

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ekologie lesa



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Vliv diverzity dřevin na variabilitu mikroklimatu
boreálního lesa ve Finsku**

Bakalářská práce

Robert Sladký

doc. Ing. Radim Matula, Ph.D.

2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Robert Sladký

Lesnictví

Ochrana a pěstování lesních ekosystémů

Název práce

Vliv diverzity dřevin na variabilitu mikroklimatu boreálního lesa ve Finsku

Název anglicky

The effects of tree diversity on microclimate variability of boreal forests in Finland

Cíle práce

Severské oblasti boreálních lesů patří k nejvíce zasaženým globálním oteplováním. Stromové patro lesů však může významně omezit negativní dopady oteplování na mikroklima v podrostu, který je domovem většiny lesních organismů, čímž snižuje dopady na biodiverzitu a stabilitu těchto lesů. Diverzita stromového patra má významný vliv na fungování lesních ekosystémů a její zvyšování může pravděpodobně posílit mikroklimatické funkce lesů, avšak doposud chybějí empirické informace o tom, jak hlavní dřeviny boreálního lesa v různých úrovních diverzity ovlivňují lesní mikroklima v severní Evropě. Cílem práce bude využít síť trvalých výzkumných ploch v okolí města Joensuu v Severní Karélii (Finsko), kde dlouhodobě probíhají mikroklimatická měření, pro zjištění, jak hlavní druhy dřevin a jejich vzájemné kombinace ovlivňují teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkosti v podrostu lesních porostů s rozdílnou druhovou bohatostí.

Metodika

Měření budou prováděna pomocí mikroklimatických čidel TMS4 na síti ploch FunDivEUROPE (1 čidlo na plochu) v okolí Joensuu ve Finsku. Tyto plochy zahrnují hlavní dřeviny boreálních lesů severní Evropy: břízu bělokorou (*Betula pendula*), smrk ztepilý (*Picea abies*) a borovice lesní (*Pinus sylvestris*) a to jak v monokulturách, tak i ve vzájemných, 1-3 druhových směsích. V rámci bakalářské práce budou výzkumné plochy navštíveny, zkontrolována a případně doinstalována čidla a stažena data.

Získaná data budou vyčištěna a analyzována v programu R pomocí balíčku PLOTer. V první fázi budou vypočítány průměry, maxima, minima a variabilita v rámci vybraných časových období (např. denní či měsíční průměry teplot a maxima během vegetační sezóny, půdní vlhkost v létě apod.). Tyto proměnné pak budou použity jako závislé proměnné pro modely, do kterých budou jako nezávislé proměnné zahrnuty zastoupení jednotlivých druhů dřevin, druhová bohatost a diverzita dřevin lesních porostů. Na základě těchto výsledků pak budou formulována praktická doporučení ohledně optimální druhové skladby lesů pro podporu mikroklimatických funkcí lesa.

Harmonogram

květen–září 2023: sběr dat v terénu

květen–listopad 2023: studium literatury, formulace cílů, konzultace

září–prosinec 2023: analýzy dat, tvorba výsledků

leden–duben 2023: psaní práce, finalizace výsledků a textů



Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

mikroklima, druhová skladba lesa, klimatická změna, boreální lesa,

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.
- Bonal, D., Gessler, A., Grossiord, C., Granier, A., Jucker, T., 2013. Does Drought Influence the Relationship Between Biodiversity and Ecosystem Functioning in Boreal Forests? *Ecosystems* 17, 394–404.
- Boulanger, Y., Taylor, A.R., Price, D.T., Cyr, D., Sainte-Marie, G., 2018. Stand-level drivers most important in determining boreal forest response to climate change. *J. Ecol.* 106, 977–990.
- Haesen, S., Lembrechts, J. J., De Frenne, P., Lenoir, J., Aalto, J., Ashcroft, M. B., Kopecký, M., Luoto, M., Maclean, I., Nijs, I., Niittynen, P., van den Hoogen, J., Arriga, N., Brůna, J., Buchmann, N., Čiliak, M., Collalti, A., De Lombaerde, E., Descombes, P., ... Van Meerbeek, K. (2021). ForestTemp – Sub-canopy microclimate temperatures of European forests. *Global Change Biology*, September, 6307–6319.
- Lembrechts, J. J., van den Hoogen, J., Aalto, J., Ashcroft, M. B., De Frenne, P., Kemppinen, J., Kopecký, M., Luoto, M., Maclean, I. M. D., Crowther, T. W., Bailey, J. J., Haesen, S., Klings, D. H., Niittynen, P., Scheffers, B. R., Van Meerbeek, K., Aartsma, P., Abdalaze, O., Abedi, M., ... Lenoir, J. (2022). Global maps of soil temperature. *Global Change Biology*, 28(9), 3110–3144.
- 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 understory temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, February, 1–13.
- Zhang, S., Landuyt, D., Verheyen, K., & De Frenne, P. (2022). Tree species mixing can amplify microclimate offsets in young forest plantations. *Journal of Applied Ecology*, 59(6), 1428–1439.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Radim Matula, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ekologie lesa

Elektronicky schváleno dne 6. 9. 2023

prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 1. 2024

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: *Vliv diverzity dřevin na variabilitu mikroklimatu boreálního lesa ve Finsku* vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

V první řadě bych rád vyjádřil svou upřímnou vděčnost doc. Ing. Radimovi Matulovi, Ph.D. za jeho cenné rady, trpělivost, osobní přístup a čas, který mi během vypracování závěrečné práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za jejich trvalou oporu, povzbuzení a porozumění, které mi pomáhalo překonávat výzvy studia.

Vliv diverzity dřevin na variabilitu mikroklimatu boreálního lesa ve Finsku

Abstrakt

Změna klimatu stále více ovlivňuje lesní ekosystémy. Předpokládá se, že průměrné teploty v boreálních oblastech vzrostou až o 5 °C během příštích 100 let. Stromové patro má však schopnost tlumit okolní extrémní makroklimatu, a tím vytvářet specifické mikroklima v lesním podrostu. Určení vztahu mezi diverzitou dřevin a mikroklimatickými charakteristikami v boreálních lesích je klíčové pro pochopení fungování těchto ekosystémů. Cílem této bakalářské práce bylo pomocí mikroklimatických čidel TMS4 určit, jak hlavní dřeviny boreálních oblastí – smrk ztepilý (*Picea abies*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), bříza bělokorá (*Betula pendula*) a jejich vzájemné směsi, ovlivňují teplotu vzduchu, teplotu půdy a vlhkost půdy. Měření bylo realizováno mezi roky 2018 až 2022 na 28 výzkumných plochách v rámci projektu FunDivEUROPE ve východním Finsku. Výsledky této práce ukázaly, že porosty s nejvyšší diverzitou dřevin vykazují nejlepší schopnost zadržovat půdní vlhkost. Ojedinelou odchylku tvořily borové monokultury, které byly průměrně vlhčí než smíšené porosty. Největší tendenci k vysychání měly smrkové porosty. Březové porosty vykazovaly vyšší půdní teploty. Nejnižší teploty vzduchu byly naměřeny ve smrkových monokulturách. Z výzkumu vyplynulo, že lesy s vyšší druhovou diverzitou mají tendenci udržovat vyšší míru půdní vlhkosti a zároveň nižší teploty vzduchu. Toto zjištění poukazuje na význam diverzity dřevin pro odolnost lesních ekosystémů vůči změně klimatu.

Klíčová slova: mikroklima, druhová skladba lesa, změna klimatu, boreální les, FunDivEUROPE

The effects of tree diversity on microclimate variability of boreal forests in Finland

Abstract

Climate change is increasingly affecting forest ecosystems. Average temperatures in boreal regions are projected to rise by up to 5 °C over the next 100 years. However, the tree canopy has the ability to buffer the surrounding macroclimate extremes, thus creating a specific microclimate in the forest understory. Determining the relationship between tree diversity and microclimatic characteristics in boreal forests is crucial for understanding the functioning of these ecosystems. The aim of this bachelor thesis was to use TMS4 microclimatic sensors to determine how the main tree species in the boreal regions - Norway spruce (*Picea abies*), Scots pine (*Pinus sylvestris*), silver birch (*Betula pendula*) and their mixtures influence air temperature, soil temperature and soil moisture. The measurements were implemented between 2018 and 2022 at 28 research plots within the FunDivEUROPE project in eastern Finland. The results of this thesis showed that stands with the highest tree diversity have the greatest ability to retain soil moisture. A rare deviation were pine monocultures, which were on average more humid than mixed stands. Spruce stands had the highest tendency to dry out. Birch stands showed higher soil temperatures. The lowest air temperatures were measured in spruce monocultures. The research indicated that forests with higher species diversity have a greater tendency to maintain higher soil moisture levels and simultaneously lower air temperatures. This finding highlights the importance of tree species diversity for the resilience of forest ecosystems to climate change.

Keywords: microclimate, forest species composition, climate change, boreal forest, FunDivEUROPE

Obsah

1	ÚVOD	10
2	CÍLE PRÁCE	12
3	LITERÁRNÍ REŠERŠE	13
3.1	LESNÍ MIKROKLIMA	13
3.1.1	<i>Faktory ovlivňující lesní mikroklima</i>	13
3.2	BOREÁLNÍ LES	14
3.2.1	<i>Les v boreální oblasti severní Evropy</i>	15
3.2.2	<i>Vliv globálního oteplování na boreální lesy</i>	16
4	METODIKA	18
4.1	POPIS STUDOVANÉ OBLASTI.....	18
4.2	POPIS SBĚRU DAT	23
4.2.1	<i>Mikroklimatická čidla</i>	23
4.3	ANALÝZA DAT	25
5	VÝSLEDKY	27
5.1	PŮDNÍ VLHKOST.....	27
5.2	TEPLOTA T1.....	30
5.3	TEPLOTA T2.....	34
5.4	TEPLOTA T3.....	37
6	DISKUZE	41
6.1	PŮDNÍ VLHKOST.....	41
6.2	TEPLOTY PŮDY T1 A T2.....	42
6.3	TEPLOTA VZDUCHU T3	43
6.4	OPTIMALIZACE LESNÍCH EKOSYSTÉMŮ V KONTEXTU ZMĚN KLIMATU	44
7	ZÁVĚR	45
8	SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	47

1 Úvod

Globální oteplování je stále závažnějším tématem ve společnosti. Teplota vzduchu u zemského povrchu se v období od roku 1880 do roku 2018 zvýšila o 1,4 °C (IPPC, 2022). Antropogenní činností, včetně emisí skleníkových plynů způsobených spalováním fosilních paliv, průmyslovou výrobou, intenzivním zemědělstvím a odlesňováním, dochází ke globálnímu oteplování a klimatickým změnám. Avšak lesy mají potenciál klimatickou změnu zmírnit. Boreální lesy pokrývají okolo 11 % povrchu Země a jsou důležitým suchozemským uložištěm uhlíku. V nedávné době se však nejen v těchto oblastech vyskytují stále častěji rozsáhlé požáry a kalamity způsobené invazí hmyzích škůdců. Negativní projevy jsou způsobeny zvýšením průměrných ročních teplot a prodloužením období sucha. Lesní ekosystémy se budou muset adaptovat nejen na změny průměrných klimatických podmínek, ale i na zvýšenou variabilitu a větší riziko extrémních klimatických jevů, jako jsou dlouhotrvající období sucha, bouře a povodně (Lindner et al., 2010). Rozsáhlé disturbance mohou výrazně narušit strukturu lesních ekosystémů. Strukturní rozmanitost lesa a složení lesních společenstev jsou klíčové faktory pro vytváření lesního mikroklimatu. Pokud disturbance naruší variabilitu ve struktuře nebo druhovou skladbu dřevin v porostu, může dojít k významné změně mikroklimatických podmínek lesního prostředí v důsledku změn teploty půdy, obsahu vody v půdě a dostupnosti světla (Atkins et al., 2023). Význam mikroklimatu si ekologové a lesníci uvědomují již dlouho a mikroklima je stále více považováno za důležitý regulátor biotických reakcí na antropogenní změny klimatu (Zellweger et al., 2019). Avšak současný ekologický výzkum pracuje většinou s daty ze standardizovaných meteorologických stanic, jejichž teplotní senzory jsou umístěny ve výšce 2 m nad zemským povrchem a zároveň jsou chráněny před přímým slunečním zářením (Lembrechts et al., 2020), tudíž neodpovídají klimatickým podmínkám v lesním podrostu. Mikroklima se však pravděpodobně neprojevuje nikde tak zřetelně jako v lesních ekosystémech, kde je množství slunečního světla dopadajícího na zemský povrch silně ovlivněno v důsledku strukturální složitosti stromových korun a značných rozdílů v evapotranspiračním ochlazování (Haesen et al., 2021). V tomto ohledu je klíčové vycházet z dat, které odrážejí reálné stanovištní podmínky. Předkládaná bakalářská práce, na rozdíl od výše zmíněných ekologických pozorování, vychází z dat naměřených mikroklimatickými čidly, jež jsou konstruována tak, aby co nejlépe zaznamenala podmínky lesního prostředí. Tato práce se zaměřuje na analýzu vlivu

diverzity dřevin na mikroklimatické charakteristiky boreálního lesního prostředí ve východním Finsku, s cílem porozumět interakcím mezi dřevinnou skladbou porostu a mikroklimatickými proměnnými.

2 Cíle práce

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit, jaké mikroklima panovalo mezi roky 2018 až 2022 v boreálním lese ve východním Finsku v okolí města Joensuu v porostech smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) H. Karst), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), břízy bělokoré (*Betula pendula* Roth) a jejich vzájemných směsích. Cílem práce bylo rovněž zjistit, jak tyto dřeviny a jejich směsi ovlivňují vlhkost půdy, teplotu půdy a teplotu vzduchu v jejich podrostu. V neposlední řadě bylo cílem vyhodnotit, jak tyto mikroklimatické proměnné ovlivňuje rostoucí diverzita stromového patra, tj. rostoucí počet druhů dřevin v porostu.

