

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin



**Hodnocení hyperspektrální reflektance a růstových parametrů v časném testu potomstev borovice lesní**

Bakalářská práce

Autor: Jiří Chuchlík

Vedoucí práce: Ing. Jan Stejskal, Ph.D.

2022

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Chuchlík

Lesnictví  
Ochrana a pěstování lesních ekosystémů

Název práce

**Hodnocení hyperspektrální reflektance a růstových parametrů v časném testu potomstev borovice lesní**

Název anglicky

**Evaluation of hyperspectral reflectance and growth parameters in a Scots pine early progeny trial**

---

### Cíle práce

Cílem práce je získat informace o mortalitě, růstu a vývoji jednoletých potomstev rodičovských stromů ze tří semenných sadů borovice lesní. Součástí práce je též genetická evaluace daného materiálu s využitím spektrální odrazivosti. Tato evaluace umožní ověřit hypotézu o genetické podmíněnosti sledovaných znaků na úrovni ekotypů. Dalším cílem je ověření kompatibility měření reflektance pomocí dvou metod – optického kabelu a kontaktní sondy.

Přínosem práce budou unikátní poznatky o spektrálních a růstových vlastnostech juvenilního materiálu borovice lesní na pozadí ekotypové proměnlivosti. Dalším přínosem, především pro fyziologickou komunitu, je ověření využitelnosti nové a pravděpodobně efektivnější metody měření pomocí optického kabelu.

### Metodika

Studovaná potomstva semenných sadů reprezentují tři zájmové lokální populace – Plzeňsko, Třeboňsko a Děčínsko (náhorní ekotyp borovice lesní).

Měření jednoletých semenáčků budou probíhat v počtu řádově tisíců kusů během vegetační sezóny 2021. Hyperspektrální reflektance bude měřena kontaktní sondou přenosného spektrálního radiometru Fieldspec a následně také optickým kabelem stejného přístroje. Tato měření přinesou zásadní informace především k fyziologickému stavu stromů, přičemž sledujeme vliv lokální adaptace a ekotypovou variabilitu v rámci tří odlišných populací.

Vyhodnocení získaných dat proběhne během podzimních měsíců 2021 s využitím smíšených lineárních modelů (software ASReml).

Literární rešerše a metodika práce budou odevzdány do konce února 2021.



### **Doporučený rozsah práce**

60 stran + tabulky, grafy a obrazové přílohy

### **Klíčová slova**

borovice lesní, šlechtění, semenné sady, chlorofyl, reflektance

---

### **Doporučené zdroje informací**

- Albrechtová, J., Kupková, L., Campbell, P. K. E. (2017). Hodnocení stavu smrkových porostů. – Případové studie sledování vývoje fyziologického stavu smrkových porostů v Krušných horách v letech 1998–2013. 1.vyd. Praha : Geographica – Česká geografická společnost, 2017. s. 401. ISBN 978-80-905642-9-9.
- Čepl, J., Holá, D., Stejskal, J., Korecký, J., Kočová, M., Lhotáková, Z., ... & Kaňák, J. (2016). Genetic variability and heritability of chlorophyll a fluorescence parameters in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *TREE PHYSIOL*, 36(7), 883-895.
- Čepl, J., Stejskal, J., Lhotáková, Z., Holá, D., Korecký, J., Lstibůrek, M., ... & Hejtmánek, J. (2018). Heritable variation in needle spectral reflectance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) peaks in red edge. *REMOTE SENS ENVIRON*, 219, 89-98.
- Eriksson, G., Ekberg, I., & Clapham, D. (2001). An introduction to forest genetics. Genetic Center, Department of Plant Biology and Forest Genetics, SLU. ISBN 91-576-6032-8
- Kaňák, J., Klápště, J., & Lstibůrek, M. (2009). Úvodní genetické hodnocení semenných sadů borovice lesní v západních Čechách. *Zprávy lesnického výzkumu*, 3, 189-204.
- Kubásek, J., Tomášková, I. (2017). Fyziologie lesních dřevin II. : růst, vývoj a rozmnožování. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin. ISBN 9788021328006.
- Paques, L. Forest Tree Breeding in Europe: Current State-of-the-Art and Perspectives. [1. vyd.] Dordrecht : Springer Science+Business Media, 2013. 527 s. ISBN 978-94-007-6146-9.
- Tomášková, I., Kubásek, J. (2016). Fyziologie lesních dřevin I. : fyziologie, produkce a stresy rostlin. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin. ISBN 978-80-213-2608-8.
- White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (Eds.). (2007). Forest genetics. Cabi. ISBN 9780851993485.

---

### **Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FLD

### **Vedoucí práce**

Ing. Jan Stejskal, Ph.D.

### **Garantující pracoviště**

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin

### **Konzultant**

Zuzana Lhotáková

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2022

**prof. Ing. Milan Lstibůrek, MSc., Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 4. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2022

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Hodnocení spektrální reflektance, fluorescence chlorofylu a růstových parametrů v časném testu potomstev borovice lesní vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Stejskala, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, 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 Praze dne.....

---

Jiří Chuchlík

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval zejména vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Stejskalovi, PhD. za ochotu, vstřícnost a vynaložený čas, odborné rady a odborné vedení. Velký dík patří také RNDr. Jaroslavu Čeplovi, PhD. za pomoc se zpracováním dat a interpretací výsledků. Dále chci poděkovat přátelům, kteří mi pomáhali se sběrem dat. V neposlední řadě patří dík mé rodině za podporu po celou dobu mého studia.

## **Abstrakt**

Na dopady stávající klimatické změny v lesnictví můžeme reagovat několika možnými způsoby včetně radikální změny druhové skladby, případně využitím exotických druhů lesních dřevin. Racionální alternativou je využití šlechtěného materiálu domácích dřevin. Naši druhou nejvýznamnější dřevinou po smrku je borovice lesní, která skýtá obrovský adaptační potenciál díky dosud nevyužité genetické variabilitě na úrovni lokálních populací. V současnosti je dostupná celá škála metod využitelných ke genotypizaci vybraných jedinců a odhadu jejich šlechtitelských hodnot pro následnou selekci. Tyto metody se také postupně zlevňují a stávají se tak dostupnými pro lesnické subjekty. Limitujícím faktorem je aktuálně spíše efektivní a dostupná fenotypizace celé škály adaptačních znaků. Řešení může představovat rychlé a efektivní měření spektrálních parametrů, jehož metodikou se zabývala právě tato bakalářská práce. Tímto experimentem se podařilo prokázat potenciál robustní a efektivní metody optického kabelu pro měření reflektance. Následná standardizace optického kabelu naznačila možnou kompatibilitu s etablovanou metodou kontaktní sondy a analýza dat metodou Random Forest praktickou využitelnost pro predikci ekotypu na základě reflektance.

**Klíčová slova:** borovice lesní, šlechtění, semenné sady, chlorofyl, reflektance

## **Abstract**

We can respond to the impacts of the current climate change in forestry in several possible ways, including a radical change in species composition, or by using exotic species of forest trees. A rational alternative is the use of improved material of domestic tree species. Our second most important tree species after spruce is Scots pine, which offers enormous adaptive potential due to as yet untapped genetic variability at the level of local populations. At present, a whole range of methods available for genotyping selected individuals and estimating their breeding values for subsequent selection is available. These methods are also gradually becoming cheaper and thus available to forestry entities. The limiting factor is currently rather effective and affordable phenotyping of the whole range of adaptive traits. The solution can be a fast and efficient measurement of spectral parameters, the optimized methodology was the main aim of this thesis. This experiment succeeded in demonstrating the potential of a robust and efficient optical cable method for measuring reflectance. Subsequent standardization of the optical cable indicated possible compatibility with the established contact probe method. Further data analysis by the Random Forest method proved its practical applicability for ecotype prediction based on reflectance.

**Key words:** Scots pine, breeding, seed orchards, chlorophyll, reflectance

## Obsah

1. Úvod .....	14
2. Cíl práce.....	15
3. Literární rešerše .....	16
3.1. Borovice lesní.....	16
3.1.1. Systematické zařazení .....	16
3.1.2. Biologie.....	16
3.1.3. Ekologické vlastnosti a cenologie.....	18
3.1.4. Areál rozšíření.....	18
3.1.5. Provenience a ekotypy borovice lesní .....	20
3.1.6. Vliv sucha .....	21
3.1.7. Hospodářský význam.....	22
3.2. Šlechtění lesních dřevin .....	23
3.2.1. Cíle šlechtění lesních dřevin .....	23
3.2.2. Princip šlechtění lesních dřevin .....	24
3.2.3. Semenné sady .....	25
3.3. Fyziologie lesních dřevin ve šlechtění .....	29
3.4. Fotosyntetické pigmenty .....	29
3.4.1. Chlorofyly .....	30
3.4.2. Karotenoidy .....	31
3.4.3. Pigmenty a reflektance.....	32
3.5. Spektroskopie.....	33
3.5.1. Multispektrální a hyperspektrální data .....	34
3.5.2. Křivka spektrální odrazivosti.....	34
3.5.3. Spektrální reflektance vegetace .....	35
3.5.4. Reflektance v oblasti červeného okraje (RED EDGE).....	37
3.5.5. Spektrální reflektance a heritabilita .....	38
4. Metodika.....	40
4.1. Lokality sběru osiva .....	40
4.1.1. Semenný sad LS Plasy – Doubrava .....	41
4.1.2. Semenný sad LS Třeboň – Holičkovna .....	41
4.1.3. Semenný sad LS Děčín – Hrádek .....	42
4.2. Sběr reprodukčního materiálu.....	42
4.3. Arboretum Sofronka.....	42
4.4. Meteorologická data.....	42

4.5.	Terénní měření .....	44
4.5.2.	Měření kontaktní sondy s vlastním zdrojem světla .....	46
4.5.3.	Meteorologické podmínky při měření .....	46
4.6.	Statistická analýza dat .....	47
4.6.1.	Popisná statistika.....	47
4.6.2.	Matematická statistika .....	48
4.6.3.	ASReml.....	48
4.6.4.	Random forest (RF) .....	49
4.6.5.	Analýza hlavních komponent .....	49
4.7.	Standardizace dat naměřených optickým kabelem na kontaktní sondu.....	50
5.	Výsledky .....	51
5.1.	Porovnání ekotypů .....	51
5.1.1.	Porovnání ekotypů na základě růstových parametrů a mortality.....	51
5.1.2.	Porovnání ekotypů na základě měření kontaktní sondou .....	52
5.1.3.	Porovnání ekotypů na základě optického kabelu.....	55
5.2.	Porovnání metod .....	58
5.3.	Propojení obou metod algoritmem.....	59
5.4.	Predikce příslušnosti k ekotypu na základě reflektance.....	62
6.	Diskuse .....	63
6.1.	Porovnání ekotypů .....	63
6.1.1.	Porovnání ekotypů na základě růstových parametrů a mortality.....	63
6.1.2.	Porovnání ekotypů na základě měření kontaktní sondou .....	64
6.1.3.	Porovnání ekotypů na základě optického kabelu.....	65
6.2.	Porovnání metod .....	66
6.3.	Propojení obou metod algoritmem.....	67
6.4.	Predikce příslušnosti k ekotypu na základě reflektance.....	68
7.	Závěr .....	69
8.	Seznam literatury a použitých zdrojů .....	70
9.	Seznam příloh.....	75
10.	Přílohy.....	76

## Seznam tabulek a obrázků

### Seznam tabulek:

Tabulka 1: Všeobecné údaje o semenných sadech. Zdroj: vytvořeno z dat ČHMÚ (2022), Seznam.cz (2022) a Lesy České republiky, s. p.(2010).....	41
Tabulka 2: Vybraná meteorologická data ze stanice Plzeň – Bolevec. Zdroj: ČHMÚ (2022).....	43
Tabulka 3: Vybraná meteorologická data ze dnů měření, stanice Plzeň – Bolevec. Zdroj: ČHMÚ (2022).....	47
Tabulka 4: Výsledky popisné statistiky pro výšky dle ekotypů. ....	51
Tabulka 5: Výsledky Waldova testu pro výšky semenáčků. ....	51
Tabulka 6: Výsledky mnohonásobného porovnávání srovnávajícího populace mezi sebou. ....	51
Tabulka 7: Mortalita a míra mortality dle jednotlivých ekotypů.....	52
Tabulka 8: Hodnocení chybovosti zařazení ke správnému ekotypu podle metody měření. ....	62

### Seznam obrázků:

Obrázek 1: Mapa přirozeného areálu borovice lesní. 1 – hlavní areál rozšíření; 2 – izolované výskyty; 3 – přírodní populace zaniklé v důsledku lidské činnosti; 4 – polární kruh. Zdroj: Kwiecień (2017). ....	19
Obrázek 2: Šlechtitelský cyklus. Zdroj: přeloženo podle White a kol. (2007).....	25
Obrázek 3: Struktura chlorofylů a a b (A), $\beta$ -karotenu (B) a fykoerytrobilinu. Zdroj: přeloženo podle Taiz a Zeiger (2002). ....	32
Obrázek 4: Rozdíl mezi multispektrálními (vlevo) a hyperspektrálními (vpravo) daty. Zdroj: Albrechtová a kol. (2017). ....	34
Obrázek 5: Hlavní charakteristiky spektrální křivky odrazivosti zdravé vegetace: absorpční minima způsobená přítomností chlorofylu (chlorofyl a: 430 nm a 660 nm, chlorofyl b: 450 nm a 650 nm), absorpční pásma vody (1 400 nm, 1 900 nm a 2 700 nm), vysoká odrazivost vlivem buněčné struktury (700 nm–1300 nm). Zdroj: Albrechtová a kol. (2017).....	36



Obrázek 6: Poloha vybraných semenných sadů na mapě ČR. 1 - lokalita Plasy; 2 - lokalita Třeboň 3 – lokalita Děčín. Zdroj mapového podkladu: Seznam.cz (2022). .....	40
Obrázek 7: Průměrné měsíční teploty vzduchu za posledních 20 a 50 let v Arboretu Sofronka. Zdroj: vytvořeno v MS Excel z dat ČHMÚ (2022). .....	43
Obrázek 8: Průměrné měsíční úhrny srážek za posledních 20 a 50 let v Arboretu Sofronka. Zdroj: vytvořeno v MS Excel z dat ČHMÚ (2022). .....	43
Obrázek 9: Průměrné měsíční doby trvání slunečního svitu za posledních 20 a 50 let v Arboretu Sofronka. Zdroj: vytvořeno v MS Excel z dat ČHMÚ (2022). .....	44
Obrázek 10: Pracovní plocha se spektrometrem FieldSpec® 3. Na něm se nachází bílá reference.....	45
Obrázek 11: Prostor pěstování a měření semenáčků v arboretu. ....	45
Obrázek 12: Poměr živých a mrtvých semenáčků podle ekotypů. ....	52
Obrázek 13: Průměrná reflektance jehlic semenáčků podle semenných sadů, měřeno sondou.....	53
Obrázek 14: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Třeboně, měřeno sondou.....	53
Obrázek 15: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Děčína, měřeno sondou.....	54
Obrázek 16: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Třeboně a Děčína, měřeno sondou.....	55
Obrázek 17: Průměrná reflektance jehlic semenáčků podle semenných sadů, měřeno opt. kabelem.....	55
Obrázek 18: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Třeboně, měřeno opt. kabelem.....	56
Obrázek 19: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Děčína, měřeno opt. kabelem.....	57
Obrázek 20: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Třeboně a Děčína, měřeno opt. kabelem.....	57
Obrázek 21: Srovnání průměrných hodnot změřených kontaktní sondou a optickým kabelem.....	58

Obrázek 22: Vliv standardizace na data naměřená optickým kabelem. ....	59
Obrázek 23: Postupná standardizace spekter měřených optickým kabelem. ....	60
Obrázek 24: Srovnání průměrných hodnot změřených kontaktní sondou a standardizovaných dat změřených optickým kabelem. ....	61
Obrázek 25: Srovnání průměrných hodnot změřených kontaktní sondou před a po standardizaci. ....	61

## Seznam použitých zkratek a symbolů

ABA = kyselina abscisová

ANOVA = analýza rozptylu

CO<sub>2</sub> = oxid uhličitý

ČHMÚ = Český hydrometeorologický ústav

ČR = Česká republika

ČZU = Česká zemědělská univerzita

FLD = Fakulta lesnická a dřevařská

GPS = globální polohový systém

$h^2$  = heritabilita / dědivost v úzkém smyslu

hPa = hektopascal, jednotka tlaku vzduchu

K = Kelvin, jednotka termodynamické teploty

LČR = Lesy České republiky, s. p.

LiDAR = light detection and ranging, metoda dálkového průzkumu země

LS = lesní správa

LVS = lesní vegetační stupeň

MŠMT = Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

NIR = blízká infračervená část elektromagnetického spektra záření

PDS = algoritmus Piecewise Direct Standardization

PLO = přírodní lesní oblast

PřF = Přírodovědecká fakulta

RED EDGE = červený okraj

REIP = inflexní bod červeného okraje

REML = metoda maximální věrohodnosti

RF = random forest,

SLT = soubor lesních typů

SWIR = krátkovlnná infračervená část elektromagnetického spektra záření

UK = Univerzita Karlova

VIS = viditelná část elektromagnetického spektra záření

WGS-84 = Světový geodetický systém 1984

## 1. Úvod

Současná globální změna klimatu má za následek změny ve frekvenci, trvání či rozsahu sucha. To pravděpodobně ovlivní složení lesů. Borovice lesní má jeden z největších areálů rozšíření v rámci dřevin. Přirozeně se vyskytuje v celé řadě klimatických podmínek, ve kterých vytváří různé ekotypy. V České republice se jedná o dřevinu s druhým nejvyšším zastoupením, čemuž odpovídá její význam pro lesní hospodářství a navazující průmysl. S globální změnou klimatu bude potřeba pěstovat odolnější jedince nebo změnit druhové složení lesů. Některé ekotypy borovice lesní mohou být odolnější, a mají tedy vyšší potenciál ve šlechtitelských programech nebo pro zalesňování. Velmi nákladná je genotypizace šlechtěného materiálu, která je pro založení semenných sadů vyšších generací v současné době nezbytná. Výběr odolných jedinců dle fenotypu nemusí být spolehlivý a toto měření je v případě většiny důležitých znaků nákladné. Metody měření kontaktní sondou a optickým kabelem mohou být levnou a rychlou alternativou k tomuto hodnocení. Optický kabel se doposud k těmto účelům nepoužíval, ale využití by mohlo vést k dalšímu zrychlení, a tedy zlevnění práce. V rámci této bakalářské práce byly měřeny tři lokální populace z lesních správ Plasy, Třeboň a Děčín. Na tomto unikátním souboru dat jsme mohli velmi efektivně ověřit zmíněné metody.

Měření probíhalo v rámci projektu Inter-Action (MŠMT) „Využití genetické variability hyperspektrální odrazivosti ekotypů borovice lesní pro selekci jedinců odolných vůči suchu“, kde budou získaná data dále využita. Na projektu se podílí FLD ČZU, PřF UK, University of Florida a University of Baltimore.

## **2. Cíl práce**

Cílem práce je získat informace o mortalitě, růstu a vývoji jednoletých potomstev rodičovských stromů ze tří semenných sadů borovice lesní. Součástí práce je též genetická evaluace daného materiálu s využitím spektrální odrazivosti. Tato evaluace umožní ověřit hypotézu o genetické podmíněnosti sledovaných znaků na úrovni ekotypů. Dalším cílem je ověření kompatibility měření reflektance pomocí dvou metod – optického kabelu a kontaktní sondy.

Přínosem práce budou unikátní poznatky o spektrálních a růstových vlastnostech juvenilního materiálu borovice lesní na pozadí ekotypové proměnlivosti. Dalším přínosem, především pro fyziologickou komunitu, je ověření využitelnosti nové a pravděpodobně efektivnější metody měření pomocí optického kabelu.

### 3. Literární rešerše

#### 3.1. Borovice lesní

##### 3.1.1. Systematické zařazení

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) patří do říše rostlin (Plantae) v rámci superskupiny Archeplastida (Zicha, 2022). Patří do semenných rostlin, přesně řečeno do oddělení nahosemenných (Pinophyta). Jde o sesterskou skupinu rostlinám krytosemenným. Další zařazení staví borovici lesní do třídy jehličnany (Pinopsida), podtřídy Pinidae a řádu borovicotvaré (Pinales) (Koblížek, 1999). Jde o největší a o ekologicky a ekonomicky nejvýznamnější skupinu nahosemenných rostlin. Známe je už z období karbonu, z doby asi před 300 miliony let. Borovice se zařazuje do čeledi borovicovitých (*Pinaceae*). Jedná se pravděpodobně o monofyletickou skupinu, čemuž nasvědčuje mnoho znaků, jako jsou například obrácená vajíčka, proteinový typ plastidů v buňkách sítkovic či absence biflavonoidů v rostlinách. Rod borovice (*Pinus*) je nejpočetnějším (více než 100 druhů) v této čeledi (Mártonfi, 2006).

