vlivy nějak ovlivňuje. Na celkem 11 zkusných plochách bylo změřeno LAI a následně byly plochy rozděleny do dvou skupin, a to na porosty s nízkým LAI odpovídajícím pod hodnotou 4, kterým se rozumí porost s řídkým zápojem, a na porosty s vysokým LAI nad hodnotou 4 se zápojem hustým. Měřením na těchto porostech bylo zjištěno, že u porostů s hustým zápojem, a tedy vysokým LAI

dochází k vyšším změnám mezi denními teploty porostu a okolí. Naopak ke klesání změn v denních teplotách docházelo v porostech s nižším LAI. Tyto porosty pak také vykazovaly větší citlivost na půdní vlhkost. V letních měsících se denní teploty mikroklimatu porostu s nízkým LAI odchylovaly od okolního prostředí rozdílem kolem 1,3 °C při vysoké půdní vlhkosti, zatímco při snížení půdní vlhkosti porostní mikroklima vykazovalo rozdíly pouze o cca 0,1 °C. Tím se markantně odlišovalo od porostů s vysokým LAI, kde se rozdíly teplot při odlišných půdních podmínkách lišily pouze o 0,5 °C. V obou případech ovšem byla potvrzena závislost půdní vlhkosti porostů na vliv LAI na teplotu okolního prostředí. Tento fenomén byl pozorován silnější v letních a jarních měsících a slabý zejména v podzimním období.

Výzkumem tak byl potvrzen vztah LAI s vodním režimem lesních porostů. Porosty s vysokým LAI využívají více půdní vody z důvodů zvýšené transpirace, než je tomu u porostů s nízkým LAI, kde tento trend není tak významný (Scharenbroch a Bockheim 2007; Aussenac 2000).

3.1.1.1.3 Věk

Věk porostu je zmiňován převážně ve spojení s korunovým zápojem, kde vyšší věk koreluje s vyšším stupněm zápoje. Tyto faktory opět vedou ke stabilnějším teplotním podmínkám v porostu po celý rok (Lindenmayer et al. 2022). Vliv přirozené sukcese či antropogenní zásahy na porost, a tím i na mikroklima, se nejvýznamněji projeví u lesů s vysokými hodnotami atributů vegetačního zápoje a velikosti LAI (Aussenac 2000). Aussenac (2000) ve své práci charakterizuje porost s největší schopností ovlivnit mikroklimat jako dospělý listnatý porost s uzavřeným korunovým zápojem a vysokým indexem listové pokryvnosti.

3.1.1.2 Topografie stanoviště

Kromě stavební struktury porostu, existují další faktory ovlivňující mikroklima. Vanwalleghem a Meentemeyer (2009) ve své práci zkoumali fyziografické (nadmořská výška, potenciální sluneční záření vzhledem k úhlu slunečního osvětlení a sklonu terénu, vlhkostní index, vzdálenost porostu od pobřeží) a ekologické proměnné (vzdálenost od okraje lesa, rozloha, stromová četnost ve

smyslu DBH a zastínění porostu). Jako nejvíce ovlivňující faktor teploty vzduchu se ve výzkumu projevila rozloha lesa a jako druhý nejdůležitější faktor nadmořská výška. Stejné pravidlo se ovšem nepotvrdilo pro půdní teplotu, kde vliv nadmořské výšky byl převážně negativní. Výsledky výzkumu poukázaly na fakt, že veškeré zkoumané fyziografické a ekologické faktory jsou důležitými proměnnými utvářejícími mikroklima v porostu a i přesto, že se určité proměnné ukázaly jako vlivnější predikátory, nelze je označit za dostatečné ukazatele vývoje mikroklimatu a pro predikci mikroklimatu brát v potaz veškeré faktory charakterizující lesní porost. Chen et al. (1999), kteří také zkoumali topografické proměnné a jejich vliv na mikroklima, zmiňují v diskuzi podobný závěr.

3.1.2 Limitující faktory měření mikroklima

Maclean et al. (2021) se ve svém výzkumu zabývali riziky při měření mikroklimatu, a to zejména měření teplot v porostu. Stejně jako může docházet k chybám při měření teplot vzduchu z důvodu například slunečního ozáření teploměru, podobné faktory se mohou vyskytovat při datovém analyzování mikroklimatu v lesních porostech.

Jako faktory s největším impaktem na chybu měření označují Maclean at al. (2021) sluneční záření a povětrnostní podmínky. Teploty měřené těsně nad zemským povrchem jsou silně ovlivňovány typem povrchu, u kterého se mikroklimatické čidlo nachází. Tento fenomén je zapříčiněn zpomaleným větrným prouděním u povrchu země (Monin a Obukhov 1954). Druhým aspektem při měření je, jak již bylo zmíněno, sluneční záření, které může způsobit zahřátí povrchu teploměru a tím data ovlivnit. Z tohoto důvodu někteří výrobci mikroklimatických čidel zakomponovali do jejich produktů ochranné stínění. To ale přináší další úskalí, a to ovlivňováním povětrnostních podmínek oproti panujícím v okolí.

V případě měření makroklimatických teplot se omezení větru v okolí teploměru nestává tak velkým problémem jako u mikroklimatu, a to z důvodu citlivosti a variability mikroklimatu v závislosti na povětrnostních podmínkách.

3.2 Boreální les

Boreální les spadá do boreální klimatické oblasti světa, která je v pořadí druhá z pěti největších na světě, co se rozlohy týká. Boreální klimatická oblast se rozkládá na 27 % světa (FAO a UNEP 2020). Tento areál se rozléhá kolem cirkumpolárního pásu od 50° do 70° severních šířek severní polokoule v oblastech Eurasie a Severní Ameriky (Podrázský 2014; Apps et al. 1993). Boreální lesy se nachází v klimaticky mrazivých podmínkách, průměrné roční teploty se pohybují v rozmezí -5 až 3 °C, převažují zde dlouhé suché chladné zimy, naopak v letních měsících, kdy jsou teploty mírnější, množství srážek odpovídá více než polovině ročního průměru úhrnu srážek (Podrázský 2014; Bonan a Shugart 1989). Přesto, že je celkový roční úhrn srážek v boreálních oblastech relativně nízký, dochází zde k zamokření či rašelinění půdy z důvodu nízkého výparu (Podrázský 2014).

Nízké průměrné roční teploty s krátkou dobou světelného záření v zimních měsících mají významný vliv na délku vegetačního období, která je v boreálních oblastech z tohoto důvodu zkrácená (Schmitt et al. 2004). V nejsevernějších podmínkách boreálního lesa je hraniční teplotou pro růst stromů 5 °C, což odpovídá přibližně 3 měsícům, oproti tomu v jižnějších polohách se vegetační doba může v závislosti na průměrných denních teplotách prodloužit až na 5 měsíců (Laurila et al. 1996). Flóra se na kratší vegetační období dokázala přizpůsobit a lze u ní pozorovat změny v morfologii(Hurme et al. 1997), u stromů jsou tyto změny nejpatrněji pozorovatelné v radiální růstu (Schmitt et al. 2004).

Boreální lesy tvoří převážně jehličnaté dřeviny společně s menšinovým zastoupením listnatých druhů, mezi typické druhy patří: smrk ztepilý (*Picea abies (L.) H. Karst*), borovice lesní (*Pinus sylvestris L.*), jedle (*Abies sp.*) a modřín (*Larix sp.*), z opadavých druhů se v hojném, ale nekonkurujícím zastoupení vyskytují různé druhy topolů, zejména pak topol balzámový (*Populus balsamifera L.*), břízy (*Betula sp.*) (Kayes a Mallik 2020). I přes nižší zastoupení listnatých dřevin je možné najít oblasti s jejich převážným zastoupením, a to zejména v jižnějších částech boreálních oblastí, kde převládá mírnější klima s relativně teplejším klimatem. V těchto oblastech je možné zahlédnout také druhy javorů (*Acer sp.*) či dubů (*Quercus sp.*) (James Arthur Larsen 1980).

3.2.1 Charakteristika dřevin boreálního lesa ve Finsku

Pro posouzení mikroklimatických rozdílu v porostech s odlišnými druhovými směsi je nejen důležité, jakou strukturu lesa jednotlivé směsi stromů vytváří, ale také jaké jsou vlastnosti těchto druhů stromů. Je známo, že druhy stromů mají například odlišný vliv na teplotu půdy, která pak ovlivňuje další procesy jako je transpirace (Jonczak et al. 2020; Aussenac 2000). V kapitole *2.1.1 Topografie a struktura lesa jako ovlivňující faktory mikroklimatu* byly zmíněny faktory, tvořící mikroklima, vztahující se k lesnímu porostu jako celku. Pro posouzení mikroklimatu je ovšem důležité neopomínat odlišné vlastnosti a anatomické struktury zkoumaných druhů stromů a jejich schopnost vlivu na prostředí. Odlišení impaktů jednotlivých faktorů není jednoduché, a proto se upřednostňuje chápat porost jako celek, ovšem detailní rozdíly mohou pomoci pro lepší pochopení vlivu porostu na mikroklimat.

Typické dřeviny evropského boreálního lesa se příliš neliší od již zmíněných nejčastějších dřevin boreálních oblastí světa. Tato diplomová práce se zaměřuje na 3 druhy, a to smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.), borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.) a břízu bělokorou (*Betula pendula* Roth).

Smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.) je polostinná dřevina s vyššími nároky na vlhkost vzduchu a půdy, preferující spíše chladné počasí, čímž se prokazuje, proč je nejzastoupenějším druhem (68 %) stromů Finska (Kulju et al. 2023). Horizontální kořenový systém s kotevní charakterem se nachází převážně v horních vrstvách půdy, menší podíl (kolem 15 %) zasahuje do hloubky až 50 cm pod povrchem (Puhe 2003). Rozmístěním kořenů u povrchu země vyžaduje smrk dostatečnou vlhkost půdy ve svrchních vrstvách.

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), která je druhým nejzastoupenějším druhem finských lesů, je polostinná dřevina s vyšší odolností vůči obdobím sucha. Kořenový systém je hluboký s kulovým charakterem (Pejchal a Mauer 2013), což umožňuje borovici čerpat vodu i z nižších půdních vrstev. Borovice roste převážně v typickém spojení s brusnicí borůvkou (*Vaccinium myrtillus*) a brusnicí brusinkou (*Vaccinium vitis-idaea)* (Archibold 2012).

Bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth) je světlomilná dřevina s mělkým kořenovým systémem s charakterem srdčitého až kulovitého (Pejchal a Mauer 2013). Bříza je známá především pro své pionýrské vlastnosti, které mají

především silný impakt na půdní vrstvu. I přesto, že bříza dosahuje obecně poměrně nízkých hodnot LAI, březové porosty mají stále svůj podíl na utváření mikroklima (Jonczak et al. 2020).

3.3 Vliv globální změny klimatu na boreální lesy

Boreální les jako jeden z největších lesních biomů země nabízí spoustu příležitostí pro využití lidmi a výrazné změny lesních porostů by tak měly dopad na velkou část přidružených činností, které jsou na boreální lesy závislé. Přibližně dvě třetiny těchto lesů jsou využívány na produkci dřeva, ale také k rekreaci, lovení divoké zvěře či k rybaření, jelikož se zde nachází nejvíce povrchových vodních ploch ze všech biomů (Gauthier et al. 2015). Lesní porosty nevyužívající se k ekonomickým účelům, nepočítaje národní parky a chráněná území, jsou z velké části pokryty permafrostem (Gauthier et al. 2015).

Lze předpokládat, že ve vyšších a mírných zeměpisných šířkách, a tedy i v oblasti boreálních lesů, dojde k většímu oteplení oproti zbylému světu (Saxe et al. 2001). Mohou za to emise skleníkových plynů, které mohou zvýšit průměrnou teplotu povrchu půdy o 3–6 °C (Saxe et al. 2001). Změna klimatu přináší pro lesní porosty nové výzvy, které mohou způsobit oslabení a náchylnost porostu pro sekundární škůdce. Výzkumy zaměřující se na tuto problematiku v boreální lesích se shodují, že jiné klimatické podmínky mohou přinést pro tuto oblast jak negativní, tak i pozitivní změny (Kellomäki et al. 2008; D'Orangeville et al. 2018; Subramanian et al. 2015).

D'Orangeville et al. (2018) ve svém výzkumu použili 2 modely pro posouzení růstu a zranitelnosti stromů na základě historických růstových záznamů 7 druhů stromů nacházejících se na boreálních oblastech jižní Kanady v letech 1985–2005 v závislosti na 2 proměnných faktorech – navýšení maximální denní teploty a potenciální míra evapotranspirace, kterými byly simulovány hypoteticky možné změny klimatu. Výsledná data ukázala, že pro většinu druhů bylo zásadním problémem omezení vody, kvůli kterému se dřeviny stávaly choulostivějšími na zvyšující se teploty vzduchu. K opačným výsledkům docházelo v chladných oblastech, kde vyšší denní teploty a omezená dostupnost vody přinášela pozitiva v podobě navýšení přírůstu dřevní hmoty. Při hodnocení modelů v závislosti na zvyšující se maximální denní teplotě v rozpětí hodnot 1–4 °C docházelo obecně k pozitivním reakcím u zvýšené teploty o 1–2 °C, růst

dřevin byl vyšší a zmírnil se výskyt vad způsobených mrazem. Naopak k negativním výsledkům docházelo při zvýšení teploty o 3–4 °C, kde se nárůst dřevní hmoty v těchto podmínkách snižoval.

Změna klimatu dává příležitost pěstování nových druhů s větší tolerancí k vyšším teplotám a je také známa schopnost adaptace dřevin na nové podmínky, avšak doba adaptace a rozšiřování druhů je určována jako nedostačující k rychlosti nastávající změny klimatu (Zhu et al. 2012). Subramanian et al. (2015) ve svém článku vidí příležitost pro zvýšení rezistence a resilience lesních porostů v přizpůsobení lesního hospodářstvím novým klimatickým podmínkám a v zamezení naopak zásahům, které porosty oslabují. Mezi příkladné opatření patří omezení výrazných probírek u smrkových porostů pro zamezení šíření hub způsobující kořenové hniloby. Se změnou klimatu se předpovídá také nárůst bouří a s nimi spojené škody na porostech. Pro zamezení zlomů a vývrtů Subramanian et al. (2015) ve svém článku doporučují zkrácení doby obmýtí, aby se zajistila stabilita porostní výšky.