3 Literární rešerše

3.1 Lesní mikroklima

Chen et al. (2006) definují mikroklima jako soubor klimatických podmínek měřených v oblastech lokalizovaných poblíž zemského povrchu. Sledované klimatické podmínky zahrnují teplotu, světlo, rychlost větru a vlhkost půdy i vzduchu. V případě lesních porostů ovlivňuje mikroklima též hustota stromů, index listové plochy (LAI) a typ porostu (Aussenac, 2000). Struktura lesa má vliv na množství slunečního záření, které pronikne do porostu, ale také na intercepci srážek, což přímo ovlivňuje mikroklimatické podmínky pod korunami stromů a nepřímo i v lesní půdě (Aalto et al., 2023). Dle Zellwegera et al. (2019) představují rozdíly ve struktuře, složení a topografické poloze lesa zásadní proměnnou pro mikroklima. Podstatně mohou ovlivňovat růst, přežívání a reprodukční úspěšnost lesních organismů a celkovou funkci lesa.

3.1.1 Faktory ovlivňující lesní mikroklima

Dle Aussenaca (2000) patří mezi nejdůležitější faktory mající vliv na mikroklima teplota, světlo a voda. Aalto et al. (2023) zmiňují vedle těchto abiotických faktorů také způsob lesního hospodaření, jež může významně proměňovat strukturu i druhovou bohatost lesů.

Na intenzitu slunečního záření má v oblastech s výraznými změnami podnebí vliv vertikální a horizontální uspořádání a rozmístění korun v porostu, tedy například mezery mezi jednotlivými stromy, věková struktura porostu, shlukování listů či vzdálenost od okraje lesa (De Frenne et al., 2021). Koruny stromů redukují množství slunečního záření, mění složení slunečního záření v různých částech spektra a mají vliv na kvalitu radiace. Úroveň snížení slunečního záření je determinována jak LAI, tak charakteristikami určujícími postavení a rozložení listů v porostu (Aussenac, 2000). Breda a Granier (1996) definují LAI jako poměr listové plochy ku rozloze dané lokality. Čím vyšší LAI a čím hustší a starší porost, tím je lesní mikroklima chladnější, jelikož část dopadajícího krátkovlnného slunečního záření je pohlcena či odražena korunami stromů (Aussenac, 2000; De Frenne et al., 2019).

Vegetace ovlivňuje také teplotu půdy a vzduchu. Dle Aussenaca (2000) lze všeobecně konstatovat, že lesní půdy vykazují v zimě vyšší teploty a v létě nižší teploty

ve srovnání s půdami mimo les. De Frenne et al. (2021) rovněž uvádějí, že struktura vegetace ovlivňuje výměnu tepla mezi lesem a bezlesí, čímž způsobuje horizontální rozdíly v tlumení okolních teplot. Von Arx et al. (2013) tvrdí, že korunový zápoj více ovlivňuje teplotu půdy nežli teplotu vzduchu, jelikož vzduch proudí a mísí se se vzduchem na otevřeném prostranství.

Přítomnost lesního porostu také ovlivňuje množství intercepce srážek dřevinami. Aussenac (2000) uvádí, že intercepce srážek v uzavřených porostech je vysoká a může dosáhnout 30 až 45 % ročních srážek. Ve srovnání s lesním porostem, samotný travní porost dokáže zachytit pouze 4 až 5 % srážek. Vlhkost půdy je ovlivněna LAI. Lesní porosty s hustým zápojem transpirují více vody než porosty s řídkým či žádným zápojem (Von Arx et al., 2013).

Mikroklima lesa představuje důležitý faktor vzájemné interakce mezi druhy. Nedostatek světla a různorodá vlhkost půdy mohou zvýšit konkurenci mezi rostlinami. Na druhou stranu mikroklima může mít pozitivní vliv na podrost. Například koruny stromů poskytují ochranu semenáčkům smíšených druhů před extrémními teplotami (De Frenne et al., 2021).

3.2 Boreální les

Boreální les je druhým nejrozsáhlejším suchozemským biotem na Zemi (Elbakidze et al., 2013). Vyskytuje se ve vysokých zeměpisných šířkách severní části zeměkoule, většinou mezi 50° s. š. až 65° s. š. (Hayes et al., 2022). Tento biot pokrývá přibližně 11 % povrchu Země (Boonstra et al., 2016) a skoro 30 % světové rozlohy lesů se nachází právě v boreálních oblastech (Gauthier et al., 2015).

V relativně častých cyklech se v boreálních lesích vyskytují rozsáhlé disturbance, jako jsou požáry a epidemie hmyzích škůdců (Hayes et al., 2022). Pro lesy v boreálních oblastech jsou také charakteristická krátká vegetační období, která začínají koncem května a trvají do září. V průběhu vegetačního období se teploty pohybují v rozmezí 10–15 °C. Během zimních období, které trvají po dobu 6 až 8 měsíců, teploty klesají hluboko pod bod mrazu. Díky těmto klimatickým podmínkám tvoří permafrost přibližně třetinu celkové rozlohy tohoto biotu (Gauthier et al., 2015).

Hayes et al. (2022) uvádí, že navzdory nízké hustotě osídlení v celé boreální oblasti, zhruba dvě třetiny její rozlohy jsou nějakým způsobem obhospodařovány, převážně za

účelem těžby dřeva. Severské země disponují vysoce mechanizovaným a výkonným lesním průmyslem. Dle Gauthiera et al. (2015) více než 33 % řeziva a 25 % papíru na exportním trhu pochází z boreálních oblastí.

3.2.1 Les v boreální oblasti severní Evropy

Boreální les se v Evropě vyskytuje v Norsku, Švédsku, Finsku, Ruské federaci a ve Skotsku (Elbakidze et al., 2013). Největší část z evropského boreálního lesa se nachází ve Fennoskandinávii, tedy na území Norska, Švédska a Finska (Esseen et al., 1997).

Stromové patro boreálního lesa je relativně homogenní. Kvůli specifickým klimatickým podmínkám zde převládají jehličnany. V boreální oblasti dominuje především smrk ztepilý a borovice lesní. Borovice typicky představuje převládající druh na suchých půdách v regionech s kontinentálním klimatem a častými požáry. Naopak, smrk je dominantní na mezických a vlhkých půdách v oblastech s oceánským klimatem a v prostředí s nižší frekvencí požárů (Esseen et al., 1997). Z listnatých dřevin se zde vyskytuje především bříza bělokorá a v menší míře také topol osika (*Populus tremula*) (Boonstra et al., 2016). V nižších etážích se také občas nachází jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia*) či vrba jíva (*Salix caprea*).

Oproti ostatním boreálním oblastem, pro Fennoskandinávii je typický malý význam keřů v lesním ekosystému. Pokud se zde keřové patro vyskytuje, je tvořeno převážně malými potlačenými stromy (Hayes et al., 2022). Boonstra et al. (2016) ve své studii uvádějí, že s výjimkou úzkých ekotonů podél říčních koryt, ve Fennoskandinávii vrstva vysokých keřů chybí. Také tvrdí, že v těchto oblastech tvoří vegetaci v podrostu převážně zakrslé keře, hlavně druhy z čeledi vřesovcovité (*Ericaceae*) jako je brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus*), brusnice brusinka (*Vaccinium vitis-idaea*) a šicha oboupohlavná (*Empetrum hermaphroditum*). Také zmiňují hojný výskyt sobích lišejníků (*Cladonia spp.*) a různých druhů mechů (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, *Ptilium crista-castrensis*).

V boreálních lesních ekosystémech severních regionů tvoří významnou herbivorní složku populace losa evropského (*Alces alces*). Mezi menšími a středně velkými býložravci, kteří obývají tyto oblasti, figurují například zajíc bělák (*Lepus timidus*) a veverka obecná (*Sciurus vulgaris*). Mezi významné predátory v severních boreálních lesích patří liška obecná (*Vulpes vulpes*), rys ostrovid (*Lynx lynx*) a vlk obecný (*Canis lupus*) (Boonstra et al., 2016).

3.2.2 Vliv globálního oteplování na boreální lesy

Změna klimatu stále více ovlivňuje lesní ekosystémy (Remeš et al., 2020). Studie Lindnerera et al. (2010) ukazuje, že lesní ekosystémy se vyznačují zvláštní citlivostí na klimatické změny, neboť dlouhý životní cyklus stromů brání rychlé adaptaci na proměny okolního prostředí.

Více než 80 % celkové rozlohy Finska pokrývají boreální lesy (Kellomäki et al., 2001). Kellomäki et al. (2001) uvádějí prognózu navýšení průměrné roční teploty během příštích 100 let o 2 až 4 °C. V tomto kontextu lze předpokládat, že globální oteplování povede ke zvýšení produktivity lesů, což bude doprovázeno posunem boreální zóny na sever o 500 až 1000 km. Christensen et al. (2007) ve své studii uvádějí pravděpodobné zvýšení teploty do roku 2100 pro severská boreální pásma až o 4 až 5 °C. V důsledku posunu vegetace směrem k pólům je pravděpodobné, že dojde k expanzi vysokých keřů, které mohou mít vliv na řadu abiotických faktorů, včetně albeda, tepelného toku, výšky a doby trvání sněhové pokrývky (Lantz et al., 2013). Rozsáhlejší sněhová pokrývky v zimním období efektivně izoluje půdu od extrémních mrazů, což má za následek ústup permafrostu (De Frenne et al., 2021).

Dle Thurnera et al. (2014) má vegetace potenciál zmírnit globální oteplování. Hraje důležitou roli v koloběhu uhlíku, jelikož zachycuje atmosférický CO₂, a tím snižuje množství skleníkových plynů v atmosféře. Právě lesy v boreálních oblastech jsou velkým uložištěm uhlíku, regulují koloběh vody a kvalitu půdy. Ekosystémové služby poskytované lesem v boreálních oblastech budou mít značný vliv na zmírňování změny klimatu a přizpůsobování se novým podmínkám (Aalto et al., 2023). Dle Hayese et al. (2022) přibližně třetina celosvětové zásoby uhlíku na souši je uložena v ekosystémech lesů boreálního pásma. Avšak Thurner et al. (2014) uvádějí, že odhady současných zásob uhlíku v boreálních lesích a lesích mírného pásu často vycházejí z neúplných údajů z inventarizace lesů. Tyto postupy častokrát trpí nedostatečným prostorovým rozlišením a vysokou mírou nejistoty.

Podle Jonssona et al. (2019) je biodiverzita rostlin považována za jeden z klíčových determinujících faktorů, který ovlivňuje poskytování ekosystémových služeb. Avšak právě rozmanitost a druhová bohatost jsou faktory citlivé na proměnlivost klimatu (Perez et al., 2016). Složení stromového patra lesů má silný vliv na biodiverzitu podrostu. Dle

Salemaa et al. (2023) zvyšující se podíl listnatých dřevin v jehličnatých porostech má potenciál rozšířit celkovou biologickou rozmanitost boreálních lesních ekosystémů.

Forzieri et al. (2022) ve své studii uvádějí, že odolnost ekosystémů v tropických a suchých oblastech, ale také lesů mírného pásu, výrazně klesá, pravděpodobně v důsledku zvýšeného stresu z nedostatku vody a proměnlivosti klimatu. Naopak tvrdí, že boreální lesy vykazují odlišné lokální vzorce s průměrným trendem zvyšování odolnosti. Tuto změnu lze pravděpodobně přičítat přínosům oteplování a zvýšenému hnojení CO₂, které mohou převážit nepříznivé účinky klimatických změn.

4 Metodika

4.1 Popis studované oblasti

Data byla měřena na 28 výzkumných plochách ve východním Finsku. Tyto výzkumné plochy jsou součástí projektu FunDivEUROPE, jehož hlavním zaměřením je výzkum dopadů biologické diverzity význačných lesních ekosystémů v Evropě na ekologické funkce a služby, včetně aspektů jako produkce dřeva, ukládání uhlíku a retence vody (Project FunDivEUROPE, 2010). Všechny plochy se nacházejí v okolí hlavního města provincie Severní Karélie, Joensuu (obr. 1). Jedná se o lesnický nejvýznamnější oblast ve Finsku, jelikož zde sídlí Evropský lesnický institut a řada lesnických firem. Všechny porosty, které se nacházejí na výzkumných plochách spadají do kategorie hospodářského lesa. Dřevinnou skladbu lesů tvoří převážně borovice lesní, smrk ztepilý a bříza bělokorá. Vegetace podrostu je typická pro boreální les. Vyskytuje se zde hojně brusnice borůvka spolu s brusnicí brusinkou. Vedle toho zde roste mnoho druhů mechu a lišejníků. Výzkumné plochy se vyskytují v nadmořské výšce 80 až 200 metrů nad mořem. Půdním typem výzkumných ploch jsou podzoly (Grossiord et al., 2014).

Tabulka 1. Průměrná roční teplota a srážky z meteorologické stanice Joensuu Linnunlahti zjištěny během let měření (Finnish meteorological institute, 2015a).

	Průměrná teplota (°C)	Průměrné srážky (mm)
2018	4,2	596
2019	4,1	718
2020	5,6	776
2021	3,6	743
2022	4,4	671

Průměrná roční teplota v oblasti Joensuu byla v letech trvání výzkumu následující: v roce 2018 byla průměrná roční teplota 4,2 °C; v roce 2019 4,1 °C; v roce 2020 5,6 °C; v roce 2021 3,6 °C a v roce 2022 4,4 °C, průměrně tedy 4,4 °C stupně (tab. 1; Finnish meteorological institute, 2015a). Průměrné roční srážky v dané lokalitě byly za rok 2018 596 mm, za rok 2019 718 mm, za rok 2020 776 mm, za rok 2021 743 mm a za rok 2022

671 mm. Průměrné roční srážky tedy činí 700,8 mm (tab. 1; Finnish meteorological institute, 2015a).