Borovice jsou stálezelené stromy nebo keře. Jejich borka je popraskaná nebo šupinovitá. Jehlice jsou ve svazečcích po 2–5, vzácně mohou být i po 1 nebo 6–8. Spodní část svazku je tvořena tzv. pochvou. Šišky mohou být vejčité, válčité nebo kulovité (Hejný a Slavík, 1988). Dozrávají ve druhém nebo třetím roce. Je známo více než 100 druhů. Areál rozšíření rodu je na severní polokouli, od polárního kruhu až po Guatemalu, Indonésii, západní Indii a Severní Ameriku (Hieke, 2008).

##### 3.1.2. Biologie

Borovice lesní může dorůst až 40 metrů. Kmen je většinou přímý. U starších jedinců se větví až v poslední čtvrtině (Hejný a Slavík, 1988). Na extrémních a chudých stanovištích je kmen často křivý a nedorůstá vysokých rozměrů. Běžně se borovice může dožít 300 let, avšak na exponovaných lokalitách s nízkou mírou konkurence se dožívá i 500 let (Slávik a Bažant, 2016).

Borku má deskovitě rozpukanou, šedohnědě zbarvenou, na řezu je rezavě červená. Na větvích a v horních částech kmene je však borka tenká, odlupující se v rezavě-oranžových lístcích. Letorosty jsou zbarveny zelenohnědě (Hejný a Slavík, 1988). Borka je poměrně odolná jak proti biotickým, tak proti abiotickým činitelům (Slávik a Bažant, 2016).

Borovice lesní má mohutný kořenový systém se zachovalým křovím kořenem. Ten zasahuje do velké hloubky. Nicméně na lokalitách s extrémními podmínkami tvoří stromy velmi odlišné typy kořenového systému. V bažinatých půdách kořeny nezasahují hluboko, ale pouze do tenkého půdního profilu. Na skalách vedou kořeny po povrchu a vrůstají do štěrbin. Na písčitéch podkladech mohou vlivem odnosu materiálu vznikat chůdovité kořeny (Slávik a Bažant, 2016).

Koruna má v mládí symetrický kuželovitý tvar. S rostoucím věkem se stává více asymetrickou a její tvar je spíše kopulovitý nebo deštníkovitý (Maděra a Úradníček, 2001). V severní a severovýchodní části evropského areálu však převládá spíše štíhlá koruna s jemným ovětvením. S postupem na jih ale přibývají a postupně začínají převažovat klenuté až deštníkovité tvary korun (Musil a kol., 2002).

Pupeny borovice lesní jsou vejcovité, protáhlé a špičaté. Jsou obalené šupinami, které jsou převážně nesmolnaté. Jehlice jsou tuhé, vyrůstají z brachyblastů po dvou. Často bývají lehce zkroucené podél delší osy. Z vnitřní strany jsou ploché a šedozeleň, z vnější strany jsou vypouklé a tmavě zelené. Šedozeleň na vnitřní straně tvoří pruhy průduchů, které jsou modravě ožiněné. Okraje jehlic jsou drobně pilovité. Jehlice opadávají zpravidla po 2 až 3 letech. Jehlice dorůstají do délky 3,5–8,0 cm a do šířky 1,3–1,8 mm (Hejný a Slávik, 1988).

Borovice lesní se řadí mezi jednodomé, její květy jsou tedy jednopohlavné, přičemž samčí a samičí květy rostou na různých jedincích. Borovice patří do dřevin anemogamních (větrosnubných), což znamená, že k opylování dochází za pomoci větru (Musil a kol., 2002). Samčí šištice jsou vejčité, 4–8 mm dlouhé. Mají bledě žluté zbarvení a jsou prstencovitě umístěny na letorostech. Samičí šištice jsou umístěny po jedné až dvou na konci větévek. Jsou karmínové a dorůstají 5–6 mm. Během podzimu dorůstají do velikosti lískového oříšku. Šišky jsou proměnlivé, dorůstají velikosti až 70 × 25 mm. Štítky jsou ale vždy matné a našedlé. Šišky mají kuželovitý, vejčitý tvar. Z vnější strany jsou světle hnědé, na vnitřní straně šupin mají tmavě hnědou barvu. Dozrávají na začátku října v druhém roce a otevírají se obvykle na jaře následujícího roku (Slávik a Bažant, 2016). Solitérní stromy začínají plodit po 15 letech, v zápoji na suchých půdách po 30–40 letech a na mokřích půdách v zápoji až po 50–70 letech. Semenné roky se opakují nejčastěji po 3–4 letech (Hejný a Slávik, 1988). V semenných sadech se semenné roky opakují častěji (Stejskal, ústní sdělení, 2022).

### 3.1.3. Ekologické vlastnosti a cenologie

Borovice lesní je velmi světlomilná dřevina. V důsledku toho nedokáže růst v přehuštěných semknutých porostech nebo se přirozeně zmladit v zástínu. Velice dobře zvládá podmínky otevřených ploch. Díky tomu ji lze použít při zalesňování holin. I přes svou světlomilnost dokáže tvořit souvislé porosty, nejčastěji se tak však děje činností člověka nebo např. působením požárů (Úradníček a Chmelař, 1995).

Díky svému kořenovému systému a silnému sacímu tlaku dokáže získávat vodu z velkých hloubek, a proto není na dostupnost vody příliš náročná. Vyskytuje se jak na stanovištích extrémně suchých, kde jiné rostliny nedokáží přežít, tak na stanovištích s nadbytkem vody, jako jsou například rašeliniště (Slávik a Bažant, 2016).

Borovice je velmi nenáročná, co se půdní reakce týče. Dokáže růst na velké škále půd a hornin. Typickými stanovišti jsou pro ni extrémní lokality, kde je konkurence ostatních dřevin nízká. Jde například o suché písky, rašeliny nebo vápencové skály. Dokáže růst i na půdách bez obsahu humusu a s minimem minerálních látek (Slávik a Bažant, 2016).

Jak napovídá areál rozšíření, borovice lesní je přizpůsobena růstu ve velmi rozmanitých klimatických podmínkách. Délka vegetační doby se pohybuje mezi 90–200 dny. Průměrné roční srážky odpovídají 200–1780 mm. Většinu areálu lze označit za oblast s kontinentálním klimatem, případně alespoň s klimatem kontinentálně laděným (Musil a kol., 2002).

Borovice roste hlavně ve společenstvech svazů *Erico-Pinion* a *Dicrano-Pinion*. Solitérní stromy na skalách rostou převážně ve společenstvech svazů *Vaccinion*, *Asplenion serpentini*, *Seslerio-Festucion glaucae* a *Allyso-Festucion pallentis*. S více než 120 houbami tvoří ektotrofní i endotrofní mykorrhizu (Hejný a Slávik, 1988).

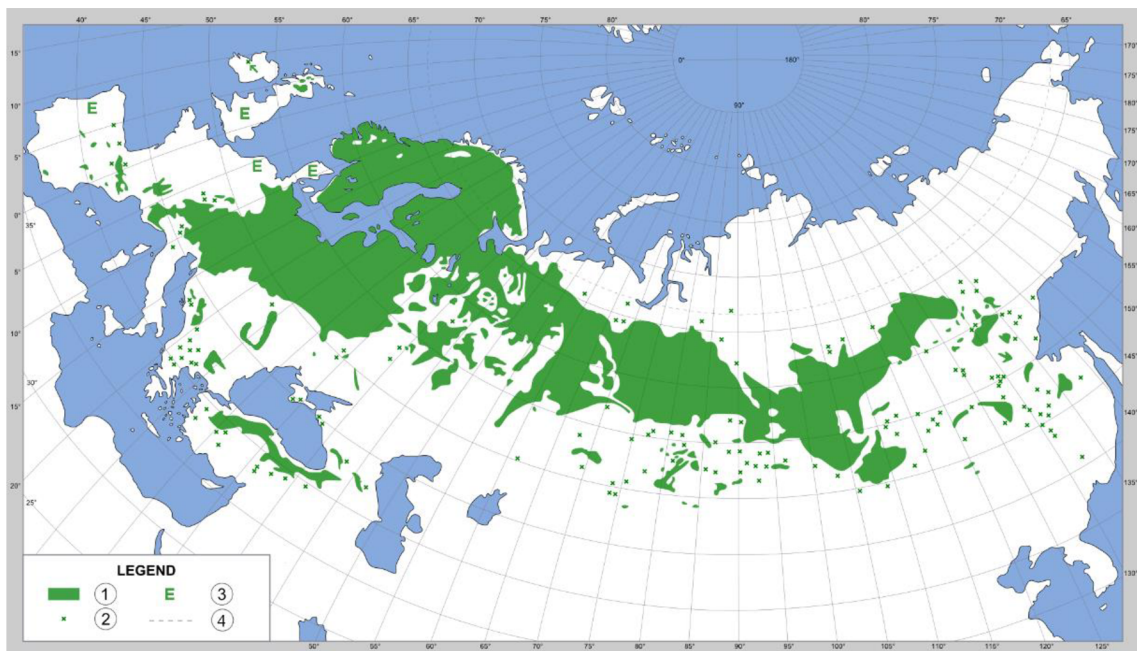
### 3.1.4. Areál rozšíření

Borovice lesní lze mezi stromovými dřevinami označit za rostlinu s nejrozsáhlejším areálem, a stejně tak i ekologickou amplitudou. Těžiště jejího areálu se nachází v severní Asii (Musil a kol., 2002).

Do areálu spadá mírný i chladnější pás celé Eurasie. Na severu zasahuje daleko za polární kruh. V Evropě chybí v teplejších částech svého areálu, zejména v nížinách a oblastech s oceánským klimatem. Vyskytuje se naopak v horských oblastech (Slávik a Bažant, 2016).



V evropské části Ruska roste na ohromném území od severní tundry až k jižním stepím. Areál pokračuje přes celou Sibiř až k Ochotskému moři. Zde je zastoupení borovice lesní nerovnoměrné. Od severu k jihu klesá maximum výskytu a rozšíření je více a více ostrůvkovité. V severních částech se vyskytuje borovice především v nižších polohách, většinou na písčích s dostatečnými srážkami, nebo dokonce v bažinách. V oblastech, kde dochází periodicky k požárům (bez vlivu člověka), borovice převažuje nad smrkem. Silnější borka a hluboký kůlový kořen dávají borovici lepší předpoklady k přežití požáru. Borovice také dokáže lépe než smrk osídlit plochy po požárech s nedostatkem humusu (Slávik a Bažant, 2016). Mapa přirozeného rozšíření borovice lesní je zobrazená na obrázku 1.



Obrázek 1: Mapa přirozeného areálu borovice lesní. 1 – hlavní areál rozšíření; 2 – izolované výskyt; 3 – přírodní populace zaniklé v důsledku lidské činnosti; 4 – polární kruh. Zdroj: Kwiecień (2017).

V takto ohromném areálu rozšíření lze vylišit 3 velmi rozdílné typy borovice:

- borovice lesní severská – nížinná (*Pinus sylvestris septentrionalis*)
- borovice lesní stepní (*Pinus sylvestris stepposa*)
- borovice lesní horská (*Pinus sylvestris montana*) (Slávik a Bažant, 2016).

Česká republika se celá nachází uvnitř areálu rozšíření. Přirozeně se zde ale vyskytovala borovice pouze ostrůvkovitě v oblasti pahorkatin a nižších pohoří, případně na extrémních stanovištích jako jsou skály nebo sutě. Lidskými zájmy však byla rozšířena i mimo svá přirozená stanoviště. Začaly tak vznikat velké monokulturní porosty převážně

na písčitých půdách např. na Plzeňsku nebo Bzenecku. Kvůli devastovaným lesům se však borovice šířila i přirozeně na holiny nebo pastviny (Úradníček a Chmelař, 1995).

### **3.1.5. Provenience a ekotypy borovice lesní**

Jak bylo zmíněno výše, borovice lesní má mezi stromy jeden z největších areálů rozšíření i ekologickou amplitudu. Diverzita uvnitř tohoto taxonu je tedy extrémní. Jednotlivé geografické variety se liší mnoha charakteristikami, ať už se jedná o velikost stromu, barvu nebo morfologické, fyziologické či růstové projevy všech částí stromu (Musil a kol., 2002).

Při popisu geografických variací druhu se setkáváme s několika důležitými termíny. První z nich, provenience, udává geografickou polohu původní populace v rámci svého areálu rozšíření. Termín zdroj semen odkazuje na geografickou polohu, ze které bylo semeno získáno, ale nebere se v potaz, jestli byly rodičovské stromy z původní populace. Geografickou rasu chápeme jako geneticky podobné jedince, kteří se vyskytují na určitém území, kterému se přizpůsobili díky přírodnímu výběru. Termín ekotyp pak popisuje rasy s určitými genotypy, které jsou přizpůsobené konkrétnímu stanovišti nebo ekologické nise. Ekotyp je určen více rysy nebo charakteristikami rasy, který jej odlišují od ostatních ekotypů (White a kol., 2007).

Už od začátku 20. století bylo lesním výzkumníkům jasné, že mezi jednotlivými populacemi borovice lesní existují velké rozdíly. Rakouský lesní výzkumník Cieslar dospěl k závěru, že fyziologické odrůdy byly dědičně přizpůsobeny délce vegetačních období stanovišť. Na základě experimentů si Cieslar a současně jeho švýcarský kolega Engler uvědomili, že se u borovice lesní i smrku ztepilého vyskytují kontinuální změny, a to od severu k jihu a z údolí do vysokých nadmořských výšek. Průkopnickým úspěchem byla práce Studie o fyziologické variabilitě borovice lesní a její vztah ke klimatu (*Studier över tallens fysiolog variabilitet och dess samband med klimatet*) Olofa Langleta z roku 1936. Autor ukázal, že se ve Švédsku obsah sušiny v určitou dobu během podzimu nepřetržitě mění od severu k jihu. Obsah sušiny odráží stupeň odolnosti. Tímto se nepřímo dokazuje variabilní mrazuvzdornost proveniencí. Koncem 40. let provedl Vilhelms Eiche ve Švédsku celostátní sběr semen v přibližně 100 porostech pro založení celostátní experimentální série proveniencí. Série obsahuje také několik nešvédských populací. Tato série testů se liší od konvenčních tím, že zahrnuje různé provenience v různých testovacích plantážích. Eicheovým záměrem bylo vyhodnotit vliv přenosu na

výkon provenience. Zahrnul různé přesuny v rámci zeměpisné šířky (sever-jih) a vertikálního gradientu. Díky tomuto pokusu máme dobré znalosti nejen o účincích přenosu, ale také o variabilitě velkého počtu znaků v rámci každé populace. Přenosy do severní testovací lokality snižují přežití, zatímco opačný přenos přežití zlepšuje. Údaje z Eichova pokusu naznačují, že jeden stupeň při šířkovém přenosu způsobí změnu v přežití přibližně o 10 %, zatímco změna o 100 metrů nadmořské výšky dává změnu přibližně o 3 % (Eriksson *a kol.*, 2006).

Rozdílné klimatické podmínky v různých částech areálu dřeviny mají vliv na růst a vývoj. V areálu borovice lesní tak můžeme vylišit dva různé klimatypy (klimatické ekotypy). Jde o borovici nížin – borovici severskou a borovici reliktní – borovici horskou. Na jejich přechodech pak můžeme vylišit i borovici stepní. Do klimatypu borovice lesní horské patří i borovice hercynská (*Pinus sylvestris hercynica*), která se vyskytovala původně ostrůvkovitě v pahorkatinách a horách hercynské oblasti v Čechách a na Moravě, ale lidskými vlivy byla značně rozšířena. Na území České republiky se vyskytuje ještě borovice karpatská (*Pinus sylvestris carpathica*) v karpatské části (Svoboda, 1953).

V České republice se přirozeně vyskytují dva hlavní ekotypy borovice lesní. Jde o náhorní ekotyp vyšších poloh a o chlumní ekotyp nízkých poloh. Tyto ekotypy jsou charakterizovány především na základě adaptace na prostředí, růstu, vlastností kmene, koruny a dalších morfologických projevů. Dále se ale v lesnické praxi vylišují regionální populace s určitými typickými vlastnostmi. Jako příklad můžeme zmínit např. borovici jihočeskou (třeboňskou), která se cení zejména s ohledem na tvárnost kmene a jakost dřeva. Dalšími příklady mohou být borovice severočeská, západočeská, šumavská (stožecká), polabská, na Moravě v oblasti Českomoravské vrchoviny svratecká nebo v oblasti Nízkého Jeseníku heraltická (Máchová *a kol.*, 2016).

### **3.1.6. Vliv sucha**

Globální klima se nejen díky skleníkovým plynům významně změnilo a bude se tak dít i v budoucnosti. Zvýšení frekvence, trvání nebo velikost sucha a tepelného stresu spojeného s těmito změnami může významně ovlivnit složení a strukturu lesů v mnoha regionech. Lesy borovice lesní jsou na extrémní sucha citlivé. V zaznamenaných případech odumírání lesů způsobeného suchem od roku 1970 v Evropě figuruje tento druh v deseti z dvaceti pěti případů (Allen *a kol.*, 2010).

Podíváme-li se na vliv sucha na rostliny celkově, je zde několik dopadů. Jedním z nich je například snížení turgoru buněk, což se projevuje vadnutím a zastavením dlouhivého růstu buněk. Při extrémní ztrátě vody, tedy pokud transpirace významně převáží nad množstvím přijímané vody, může dojít až k plazmolýze, kdy se plazmolema odděluje od buněčné stěny. V takovém případě dochází k odumření buňky. Při nedostatku vody v půdě začíná rostlina tvořit kyselinu abscisovou (ABA – „Abscisic Acid“), která je mediátorem exprese genů pro stresové proteiny a ovlivňuje uzavírání průduchů nadzemních orgánů. Poté se začíná zvyšovat množství osmoticky aktivních metabolitů a snižuje se rychlost fotosyntézy. Rostliny mají dále několik obecných strategií, kterými suchu vzdorují, např. pokles listové plochy, omezení transpirace nebo osmotické přizpůsobení (Tomášková a Kubásek, 2016).

V rámci hodnocení zdravotního stavu porostů borovice lesní v Česku na základě vizuálního hodnocení míry defoliace dochází v období 2000–2019 k postupnému zvyšování hodnot. V roce 2000 byla průměrná hodnota 32 %, zatímco v roce 2019 už 51 %. Významné zhoršování lze pozorovat od roku 2015. To je způsobené zejména nedostatkem vody a také, v souvislosti s tím, napadením biotickými škodlivými činiteli (Lorenc a Liška, 2020).

### **3.1.7. Hospodářský význam**

Hned po smrku je borovice naší hospodářsky nejvýznamnější dřevinou. Má rozlišené červenohnědé jádro a nažloutlou běl. Dřevo není těžké, je měkké a pružné. Přesto se houževnatostí nevyrovná smrku. Vysoký podíl pryskyřice zvyšuje odolnost jak na vzduchu, tak i ve vodě. Dřevo můžeme zařadit mezi středně trvanlivé. Vzhledem k mechanickým přednostem smrku nemá borovice tak velký podíl zpracování. Přesto se používá k výrobě řeziva, pro stavební účely nebo při výrobě rámových konstrukcí panelových dřevostaveb (Slávik a Bažant, 2016).

Používá se i na stavbu srubů, případně k výrobě zahradní architektury. Méně kvalitní dřevo se používá pro výrobu obalových materiálů. Dřevo je dále používáno k výrobě překližek, ale také dých loupaných i krájených. Kvůli výronům pryskyřice je další zpracování náročné nebo omezené. Kulatina menších průměrů se používá jako důlní nebo jako sloupovina (Slávik a Bažant, 2016).

