

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra ekologie lesa



**Vliv druhové skladby na mikroklima boreálního lesa ve  
Finsku**

Bakalářská práce

Autor: Romana Pilařová

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

2020



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Romana Pilařová

Lesnictví

Lesnictví

Název práce

**Vliv druhové skladby na mikroklima boreálního lesa ve Finsku**

Název anglicky

**Effects of tree species composition on the microclimate 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 lesní mikroklima, čímž snižuje dopady na biodiverzitu a stabilitu těchto lesů. Tento pozitivní vliv lesa na mikroklima v podrostu se však může lišit dle druhové a funkční skladby stromového patra, avšak empirická informace o tom, jak hlavní dřeviny boreálního lesa a jejich směsi ovlivňují lesní mikroklima doposud chybějí. Cílem práce tak bude zjistit, jak hlavní druhy dřevin boreálního lesa ve Finsku a jejich směsi ovlivňují teploty vzduchu, půdy a půdní vlhkost v podrostu.

### 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 oblasti – břízu bělokorou (*Betula pendula*), smrk ztepilý (*Picea abies*) a borovici lesní (*Pinus sylvestris*) a to jak v monokulturách tak i ve vzájemných směsích. V rámci diplomové práce budou plochy navštíveny, zkontrolována a případně doinstalována čidla a stažena data. Nad každým čidlem bude zhotovena hemisférická fotografie pro určení pokrývnosti stromového patra.

Analýza dat bude prováděna v programu R s pomocí k tomu vytvořeného skriptu. V první fázi budou vypočítány průměry, maxima, minima a variabilita v rámci vybraných časových období (např. denní či měsíční průměry teplot a maxima během vegetační sezóny, půdní vlhkost v létě apod.). Tyto proměnné pak budou použity jako závislé proměnné pro modely, do kterých budou jako nezávislé proměnné zahrnuty: zastoupení jednotlivých druhů dřevin, hustota porostu a pokrývnost stromového patra.

## Doporučený rozsah práce

35 stran textu

## Klíčová slova

mikroklima, boreální les, 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.
- 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>
- 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. *Bioscience* 49, 288–297.
- 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.
- D'Orangeville, L., Houle, D., Duchesne, L., Phillips, R.P., Bergeron, Y., Kneeshaw, D., 2018. Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nat. Commun.* 9, 1–10.
- Reich, P.B., Sendall, K.M., Stefanski, A., Rich, R.L., Hobbie, S.E., Montgomery, R.A., 2018. Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture. *Nature* 562, 263–267.

---

## Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

## Vedoucí práce

Ing. Radim Matula, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra ekologie lesa

---

Elektronicky schváleno dne 10. 6. 2019

**prof. Ing. Miroslav Svoboda, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 15. 06. 2020

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv druhové skladby na mikroklima boreálního lesa ve Finsku“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Radima Matuly, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědoma, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Radimovi Matulovi, Ph.D. za vedení a cenné rady při zpracovávání bakalářské práce.

# Vliv druhové skladby na mikroklima boreálního lesa ve Finsku

## Abstrakt

Tato bakalářská práce zkoumá vztah mezi druhovou skladbou stromů v boreálních lesích a mikroklimatem v jejich podrostu. Cílem bylo zjistit jaký vliv mají hlavní cílové dřeviny boreálního lesa severní Evropy (*Picea abies* (L.) H. Karst, *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth) a jejich směsi na půdní vlhkost, půdní teplotu a teplotu vzduchu.

Výzkum probíhal ve východním Finsku v okolí města Joensuu. Naměřená data byla shromážděna z celkem 28 zkusných ploch, které jsou součástí projektu FunDivEurope. Na každé z ploch se nacházelo jedno půdní čidlo TMS-4, pomocí, kterého byly měřeny čtyři parametry: půdní vlhkost, půdní teplota měřena 10 cm pod povrchem, půdní teplota měřena 2 cm pod povrchem a teplota vzduchu. Následně byla data zpracována pomocí statistického softwaru R.

Z naměřených hodnot byl zjištěno, že teploty se zásadněji nelišily mezi jednotlivými druhy a směsmi, ale vlhkost půdy byla nejvyšší v borových porostech. Práce tak ukázala, že s výjimkou monokultur borovice, druhově bohaté smíšené lesy jsou méně ohroženy suchem a jsou proto optimální pro růst a stabilitu v podmínkách klimatických změn.

**Klíčová slova:** mikroklima, boreální les, globální změna klimatu, FunDivEurope, druhová skladba, TMS-4

# Effects of tree species composition on the microclimate of boreal forests in Finland

## Abstract

This bachelor thesis examines the relationship between the species composition of trees in boreal forests and the microclimate in their undergrowth. The aim was to determine the influence of the main target trees of the boreal forest of northern Europe (*Picea abies* (L.) H. Karst, *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth) and their mixtures on soil moisture, soil temperature and air temperature.

The research took place in eastern Finland around the city of Joensuu. The measured data were collected from a total of 28 test plots, which are part of the FunDivEurope project. There was one TMS-4 soil sensor on each of the plots, by means of which four parameters were measured: soil moisture, soil temperature measured 10 cm below the surface, soil temperature measured 2 cm below the surface and air temperature. Subsequently, the data were processed using statistical software R.

From the measured values, it was found that the temperatures did not differ significantly between individual species and mixtures, but the soil moisture was the highest in pine stands. The work thus showed that, apart from pine monocultures, species-rich mixed forests are less endangered by drought and are therefore optimal for growth and stability under climate change.

**Keywords:** microclimate, boreal forest, global climate change, FunDivEurope, species composition, TMS-4



# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Rozbor problematiky</b> .....	<b>14</b>
3.1 Mikroklima lesa .....	14
3.1.1 Faktory ovlivňující mikroklima v lesích.....	14
3.2 Boreální les.....	16
3.3 Vliv globální změny klimatu na boreální lesy .....	17
3.3.1. Dopady klimatické změny na boreální lesy .....	17
3.4 Projekt FunDivEUROPE .....	18
<b>4 Metodika</b> .....	<b>20</b>
4.1 Přírodní poměry .....	20
4.2 Průběh stahování dat .....	24
4.3 Zpracování dat.....	25
4.4 Měřicí čidla .....	25
<b>5 Výsledky</b> .....	<b>28</b>
5.1 Půdní vlhkost.....	28
5.2 Půdní teplota T1 a T2 .....	30
5.3 Teplota vzduchu T3.....	33
<b>6 Diskuze</b> .....	<b>36</b>
6.1 Půdní vlhkost.....	36
6.2 Půdní teplota T1 a T2 .....	37
6.3 Vzdušná teplota T3 .....	38
<b>7 Závěr</b> .....	<b>39</b>

## Seznam tabulek, obrázků a grafů

### Obrázky:

Obrázek 1. Mapa s vyznačeným městem Joensuu, v jehož blízkosti se nacházejí zkusné plochy. Foto: Mapy.cz. In: Mapy.cz [online]. [Cit. 11. 6. 2020], dostupné z:

<https://mapy.cz/zakladni?x=30.3525169&y=62.6795978&z=8&source=osm&id=75434>

Obrázek 2 - Monokulturní borovicový les, ve kterém je umístěna zkusná plocha

Obrázek 3- Monokulturní smrkový porost, v kterém byla umístěna zkusná plocha

Obrázek 4- Smíšený les s pěstební směsí smrk-bříza, v kterém byla umístěna zkusná plocha

Obrázek 5- Popis půdního čidla TMS-4. Krycí klobouček pro TMS 3, In:

TOMST s.r.o. [online]. [Cit. 11. 6. 2020], dostupné z: <https://eshop.tomst.com/tms-datalogery/92-kryci-kloboucek-pro-tms-3.html>

Obrázek 6- Půdní čidlo opatřené ochranným pletivem, proti okusu zvěře, vyfoceno na zkusné ploše

Obrázek 7. Graf zobrazující hodnoty půdní vlhkosti měřené v monokulturních lesích v závislosti na čase.

Obrázek 8. Graf zobrazující hodnoty půdní vlhkosti měřené na všech zkusných plochách v závislosti na čase.

Obrázek 9. Graf zobrazující hodnoty půdní vlhkosti z pohledu počtu druhů v porostu v závislosti na čase.

Obrázek 10. Grafy zobrazující průměrné měsíční hodnoty půdní vlhkosti v závislosti na čase. Barvy znázorňují pozorované roky. Graf je vyhotoven pro monokulturní, smíšené dvou-druhové a smíšené tří-druhové porosty.

Obrázek 11. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T1 v závislosti na čase a počet druhů na zkusné ploše.

Obrázek 12. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T2 v závislosti na čase a počtu druhů na zkusné ploše.

Obrázek 13. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T1 (půdní) v závislosti na čase a jednotlivých dřevin.

Obrázek 14. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T2 v závislosti na čase a jednotlivých dřevin.

Obrázek 15. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T1 (půdní) v závislosti na čase a jednotlivých dřevinných směsí, které se na zkusných plochách nacházely.

Obrázek 16. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T2 v závislosti na čase a jednotlivých dřevinných směsích, které se na zkušných plochách nacházely.

Obrázek 17. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T3 (vzduchu) v závislosti na čase a jednotlivých dřevinných směsích, které se na zkušných plochách nacházely.

Obrázek 18. Podrobný pohled na letní měsíce v roce 2018 a v roce 2019 teplotního grafu na obrázku 17.

Obrázek 19. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T3 v závislosti na čase a počtu druhů na zkušné ploše.

### **Tabulky:**

Tabulka 1. Soupis zkušných ploch s identifikací čidel TMS a popis porostního krytu na plochách.

### **Seznam použitých zkratk**

LAI= Leaf area index – index listové plochy

TMS= Temperature Measurement – systém pro měření teploty

GNSS= Global Navigation Satellite System – globální družicový polohový systém

FunDivEUROPE = Functional Significance of Forest Biodiversity in Europe – funkční význam biologické rozmanitosti lesů v Evropě

# 1 Úvod

V posledních letech je velmi diskutovaným tématem problém globální změny klimatu. Lesnictví se toto téma také dotýká a mění se klima začíná být velkým problémem. Zejména dlouhá období sucha oslabují lesní porosty a ty jsou pak náchylnější na škodlivé patogeny či škůdce (Fleischer et al., 2005).

Také proto se čím dál tím více probírají možná opatření pro zpomalení globálního oteplování. Není překvapením, že právě stromy nám mohou pomoci při řešení klimatického problému jako je globální změna klimatu (De Frenne et al., 2013). Již v minulosti byla dokázána různá propojení porostů s mikroklimatem a jejich společným ovlivňováním makroklimatu (De Frenne et al., 2013). Ač si to mnohdy neuvědomujeme, mikroklima se ne vždy vyskytuje jen pár centimetrů nad povrchem. Ve stručném vysvětlení se sice jedná o lokální klima v blízkosti půdy, ale v případě příznivých biotických podmínek (bezvětrí), se může lokální mikroklima tvořit až do výšky několik metrů. V takovém případě můžou místní klimatické podmínky ovlivňovat velkou část okolí.