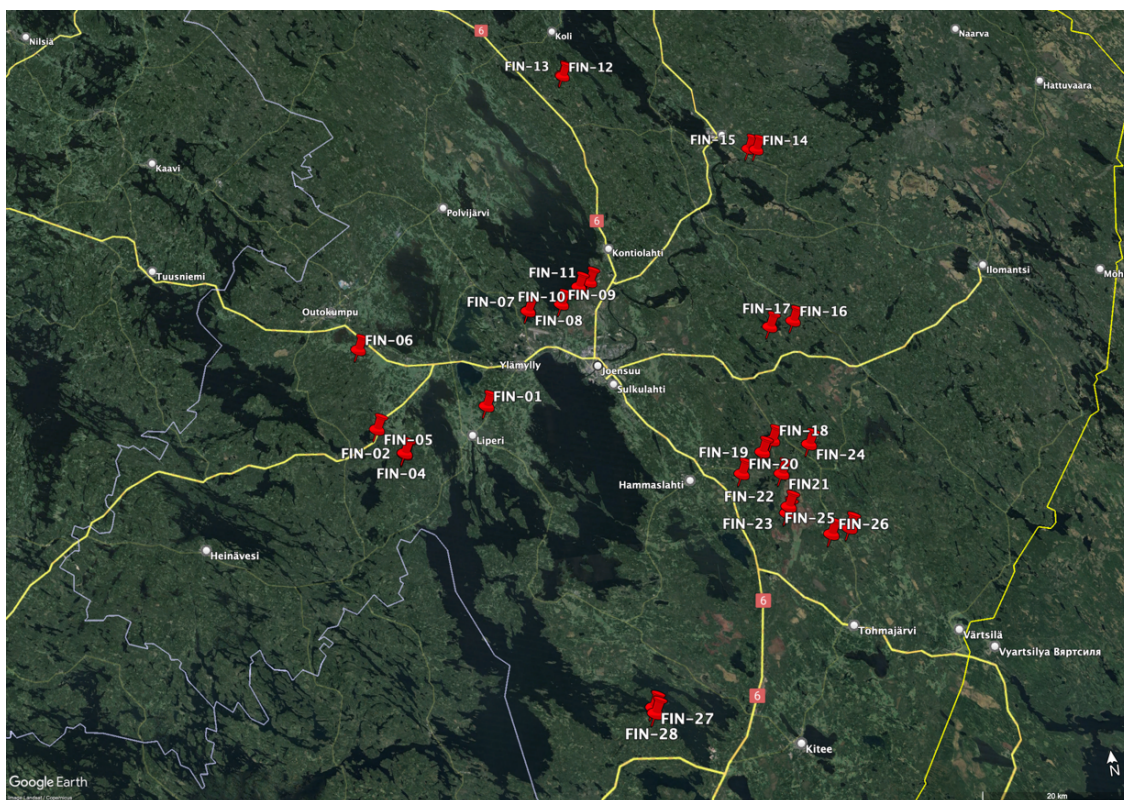
Výzkumné plochy jsou čtvercového tvaru 30 x 30 metrů. Na každé z výzkumných ploch se nachází jedno mikroklimatické půdní čidlo TMS4 (TOMST s.r.o.). Čidla byla na plochy instalována v roce 2017. V rámci práce jsou zpracovány až data z roku 2018, jelikož pro rok 2017 nebyla dostupná všechna potřebná data z vegetační sezóny.

Tabulka 2. Seznam výzkumných ploch s identifikačními čísly mikroklimatických čidel a popisu stromového patra porostu.

Název plochy	ID čidla	Počet druhů dřevin na ploše	Skladba dřevin
FIN-1	94178235	2	smrk-borovice
FIN-2	94178227	2	smrk-bříza
FIN-3	94233817	2	smrk-bříza
FIN-4	94178226	2	smrk-bříza
FIN-5	94178543	2	borovice-bříza
FIN-6	94233816	1	smrk
FIN-7	94178224	1	bříza
FIN-8	94216721	1	bříza
FIN-9	94178242	1	borovice
FIN-10	94178228	1	smrk
FIN-11	94178256	1	bříza
FIN-12	94178250	3	smrk-borovice-bříza
FIN-13	94178225	2	borovice-bříza
FIN-14	94178243	1	borovice
FIN-15	94178223	2	borovice-bříza
FIN-16	94178260	1	borovice
FIN-17	94178231	2	smrk-borovice
FIN-18	94178251	1	smrk
FIN-19	94178244	2	smrk-borovice
FIN-20	94233820	2	smrk-bříza
FIN-21	94178237	1	borovice
FIN-22	94178220	2	smrk-borovice
FIN-23	94178241	1	smrk
FIN-24	94178221	2	smrk-bříza
FIN-25	94178253	3	smrk-borovice-bříza
FIN-26	94178245	3	smrk-borovice-bříza
FIN-27	94178254	2	smrk-borovice
FIN-28	94178232	2	borovice-bříza



Obrázek 1. Mapa znázorňující polohu města Joensuu, v jehož okolí se vyskytují výzkumné plochy (zdroj: [Mapy.cz](https://www.mapy.cz)).



Obrázek 2. Mapa znázorňující polohu výzkumných ploch v okolí města Joensuu (zdroj: [Google Earth](https://www.google.com/earth/)).



Obrázek 3. Monokulturní smrkový porost nacházející se na výzkumné ploše FIN-23.



Obrázek 4. Borový porost, ve kterém se vyskytuje výzkumná plocha FIN-14.

4.2 Popis sběru dat

Výzkumné plochy jsou rozmístěny v blízkosti města Joensuu (obr. 2). Data zpracovaná v této práci byla stažena v září roku 2023. Jednotlivé plochy byly vyhledávány prostřednictvím aplikace Guru Maps, do níž byly zaneseny jejich souřadnice. Rohy výzkumných ploch jsou označeny dřevěnými kolíky natřenými červenou barvou, aby byly snadno identifikovatelné v terénu. Každá plocha má nainstalováno jedno měřící mikroklimatické čidlo (tab. 2). Vedle čidel se na plochách nacházejí také dendrometry, jejichž data však nejsou součástí této práce.

Po příjezdu na výzkumnou plochu byla mikroklimatická čidla zkontrolována, zda jsou mechanicky v pořádku. Pokud byla čidla poškozena, byla vyměněna za nová. Mikroklimatická čidla musela být napojena pomocí USB kabelu k tabletu značky Getac s nainstalovaným softwarem Lolly Manager. Po propojení konektoru čidla a tabletu je v první řadě potřeba aktualizovat systém v čidlech na stejnou verzi, jež je instalována v tabletu. Po kompletním stažení dat z mikroklimatického čidla do tabletu se zobrazí graf znázorňující křivky vývoje vlhkosti a teplot. Z grafu je patrné, zda je čidlo funkční či ne. V případě nefunkčnosti čidla dochází k nahrazení novým.

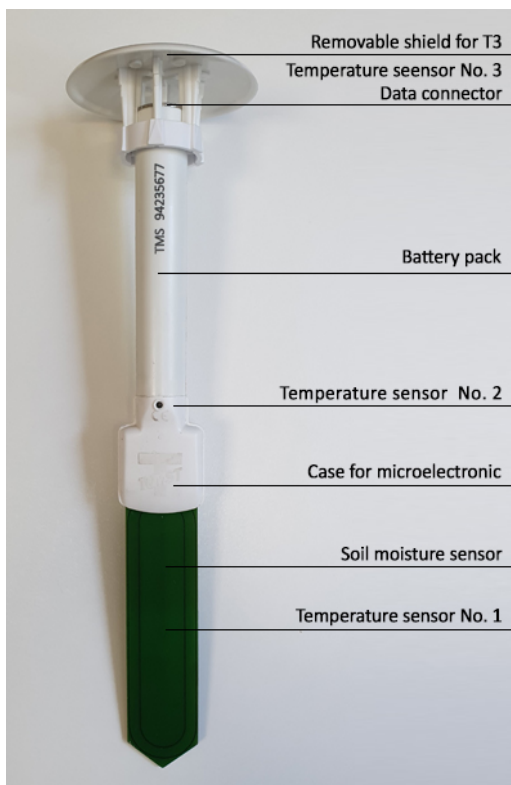
4.2.1 Mikroklimatická čidla

K měření vlhkosti půdy a teplot na výzkumných plochách byla využita mikroklimatická čidla TMS4, které vyrábí firma TOMST s.r.o. Čidla jsou navržena tak, aby napodobovala byliny, a tudíž dokázala co nejlépe měřit mikroklima stanoviště (Wild et al., 2019).

Přístroj je opatřen třemi teplotními senzory v různých výškách, přičemž dva ze senzorů měří teplotu půdy. Senzor teploty vzduchu se nachází ve výšce 15 cm nad zemí (T3). Jeden ze senzorů měřící půdní teplotu je umístěn těsně pod povrchem (T2) a druhý se vyskytuje v hloubce 10 cm (T1; obr. 5). Půdní čidlo se skládá z nadzemní a podzemní části. Na konci nadzemní části (ve výšce 15 cm) se nachází konektor na stahování dat. Vrchní část čidla je zakryta ochranným plastovým kloboučkem, aby nedocházelo k poškození konektoru a k vystavení teplotního senzoru přímému slunečnímu záření, a tudíž ke zkreslení dat (obr. 6). V podzemní části čidla se kromě již zmiňovaných senzorů měřících teplotu půdy nachází také senzor pro měření vlhkosti půdy (obr. 5). V nadzemní části čidla se nachází lithiová baterie, která má životnost zhruba 10 let. Čidlo je schopné

měřit v teplotách od -60 do +85 °C, avšak v těchto extrémních hodnotách může docházet ke snížení životnosti baterie. Výrobce doporučuje využívat čidla v rozmezích teplot od - 40 do + 60 °C (Wild et al., 2019).

Velkou výhodou mikroklimatických TMS4 čidel je jejich bezúdržbové fungování. Hlavní nebezpečí tak představuje poškození čidel divokou zvěří. U těchto čidel je možné nastavit intervaly snímání dat, přičemž délka intervalů má následně vliv na výdrž paměti čidla. Pokud je čidlo nastaveno v základním režimu, což znamená, že snímá data každých 15 minut, vydrží jeho paměť až 15 let. Cena jednoho čidla se pohybuje okolo 100 eur (TOMST s.r.o., 2021).



Obrázek 5. Popis částí mikroklimatického čidla TMS4 (TOMST s.r.o.)



Obrázek 6. Půdní čidlo TMS4 s ochranným pletivem proti poškození zvěří umístěné na výzkumné ploše.

4.3 Analýza dat

Veškerá analýza dat pro bakalářskou práci byla zpracována prostřednictvím statistického programu R (R Core Team, 2023). V první řadě byla data v programu vyčištěna pomocí balíčku PLOTer. Některá data byla následkem narušení zvěří, porušením čidla či jinými vlivy poškozena, a je potřeba tyto data z datového souboru odstranit. Veškerá data byla proto vizuálně zkontrolována a chybná data odstraněna, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků v další fázi zpracování dat. Vedle chybných dat byla odstraněna i měření, jež probíhala ještě před instalováním čidla na výzkumné ploše, protože tato čidla měří od jejich výroby a datový soubor by tak obsahoval i data z období před instalací na výzkumných plochách.

Data stažená z půdních čidel neobsahují informaci o dané lokalitě, v níž bylo čidlo umístěno. Z toho důvodu je potřeba vyčištěná data propojit s vytvořenou tabulkou s metadaty, v níž jsou zahrnuty detailní informace o plochách. V tabulce se nacházelo číslo plochy, GPS poloha (souřadnice), identifikační číslo čidla instalovaného na ploše, druhová skladba porostu a počet hlavních druhů dřevin v porostu (druhová bohatost). Po propojení těchto metadat s vyčištěnými daty z TMS4 čidel bylo možné data analyzovat.

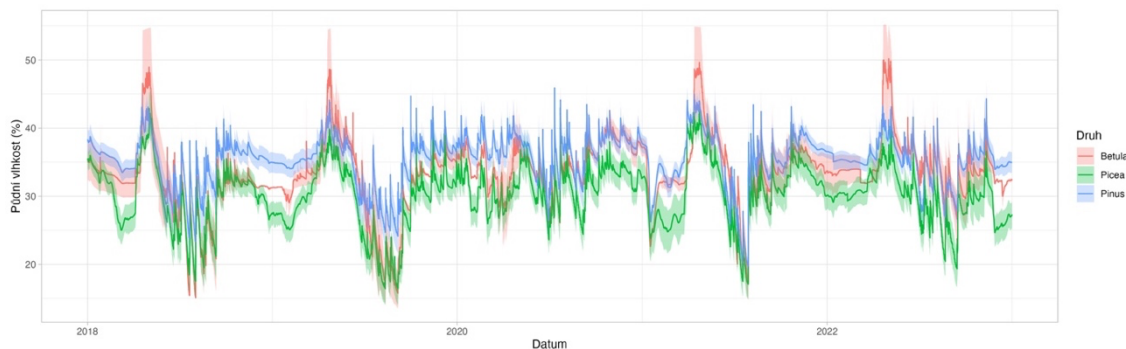
Po propojení dat s tabulkou byly následně vypočítány průměrné hodnoty pro veškeré veličiny, tedy pro teplotu vzduchu, teploty půdy a půdní vlhkost.

Pro vyhodnocení trendů a vývoje jednotlivých mikroklimatických proměnných v průběhu studovaného časového období byly do těchto dat naitovány zobecněné aditivní modely (GAM). Významnost každého modelu byla otestována a všechny naitované GAM modely byly statisticky významné ($P < 0,001$). Z výsledných GAM modelů pak byly vytvořeny grafy pomocí balíčku “ggplot2”.

Dále byly testovány vlivy rozdílné druhové skladby a počtu hlavních druhů dřevin v porostu (SR) na průměrné hodnoty jednotlivých mikroklimatických proměnných pomocí lineárních modelů. Jejich výsledky byly rovněž vizualizovány pomocí balíčku “ggplot2”.

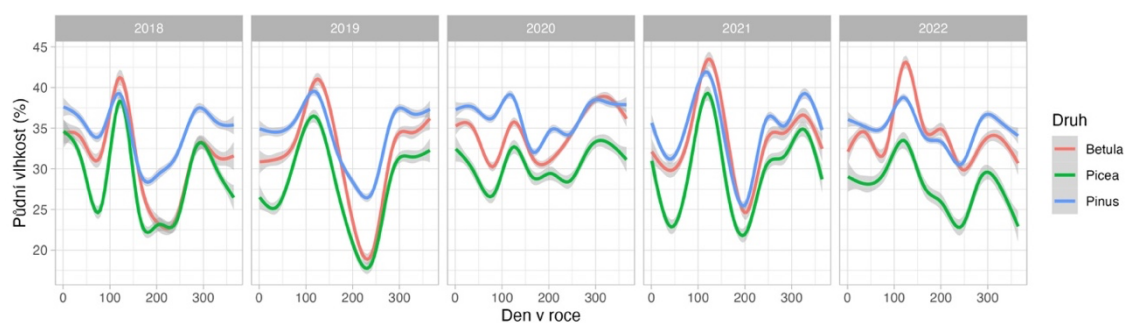
5 Výsledky

5.1 Půdní vlhkost



Obrázek 7. Vývoj půdní vlhkosti v čase v monokulturách břízy (*Betula*), smrku (*Picea*) a borovice (*Pinus*) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.