3.4 Projekt FunDivEUROPE

Se zvyšujícím se zájmem o lesní biodiverzitu a impaktu na další funkce lesa, se zvyšuje také náročnost na odběr zkoumaných dat pro zajištění neovlivněných a nezkreslených dat okolními faktory, které nejsou hlavními zájmy výzkumů. Nejčastěji se výzkumy potýkaly s problémy komplexnosti a velikosti výzkumu, kdy z tohoto důvodu jeden zkoumaný faktor byl zvýhodňován oproti jiným nebo výzkum nedosahoval rozsahu, který je potřebný pro zkoumání multifunkčního ekosystému. Pro vylepšení nastalých problémů při výzkumech tohoto zaměření se zabývá jedna z částí projektu FunDivEUROPE (Baeten et al. 2013).

Projekt byl založen v říjnu roku 2010 za spolupráce 24 partnerských univerzit z 15 zemí. Koordinátorem projektu je německá univerzita Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Projekt je rozdělen celkem na 7 pracovních modulů, jejichž výzkum se odehrává na 4 různých platformách, z toho 3 jsou vědecké a 1 založená na rozšiřování nových poznatků a vědomostí. Vědecké platformy jsou pak experimentální, průzkumné a inventarizační (Project FunDiveEurope 2010). Z toho tato diplomová práce využívá již založené plochy v rámci průzkumné platformy.

Pro účely této platformy byla vytvořena rozsáhlá síť zkusných ploch ve vzrostlých lesích s hlavním účelem ověřování biodiverzity lesů a jejich vliv na funkce lesa a blízké

okolí porostu. Síť ploch se nachází celkem v 6 zemích (Finsko, Polsko, Německo, Rumunsko, Itálie, Španělsko), jež souhrnně čítají 209 trvalých zkusných ploch, z nich 28 se nachází ve Finsku a byly využity právě pro účely této diplomové práce. Plochy jsou navrhnuty způsobem, aby zahrnuly 6 hlavních evropských typů lesů, a to boreální ve Finsku, hemiboreální jehličnaté a smíšené lesy v Polsku, bukové porosty v Německu, horské bučiny v Rumunsku, teplomilné listnaté porosty v Itálii a středomořské smíšené porosty ve Španělsku. Lesní porosty, ve kterých se zkusné plochy nachází, jsou ve všech zemích ve vlastnictví státu, až na výjimku Finska, kde se plochy nachází také na porostech ve vlastnictvím velkých soukromých lesnických firem (Baeten Lander 2010). Ve všech případech se jedná o lesy hospodářské. Podrobný popis procesu vybírání vhodných ploch a jednotlivá kritéria je rozepsán v kapitole 4 Metodika – 4.2 Zkusné plochy.

4 Metodika

Výzkum probíhal na 28 zkusných plochách patřících do sítě výzkumných ploch po celé Evropě, které jsou v kompetenci projektu FunDivEUROPE (Baeten et al. 2013). Tento projekt byl založen v roce 2012 finským institutem Natural resources institute Finland (LUKE), v jehož spolupráci výzkum probíhal. Plochy jsou situovány ve východním Finsku, v provincii Severní Karélie, v okolí města Joensuu, které obklopují lesy boreálního typu. Joensuu je lesnictvím velmi proslulé, nachází se tu lesnická univerzita University of Eastern Finland a sídlí tu dokonce i Evropský lesnický institut, díky tomu si město vysloužilo přezdívku „Hlavní město lesnictví v Evropě“.

Sběr mikroklimatických dat na plochách je prováděn pomocí mikroklimatického měření, které bylo započato již na jaře roku 2017, kdy se na zkusných plochách instalovala měřicí zařízení TMS-4 (viz. kapitola měřicí čidla). Data jsou stahována pravidelně v podzimním, případně i jarním, období, kdy jsou všechna čidla také zkontrolována a v případě potřeby opravena či nahrazena novými.

4.1 Přírodní poměry

Celkem 28 zkusných ploch, na kterých se studie prováděla, se nachází v boreálních lesích východního Finska. Jsou rozprostřena v okolí města Joensuu (Obr. 5), na ploše o rozloze 1600 km^2.

Klimatické podmínky panující v této oblasti jsou typicky chladné. Průměrná roční teplota je 2,1 ° C a průměrné roční srážky se pohybují kolem 700 mm (Grossiord et al. 2014).

Zimní měsíce přináší v oblasti Joensuu denní teploty pohybující se v průměru pod bodem mrazu, výjimečně teploty vystoupají do kladných hodnot. Zima začíná v severních oblastech v polovině října odkud se zimní počasí postupem času posouvá směrem na jih a v nejjižnějších částech Finska se zimní počasí projevuje až po dvou měsících. Vzhledem k poloze zkusných ploch tohoto výzkumu se dá odhadnout, že pravá zima obvykle nastupuje v období listopadu. Dle přiložené tabulky (Obr. 4) lze vyčíst, že průměrné zimní teploty se pohybují kolem -11 °C až 0 °C. Trvání zimy se odhaduje mezi 100 až 200 dny, čímž dosahuje největší délky ze všech ročních období (FMI 2023).

Jarní období se pohybuje v měsících duben až květen s opět rozdílným začátkem v závislosti na zeměpisné šířce místa ve Finsku. Oproti zimě jaro začíná jako první

v jižních oblastech a pomalu postupuje na sever (FMI 2023). Jarní teploty se pohybují mezi 0 °C až 10 °C. Sněhová pokrývka roztává rychleji na otevřených prostranstvích, v lesích sníh roztává pomaleji Finský meteorologický institut (FMI 2023) udává dobu až 4 týdny po začátku jara. Přehled jarního počasí měřeného v okolí výzkumu je opět k nalezení v přiložené tabulce níže (Obr.4). Podobné teplotní podmínky panují také v podzimním období, které začíná od konce srpna či září v závislosti na poloze (FMI 2023).

Průměrní denní letní teploty se obecně pohybují vždy nad 10 °C a ojediněle přesahují hranici 30 °C. Avšak v městě Joensuu bylo v historii již naměřeno i 37 °C (FMI 2023). V letním období stoupají také srážky, které dosahují až 2x většího objemu než v jiných měsících (Obr. 4).

Také vegetace odpovídá boreálním lesům, na plochách se nacházely typické rostliny jako brusnice borůvka či brusnice brusinka, stromové zástupce tvořil smrk ztepilý, borovice lesní a bříza bělokorá. Pro lepší představu je prostředí zkusných ploch zachyceno na přiložených fotografiích (Obr. 1, 2, 3). Lesy, ve kterých se nacházejí plochy, jsou uměle vysazeny a jedná se tedy o hospodářské lesy.

Obrázek 1. Fotografie pořízená na zkusné ploše jedno druhové porostní směsi břízy. V dolní části je viditelné mikroklimatické čidlo TMS-4.

Obrázek 2. Fotografie pořízená na zkusné ploše číslo 20 s dvou druhovou porostní směsí smrk – bříza.

Obrázek 3. Fotografie pořízená na zkusné ploše číslo 18 s jedno druhovou porostní směsí smrku.

Rok	Měsíc	Měsíční souhrn srážek (mm)	Průměrná měsíční teplota (°C)
2017	11	58.7	0.3
2017	12	85.8	-1.3
2018	1	44.8	-4.9
2018	2	10.7	-11.2
2018	3	39.6	-8.5
2018	4	38.2	2.2
2018	5	24.3	12.7
2018	6	48.3	13.8
2018	7	57.7	19.7
2018	8	75.8	16.9
2018	9	93.9	11.5
2018	10	48.4	4.3
2018	11	16.4	1.1
2018	12	45.3	-5.5
2019	1	48.6	-11.4
2019	2	47.1	-4.9
2019	3	48.2	-2.5
2019	4	15.5	3.4
2019	5	82.3	8.9
2019	6	100.2	16.3
2019	7	45.2	14.9
2019	8	38.3	14.5
2019	9	57.9	9.9
2019	10	104.9	2.6
2019	11	66.6	-0.8
2019	12	67.9	-1.2
2020	1	38.8	-2
2020	2	45.6	-2.9
2020	3	39.5	-1.1
2020	4	27.2	1.1
2020	5	28.7	8.3
2020	6	62.1	17
2020	7	115.9	16.2
2020	8	83.6	15.1
2020	9	-	-
2020	10	-	-
2020	11	46.2	1.9
2020	12	37.2	-2.1
2021	1	57.9	-8.1
2021	2	44.4	-12.7
2021	3	31.5	-4.2
2021	4	-	-
2021	6	-	-
2021	7	57.5	20.1
2021	8	115.5	15
2021	9	50.5	7.5
2021	10	73.4	6.4
2021	11	55.2	-0.6
2021	12	36.9	-9.8
2022	1	55.7	-8
2022	2	61.9	-4.7
2022	3	20.6	-3.2
2022	4	15.7	1.4
2022	5	23.3	8.3
2022	6	85.9	15.7
2022	7	129.1	18.3
2022	8	34	17.6
2022	9	27	8.7
2022	10	48.9	5.9
2022	11	52.5	-1.2
2022	12	53.3	-5

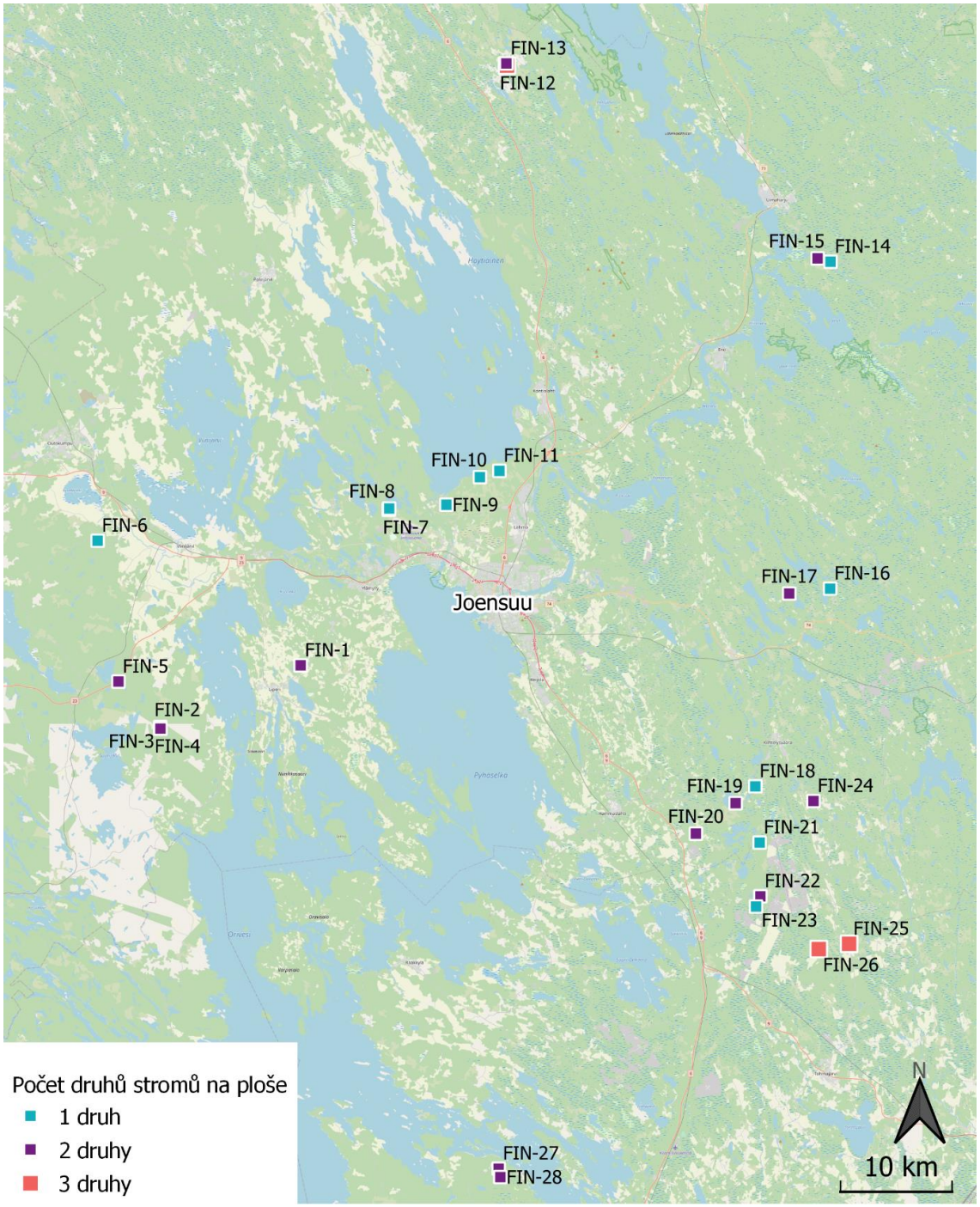
Obrázek 4. Přehled měsíčních průměrných teplot a měsíčního úhrnu srážek měřený meteorologickou stanicí v Joensuu Linnunlahti, v odpovídajícímu časovému období, pro které se zpracovávaly výsledky práce, a to od roku 2017 do prosince 2022. Data byla stažena z Finského meteorologického institutu: Finnish Meteorological Institute (ilmatieteenlaitos.fi).

4.2 Zkusné plochy

Pro výzkum byly využity již existující zkusné plochy, které jsou v kompetenci projektu FunDivEUROPE. Pro účely tohoto projektu se vytvořila rozsáhlá sít výzkumných ploch v rámci více zemí, jež se vybíraly na základě předem stanovených kritériích s pevně danou velikostí 30 x 30 m. Tato kritéria se dají pomyslně rozdělit na dvě hlavní podmínky, čímž je rovnoměrnost zastoupení pozorovaných dřevin a minimalizace rušivých faktorů (Baeten et al. 2013). Rovnoměrnost byla definována výčetní základnou, která měla být co možná nejvyrovnanější mezi jednotlivými přítomnými druhy. Plochy s příliš lišící se velikostí výčetní základny byly vyřazeny. Dále v pozorovaném úseku nemohlo být příliš mnoho necílových dřevin. Zastoupení těchto dřevin bylo stanoveno na maximální hranici 10 %, ovšem primárně byly vyhledávány plochy se zastoupením necílových dřevin do 5 %. Každá pozorovaná dřevina musela být zastoupena v minimálně třech monokulturních lesích, v třech smíšených lesích s dvou druhovou kombinací a ve třech smíšených lesích s tří druhovou kombinací. Pro minimalizování rušivých faktorů, které by případně v budoucnu mohly ovlivnit výsledná data, se vybírala místa s podobnými pedologickými podmínky se zaměřením na hloubku půdy a její sklon, a klimatickými podmínkami, a to zejména vyrovnaná nadmořská výška u všech ploch. Dále stromy musely být v podobném věku, jako akceptovatelné se považovaly porosty s dospívající a vyspělou kmenovinou s vytvářejícím plným zápojem (Baeten et al. 2013).