Díky znalostem vlivu jednotlivých druhů stromů či jejich kombinací na mikroklima by se dalo podpořit zpomalení či zamezení negativních dopadů globálních změn klimatu na lesní mikroklima, které je zásadní pro růstové podmínky stromů a celkovou stabilitu lesních ekosystémů (Norris et al., 2012). Bohužel, ale informace o vazbách mezi druhovou skladbou a mikroklimatem nejsou dostatečně empiricky podloženy, a tak doposud není jasné jaké porosty by mohly mít zmírňující vliv na účinky globálního oteplování.

V této bakalářské práci bylo zjišťováno, jakým způsobem druhové složení lesů ovlivňuje mikroklima v podrostu lesů. Měření probíhá v boreálním lese ve východním Finsku, a to přesně v blízkosti města Joensuu. Severské boreální lesy jsou příhodné k této studii, jelikož se tyto lesy se svou rozlohou řadí mezi jeden z největších zalesněných biotů světa. Pro člověka je boreální les důležitý z hlediska zásobárny dřeva jakožto výchozího materiálu pro pilařské zpracování a dřevozpracující průmysl, nehledě na schopnost regulace množství oxidu uhličitého v atmosféře a další ekologické benefity náležící tomuto biomu. Zpracování kalamit v takto rozlehlých lesích a případné jejich odlesnění by mohlo mít negativní vliv na klimatickou dynamiku lokálního i globálnějšího charakteru.

## 2 Cíl práce

Tato bakalářská práce měla za cíl zjistit, jak jednotlivé druhy dřevin a jejich směsi v boreálních lesích ve Finsku ovlivňují mikroklima. Studovány byly hlavní dřeviny boreálních lesů severní Evropy, a to jehličnany smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a také jeden listnatý druh bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth).

Konkrétně bylo cílem zjistit, jak tyto druhy a všechny jejich druhové kombinace ovlivňují teplotu vzduchu (výšce 50 cm nad povrchem půdy), teploty půdy (2 a 10 cm pod povrchem půdy) a objemovou půdní vlhkost (v horních 10 cm půdy) na celkem 28 výzkumných plochách FunDivEUROPE ve východním Finsku. Měření byla prováděna pomocí mikroklimatických čidel na výzkumných plochách v monokulturních a smíšených lesích s dvou-druhovými a tří-druhovými kombinacemi dřevin. Naměřené hodnoty z celkem dvouletého pozorovaného období byly vyhodnoceny pomocí obecných aditivních modelů, jejichž výsledky byly zobrazeny v grafech pro lepší přehlednost. Tato bakalářská práce byla provedena na ve spolupráci s Natural Resources Institute Finland, pobočkou v Joensuu.

## **3 Rozbor problematiky**

### **3.1 Mikroklima lesa**

Mikroklima je jinými slovy lokální klima, nacházející se v blízkosti povrchu země. Tvoří jej soustava klimatických podmínek, mezi nejpodstatnější z nich patří teplota, světelné záření a vlhkost (Jones, 1993).

Mezi významné klimatotvorné faktory je považována prezence lesního krytu na povrchu Země (De Frenne et al., 2013). Lesní porosty a rostliny mají v lokálním měřítku schopnost podmínky mikroklimatu značně ovlivňovat (De Frenne et al., 2013). Míra ovlivnění klimatických podmínek porostem se odvíjí od druhové skladby, počtem bylinných pater, půdním složením či disturbancemi, které na ploše probíhají (Armbruster et al., 2004).

Jedná se tedy o stále probíhající interakce mezi makroklimatem a vegetačním krytem. Tato vzájemná působení lze definovat jako výměnu energie a hmoty, změnu struktury a charakteru či změnu ekofyziologického chování vegetačního krytu (Aussenac, 2000).

Mikroklima je velmi proměnlivý a snadno ovlivnitelný faktor, a to jak ve vertikálním, tak i v horizontálním směru. Kromě vegetačního krytu mají velký vliv také faktory utvářející makroklima či mezoklima, jako je například sluneční záření či povětrnostní podmínky. (Litschmann & Hadaš, 2003). Z hlediska původu mohou být faktory ovlivňující mikroklima rozděleny na biotické a abiotické vlivy.

#### **3.1.1 Faktory ovlivňující mikroklima v lesích**

Vliv abiotických a biotických podmínek na mikroklima může být značně pozměněno přítomností lesního ekosystému potažmo jeho podobou. V korunách stromů a na ploše porostního pláště dochází k absorpci či odražení slunečního záření, intercepci srážek, nebo zpomalení větru pronikajícího do porostu (Klaassen et al., 1998), (Federer & Tanner, 1966).

Jedním z nevlivnějších abiotických faktorů je vítr, jehož dlouhotrvající působení na dané území může mikroklima ovlivnit na tolik až dojde k jeho úplné ztrátě a nahrazením makroklimatem (Litschmann & Hadaš, 2003). Opačný vliv na mikroklima má sluneční záření, za bezvětrnostních podmínek může mikroklima naopak narůst ve

vertikálním směru do výšek metrů (Litschmann & Hadaš, 2003). Míra propuštěného záření také ovlivňuje místní radiační bilanci (Podrázský, 2014).

Při ovlivňování abiotických faktorů je důležitým aspektem podoba lesního ekosystému. U stromů zejména tvar a velikost koruny (Aussenac, 2000). Tyto hlavní parametry se dají vyjádřit pomocí stupně vegetačního zápoje a indexu listové plochy (LAI). Jedná se o hodnoty, které nejen přímo ovlivňují mikroklima, ale také spolu s dalšími stromovými veličinami poukazují na množství fotosynteticky aktivní biomasy, která je schopna ovlivňovat okolní podmínky svou činností (Aussenac, 2000).

Například u starého porostu, zejména s listnatými druhy, kde korunový zápoj je velmi hustý, dochází k akumulaci vzduchu, a tím pádem dokáže lépe udržovat teplotu pod korunami stromů (Geiger et al., 1995). Opakem může být mladý ne zcela zapojený a rozvětvený porost, který netvoří bariéru pro proudění vzduchu a přístup slunečního záření na povrch půdy. Extrémem je porostní holina, kde vzduch může proudit neomezeně, nedochází tak k akumulování teploty, v těchto případech má mikroklima ve vertikálním směru velmi malý rozsah (Geiger et al., 1995).

Korunový zápoj tvoří rozhraní mezi atmosférou a vegetací. Lze ji definovat jako podíl plochy korunových projekcí stromu k výměře porostní skupiny či jiného vymezeného posuzovaného území (Jennings et al., 1999). Zápoj nám tedy říká, jak moc dochází k vzájemnému dotyku a prolínání větví stromů (Podrázský, 2014).

LAI je bezrozměrná veličina, určující velikost listové plochy nesenou dřevinou (Myneni, 1997). Je velice dynamickou veličinou, mění se podle sezóny, vývojové etapy nebo například podle působení biologických faktorů. Od velikost LAI se odráží celkové mikroklima porostu, vypovídá o dostupnosti živin v půdě, výskytu pro vegetaci přístupné vody, činnosti herbivorů a tedy nastiňuje i celkový zdravotní stav dřeviny (Welles, 1990).

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). Plný stromový zápoj ovlivňuje místní mikroklimatické podmínky (např. vlhkost a teplotu), které mohou působit tlumivým efektem na oteplování makroklimatu (De Frenne et al., 2013).

V posledních letech, v souvislosti s klimatickou změnou, ale zaznávají názory, že by měl být les chápán i jako významný faktor ovlivňující nejen lokální podmínky, a tudíž by měli být vlastníci lesa oceněni za tuto službu, což by je mohlo motivovat k pěstování právě ekologicky významných kultur.

## 3.2 Boreální les

Boreální les, nebo také pod ruským označením Tajga, je jedním z biotů země. Tvoří souvislý pás lesů nacházející se přibližně od 50° do 70° severních šířek severní polokoule. V tomto biotu jsou spíše mrazivé podmínky, převažují dlouhé chladné zimy nad krátkými mírnými léty. Průměrné roční teploty se pohybují kolem -5 až 3 °C, v teplejších měsících kolem 10 °C, z tohoto důvodu je vegetační doba omezena na 1-4 měsíce ročně. Úhrn srážek je spíše nízký, ale kombinace s velmi nízkým výparem způsobuje převážně nadbytek vody, který v určitých oblastech vede až k zamokření či k rašelinění (Podrázský, 2014).

Podle těchto specifických klimatických podmínek se přizpůsobila také vegetace. Stromy jsou přizpůsobeny na krátkou vegetační dobu především stálezeleností (výjimkou je vyskytující se modřín (*Larix sp.*)). Listnaté stromy se z důvodu velkých mrazů nacházejí spíše v drobnolistých variacích jako vtoušené dřeviny, případně se lze setkat i s dominancí širokolistých druhů na klimaticky příznivějších stanovištích. (Larsen, 1980)

Typickým představitelem tohoto chladného biotu je jehličnatý les s dominantní tendencí a tím i navazující dynamikou jehličnatých porostů. Jehličnaté kultury jakožto hlavní dřevina v zápoji významně ovlivňují lokální klima i podmínky, takže jejich zásadní změna má značný dopad na místní ekosystém. Z jehličnatých druhů se zde v největší míře zastoupení objevuje smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) a modřín (*Larix sp.*). Listnaté druhy jsou v boreálních lesích ve značné menšině a jehličnatým druhům tak nekonkurují, převážně se zde vyskytuje bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth) a druhy topolů (*Populus sp.*). Jejich výskyt je častější v počátcích sukcese, kde zastávají funkci pionýrských dřevin (Podrázský, 2014)(Angelstam & Kuuluvainen, 2004). Na více humidních a teplejších oblastech v rámci biotu, naopak jehličnaté druhy ustupují ve prospěch listnáčů jako dub (*Quercus sp.*) nebo javor (*Acer sp.*) (Larsen, 1980). Z řádu bylin se nejvíce vyskytují druhy žijící na kyselých půdách s chudším obsahem minerálů, typickými zástupci jsou brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus*) a brusnice brusinka (*Vaccinium vitis-idaea*), šťavel kyselý (*Oxalis acetosella*), Pstroček dvoulisý (*Maianthemum bifolium*) (Archibold, 2012).