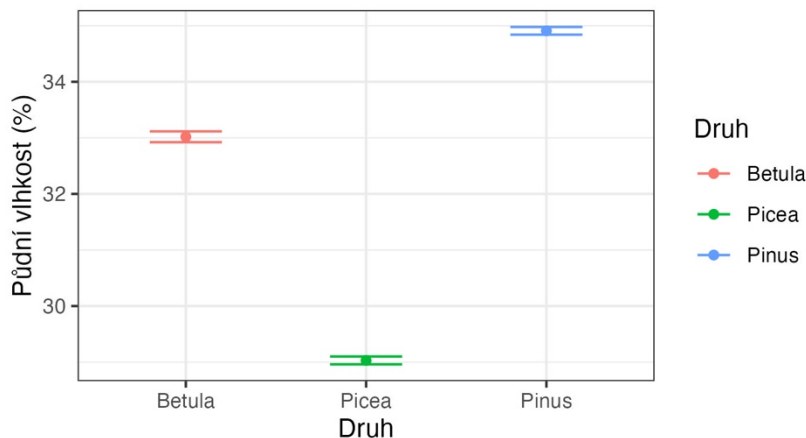
Půdní vlhkost dosahovala dlouhodobě nejvyšších hodnot v borových porostech (obr. 7). Výrazné výkyvy, a to zejména výrazné zvýšení půdní vlhkosti v období časného jara, byly zaznamenány v březových porostech (přes 50% objemové půdní vlhkosti; obr. 7). Stabilně nejnižší hodnoty vlhkosti byly naměřeny ve smrkových monokulturách (obr. 7).



Obrázek 8. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v monokulturách borovice (*Pinus*), břízy (*Betula*) a smrku (*Picea*) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

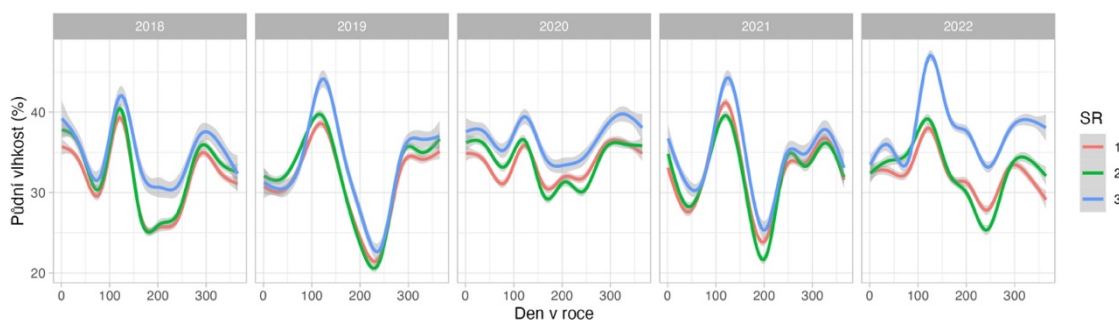
Půdní vlhkost dosahovala stabilně nejvyšších hodnot v borových monokulturách. Naopak nejnižší vlhkost lze konstantně vyzpozorovat ve smrkových monokulturách (obr. 8). Z počátku jara byla nejvyšší vlhkost naměřena v březových monokulturách (obr. 8). Celkově nejnižších hodnot dosahovala půdní vlhkost během letních dnů roku 2019 ve

smrkových a březových porostech. Nejvyšší hodnoty za celou dobu výzkumu se téměř přiblížily 45% půdní vlhkosti, a to na počátku jara 2021 a 2022 v březových porostech (obr. 8).



Obrázek 9. Průměrná půdní vlhkost v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti

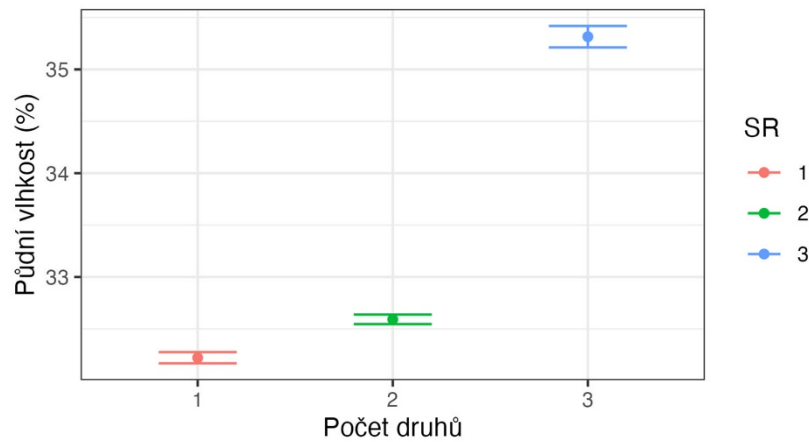
Graf zobrazující průměrnou půdní vlhkost v monokulturách (obr. 9) dokládá, že nejvyšší hodnoty půdní vlhkosti byly naměřeny v borových porostech. O něco nižší vlhkost vykazovaly březové porosty. Ve smrkových monokulturách byla zjištěna nejnižší průměrná půdní vlhkost, která vykazovala hodnoty více než o 4 % nižší, než v borových monokulturách (obr. 9).



Obrázek 10. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nabitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

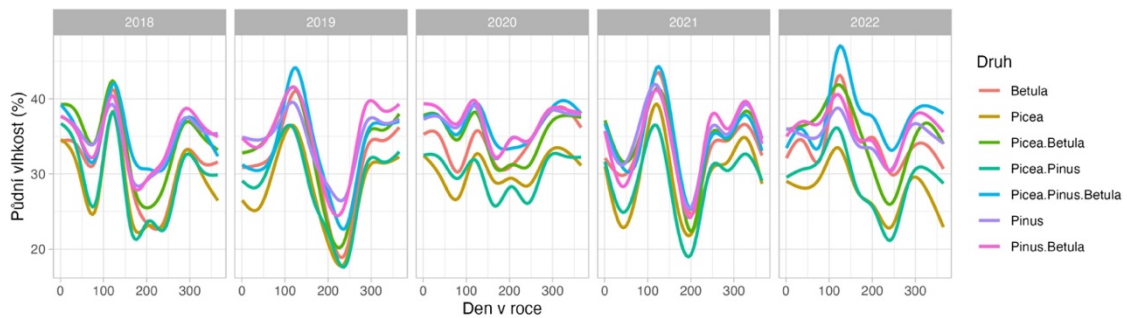
Nejvyšší hodnoty vlhkosti byly naměřeny ve tří druhových porostech (obr. 10). Celkově byla za sledované období nejvyšší vlhkost naměřena počátkem jara v roce 2022

(obr. 10). Mezi porosty s jedním a dvěma druhy nejsou rozdíly tak markantní. Pakliže jsou patrné rozdíly, nižší vlhkosti dosahovaly převážně dvou druhové porosty (obr. 10).



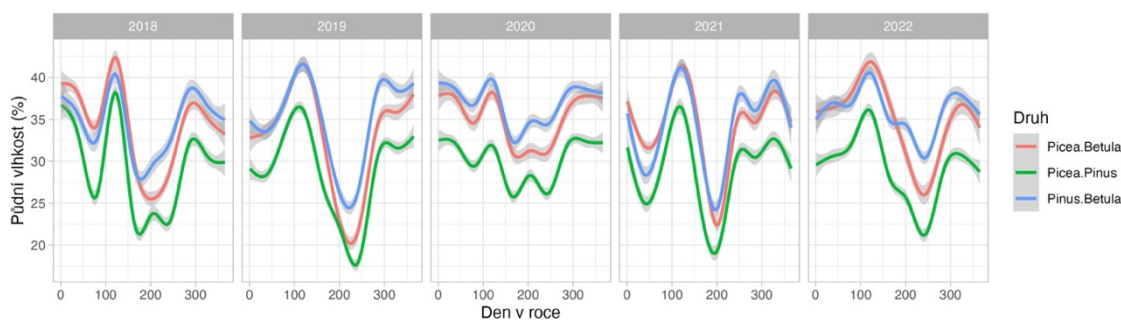
Obrázek 11. Průměrná půdní vlhkost v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

Průměrná půdní vlhkost dosahovala nejvyšších hodnot ve tří druhových směsích, kde přesáhla 35 %. O více než 2 % nižší půdní vlhkost byla naměřena v monokulturách a v porostech složených ze dvou druhů dřevin (obr. 11).



Obrázek 12. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují naitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

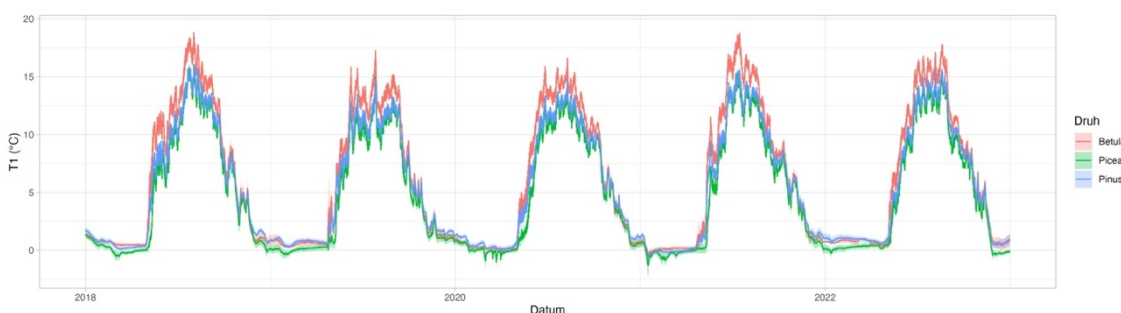
Daný GAM model (obr. 12) dokládá, že nejvyšší půdní vlhkosti byly stabilně naměřeny ve tří druhovém porostu (borovice, smrk, bříza). Celkově byla za celé období nejvyšší vlhkost naměřena v časném jaru roku 2022 (obr. 12). Na druhou stranu nejnižší půdní vlhkosti za celé sledované období dosahovaly porosty s dvěma druhy jehličnanů (smrk, borovice). Nejnižší půdní vlhkost těchto porostů byla během několika letních dnů roku 2019 (obr. 12).



Obrázek 13. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

Ve sledovaném GAM modelu (obr. 13) lze pozorovat, že stabilně nejvyšší hodnoty půdní vlhkosti v porostech složených ze dvou druhů dřevin za celé období byly naměřeny v porostech se směsí borovice a břízy. Výjimkou byly roky 2018 a 2022, kdy byla nejvyšší půdní vlhkost zjištěna během jara v porostech se směsí smrku a břízy. V těchto případech půdní vlhkost přesáhla 40 % (obr. 13). Naopak nejnižší hodnoty půdní vlhkosti vykazovaly po celou dobu sledování jehličnaté porosty složené ze směsi smrku a borovice. Extrémně nízké hodnoty půdní vlhkosti byly naměřeny v létě roku 2019 právě v této směsi, kdy půdní vlhkost klesla pod 20 %. Téměř stejně nízké hodnoty byly zjištěny i v roce 2021 (obr. 13).

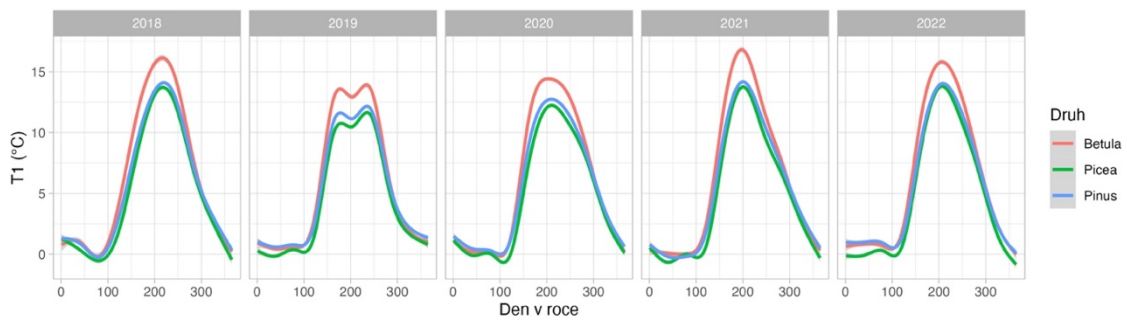
5.2 Teplota T1



Obrázek 14. Vývoj teploty T1 v čase v monokulturách břízy (*Betula*), smrku (*Picea*) a borovice (*Pinus*) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.

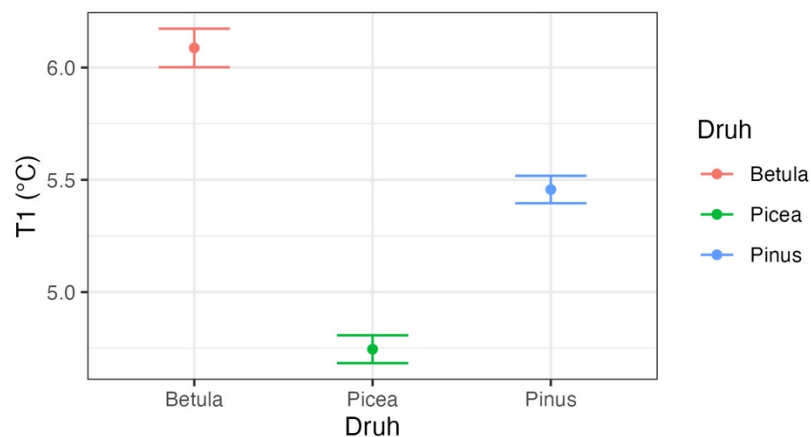
V grafu vývoje teploty T1 (obr. 14) lze pozorovat, že nejvyšší teploty půdy v hloubce 10 cm po většinu vegetačního období panovaly v monokulturách břízy. Ani jeden rok však nepřesáhly více jak 20 °C. Naopak stabilně nejnižší hodnoty teploty půdy

byly zjištěny ve smrkových monokulturách. Teploty půdy klesly v zimních měsících pod 0 °C mimo pár výjimek pouze v porostech smrku (obr. 14). Hodnoty půdních teplot borových monokultur se téměř po celou dobu sledování držely mezi teplotami půdy zjištěnými v porostech břízy a smrku. Menší výkyvy lze pozorovat pouze v zimních měsících, kdy vykazovaly vyšší teploty půdy než monokultury břízy (obr. 14).