## 3.2. Šlechtění lesních dřevin

Šlechtění jako takové provází člověka odedávna. Když člověk přešel z kočovného způsobu života k zemědělskému, začal si vybírat jednotlivé konkurenceschopnější planě rostoucí rostliny pro svou obživu a začal s domestikací zvířat. Jelikož lesní dřeviny neposkytovaly člověku obživu, jejich umělé zušlechťování se dostalo na řadu až mnohem později. První osobou, která zmiňuje velkou perspektivu šlechtění lesních dřevin je šlechtitel Josef G. Kölreuter. Ve své práci z roku 1765 zmiňuje hybridy stromů, jejichž dřevo bude mít velký hospodářský význam a další dobré vlastnosti, přičemž plného vzrůstu dosáhnou za polovinu obvyklé doby (Kantor, 1975).

### 3.2.1. Cíle šlechtění lesních dřevin

Šlechtitelské programy jsou navrhované tak, aby vyvíjely geneticky vylepšené odrůdy na zalesňování, pro zvýšení ekonomické nebo sociální hodnoty budoucího lesa. Zlepšení vlastností stromů je nedílnou součástí většiny programů ve všech zemích světa a zahrnuje opakované cykly činností, jako je selekce, prolínání selekcí a genetické testování (White *a kol.*, 2007).

Mohlo by se zdát samozřejmé, že jediným cílem je vyrábět kvalitnější surovinu pro pily, celulózový a papírenský průmysl. Šlechtění však může být zaměřeno například také na produkci materiálu pro okrasné lesy nebo pěstování vánočních stromků. Na Islandu se produkty šlechtění používají k zalesňování nelesních půd. Dalším cílem může být využívání vyšlechtěných stromů k prevenci eroze. V důsledku různých cílů kulturních lesů musí být použita různá selekční kritéria k vybudování selektovaných populací, která budou splňovat různé cíle (Eriksson *a kol.*, 2006).

Cíle šlechtění tedy mohou být různé. Může jít o zvyšování produkce biomasy, jakosti dřeva nebo odolnosti proti škodlivým činitelům. Nemusí se vždy jednat pouze o zaměření na jeden aspekt. Lze se zaměřit i na dvě nebo více vlastností, zvláště pokud jde o vlastnosti s vyšší genetickou korelací (Pospíšil *a Koblíha*, 1988).

Cíle šlechtění lesních dřevin lze podle Pauleho (1992) rozdělit na:

1. Zvýšení kvantity produkce dřevní hmoty nebo dalších produktů (např. pryskyřice)
2. Zvýšení kvality produkce dřevní hmoty nebo dalších produktů
3. Zvýšení odolnosti lesních dřevin
  - a. vůči abiotickým činitelům

#### b. vůči biotickým činitelům

Z těchto kategorií bývá na prvním místě právě zvýšení kvantity produkce. V jednodušejí zaměřených šlechtitelských programech představuje zvýšení kvantity produkce 15–20 %. V komplikovanějších programech může dosahovat zvýšení produkce až 40 %. Ruku v ruce jde se zvýšením kvantity zvýšení kvality. Bylo by nesmyslné, pokud by rostla pouze kvantita, ale kvalita by se neměnila, nebo by dokonce klesala. U kvality mluvíme především o přímosti, průběhu kmene, plnodřevnosti nebo rovnoměrných letokruzích. Odolnost pak rozlišujeme na abiotickou, kam spadá například mrazuvzdornost, odolnost vůči suchu, znečištění ovzduší nebo sněhu a námraze. Do biotické odolnosti můžeme zařadit například odolnost vůči ohryzu zvěří, napadení hmyzem nebo houbovými či jinými patogeny (Paule, 1992).

#### **3.2.2. Princip šlechtění lesních dřevin**

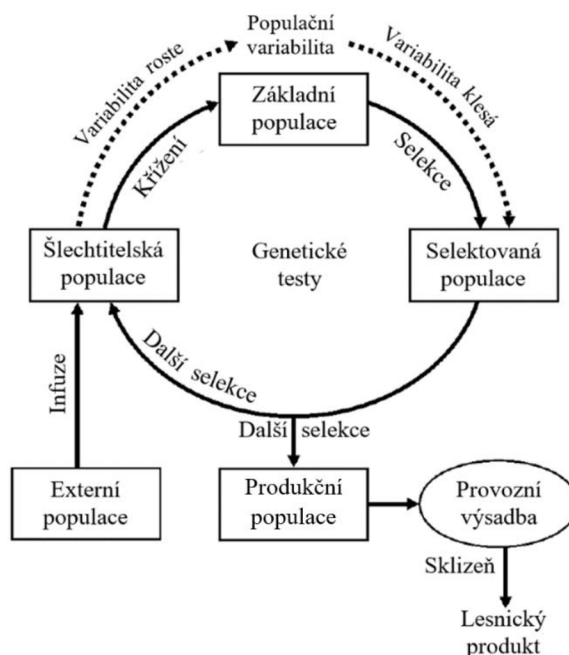
Šlechtitelský program je průběžným souborem opatření, kterými se snažíme dosáhnout určitého cíle. Ten může být formulován s různou přesností, důležité však je, aby byl jasný a konkrétní. Smyslem je tedy docílení genetického zisku, který je definován znaky a vlastnostmi, kterých chce šlechtitelský program dosáhnout (Pospíšil a Koblíha, 1988).

Pokud máme definované znaky pro zlepšení, je důležité odhadnout jejich genetické variace a způsob dědičnosti. Odhady aditivního rozptylu nebo aditivního variačního koeficientu jsou důležité, protože aditivní rozptyl můžeme použít při hromadném výběru. Pokud je znám aditivní rozptyl, můžeme vypočítat možné genetické zisky. Jestliže je vysoký podíl neaditivní genetické variace, stává se šlechtění složitějším (Eriksson a kol., 2006).

Pro šlechtění lesních dřevin se využívá genetické proměnlivosti. Ta existuje v populacích přirozeně nebo existují populace, kde byla proměnlivost uměle rozšířena. Základním principem a nástrojem šlechtění je selekce. Při vybírání pouze určitých stromů musí bezpodmínečně docházet k menšímu či většímu omezení genetické proměnlivosti. Souběžně se zužováním genetické informace by mělo naopak docházet k opatřením pro udržení původní proměnlivosti za účelem případných dalších šlechtitelských záměrů (Pospíšil a Koblíha, 1988).

Výběr, zprostředkování a další aktivity většiny šlechtitelských programů můžeme shrnout pomocí koncepčního modelu nazývaného šlechtitelský cyklus (*the breeding cycle*). Jednotlivé programy se značně liší v provádění jednotlivých činností, ve velikosti

různých typů populace či v intenzivě programu (White *a kol.*, 2007). Schéma šlechtitelského cyklu se nachází na obrázku 2.



Obrázek 2: Šlechtitelský cyklus. Zdroj: přeloženo podle White *a kol.* (2007).

Hlavními činnostmi šlechtitelského cyklu jsou selekce a křížení. Ty jsou postupně aplikovány během každého šlechtitelského cyklu. Nejprve se provádějí selekce ze zdrojové populace, poté někteří nebo všichni vybraní jedinci vytvoří šlechtitelskou populaci a jsou navzájem kříženi, aby se vyvolala rekombinace alel. Potomstvo odvozené z křížení se vysadí, aby vytvořilo produkční populaci dalšího cyklu, a selekce se opět použije k výběru nejlepších jedinců. Pokud je druhý cyklus selekce proveden efektivně, vede k dalšímu genetickému zisku (White *a kol.*, 2007). Selektovaná populace se skládá z jedinců vybraných na základě fenotypu, zatímco základní populace zabírá postavení zdrojové populace u semenných sadů vyšší generace, kde se už nevybírají jedinci na základě fenotypu (Funda *a El-Kassaby*, 2012). Šlechtitelská populace navazuje na selektovanou, dochází zde ke křížení a testování jedinců. Z produkční populace se již získává vyšlechtěný genetický materiál jako genetický zisk a může být použitý v hospodářských výsadbách (Ivanek *a kol.*, 2010).

### 3.2.3. Semenné sady

Semenné sady jsou umělé výsadby, které jsou potomstvem výběrových stromů, jejichž účelem je šlechtění a produkce hodnotného reprodukčního materiálu. Na základě způsobu reprodukce výběrového stromu je dělíme na klonové semenné sady, které byly založeny

vegetativním způsobem a jádrové semenné sady zakládáné z generativně vzniklých potomků výběrových stromů (Paule, 1992). Semenné sady rozlišujeme na testované a netestované. Netestované jsou pouze sady 1. generací, zatímco sady vyšších generací už testované jsou (Kaňák, 2008).

V České republice převládají klonové semenné sady zakládáné z roubovanců (ramet) vybraných klonů (ortetů). Je možné je zakládat i z řízkovanců. Jádrové semenné sady jsou vhodné pro pionýrské druhy, které začínají plodit v nízkém věku (Kaňák, 2008).

Z genetického hlediska je mezi těmito typy velký rozdíl. Roubovance představují identické kopie výběrového stromu, zatímco jedinci vzniklí v semenných sadech jsou potomky volně opylovaných mateřských stromů (Paule, 1992).

Na konci roku 2020 bylo v České republice evidováno 134 semenných sadů, z čehož jich bylo 107 uznaných a zbylých 27 registrovaných. Vzhledem k poměrně dlouhé době uznávání semenného sadu jako zdroje kvalifikovaného reprodukčního materiálu se zaznamenávají i založené, ale neuznané semenné sady. Celková plocha semenných sadů činí 295,78 ha. Semenné sady jsou založeny pro 25 druhů dřevin (10 jehličnatých a 15 listnatých). Plocha semenných sadů pro jehličnaté dřeviny je 242,81 ha a plocha semenných sadů listnatých dřevin je 2,97 ha (Ministerstvo zemědělství, 2021).

### **3.2.3.1. Semenné sady 1. generace**

Semenné sady můžeme rozdělovat buď podle generace šlechtění, anebo podle způsobu založení – klonové nebo semenné sady. Sady první generace jsou zakládány rodiči vybranými na základě jejich fenotypů v lesních porostech (tj. zakladatelské populace) a jejich genetická hodnota je z velké části neznámá (Funda a El-Kassaby, 2012).

Jedním z hlavních způsobů, jak ovlivnit šlechtěnou populaci, je selekce. Díky vhodnému výběru jedinců ze zdrojové populace se dosahuje genetického zisku. Vzhledem k omezení množství jedinců však současně dochází k omezení genetické diverzity. Jelikož se zde jedná o semenné sady první generace a nemáme informace o genetické kvalitě, používá se individuální fenotypová selekce. Tímto způsobem je v České republice založena naprostá většina semenných sadů (Ivanek a kol., 2010).

Při zakládání sadů musíme dbát na určité zásady. Klony musí být z jedné přírodní lesní oblasti, musí být respektovány přenosy v rámci LVS dané vyhláškou č. 456/2021 Sb. a zároveň musí být respektovány klimatické ekotypy dřevin. Odběr roubů probíhá v době vegetačního klidu, od prosince do března, v závislosti na druhu dřeviny. Odebírání roubů



se provádí obvykle v horní třetině stromů. Ihned po odběru se musí všechny rouby označit evidenčním číslem (neoznačené rouby jsou bezcenné) a převést na místo skladování, nejlépe na místo roubování. Do semenného sadu se roubovance vysazují během 2.–3. roku po roubování. Co se plochy semenného sadu týče, měla by odpovídat ekologickým nárokům pěstované dřeviny. Aby nedocházelo ke snižování variability vypěstovaných potomstev, je potřeba dodržet minimální počet klonů. U sadů 1. generace bývá uváděn jako minimální počet 50 klonů (ortetů). Kvůli zabránění okrajového efektu se doporučuje vzdálenost od okolních porostů minimálně 15–20 m (Kaňák, 2008). Zároveň by se sad neměl nacházet v blízkosti nekvalitního porostu stejného druhu, aby se zabránilo kontaminaci nevhodným pylem. Vzdálenost jednotlivých ramet by měla být co největší, aby se zabránilo samoopylení. Stejně tak by se měli lišit i sousedi, aby docházelo k maximálnímu počtu kombinací a zvyšovala se tak genetická variabilita, a zároveň docházelo k minimalizaci inbreedingu (Ivanek *a kol.*, 2010). Inbreeding (příbuzenské křížení) zvyšuje genomickou homozygotnost u jedinců a populací. To zase obvykle vede ke ztrátě zdatnosti nazývané inbrední deprese – snížení schopnosti přežití v důsledku křížení příbuzných jedinců (Fox *a Reed*, 2011).

Jelikož mohou být fenotypové znaky, na základě kterých se jedinci vybírají, velkou měrou ovlivněny prostředím, nemůžeme očekávat vysokou míru genetické odezvy. Abychom zvýšili genetický zisk, je potřeba potomstvo experimentálně testovat. Z pozitivně testovaných jedinců pak vznikají šlechtitelské populace 2. a postupně vyšší generace (Ivanek *a kol.*, 2010).

### **3.2.3.2. Testování potomstev semenných sadů**

Testování potomstev semenných sadů se provádí za účelem zjištění informací o genetické variabilitě hledaných znaků a vlastností u zkoumaných populací. Na základě testování je možná následná selekce na genetické úrovni pro vytvoření semenných sadů vyšší generace nebo zařazení do kategorie testovaných zdrojů reprodukčního materiálu (Frýdl, 2009). Pokud testujeme klony za účelem vytvoření semenného sadu vyšší generace, jejich genetickou hodnotu zjišťujeme testováním potomstev mateřských stromů (klonů) (Kaňák *a kol.*, 2009).

Pokud testování provádíme za účelem produkce testovaného reprodukčního materiálu, může být testování provedeno dvěma variantami. Testuje se buď celý semenný sad, nebo pouze jednotlivé klony. Semenné sady nebo klony, které jsou pozitivně testované mohou

být použité pro produkci. Pokud je cílem založení semenného sadu vyšší generace, je opět možné provádět testování dvěma způsoby, v závislosti na tom, jaká je požadovaná generace budoucího semenného sadu. V prvním případě se potomstva klonů získají kontrolovaným křížením a jsou tedy známi oba rodiče – v tomto případě se jedná o plno sesterská potomstva. V druhém případě se potomstva získají z osiva klonů a známe tedy pouze matku. Jedná se tedy o potomstva polosesterská (Kaňák, 2008). Při použití prvního způsobu lze zakládat z pozitivně testovaných klonů semenné sady 2. a vyšší generace. Při použití 2. způsobu lze založit semenný sad 1,5. generace. Pokud se využijí genové markery ke zjištění otcovských klonů mohou být z takto testovaných potomstev založeny i semenné sady vyšších generací (El-Kassaby a Lstibůrek, 2009).

### **3.2.3.3. Semenné sady 1,5. generace**

Při převodu semenného sadu 1. generace na sad generace 1,5. je podmínkou ověření geneticky podmíněných charakteristik potomstev klonů. Potomstva se získávají z osiva klonů, u kterého je známá pouze matka. Jedná se o polosesterské populace potomstev. Na základě proběhlého testování probíhá selekce klonů, kdy se vyberou jedinci s vhodnými charakteristikami. Jde o selekci v potomstvech, kterou nazýváme „*forward selection*“. Doba trvání cyklu křížení a testování potomstev trvá řádově desítky let. Druhá možnost spočívá ve zpětné selekci ortetů podle jejich potomstev. Tento způsob nazýváme zpětnou selekci „*backward selection*“ (Ivanek a kol., 2010).

Na základě výsledků testování můžeme z pozitivně ověřených jedinců založit zcela nový semenný sad 1,5. generace. Vzhledem k poměrně velkým nákladům v poměru k přínosům však nemusí být založení nového semenného sadu 1,5 generace ekonomické a často bývá vhodnější založit rovnou semenný sad 2. generace (Ivanek a kol., 2010).

### **3.2.3.4. Semenné sady vyšších generací**

Doposud založené semenné sady na území České republiky patří mezi 1. generace semenných sadů (Kaňák a kol., 2009). Semenné sady vyšších generací lze zakládat z pozitivně ověřených klonů vzniklých kontrolovaným křížením, tedy z potomstev plnosesterských. Pokud využijeme genetických markerů pro zjištění otcovských klonů, může být semenný sad vyšší generace založen i ze sesterstev polosesterských (Kaňák, 2008). Příkladem může být metoda *Breeding Without Breeding* – šlechtění bez šlechtění. Ta kombinuje použití fenotypového nebo genotypového předvýběru vhodných mateřských jedinců a kvantitativní genetickou analýzu k identifikaci otcovského

genotypu. Bez kontrolovaného křížení nebo experimentálního testování jsou přesto zjištěni oba rodiče potomstva (El-Kassaby a Lstibůrek, 2009).

### 3.3. Fyziologie lesních dřevin ve šlechtění

Fyziologické vlastnosti lesních dřevin mohou být využity ve šlechtitelských programech. Například znalost obsahu pigmentu a znaky spektrální reflektance souvisí s  $h^2$  – heritabilitou v úzkém smyslu („*narrow-sense heritability*“), a mohou tedy být velmi důležité pro šlechtitelské programy. Tyto znaky mohou být použité k určení fenotypů s vhodným genotypem, který je např. odolný suchu nebo disponuje lepší tolerancí vůči dalším stresům (Čepl a kol., 2018).

V jedné ze studií zaměřených na tato témata byly zkoumány genetické variace, které jsou základem některých parametrů fluorescence chlorofylu v populacích borovice lesní. Analýza fluorescence chlorofylu poskytuje množství informací o fyziologickém stavu jehličnanů, zejména informace o reakcích na faktory prostředí. Díky těmto informacím lze použít výstupů měření fluorescence chlorofylu také v genetice a šlechtění stromů. Šlechtitelé pracují s genetickými variacemi vlastností ovlivňujících produktivitu a zdraví porostu a možnost měření těchto vlastností je důležitým přínosem. Ve zmiňované strukturované populaci bez ovlivnění stresem se došlo k závěru, že v různých indexech fluorescence chlorofylu nabývá genetická variace statisticky významných hodnot (Čepl a kol., 2016).

### 3.4. Fotosyntetické pigmenty

Oxygenní fotosyntéza je několikastupňový proces, během kterého vznikají z jednoduchých anorganických látek ( $\text{CO}_2$ ) energeticky bohaté organické látky. Jako energetický zdroj k tvorbě těchto látek používá rostlina energii fotonů slunečního záření. Voda slouží jako donor elektronů a protonů a kyslík je uvolňován jen jako vedlejší produkt. K fotosyntéze je využito asi 40 % slunečního záření, které přibližně odpovídá 400–700 nm, tedy viditelnému spektru (Tomášková a Kubásek, 2016).

Aby mohla být energie slunečního světla využita ve fotosyntéze, musí být nejprve absorbována pigmenty rostliny. Veškeré pigmenty, které se na fotosyntéze podílejí se nacházejí v chloroplastech. Chlorofyly a bakteriochlorofyly (pigmenty nalezené v určitých bakteriích) jsou typickými pigmenty fotosyntetických organismů, ale všechny organismy obsahují směs více než jednoho druhu pigmentu, z nichž každý plní specifickou funkci (Taiz a Zeiger, 2002).

Fotosyntetické pigmenty jsou uloženy ve fotosystémech tylakoidů. Dokáží pohlcovat určitou část viditelného záření a jeho energii předávají dalším molekulám v podobě excitovaného stavu. Fotosyntetické pigmenty můžeme rozdělit do tří základních skupin: chlorofyly, karotenoidy a fykobiliny, což jsou barviva některých řas a sinic, která předávají energii chlorofylu a (Tomášková a Kubásek, 2016).

Část světelné energie absorbované chlorofyly a karotenoidy se nakonec uloží jako chemická energie prostřednictvím tvorby chemických vazeb. Tato přeměna energie z jedné formy na druhou je složitý proces, který závisí na spolupráci mezi mnoha molekulami pigmentů a skupinou proteinů pro přenos elektronů (Taiz a Zeiger, 2002).

### **3.4.1. Chlorofyly**

Chlorofyly patří mezi fotosyntetické pigmenty. Jejich molekuly můžeme pomyslně rozdělit na konjugovaný tetrapyrolový kruh s atomem hořčíku navázaným uprostřed a na 20uhlíkatý řetězec. Tetrapyrolový kruh, který je svou strukturou podobný například porfyrinu, slouží jako anténa zachycující fotosynteticky aktivní záření. Obsahuje některé volně vázané elektrony, jež se podílí na redoxních reakcích a dalších procesech fotosyntézy. Dvacetiuhlíkatý řetězec slouží k ukotvení molekuly v hydrofobním prostředí ve fotosystémech (Taiz a Zeiger, 2002).