Pro některé severské státy jsou boreální lesy přírodním bohatstvím. Vzhledem k jejich velké rozloze hraje těžbařský průmysl zásadní roli pro ekonomickou dynamiku států. V případě Finska představují lesní pozemky 86 % z celkové rozlohy státu (Vaahtera et



al., 2018) a svou dřevařskou produkcí ho staví na druhou příčku hned za vedoucím Švédskem v rámci Evropy, co se týče hrubého příjmu navázaného na tento segment (Coyette & Schenk, 2019).

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

Obecně 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). Vyšší teploty by mohly přinést ještě větší riziko požárů či přemnožení hmyzích škůdců (Fleischer et al., 2005). Jehličnany by se v důsledky změny klimatu mohly dostat mimo jejich ekologické optimum, takže by v oblastech přirozených boreálních lesů mohlo nastat odumírání těchto lesů většího rozsahu, než je v takových porostech běžné (Volney & Fleming, 2019).

Ke kolísání teplot docházelo již několikrát v historii Země. Jsou doloženy záznamy o obdobích, kdy teplota byla vyšší i nižší, než je nyní. Výzkumy také dokumentují historickou nepřilíš odlišnou rostlinou skladbu, takže lze předpokládat, že stromy a vegetace obecně je schopna se do jisté míry přizpůsobit novým klimatickým podmínkám (Jacobson & Dieffenbacher-Krall, 1995).

#### **3.3.1. Dopady klimatické změny na boreální lesy**

Ač se to na první pohled může zdát jako nelogické vzhledem k obecně negativnímu názoru na globální oteplování, teplejší podmínky mohou vyústit i v příznivější situaci pro lesní porosty ve specifických podmínkách.

Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, podle klimatických modelů by se měly do konce 21. století v boreálních lesích zvýšit teploty a prodloužit období sucha (Saxe et al., 2001). Mohlo by se zdát, že právě takové klimatické změny povedou ke snížení růstu stromů a na určitých zeměpisných šířkách tomu tak opravdu je (D'Orangeville et al., 2018). Avšak pro chladné boreální lesy, kde je limitujícím faktorem produkce biomasy právě příliš nízká průměrná roční teplota, by takové změny mohly být naopak do jisté míry přínosné (D'Orangeville et al., 2018). Vyšší teploty mohou prodloužit vegetační období a zvyšovat rychlost růstu, zmenší se také riziko poškození mrazem stromů hrozící při nízkých teplotách. Nejčastějším limitujícím faktorem pro růst stromů v severních šířkách jsou totiž především nízké teploty a nadbytek vody, který může vést k poklesu

produktivity lesa (Goldblum & Rigg, 2005). Za výhodné tedy můžeme předpokládat zvýšenou produkci dřevní hmoty, a to až v průměru o  $13 \pm 3\%$  (D'Orangeville et al., 2018). Ovšem vyšší oteplení má pozitivní vliv pouze pro některé druhy stromů, v opačném případě dochází k negativním účinkům jako je snižování růstu způsobeným nedostatkem vody, jelikož s vysokými teploty přichází také zvýšená míra výparu (Goldblum & Rigg, 2005) (D'Orangeville et al., 2018).

Zároveň je důležité poukázat na fakt, že mrazivé a vlhkostní podmínky dosud eliminovaly hmyzí škůdce na přijatelné množství, a i relativně malé oteplení by mohlo být impulsem pro masivnější rozmnožování a zvýšit tak výskyt kalamit způsobených lesními hmyzími škůdci (Price et al., 2013). Naopak pro druhy jejichž přirozený areál je v nižších zeměpisných šířkách a nižších nadmořských výškách, by vyšší teplota mohla mít pozitivní vliv. Znamenalo by to pro tyto druhy možnost rozšířit se směrem na sever a do vyšších poloh (Coomes et al., 2014). To by platilo samozřejmě jen v případě, že nový areál bude disponovat vhodnými podmínkami dle nároků konkrétního druhu, jako je například výše srážek či pedologická nebo jiná specifika. Při klimatických změnách se dá tedy očekávat, že bude docházet ke změně druhové skladby stromového patra, dřeviny mohou vymizet z určitých nadmořských výšek, zejména mimo areál svého přirozeného výskytu.

### **3.4 Projekt FunDivEUROPE**

V roce 2010 německá univerzita Albert-Ludwigs-Universität Freiburg za pomoci další 25 partnerských institucí z celkem 15 zemí vytvořila evropský výzkumný projekt FunDivEUROPE. Hlavním cílem tohoto projektu je objasnit účinky biologické rozmanitosti ve významných typech evropských lesů ve vztahu k ekologickým funkcím a službám, jako je například produkce dřeva, ukládání uhlíku či schopnost retence vody. Znalost těchto vztahů může napomoci efektivnějšímu a zároveň přírodě bližšímu a trvale udržitelnému lesnímu hospodářství (Project FunDiveEurope, 2010c).

Tento rozsáhlý projekt je postaven na základě třech různých platforem: experimentální, průzkumné a inventarizační (Project FunDiveEurope, 2010c).

Nejrozsáhlejší část z hlediska počtu zkusných ploch je věnována experimentálnímu výzkumu, které jsou napojeny na již existující globální síť TreeDivNet. Ta se skládá z bezmála 2 900 ploch v rámci 8 různých států napříč všemi hlavními biomy, ale největší koncentrace se nachází v Evropě v pásu mezi Francií a Finskem. Celková plocha čítá

okolo 600 hektarů. Dle autorů projektu FunDivEUROPE se zřejmě jedná o nejrozsáhlejší výzkumnou platformu sloužící k lepšímu pochopení významu lesní biodiverzity. Experimenty, které zde probíhají, jsou postaveny na komplexních přístupech a poskytují tak souhrnné informace o tom, jak rostliny reagují s mikrobiomy a jak naopak mikrobiomy ovlivňují růst a celkové zdraví rostlin v rámci dané lokality (Project FunDiveEurope, 2010a).

Průzkumná platforma tvoří speciálně utvořenou síť ploch, nacházející se v šesti zemích (Finsko, Polsko, Německo, Rumunsko, Itálie, Španělsko) v nichž jsou zahrnuty nejdůležitější evropské typy lesů. Pro lepší reprezentativnost platformy je v každém regionu více ploch umístěných v druhově různorodých porostech (Project FunDiveEurope, 2010b).

Inventarizační platforma je datový soubor obsahující informace převzaté z národní lesní inventarizace týkající se ploch, které jsou součástí průzkumné platformy. Najdeme zde veškeré rozsáhlé popisy struktury lesů a statistické přehledy výsledků. Takové informace mohou uvést získaná data z vlastních měření do patřičného kontextu skutečné podoby lesů v jednotlivých státech a regionech (Project FunDiveEurope, 2010d).

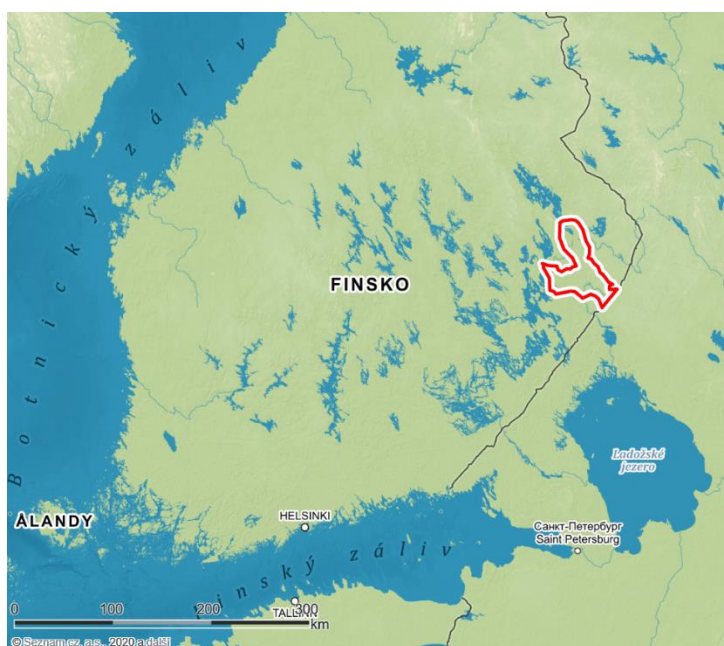
## 4 Metodika

Výzkum probíhal na 28 zkusných plochách v síti FunDivEurope (Baeten et al., 2013), které založil (v roce 2012) a spravuje Natural resources institute Finland (LUKE), v jehož spolupráci výzkum probíhal. Plochy jsou situovány ve východním Finsku 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“.

Mikroklimatická měření byla započata již na jaře roku 2017, kdy se na zkusných plochách instalovala měřící zařízení TMS-4 (viz. kapitola měřící čidla).

### 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. 1) na ploše o rozloze 1600 km<sup>2</sup>.



Obrázek 1. Mapa s vyznačeným městem Joensuu, v jehož blízkosti se nacházejí zkusné plochy. Foto: Mapy.cz

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). 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 obrázku 2, 3, 4. Lesy, ve kterých se nacházejí plochy jsou uměle vysazeny a jedná se tedy o hospodářské lesy.

Plochy v rámci sítě FunDivEUROPE byly vybírány na základě dvou hlavních kritérií a těmi je rovnoměrnost zastoupení pozorovaných dřevin a minimalizace rušivých faktorů (Jucker et al., 2014). Rovnoměrnost byla definována výčetní základnou, která měla být co možná nejvyrovnanější mezi jednotlivými přítomnými druhy. Plochy s méně vyrovnaným poměrem výčetních základen 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 v 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 (sklon) a klimatickými (nadmořská výška) podmínkami. Dále stromy musely být v podobném věku a vytvářet plný zápoj (Jucker et al., 2014).

Na každé ploše s rozměry 30 x 30 m bylo nainstalováno v roce 2017 vždy jedno měřící čidlo TMS- 4.

Přehled parametrů popisující jednotlivé zkusné plochy je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1. Soupis zkusných ploch s identifikací čidel TMS a popis porostního krytu na plochách.

název zkusné plochy	ID čidla	počet druhů dřevin na ploše	věk	dřevinná skladba
FIN-1	94178235	2	45	smrk-borovice
FIN-2	94178227	2	42	smrk-briza
FIN-3	94178234	2	42	briza-smrk
FIN-4	94178226	2	42	smrk-briza
FIN-5	92178543	2	45	borovice-briza
FIN-6	94178249	1	47	smrk
FIN-7	94178224	1	38	briza
FIN-8	94178239	1	38	briza
FIN-9	94178242	1	49	borovice
FIN-10	94178228	1	49	smrk
FIN-11	94178256	1	34	briza
FIN-12	94178250	3	32	borovice-smrk-briza
FIN-13	94178225	2	43	borovice-briza
FIN-14	94178243	1	42	borovice
FIN-15	94178223	2	43	borovice-briza
FIN-16	94178260	1	45	borovice
FIN-17	94178231	2	47	smrk-borovice
FIN-18	94178251	1	40	smrk
FIN-19	94178244	2	44	smrk-borovice
FIN-20	94178229	2	49	smrk-briza
FIN-21	94178237	1	39	borovice
FIN-22	94178220	2	38	smrk-borovice
FIN-23	94178241	1	40	smrk
FIN-24	94178221	2	32	smrk-briza
FIN-25	94178253	3	38	borovice-smrk-briza
FIN-26	94178245	3	48	borovice-smrk-briza
FIN-27	94178254	3	39	borovice-smrk-briza
FIN-28	94178232	2	39	borovice-briza





Obrázek 2. Borovicový les, ve kterém je umístěna zkusná plocha FIN 9.