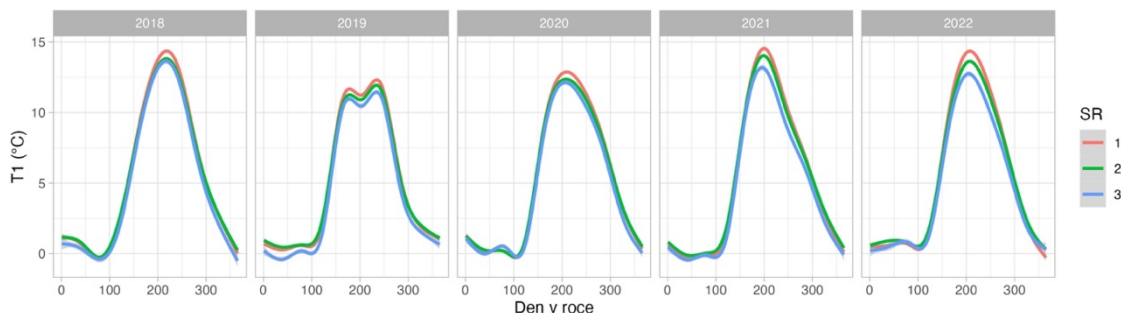
Obrázek 15. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v monokulturách borovice (*Pinus*), břízy (*Betula*) a smrku (*Picea*) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

Předkládaný GAM model (obr. 15) ukazuje, že nejvyšší teploty půdy T1 byly ve všech letech výzkumu zjištěny v monokulturách břízy. Teploty půdy ve smrkových a borových monokulturách se vyvíjely relativně identicky, avšak v porostech borovic byly zjištěny hodnoty teplot o trochu vyšší (obr. 15).



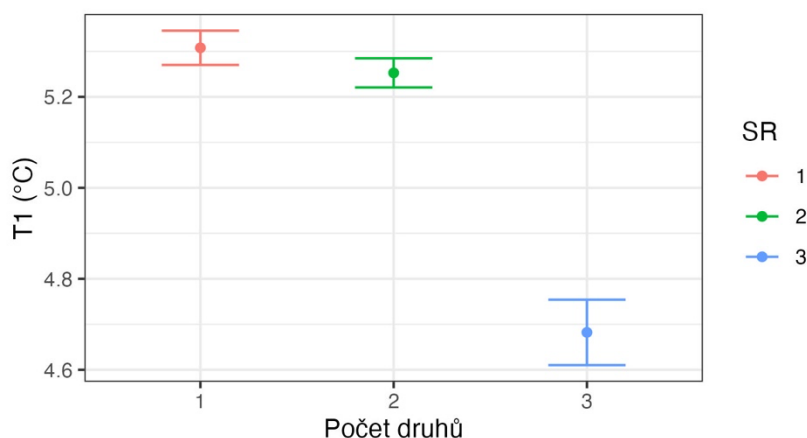
Obrázek 16. Průměrná teplota T1 v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

V monokulturách byly nejvyšší průměrné teploty půdy T1 naměřeny v březových porostech. O něco nižší hodnoty byly zjištěny v borových porostech. Nejnižší průměrné teploty T1 byly zaznamenány ve smrkových monokulturách (obr. 16).



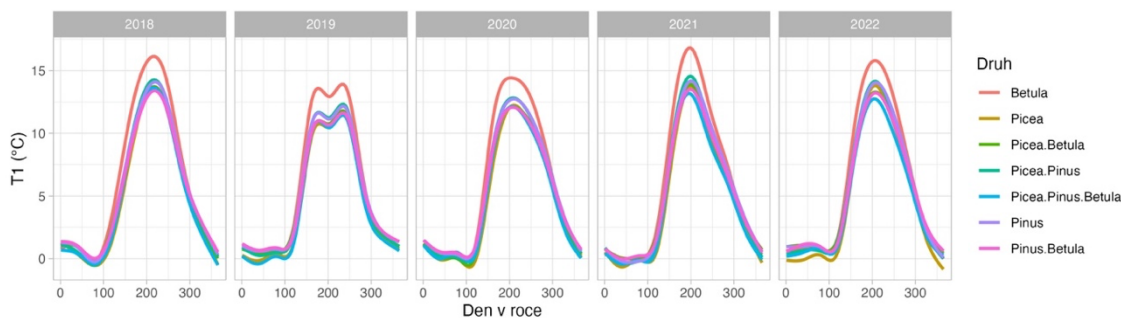
Obrázek 17. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

Sledovaný GAM model (obr. 17) dokládá, že teploty půdy T1 se v porostech s různou druhovou bohatostí příliš nelišily. Menší rozdíly lze pozorovat během léta v každém ze sledovaných let výzkumu, kdy nejvyšší teploty půdy byly naměřeny v monokulturních porostech. Naopak nejnižší teploty byly zjištěny v druhově nejbohatších porostech, tedy ve směsích se třemi druhy dřevin (obr. 17).



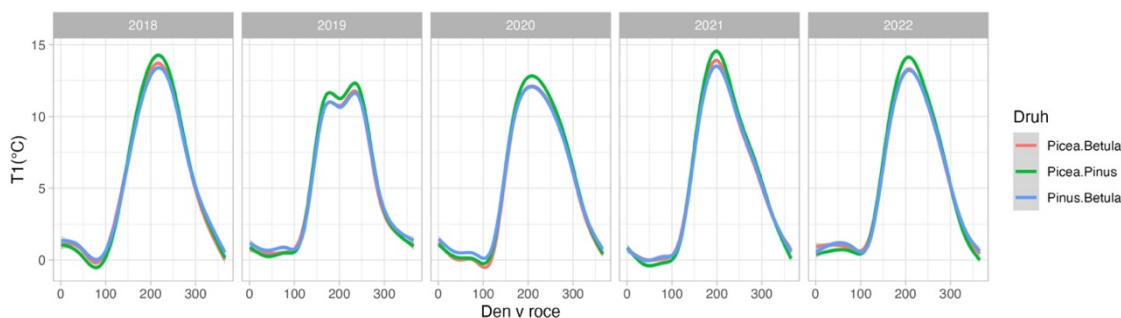
Obrázek 18. Průměrná teplota T1 v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

Průměrné teploty půdy T1 byly naměřeny v monokulturách a v porostech složených ze dvou druhů dřevin vyšší (více než o 0,5 °C), než ve tří druhových směsích, kde vykazovaly průměrné teploty hodnotu okolo 4,7 °C (obr. 18).



Obrázek 19. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

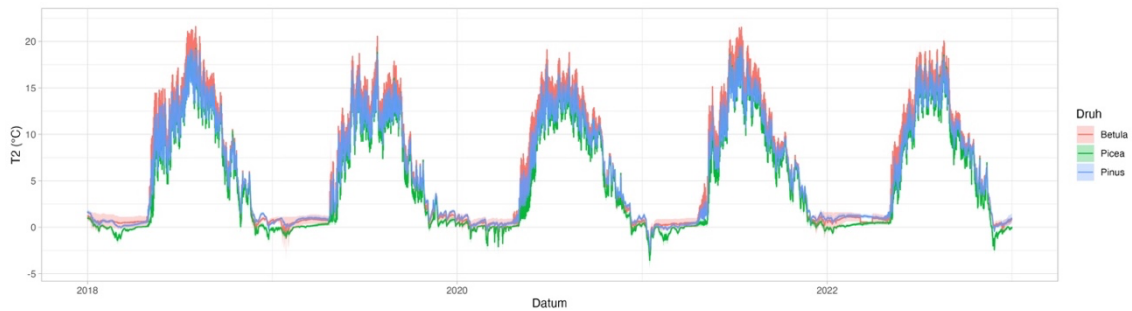
Při sledování půdní teploty T1 se ukázaly jako nejteplejší březové monokultury (obr. 19). V roce 2018, 2021 a 2022 teploty přesáhly v letním období 15 °C. Ostatní směsi dřevin vykazovaly po celou dobu relativně shodné hodnoty půdní teploty. Menší odchylky lze pozorovat v průběhu zimního a letního období (obr. 19).



Obrázek 20. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

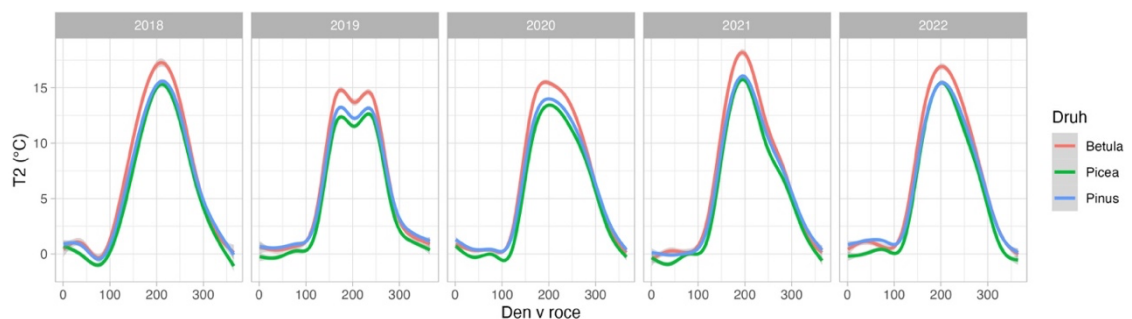
Teploty půdy T1 ve dvou druhových směsích (obr. 20) se vyvíjely podobně jako v porostech s různou skladbou dřevin (obr. 19). Nicméně ani v jednom roce hodnoty půdní teploty v porostech složených ze dvou druhů dřevin nepřesáhly 15 °C. Porosty složené z jehličnatých dřevin (smrk-borovice) vykazovaly každý rok během léta nejvyšší teploty půdy (obr. 20).

5.3 Teplota T2

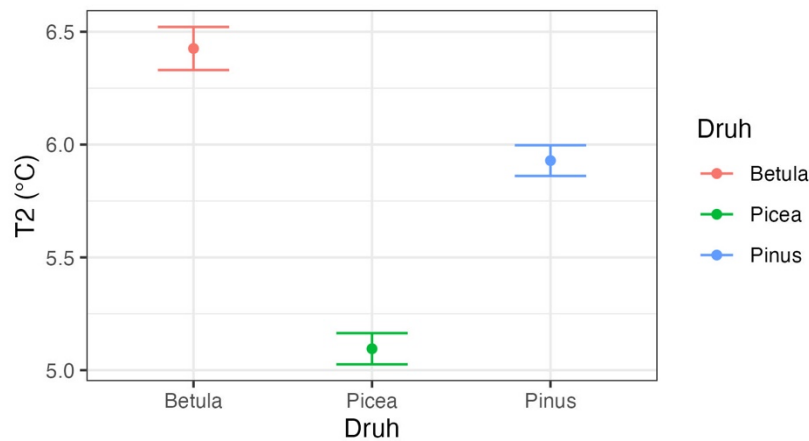


Obrázek 21. Vývoj teploty T2 v čase v monokulturách břízy (*Betula*), smrku (*Picea*) a borovice (*Pinus*) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.

Daný graf (obr. 21) dokládá, že nejvyšší hodnoty teploty půdy v hloubce 2 cm T2 byly naměřeny v březových monokulturách. Naopak nejnižší teploty byly zjištěny ve smrkových monokulturách. Právě v těchto porostech klesly v zimních obdobích teploty půdy T2 až pod 0 °C (obr. 21). Teplota půdy borových monokultur se téměř po celou dobu sledování pohybovala mezi hodnotami půdních teplot březových a smrkových monokultur (obr. 21).

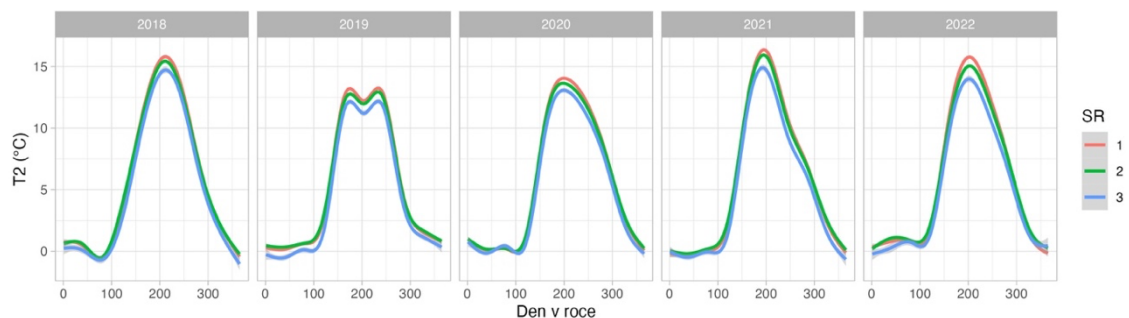


Obrázek 22. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v monokulturách borovice (*Pinus*), břízy (*Betula*) a smrku (*Picea*) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.



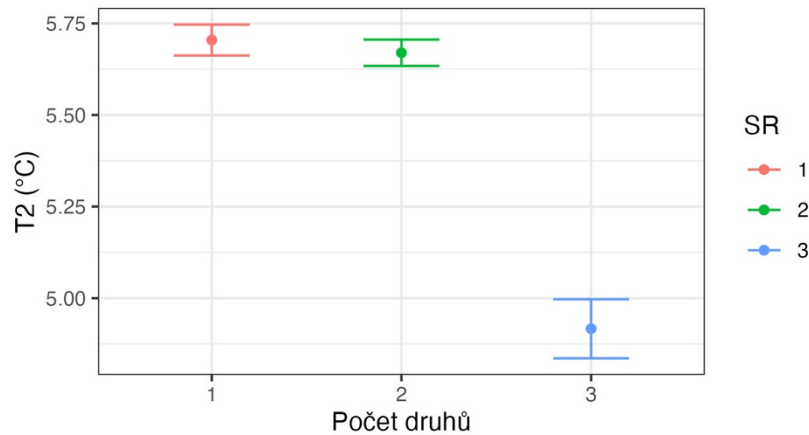
Obrázek 23. Průměrná teplota T2 v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

Průměrné teploty půdy T2 v monokulturách byly nejvyšší zaznamenány v březových porostech. O něco nižší hodnoty byly zjištěny v borových monokulturách. Nejnižší průměrné teploty půdy T2 byly pozorovány ve smrkových monokulturách (obr. 23).