Když tetrapyrolový konjugovaný systém elektronů přijme energii díky pohlcení záření vhodné vlnové délky, dochází k excitaci chlorofylu. Excitovaný elektron se dostane na vyšší orbital. Pro průběh fotosyntézy je dostatečný tzv. nejnižší singletní excitovaný stav. Energie potřebná pro excitaci odpovídá energii červené části viditelného spektra. Fotony s nižší vlnovou délkou – modrá část viditelného spektra, zajistí vybuzení druhého singletního excitovaného stavu (Tomášková a Kubásek, 2016). Chlorofyly tedy silně absorbují v modré (asi 430 nm) a červené (asi 660 nm) části spektra. Jelikož zelené světlo uprostřed viditelné oblasti není účinně absorbováno, většina se odráží do našich očí a dává rostlinám jejich charakteristickou zelenou barvu (Taiz a Zeiger, 2002). Následný přechod z druhého na nejnižší excitovaný stav probíhá samovolně, kdy se nadbytečná energie uvolňuje ve formě tepla. Energie z prvního excitovaného stavu je pak následně přenášena na další molekulu. V případě přebytku světla nebo omezení fotosyntézy stresory nemůže excitovaný chlorofyl energii předat. Excitovaný elektron se vrací do základního stavu a přebytečná energie je vyzářena v podobě tepla nebo fluorescence. Ta je nepřímo úměrná fotosyntéze a je důležitým parametrem, který se využívá

k hodnocení fotosyntézy a zdravotního stavu rostliny (Tomášková a Kubásek, 2016). Struktura chlorofylů je zobrazena na obrázku 3.

#### **3.4.1.1. Chlorofyl a**

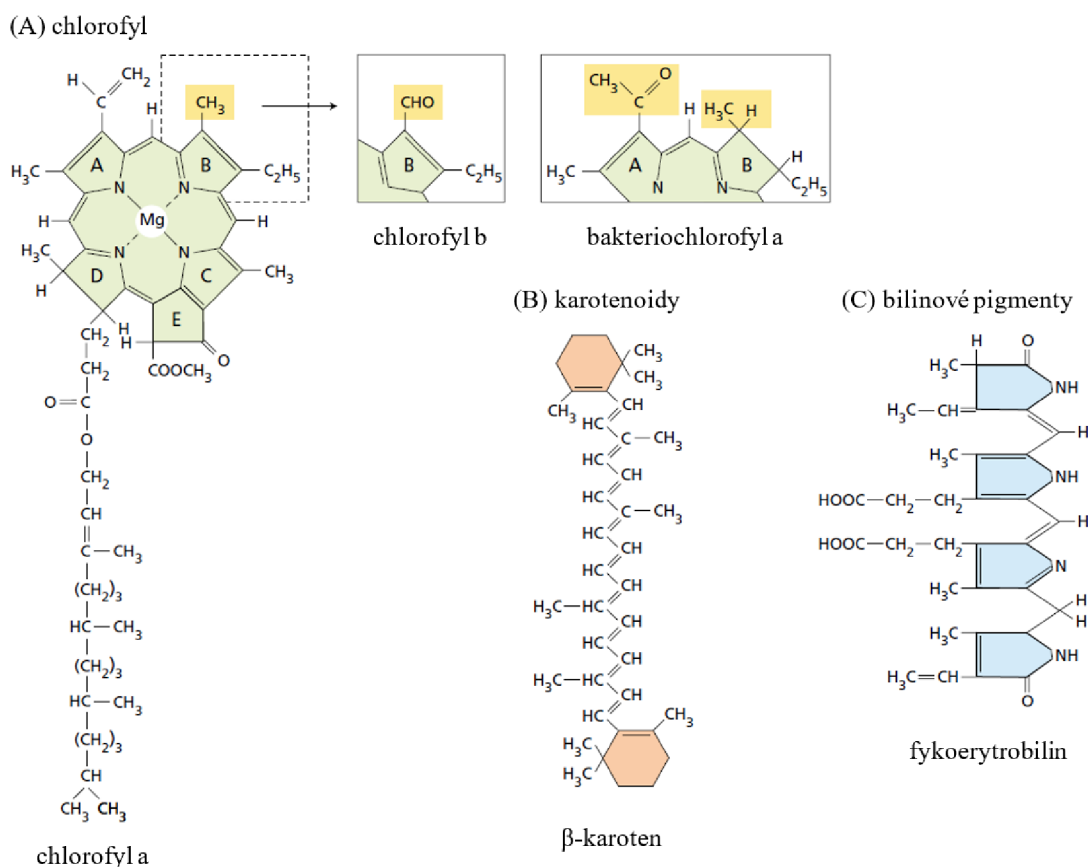
Chlorofyl a je základní molekulou každého fotosystému. Je schopen separace náboje, tedy transferu elektronu na jinou molekulu, a proto jej můžeme najít v reakčních centrech fotosystémů, jako jejich hlavní součást. Dvojice chlorofylů v každém z reakčních center, která je schopna uvolňovat elektron k jeho transportu v elektron-transportním řetězci se nazývá specifický pár. Ostatní pigmenty pouze předávají excitaci směrem k tomuto specifickému páru (Tomášková a Kubásek, 2016).

#### **3.4.1.2. Chlorofyl b**

Chlorofyl b vzniká řízenou oxidací chlorofylu a. Slouží společně s molekulami chlorofylu a, které tvoří specifický pár, k přenosu excitace směrem k tomuto páru. energii v podobě excitovaného stavu dokáží mezi sebou přenášet elektrony s účinností téměř 100 %. Jedná se o tzv. kvantovou koherenci (Tomášková a Kubásek, 2016).

#### **3.4.2. Karotenoidy**

Dalším druhem fotosyntetických pigmentů jsou karotenoidy. Skládají se ze 40uhlíkatých tetraterpenů. Základní stavební jednotkou pro vznik karotenoidů jsou izoprenové jednotky (8 izoprenových jednotek). V rostlině mají tyto barviva více funkcí. Můžeme je rozdělit do dvou skupin, na bezkyslíkaté karoteny a kyslíkaté xantofyly. Obě skupiny se vyskytují nejvíce v chromoplastech, které dávají například barvu plodům nebo květům. Mají však funkci i ve fotosynteticky aktivních chloroplastech. Některé xantofyly, jako například  $\beta$ -karoten, který je provitaminem vitamínu A, mohou předávat energii chlorofylům a podílet se tak na procesu fotosyntézy. Účinnost přenosu energie je však nízká, přibližně 30%. Větší význam karotenoidů tkví v ochraně fotosyntetického aparátu před oxidativním stresem. Poškození způsobují reaktivní formy kyslíku a dusíku, které vznikají především při vysoké ozáření, která nedokáže být využita ve fotosyntéze (například z důvodu stresu ze sucha, mrazu nebo nedostatku  $\text{CO}_2$ ). Ochrana probíhá dvěma způsoby. Buď jde o přeměnu nadměrné energie na teplo, ještě předtím, než dojde ke vzniku nebezpečných radikálů (tzv. xantofylový cyklus), nebo o přeměnu nebezpečných radikálů na neškodné molekuly pomocí antioxidačních schopností karotenoidů (Tomášková a Kubásek, 2016). Struktura  $\beta$ -karotenu je zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 3: Struktura chlorofylů a a b (A),  $\beta$ -karotenu (B) a fykoerytrobilinu. Zdroj: přeloženo podle Taiz a Zeiger (2002).

### 3.4.3. Pigmenty a reflektance

Obsah pigmentů je důležitý z několika důvodů. Množství slunečního záření absorbovaného listem je odvislé od koncentrací fotosyntetických pigmentů. Nízké koncentrace chlorofylu mohou přímo omezovat fotosyntetický potenciál, a tím i primární produkci. Velká část dusíku v listech je začleněna do chlorofylu, tudíž kvantifikace obsahu chlorofylu poskytuje nepřímé měření stavu živin. Pigmentace může přímo souviset se stresovou fyziologií, jelikož koncentrace karotenoidů se zvyšují a chlorofyly obecně klesají ve stresu a během stárnutí. Relativní koncentrace pigmentů se mění s abiotickými faktory, jako je světlo, a tak kvantifikace těchto poměrů může poskytnout důležité informace o vztazích mezi rostlinami a jejich prostředím (Richardson *a kol.*, 2002).

Tradiční metody zjišťování obsahu chlorofylu vyžadovaly jeho extrakci v rozpouštědle, po které následovalo spektrofotometrické stanovení absorbance a převod z absorbance na koncentraci pomocí standardně publikovaných rovnic. Stanovení chlorofylu tak vyžaduje destruktivní odběr vzorků (který vylučuje např. vývojové studie jednotlivých listů) a je

relativně časově, a tedy i finančně náročné. Proto byly vyvinuty nedestruktivní optické metody založené na absorbanci anebo odrazu světla neporušeným listem. Optické metody obecně poskytují hodnotu „chlorofylového indexu“, která vyjadřuje relativní obsah chlorofylu na jednotku plochy listu nebo koncentraci na gram listové tkáně. Tyto novější metody jsou nedestruktivní, velmi rychlé a nyní možné v terénu (Richardson *a kol.*, 2002).

Obsah rostlinných pigmentů silně souvisí s fyziologickým stavem rostlin. Proto mohou být informace týkající se obsahu pigmentů cenným indikátorem řady klíčových vlastností a procesů ve vegetaci a širším ekosystému. Vnitřní struktura listů rozptyluje dopadající záření a umožňuje, aby velká část procházela zpět horní vrstvou epidermis a byla pozorována jako odražené záření. Pigmenty, voda a další biochemikálie absorbují určité vlnové délky záření, což snižuje odrazivost v těchto oblastech. Naměřené hodnoty odraženého záření lze použít jako nedestruktivní metodu pro kvantifikaci pigmentů. Kvůli přerývacím se absorpčním vlastnostem pigmentů a dalších složek může být obtížné vztáhnout odrazivost na jedné vlnové délce ke koncentraci jednotlivého pigmentu (Blackburn, 2006).

Jak bylo zmíněno výše, obsah fotosyntetických pigmentů v listech reaguje v závislosti na podmínkách prostředí, a proto se využívá jako indikátor stresu. Tyto pigmenty určují optické vlastnosti listů zejména v oblasti viditelného spektra. Obsah pigmentů je možné odhadnout ze spekter odrazivosti získaných spektrometrem v laboratoři nebo pomocí technik dálkového průzkumu díky metodám nebo modelům radiačního přenosu (Čepl *a kol.*, 2018).

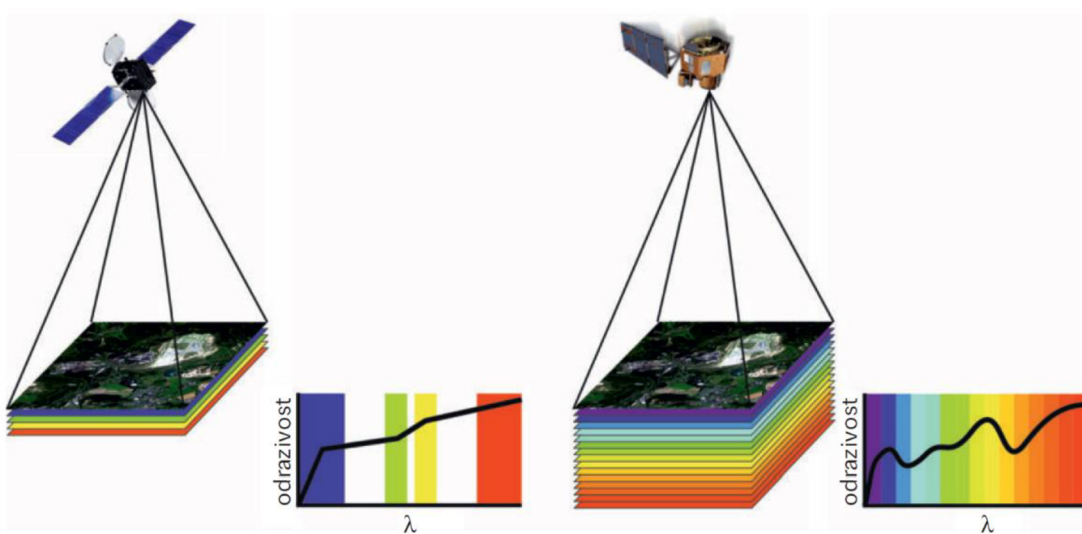
### **3.5. Spektroskopie**

Fyzikální obor spektroskopie se zabývá vznikem a vlastnostmi spekter elektromagnetického záření. Zabývá se reakcí záření se vzorkem. V laboratorní spektroskopii se k měření používají laboratorní spektrometry. To je optický přístroj, tvořený difrakční mřížkou a řadou detektorů. Difrakční mřížka rozkládá bílé světlo na jednotlivé složky. Tyto složky dopadají na jednotlivé detektory, které zaznamenávají hodnoty elektromagnetické energie na určité vlnové délce. Ze získaných dat tedy nemáme obrazový výstup, ale získáme křivky spektrální reflektance měřených objektů (Albrechtová *a kol.*, 2017).

### 3.5.1. Multispektrální a hyperspektrální data

Multispektrální zařízení dálkového průzkumu zaznamenávají odraženou nebo emitovanou energii z objektu nebo oblasti zájmu v několika širokých pásmech (oblastech) elektromagnetického spektra. Hyperspektrální zařízení už dokáží zaznamenat data ve stovkách pásem, která jsou mnohonásobně užší. Ultraspektrální zařízení dálkového průzkumu dokáží shromažďovat data dokonce z tisíců pásem (Jensen, 2014).

Multispektrální data obvykle zahrnují pouze několik spektrálních oblastí. Ty jsou poměrně široké, obvykle desítky až stovky nanometrů. Jednotlivé oblasti na sebe nenasazují, takže se mezi snímanými daty tvoří mezery. Na rozdíl od předchozích, hyperspektrální data jsou snímána v mnohem užších intervalech a mnohem častěji. Jde až o stovky pásem širokých obvykle 3–15 nm, které na sebe navazují. Při posuzování fyziologického stavu vegetace je potřeba použít hyperspektrální data (Albrechtová *a kol.*, 2017). Rozdíl multispektrálních a hyperspektrálních dat je zobrazený na obrázku 4.



Obrázek 4: Rozdíl mezi multispektrálními (vlevo) a hyperspektrálními (vpravo) daty. Zdroj: Albrechtová *a kol.* (2017).

### 3.5.2. Křivka spektrální odrazivosti

Každý materiál na světě, jako například vegetace, voda či holá půda, odrážejí různé poměry energie v modré, zelené, červené a blízké infračervené části elektromagnetického spektra. Pokud vykreslíme množství energie odražené od každého z těchto materiálů na konkrétních vlnových délkách, dostaneme křivku spektrální odrazivosti, někdy nazývanou spektrálním podpisem (Jensen, 2014).



Tato křivka ukazuje závislost odrazivosti na vlnové délce záření. Vezmeme-li v úvahu více různých povrchů jejich spektrální křivky odrazivosti nebudou nikdy stejné. Přesto se může stát, že v jednom intervalu budou odrážet stejné množství energie, tedy že se budou v tomto místě jejich spektrální křivky překrývat. V jiných intervalech se ale odražené množství energie bude lišit. Například voda a vegetace mají spektrální vlastnosti v rámci viditelného spektra podobné, výrazně se ale liší v oblasti infračerveného záření. Křivka spektrální odrazivosti se ale může lišit i u stejného povrchu v čase nebo v závislosti na stavu měřeného objektu. Příkladem může být opět vegetace. S měnícím se množstvím vody v závislosti na fenologických fázích vegetace se bude měnit i spektrální křivka odrazivosti. Měření odrazivosti se provádí pomocí spektrometru (Albrechtová *a kol.*, 2017).

### 3.5.3. Spektrální reflektance vegetace

Rostliny přizpůsobily svou vnitřní i vnější strukturu k provádění fotosyntézy. Interakce této struktury s elektromagnetickým zářením má přímý vliv na to, jak vypadají záznamy spektrální reflektance (Jensen, 2014).

Zdravá vegetace zachycuje světelný tok přímo ze Slunce nebo rozptýlené difúzní světlo ( $\Phi_i$ ) dopadající na zelený list. Tato dopadající elektromagnetická energie interaguje s pigmenty, vodou a mezibuněčnými vzduchovými prostory uvnitř listu rostliny. Množství záření odraženého od listu ( $\Phi_\rho$ ), množství záření absorbovaného listem ( $\Phi_\alpha$ ) a množství záření procházejícího listem ( $\Phi_\tau$ ) může být zjištěno pomocí rovnice energetické bilance. Obecná rovnice pro interakci spektrálního ( $\lambda$ ) toku záření s listem je:

$$\Phi_{i_\lambda} = \Phi_{\rho_\lambda} + \Phi_{\alpha_\lambda} + \Phi_{\tau_\lambda}$$

Pokud každou z proměnných vydělíme původním dopadajícím tokem záření a výraz vhodně upravíme, získáme rovnici:

$$i_\lambda = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda$$

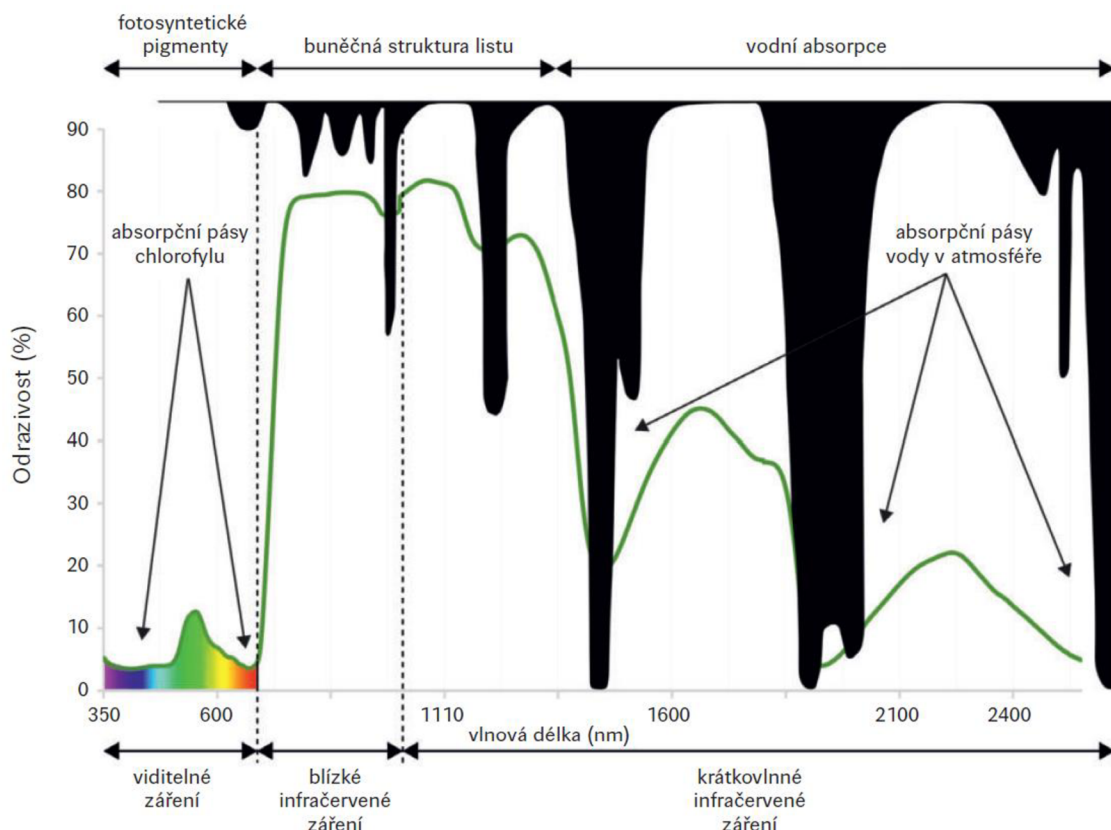
kde  $\rho_\lambda$  je spektrální hemisférická odrazivost listu,  $\alpha_\lambda$  je spektrální hemisférická absorpance a  $\tau_\lambda$  je spektrální hemisférická propustnost listu. Jelikož nás zajímá právě odražená energie, hodí se uvažovat o tomto vztahu způsobem:

$$\rho_\lambda = i_\lambda - (\alpha_\lambda + \tau_\lambda)$$

kde se energie odražená od povrchu listu rovná dopadající energii minus energie absorbovaná přímo rostlinou a množství energie propuštěné skrze list (Jensen, 2014).