Obrázek 3. Zkusná plocha FIN 23 nacházející se ve smrkovém porostu.





Obrázek 4. Smíšený les s pěstební směsí smrk-bříza, ve kterém byla umístěna zkusná plocha FIN 20.

## 4.2 Průběh stahování dat

Stažení naměřených dat z TMS čidel pro tuto bakalářskou práci bylo provedeno v polovině listopadu roku 2019. Jednotlivé zkusné plochy jsou ve Finsku rozprostřeny na území o rozloze 1600 km<sup>2</sup>, a proto jsme se k jednotlivým místům přibližovali osobním automobilem. Dále jsme přímo na zkusné plochy docházeli pěšky pomocí GNSS. Každá zkusná plocha byla opatřena dřevěnými kolíky, modře natřené kolíky ohraničovaly hranici plochy (30m X 30m) a červeně natřené kolíky označovaly vnitřní čtverec (10m X 10m). 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 přenášených 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.



Software nabízí okamžitý náhled na graf z právě přenesených dat do notebooku, umožňuje tím tak přehlednou kontrolu, jsou-li data správně stažena.

### 4.3 Zpracování dat

Veškeré analýzy, revize a čištění dat byly provedeny ve statistickém programu R (R Core Team, 2016) a v něm obsažených balíčcích. V první fázi byla data revidována a odstraněna viditelně chybná měření, která běžně vznikají buď chybou přístroje či vytažením čidla z půdy nebo jeho poškozením (nejčastěji zvěří). Jelikož čidla poskytují velké množství dat (v řádech milionů měření) a vizualizace a revize v běžném software není možná, bylo k čištění využito speciálně napsaného scriptu (aplikace) v balíčku „Shiny“, který umožnil jednoduchou vizualizaci dat a odmazávání či posuny chybných dat. Z této aplikace pak byla vyčištěná data vyexportována jako tabula ve formátu csv, která byla použita přímo ve statistických analýzách v programu R.

V programu R pak byly vypočítány průměrné hodnoty pro jednotlivé měřené veličiny, a to jak pro jednotlivé roky (2018, 2019) tak i pro jednotlivé měsíce. Rozdíly v průměrech byly testovány pomocí zobecněných lineárních modelů. Pro vyhodnocení dynamiky teplot a půdní vlhkosti během sledovaného období byly do dat nařazeny zobecněné aditivní modely (GAM), které pak byly zobrazeny v grafech pomocí balíčku „ggplot2“.

### 4.4 Měřicí čidla

Měření půdní vlhkosti a teplot bylo prováděno pomocí čidel TMS-4, anglická zkratka TMS znamená Temperature Measurement Systems (Wild et al., 2019).

Použité TMS čidlo se skládá ze dvou částí, nadzemní a podzemní. Přibližně ve výšce 50 cm nad zemí se nachází senzor vzdušné teploty T3 opatřený ochranným kloboučkem (Obr. 5 a 6), 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 10let (Wild et al., 2019).

Nadzemní a podzemní části jsou propojeny pomocí kabelu, který opatřen speciálním chráničem proti poškození a 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 5. Ilustrační obrázek nadzemní části TMS-4. Foto: TOMST s.r.o.



Obrázek 6. Půdní čidlo TMS na výzkumné ploše. Čidlo je opatřené ochranným pletivem, proti okusu zvířete.

## 5 Výsledky

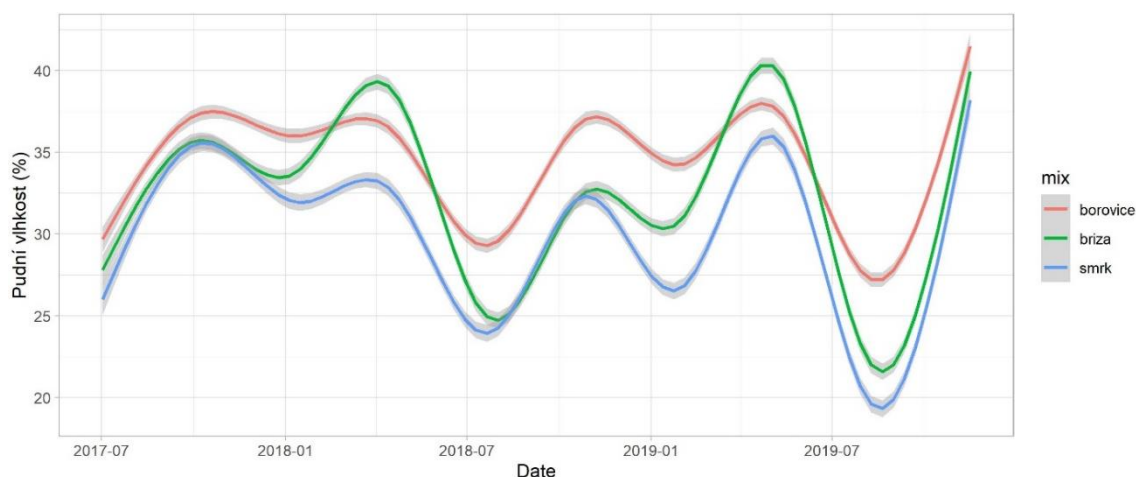
Základním podkladem pro vyhodnocení dat jsou grafy GAM modelů, které znázorňují průběh jednotlivých mikroklimatických veličin (půdní vlhkost, půdní teplota měřena 10 cm pod povrchem, a půdní teplota měřena 2 cm pod povrchem) v čase. Křivky potom reprezentují zkoumané veličiny na ploše z pohledu hlavní dřeviny, druhové bohatosti porostu a pěstební směsi. Právě díky průběhům zmíněných mikroklimatických veličin lze odvodit stav vlhkostních a teplotních podmínek a jejich eventuální návaznost na určitě dřevinné směsi či druhy. Dvouletá časová řada nabízí širší pohled na problematiku mikroklimatu, a umožňuje také sledovat eventuální rozdíly v rámci ročních období i měsíců.

### 5.1 Půdní vlhkost

Nejvíce různorodý, z pohledu půdní vlhkosti, vyšel graf zobrazující hodnoty odebrané z ploch s jednou hlavní dřevinou.

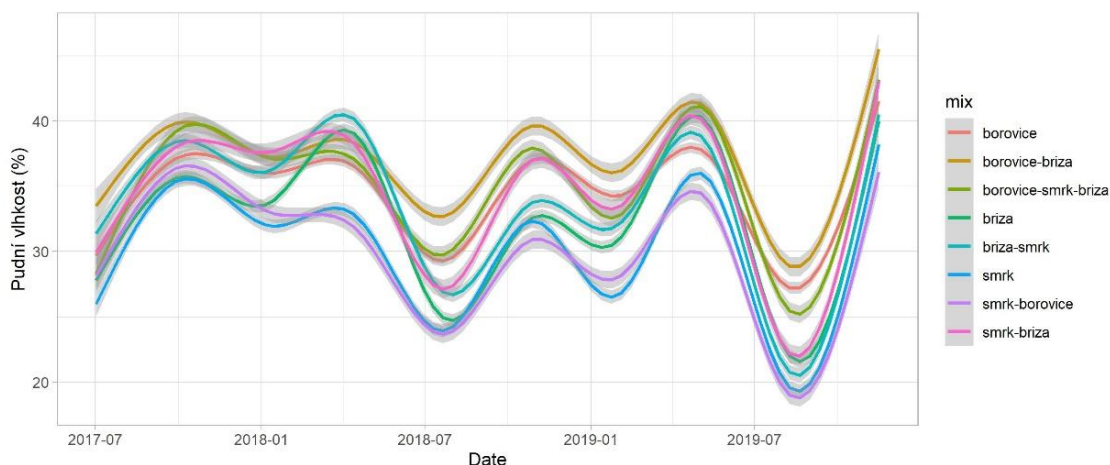
Podle výsledného grafu půdní vlhkosti na obrázku 7 je patrné, že v roce 2018 dosahovala půdní vlhkost vyšších minimálních hodnot, ale také nižších maximálních oproti roku 2019. Lokální maxima a minima vykazovala rozdíly v hodnotách vlhkosti v rámci zmíněných dvou let, ale vyskytovala se v přibližně stejnou dobu – minima na v zimě a v létě, maxima na jaře na podzim.

Borovicové porosty se z grafu jeví jako nejvíce schopné stabilizace půdní vlhkosti, což je indikováno nejmenšími výkyvy hodnot a nejplošší křivkou. Data změřená ve smrkových lesích naznačují podobný průběh, ale oproti borovici soustavně nižší půdní vlhkost o cca 10 %, patrnou zejména v roce 2018. Smrkové porosty mají také ze všech dřevin nejnižší naměřené hodnoty v rámci celého sledovaného období. V březových porostech byly naměřeny naopak nejvyšší dosažené hodnoty vlhkosti, a to v jarních měsících v obou sledovaných letech. Amplituda křivky březových lesů byla největší ze tří sledovaných dřevin.



Obrázek 7. Graf zobrazující hodnoty půdní vlhkosti měřené v monokulturních lesích v závislosti na čase.

Následující graf (Obr. 8) zobrazuje průměrná data půdní vlhkosti ze všech pozorovaných zkusných ploch. Všechny průběhy půdních vlhkostí poukazují na opakující se trend, který kopíruje změnu klimatu v závislosti na čase. Křivky zobrazující půdní vlhkost v porostech bríza-smrk a bríza indikovaly nejstrmější změny vlhkosti, zejména na jaře roku 2018, kde půdní vlhkost byla v tomto momentě nejvyšší ze všech směsí. Pěstební směs borovice-bríza dosahuje až na výjimku na jaře 2018 soustavně nejvyšší hodnoty. Naopak nejnižší vlhkost byla po celé měřené období ve smrkovo-borovicových a smrkových porostech.