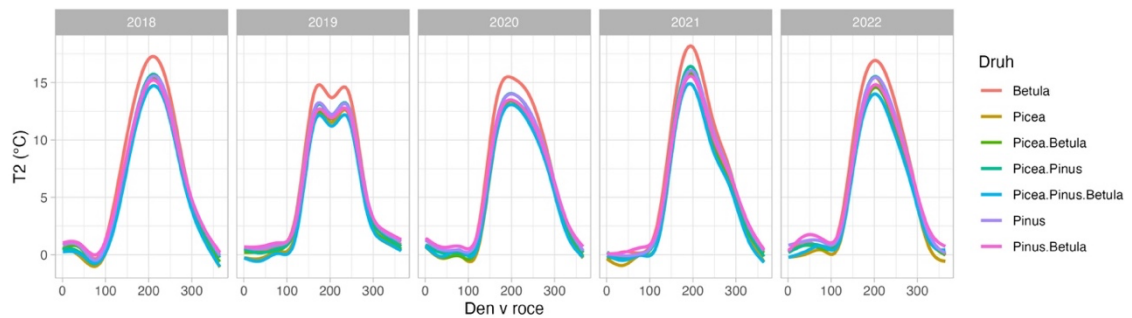
Obrázek 24. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

Půdní teplota T2 v monokulturách vykazovala vyšší teploty než v porostech s více druhy dřevin (obr. 22, 24). Nejvyšší teploty byly naměřeny v monokulturách břízy. O něco nižší hodnoty vykazovaly monokultury smrku a borovice (obr. 22). GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v porostech s různým počtem dřevin (obr. 24) ukazuje, že s počtem druhů dřevin hodnoty teplot půdy klesaly. Z toho vyplývá, že nejnižší hodnoty byly naměřeny v porostech se třemi druhy dřevin (obr. 24).



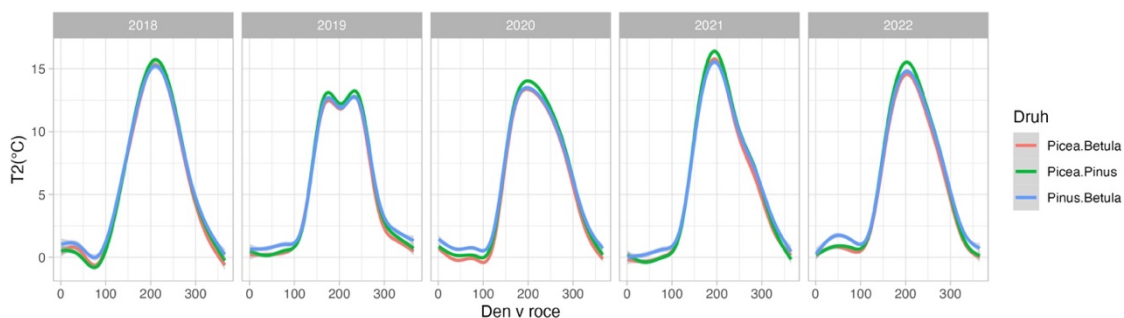
Obrázek 25. Průměrná teplota T_2 v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

Nejnižší průměrné teploty půdy T_2 byly zaznamenány ve tří druhových porostech (méně než 5 °C). O více než 0,5 °C vyšší hodnoty vykazovaly jak monokultury, tak i porosty složené ze dvou druhů dřevin (obr 25).



Obrázek 26. GAM model zobrazující vývoj teploty T_2 v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

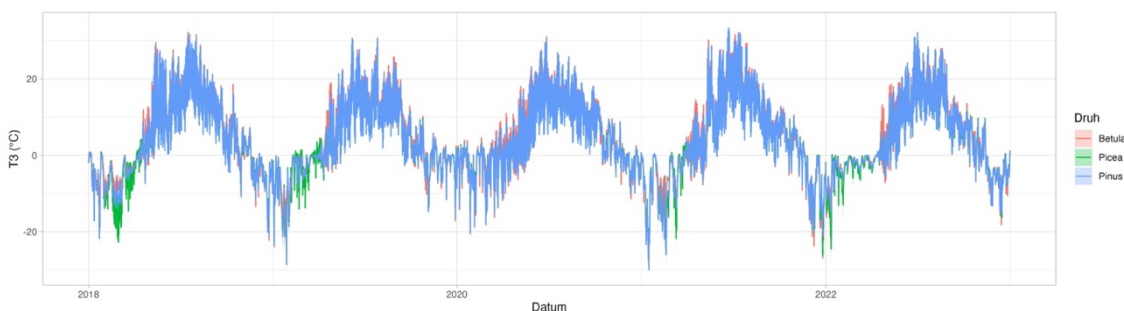
Předkládaný GAM model (obr. 26) ukazuje, že nejvyšší teploty půdy T_2 byly naměřeny v monokulturách břízy, kdy během každého léta teploty těchto porostů výrazně přesáhly teploty všech ostatních porostů.



Obrázek 27. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

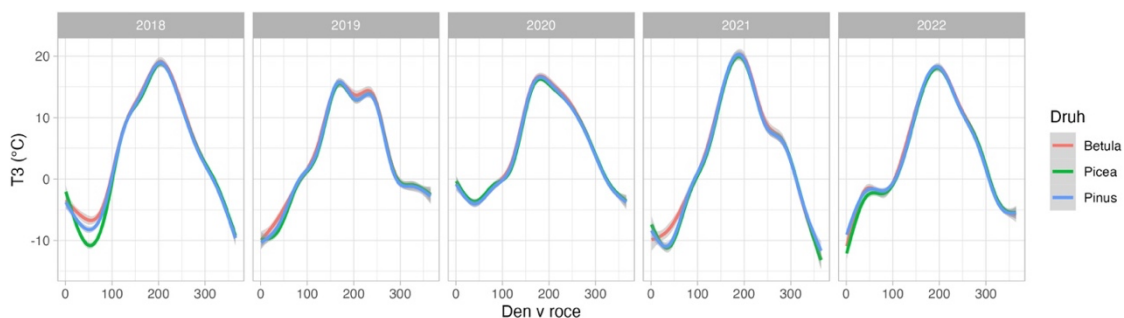
Vývoj teplot půdy T2 v porostech se dvěma druhy dřevin (obr. 27) byl u všech dvou druhových porostů po celou dobu sledování víceméně stejný. Menší odchylky lze sledovat v letních obdobích, kdy jehličnaté porosty (smrk – borovice) vykazovaly o něco vyšší teploty půdy než ostatní typy směsí (obr. 27).

5.4 Teplota T3

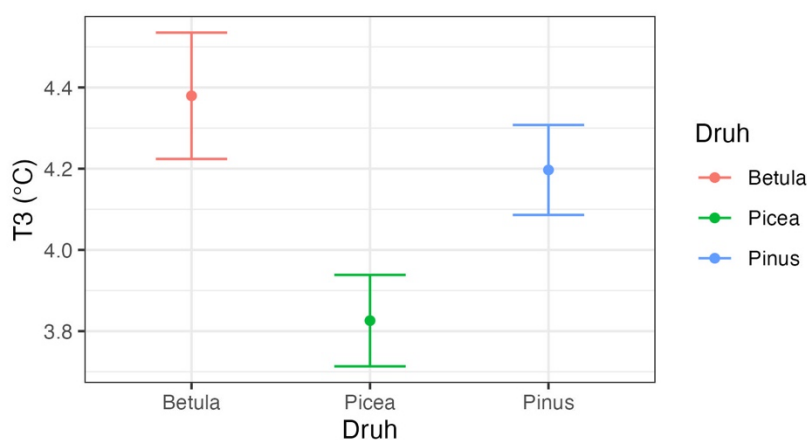


Obrázek 28. Vývoj teploty T3 v čase v monokulturách břízy (*Betula*), smrku (*Picea*) a borovice (*Pinus*) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.

Ve sledovaném grafu vývoje teplot vzduchu T3 v monokulturách lze pozorovat, že se teploty ve všech porostech vyvíjely téměř identicky (obr. 28). Nejvyšší hodnoty se pohybovaly v letních měsících okolo 30 °C. Naopak v průběhu zimy klesla teplota vzduchu hluboko pod bod mrazu (obr. 28)

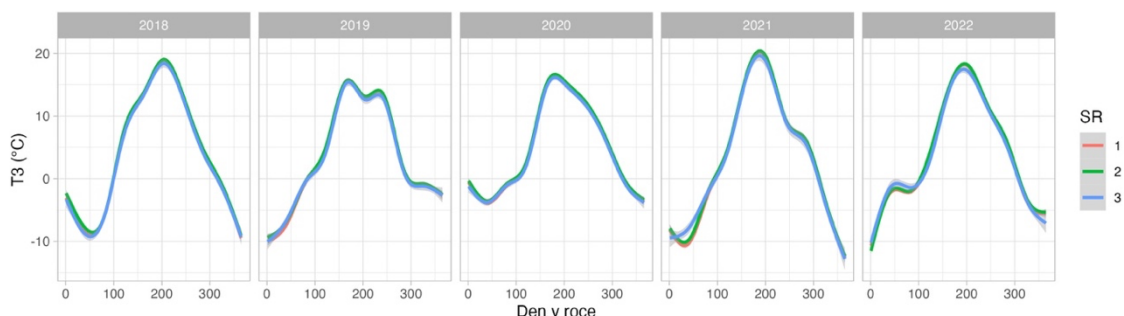


Obrázek 29. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v monokulturách borovice (*Pinus*), břízy (*Betula*) a smrku (*Picea*) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

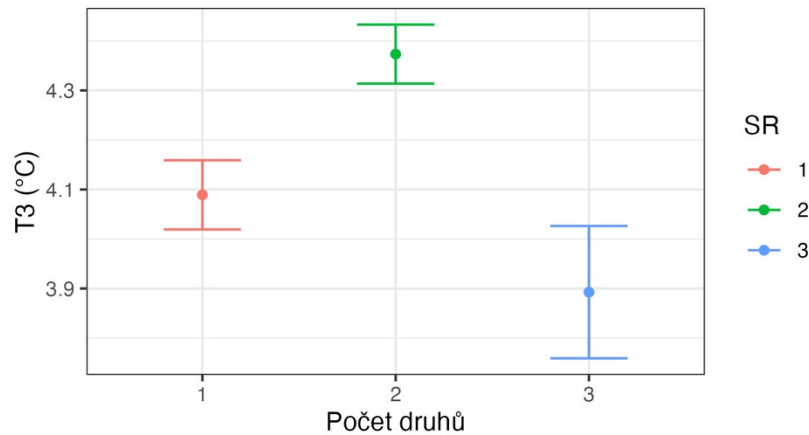


Obrázek 30. Průměrná teplota T3 v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

Průměrné teploty vzduchu T3 byly nejvyšší zjištěny v monokulturách břízy. O necelých 0,2 °C nižší hodnoty vykazovaly borové porosty. Nejnižší průměrné teploty vzduchu byly naměřeny ve smrkových monokulturách (obr. 30).



Obrázek 31. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

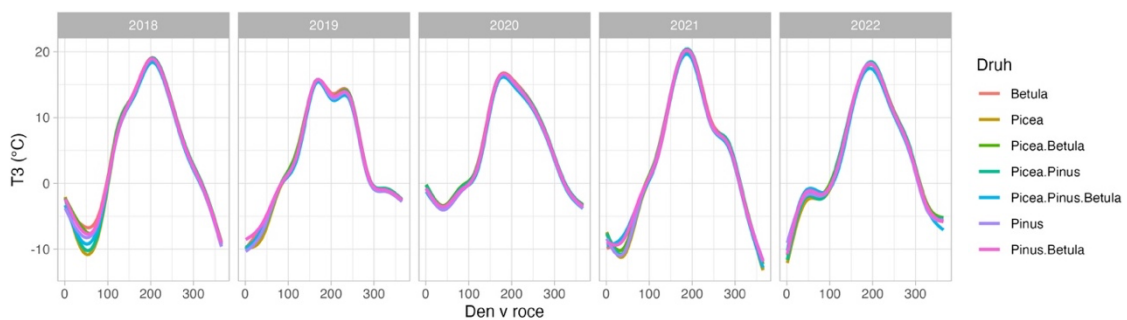


Obrázek 32. Průměrná teplota T3 v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.

Průměrné teploty vzduchu T3 byly nejnižší v porostech složených ze tří druhů dřevin. O 0,2 °C vyšší hodnoty byly zaznamenány v monokulturách. Nejvyšší průměrné teploty byly naměřeny ve dvou druhových porostech (obr. 32).

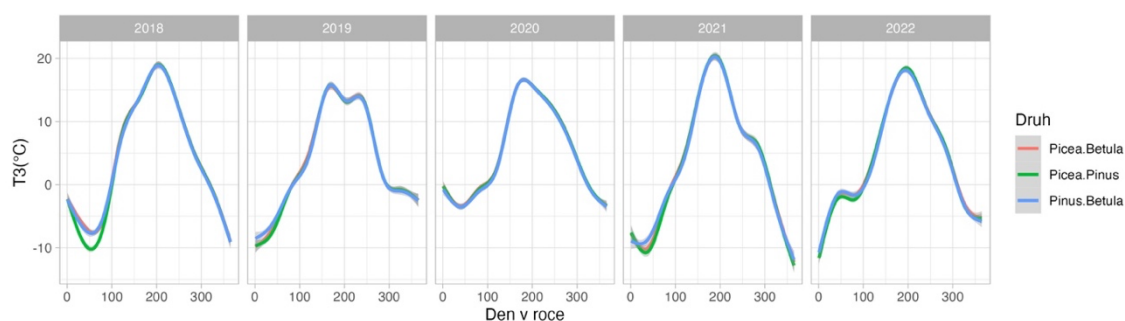
Rozdíly teplot vzduchu T3 v monokulturách a ve smíšených porostech byly minimální (obr. 29, 31). Vývoj teplot v monokulturách vykazoval pouze malé odchylky, a to především v zimě roku 2018, kdy se ukázaly březové porosty jako nejteplejší, a naopak ve smrkových byly naměřeny hodnoty nejnižší (více než -10 °C). Další diferenci lze pozorovat na začátku roku 2021, kdy v březových porostech byly opět zjištěny o něco vyšší teploty (obr. 29).