Světlo opouštějící list je částečně světlo odražené od povrchu a částečně rozptýlené záření zevnitř listu. Odrazivost listu závisí na povaze jeho povrchu. Například může být zvýšena hustou pokrývkou trichomů nebo silnou vrstvou vosku. V oblasti viditelného záření listy odrážejí v průměru 6–10 % dopadajícího záření. Zelené světlo se odráží velmi silně (10–20 %), oranžové a červené světlo se odráží nejméně (3–10 %). V oblasti ultrafialového záření odrážejí listy malé množství energie (3 % a méně). Na druhou stranu záření v infračervené oblasti je odraženo při kolmém dopadu až ze 70 %. Blízké infračervené záření (NIR: 750-1350 nm) je citlivé na fyziologický stav rostliny. Změna může indikovat měnící se podmínky prostředí, poškození nebo houbové onemocnění rostliny (Larcher, 2003).

Čím větší je absorpce způsobená např. pigmenty, tím nižší bude odrazivost. Maximální absorpce chlorofylu a odpovídá 430 nm a 660 nm. Maximální absorpce chlorofylu b odpovídá 450 nm a 650 nm. Absorpce ostatních pigmentů je často maskována absorpcí chlorofylu. Například karotenoidy mají své maximum na 450 nm (Albrechtová a kol., 2017). Odrazivost zdravé vegetace lze vidět na obrázku 5.



Obrázek 5: Hlavní charakteristiky spektrální křivky odrazivosti zdravé vegetace: absorpční minima způsobená přítomností chlorofylu (chlorofyl a: 430 nm a 660 nm, chlorofyl b: 450 nm a 650 nm), absorpční pásma vody (1 400 nm, 1 900 nm a 2 700 nm), vysoká odrazivost vlivem buněčné struktury (700 nm–1300 nm). Zdroj: Albrechtová a kol. (2017).

### 3.5.4. Reflektance v oblasti červeného okraje (RED EDGE)

U zdravých listů se odrazivost v blízké infračervené oblasti dramaticky zvyšuje v oblasti 700–1200 nm. Jde o spektrální projev vegetace v oblasti blízkého infračerveného záření. NIR je typické prudkým nárůstem reflektance mezi vlnovými délkami cca 700–800 nm. Tuto oblast nazýváme červeným okrajem („RED-EDGE“). Jedná se pravděpodobně o nejvíce zkoumanou oblast spektra, jelikož má veliký význam pro hodnocení fyziologického stavu rostlin (Albrechtová *a kol.*, 2017).

Zdravý zelený list absorbuje energii nejvíce v modré a červené části spektra, jelikož toto světlo je využito v procesu fotosyntézy. Avšak hned za červeným pásmem viditelného spektra se odrazivost a propustnost listů rostlin dramaticky zvyšuje. Tento stav se vyskytuje v celém rozsahu vlnových délek blízkého infračerveného záření. Pokud by rostliny absorbovaly tuto energii se stejnou účinností jako ve viditelné oblasti, mohly by se přehřát a proteiny by mohly začít denaturovat. V důsledku toho se rostliny přizpůsobily tak, že nevyužívají toto obrovské množství blízké infračervené energie a jednoduše ji odrážejí nebo propouštějí do spodnějších listů nebo do země. Tato vysoká difúzní odrazivost blízkého infračerveného záření listy rostlin se odehrává na rozhraní buněčné stěny a vzduchu uvnitř listu (Jensen, 2014).

Změny v blízkých infračervených spektrálních vlastnostech zdravé zelené vegetace mohou poskytnout informace o stárnutí rostlin anebo stresu. Například s klesajícím množstvím vody v mezibuněčných vzdušných prostorech se zvyšuje rozptyl dopadajícího infračerveného záření na rozhraní mezibuněčných stěn. To má za následek větší odrazivost záření v oblasti středního infračerveného záření od listu. Pokud klesne relativní obsah vody v rostlině na 50 %, téměř jakákoli část viditelného, blízkého i středního infračerveného záření dokáže poskytnout cenné informace o spektrální odrazivosti. Vodní pára absorbuje NIR v rozmezí 920–980 nm, v důsledku toho se předpokládá, že optimální spektrální oblast pro snímání v NIR leží v oblasti 740–900 nm (Jensen, 2014).

Důležitá je především pozice inflexního bodu červeného okraje (REIP – „*Red-edge inflection point*“) spektrální křivky odrazivosti v této oblasti. REIP má důležitou roli při hodnocení zdravotního stavu vegetace. Používá se i při výpočtu některých vegetačních indexů. S rostoucím obsahem chlorofylu se zvětšuje i absorpční pásmo v červené oblasti. To způsobuje posun REIP do delších vlnových délek. Naopak s poklesem chlorofylu

v listu se REIP posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. To může být signálem pro končící vegetační období rostliny, špatný fyziologický stav nebo stresový stav rostliny (Albrechtová *a kol.*, 2017).

### 3.5.5. Spektrální reflektance a heritabilita

Různé rostlinné druhy a linie si vyvinuly různé funkční mechanismy pro získávání a využití zdrojů. Tyto rozdíly se odráží i v jejich spektrálních vlastnostech. Spektrální křivka je tedy vlastně souhrnným vyjádřením chemického a strukturálního složení listů. V důsledku toho můžeme předpokládat, že spektra odhalují evoluční příbuznost mezi organismy v rámci i napříč liniemi (Cavender-Bares *a kol.*, 2016).

V současné době máme pouze omezené znalosti o genetické variabilitě a vlastnostech spektrální odrazivosti u stromů vyskytujících se v lesích. Znalost obsahu pigmentů a jejich spektrálních vlastností souvisejících s  $h^2$  – dědivostí v úzkém smyslu může být pro šlechtitelské programy zásadní. Tyto vlastnosti by mohly být využity jako nepřímé identifikátory požadovaných fenotypů sloužící např. k identifikaci genotypů odolných vůči suchu nebo tolerantních vůči stresu (Čepl *a kol.*, 2018).

Jedna z mála studií zabývajících se touto problematikou se zaměřila na rod dub (*Quercus*). Byla zkoumána spektrální data (v rozsahu 400–2400 nm) listů více druhů v rámci rodu *Quercus* pomocí polních i skleníkových experimentů. Spektrální data zde významně odlišují populace v rámci druhu. Zároveň je spektrální podobnost významně spojena s fylogenetickou podobností mezi druhy. Důležitým zjištěním bylo, že se přesnost určení zvyšuje na vyšších úrovních v hierarchické organizaci rostlinné diverzity. To znamená, že se lépe rozliší klady, než druhy nebo populace. Tento vzorec podporuje evoluční vysvětlení stupně optické diferenciacce mezi rostlinami. Zároveň je zde potenciál pro vzdálenou detekci genetické a fylogenetické diverzity (Cavender-Bares *a kol.*, 2016).

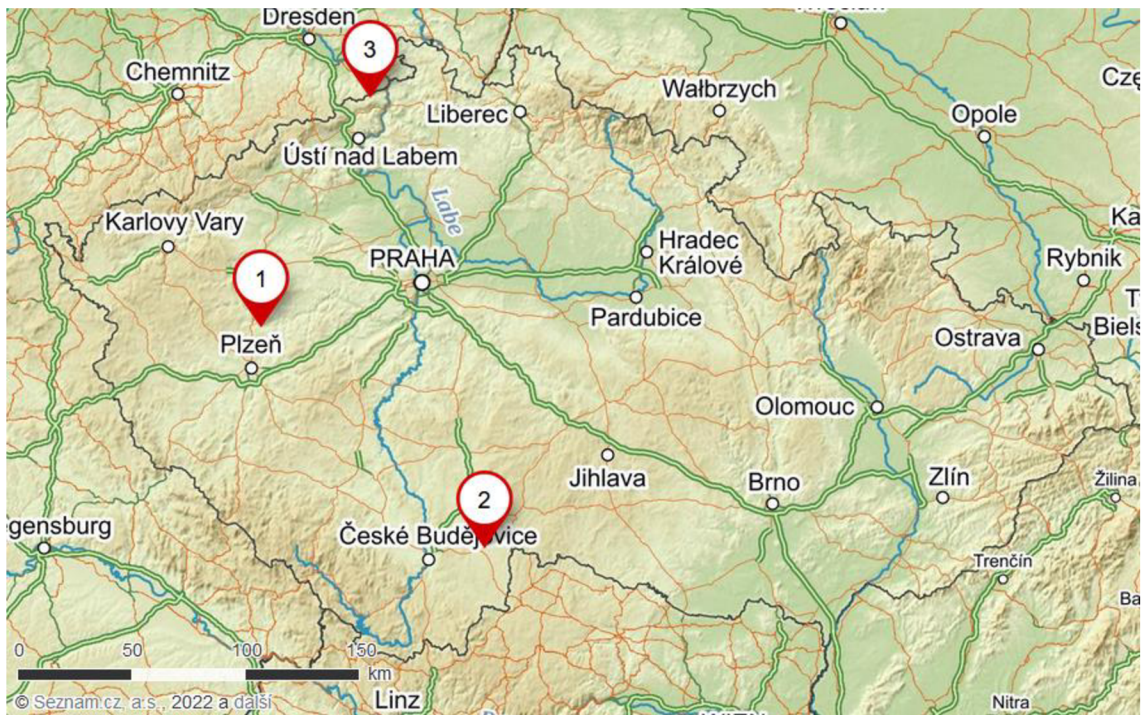
Další ze studií, pravděpodobně jediná zabývajících se jehličnatými stromy, se zaměřovala na variace dědivosti ve spektrální odrazivosti jehlic dvou populací borovice lesní, a to zejména v oblasti RED-EDGE. Byla studována strukturovaná populace borovice lesní. Rodokmen vybraných stromů byl rekonstruovaný pomocí DNA markerů. Díky tomu bylo možné fenotyp pigmentových a odrazových znaků rozložit na jednotlivé genotypové složky a odhadnout tak jejich dědivost v úzkém smyslu. Hodnota většiny indexů odrazivosti byla statisticky významná při různých vlnových délkách. Novinkou však je především odhad heritability  $h^2$  v pásmech širokých 1 nm vlnové délky v rozsahu spektra

odrazivosti 400-2500 nm. Nejvyšší odhad  $h^2$  byl nalezen v pásmu 722 nm což odpovídá REIP. Poměrně vysoké byly také hodnoty blízkého infračerveného záření (NIR) a krátkovlnné infračervené záření (SWIR). Naproti tomu všechny odhady  $h^2$  ve viditelném spektru mimo oblasti zeleného světla se blížily nule. Znalost těchto markerů založených na pigmentech nebo spektrální odrazivosti může pomoci rozpoznat odolné genotypy. Mimo to mohou být např. spektrální indexy použité jako nepřímé ukazatele konkrétních parametrů závislých na produkčních nebo adaptivních vlastnostech. Zároveň nedávný vývoj spektrálních senzorů s vysokým rozlišením nesených vzdušnými a vesmírnými zařízeními činí ze spektrálních znaků listů aktuální a moderní technologii pro masové fenotypování lesních stromů (Čepl *a kol.*, 2018).

## 4. Metodika

### 4.1. Lokality sběru osiva

Reprodukční materiál pocházel ze tří semenných sadů borovice lesní z lesních správ Plasy, Třeboň a Děčín. Místní názvy a další všeobecné informace jsou uvedeny v tabulce 1. Meteorologická data srážek a teploty pocházejí pro semenný sad LS Plasy ze stanice Kralovice (Plzeňský kraj, 449 m n. m.), pro semenný sad LS Třeboň ze stanice Třeboň (Jihočeský kraj, 428 m n. m.) a pro semenný sad LS Děčín ze stanice Sněžník (Ústecký kraj, 569 m n. m.). Jelikož zmíněné stanice neposkytují informace k průměrné době trvání slunečního svitu nebo jich velká část schází, byla použita data ze stanice Plzeň – Bolevec (Plzeňský kraj, 331 m n. m.) pro Plasy, pro Třeboň data ze stanice Jindřichův Hradec, Děbolín (Jihočeský kraj, 524 m n. m.) a pro Děčín data ze stanice Ústí nad Labem, Kočkov (Ústecký kraj, 375,39 m n. m.). Průměrné hodnoty jsou počítány z dat za posledních dvacet let. Umístění semenných sadů je zobrazeno na obrázku 6.



Obrázek 6: Poloha vybraných semenných sadů na mapě ČR. 1 - lokalita Plasy; 2 - lokalita Třeboň 3 – lokalita Děčín. Zdroj mapového podkladu: Seznam.cz (2022).

Tabulka 1: Všeobecné údaje o semenných sadech. Zdroj: vytvořeno z dat ČHMÚ (2022), Seznam.cz (2022) a Lesy České republiky, s. p.(2010).

Semenný sad	LS Plasy	LS Třeboň	LS Děčín
Evidenční číslo	79	82	165
Místní název	Doubrava	Holičkovna	Hrádek
GPS	49°54'31.343"N, 13°26'33.360"E	49°0'59.950"N, 14°49'28.821"E	50°49'8.696"N, 14°7'2.199"E
PLO	6	15b	19
SLT	3 I	0 K	5 K
LVS	2 – bukodubový	3 – dubobukový	5 – jedlobukový
Nadmořská výška [m n. m.]	385	430	465
Počet klonů	86	108	78
Rok založení	1980	1981	2003
Průměrný měsíční úhrn srážek [mm]	41,9	53,8	69,5
Průměrná denní teplota [°C]	8,9	8,8	7,5
Průměrná doba trvání slunečního svitu v roce [h]	1515,6	1736,8	1590,4

#### 4.1.1. Semenný sad LS Plasy – Doubrava

Vlastníkem semenného sadu Doubrava jsou LČR, lesní správa Plasy. Nachází se v PLO 6 – Západočeské pahorkatině. Byl založen roku 1980. Nachází se zde 86 klonů. Rozloha činí 6,48 ha a nadmořská výška je 385 m n. m. Lesní vegetační stupeň je bukodubový, průměrný roční úhrn srážek je 489 mm, průměrná roční teplota je 11,1 °C. Stromy přísluší k regionální populaci západočeské borovice v rámci pahorkatinného ekotypu.

#### 4.1.2. Semenný sad LS Třeboň – Holičkovna

Vlastníkem semenného sadu Holičkovna jsou LČR, lesní správa Třeboň. Nachází se v PLO 15b – Jihočeské pánve – část třeboňská pánev. Byl založen roku 1981. Nachází se zde 108 klonů. Rozloha činí 5,35 ha a nadmořská výška je 430 m n. m. Lesní vegetační stupeň je dubobukový, průměrný roční úhrn srážek je 623 mm, průměrná roční teplota je 11,1 °C. Jedná se o třeboňskou borovici patřící k pahorkatinnému ekotypu.



### **4.1.3. Semenný sad LS Děčín – Hrádek**

Vlastníkem semenného sadu Hrádek jsou LČR, lesní správa Děčín. Nachází se v PLO 19 – Lužická pískovcová vrchovina. Byl založen roku 2003. Nachází se zde 78 klonů. Rozloha činí 1,33 ha a nadmořská výška je 465 m n. m. Lesní vegetační stupeň je jedlobukový až smrkobukový, průměrný roční úhrn srážek je 826 mm, průměrná roční teplota je 8,9 °C. Na rozdíl od předchozích semenných sadů odpovídá borovice náhornímu ekotypu.

## **4.2. Sběr reprodukčního materiálu**

Sběr reprodukčního materiálu ze tří semenných sadů probíhal v lednu 2020. Byly sebrány šišky ze všech zastoupených klonů pomocí teleskopických nůžek. Důležitou součástí kampaně byla přesná evidence sbíraných šišek. Semenný materiál byl rozřazený podle klonální příslušnosti. Odebraný materiál byl označen štítky s čísly jednotlivých matek. Jelikož bylo opylování volné, otcovský gametický příspěvek evidován nebyl. Jedná se tedy o tzv. polosesterská potomstva, u kterých evidujeme pouze mateřský strom.

## **4.3. Arboretum Sofronka**

Získaný reprodukční materiál byl po celou dobu pěstován v arboretu Sofronka v Plzni – Bolevci. Toto arboretum bylo založeno jako pracoviště VÚLHM, jejímž zřizovatelem je Ministerstvo zemědělství České republiky.

Arboretum bylo založeno v roce 1956 Ing. Karlem Kaňákem CSc., který zde založil sbírku světového sortimentu druhů rodu *Pinus*. V roce 2009 bylo výzkumným ústavem toto pracoviště zrušeno a přešlo pod Správu veřejného statku města Plzně. Nachází se na souřadnicích 49° 47' 21" N, 13° 23' 9" E (WGS-84)

Pozemek je situován na mírném svahu s jižní expozicí s nadmořskou výškou 330–350 m n. m. Půda odpovídá permokarbonským hlinitým pískům a arkózám. Půda je minerálně chudá s žádnou, případně s velmi tenkou humusovou vrstvou. Lesní vegetační stupeň je bukodubový, soubor lesních typů odpovídá kyselému boru (Kaňák, 2016).

## **4.4. Meteorologická data**

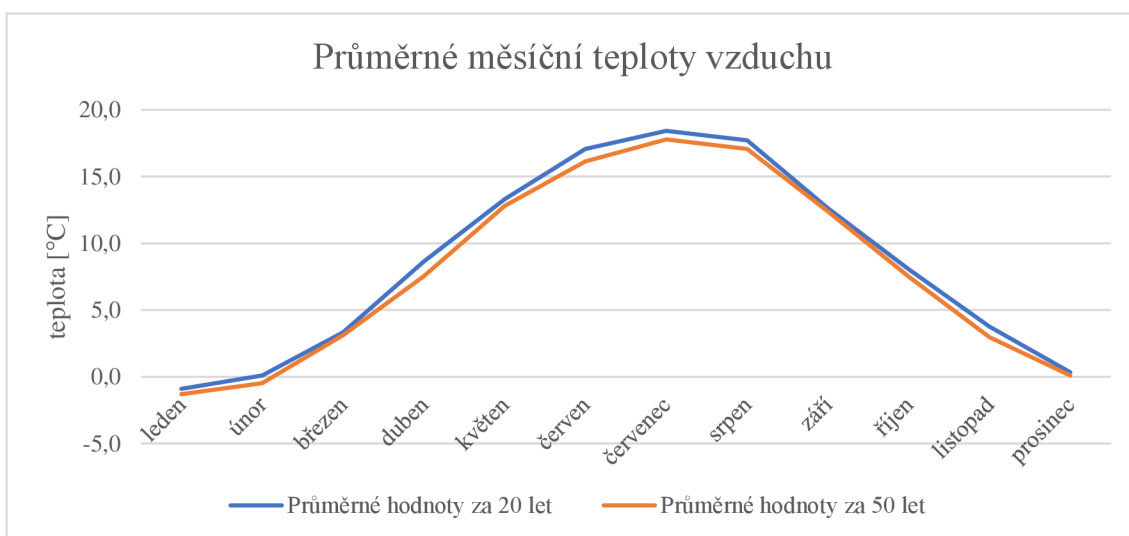
Přímo v areálu arboreta se nachází od roku 1965 meteorologická stanice pod názvem Plzeň – Bolevec (Plzeňský kraj, 331 m n. m.) Vybraná průměrná data jsou zobrazena v tabulce 2, průměry jsou spočítané z dat za posledních 20 let. Pro srovnání jsou uvedeny



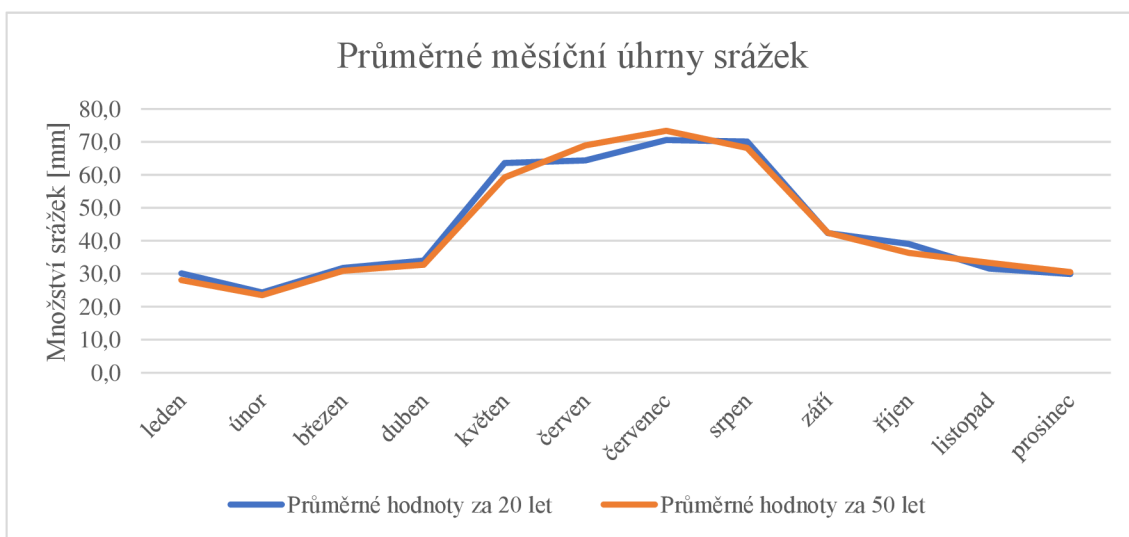
i průměrné měsíční hodnoty úhrnu srážek, teplot a doby slunečního svitu za posledních 20 a 50 let v grafech na obrázcích 7, 8 a 9.