Takovýto výběr zkusných ploch je příhodný pro účely této diplomové práce z hlediska omezení potenciálních rušivých elementů zkusných ploch, které by mohly ovlivnit výsledná data a zkreslovat tak závěry mezi jednotlivými druhovými porostními směsmi.

V roce 2017 bylo na 28 zkusných plochách nainstalováno, do přibližného středu, jedno měřící čidlo TMS- 4 rozlišující se identifikačním číslem (Obr. 6). Tyto plochy jsou zvýrazněny na přiložené mapě (Obr. 5), kde jsou barevně odlišeny v závislosti na druhové kombinaci.



Obrázek 5. Mapa zobrazující umístění zkusných ploch s pojmenováním pod oficiálním označením. Plochy jsou barevně označeny v závislosti na druhové kombinaci, která se na vybrané ploše vyskytuje. Mapa byla vytvořena v software QGIS.

Plocha	ID čidla	Nadmořská výška (m n. m.)	Počet druhů na ploše	Dřevinná skladba	LAI	Pokryvnost (%)
FIN01	94178235	87	2	smrk-borovice	2.5	72.9
FIN02	94178227	138	2	smrk-bříza	1.7204	62.4
FIN03	94178234	139	2	smrk-bříza	1.8751	64.2
FIN04	94178226	138	2	smrk-bříza	2.5182	69.4
FIN05	92178543	114	2	borovice-bříza	1.453	52.8
FIN06	94178249	112	1	smr	2.456	72.8
FIN07	94178224	120	1	bříza	1.7595	63.8
FIN08	94178239	120	1	bříza	1.366	59.6
FIN09	94178242	119	1	borovice	1.987	66.8
FIN10	94178228	134	1	smrk	2.134	75.3
FIN11	94178256	124	1	bříza	0.9881	46.5
FIN12	94178250	233	3	borovice-smrk-bříza	1.813	59.7
FIN13	94178225	219	2	borovice-bříza	1.0814	44.3
FIN14	94178243	101	1	borovice	1.89	69.2
FIN15	94178223	97	2	borovice-bříza	1.1375	49.2
FIN16	94178260	143	1	borovice	2.876	71.8
FIN17	94178231	139	2	smrk-borovice	2.235	71.2
FIN18	94178251	110	1	smrk	2.793	76.3
FIN19	94178244	130	2	smrk-borovice	2.283	68.8
FIN20	94178229	119	2	smrk-bříza	1.9428	69.1
FIN21	94178237	135	1	borovice	1.846	64.3
FIN22	94178220	126	2	smrk-borovice	2.2079	71.2
FIN23	94178241	122	1	smrk	2.419	77.2
FIN24	94178221	151	2	smrk-bříza	2.1535	71.5
FIN25	94178253	136	3	borovice-smrk-bříza	2.2577	66.7
FIN26	94178245	108	3	borovice-smrk-bříza	2.1165	64.7
FIN27	94178254	119	2	smrk-borovice	1.7797	62.3
FIN28	94178232	111	2	borovice-bříza	0.9441	63.2

Obrázek 6. Tabulka obsahuje strukturní informace k jednotlivým zkusným plochám, na kterých byl výzkum prováděn.

4.3 Měřicí čidla

Pro získávání potřebných dat k diplomové práci byla využita v terénu mikroklimatická měřicí čidla TMS-4 (Obr. 7). Pomocí těchto snímačů byly měřeny 3 veličiny, a to teplota vzduchu (označována v této práci pod zkratkou T3), dvě půdní teploty v odlišných hloubkách (označené zkratkou T2 a T1) a půdní vlhkost.

Produkt TMS-4, jenž nese název anglické zkratky Temperature Measurement Systems, je produktem české firmy, která se zaměřuje na výrobu čidel již od roku 1995 (TOMST s.r.o.). Výrobou se zaměřili také na využití čidel v mikroklimatickém a dendrologickém měření. Mikroklimatické čidlo TMS-4 se vyrábí ve více provedeních, které nabízí širokou škálu využití pro ekologické výzkumy. K účelům diplomové práce byl využit produkt skládající se z dvou hlavních měřicích částí, nadzemní a podzemní. Přibližně ve výšce 50 cm nad zemí se nachází senzor vzdušné teploty T3 opatřený ochranným kloboučkem, který slouží nejen jako ochrana proti mechanickému poškození, ale také kryje měřicí aparát před přímým slunečním zářením, aby nedocházelo ke zkreslení dat. Zároveň se v těchto místech nachází i konektor pro připojení zařízení a přenos dat. Dále se v nadzemní části nachází vysokokapacitní lithiové články s parametry 3,6 V, 2600 mAh. Baterie v běžných podmínkách vydrží přibližně 10 let. Nadzemní a podzemní části jsou propojeny pomocí kabelu, který je opatřen speciálním chráničem proti poškození a proti vniknutí vody. V podzemní části se nachází senzor pro měření půdní vlhkosti, půdní teploty T1 (umístěný cca 10 cm pod povrchem) a půdní teploty T2 nacházející se přibližně 2 cm pod povrchem (Wild et al. 2019).

Měřicí senzory umístěné na TMS zaznamenávají data každých 15 minut. Díky velké paměti spolu s velkokapacitní baterií jsou schopna tato čidla zaznamenat až 524 288 měření. Čidlo se po tuto dobu tedy nutně nemusí nabíjet, nevyžaduje ani jinou údržbu, je zcela samostatné, což je jeho velkou předností. I přesto, že celá konstrukce je velice pevná, doporučuje se pravidelná kontrola stavu čidla. Bohužel totiž dochází velice často k poškození divokou zvěří. Je proto také doporučena ochrana TMS čidel, například kovovou klecí, která se již osvědčila jako účinná překážka před případnou manipulací či okusem divokých prasat, jelenů nebo medvědů (Wild et al. 2019).

Teplotní senzory jsou schopny zaznamenat teploty v rozmezí od -40 až +60 °C. Je testováno, že dokážou měřit i v extrémnějších teplotách, a to v rozsahu od 60 až +85°C.

Extrémní teploty však mohou mít vliv na kapacitu baterie a zkrátit tak její životnost (Wild et al. 2019).

Obrázek č 7. Fotografie mikroklimatického čidla TMS-4 opatřeného ochranným pletivem proti okusu zvířat.

4.4 Průběh stahování dat

Stažení naměřených dat z TMS čidel pro tuto diplomovou práci bylo prováděno opakovaně od roku 2019, a to s časovým rozmezím maximálně jednoho roku. Při této příležitosti byla vždy zkontrolována funkčnost mikroklimatických čidel, stav baterie a v případě znečištění byla čidla očištěna pro zvýšení přesnosti měření v budoucnu. Jestliže se zjistí jakékoliv poškození čidla, které může potenciálně způsobit nepřesnosti v měření či není schopno měření vůbec, je vyměněno za nové.

Jednotlivé zkusné plochy jsou ve Finsku rozprostřeny na území o rozloze 1600 km^2, a proto je nevyhnutelné dopravovat se do blízkosti jednotlivých míst osobním automobilem. Přímo na zkusné plochy je potom nutné docházet pěšky pomocí GNSS. Každá zkusná plocha byla opatřena dřevěnými kolíky, modře natřené kolíky ohraničovaly hranici plochy (30 m x 30 m) a červeně natřené kolíky označovaly vnitřní čtverec (10 m x 10 m), (Obr. 2, 3). Součástí zkusných ploch jsou také dendrometry připevněné na vybraných stromech, které jsou využívány k přidruženému výzkumu.

Stahování dat z půdních čidel se provádělo pomocí TMD adaptéru na základě USB rozhraní. Přenos dat mezi adaptérem a čidlem probíhá bezdrátově přiložením adaptéru k nejvyššímu bodu čidla, kde se nachází příslušný protipól. Čas samotného extrahování dat do notebooku se odvíjí od množství přenášejících dat. Výrobce uvádí rychlost 3 sekundy pro přenos informací odpovídající jednomu měsíci. Pro stahování dat vytvořil výrobce TMS čidel počítačový software Lolly Manager, který je volně přístupný na internetu.

4.5 Zpracování dat

Veškerá stažená dat byla po sběru následně vizuálně zkontrolována pro zamezení ovlivňování výsledků chybným měřením. Kontrola byla prováděna v programu R ve verzi 4.1.2 (R Core Team, 2021) v grafickém rozhraní R Studio, a to za pomoci aplikace Shiny, která je součástí balíčku PLOTeR. Aplikace Shiny umožnuje vizuální zobrazení dat pomocí grafu i náhledu informací týkajících se jednotlivých dat v podobě tabulky. Data, která se výrazně odchylovala, byla přes tuto aplikaci vymazána. Po očištění se následně data v prostředí programu R uložila ve formátu .csv (comma-separated values).

Následovné zpracování výsledků probíhalo také v programu R, pro jejich zpracování byly využity balíčky plyr, dplyr, lme4, tidyverse a car. Pro jednotlivé mikroklimatické veličiny byly spočítány měsíční a roční průměry pro jednotlivé roky (2018-2022), k nimž byly přiřazeny následovné informace o plochách: počet druhů dřevin na ploše, výpis těchto druhů a id čidla. Následně byla pomocí aditivního modelu GAM nafitována a vizuálně zobrazena funkcí ggplot. Grafy byly vytvořeny pro všechny možné druhové směsi, které se na plochách zobrazovaly, grafy se zaměřením na jedno druhové porosty a grafy zobrazující závislost veličin na počtu druhů na ploše.

Parametry týkající se struktury lesa byly vyhodnocovány na základě hemisférických fotografií, které byly pořízeny vždy ve středu jednotlivých zkusných ploch, následní vyhodnocení probíhalo také v programu R pomocí balíčku Hemiphot.R (ter Steege 2018).

Struktura porostů byla dále vyhodnocena pomocí balíčku car využitím funkce lm, kterými se sestavili obecné lineární modely. Pro tyto výpočty byly vypočítány průměrné hodnoty mikroklimatických veličin za rok 2022 a 2021, pro které byl vyhodnocen vztah ke strukturním datům LAI a pokryvnost stromového patra. Pro výpočty s výsledkem označeným jako významný vztah byly následně vytvořeny grafy pomocí funkcí geom_point a stat_smooth.

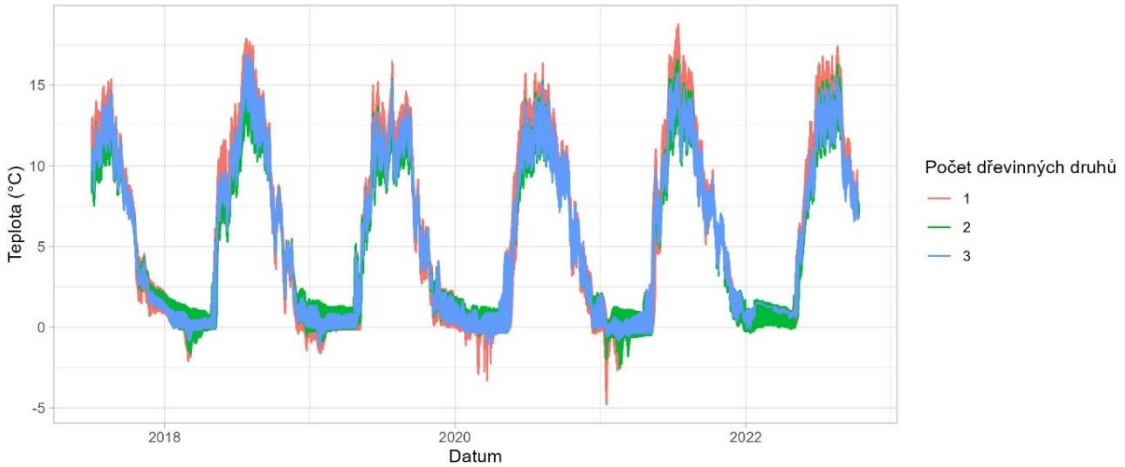
I přesto, že je rok 2022 zahrnut mezi zpracovanými výsledky, je nutné podotknout, že při čistění a práci s daty bylo zjištěno, že u celkem 9 mikroklimatických čidel chybějí data pro rok 2022. Předpokládá se tak, že u těchto mikroklimatických čidel došlo k poruše, kterou mohla způsobit jak zvěř, tak i samotná porucha čidla. Jedná se o čidla na plochách č 3, 5, 8, 18, 20, 21, 24, 25, 26.

5 Výsledky

Pro ověření cílů této diplomové práce byly pro vyšší přehlednost zpracovány vizuální výsledky. Výsledky jsou rozděleny do podkapitol dle zkoumaných veličin, tedy půdní teplota T1, půdní teplota T2, teplota vzduchu T3, vlhkost vzduchu. Následovně jsou výsledky zaměřeny na strukturu lesních porostů a jejich vztah s mikroklimatickými veličinami. Zpracované výsledky nabízejí dlouholetý přehled vývoje dat, a to od roku 2017 do roku 2022.