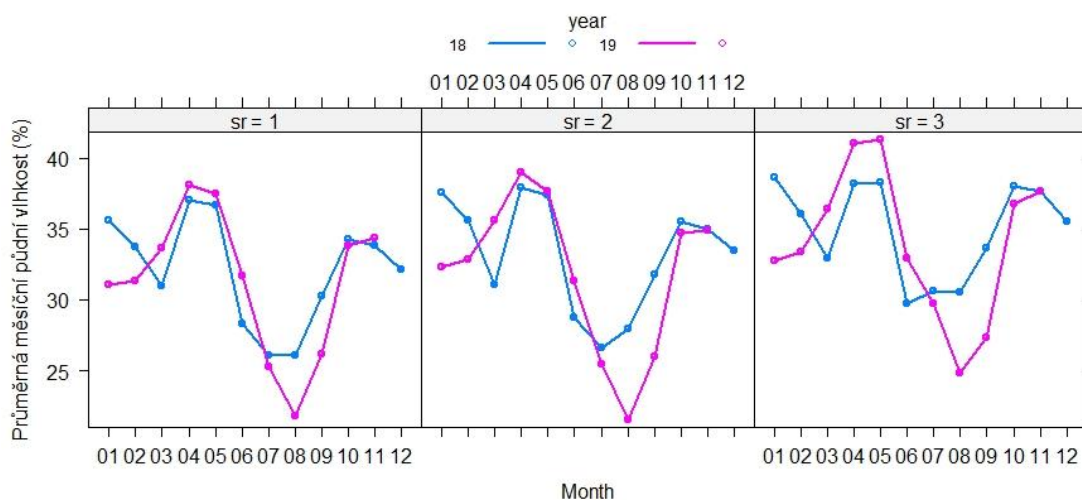


Obrázek 8. Graf zobrazující hodnoty půdní vlhkosti měřené na všech zkusných plochách v závislosti na čase.

Při pozorování monokulturních a smíšených porostů, kde nehrály roli druhy dřevin, ale pouze druhová bohatost na měřených plochách, byla podle grafu (Obr. 9) nejvyšší vlhkost půdy naměřena ve smíšených porostech, respektive porostech obsahující 3 druhy dřevin. Naopak nejnižší mikroklíma vyjádřené nejnižšími naměřenými hodnotami vlhkosti bylo patrné v monokulturách. Zde se půdní vlhkost pohybovala téměř vždy, s výjimkou léta 2019, pod hodnotami naměřených u porostů, kde byly zastoupeny minimálně dva druhy stromů.

Obrázek 9. Graf zobrazující hodnoty půdní vlhkosti z pohledu počtu druhů v porostu v závislosti na čase.

Graf umožňující lepší porovnání vlhkostních podmínek v rámci měsíců i v rámci let 2018 a 2019 (Obr. 10) ukázal, že v roce 2018 v letních měsících obzvláště v srpnu byla naměřená vlhkost zhruba o 5 % vyšší. Graf také poukázal na velmi podobné hodnoty půdní vlhkosti mezi monokulturními a smíšenými dvou-druhovými kombinacemi.



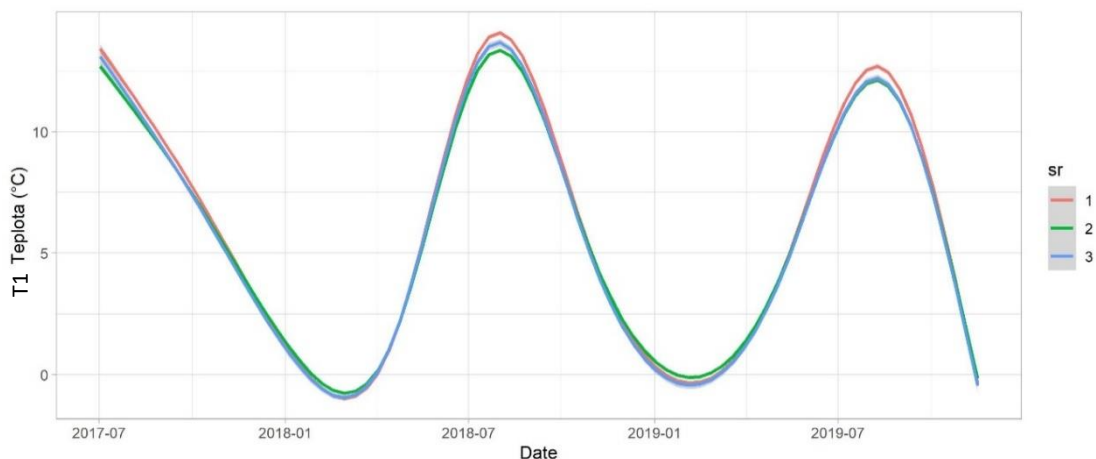
Obrázek 10. Grafy zobrazující průměrné měsíční hodnoty půdní vlhkosti v závislosti na čase. Barvy znázorňují pozorované roky. Graf je vyhotoven pro monokulturní (sr = 1), smíšené dvou-druhové (sr = 2) a smíšené tří-druhové porosty (sr = 3).

## 5.2 Půdní teplota T1 a T2

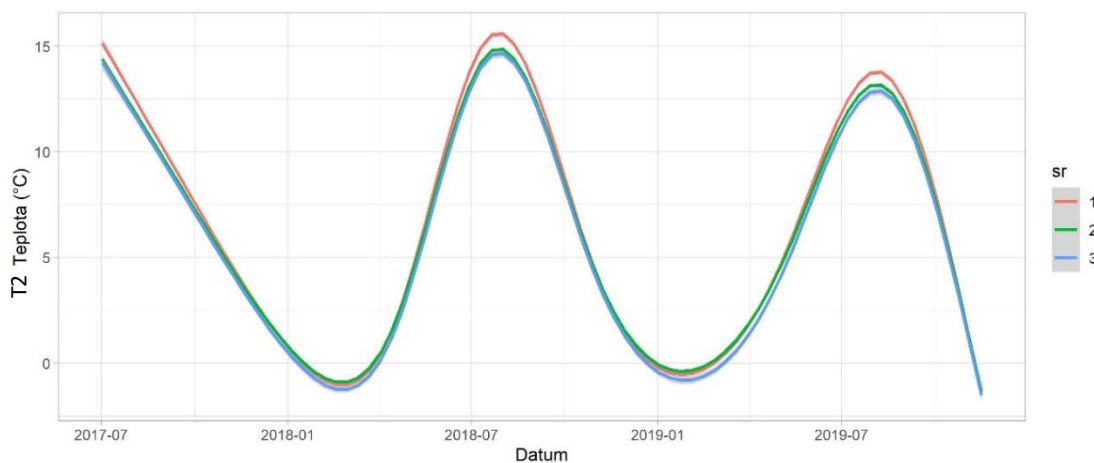
Výsledné hodnoty půdních teplot T1 měřené v přibližné hloubce 10 cm pod zemským povrchem a teploty měřené 2 cm pod povrchem T2 vykazovaly téměř shodné

tendence a pozorované poměrné rozdíly byly zřejmě menší oproti půdní vlhkosti. Ze všech grafů půdních teplot jde vidět, že léto 2018 bylo teplejší než 2019.

Teploty T1 a T2 naměřené v monokulturách a smíšených lesích si byly navzájem velice podobné (Obr. 11, Obr. 12). K rozdílným teplotám docházelo pouze v letních a zimních měsících, a to zhruba o 1-2°C. Maximální teploty byly naměřeny v monokulturách v letních měsících.



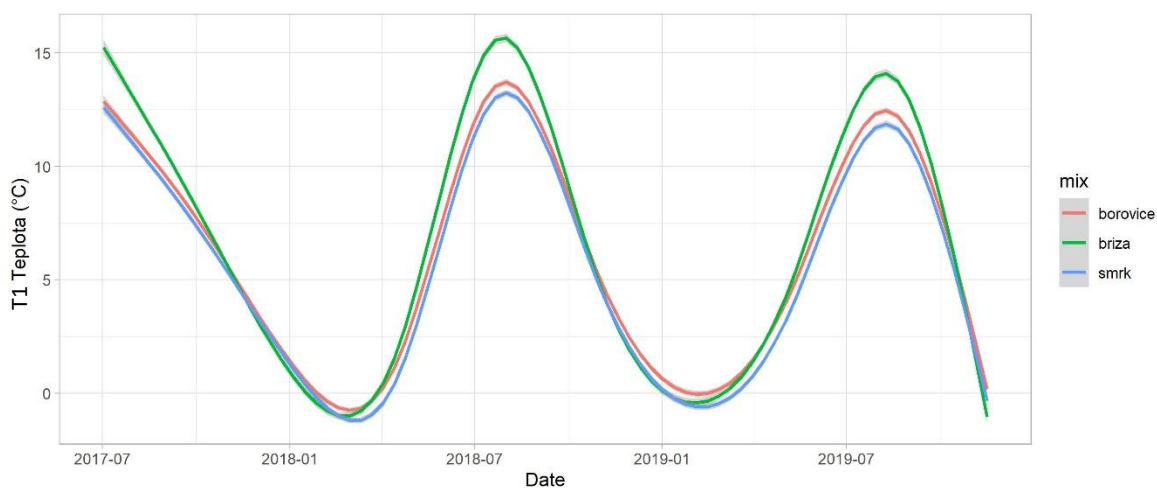
Obrázek 11. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T1 (půdní) v závislosti na čase a počtu druhů na zkusné ploše.



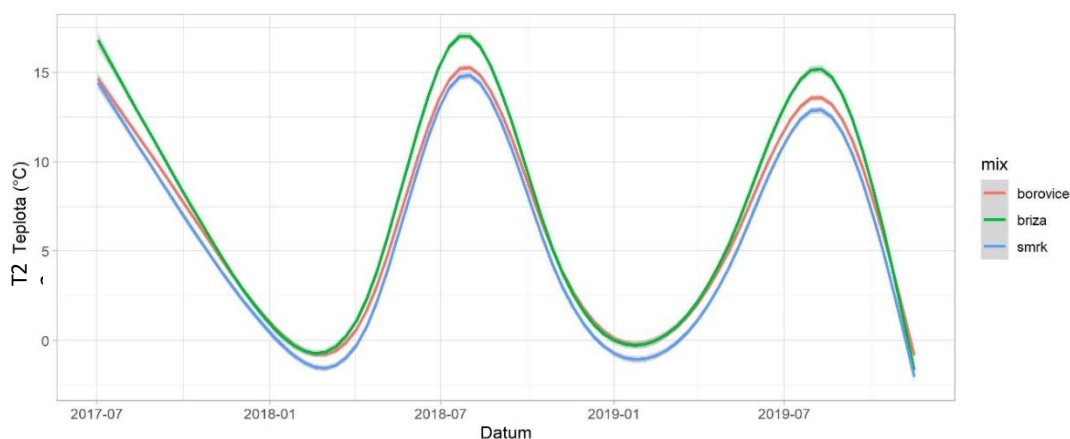
Obrázek 12. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T2 v závislosti na čase a počtu druhů na zkusné ploše.