Tabulka 2: Vybraná meteorologická data ze stanice Plzeň – Bolevec. Zdroj: ČHMÚ (2022).

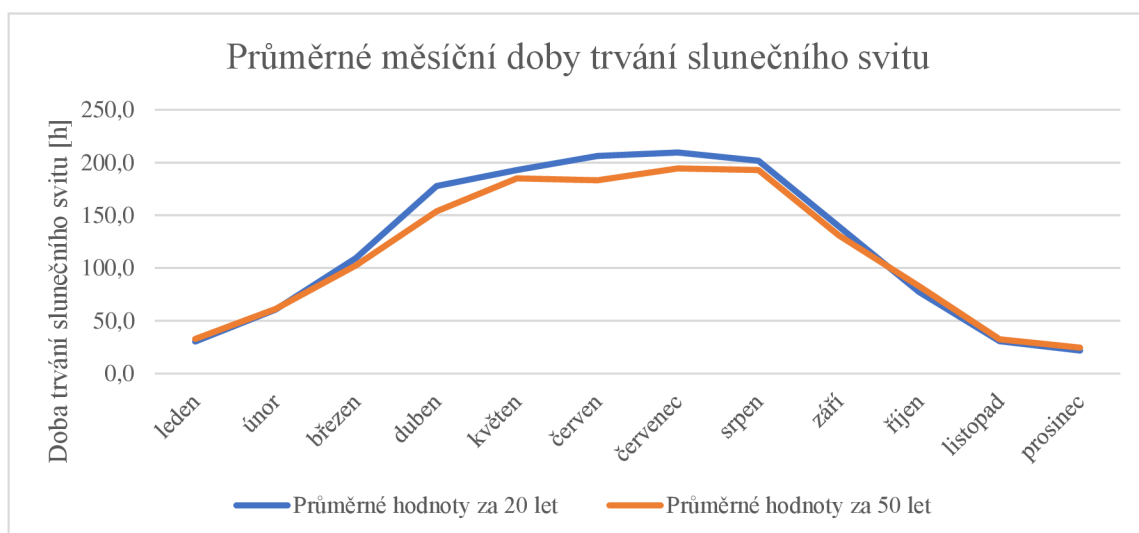
<b>Průměrná denní teplota [°C]</b>	8,5
<b>Průměrný měsíční úhrn srážek [mm]</b>	44,3
<b>Průměrný roční úhrn srážek [mm]</b>	531,9
<b>Průměrná doba trvání slunečního svitu v měsíci [h]</b>	121,5
<b>Průměrná doba trvání slunečního svitu v roce [h]</b>	1457,6



Obrázek 7: Průměrné měsíční teploty vzduchu za posledních 20 a 50 let v Arboretu Sofronka. Zdroj: vytvořeno v MS Excel z dat ČHMÚ (2022).



Obrázek 8: Průměrné měsíční úhrny srážek za posledních 20 a 50 let v Arboretu Sofronka. Zdroj: vytvořeno v MS Excel z dat ČHMÚ (2022).



Obrázek 9: Průměrné měsíční doby trvání slunečního svitu za posledních 20 a 50 let v Arboretu Sofronka. Zdroj: vytvořeno v MS Excel z dat ČHMÚ (2022).

#### 4.5. Terénní měření

Terénní měření probíhalo na konci vegetační sezóny ve dnech 7. 9. až 10. 9. 2021. Měřily se jednoleté sazenice borovice lesní. Semena pochází ze tří semenných sadů LS Plasy – Doubrava, LS Třeboň – Holičkovna a LS Děčín – Hrádek. Sazenice byly pěstovány v sadbovačích po maximálně šedesáti kusech, přičemž v jednom sadbovači se nacházely vždy pouze semenáčky z jednoho ze semenných sadů. Jedná se o tzv. polosesterská potomstva – vždy evidujeme mateřský strom. Celkem bylo změřeno 1788 sazenic, z čehož bylo 746 sazenic z Plas, 750 z Třeboně a 292 z Děčína. Měření probíhalo v Arboretu Sofronka (Plzeň), kde byly sazenice po celou dobu pěstovány.

V rámci měření byl zjištěn počet uhynulých stromků, počet živých stromků a celkový počet stromků jako součet živých a uhynulých semenáčků. Na základě těchto dat byla zjištěna mortalita, tj. celkový počet mrtvých jedinců. Míra mortality byla zjištěna jako podíl počtu mrtvých semenáčků a všech semenáčků.

Byly změřeny také výšky všech semenáčků, které se použily pro posouzení statistické odlišnosti ekotypů v oblasti růstu.

K měření byl použit spektrometr FieldSpec® 3, což je spektrometr umožňující měřit reflektanci, transmitanci, záření a ozáření. Jedná se o přístroj určený k terénním měřením viditelného, blízkého infračerveného (NIR) a krátkovlnného infračerveného (SWIR) spektra. Rozpětí měřeného spektra je 350–2500 nm a doba skenování 0,1 sekundy poskytuje přesný průměr každou sekundu. Součástí vybavení spektrometru byl ovladač

přístroje: přenosný laptop, software RS<sup>3</sup>, optický kabel a kontaktní sonda Plant Probe A122317 (ASD Inc. 2010) s vlastním zdrojem světla o teplotě 2900 K.

Měření probíhalo přímo v arboretu. Abychom znáhodnili časy měření mezi sledovanými potomstvy a populacemi, střídavě jsme snímali sadbovače z různých sadů. Měřené byly pouze živé semenáčky. Pořadí měření sadbovačů a semenáčků je znázorněno v příloze 1. Všechny sazenice byly měřené dvěma metodami:

- a) pouze optickým kabelem
- b) kontaktní sondou s vlastním zdrojem světla

#### 4.5.1. Měření optickým kabelem

Měření optickým kabelem probíhalo ve dnech 7. 9. a 8. 9. 2021. Tato metoda je závislá na počasí a stálosti osvětlení sazenic, jelikož optický kabel nemá vlastní zdroj světla. Aby se eliminovala odrazivost půdy, na kmínky sazenic jsme nasazovali šablony z černého papíru. Optická sonda se namířila ze shora tak, aby mířila na vrcholový pupen sazenice. Vzdálenost sondy od semenáčku odpovídala přibližně 5 cm. Úhel měření optickým kabelem byl 5°, takže předpokládaný poměr smíšených pixelů byl efektivně minimalizován. Počet snímků pro vytvoření průměrné hodnoty byl nastavený na 50. Když se hodnoty viditelné na laptopu ustálily, došlo k uložení daného měření. Souběžně s měřením probíhala i podrobná evidence dat do polního zápisníku, aby se tato metoda dala následně bezchybně spárovat s výsledky měření kontaktní sondy. Vzhledem k závislosti na vnějším osvětlení se prováděla přibližně po každých 10 měřeních normalizace vzhledem k bílé referenci – téměř 100% odrazivému materiálu. Fotografie z měření jsou na obrázcích 10 a 11.



Obrázek 10: Pracovní plocha se spektrometrem FieldSpec® 3. Na něm se nachází bílá reference.



Obrázek 11: Prostor pěstování a měření semenáčků v arboretu.

#### **4.5.2. Měření kontaktní sondy s vlastním zdrojem světla**

Měření touto metodou probíhalo ve dnech 9. 9. a 10. 9. 2021. Jelikož má kontaktní sonda vlastní zdroj světla, nebylo toto měření natolik závislé na vnějších podmínkách. Aby se ovlivnění vnějším světlem dále eliminovalo, přenášeli jsme sadbovače do přilehlého skleníku. Sazenice byly měřeny ve stejném pořadí jako v předchozí metodě, aby se dala data přesně spárovat. Měření probíhalo tak, že se ze strany sazenice přiložila černá destička s téměř nulovou odrazivostí a následně se přiložila (s mírným přtlakem) kontaktní sonda. Jehlice mezi sondou a destičkou byly uspořádány tak, aby zabíraly co největší snímanou plochu. Poté, co se hodnoty viditelné na obrazovce laptopu v reálném čase ustálily, data byla uložena. Aby nedošlo k přehřátí jehlic kvůli světelnému zdroji sondy, byl počet skenování k vytvoření průměrné hodnoty nastaven na 25 snímků, doba měření se tak úměrně riziku zkrátila.

Po ukončení obou metod měření se data uložená v textových souborech *.txt* dále zpracovala v programu *MS Excel*. Zde se k naměřeným vlnovým délkám přiřadily souřadnice podle uspořádání jednotlivých sazenic v sadbovačích (*ID*), dále pak číslo matky (*MUM*), semenný sad, odkud pochází (*SITE*), řada (*ROW*) a sloupec (*COLUMN*) pro určení souřadnic. Mapa živých a mrtvých semenáčků je uvedena v příloze 2.

#### **4.5.3. Meteorologické podmínky při měření**

Měření reflektance sazenic je do značné míry závislé na aktuálním počasí. U měření kontaktní sondou s vlastním zdrojem světla je vliv počasí omezený, zvláště pak pokud měříme v zastíněném prostoru. Naopak u měření optickým kabelem jsou výsledky na počasí závislé. Při změně osvitů sazenic je potřeba provést okamžitě normalizaci vzhledem k bílé referenci. Měření optickým kabelem probíhalo ve dnech 7. a 8. 9. 2021. Měření kontaktní sondou probíhalo ve dnech 9. a 10. 9. 2021. Vybraná meteorologická data ze dní měření jsou uvedena v tabulce 3. Uvedená data pochází z meteorologické stanice Plzeň – Bolevec, která se nachází přímo v areálu arboreta (Plzeňský kraj, 331 m n. m.).

Tabulka 3: Vybraná meteorologická data ze dnů měření, stanice Plzeň – Bolevec. Zdroj: ČHMÚ (2022).

	7. 9.	8. 9.	9. 9.	10. 9.
<b>Průměrná teplota vzduchu [°C]</b>	16,2	15,1	15,8	16,7
<b>Maximální teplota vzduchu [°C]</b>	26,2	26,0	27,8	28,7
<b>Minimální teplota vzduchu [°C]</b>	9,8	8,7	6,0	10,0
<b>Denní úhrn srážek [mm]</b>	0	0	0	0,7
<b>Průměrná relativní vlhkost vzduchu [%]</b>	78,3	73,3	74,7	82,0
<b>Denní úhrn doby trvání slunečního svitu [h]</b>	1,9	9,7	9,3	6,6
<b>Oblačnost [1–10]</b>	6,3	0,0	0,0	6,3

## 4.6. Statistická analýza dat

Zpracování naměřených dat bylo provedeno pomocí popisné a matematické statistiky. K analýze byl použitý Waldův test (modifikovaný F-test; součástí hodnocení ASReml), párový t-test, mnohonásobné porovnávání, analýza hlavních komponent a model random forest. Pro statistickou analýzu byly použity programy MS Excel, software RStudio a jeho datové balíčky ASReml a randomForest. Pomocí těchto programů byly také vytvořeny použité grafy.

### 4.6.1. Popisná statistika

Popisná (deskriptivní) statistika popisuje soubor dat, který je často ve své původní podobě příliš velký. Pro vyvozování závěrů není takový soubor dat vhodný a prostý výpis hodnot je pak zcela nepřehledný. Data tedy redukuje do menšího počtu ukazatelů, které lze snáze interpretovat (Anděl, 1998).

Ukazatele popisné statistiky byly vypočteny v programu MS Excel. Byly použité pro srovnání výšek ekotypů. Použité statistické ukazatele a vzorce pro jejich výpočet:

#### 4.6.1.1. Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

#### 4.6.1.2. Rozptyl

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

#### 4.6.1.3. Směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

#### 4.6.2. Matematická statistika

Matematická statistika se zabývá metodami pro sběr, analýzu a interpretaci kvantitativních dat. V rámci matematické statistiky se používá teorie pravděpodobnosti k hodnocení spolehlivosti závěrů na základě dat. Teorie pravděpodobnosti je tedy základem matematické statistiky (Sahoo, 2015).

##### 4.6.2.1. Párový t-test

Tento test se používá u závislých výběrů – u párových měření. Typickým příkladem může být posouzení shodnosti výsledků měření za použití různých měřících metod. Výsledkem takového měření jsou páry závislých pozorování. Místo testování shodnosti rozptýlů a středních hodnot lze v páru tyto hodnoty od sebe odečíst a získat tak jedinou hodnotu. Pak lze testovat hypotézu  $H_0: \mu_d = 0$ . Testové kritérium, které porovnáme s kritickými hodnotami z tabulky bude mít následující tvar:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d} \sqrt{n}$$

kde aritmetický průměr  $\bar{d}$  a směrodatná odchylka  $s_d$  jsou spočítány ze souboru diferencí z původních hodnot (Svatošová a Kába, 2007).

Párový t-test byl použitý ke srovnání metod měření. Aplikace testu proběhla v softwaru RStudio.

#### 4.6.3. ASReml

ASReml je statistický software, který pracuje se smíšenými lineárními modely, které používají metodu maximální věrohodnosti (REML). Smíšené lineární modely mohou být vhodným nástrojem pro analýzu dat ze zemědělských, biologických, medicínských nebo environmentálních studií. Smíšený lineární model pracuje zároveň s fixními i s náhodnými efekty/faktory. Zpracování fixních efektů (v našem konkrétním využití se jedná o faktor ekotypu) je víceméně analogií analýzy rozptylu a interpretace je prakticky

identická. Signifikanci rozdílu v rámci fixního efektu ekotypu zde posuzuje tzv. Waldův test (Gilmour *a kol.*, 2009).

Mnohonásobné porovnání bylo realizováno specifickým kódem v RStudiu, který nám poskytnul Salvador Gezan, (2020). Jednalo se o specifickou formu *post hoc* testu, kdy jsou p-hodnoty počítány na základě plovoucí hodnoty Least Significant Difference.

#### **4.6.4. Random forest (RF)**

Random forest je typ skupinového modelu. Využívá se pro soubory s velkým množstvím prediktorů a dobře funguje i na malých datových souborech. Mimo klasifikaci a predikci dokáže RF řešit problémy jako jsou měření významnosti proměnných, efekt proměnných na predikci, shlukování nebo detekce odlehlých hodnot (Komprdová, 2012). Datový soubor se dělí na trénovací a testovací vzorky. Trénovací soubory mají tzv. bootstrapový výběr, jedná se o náhodné výběry s opakováním. Tímto způsobem se po každém výběru nesnižuje původní velikost souboru, a proto je metoda vhodná i pro malé datové soubory. Model RF se skládá ze souboru rozhodovacích stromů. Každý ze stromů je konstruován výběrem z trénovacích souborů. Vzhledem k výběrům s opakováním budou výsledné stromy korelované. Aby se tomu zabránilo, vybírá se pouze určitý počet prediktorů. Random forest tedy používá náhodný výběr pozorování i prediktorů (Cao *a kol.*, 2016). Z takto generovaných stromů získáme informaci o zařazení každého pozorování do výsledné kategorie. Při klasifikaci se výsledek určí hlasováním všech stromů, při regresi je predikce průměrem ze všech stromů (Komprdová, 2012).

Model RF byl použitý k predikci příslušnosti k ekotypu na základě reflektance. Aplikace modelu proběhla v softwaru RStudio s využitím balíčku randomForest.

#### **4.6.5. Analýza hlavních komponent**

Analýza hlavních komponent je metoda, která se používá ke snížení rozměrů souboru dat nebo k odstranění korelace mezi daty. Jde o snížení počtu proměnných, tak, aby většina informace zůstala zachována. Snížení počtu proměnných ubírá na přesnosti dat, ale takto upravené soubory se lépe analyzují a zobrazují (Jaadi, 2021). V rámci naměřených dat jsou rozptýly některých proměnných velké a některé menší. Nejprve je vynesena vektor podle delší osy mračna bodů, tedy souběžně s největším rozptylem. Následně je kolmo na předchozí vektor vynesena druhý, který je v pravém úhlu k prvnímu vektoru. Oba vektory prochází těžištěm dat. Jakmile jsou tyto vektory vytvořené, je možné najít souřadnice všech datových bodů vzhledem k vytvořeným vektorům. Soustava se nám tak

vlastně pootočí a vektor procházející delší osou bodů bude představovat osu x. Proces nezměnil prostorové vztahy bodů, zároveň jsou naše nové osy nekorelované. U souborů dat s mnoha proměnnými můžeme ignorovat osy malým rozptylem, což vede ke snížení dimenzí. Jeden soubor dat tedy může začínat s třiceti původními proměnnými, ale nakonec mu ponecháme pouze dvě nebo tři smysluplné osy. Ty jsou označovány jako hlavní komponenty (Holland, 2019).

Analýza hlavních komponent byla využita ke dvourozměrnému zobrazení rozdílů mezi hyperspektrálními daty naměřenými oběma zmíněnými metodami a daty standardizovanými pomocí algoritmu PDS („*Piecewise Direct Standardization*“). Analýza byla provedena v softwaru RStudio.

#### **4.7. Standardizace dat naměřených optickým kabelem na kontaktní sondu**

Pro standardizaci dat, která sloužila k propojení metod optického kabelu a kontaktní sondy byl použit algoritmus PDS, který navrhli Wang *a kol.*, (1991). Tato metoda slouží k přenosu dat z jednoho přístroje do druhého, případně ke standardizaci dat jednoho způsobu měření na druhý způsob měření (Guillaume, 2018).

Měření kontaktní sondou bylo zvažováno jako cílová kvalita měření. Následně byla spektra kontaktní sondy porovnána se standardizovaným spektrálním produktem. Ke standardizaci byl použit software RStudio.



## 5. Výsledky

### 5.1. Porovnání ekotypů

#### 5.1.1. Porovnání ekotypů na základě růstových parametrů a mortality

Tabulka 4: Výsledky popisné statistiky pro výšky dle ekotypů.

	Aritmetický průměr	Rozptyl	Směrodatná odchylka
<b>Plasy</b>	49,79	91,85	9,58
<b>Třeboň</b>	51,42	107,29	10,36
<b>Děčín</b>	47,19	109,17	10,45

V tabulce 4 vidíme výsledky popisné statistiky podle ekotypů. Průměrně je nejvyšší ekotyp z Plas. Největší rozptyl výšek má ekotyp z Děčína.

Tabulka 5: Výsledky Waldova testu pro výšky semenáčků.

Stupně volnosti	Součet čtverců	Waldova statistika	Pr ( $X^2$ )
2	2874	28,4	$6,78 \times 10^{-7}$

V tabulce 5 vidíme výsledek Waldova testu pro výšky semenáčků. P-hodnota, označená v tabulce jako Pr ( $X^2$ ), je výrazně nižší než hodnota 0,05. Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  můžeme hypotézu o shodných průměrech výšek všech ekotypů zamítnout.

Tabulka 6: Výsledky mnohonásobného porovnávání srovnávacího populace mezi sebou.

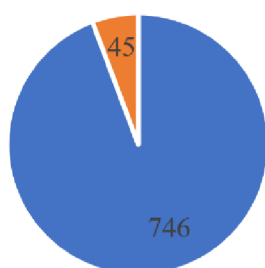
Porovnání	Rozdíl	Std. rozdíl	t-hodnota	p-hodnota
<b>Děčín Plasy</b>	-3.131443	0.9002729	-3,478327	$2,78 \times 10^{-4}$
<b>Děčín Třeboň</b>	-4.726938	0.8875039	-5,326104	$8,16 \times 10^{-8}$
<b>Plasy Třeboň</b>	-1.595495	0.7173231	-2,224234	$1,33 \times 10^{-2}$

Pro vzájemné srovnání výšek jednotlivých ekotypů bylo použito mnohonásobné porovnávání. Výsledky vidíme v tabulce 6. Všechny tři p-hodnoty nedosahují hodnoty 0,05, takže hypotézu o shodných průměrech naměřených výšek můžeme zamítnout. Na výsledcích je vidět větší rozdíl mezi náhorním ekotypem z Děčína a pahorkatinnými ekotypy z Plas a Třeboně.