5.1 Půdní teplota T1

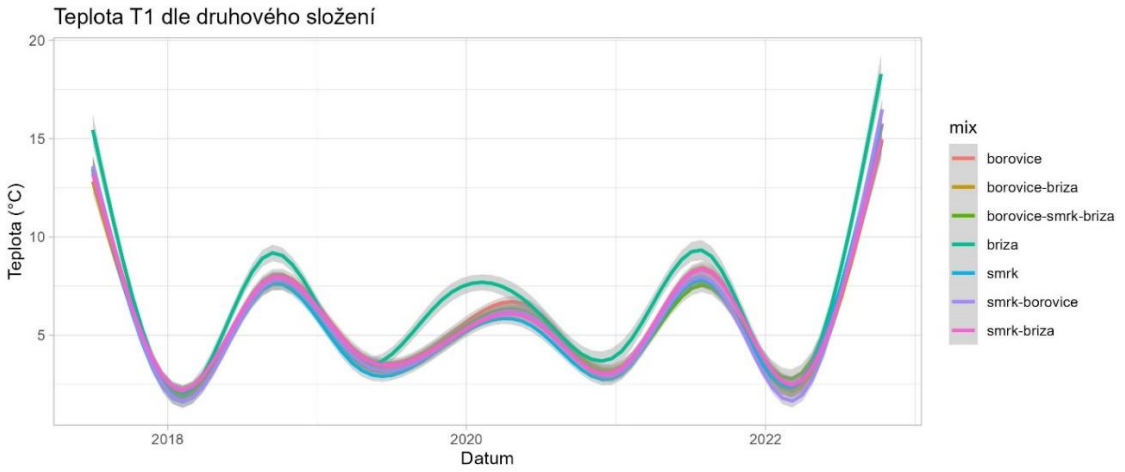
Půdní teplota T1, která byla měřena v hloubce 15 cm pod povrchem půdy, ukázala značné rozdíly mezi porosty v závislosti na počtu druhů na ploše. V grafu (Obr. 8) lze díky liniovému zobrazení jednoduše pozorovat vyšší odchýlení červené křivky, která zobrazuje jedno druhové porosty. Křivka se vykyvuje jak v kladných hodnotách, tak i v hodnotách pod 0°C. U porostů s dvěma druhy dřevin, které jsou na grafu znázorněny zelenou křivkou, lze pozorovat nižší průměrné teploty oproti 3 druhovým směsím, avšak u kladných hodnot, dosahují dvou druhové směsi, ve všech pozorovaných letech, nejnižších hodnot.



Obrázek 8. Grafické zobrazení průměrných denních teplot T1 v závislosti na počtu druhů dřevin na zkusné ploše. Data byla vizualizována pro časové období od července 2017 do října roku 2022.

Při podrobném zaměření na porostní druhové složení (Obr. 9) vykazovala půdní teplota T1 podobný trend v průběhu pozorovaných let pro většinu porostů. Výjimkou je březový porost, kde se opakovaně vyskytovala vyšší průměrná denní teplota. U

ostatních jedno druhových směsí nedocházelo k takto značnému vychýlení, přesto se ukázala vychýlení od dvou a třech druhových kombinací. Borový porost se vychyluje do vyšších hodnot v letních měsících roku 2020 a naopak ve smrkovém porostu byly nižší teploty, a to přibližně v období od léta 2018 až do roku 2021. Jako druhý porost, kde dominovaly nejnižší hodnoty, se ukázal porost s druhovou kombinací smrk-borovice. Tento porost dosahoval nejnižších hodnot v zimních obdobích roku 2018 a roku 2022.

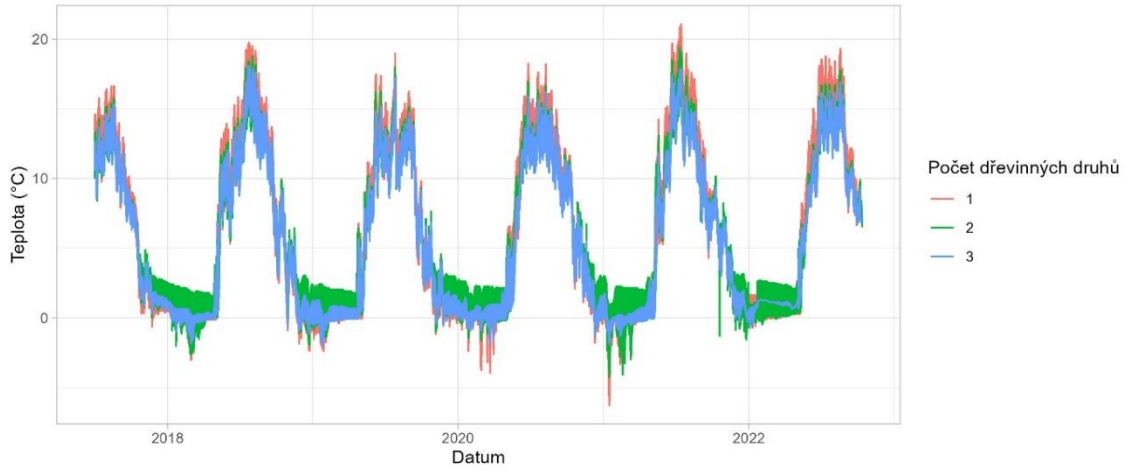


Obrázek 9. Grafické zobrazení průměrných denních hodnot půdní teploty T1 dle druhového složení na zkusných plochách. Zobrazeny jsou všechny vyskytující se druhové směsi i monokulturní porosty. Data byla vizualizována pro časové období od července 2017 do října roku 2022.

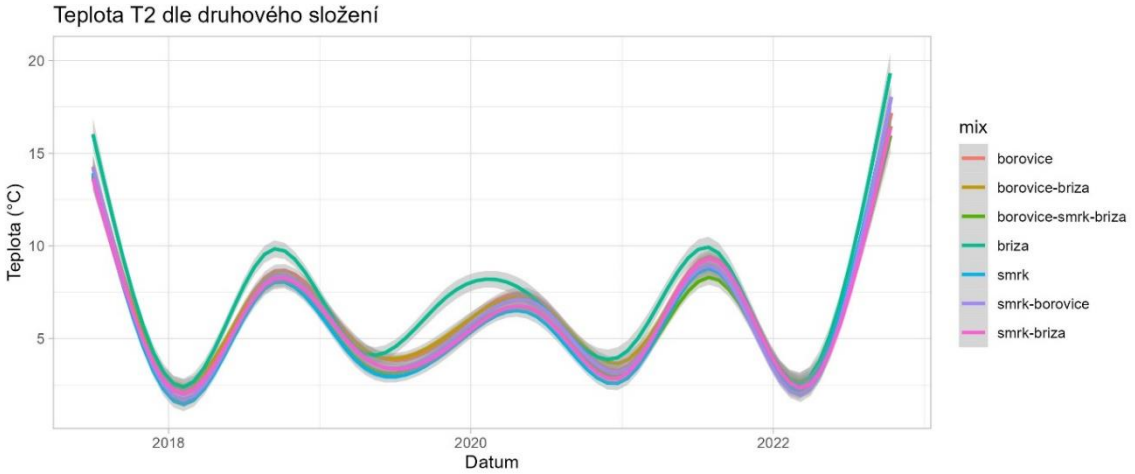
5.2 Půdní teplota T2

Půdní teplota T2, která byla měřena 2 cm pod povrchem, ukázala podobný trend jako výsledná data půdní teploty T1. Přesto lze pozorovat mezi těmito dvěma druhy teplot rozdíly. Graf zobrazující průměrné denní teploty dle počtu druhů dřevin (Obr. 10) na porostu ukázal u dvou druhových porostů vyšší variabilitu průměrných teplot v zimním období. Nejnižší hodnoty se objevují u stejných porostů jako v případě teploty T1, a to tedy převážně u monokulturních a dvou druhových porostů.

Nafitovaný GAM model pro porostní druhovou skladbu a průměrné denní teploty T2 (Obr. 11) ukázal opět jasný rozdíl mezi monokulturními březovými porosty, kde v letních měsících převažovaly vyšší průměrné tepoty oproti ostatním porostům. V nejnižších hodnotách dominují smrkové monokultury a dvou druhové směsi smrku a borovice.



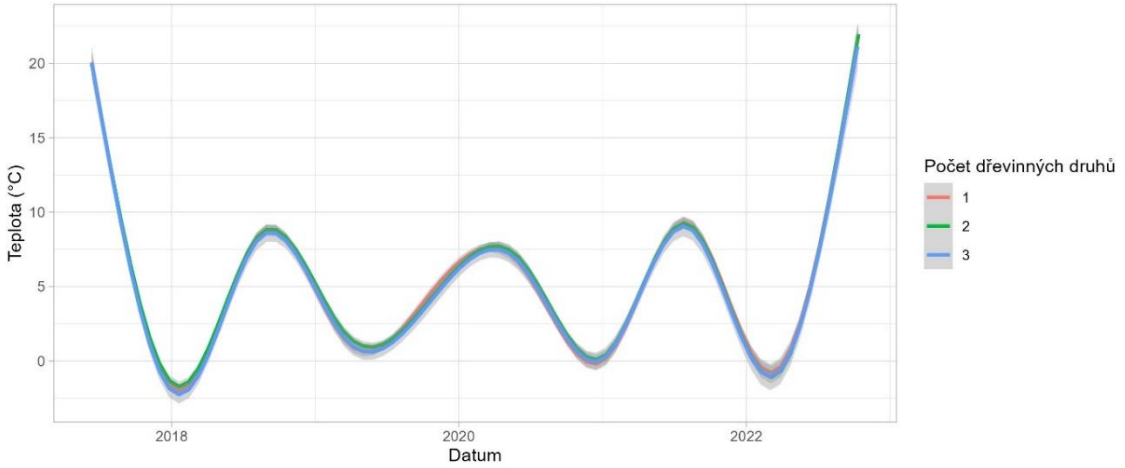
Obrázek 10. Grafické zobrazení průměrných denních půdních teplot T2. Barevné rozlišení určuje počet druhů dřevin na směsi. Data byla vizualizována pro časové období od července 2017 do října roku 2022.



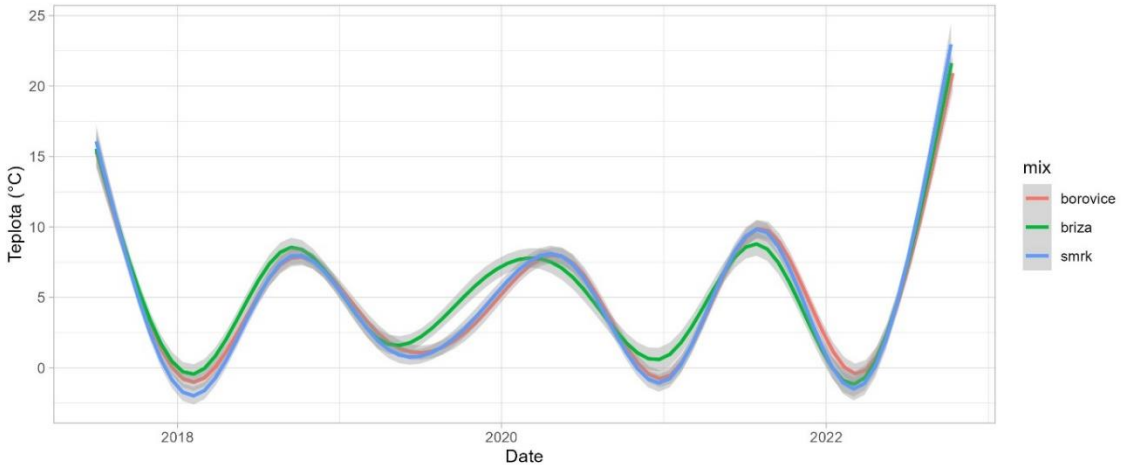
Obrázek 11. Grafické zobrazení průměrné denní teploty T2 pro pozorované porostní druhové skladby. Vizualizovány jsou jak monokultury, tak i dvou a tří druhové směsi. Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.

5.3 Teplota vzduchu T3

Průměrné denní teploty vzduchu T3 neukázaly výrazné odchýlení mezi počtem druhů dřevin v porostu (Obr. 12). Pro monokulturní porosty (Obr. 13) ukázal model GAM výrazné změny pro březové porosty. Křivka zobrazující březové porosty odchylovala od ostatních druhů po celé časové období 2018 až 2022. Po zimních měsících data ukázala dřívější zvyšování teplot v březových porostech. Březové porosty dosahovaly lokálního maxima v letních měsících pouze v roce 2018.

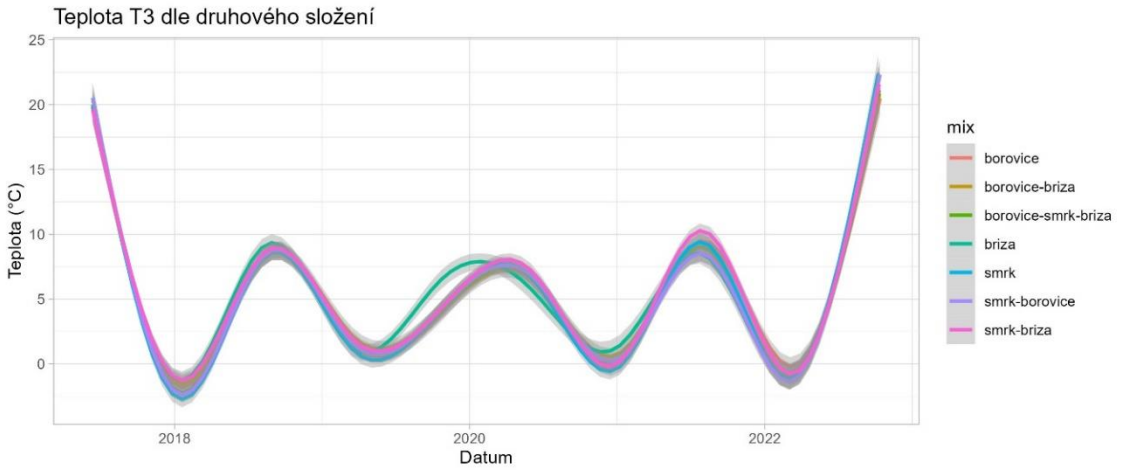


Obrázek 12. Grafické zobrazení průměrných denních teplot T3 dle počtu druhů dřevin na zkusné ploše. Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.



Obrázek 13. Grafické zobrazení průměrné denní teploty T3 v monokulturních porostech. Barevné rozlišení určuje druh dřeviny na porostu. které Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.