GAM model zobrazující vývoj teplot vzduchu T3 v porostech s rozdílným počtem druhů dřevin ukazuje, že hodnoty teplot se ve všech porostech vyvíjely obdobně (obr. 31).



Obrázek 33. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

V porostech s různou druhovou skladbou dřevin se teploty T3 vyvíjely prakticky totožně (obr. 33). Nejmarkantnější odchylky lze zaznamenat v roce 2018, kdy v zimě teploty klesly nejvíce ve smrkových porostech, naopak nejvyšší hodnoty byly naměřeny v monokulturách břízy (obr. 33).



Obrázek 34. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.

GAM model popisující vývoj teploty vzduchu T3 v porostech složených ze dvou druhů dřevin ukazuje, že křivka hodnot teploty se u všech porostů vyvíjela téměř shodně (obr. 34). Pouze v zimě roku 2018 byla zjištěna nižší teplota v jehličnatých porostech složených ze smrku a borovice, kdy teplota vzduchu klesla na -10 °C (obr. 34).

6 Diskuze

6.1 Půdní vlhkost

Tato bakalářská práce se zaměřovala na vliv druhové skladby a druhové bohatosti dřevin na mikroklima v boreálním lese ve východním Finsku. Výsledky ukázaly, že nejvyšších hodnot půdní vlhkosti dosahovaly druhově nejbohatší porosty složené ze tří druhů dřevin (borovice, bříza, smrk; obr. 10). Také průměrné hodnoty vlhkosti půdy byly v druhově nejbohatších porostech naměřeny největší. Oproti monokulturám a dvou druhovým porostům vykazovaly tří druhové porosty o více než 2 % vyšší hodnoty průměrné půdní vlhkosti (obr. 11). Grossiord et al. (2014) však ve své studii uvádějí, že během suchých vegetačních období mohou interakce mezi druhy ve smíšených porostech vést ke snížení dostupnosti půdní vlhkosti oproti monokulturám. Také tvrdí, že vztah mezi druhovou bohatostí a fungováním ekosystému v boreálních lesích závisí na místních podmínkách prostředí. Tento pozitivní vztah mezi diverzitou dřevin a vlhkostí půdy se může měnit s podmínkami stanoviště a klimatickými podmínkami v daném roce. Nicméně smíšené lesní ekosystémy, tedy lesy složené ze dvou a více druhů dřevin, mají potenciál lépe odolávat různým disturbancím (abiotickým i biotickým) a zároveň přispívat ke zvýšení stability produktivity lesních společenstev (Pardos et al., 2021).

Naopak jako nejsušší se ukázaly jehličnaté lesy. Půdní vlhkost v porostech smrku a borovice v letním období klesla v roce 2019 a 2021 až pod 20 % (obr. 12). V porovnání s ostatními porosty složenými ze dvou druhů dřevin (smrk – bříza; borovice – bříza) vykazovaly stabilně nejnižší hodnoty půdní vlhkosti porosty složené ze smrku a borovice v průběhu celého roku, v každém ze sledovaných let výzkumu (obr. 13). Nehledě na počet dřevin, všechny porosty, ve kterých se vyskytoval smrk, měly tendenci především během teplejších dnů vysychat (obr. 12). Výsledky této práce ukazují, že v lokalitách s nedostatkem vody se smrk nejeví jako optimální volba dřeviny pro zmírnění suchých období v lesech boreálních oblastí. Absorpce vody u smrku probíhá především v horních půdních horizontech, což je způsobeno relativně mělkým uložením jeho kořenového systému v půdním profilu (Pretzsch et al., 2013). Ge et al. (2013) uvádějí, že kvůli uložení hlavních částí kořenů v povrchové vrstvě půdy a vysoké míře úbytku vody evapotranspirací, je smrk zranitelný vůči nízké vlhkosti půdy. S ohledem na klimatickou

změnu je proto smrk více ohrožen suchem než dřeviny s kořenovým systémem zasahujícím do hlubších vrstev půdy.

Co se týče monokultur, stabilně nejvlhčí byly borové porosty. Borové monokultury vykazovaly nejvyšší úroveň půdní vlhkosti, což pravděpodobně souvisí s tím, že kořenový systém borovic proniká do hlubších vrstev půdy a efektivně využívá vodu z těchto zdrojů. Nejvyšší hodnoty průměrné vlhkosti půdy byly taktéž zaznamenány v borových porostech (obr. 9). Naopak nejnižší hodnoty půdní vlhkosti byly v průběhu celého měření zjištěny ve smrkových porostech. Také podle průměrných hodnot se jako nejsušší ukázaly smrkové monokultury, kde oproti borovým porostům byla průměrná půdní vlhkost nižší o více než 5 % (obr. 9). Nejmarkantnější výkyvy však bylo možno pozorovat v březových porostech v období časného jara (obr. 7). Dále byly velmi nízké hodnoty půdní vlhkosti naměřeny v březových porostech během letních dnů (především v roce 2018 a 2019; obr. 7). Nízká půdní vlhkost v březových monokulturách byla zjištěna pravděpodobně kvůli nízkému LAI těchto porostů. Koruny stromů v těchto světlých porostech zachytí pouze malou část slunečního záření, a proto zde dochází během letních dnů k výraznému výparu vody z povrchových vrstev půdy.

6.2 Teploty půdy T1 a T2

Ze sledovaných GAM modelů lze pozorovat, že vývoj teploty půdy T1 a T2 měl po celou dobu měření téměř identický průběh. Avšak významnější odchylky lze pozorovat v březových monokulturách, kdy během letního období v každém sledovaném roce teploty půdy výrazně přesáhly hodnot jak ostatních monokultur (obr. 14, 21), tak i porostů složených z více druhů dřevin (obr. 19, 26). To je nejspíš způsobeno tím, že bříza bělokorá je světlomilná pionýrská dřevina, jejichž porosty jsou značně otevřené s nízkým LAI. Z toho důvodu pod koruny stromů dopadá více slunečních paprsků a dochází tak k většímu výparu vody z horních vrstev půdy, a tudíž k vyšším teplotám na povrchu půdy. Von Arx et al. (2013) ve svých závěrech uvádějí, že teplota půdy je korunovým zápojem ovlivněna ve větší míře než teplota vzduchu, jelikož vzduch z lesního prostředí se mísí se vzduchem mimo les.

Chladnější průměrné teploty půdy T1 a T2 byly zjištěny v monokulturách borovice a smrku. O něco nižší teploty než v čistých březových porostech, byly naměřeny v borových monokulturách. Nejnižší teploty půdy panovaly po celou dobu výzkumu ve smrkových monokulturách, a to jak během zimních, tak i letních měsíců (obr. 15, 22).

Průměrné teploty půdy T1 a T2 byly nejvyšší naměřeny v březových monokulturách, kdy hodnoty dosahovaly v obou proměnných více než 6 °C. Průměrné teploty o 0,5 °C nižší byly zaznamenány v borových porostech. Nechladnější podmínky panovaly ve smrkových monokulturách, kde byly průměrné teploty půdy T1 a T2 oproti porostům břízy nižší o více než 1 °C (obr. 16, 23). To pravděpodobně opět souvisí s korunovým zápojem. Smrkové monokultury jsou většinou husté porosty s vysokým LAI. Většina příchozího světla je odražena či pohlcena korunami stromů, a jen malá část paprsků dopadá až na lesní půdu.

6.3 Teplota vzduchu T3

Z vývoje teploty vzduchu T3 ve sledovaných porostech vyplývá, že vliv druhové skladby na dynamiku teplot ve výšce 15 cm nad povrchem je relativně nižší, než na vývoj teplot půdy T1 a T2. Zjištěné teploty vzduchu se od sebe příliš nelišily v žádném ze sledovaných typů porostu (obr. 33). Avšak přítomnost korun stromů má na vývoj teploty vzduchu vliv významný. Stickley a Fraterrigo (2021) ve své studii uvádějí, že maximální teploty uvnitř lesa mohou být během teplých dnů o více než 5 °C nižší než na přilehlých vykáčených plochách. Aussenac (2000) rovněž zjistil, že v lesích se vyskytují v zimě vyšší teploty a v létě nižší teploty vzduchu i půdy oproti klimatickým podmínkám mimo les.

Menší odchylky v teplotách vzduchu lze pozorovat především v naměřených hodnotách monokultur v zimě roku 2018. Nejnižší teploty vzduchu byly naměřeny ve smrkových porostech (obr. 29). Podobný pokles je viditelný při porovnávání teplot vzduchu v porostech složených ze dvou druhů dřevin, kdy nejnižší teploty panovaly v jehličnatém lese (smrk – borovice; obr. 34).

Teplotu vzduchu ve výšce 15 cm nad povrchem může ovlivnit sněhová pokrývka. Zhao et al. (2022) ve své studii uvádějí, že vrstva sněhu může sloužit jako izolační vrstva, která vytváří specifické teplejší mikroklima, jelikož chrání půdu před nízkými teplotami vzduchu. Sněhová pokrývka může během zimy v okolí Joensuu dosahovat více než 60 cm (Finnish meteorological institute, 2015b). Přičemž smrkové lesy se vyznačují hustým korunovým zápojem, který většinu sněhových srážek zachytí a nedochází tak k vytvoření sněhové pokrývky pod korunami stromů. De Frenne et al. (2021) zjistili, že koruny stromů mohou snižovat sněhovou pokrývku na půdním povrchu, a tím redukovat izolační účinek sněhu na chladné teploty půdy během zimního období. Teploty vzduchu

zaznamenané během zimy roku 2018 by tak mohly být ovlivněny vyšším objemem sněhových srážek, což by mohlo vést k ovlivnění naměřených dat.

Nejnižší průměrné teploty vzduchu v monokulturách byly zjištěny ve smrkových porostech. Jako nejteplejší se ukázaly porosty břízy, kde byla průměrná teplota vzduchu až o 0,5 °C vyšší (obr. 30). Lze tedy tvrdit, že i na teplotu vzduchu má určitý vliv kompozice dřevinného patra. Také druhová bohatost měla vliv na průměrné teploty vzduchu. Nejnižší průměrné teploty byly naměřeny ve druhově nejbohatších porostech složených ze tří druhů dřevin (obr. 32). Naopak nejvyšší průměrné teploty vzduchu byly zaznamenány v porostech složených ze dvou druhů dřevin, a o něco nižší teploty byly pozorovány v monokulturách. Monokultury měly chladnější průměrné teploty vzduchu pravděpodobně díky smrkovým porostům, které vykazovaly výrazně nižší hodnoty než zbylé dva typy monokultur (obr. 30).

6.4 Optimalizace lesních ekosystémů v kontextu změn klimatu

Při analýze průměrných hodnot všech sledovaných proměnných, konkrétně vlhkosti půdy, teploty půd (T1 a T2) a teploty vzduchu, se prokázalo, že porosty s největší druhovou bohatostí (tj. se třemi různými druhy dřevin ve směsi) vykazují nejvyšší míru půdní vlhkosti a zároveň nejnižší teploty. Za předpokladu oteplení klimatu se tedy obecně jeví porosty s vyšší diverzitou dřevin jako lepší varianta oproti monokulturám. Smíšené porosty mají potenciál lépe tlumit extrémní teploty okolního prostředí a zachovat potřebnou vlhkost půdy pro vývoj lesního ekosystému.

Vzhledem k volbě nejvhodnějšího typu porostu je však klíčové zaměřit se především na charakteristiky stanoviště. V oblastech s nedostatkem povrchové vody je vhodné upřednostňovat borové monokultury, které díky svému kořenovému systému mohou efektivně absorbovat vodu z hlubších vrstev půdy. Naopak v lokalitách s dostatkem vody je vhodné preferovat hospodaření se smrkovými porosty, které díky vysokému LAI mají potenciál výrazně snižovat teploty půdy i vzduchu, a tudíž udržovat chladnější mikroklima v podrostu. Pro dosažení udržitelného hospodaření je potřeba v budoucnu s lesními ekosystémy nakládat šetrně, a také přizpůsobit skladbu dřevin novým, pravděpodobně teplejším podmínkám klimatu.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnotit mikroklimatické podmínky v boreálním lese ve východním Finsku v okolí města Joensuu v závislosti na druhové skladbě a bohatosti lesních porostů. Měření mikroklimatu bylo uskutečněno na 28 výzkumných plochách, které jsou součástí projektu FunDivEUROPE, mezi roky 2018 až 2022. Konkrétně bylo provedeno v porostech smrku ztepilého (*Picea abies*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), břízy bělokoré (*Betula pendula*) a jejich směsích. Hlavním cílem práce bylo zjistit, jak tyto dřeviny a jejich vzájemné směsi ovlivňují vlhkost půdy, teploty půdy a teplotu vzduchu v jejich podrostu. Součástí zkoumání bylo také vyhodnotit, jakým způsobem tyto mikroklimatické proměnné ovlivňuje rostoucí diverzita stromového patra. Na každé výzkumné ploše bylo nainstalováno jedno mikroklimatické půdní čidlo TMS4, které provádělo měření všech sledovaných proměnných každých 15 minut.

Výsledky práce ukázaly, že porosty s nejvyšší druhovou diverzitou, tj. porosty složené ze tří druhů dřevin (borovice-bříza-smrk), vykazují nejlepší schopnost zadržovat půdní vlhkost. Ojedinelou odchylku tvořily borové monokultury pravděpodobně kvůli svému kořenovému systému, který zasahuje do hlubších vrstev půdy a čerpá vodu z těchto zdrojů. Naopak nejnižší hodnoty půdní vlhkosti byly zjištěny v porostech, ve kterých se vyskytoval smrk. Smrkové porosty mají tendenci vysychat patrně kvůli uložení kořenů pouze v povrchové vrstvě půdy, a také vysoké míře úbytku vody evapotranspirací.