Při zaměření na jednotlivé druhy dřevin můžeme v grafech teploty T1 (Obr. 13) a teploty T2 (Obr. 14) pozorovat viditelnější rozdíly mezi naměřenými daty oproti pozorování v monokulturách a smíšených lesích (Obr. 11, 12). V letních měsících v březových porostech docházelo k největšímu oteplení, průměrné teploty T1 v nejteplejších dnech dosahovaly okolo 15 °C (pro T2 17 °C). Naopak nejchladnější teplota byla v těchto dnech naměřena ve smrkových porostech, kde se půdní teplota T1 držela kolem 12,5 °C (T2 13 °C). Teploty naměřené v zimních měsících měly v monokulturách jednotlivých dřevin velmi podobné hodnoty, avšak i tak bylo patrné, že smrkové porosty byly mírně chladnější a borové prostory naopak mírně teplejší ve srovnání všech druhů.



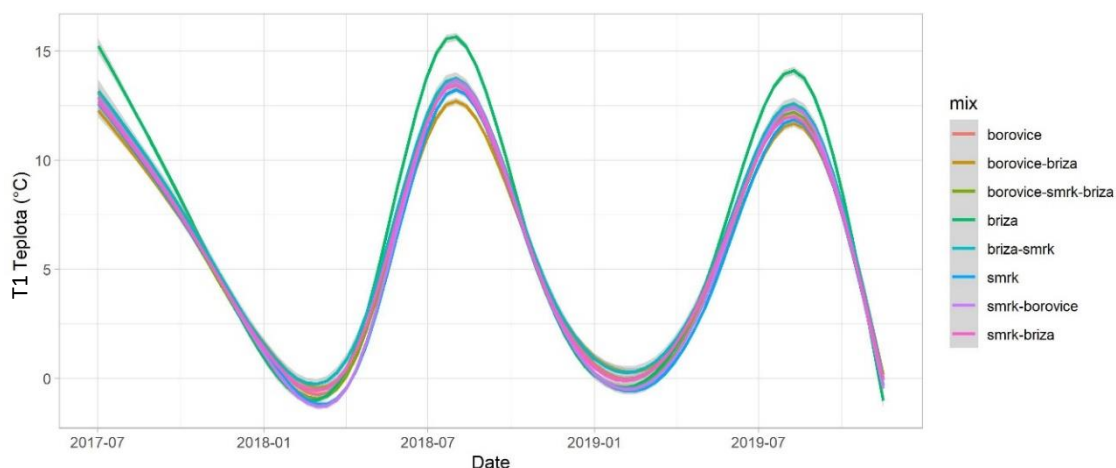
Obrázek 13. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T1 (půdní) v závislosti na čase a jednotlivých dřevin.



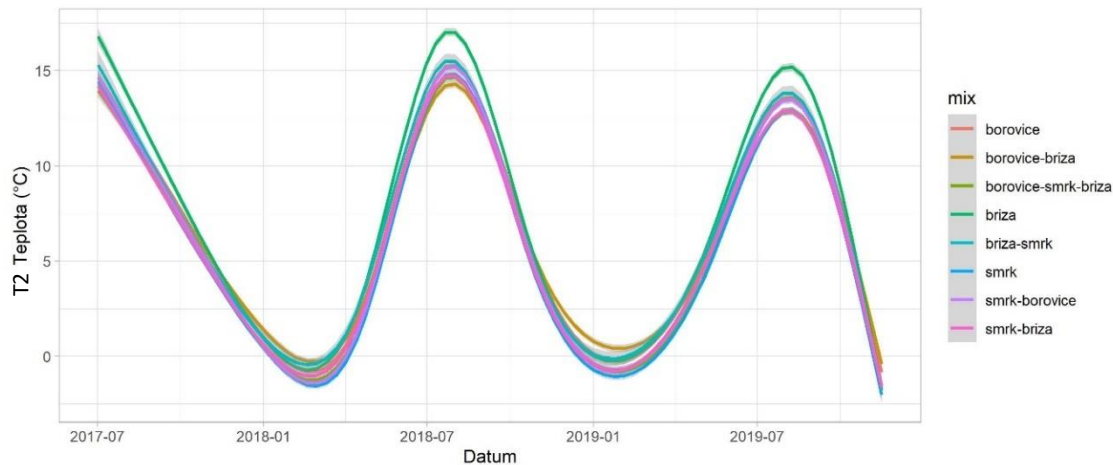
Obrázek 14. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T2 v závislosti na čase a jednotlivých dřevin.



V jednotlivých zkoumaných dřevinných směsích byl průběh teplot opět velmi podobný po celou dobu sledovaného období, a to nejvíce na podzim roku 2018 (Obr. 15, 16) . Výjimku tvořily březové porosty, ve kterých byly naměřeny v letních měsících o zhruba 5-6 °C větší hodnoty oproti ostatním směsím. V průběhu sledovaného období nebyla naměřena soustavně nejnižší teplota u jedné směsi.



Obrázek 15. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T1 (půdní) v závislosti na čase a jednotlivých dřevinných směsích, které se na zkusných plochách nacházely.



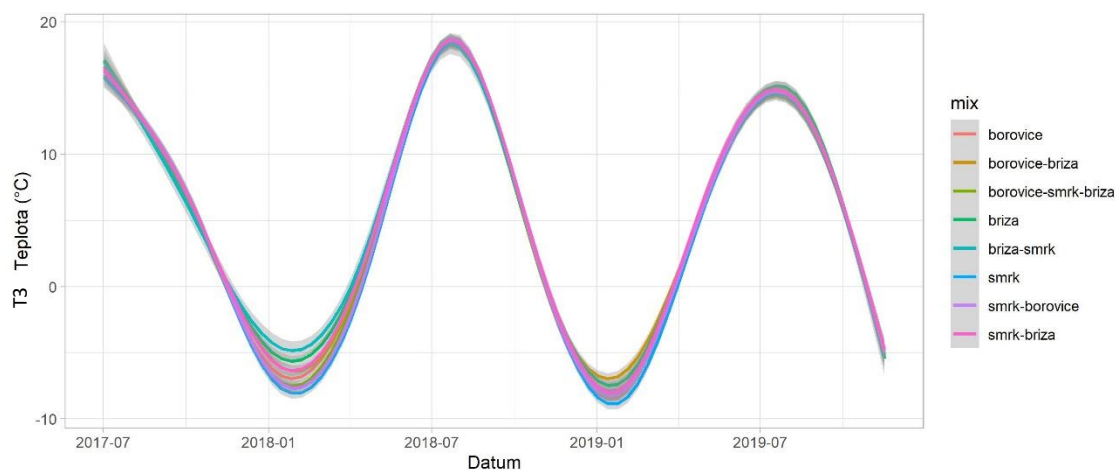
Obrázek 16. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T2 v závislosti na čase a jednotlivých dřevinných směsích, které se na zkusných plochách nacházely.

### 5.3 Teplota vzduchu T3

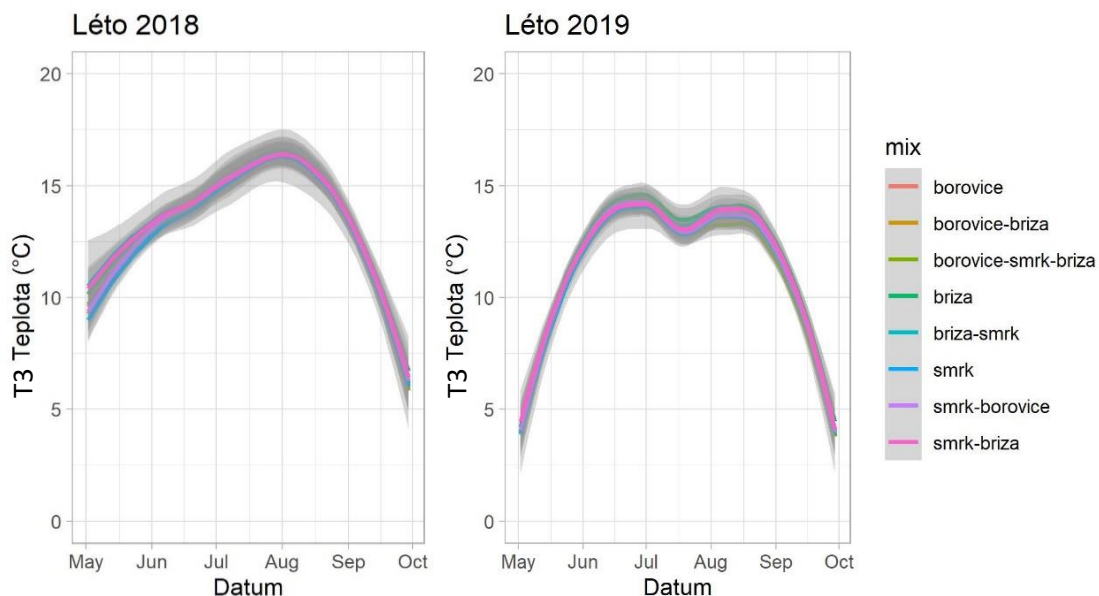
Teploty naměřené senzorem, nejvýše umístěným na čidlu (přibližně 50 cm nad zemí), nevykazovaly přílišné rozdíly mezi jednotlivými zkoumanými parametry.

Průměrné teploty monokulturních a smíšených lesů byly, až na minimální odchylky, stejné.

Teplotní rozdíl se objevil v zimních měsících při porovnání všech možných druhových kombinací. Lokální maxima v tomto období dosahovaly smíšené lesy s druhovou kombinací borovice-bříza a smrk-bříza. Ve smrkových monokulturách byly naměřeny nejnižší hodnoty, které se svým průměrem dosahovaly téměř  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V letních měsících byly průměrné křivky téměř vyrovnané (Obr 17), a to na všech zkoumaných plochách, i při podrobném zaměření na letní měsíce (Obr. 18) se nenacházely rozdíly mezi všemi možnými druhovými kombinacemi ani mezi monokulturními a smíšenými lesy.