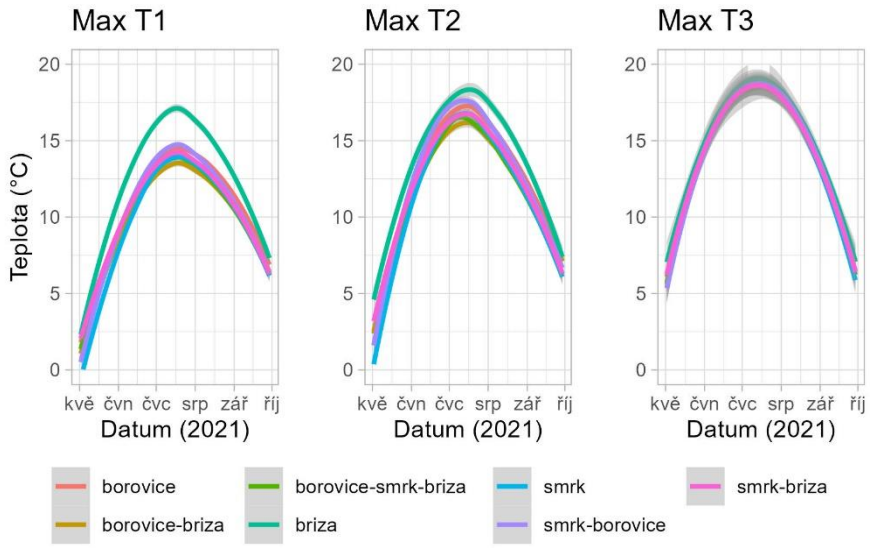
Souhrné vizuální zobrazení průměrných denních hodnot T3 pro všechny pozorované porostní směsi (Obr. 14) ukázalo poměrně podobné kolísání teplot pro většinu směsí v pozorovaném období. Výrazně lišící byla data březových porostů, a to v letním období roku 2020, kde se teploty začaly zvyšovat dříve než v ostatních pozorovaných směsích.



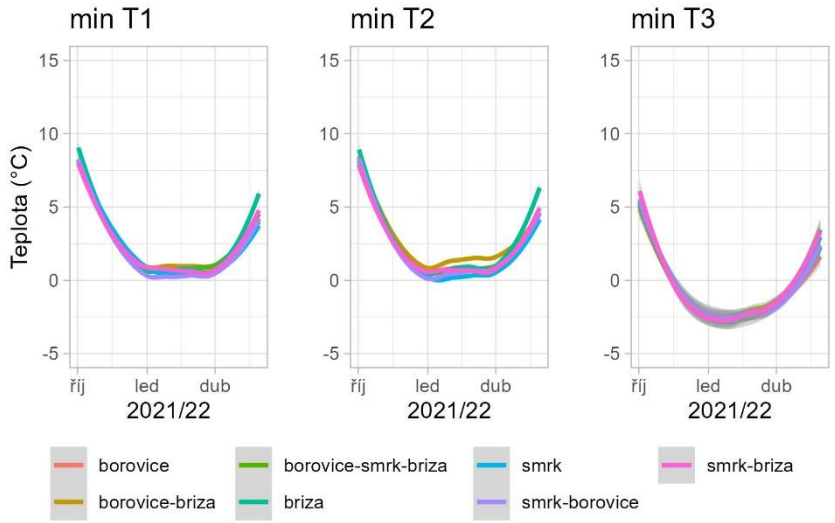
Obrázek 14. Grafické zobrazení průměrných denních teplot vzduchu T3 pro všechny pozorované porostní směsi. Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.

Pro přehlednost výsledků všech pozorovaných teplot byly vytvořeny nafitované GAM modely se zaměřením na letní měsíce roku 2021 (Obr. 15). Modely zobrazují maximální hodnoty pro teploty T1, T2, T3 na všech pozorovaných porostních směsích. Vizuální zobrazení ukázalo viditelné rozdíly půdních teplot mezi jednotlivými směsmi. Naopak teploty vzduchu T3 byly v průběhu tohoto léta velice podobné a nedocházelo zde k výraznému odchýlení, avšak teploty zde byly vyšší než u půdních teplot.

Denní minimální hodnoty v zimních měsících ukázaly podobný trend pro teploty T1, T2, T3 (Obr. 16). Půdní teploty byly více rozdílné mezi jednotlivými směsmi, teploty vzduchu byly velice podobné. U půdních teplot byly nejteplejší hodnoty v porostech s dvou druhovou směsí borovice – bříza, naopak nejnižší teploty byly naměřeny u dvou druhové směsi smrk – borovice a monokulturního porostu smrku.



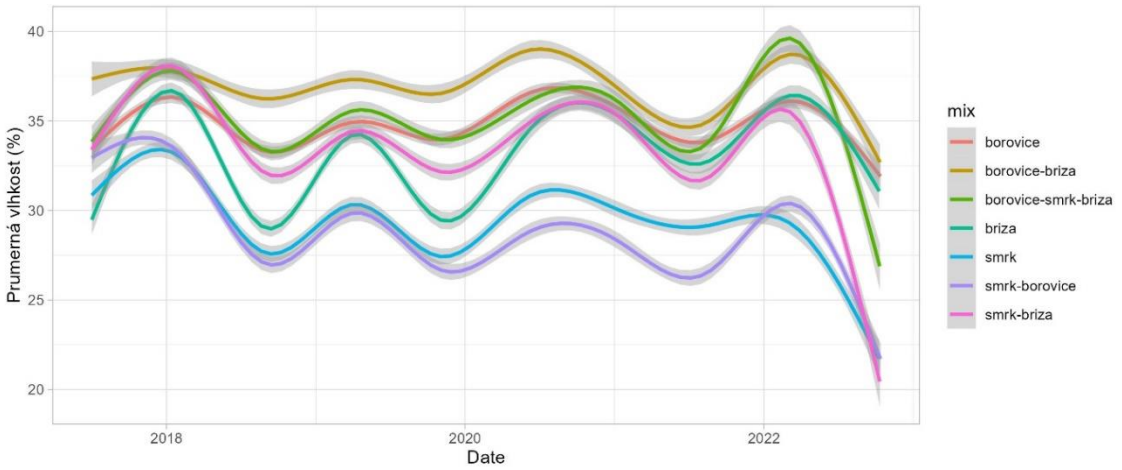
Obrázek 15. GAM modely pro maximální denní teploty T1, T2, T3. Teploty jsou zobrazeny pro veškeré pozorované porostní směsi. Časová osa u těchto grafů je od 1. 5. 2021 do 30. 9. 2021.



Obrázek 16. GAM modely pro minimální denní teploty T1, T2, T3. Teploty jsou zobrazeny pro veškeré pozorované porostní směsi. Časové období bylo omezeno na 30. 10. 2021 – 30. 4. 2022.

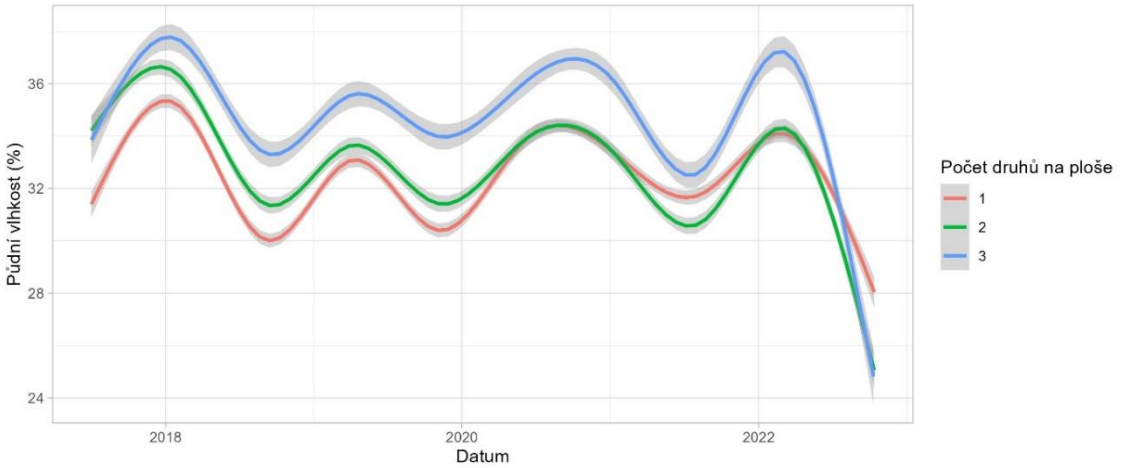
5.4 Půdní vlhkost

Měření půdní vlhkosti ukázalo značné rozdíly mezi jednotlivými porostními směsmi (Obr. 17). Jako nejsušší byly porosty s druhovou směsí smrk-borovice a monokulturní porosty smrku. Porosty s nejvyššími hodnotami půdní vlhkosti byly na porostech s druhovou směsí borovice-bříza. Jako druhá směs s nejvyšší půdní vlhkostí se ukázala tří druhová kombinace borovice-smrk-bříza, která byla obzvláště vysoká v roce 2022.



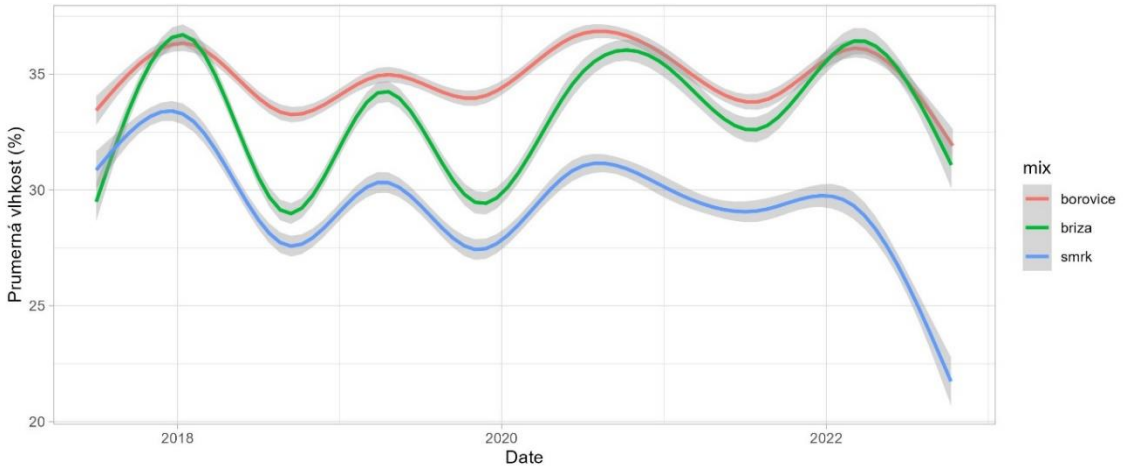
Obrázek 17. Grafické zobrazení průměrné denní vlhkosti půdy na všech pozorovaných porostních směsích. Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.

Při porovnání průměrné půdní vlhkosti dle počtu druhů na zkusné ploše (Obr. 18) byly tří druhové porosty nejvlhčí v průběhu celého sledovaného období. V monokulturních lesích byly naměřeny nejnižší hodnoty půdní vlhkosti do roku 2021, poté byly nejnižší hodnoty naměřeny ve dvou druhových směsí.



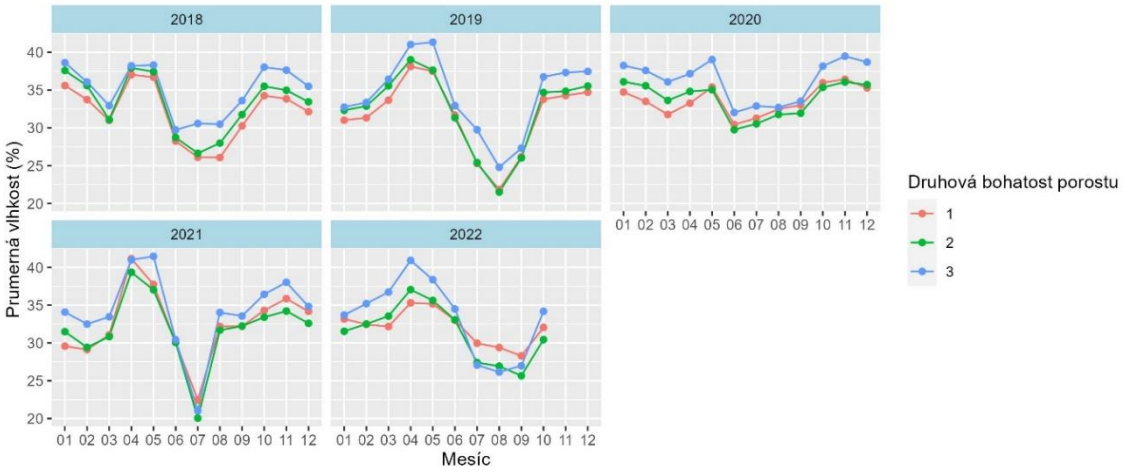
Obrázek 18. Grafické zobrazení průměrné denní vlhkosti půdy dle počtu druhů na zkusné ploše. Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.

Půdní vlhkost se v závislosti druhu monokulturního porostu značně lišila (Obr. 19). Nejnižší hodnoty byly naměřeny ve smrkových porostech, rozdíl oproti borovicovým porostům se pohyboval kolem 5 %. Březové monokultury ukázaly větší rozdíly mezi jednotlivými ročními obdobími, půdní vlhkost se během měření pohybovala v rozmezí 37-28 %, zatímco křivka pro borovicové monokultury se pohybuje v rozmezí 37-33 %. Křivka smrkových porostů více kopíruje průběh půdní vlhkosti borovicových porostů.



Obrázek 19. Grafické zobrazení průměrné denní vlhkosti půdy pro monokulturní porosty. Barevné rozlišení určuje druh dřeviny na porostu. Časová osa je od července 2017 do října roku 2022.

Měsíční průměry půdní vlhkosti dle počtu druhů na zkusné ploše (Obr. 20) ukázaly podrobnější přehled průběhu jednotlivých ročních období. V roce 2021 byl v měsíci červenec naměřen rychlý pokles půdní vlhkosti, k podobnému klesání došlo také v létě 2019. V letech 2018, 2020 a 2022 byly hodnoty opět nižší v letních měsících, ale neklesaly pod 25 %.