Vývoj půdních teplot T1 a T2 měl po celou dobu měření téměř identický průběh. Větší odchylky byly zjištěny v monokulturách břízy. Březové porosty jsou charakteristické nízkým LAI, tudíž pod koruny stromů dopadá více slunečních paprsků a dochází tak k intenzivnějšímu výparu vody z horních vrstev půdy, což způsobuje vyšší teploty na jejím povrchu. Nejnižší teploty půdy byly naměřeny ve smrkových monokulturách, které naopak od březových porostů disponují vysokým LAI, tudíž většinu slunečních paprsků pohltí koruny stromů, a jen malá část otepluje lesní půdu.

Nejnižší průměrná teplota vzduchu T3, měřena ve výšce 15 cm nad povrchem půdy, panovala ve směsích složených ze tří druhů. Nejnižší teploty vzduchu však byly naměřeny ve smrkových monokulturách během zimních měsíců. Tento jev lze pravděpodobně vysvětlit tím, že smrkové porosty vykazují vysokou hustotu korunového zápoje, který efektivně zadržuje většinu sněhových srážek, což snižuje tvorbu sněhové pokrývky pod korunami stromů. Vrstva sněhu totiž plní funkci izolační vrstvy, která

vytváří specifické teplejší mikroklima tím, že chrání půdu před vlivem nízkých teplot vzduchu.

Výsledky bakalářské práce naznačují, že lesy s vyšší druhovou diverzitou mají tendenci udržovat vyšší míru půdní vlhkosti a zároveň nižší teploty vzduchu. Tato zjištění podtrhují význam zvýšení diverzity dřevin lesních ekosystémů pro jejich schopnost odolávat změně klimatu.

8 Seznam literatury a použitých zdrojů

Aalto, I., Aalto, J., Hancock, S., Valkonen, S., & Maeda, E. E. (2023). Quantifying the impact of management on the three-dimensional structure of boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 535. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120885>

Atkins, J. W., Shiklomanov, A., Mathes, K. C., Bond-Lamberty, B., & Gough, C. M. (2023). Effects of forest structural and compositional change on forest microclimates across a gradient of disturbance severity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109566>

Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann. For. Sci.* 57, 287–301. <https://doi.org/10.1051/forest:2000119>

Boonstra, R., Andreassen, H. P., Boutin, S., Hušek, J., Ims, R. A., Krebs, C. J., Skarpe, C., & Wabakken, P. (2016). Why do the boreal forest ecosystems of Northwestern Europe differ from those of Western North America? *BioScience*, 66(9), 722–734. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw080>

Bréda, N., & Granier, A. (1996). Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Ann. For. Sci.* 53, 521–536. <https://doi.org/10.1051/forest:19960232>

De Frenne, P., Zellweger, F., Rodríguez-Sánchez, F., Scheffers, B. R., Hylander, K., Luoto, M., Vellend, M., Verheyen, K., & Lenoir, J. (2019). Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology and Evolution*, 3(5), 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0842-1>

De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B. R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M. B., Christiansen, D. M., Decocq, G., de Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klinges, D. H., Koelemeijer, I. A., Lembrechts, J. J., Marrec, R., ... Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers

and future research agenda. *Global Change Biology*, 27(11), 2279–2297.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15569>

Elbakidze, M., Angelstam, P., Sobolev, N., Degerman, E., Andersson, K., Axelsson, R., Höjer, O., & Wennberg, S. (2013). Protected area as an indicator of ecological sustainability? A century of development in Europe's boreal forest. *Ambio*, 42(2), 201–214. <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0375-1>

Esseen, P.-A., Ehnström, B., Ericson, L., & Sjöberg, K. (1997). Boreal Forests. *Ecological Bulletins*, 46, 16–47. <http://www.jstor.org/stable/20113207>

Finnish meteorological institute. Statistics from 1961 onwards. Ilmatieteenlaitos.fi [online]. ©2015a [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/statistics-from-1961-onwards>

Finnish meteorological institute. Weather Joensuu. Ilmatieteenlaitos.fi [online]. ©2015b [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/weather/joensuu>

Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A., & Cescatti, A. (2022). Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 608(7923), 534–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9>

Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A. Z., & Schepaschenko, D. G. (2015). Boreal forest health and global change. *Science*, 349(6250), 819–822. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa9092>

Ge, Z. M., Kellomäki, S., Zhou, X., Wang, K. Y., Peltola, H., Väisänen, H., & Strandman, H. (2013). Effects of climate change on evapotranspiration and soil water availability in Norway spruce forests in southern Finland: An ecosystem model based approach. *Ecohydrology*, 6(1), 51–63. <https://doi.org/10.1002/eco.276>

Grossiord, C., Granier, A., Gessler, A., Jucker, T., & Bonal, D. (2014). Does Drought Influence the Relationship Between Biodiversity and Ecosystem Functioning in Boreal Forests? *Ecosystems*, 17(3), 394–404. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9729-1>

Haesen, S., Lembrechts, J. J., de Frenne, P., Lenoir, J., Aalto, J., Ashcroft, M. B., Kopecký, M., Luoto, M., Maclean, I., Nijs, I., Niittynen, P., van den Hoogen, J., Arriga, N., Brůna, J., Buchmann, N., Čiliak, M., Collalti, A., de Lombaerde, E., Descombes, P., ... van Meerbeek, K. (2021). ForestTemp – Sub-canopy microclimate temperatures of European forests. *Global Change Biology*, 27(23), 6307–6319. <https://doi.org/10.1111/gcb.15892>

Hayes, D. J., Butman, D. E., Domke, G. M., Fisher, J. B., Neigh, C. S. R., & Welp, L. R. (2022). Boreal forests. In B. Poulter, J. G. Canadell, D. J. Hayes, R. L. Thompson (Eds.), *Balancing Greenhouse Gas Budgets: Accounting for Natural and Anthropogenic Flows of CO₂ and other Trace Gases* (203-236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814952-2.00025-3>

Chen, J., Saunders, S. C., Crow, T. R., Naiman, R. J., Brosofske, K. D., Mroz, G. D., Brookshire, B. L., & Franklin, J. F. (1999). Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology – Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience*, 49(4), 288–297. <https://doi.org/10.2307/1313612>

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, & P. Whetton. (2007). *Regional Climate Projections*. In [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPPC. (2022). Land–climate interactions. In *Climate Change and Land*, 131–248. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>

Jonsson, M., Bengtsson, J., Gamfeldt, L., Moen, J., & Snäll, T. (2019). Levels of forest ecosystem services depend on specific mixtures of commercial tree species. *Nature Plants* 5(2), 141–147. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0346-z>

Kellomäki S, Rouvinen I, Peltola H, Strandman H, & Steinbrecher R. (2001). Impact of global warming on the tree species composition of boreal forests in Finland and effects on emissions of isoprenoids. *Global Change Biology*, 7, 531–544. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2001.00414.x>

Lantz, T. C., Marsh, P., & Kokelj, S. V. (2013). Recent Shrub Proliferation in the Mackenzie Delta Uplands and Microclimatic Implications. *Ecosystems*, 16(1), 47–59. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9595-2>

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., ... Nijs, I. (2020). SoilTemp: A global database of near-surface temperature. *Global Change Biology*, 26(11), 6616–6629. <https://doi.org/10.1111/gcb.15123>

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>

Pardos, M., del Río, M., Pretzsch, H., Jactel, H., Bielak, K., Bravo, F., Brazaitis, G., Defosse, E., Engel, M., Godvod, K., Jacobs, K., Jansone, L., Jansons, A., Morin, X., Nothdurft, A., Oreti, L., Ponette, Q., Pach, M., Riofrío, J., ... Calama, R. (2021). The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe. *Forest Ecology and Management*, 481. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118687>

Perez, L., Nelson, T., Coops, N. C., Fontana, F., & Drever, C. R. (2016). Characterization of spatial relationships between three remotely sensed indirect indicators of biodiversity and climate: a 21years' data series review across the Canadian boreal forest. *International Journal of Digital Earth*, 9(7), 676–696. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1116623>

Pretzsch, H., Schütze, G., & Uhl, E. (2013). Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: Evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology*, 15(3), 483–495. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>

Project FunDivEUROPE.eu [online]. 2010 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <http://project.fundiveurope.eu>

R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Remeš, J., Pulkrab, K., Bílek, L., & Podrázský, V. (2020). Economic and production effect of tree species change as a result of adaptation to climate change. *Forests*, 11(4), 431. <https://doi.org/10.3390/F11040431>

Salemaa, M., Hotanen, J. P., Oksanen, J., Tonteri, T., & Merilä, P. (2023). Broadleaved trees enhance biodiversity of the understorey vegetation in boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 546. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121357>

Stickley, S. F., & Fraterrigo, J. M. (2021). Understorey vegetation contributes to microclimatic buffering of near-surface temperatures in temperate deciduous forests. *Landscape Ecology*, 36(4), 1197–1213. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01195-w>

Turner, M., Beer, C., Santoro, M., Carvalhais, N., Wutzler, T., Schepaschenko, D., Shvidenko, A., Kompter, E., Ahrens, B., Levick, S. R., & Schmullius, C. (2014). Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 297–310. <https://doi.org/10.1111/geb.12125>

TOMST. Web en systems tms tms-4. Tomst.com [online]. 2021 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://tomst.com/web/en/systems/tms/tms-4/>

Von Arx, G., Graf Pannatier, E., Thimonier, A., & Rebetez, M. (2013). Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: Potential implications for seedling

establishment in a changing climate. *Journal of Ecology*, 101(5), 1201–1213.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12121>

Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J., & Haase, T. (2019). Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40–47.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>

Zellweger, F., Coomes, D., Lenoir, J., Depauw, L., Maes, S. L., Wulf, M., Kirby, K. J., Brunet, J., Kopecký, M., Máliš, F., Schmidt, W., Heinrichs, S., den Ouden, J., Jaroszewicz, B., Buyse, G., Spicher, F., Verheyen, K., & De Frenne, P. (2019). Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 28(12), 1774–1786.
<https://doi.org/10.1111/geb.12991>

Zhao, Z., de Frenne, P., Peñuelas, J., van Meerbeek, K., Fornara, D. A., Peng, Y., Wu, Q., Ni, X., Wu, F., & Yue, K. (2022). Effects of snow cover-induced microclimate warming on soil physicochemical and biotic properties. *Geoderma*, 423.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115983>

Seznam tabulek a obrázků

Tabulky:

Tabulka 1. Průměrná roční teplota a srážky z meteorologické stanice Joensuu Linnunlahti zjištěny během let měření (Finnish meteorological institute, 2015a).....	18
Tabulka 2. Seznam výzkumných ploch s identifikačními čísly mikroklimatických čidel a popisu stromového patra porostu.....	20

Obrázky:

Obrázek 1. Mapa znázorňující polohu města Joensuu, v jehož okolí se vyskytují výzkumné plochy (zdroj: Mapy.cz).....	21
Obrázek 2. Mapa znázorňující polohu výzkumných ploch v okolí města Joensuu (zdroj: Google Earth).....	21
Obrázek 3. Monokulturní smrkový porost nacházející se na výzkumné ploše FIN-23..	22

Obrázek 4. Borový porost, ve kterém se vyskytuje výzkumná plocha FIN-14.....	22
Obrázek 5. Popis částí mikroklimatického čidla TMS4 (TOMST s.r.o.).....	24
Obrázek 6. Půdní čidlo TMS4 s ochranným pletivem proti poškození zvěří umístěné na výzkumné ploše.	25
Obrázek 7. Vývoj půdní vlhkosti v čase v monokulturách břízy (Betula), smrku (Picea) a borovice (Pinus) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.....	27
Obrázek 8. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v monokulturách borovice (Pinus), břízy (Betula) a smrku (Picea) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.	27
Obrázek 9. Průměrná půdní vlhkost v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	28
Obrázek 10. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.	28
Obrázek 11. Průměrná půdní vlhkost v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	29
Obrázek 12. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	29
Obrázek 13. GAM model zobrazující vývoj půdní vlhkosti v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	30
Obrázek 14. Vývoj teploty T1 v čase v monokulturách břízy (Betula), smrku (Picea) a borovice (Pinus) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.....	30
Obrázek 15. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v monokulturách borovice (Pinus), břízy (Betula) a smrku (Picea) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	31
Obrázek 16. Průměrná teplota T1 v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	31
Obrázek 17. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	32
Obrázek 18. Průměrná teplota T1 v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	32
Obrázek 19. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	33
Obrázek 20. GAM model zobrazující vývoj teploty T1 v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech	

2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	33
Obrázek 21. Vývoj teploty T2 v čase v monokulturách břízy (Betula), smrku (Picea) a borovice (Pinus) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.....	34
Obrázek 22. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v monokulturách borovice (Pinus), břízy (Betula) a smrku (Picea) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	34
Obrázek 23. Průměrná teplota T2 v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	35
Obrázek 24. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	35
Obrázek 25. Průměrná teplota T2 v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	36
Obrázek 26. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	36
Obrázek 27. GAM model zobrazující vývoj teploty T2 v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	37
Obrázek 28. Vývoj teploty T3 v čase v monokulturách břízy (Betula), smrku (Picea) a borovice (Pinus) v letech 2018 až 2022. Křivky znázorňují průměrné hodnoty a barevně zvýrazněná zóna kolem nich směrodatnou odchylku průměru.....	37
Obrázek 29. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v monokulturách borovice (Pinus), břízy (Betula) a smrku (Picea) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	38
Obrázek 30. Průměrná teplota T3 v monokulturách v závislosti na druhu dřeviny. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	38
Obrázek 31. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v porostech s různým počtem druhů dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	38
Obrázek 32. Průměrná teplota T3 v porostech v závislosti na počtu dřevin ve směsi. Tečky značí průměry, čárky kolem nich znázorňují 95% intervaly spolehlivosti.....	39
Obrázek 33. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v porostech s různou druhovou skladbou dřevin v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	39
Obrázek 34. GAM model zobrazující vývoj teploty T3 v porostech složených ze dvou druhů dřevin (smrk-bříza; smrk-borovice; borovice-bříza) v závislosti na čase v letech 2018 až 2022. Linie znázorňují nafitovaný GAM model a šedá zóna kolem nich 95% intervaly spolehlivosti.....	40