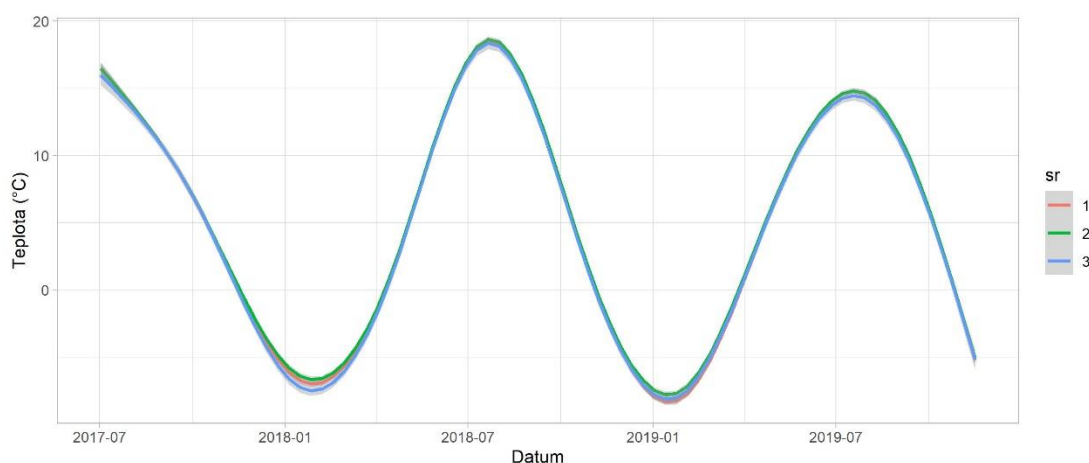


Obrázek 17. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T3 (vzduchu) v závislosti na čase a jednotlivých dřevinných směsích, které se na zkusných plochách nacházely.



Obrázek 18. Podrobný pohled na letní měsíce v roce 2018 a v roce 2019 teplotního grafu na obrázku 17.

V jednotlivých úrovních smíšení byla naměřena velmi podobná teplota vzduchu (Obr. 19). V průběhu dvou letého intervalu teploty odpovídaly měnícím se klimatickým podmínkám v závislosti na čase. Na grafu (Obr. 19) lze pozorovat drobné odchylky v zimních měsících, kde se jako nejteplejší ukázal smíšený porost s dvou-druhovou kombinací. Nelze vyhodnotit žádný porost jednoznačně jako nejchladnější, jelikož každý rok se v zimních období projevil jiný porost s minimálními naměřenými teploty.



Obrázek 19. Teplotní graf zobrazující vývoj teploty T3 v závislosti na čase a počtu druhů dřevin na zkušné ploše.

## 6 Diskuze

### 6.1 Půdní vlhkost

Z pohledu druhové bohatosti na zkusných plochách se ukázal tří-druhový smíšený les jako porost udržující největší vlhkost ze všech pozorovaných úrovní smíšení. Půdní vlhkost je zásadním faktorem pro vitalitu lesního ekosystému a všech jeho složek. Sucho jakožto stresový faktor může dřeviny oslabovat, zpomalovat růst či tvořit vhodné podmínky pro napadení stromu sekundárními škůdci (Kula, 2014). Proto, jak výsledky této bakalářské práce ukazují, druhově bohaté smíšené boreální lesy poskytují lepší podmínky pro růst a stabilitu stromů, a to i v podmínkách klimatické změny.

Výjimkou byly čisté borové lesy, které vykazovaly nejvyšší půdní vlhkost po celou dobu měřeného období. Důvodem pravděpodobně je, že tento druh má hluboký kořenový systém a je pro něj tak zásadní dostatek podzemní vody. Je tedy možné, že právě hluboko položené kořeny neodčerpávají vodu v takové míře ze svrchních vrstev půdy jako například smrkové porosty. Odlišná konfigurace hlouběji položeného půdního čidla by mohla toto tvrzení s jistotou prokázat.

Jako nejsušší porosty se tedy ukázaly smrkové a borovico-smrkové porosty, ten to fakt může mít souvislost s habitem smrku a jeho intercepční kapacitou. Smrkové koruny jsou velmi husté, čemuž odpovídají také vysoké hodnoty LAI (Teske & Thistle, 2004), tudíž ve větší míře zabraňují dopadu srážek na povrch půdy oproti ostatním pozorovaným dřevinám a zvyšují tak podíl odpařené a zachycené vody z celkového objemu vertikálních srážek.

Kombinací ekologických nároků a struktury kořenových systémů druhů smrku a borovice může docházet k čerpání vody z širšího půdního profilu (Mickovski & Ennos, 2003), a proto by bylo vhodné tuto směs doporučit spíše na vlhčích stanovištích, kde je možné lépe využít pěstební potenciál této směsi.

Zajímavá je také vlhkostní dynamika březových porostů, kde docházelo k největším vychýlení mezi naměřenými hodnotami. Ač se v jarním a podzimním období dostávalo do půdy největší množství vody, tak tu byly zároveň naměřené nejnižší hodnoty v době letních měsíců. Příčinou může být menší index listové plochy břízy, jímž se srážky snadno dostanou na povrch půdy, ovšem menší hustota koruny znamená také větší propustnost světelných paprsků (Aussenac, 2000), který může zvyšovat výpar. Naznačuje to menší schopnosti

březových porostů ovlivňovat vlhkostní režim například v porovnání s borovými či smrkovými porosty.

## 6.2 Půdní teplota T1 a T2

Výsledné hodnoty půdních teplot T1 a T2 byly velice podobné mezi testovanými druhy a směsmi dřevin a měly téměř totožné průběhy během sledovaného období.

To mohlo být způsobeno malým rozdílem vzájemné polohy senzorů umístěných na jednom mikroklimatickém čidle. Může se tak z podobností dat odvodit, že stromy nijak rozdílně neovlivňují teplotu půdy 2 cm pod povrchem a teplotu půdy přibližně 10 cm pod povrchem. V tomto případě by mohlo být opět zajímavé porovnání s dalším měřením s použitím jiného typu mikroklimatického čidla, které by měřilo půdní teplotu T1 hlouběji v půdě oproti půdní teplotě T2.

Jeden velice patrný rozdíl v měření teplot T1 a T2, je patrný ve výsledných grafech zobrazující hodnoty naměřené v monokulturních porostech. V zimních měsících dochází k odlišné dynamice hodnot. Zatím co teploty T1 neprojeví výrazný rozdíl mezi monokulturami, měření teploty T2 ukázalo chladnější půdní podmínky ve smrkových porostech oproti zbylým dvou druhům.

Při zaměření na smrkové porosty, lze zjistit, že z naměřených hodnot v monokulturních porostech, je po celé sledované období smrkový porost, ten nejchladnější. Ten to fakt může být způsobený vysokou hustotou smrkových korun, které tak zachytávají mnohem více světla než jiné stromy (Teske & Thistle, 2004). K podobnému závěru došli ve své práci Messier et al. 1998, který zjistili, že v smrkovém lese se nachází mnohem menší hustota fotosynteticky aktivního toku fotonů, než v borových a březových porostech. V kanadském výzkumu, v kterém byl pro změnu zkoumán vliv mechové přítomnosti ve smrkovém porostu, se píše o mechu jakožto o přispěvateli ke snižování půdní teploty (Fenton et al., 2005). Nápadně silná vrstva mechu byla patrná i ve smrkových monokulturách na studovaných plochách, což může být i jedním z důvodů pro nižší půdní teploty v těchto porostech. Je tedy evidentní, že výsledky dřívějších výzkumů ohledně vlivu smrku na teploty půdy odpovídají výsledkům v této bakalářské práci.

Vyšší naměřené půdní teploty oproti průměru v ostatních zkoumaných porostech lze pozorovat v letních měsících v březových monokulturách. Podobně odlišný průběh byl u břízy pozorovány také v grafech půdní vlhkosti (Obr. 7). Ač se v tomto případě jednalo o vyšší vlhkostní poměry v podzimních a jarních měsících, stále si z obou grafů můžeme

odvodit odlišný vliv břízy na porost, který může být zapříčiněn odlišnou korunovou strukturou břízy oproti smrku a borovici. V tomto případě především na menší hustotu koruny či nízkého zápoje. Ač bříza ve Finsku zastupuje roli hlavní hospodářské dřeviny, v České republice často plní roli přípravné (pionýrské) dřeviny neboli druhu s osidlovacími vlastnostmi na nepříznivých stanovištích. Břízy jsou tak známy díky vlivu své přítomnosti na utváření lepších půdních podmínek (Podrazsky, 2001). V porovnání s ostatními druhy v rámci této práce se bříza, ale nejeví jakožto dřevina s největším mikroklimatickým vlivem na prostředí.

### 6.3 Vzdušná teplota T3

Naměřené teploty vzduchu vykazovaly téměř shodné hodnoty ve všech pozorovaných porostech. Je poměrně překvapující, že nevznikaly četnější výkyvy teplot mezi úrovní smíšení oproti celkovému trendu odpovídající teplotní dynamice v průběhu roku, obzvláště pokud v měření ostatních faktorů mikroklimatu (půdní vlhkost, T1, T2), byla pozorována variabilita hodnot.

Stále můžeme, ale pozorovat jistou podobu či návaznost mezi teplotami vzduchu a půdními teplotami. Například u půdní teploty bylo zjištěno, že ve smrkových monokulturách převládají nejchladnější podmínky během sledovaných dvou let, obzvláště v zimních měsících. Stejně tak v naměřených teplotách vzduchu vychází smrkový porost ve většině sledovaného období jako nejchladnější (výjimkou jsou období od srpna do prosince, kde jsou naměřené teploty zkusných ploch téměř totožné). Lze tak odvodit podobné tvrzení jako u půdní teploty, a to že smrkové porosty zachycují větší podíl slunečního záření, které se nedostává na půdní povrch v tak velké míře jako v případě borových a březových lesů (Messier et al., 1998).

Je také zajímavé, že naměřené teploty T3 na všech zkusných plochách vykazovaly významnější rozdíly pouze v zimních měsících. Zatím co nejnižší teploty byly v obou pozorovaných letech naměřeny ve smrkovém porostu, porosty s nejvyššími teploty se v letech lišily. V zimě 2018 byl jako nejteplejší porost smrkovo-březový a v roce 2019 borovico-březový. Tyto výsledky mohou poukazovat na vliv smíšení s břízou, v jejichž přítomnosti, kvůli menší LAI, prochází více slunečního záření do porostu a tím se zvyšuje teplota vzduchu (Aussenac, 2000).

## 7 Závěr

V rámci této bakalářské práce bylo zjišťováno, jaký vliv mají hlavní dřeviny boreálního lesa severní Evropy (*Picea abies* (L.) H. Karst, *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth) a jejich vzájemné směsi na mikroklima v podrostu. Cílem bylo zjistit, jak tyto druhy a všechny jejich druhové kombinace ovlivňují teplotu vzduchu (ve výšce 50 cm nad povrchem půdy), teploty půdy (2 a 10 cm pod povrchem půdy) a objemovou půdní vlhkost (v horních 10 cm půdy) na celkem 28 výzkumných plochách FunDivEUROPE ve východním Finsku. Na každé výzkumné ploše bylo umístěno jedno mikroklimatické čidlo TMS-4, které zaznamenávalo naměřená data ve dvouletém pozorovaném období každých 15 minut. Tato bakalářská práce byla provedena na ve spolupráci s Natural Resources Institute Finland, pobočkou v Joensuu.

Pro vyhodnocení dat byly vytvořeny zobecněné aditivní modely pomocí statistického programu R, na jejichž základě byly vytvořeny grafy průměrných naměřených hodnot v závislosti na času.