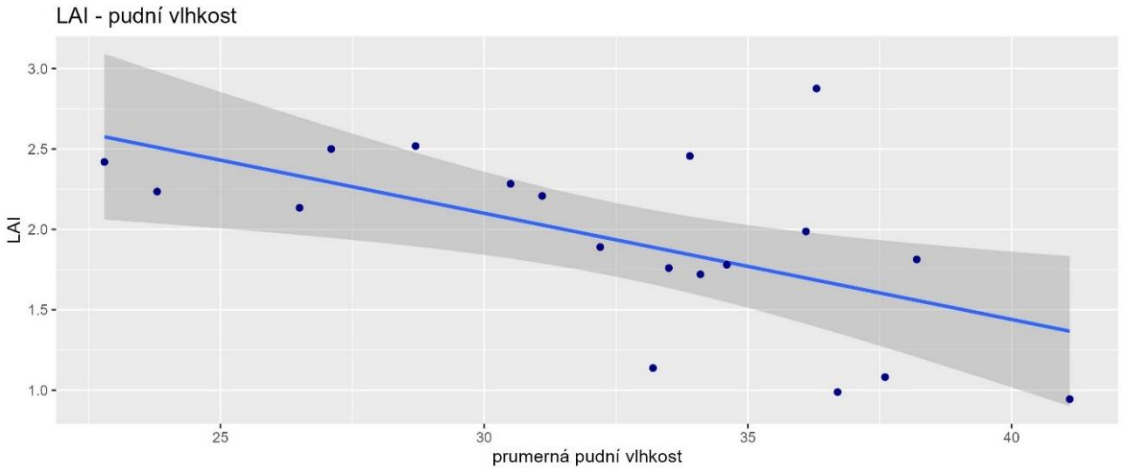


Obrázek 20. Grafické zobrazení měsíčních průměrů půdní vlhkosti dle počtu druhů na zkusné ploše. Grafy jsou rozděleny dle jednotlivých pozorovaných let (2018-2022). Na ose x jsou zobrazeny měsíce.

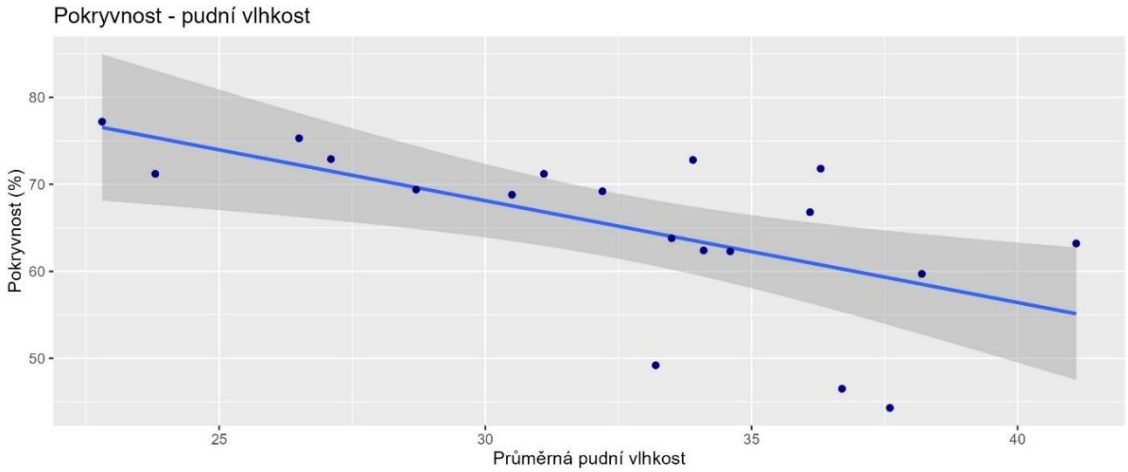
5.5 Struktura lesních porostů a jejich vztah s mikroklimatem

5.5.1 Půdní vlhkost

Výpočet lineárního obecného modelu vztahu struktury porostů (LAI, pokryvnost stromového patra) a jednotlivými mikroklimatickými veličinami ukázal, že existuje významný vztah mezi půdní vlhkostí a strukturními veličinami. Průměrná roční hodnota půdní vlhkosti prokázala významný vztah s LAI (Obr. 21), kdy se zvyšující se LAI docházelo ke zvyšování půdní vlhkosti ($P < 0.01$, $R^2 = 0.3371$). Vztah půdní vlhkosti s pokryvností stromového patra byl svou významností ($P > 0.01$, $R^2 = 0.3743$) podobný vztahu s LAI. Významnost potvrzuje zvyšování půdní vlhkosti se zvyšující se pokryvností stromového patra (Obr. 22).



Obrázek 21. Graficky znázorněný vztah hodnot LAI na zkusných plochách s průměrnými ročními (2022) hodnotami půdní vlhkosti na všech zkusných plochách. Modrou křivkou je znázorněna regresní funkce, šedá zóna představuje 95% interval spolehlivosti.

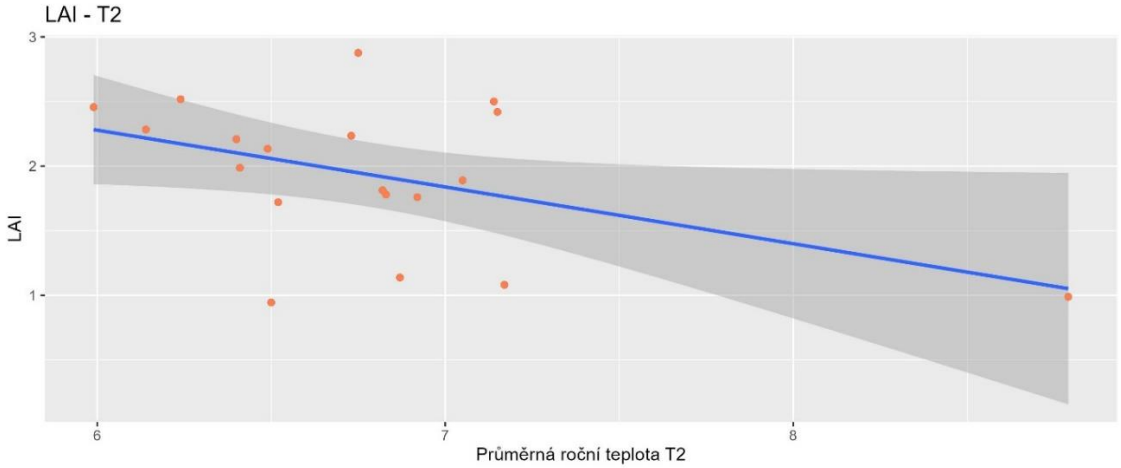


Obrázek 22. Graficky znázorněný vztah hodnot pokryvností stromového patra na zkusných plochách s průměrnými ročními (2022) hodnotami půdní vlhkosti na všech zkusných plochách. Modrou křivkou je znázorněna regresní funkce, šedá zóna představuje 95% interval spolehlivosti.

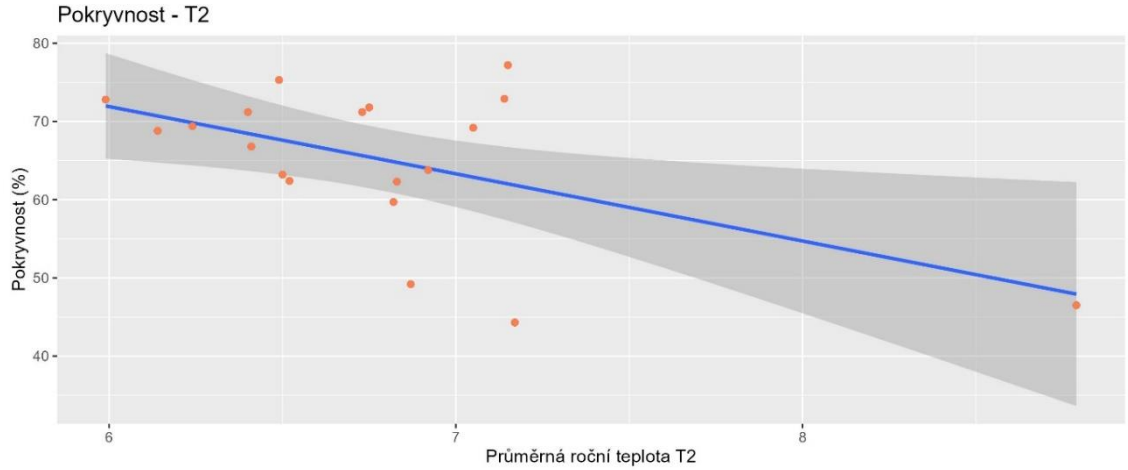
5.5.2 Teplota T1, T2, T3

Obecný lineární model nepotvrdil významnost vztahu půdní teploty T1 a teploty vzduchu T3 s LAI, ani s pokryvností stromového patra ($P > 0.05$).

Vztah půdní teploty T2 s LAI byl výpočtem stanoven na významný ($P < 0.05$, $R^2 = 0.2156$). Se zvyšující se LAI docházelo ke stoupání půdní teploty T2 (Obr. 23). Podobný vztah byl také prokázán pro půdní teplotu s pokryvností stromového patra, kterou lze také označit za významnou ($P < 0.05$, $R^2 = 0.2915$), čímž se ukázalo, že se zvyšující se pokryvností stromového patra se zvyšuje půdní teplota T2 (Obr. 24).



Obrázek 23. Graficky znázorněný vztah hodnot LAI na zkusných plochách s průměrnými ročními (2022) půdními teplotami T2 na všech zkusných plochách. Modrou křivkou je znázorněna regresní funkce, šedá zóna představuje 95% interval spolehlivosti.



Obrázek 24. Graficky znázorněný vztah hodnot pokryvnosti stromového patra na zkusných plochách s průměrnými ročními (2022) půdními teplotami T2 na všech zkusných plochách. Modrou křivkou je znázorněna regresní funkce, šedá zóna představuje 95% interval spolehlivosti.

6 Diskuse

6.1 Půdní teplota

Výsledná data půdní teploty T1 a T2 ukázala značné rozdíly v závislosti na počtu druhů dřevin na ploše. Monokulturní porosty byly v letních měsících nejteplejší, a naopak v zimních měsících nejstudenější (Obr. 8, 10), z čehož může vyplývat, že jedno druhové směsi nemají výrazný vliv na klimatické podmínky okolí. Na porostech s dvou a tří druhovou směsí byla léta v porovnání s monokulturami chladnější. K podobným závěrům došli také Zhang et al. (2022), kteří ve svých závěrech uvedli, že více druhová porostní směs může mít vyšší vliv na ovlivnění mikroklimatu, a to z důvodu zvýšené rozmanitosti korunového patra. Dle jejich výsledků se však ne vždy toto tvrzení potvrdilo a vždy závisí na druhové směsi, která je hodnocena.

V porovnání všech pozorovaných druhových kombinací platí, že monokulturní porosty jsou nejteplejší, a to u březových a borovicových porostů (Obr. 9). Ovšem v zimním období byly nejnižší teploty naměřeny jak u monokultur smrku, tak i u dvou druhové směsi smrk-borovice. To může potvrzovat, že nelze obecně konstatovat, že se zvyšujícím se počtem druhů se zvyšuje ovlivňování lesního mikroklimatu (Zhang et al. 2022).

Půdní teplota T2 se pohybovala v podobných hodnotách jako půdní teplota T1, avšak se zvýšenými odchylky mezi jednotlivými směsmi. Na březových monokulturách byly měřeny opět výrazně teplejší hodnoty v letních měsících oproti ostatním pozorovaným směsím (Obr. 11). U březových porostů byl také pozorován trend, kdy zvyšující se teploty po zimním období nastupovaly dříve než u jiných porostů. Lze tak pozorovat, že půdní teplota 5 °C, která je udávána jako hraniční teplota umožňující růst stromů v boreálních oblastech (Laurila et al. 1996), byla na těchto porostech naměřena dříve. Růst stromů je udáván sice průměrnou denní teplotou vzduchu, i přesto lze dle výsledků usoudit na dřívější růst stromů v březových porostech než u jiných porostních směsí. Nissinen et al. (2020) ve svém článku potvrzují kladnou odezvu březových, ale i borových porostů na změnu klimatu, kdy v teplejších klimatických podmínkách dochází zejména k rychlejšímu růstu semenáčků.

6.2 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu nebyla v porovnání s půdními teplotami příliš odlišná v závislosti na pozorovaných druhových směsích (Obr. 14). Porté et al. (2004) uvádí podobný výsledek a vyšší variabilitu půdních teplot vysvětlili omezeným slunečním zářením pod povrchem půdy. Sluneční záření zachycené zápojem již neovlivňuje v takové míře měření půdních teplot, teploty pod povrchem jsou tak více ovlivňovány dřevinnou skladbou než teplotou vzduchu, na kterou má vliv více aspektů (Morecroft et al. 1998).

Grafické zobrazení naměřených teplot vzduchu nevykazovalo přílišné rozdíly mezi monokulturami a více druhovými porostními směsmi (Obr.12), z výsledků tak nelze obecně stanovit, kolik druhů je efektivní pěstovat pro ovlivnění vzdušné teploty. Tento výsledek se vymyká článkům zmiňujícím, že rozdílná struktura korunového zápoje má odlišný vliv na utváření teplotních podmínek v porostu (von Arx et al. 2013; Zellweger et al. 2019; Gilbert et al. 2022). Ehbrecht et al. (2019) však ve svém výzkumu dospěli k závěru, že strukturní variabilita porostu nekoreluje s denními teplotami vzduchu.

Z výsledných teplot vzduchu pro monokultury (Obr. 13) se ukázalo, že u březových porostů docházelo opět k dřívějšímu oteplování po zimních měsících, což naznačuje lepší podmínky pro semenáčky i růst stromů (Nissinen et al. 2020).
Ve smrkových porostech se v zimních měsících udržovaly nejchladnější teploty. Vysvětlujícím faktorem může být vyšší LAI než u borovice a břízy (Teske a Thistle 2004), který zachycuje sluneční záření a tím zamezuje zvýšení teplot u povrchu porostu (Monin a Obukhov 1954). Porté et al. (2004) ve svém článku také popisují, že u jehličnatých porostů, i přesto, že dosahují vyšších hodnot LAI, nastávají v korunovém zápoji větší mezery, které mohou mít vliv na udržování vyšších teplot. Jehličnaté porosty tak neudržují vyšší teploty tak efektivně, jako například listnaté dřeviny v letních měsících (Porté et al. 2004). Výsledky průměrných teplot pro porostní směs smrk-borovice byly v letních měsících jako jedny z nejchladnějších, což potvrzuje, že zvýšená variabilita korunového patra dvou dřevin s vysokými hodnotami LAI má pozitivní vliv na snižování teplot uvnitř porostu v letních měsících.