Tabulka 7: Mortalita a míra mortality dle jednotlivých ekotypů.

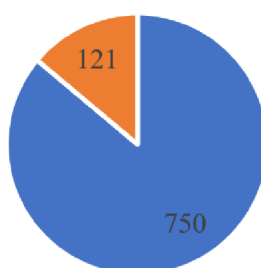
	Původní počet	Mortalita	Míra mortality
<b>Plasy</b>	791	45	0,057
<b>Třeboň</b>	871	121	0,139
<b>Děčín</b>	409	117	0,286
<b>Celkem</b>	2071	283	0,137

Mortalita Plasy



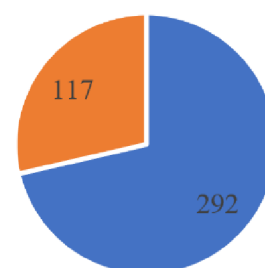
- Živé semenáčky
- Mrtvé semenáčky

Mortalita Třeboň



- Živé semenáčky
- Mrtvé semenáčky

Mortalita Děčín



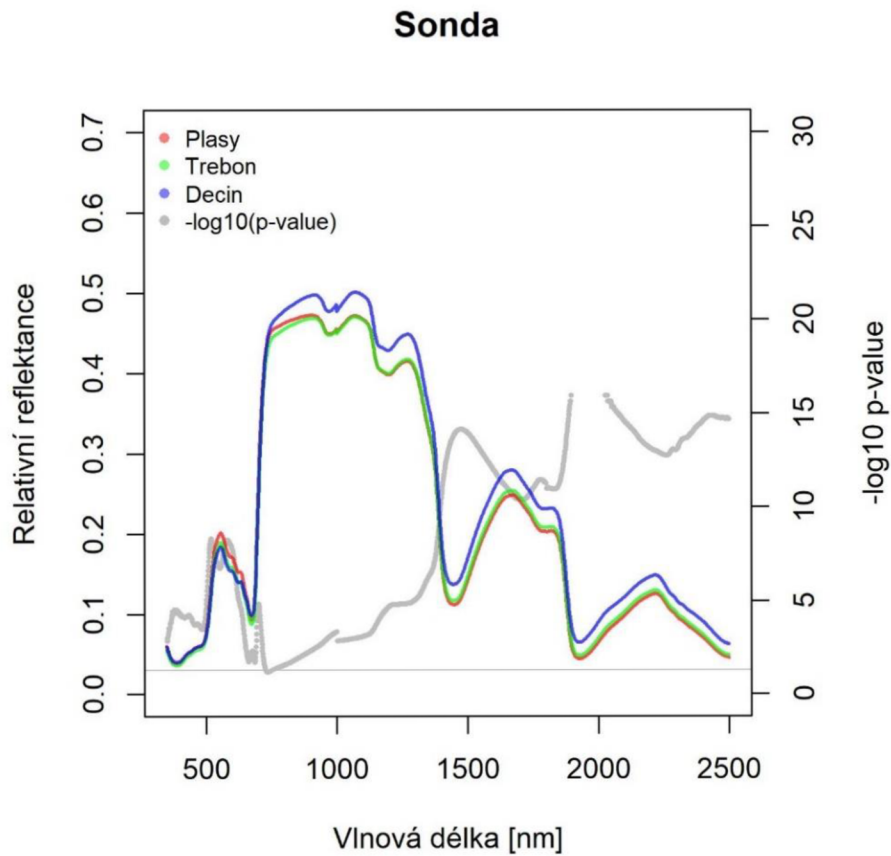
- Živé semenáčky
- Mrtvé semenáčky

Obrázek 12: Poměr živých a mrtvých semenáčků podle ekotypů.

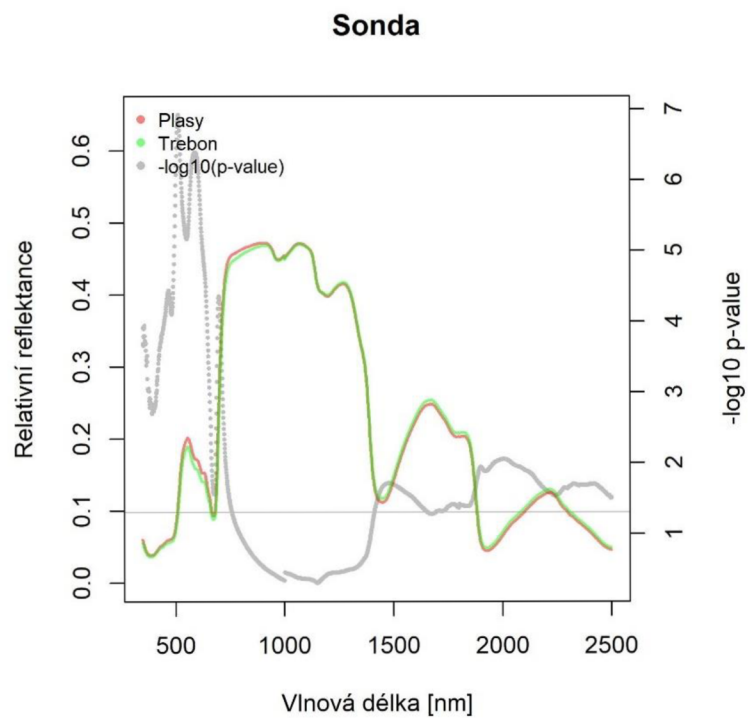
Tabulka 7 a obrázek 12 nám ukazují mortalitu a míru mortality podle ekotypů. Z výsledků je patrné, že nejvyšší míra mortality se projevila u populace z Děčína. Zde odumřelo téměř 30 % semenáčků. Naopak nejmenší míra mortality se vyskytovala mezi semenáčky z Plas. Zde dosahovala necelých 6 %.

### 5.1.2. Porovnání ekotypů na základě měření kontaktní sondou

Obrázek 13 nám ukazuje průměrné hodnoty reflektance podle příslušnosti k semenným sadům naměřené metodou využívající kontaktní sondu. Průměrné hodnoty z jednotlivých sadů vytvářejí spektrální křivky odrazivosti. Šedá křivka představuje zlogaritmovanou p-hodnotu. Ukazuje nám oblasti spektra, ve kterých se semenáčky z alespoň jednoho semenného sadu statisticky liší. Pokud se šedá křivka nachází nad vodorovnou ryskou, je rozdíl statisticky významný na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

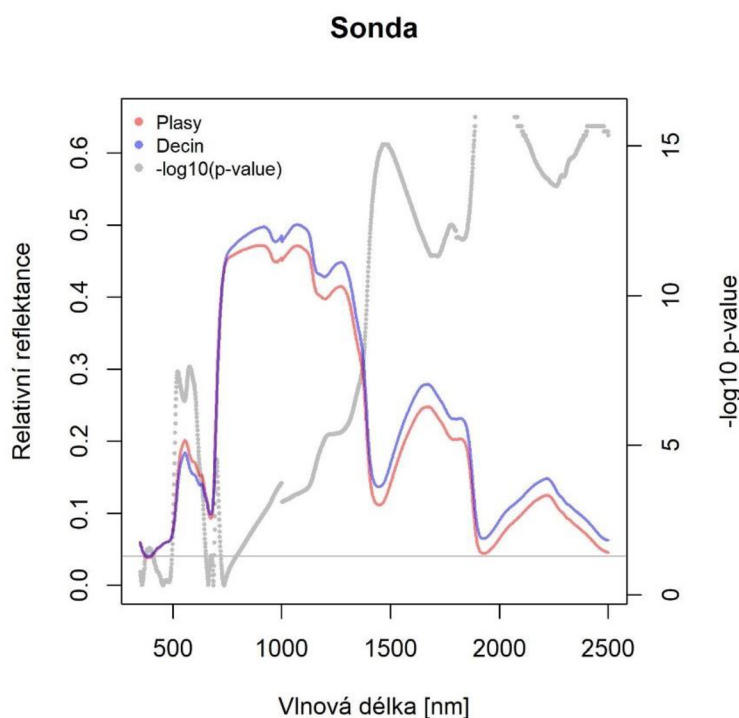


Obrázek 13: Průměrná reflektance jehlic semenáčků podle semenných sadů, měřeno sondou.



Obrázek 14: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Třeboně, měřeno sondou.

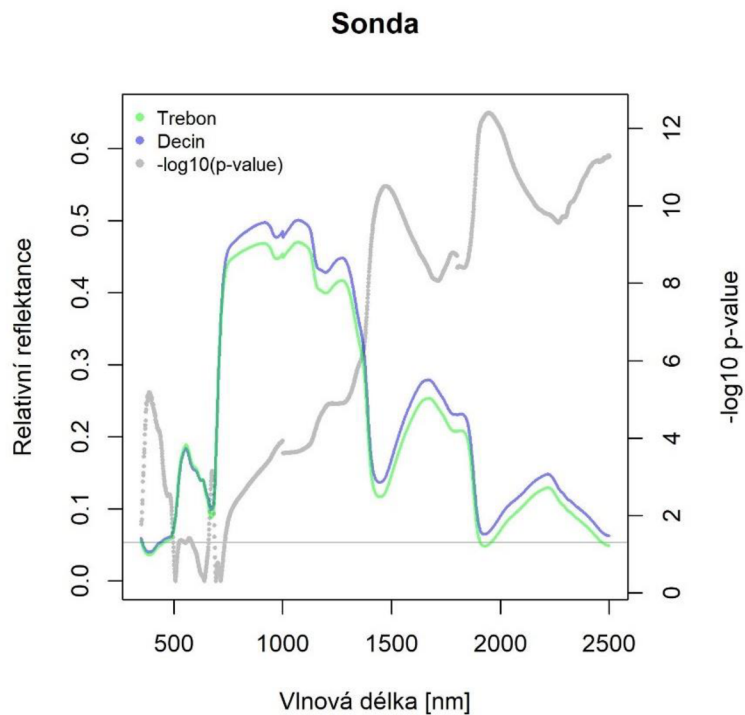
Z obrázku 14 je patrné srovnání průměrné reflektance ekotypů z Plas a Třeboně. Šedá křivka ukazuje statistický rozdíl mezi oběma ekotypy. Pokud se nachází pod vodorovnou křivkou, není rozdíl statisticky významný. Tyto dva ekotypy se tedy podle této metody liší v oblasti viditelného spektra a v oblasti SWIR. Je zde také patrná rozdílnost v oblasti RED-EDGE. V oblasti NIR jsou rozdíly statisticky nevýznamné.



Obrázek 15: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Děčína, měřeno sondou.

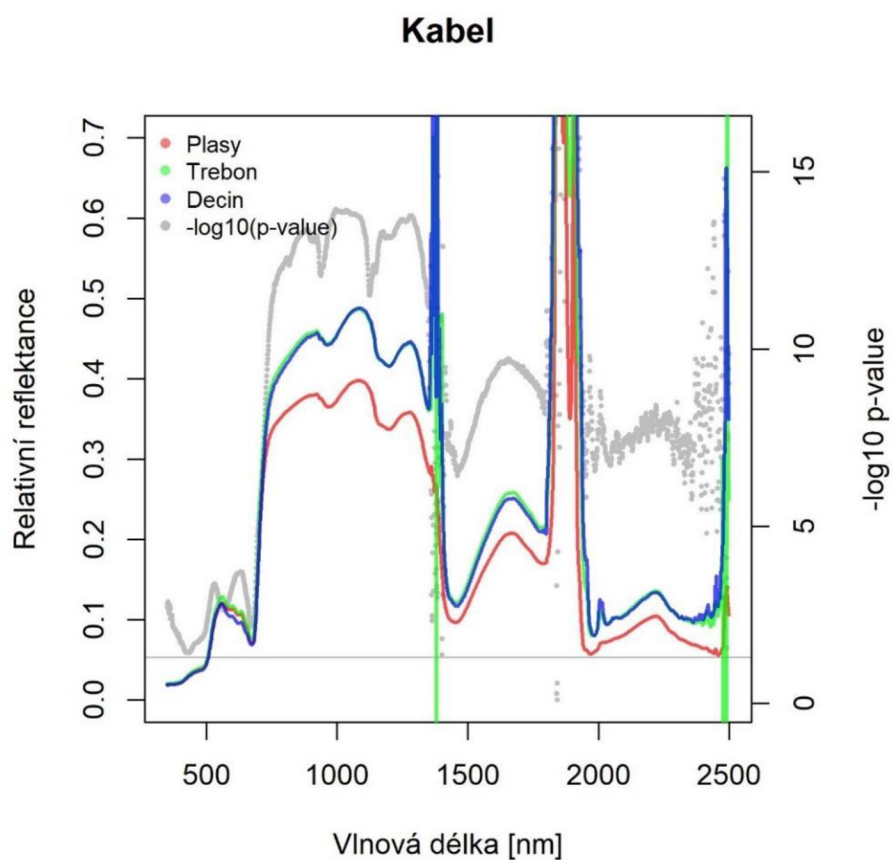
Obrázek 15 ilustruje rozdíly v průměrné reflektanci ekotypů z Plas a Děčína. Šedá křivka opět ukazuje statistický rozdíl mezi oběma ekotypy. Tyto dva ekotypy se tedy podle této metody liší téměř v celé oblasti měřeného spektra.

Z obrázku 16 můžeme odečíst rozdíly průměrné reflektance ekotypů z Třeboně a Děčína. Šedá křivka opět ukazuje statistický rozdíl mezi oběma ekotypy. Průměrná reflektance těchto dvou ekotypů je statisticky shodná v oblasti odrazivosti fotosyntetických pigmentů. V oblasti NIR a SWIR je reflektance těchto dvou ekotypů statisticky odlišná.



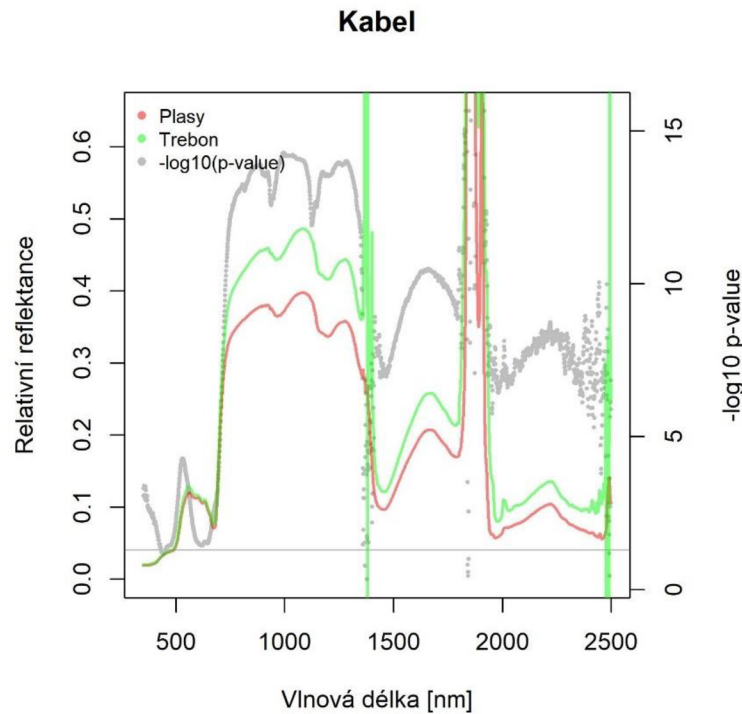
Obrázek 16: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Třeboně a Děčína, měřeno sondou.

### 5.1.3. Porovnání ekotypů na základě optického kabelu



Obrázek 17: Průměrná reflektance jehlic semenáčků podle semenných sadů, měřeno opt. kabelem.

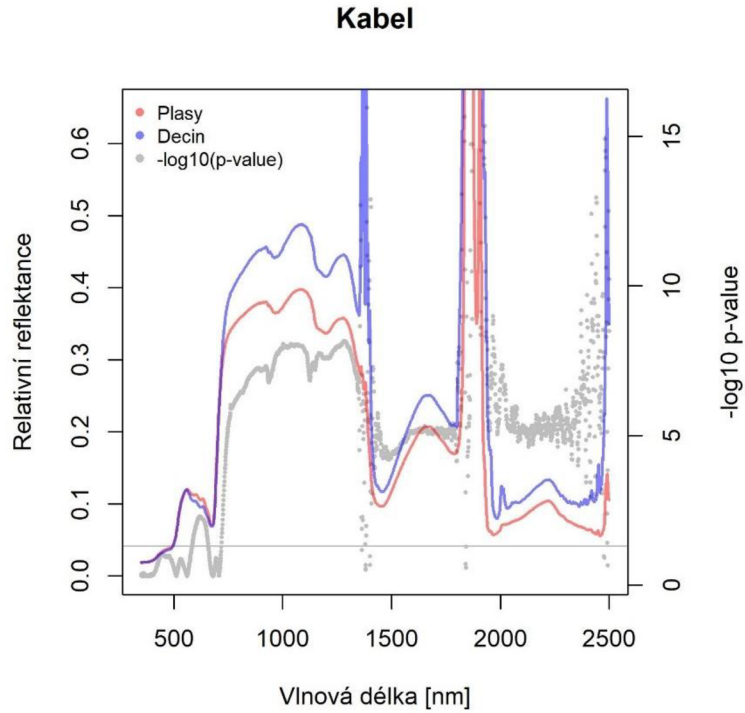
Obrázek 17 zobrazuje průměrné hodnoty reflektance podle příslušnosti k semenným sadům naměřené metodou využívající optický kabel. Průměrné hodnoty z jednotlivých sadů vytvářejí spektrální křivky odrazivosti. Šedá křivka představuje zlogaritmovanou p-hodnotu. Ukazuje nám oblasti spektra, ve kterých se semenáčky z alespoň jednoho semenného sadu statisticky liší. Pokud se šedá křivka nachází nad vodorovnou rýskou, je rozdíl s pravděpodobností 95 % statisticky významný.



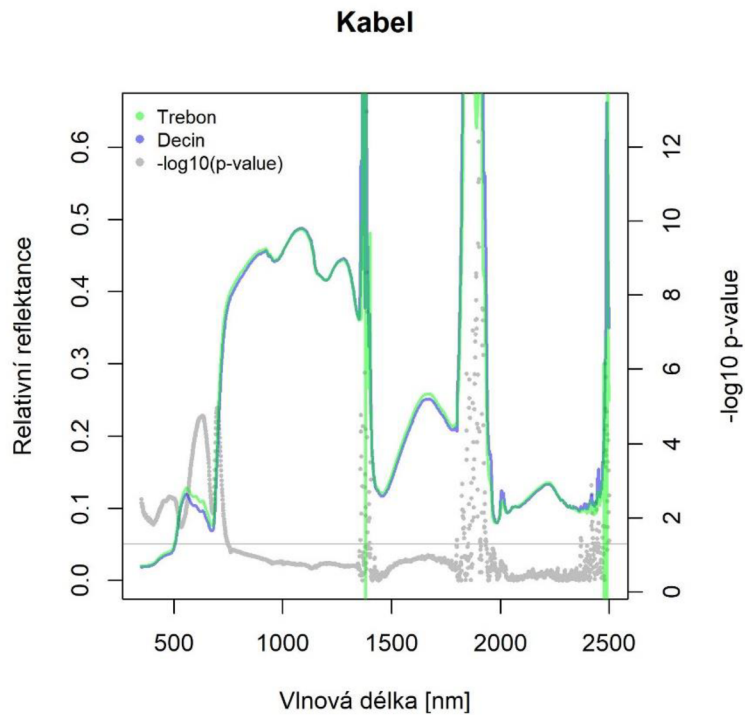
Obrázek 18: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Třeboně, měřeno opt. kabelem.

Na obrázku 18 vidíme srovnání průměrné reflektance ekotypů z Plas a Třeboně. Jako na předchozích obrázcích ukazuje šedá křivka statistický rozdíl mezi oběma ekotypy. Pokud se nachází pod vodorovnou rýskou, není rozdíl statisticky významný. Rozdílnost těchto dvou ekotypů je statisticky významná přibližně pro zelenou oblast viditelného spektra a celé oblasti NIR a SWIR.