Naměřená data získaná z období červenec 2017–listopad 2019 odpovídala klimatické dynamice měnící se v průběhu roku. Výsledky této bakalářské práce ukazují, že druhově bohaté smíšené boreální lesy poskytují lepší podmínky pro růst a stabilitu stromů, a to i v podmínkách klimatické změny. Výjimkou byly borovicové monokultury, které vykazovaly nejvyšší půdní vlhkost po celou dobu měřeného období. Důvodem pravděpodobně je, že tento druh má hluboký kořenový systém a je pro něj tak zásadní dostatek podzemní vody. Je tedy možné, že právě hluboko položené kořeny neodčerpávají vodu v takové míře ze svrchních vrstev půdy jako například smrkové porosty. Odlišná konfigurace hlouběji položeného půdního čidla by mohla toto tvrzení s jistotou prokázat.

Jako nejsušší porosty se ukázaly smrkové a borovico-smrkové porosty, ten to fakt může mít souvislost s habitem smrku a jeho intercepční kapacitou. Smrkové koruny jsou velmi husté, čemuž odpovídají také vysoké hodnoty LAI, tudíž ve větší míře zabraňují dopadu srážek na povrch půdy oproti ostatním pozorovaným dřevinám a zvyšují tak podíl odpařené a zachycené vody z celkového objemu vertikálních srážek.

Z naměřených teplot bylo zjištěno, že půdní teploty a teploty vzduchu se zásadněji nelišily mezi jednotlivými druhy a směsmi. Přesto výsledky ukazují, že v monokulturních lesích se nacházela v letních obdobích nejvyšší půdní teplota. Nejvyšší půdní teploty v letních měsících byly měřeny zejména v březových monokulturách. Příčinou může být

menší hustota koruny či index listové plochy břízy, jímž se sluneční paprsky snadno dostanou na povrch půdy.

Teplotně nejchladnějším porostem se jevil smrkový les. V zimních měsících se zde nacházely nejnižší půdní teploty a po celou dobu sledovaného období, zde byla naměřena nejnižší teplota vzduchu. Lze si tak odvodit, že smrkové porosty zachycují větší podíl slunečního záření, které se nedostává na půdní povrch v tak velké míře.

Změřená data poukazují na porosty, v nichž v porovnání se všemi zkoumanými porosty převládají méně vlhké a méně chladné podmínky. Lze si tak snadno odvodit, že s přibývajícími globálními klimatickými změnami, hrozí v takovýchto porostech škody způsobené právě stresem nedostatku vody v kombinaci s příliš vysokými teplotami. Takto stresované porosty mohou být také více náchylné na napadení hmyzími škůdci, v extrémních případech soustavného působení jednoho či více stresorů může dojít i ke kalamitním událostem. Zpracování kalamit v takto rozlehlých lesích a případné jejich odlesnění by mohlo mít negativní vliv na klimatickou dynamiku lokálního i globálnějšího charakteru. Výsledná data, mohou být také nápomocná při plánování druhového složení v rámci dlouhodobé strategie pěstování lesů.



## 8 Seznam literatury a použitých zdrojů

- Angelstam, P., & Kuuluvainen, T. (2004). Boreal forest disturbance regimes, successional dynamics and landscape structures: a European perspective. *Ecological Bulletins*, 117–136.
- Archibold, O. W. (2012). *Ecology of world vegetation*. Springer Science & Business Media.
- Armbruster, M., Seegert, J., & Feger, K.-H. (2004). Effects of changes in tree species composition on water flow dynamics – Model applications and their limitations. *Plant and Soil*, 264(1), 13–24. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047716.45245.23>
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science*, 57(3), 287–301. <https://doi.org/10.1051/forest:2000119>
- Baeten, L., Verheyen, K., Wirth, C., Bruelheide, H., Bussotti, F., Finér, L., Jaroszewicz, B., Selvi, F., Valladares, F., & Allan, E. (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.
- Coomes, D. A., Flores, O., Holdaway, R., Jucker, T., Lines, E. R., & Vanderwel, M. C. (2014). Wood production response to climate change will depend critically on forest composition and structure. *Global Change Biology*, 20(12), 3632–3645.
- Coyette, H., & Schenk, C. (2019). *Agriculture, forestry and fishery statistics*. <https://doi.org/10.2785/45595>
- D'Orangeville, L., Houle, D., Duchesne, L., Phillips, R. P., Bergeron, Y., & Kneeshaw, D. (2018). Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications*, 9(1), 3213. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05705-4>
- De Frenne, P., Rodríguez-Sánchez, F., Coomes, D. A., Baeten, L., Verstraeten, G., Vellen, M., Bernhardt-Römermann, M., Brown, C. D., Brunet, J., Cornelis, J., Decocq, G. M., Dierschke, H., Eriksson, O., Gilliam, F. S., Hédli, R., Heinken, T., Hermy, M., Hommel, P., Jenkins, M. A., ... Verheyen, K. (2013). Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of*

*Sciences of the United States of America*, 110(46), 18561–18565.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1311190110>

Federer, C. A., & Tanner, C. B. (1966). Spectral Distribution of Light in the Forest.  
*Ecology*, 47(4), 555–560. <https://doi.org/10.2307/1933932>

Fenton, N., Lecomte, N., Légaré, S., & Bergeron, Y. (2005). Paludification in black spruce  
(*Picea mariana*) forests of eastern Canada: Potential factors and management  
implications. *Forest Ecology and Management*, 213(1), 151–159.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.017>

Fleischer, P., Godzik, B., Bicarova, S., & Bytnerowicz, A. (2005). *Effects of air pollution  
and climate change on forests of the Tatra Mountains, Central Europe BT - Plant  
Responses to Air Pollution and Global Change* (K. Omasa, I. Nouchi, & L. J. De Kok  
(Eds.); pp. 111–121). Springer Japan.

Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (1995). *Forest Climatology BT - The Climate  
Near the Ground* (R. Geiger, R. H. Aron, & P. Todhunter (Eds.); pp. 259–325).  
Vieweg+Teubner Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-322-86582-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-322-86582-3_7)

Goldblum, D., & Rigg, L. S. (2005). Tree growth response to climate change at the  
deciduous boreal forest ecotone, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest  
Research*, 35(11), 2709–2718.

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>

Jacobson, G. L., & Dieffenbacher-Krall, A. (1995). White Pine and Climate Change:  
Insights from the Past. *Journal of Forestry*, 93(7), 39–42.  
<https://doi.org/10.1093/jof/93.7.39>

Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and  
understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry:  
An International Journal of Forest Research*, 72(1), 59–74.  
<https://doi.org/10.1093/forestry/72.1.59>

Jones, M. B. (1993). *Plant microclimate BT - Photosynthesis and Production in a*

- Changing Environment: A field and laboratory manual* (D. O. Hall, J. M. O. Scurlock, H. R. Bolhár-Nordenkamp, R. C. Leegood, & S. P. Long (Eds.); pp. 47–64). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1566-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1566-7_4)
- Jucker, T., Bouriaud, O., Avacaritei, D., & Coomes, D. A. (2014). Stabilizing effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes. *Ecology Letters*, *17*(12), 1560–1569.
- Klaassen, W., Bosveld, F., & de Water, E. (1998). Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, *212–213*, 36–50. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00200-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00200-5)
- Kula, E. (2014). *Ochrana lesa ve stredoevropských podmínkách 1. část*. [https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/skripta/Ochrana\\_lesa.pdf](https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/skripta/Ochrana_lesa.pdf)
- Larsen, J. A. (1980). *1 - Introduction: Boreal Ecology and Ecosystems Analysis* (J. A. B. T.-T. B. E. LARSEN (Ed.); pp. 1–18). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-436880-4.50006-6>
- Litschmann, T., & Hadaš, P. (2003). *MIKROKLIMA VYBRANÝCH POROSTNÍCH STANOVIŠŤ*. 59–65.
- Messier, C., Parent, S., & Bergeron, Y. (1998). Effects of overstory and understory vegetation on the understory light environment in mixed boreal forests. *Journal of Vegetation Science*, *9*(4), 511–520.
- Mickovski, S. B., & Ennos, A. R. (2003). Anchorage and asymmetry in the root system of *Pinus peuce*. *Silva Fennica*, *37*(2), 161–173.
- Myneni, R. B. (1997). Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *35*(6), 1380–1393. <https://doi.org/10.1109/36.649788>
- Norris, C., Hobson, P., & Ibisch, P. L. (2012). Microclimate and vegetation function as indicators of forest thermodynamic efficiency. *Journal of Applied Ecology*, *49*(3), 562–570.
- Podrazsky, V. (2001). Effect of substitute tree species on the forest soils. *Perspectives of the Ecological Research in Mountain Forest Ecosystems, Hrinova (Slovak Republic)*, 22-25 Oct 2001.

- Podrázský, V. (2014). *Základy ekologie lesa*. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Price, D. T., Alfaro, R. I., Brown, K. J., Flannigan, M. D., Fleming, R. A., Hogg, E. H., Girardin, M. P., Lakusta, T., Johnston, M., & McKenney, D. W. (2013). Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems. *Environmental Reviews*, 21(4), 322–365.
- Project FunDiveEurope. (2010a). *Experimental Platform \_ FunDivEUROPE*.  
[http://project.fundiveurope.eu/?page\\_id=20](http://project.fundiveurope.eu/?page_id=20)
- Project FunDiveEurope. (2010b). *Exploratory Platform \_ FunDivEUROPE*.  
[http://project.fundiveurope.eu/?page\\_id=22](http://project.fundiveurope.eu/?page_id=22)
- Project FunDiveEurope. (2010c). *FunDivEUROPE \_ Functional significance of forest biodiversity in Europe*. <http://project.fundiveurope.eu/>
- Project FunDiveEurope. (2010d). *Inventory Platform \_ FunDivEUROPE*.  
[http://project.fundiveurope.eu/?page\\_id=63](http://project.fundiveurope.eu/?page_id=63)
- R Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>
- Saxe, H., Cannell, M. G. R., Johnsen, Ø., Ryan, M. G., & Vourlitis, G. (2001b). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149(3), 369–400.  
<https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x>
- Teske, M. E., & Thistle, H. W. (2004). A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecology and Management*, 198(1), 341–350.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.031>
- Vaahtera, E., Aarne, M., Ihalainen, A., Mäki-Simola, E., Peltola, A., Torvelainen, J., Uotila, E., & Ylitalo, E. (2018). *Suomen metsätilastot, Finnish forest statistics*.  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-701-5>
- Volney, W. J. A., & Fleming, R. A. (2019). Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1), 283–294.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00232-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00232-2)
- Welles, J. (1990). Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, 5, 31–43. <https://doi.org/10.1080/02757259009532120>

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(July 2018), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.018>