Neuner et al. (2015) se ve svém výzkumu zmiňují o citlivosti monokulturních porostů smrku na nastávající klimatické změny a pro zamezení těchto negativních dopadů doporučují v budoucnu pěstovat smrk v druhové kombinaci s dalším druhem.

6.3 Půdní vlhkost

Výsledná data jasně prokázala schopnost 3 druhových dřevinných směsí udržet nejlépe půdní vlhkost po celou dobu sledovaného období (Obr. 18). V roce 2021 došlo ale u této směsi k náhlému výraznému snížení hodnot a mohlo by to tak poukazovat na fakt, že vyšší druhová kombinace má vyšší nároky na využívání podpovrchové vody. Jak popsali Grossiord et al. (2014 b) ve svém článku, vždy záleží na druhové kombinaci i na stanovišti, na kterém jsou data posuzována. Více druhová kombinace může mít jak pozitivní, tak i negativní efekt na půdní vlhkost.

Při zaměření na nejsušší stanoviště, smrkové monokultury a porostní směs smrk-borovice dosahovaly nejnižších hodnot půdní vlhkosti (Obr. 17). Takový výsledek není příliš překvapující vzhledem k vlastnostem smrku. Smrk je dřevina s vysokými nároky na vlhkost vzduchu i půdy a jeho kořenový systém má mělký tvar, který je omezující pro přísun vody z nižších půdních vrstev (Puhe 2003). Jak již bylo, uvedeno struktura smrkové koruny dosahuje vysokých hodnot LAI, jenž má za následek zvýšení záchytu srážek a omezení přísunu podzemní vody (Teske a Thistle 2004). Borovice, i přes schopnost přivádět vodu z nižších půdních pater svým hlubokým kořenovým systémem (Pejchal a Mauer 2013), zdá se, není schopna vykompenzovat nároky smrku, a naopak svou hustou strukturou koruny zvyšuje omezení dopadu srážek na povrch (Teske a Thistle 2004). Výsledky tak potvrzují tvrzení Neuner et al. (2015) o citlivosti smrku na sucho a doporučení pěstovat smrk ve vhodné dřevinné směsi pro zamezení negativních dopadů změny klimatu na jeho pěstování.

Naopak monokulturní borovicové porosty vykazovaly stabilní zvýšenou půdní vlhkost. Menší nároky na zásobu vody se projevily menšími poklesy půdní vlhkosti v obdobích sucha. K podobnému trendu docházelo také ve smíšeném porostu borovice-bříza, kterou lze dle výsledných naměřených dat označit jako nejvlhčí porostní směs. I přesto, že monokulturní porosty břízy potvrdily snížené udržování půdní vlhkosti v období sucha, v kombinaci s borovicí se v průběhu pozorovaných let potvrdila dlouhodobá schopnost udržovat vysoké hodnoty půdní vlhkosti, což naznačuje vhodnou korunovou strukturu (von Arx et al. 2013). Menší citlivost borovice a břízy na snížený

úhrn srážek, způsobený nastávající změnou klimatu, potvrzují ve svém výzkumu také Briceño-Elizondo et al. (2006).

6.4 Struktura lesních porostů a jejich vztah s mikroklimatem

Zkoumaná struktura porostu potvrdila vztah mezi mikroklimatickými veličinami. Vztah LAI a pokryvnosti stromového patra se potvrdil jak pro půdní vlhkost (Obr. 21, 22), tak i pro půdní teplotu T2 (Obr. 23, 24). Tento vztah byl popsán v mnoha článkách (von Arx et al. 2013; Gholz et al. 1990; Grier a Running 1977). Von Arx et al. (2013) ve svém článku také potvrdili vztah LAI s půdní vlhkostí a půdní teplotou, avšak jejich výsledky prokázaly opačný trend, se snižující LAI se zvyšují půdní veličiny. Opačný výsledek této diplomové práce, tedy se zvyšujícími se hodnoty LAI a pokryvnosti se zvyšují půdní veličiny, mohl být způsobený odlišn zkoumanými druhy dřevin či vlivem prostředí, jak i potvrdili ve svém článku Grossiord et al. (2014 b).

Vzhledem k literatuře zmiňující se o vztahu LAI s teplotou vzduchu, zejména v kontextu snižování maximálních teplot v letním období, bylo překvapující, že data této diplomové práce neprokázaly stejný vztah. Vliv na takový výsledek můžou mít podmínky prostředí, například hustý nárust bařeně v okolí mikroklimatického čidla či nálet nežádoucích dřevin od založení porostu, které mohou výsledky zkreslovat. Možné chyby v měření tak mohly, v důsledku menšího množství dat struktury porostů, více ovlivnit výsledky.

Tyto výsledky, vymykající se literatuře, která se zabývá vztahem LAI k mikroklimatu, poukazují na důležitou věc, a sice neopomínat vlastní vědomosti a zkušenosti s místními podmínkami prostředí, které mohou vyžadovat odlišný přístup, a vždy k plánování a pěstování lesa přistupovat individuálně.

7 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověřit, jak jednotlivé porostní směsi dřevin a struktura porostu ovlivňují mikroklima lesů situovaných v boreální oblasti východního Finska. Výzkum se zaměřil na 3 druhy dřevin, a to smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.), borovici lesní (*Pinus sylvestris* L.) a břízu bělokorou (*Betula pendula* Roth). Pro ověření cílů bylo pozorováno celkem 28 zkusných ploch se 7 různými druhovými kombinacemi druhů dřevin, a to v monokulturních, dvou druhových a dále tří druhových směsí. Do středu každé plochy bylo instalováno mikroklimatické čidlo pro měření veličin, na které se tato práce zaměřila, a to půdní vlhkost, půdní teploty a teplota vzduchu. Veličiny struktury porostu: LAI a pokryvnost stromového patra, byly vypočítány na základě pořízené hemisférické fotografie ve středu každé zkusné plochy.

Vyhodnocená data ukázala značný vliv počtu druhů dřevin i jednotlivých druhů dřevin na mikroklimatické veličiny. Nejoptimálnější podmínky pro růst stromů byly z pohledu počtu druhů dřevin na ploše označeny u dvou druhových a tří druhových porostních směsí, ve kterých se po celkovou dobu měření nacházela vyšší vlhkost a mírnější půdní teplotní podmínky než v monokulturních porostech. I přesto byla u dvou druhové směsi výjimka, a to u porostní směsi smrk-borovice. V tom to porostu byla naměřena výrazně nižší půdní vlhkost v průběhu celého pozorovaného období. Samostatný monokulturní porost borovice byl přitom jeden z nejvlhčích porostů. Porostní směs smrk-borovice, se tak nezdá být optimální pro vybrané prostředí. Stejně jako borovice i březové porosty vykazovaly zvýšené hodnoty půdní vlhkosti. V březových monokulturách však tyto hodnoty nebyly stabilní, v průběhu měnících se ročních obdobích docházelo k výrazným propadům nastiňujícím menší schopnost hospodaření se zásoby půdní vody.

Při zasazení výsledných dat týkajících se mikroklima do aktuálního tématu změny klimatu lze zejména jedno druhové porosty smrku označit za rizikové. Měření této diplomové práce v těchto porostech ukázalo nízké hodnoty půdní vlhkosti, které se shodují s výsledky v současné literatuře. Vědecké články upozorňují na možné negativní dopady změny klimatu na smrkové porosty. Zejména snižující se úhrn srážek může oslabovat porosty a zpomalovat růst smrku, který má vysoké vlhkostní nároky. Současná literatura doporučuje zvážit pěstování smrku ve vhodné porostní směsi.

Ověřováním vztahu mezi strukturou porostu a druhovými směsmi došlo k neočekávanému výsledku vzhledem k existující literatuře zaměřující se na toto téma. Výsledky výpočtů vztahu LAI a pokryvností stromového patra k půdní teplotě a půdní vlhkosti říkají, že čím vyšší jsou hodnoty LAI a pokryvnosti, tím vyšší jsou hodnoty půdních veličin. Odlišný výsledek mohl být způsobený jak chybou měření, tak i vlivem místních podmínek prostředí.

Opakované roční měření struktury porostu by mohlo nabídnout lepší ověření výsledků a zmenšení intenzity vlivu chyb v měřeních na výsledek. Toto měření by mohlo být vhodným rozšíření výzkumu této diplomové práce.

8 Literatura

AALTO, Juha, Peter C LE ROUX a Miska LUOTO, 2013. Vegetation Mediates Soil Temperature and Moisture in Arctic-Alpine Environments. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* [online]. **45**(4), 429–439. ISSN 1523-0430. Dostupné z: doi:10.1657/1938-4246-45.4.429

APPS, M J, W A KURZ, R J LUXMOORE, L O NILSSON, R A SEDJO, R SCHMIDT, L G SIMPSON a T S VINSON, 1993. Boreal forests and tundra. *Water, Air, and Soil Pollution* [online]. **70**(1), 39–53. ISSN 1573-2932. Dostupné z: doi:10.1007/BF01104987
ARCHIBOLD, Oliver William, 2012. *Ecology of world vegetation*. B.m.: Springer Science & Business Media. ISBN 9401100098.

AUSSENAC, Gilbert, 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* [online]. **57**(3), 287–301. ISSN 12864560. Dostupné z: doi:10.1051/forest:2000119

BAETEN LANDER, 2010. *Exploratory Platform _ FunDivEUROPE* [online] [vid. 2023-03-07]. Dostupné z: http://project.fundiveurope.eu/?page_id=22

BAETEN, Lander, Kris VERHEYEN, Christian WIRTH, Helge BRUELHEIDE, Filippo BUSSOTTI, Leena FINÉR, Bogdan JAROSZEWICZ, Federico SELVI, Fernando VALLADARES a Eric ALLAN, 2013. A novel comparative research platform designed to determine the functional significance of tree species diversity in European forests. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. **15**(5), 281–291. ISSN 1433-8319.

BAKER, Thomas P., Gregory J. JORDAN, E. Ashley STEEL, Nicholas M. FOUNTAIN-JONES, Timothy J. WARDLAW a Susan C. BAKER, 2014. Microclimate through space and time: Microclimatic variation at the edge of regeneration forests over daily, yearly and decadal time scales. *Forest Ecology and Management* [online]. **334**, 174–184 [vid. 2022-12-14]. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/J.FORECO.2014.09.008

BONAN, Gordon B a Herman H SHUGART, 1989. *Environmental factors and ecological processes in boreal forests* [online]. Dostupné z: www.annualreviews.org

BRICEÑO-ELIZONDO, Elemer, Jordi GARCIA-GONZALO, Heli PELTOLA, Juho MATALA a Seppo KELLOMÄKI, 2006. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. *Forest Ecology and Management* [online]. **232**(1), 152–167. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.062

DE FRENNE, Pieter, Jonathan LENOIR, Miska LUOTO, Brett R SCHEFFERS, Florian ZELLWEGER, Juha AALTO, Michael B ASHCROFT, Ditte M CHRISTIANSEN, Guillaume DECOCQ, Karen DE PAUW, Sanne GOVAERT, Caroline GREISER, Eva GRIL, Arndt HAMPE, Tommaso JUCKER, David H KLINGES, Irena A KOELEMEIJER, Jonas J LEMBRECHTS, Ronan MARREC,

Camille MEEUSSEN, Jérôme OGÉE, Vilna TYYSTJÄRVI, Pieter VANGANSBEKE a Kristoffer HYLANDER, 2021a. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology* [online]. **27**(11), 2279–2297. ISSN 1354-1013. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/gcb.15569

DE FRENNE, Pieter, Jonathan LENOIR, Miska LUOTO, Brett R SCHEFFERS, Florian ZELLWEGER, Juha AALTO, Michael B ASHCROFT, Ditte M CHRISTIANSEN, Guillaume DECOCQ, Karen DE PAUW, Sanne GOVAERT, Caroline GREISER, Eva GRIL, Arndt HAMPE, Tommaso JUCKER, David H KLINGES, Irena A KOELEMEIJER, Jonas J LEMBRECHTS, Ronan MARREC, Camille MEEUSSEN, Jérôme OGÉE, Vilna TYYSTJÄRVI, Pieter VANGANSBEKE a Kristoffer HYLANDER, 2021b. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology* [online]. **27**(11), 2279–2297. ISSN 1354-1013. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/gcb.15569

DE FRENNE, Pieter, Francisco RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, David Anthony COOMES, Lander BAETEN, Gorik VERSTRAETEN, Mark VELLEN, Markus BERNHARDT-RÖMERMANN, Carissa D. BROWN, Jörg BRUNET, Johnny CORNELIS, Guillaume M. DECOCQ, Hartmut DIERSCHKE, Ove ERIKSSON, Frank S. GILLIAM, Radim HÉDL, Thilo HEINKEN, Martin HERMY, Patrick HOMMEL, Michael A. JENKINS, Daniel L. KELLY, Keith J. KIRBY, Fraser J.G. MITCHELL, Tobias NAAF, Miles NEWMAN, George PETERKEN, Petr PETŘÍK, Jan SCHULTZ, Grégory SONNIER, Hans VAN CALSTER, Donald M. WALLER, Gian Reto WALTHER, Peter S. WHITE, Kerry D. WOODS, Monika WULF, Bente Jessen GRAAE a Kris VERHEYEN, 2013. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [online]. **110**(46), 18561–18565. ISSN 00278424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1311190110

DE FRENNE, Pieter, Florian ZELLWEGER, Francisco RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, Brett R SCHEFFERS, Kristoffer HYLANDER, Miska LUOTO, Mark VELLEND, Kris VERHEYEN a Jonathan LENOIR, 2019. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution* [online]. **3**(5), 744–749. ISSN 2397-334X. Dostupné z: doi:10.1038/s41559-019-0842-1

D'ORANGEVILLE, Loïc, Daniel HOULE, Louis DUCHESNE, Richard P PHILLIPS, Yves BERGERON a Daniel KNEESHAW, 2018. Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications* [online]. **9**(1), 3213. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-018-05705-4

EDMONDSON, Jill L, Iain STOTT, Zoe G DAVIES, Kevin J GASTON a Jonathan R LEAKE, 2016. Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Scientific Reports*. **6**(1), 1–8. ISSN 2045-2322.

EHBRECHT, Martin, Peter SCHALL, Christian AMMER, Markus FISCHER a Dominik SEIDEL, 2019. Effects of structural heterogeneity on the diurnal temperature range in temperate forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* [online]. **432**, 860–867. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.008

FAO a UNEP, 2020. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. *The State of the World's Forests 2020* [online]. [vid. 2022-12-21]. Dostupné z: doi:10.4060/CA8642EN

FMI, 2023. *Seasons in Finland - Finnish Meteorological Institute* [online] [vid. 2023-02-27]. Dostupné z: https://en.ilmatieteenlaitos.fi/seasons-in-finland
FORMAN, Richard T T a Michel GODRON, 1986. Landscape ecology. *John Wiley & Sons New York*. **4**, 22–28.

GAUTHIER, S, P BERNIER, T KUULUVAINEN, A Z SHVIDENKO a D G SCHEPASCHENKO, 2015. Boreal forest health and global change. *Science* [online]. **349**(6250), 819–822. Dostupné z: doi:10.1126/science.aaa9092

GHOLZ, H. L., K. C. EWEL a R. O. TESKEY, 1990. Water and forest productivity. *Forest Ecology and Management* [online]. **30**(1–4), 1–18 [vid. 2023-02-15]. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/0378-1127(90)90122-R

GILBERT, Neil A, Nicholas M ANICH, Mike WORLAND a Benjamin ZUCKERBERG, 2022. Microclimate complexities at the trailing edge of the boreal forest. *Forest Ecology and Management* [online]. **524**, 120533. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120533

GRIER, Charles G a Steven W RUNNING, 1977. Leaf Area of Mature Northwestern Coniferous Forests: Relation to Site Water Balance. *Ecology* [online]. **58**(4), 893–899. ISSN 0012-9658. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.2307/1936225

GROSSIORD, Charlotte, André GRANIER, Arthur GESSLER, Tommaso JUCKER a Damien BONAL, 2014a. Does Drought Influence the Relationship Between Biodiversity and Ecosystem Functioning in Boreal Forests? *Ecosystems* [online]. **17**(3), 394–404. ISSN 1435-0629. Dostupné z: doi:10.1007/s10021-013-9729-1

GROSSIORD, Charlotte, André GRANIER, Sophia RATCLIFFE, Olivier BOURIAUD, Helge BRUELHEIDE, Ewa CHEĆKO, David Ian FORRESTER, Seid Muhie DAWUD, Leena FINÉR, Martina POLLASTRINI, Michael SCHERER-LORENZEN, Fernando VALLADARES, Damien BONAL a Arthur GESSLER, 2014b. Tree diversity does not always improve resistance of forest ecosystems to drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. **111**(41), 14812–14815. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1411970111

HOLMES, R. M. a A. NELSON DINGLE, 1965. The relationship between the macro- and microclimate. *Agricultural Meteorology* [online]. **2**(2), 127–133 [vid. 2022-12-12]. ISSN 00021571. Dostupné z: doi:10.1016/0002-1571(65)90006-3

HURME, Päivi, Tapani REPO, Outi SAVOLAINEN a Timo PÄÄKKÖNEN, 1997. *Climatic adaptation of bud set and frost hardiness in Scots pine (Pinus sylvestris)* [online]. Dostupné z: www.nrcresearchpress.com

CHEN, J. M. a T. A. BLACK, 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment* [online]. **15**(4), 421–429. ISSN 0140-7791. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x

CHEN, Jiquan, Sari C. SAUNDERS, Thomas R. CROW, Robert J. NAIMAN, Kimberley D. BROSOFSKE, Glenn D. MROZ, Brian L. BROOKSHIRE a Jerry F. FRANKLIN, 1999. Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape EcologyVariations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience* [online]. **49**(4), 288–297 [vid. 2022-12-20]. ISSN 0006-3568. Dostupné z: doi:10.2307/1313612

JAMES ARTHUR LARSEN, 1980. *The boreal ecosystem*. London: Academic Press, Inc. ISBN 9780124368804.

JONCZAK, Jerzy, Urszula JANKIEWICZ, Marek KONDRAS, Bogusława KRUCZKOWSKA, Lidia OKTABA, Jarosław OKTABA, Izabella OLEJNICZAK, Edyta PAWŁOWICZ, Nora POLLÁKOVÁ, Thomas RAAB, Edyta REGULSKA, Sandra SŁOWIŃSKA a Magdalena SUT-LOHMANN, 2020. The influence of birch trees (Betula spp.) on soil environment – A review. *Forest Ecology and Management* [online]. **477**, 118486. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118486

KAYES, Imrul a Azim MALLIK, 2020. Boreal Forests: Distributions, Biodiversity, and Management. In: Walter LEAL FILHO, Anabela Marisa AZUL, Luciana BRANDLI, Amanda LANGE SALVIA a Tony WALL, ed. *Life on Land* [online]. Cham: Springer International Publishing, s. 1–12. ISBN 978-3-319-71065-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-71065-5_17-1

KELLOMÄKI, Seppo, Heli PELTOLA, Tuula NUUTINEN, Kari T KORHONEN a Harri STRANDMAN, 2008. Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. **363**(1501), 2339–2349. ISSN 0962-8436.

KULJU, Irma, Tuomas NIINISTÖ, Aarre PELTOLA, Minna RÄTY, Tiina SAUVULA-SEPPÄLÄ, Jukka TORVELAINEN, Esa UOTILA a Eeva VAAHTERA, 2023. Metsätilastollinen vuosikirja 2022. ISSN 9523805843.

LAURILA, Tuomas, Hannele HAKOLA, Virpi LINDFORS, Janne RINNE, Rainer STEINBRECHER, Jürgen KESSELMEIER, Robert JANSON a Seppo KELLOMÄKI, 1996. Biogenic VOC emissions and photochemistry in the boreal regions of Europe. LINDENMAYER, David, Wade BLANCHARD, Lachlan MCBURNEY, Elle BOWD, Kara YOUNGENTOB, Karen MARSH a Chris TAYLOR, 2022. Stand age related differences in forest microclimate. *Forest Ecology and Management* [online]. **510**, 120101 [vid. 2022-12-15]. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/J.FORECO.2022.120101

LITSCHMANN, Tomáš a Pavel HADAŠ, 2003. MIKROKLIMA VYBRANÝCH POROSTNÍCH STANOVIŠŤ. 59–65.

MACLEAN, Ilya M D, James P DUFFY, Stef HAESEN, Sanne GOVAERT, Pieter DE FRENNE, Thomas VANNESTE, Jonathan LENOIR, Jonas J LEMBRECHTS, Marcus W RHODES a Koenraad VAN MEERBEEK, 2021. On the measurement of

microclimate. *Methods in Ecology and Evolution* [online]. **12**(8), 1397–1410. ISSN 2041-210X. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/2041-210X.13627

MEIER, Ina C a Christoph LEUSCHNER, 2008. Leaf Size and Leaf Area Index in Fagus sylvatica Forests: Competing Effects of Precipitation, Temperature, and Nitrogen Availability. *Ecosystems* [online]. **11**(5), 655–669. ISSN 1435-0629. Dostupné z: doi:10.1007/s10021-008-9135-2

MONIN, Andreĭ Sergeevich a Aleksandr Mikhaĭlovich OBUKHOV, 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*. **151**(163), e187.

MORECROFT, M D, M E TAYLOR a H R OLIVER, 1998. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. **90**(1), 141–156. ISSN 0168-1923. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00070-1

NEUNER, Susanne, Axel ALBRECHT, Dominik CULLMANN, Friedrich ENGELS, Verena C GRIESS, W Andreas HAHN, Marc HANEWINKEL, Fabian HÄRTL, Christian KÖLLING, Kai STAUPENDAHL a Thomas KNOKE, 2015. Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. *Global Change Biology* [online]. **21**(2), 935–946. ISSN 1354-1013. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/gcb.12751

NISSINEN, Katri, Virpi VIRJAMO, Antti KILPELÄINEN, Veli Pekka IKONEN, Laura PIKKARAINEN, Iida Liina ÄRVÄS, Sara KIRSIKKA-AHO, Anna PELTONEN, Norul SOBUJ, Unnikrishnan SIVADASAN, Xiao ZHOU, Zhen Ming GE, Timo SALMINEN, Riitta JULKUNEN-TIITTO a Heli PELTOLA, 2020. Growth responses of Boreal Scots Pine, Norway Spruce and silver birch seedlings to simulated climate warming over three growing seasons in a controlled field experiment. *Forests* [online]. **11**(9). ISSN 19994907. Dostupné z: doi:10.3390/F11090943

PEJCHAL, Miloš a Oldřich MAUER, 2013. Architektura kořenového systému stromů.
PODRÁZSKÝ, Vilém, 2014. *Základy ekologie lesa*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2515-9.

PORTÉ, Annabel, Frédéric HUARD a Philippe DREYFUS, 2004. Microclimate beneath pine plantation, semi-mature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. **126**(1), 175–182. ISSN 0168-1923. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.06.001

PROJECT FUNDIVEEUROPE, 2010. *FunDivEUROPE _ Functional significance of forest biodiversity in Europe* [online] [vid. 2020-06-08]. Dostupné z: http://project.fundiveurope.eu/
PUHE, Joachim, 2003. Growth and development of the root system of Norway spruce (Picea abies) in forest stands—a review. *Forest Ecology and Management* [online]. **175**(1), 253–273. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00134-2

ROSENBERG, N J, B L BLAD a S B VERMA, 1983. *Microclimate: The Biological Environment* [online]. B.m.: Wiley. A Wiley-Interscience publication. ISBN 9780471060666. Dostupné z: https://books.google.ch/books?id=c6MI6VvTqTsC

SAXE, Henrik, Melvin G.R. CANNELL, Øystein JOHNSEN, Michael G. RYAN a George VOURLITIS, 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* [online]. **149**(3), 369–400. ISSN 0028646X. Dostupné z: doi:10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x

SCHARENBROCH, B C a J G BOCKHEIM, 2007. Impacts of forest gaps on soil properties and processes in old growth northern hardwood-hemlock forests. *Plant and Soil* [online]. **294**(1), 219–233. ISSN 1573-5036. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-007-9248-y

SCHMITT, Uwe, Risto JALKANEN, Dieter Eckstein SCHMITT, U JALKANEN a R & ECKSTEIN, 2004. *Cambium Dynamics of Pinus sylvestris and Betula spp. in the Northern Boreal Forest in Finland*.

SUBRAMANIAN, Narayanan, Johan BERGH, Ulf JOHANSSON, Urban NILSSON a Ola SALLNÄS, 2015. Adaptation of forest management regimes in southern Sweden to increased risks associated with climate change. *Forests*. **7**(1), 8. ISSN 1999-4907.

TER STEEGE, Hans, 2018. Hemiphot. R: Free R scripts to analyse hemispherical photographs for canopy openness, leaf area index and photosynthetic active radiation under forest canopies. *Unpublished report. Naturalis Biodiversity Center, Leiden, The Netherlands*.

TESKE, Milton E a Harold W THISTLE, 2004. A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecology and Management* [online]. **198**(1), 341–350. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.031 TOMST S.R.O., [b.r.]. *TOMST* [online] [vid. 2023-03-14]. Dostupné z: https://tomst.com/web/cz/

VANWALLEGHEM, T a R K MEENTEMEYER, 2009. Predicting Forest Microclimate in Heterogeneous Landscapes. *Ecosystems* [online]. **12**(7), 1158–1172. ISSN 1435-0629. Dostupné z: doi:10.1007/s10021-009-9281-1

VON ARX, Georg, Elisabeth GRAF PANNATIER, Anne THIMONIER a Martine REBETEZ, 2013. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *Journal of Ecology* [online]. **101**(5), 1201–1213. ISSN 0022-0477. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1111/1365-2745.12121

WILD, Jan, Martin KOPECKÝ, Martin MACEK, Martin ŠANDA, Jakub JANKOVEC a Tomáš HAASE, 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. **268**(July 2018), 40–47. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2018.12.018

ZELLWEGER, Florian, David COOMES, Jonathan LENOIR, Leen DEPAUW, Sybryn L. MAES, Monika WULF, Keith J. KIRBY, Jörg BRUNET, Martin KOPECKÝ, František MÁLIŠ, Wolfgang SCHMIDT, Steffi HEINRICHS, Jan DEN OUDEN, Bogdan JAROSZEWICZ, Gauthier BUYSE, Fabien SPICHER, Kris VERHEYEN a Pieter DE FRENNE, 2019. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography* [online]. **28**(12), 1774–1786 [vid. 2022-12-16]. ISSN 1466-8238. Dostupné z: doi:10.1111/GEB.12991

ZELLWEGER, Florian, Pieter DE FRENNE, Jonathan LENOIR, Pieter VANGANSBEKE, Kris VERHEYEN, Markus BERNHARDT-RÖMERMANN, Lander BAETEN, Radim HÉDL, Imre BERKI, Jörg BRUNET, Hans VAN CALSTER, Markéta CHUDOMELOVÁ, Guillaume DECOCQ, Thomas DIRNBÖCK, Tomasz DURAK, Thilo HEINKEN, Bogdan JAROSZEWICZ, Martin KOPECKÝ, František MÁLIŠ, Martin MACEK, Marek MALICKI, Tobias NAAF, Thomas A NAGEL, Adrienne ORTMANN-AJKAI, Petr PETŘÍK, Remigiusz PIELECH, Kamila RECZYŃSKA, Wolfgang SCHMIDT, Tibor STANDOVÁR, Krzysztof ŚWIERKOSZ, Balázs TELEKI, Ondřej VILD, Monika WULF a David COOMES, 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science* [online]. **368**(6492), 772–775. Dostupné z: doi:10.1126/science.aba6880

ZHANG, Shengmin, | DRIES, Landuyt | KRIS VERHEYEN a Pieter DE FRENNE, 2022. Tree species mixing can amplify microclimate offsets in young forest plantations. *J Appl Ecol* [online]. **59**, 1428–1439 [vid. 2022-12-14]. Dostupné z: doi:10.1111/1365-2664.14158

ZHU, Kai, Christopher W WOODALL a James S CLARK, 2012. Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change. *Global Change Biology*. **18**(3), 1042–1052. ISSN 1354-1013.