Obrázek 19 nám ukazuje rozdílnost mezi reflektancemi ekotypů z Plas a Děčína. Statisticky významnou rozdílnost můžeme pozorovat v oblastech NIR a SWIR. V rámci viditelného spektra jsou ekotypy odlišné v rámci červené oblasti.



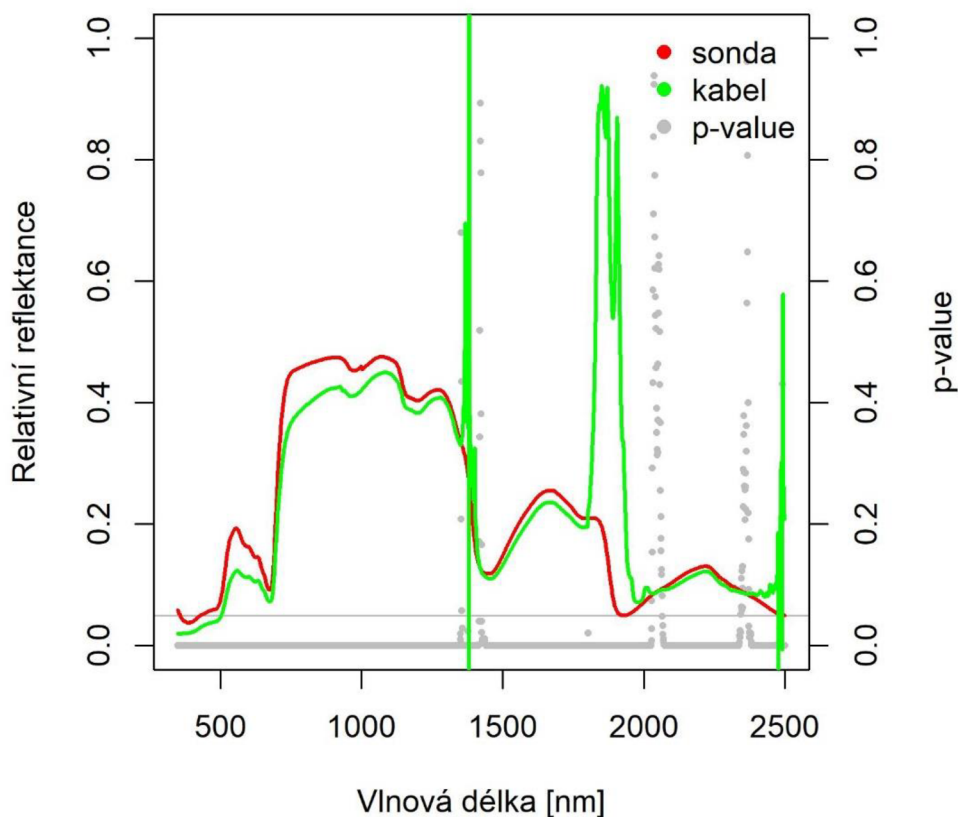
Obrázek 19: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Plas a Děčína, měřeno opt. kabelem.



Obrázek 20: Porovnání průměrné reflektance semenáčků z Třeboně a Děčína, měřeno opt. kabelem.

Obrázek 20 nám ukazuje rozdílnost reflektancí ekotypů z Třeboně a Děčína. Statisticky rozdílné jsou tyto ekotypy v oblasti viditelného spektra VIS a oblasti RED-EDGE. V oblastech NIR a SWIR není rozdílnost významná.

## 5.2. Porovnání metod



Obrázek 21: Srovnání průměrných hodnot změřených kontaktní sondou a optickým kabelem.

Na obrázku 21 vidíme spektrální křivky vytvořené zprůměrováním všech měření pomocí kontaktní sondy a optického kabelu. Šedá křivka určuje statistickou rozdílnost mezi oběma spektrálními křivkami. Jelikož není p-hodnota zlogaritmována, šedá křivka ukazuje statisticky významnou odlišnost, pokud se nachází pod vodorovnou rýskou. Z obrázku je tedy patrné, že se metody odlišují v rámci celého měřeného spektra.

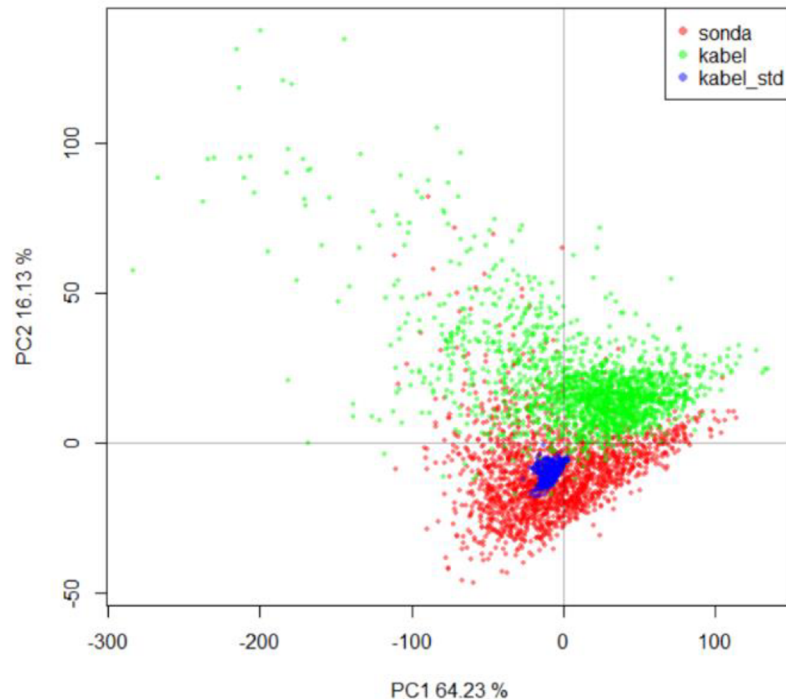
Pokud porovnáme dříve zmíněné obrázky 14 a 18, tedy srovnání reflektance vzorků z Plas a Děčína, je zde patrný rozdíl. Kabel oproti sondě zaznamenává statisticky významné rozdíly v oblasti NIR. V rámci celého VIS, a zvláště v červené oblasti, zase nachází markantnější statistické rozdíly kontaktní sonda.

Při srovnání obrázků 15 a 19, což je porovnání reflektancí z Plas a Děčína, najdeme největší rozdíly v rámci VIS. Kontaktní sonda opět zaznamenává větší rozdíly v této oblasti. U optického kabelu je rozdíl v této oblasti z velké části statisticky nevýznamný. Podstatný rozdíl je také v oblasti RED-EDGE. U kontaktní sondy se zde reflektance statisticky liší, zatímco u optického kabelu rozdíl nedosahuje p-hodnoty.



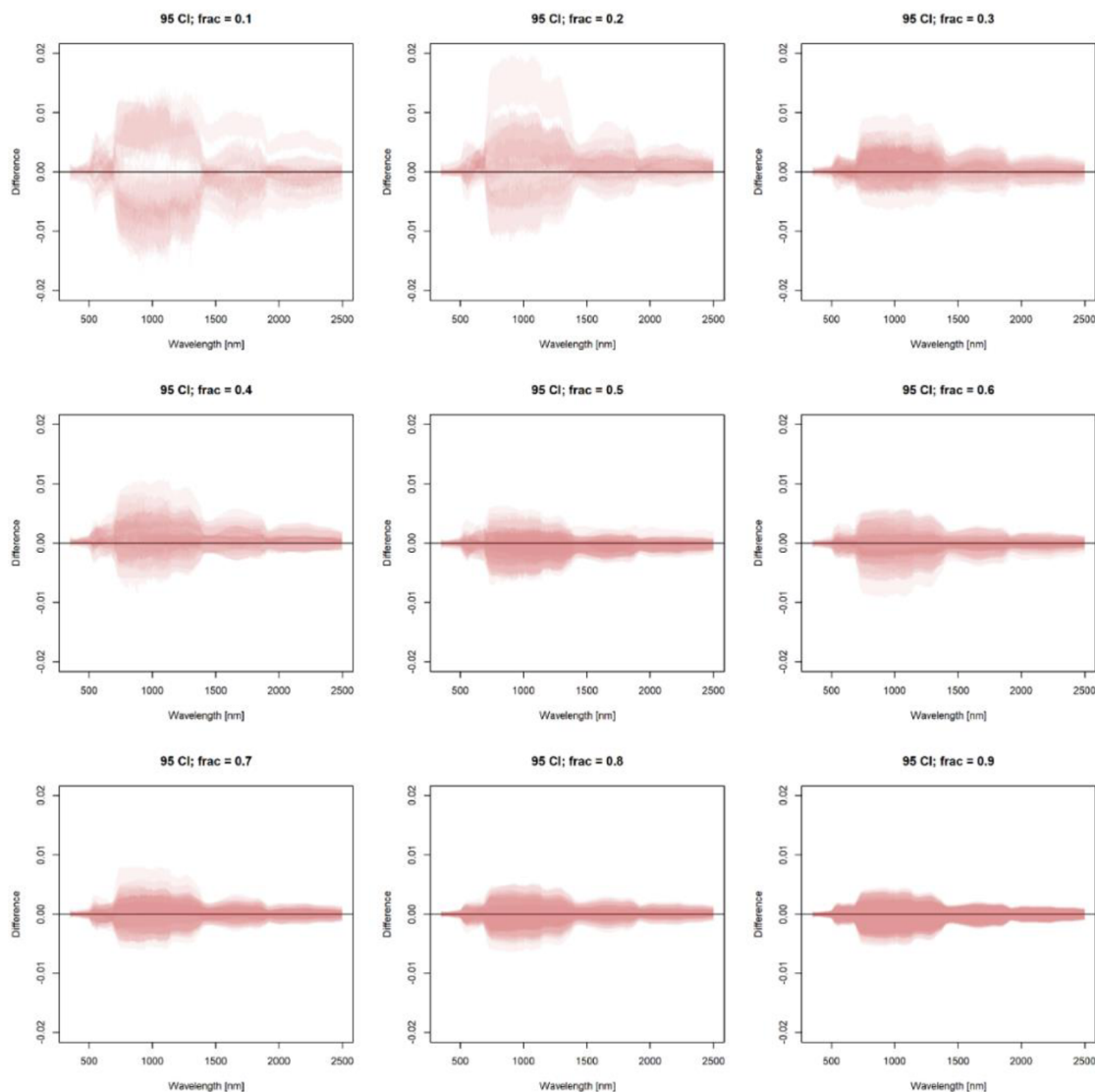
I při srovnání statistické rozdílnosti reflektance vzorků z Třeboně a Děčína na obrázcích 16 a 20 jsou patrné odlišnosti. Metoda využívající optický kabel nachází statisticky významnou odlišnost pouze v oblasti VIS a v oblasti RED-EDGE. Metoda využívající kontaktní sondu naopak nachází statisticky významnou odlišnost v celém měřeném spektru mimo oblast reflektance fotosyntetických pigmentů.

### 5.3. Propojení obou metod algoritmem



Obrázek 22: Vliv standardizace na data naměřená optickým kabelem.

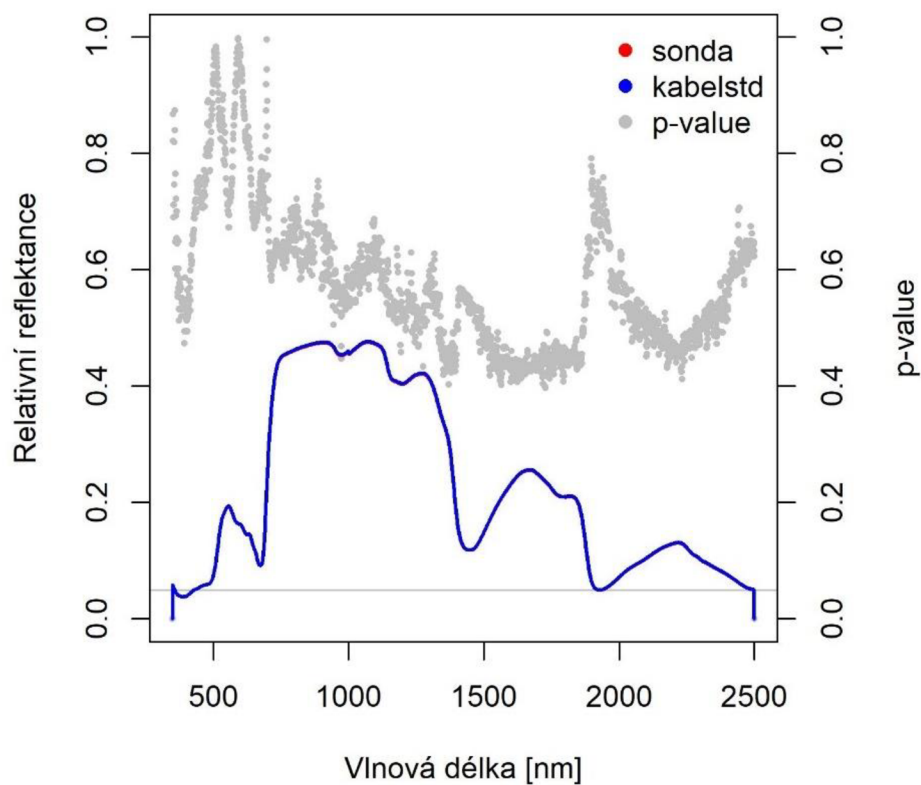
Na obrázku 22 vidíme dvourozměrně zobrazená data naměřená pomocí kontaktní sondy (červená barva) a optického kabelu (zelená barva). Modrá barva označuje polohu standardizovaných dat naměřených optickým kabelem vzhledem k původním měřením. Je patrné, že po standardizaci se optický kabel klastruje mnohem blíže původním datům naměřeným sondou.



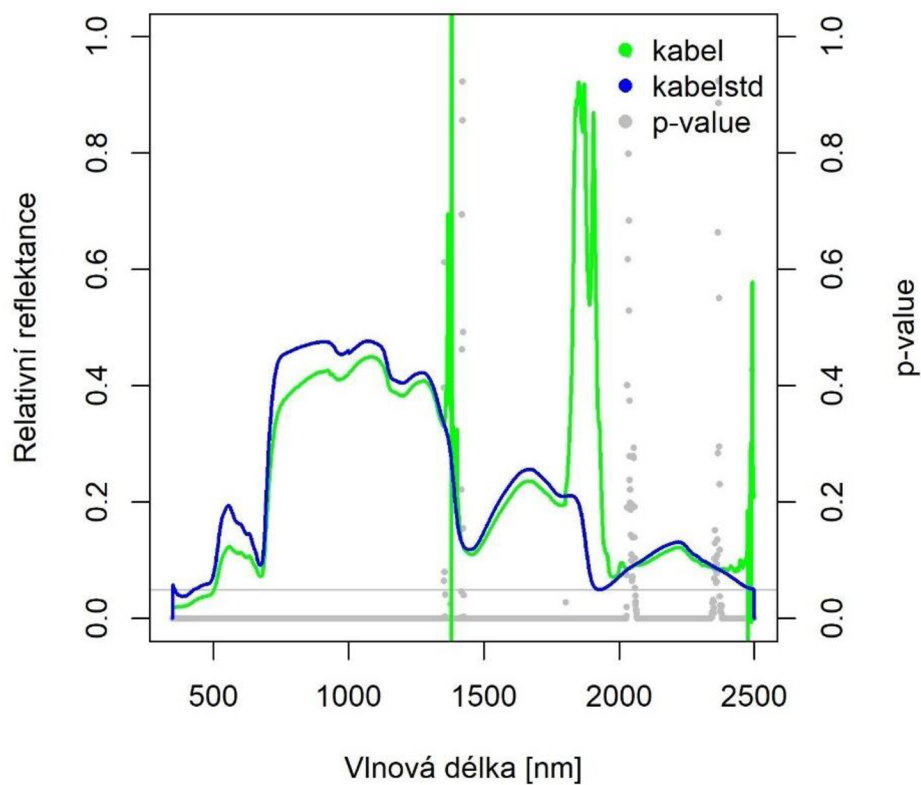
Obrázek 23: Postupná standardizace spekter měřených optickým kabelem.

Na obrázku 23 můžeme pozorovat postupnou standardizaci spekter měřených optickým kabelem. První z grafů na obrázku udává poměr 9:1, kdy je 90 % měření provedeno optickým kabelem. Zbýlých 10 % je měřeno pomocí kontaktní sondy a je použito ke standardizaci. U ostatních grafů se poměr postupně převrací na druhou stranu a poslední z grafů má poměr 1:9

Obrázek 24 zobrazuje křivky spektrální reflektance z dat naměřených kontaktní sondou a ze standardizovaných dat naměřených optickým kabelem. Křivky se v grafu překrývají. Šedá křivka znázorňuje odlišnost dat. Jelikož není p-hodnota zlogaritmována, data jsou statisticky odlišná, pokud se šedá křivka nachází pod vodorovnou ryskou. Z grafu je tedy patrné, že díky standardizaci dat odpovídají hodnoty naměřené optickým kabelem hodnotám naměřeným kontaktní sondou.



Obrázek 24: Srovnání průměrných hodnot změřených kontaktní sondou a standardizovaných dat změřených optickým kabelem.



Obrázek 25: Srovnání průměrných hodnot změřených kontaktní sondou před a po standardizaci.

Obrázek 25 porovnává spektrální křivku vytvořenou z dat naměřených optickým kabelem před standardizací a po ní. Šedá křivka ukazuje oblasti, které jsou statisticky odlišné. Pokud se nachází šedá křivka pod vodorovnou ryskou, křivky se v daném místě statisticky odlišují. Zde se křivky odlišují v celém měřeném spektru.

Grafy z dat naměřených optickým kabelem po standardizaci, které srovnávají jednotlivé ekotypy, se nachází v příloze 3.

#### 5.4. Predikce příslušnosti k ekotypu na základě reflektance

Tabulka 8: Hodnocení chybovosti zařazení ke správnému ekotypu podle metody měření.

Metoda	Odhad chybovosti
RF SONDA	47,43 %
RF KABEL	19,24 %
RF KABEL s ořezem podezřelých vln. délek	34,34 %
RF std. KABEL	27,77 %

Tabulka 8 shrnuje výsledky modelu Random Forest. Odhad chybovosti udává pravděpodobnost, s jakou model zařadí semenáček chybně k jinému ekotypu. Nejlepší výsledky získáváme, pokud model zařazuje data naměřená optickým kabelem. Pravděpodobnost, že semenáček změřený optickým kabelem bude přiřazen ke správnému ekotypu, dosahuje 80,76 %. Pokud použijeme data standardizovaná výše zmíněným algoritmem, pravděpodobnost se snižuje na 72,23 %. Vzhledem k velkému rozptylu dat z optického kabelu byly ze souboru oříznuty „podezřelé“ vlnové délky s výrazně vyšší variabilitou. Pravděpodobnost správného přiřazení k ekotypu z takto oříznutých dat je 65,66 %. Nejhorší výsledek byl získán z dat naměřených kontaktní sondou. Pravděpodobnost správného zařazení do ekotypu je pouze 52,57 %.

## 6. Diskuse

### 6.1. Porovnání ekotypů

#### 6.1.1. Porovnání ekotypů na základě růstových parametrů a mortality

Na základě statistických ukazatelů můžeme usuzovat, že se ekotypy výškově liší. Průměrně nejvyšší je třeboňský ekotyp, průměrně nejnižší je děčínský ekotyp. Zároveň se dle mnohonásobného porovnání průměry těchto dvou ekotypů nejvíce odlišují. Nejméně se naopak odlišují ekotypy z Třeboně a Plas, přesto hladina významnosti dosahuje 0,013. To odpovídá faktu, že populace z Třeboně a Plas se zařazují do pahorkatinného ekotypu, zatímco populace z Děčína se řadí do náhorního ekotypu.

V takto nízkém věku je však složité na základě výšky selektovat elitní potomstva. Důvodem je především výrazně odlišná růstová dynamika mezi ekotypy a obecně nízké korelace mezi juvenilním materiálem a mytním věkem dřevin. Rozlišování nížinného, resp. pahorkatinného ekotypu a náhorního ekotypu vyplývá zejména z posuzování lesních porostů v dospělosti (např. na základě růstového rytmu, druhové skladby porostů, charakteristiky kmene a koruny). Některé rozdíly lze zaznamenat i na mladších ověřovacích plochách ve věku 17 let, zejména tendence pomalejšího růstu se stoupající nadmořskou výškou původu zdroje semen v rámci jednotlivých přírodních lesních oblastí (Šindelář *a kol.*, 2007).

Nejvyšší míry mortality dosahovala populace z Děčína. Nepřežilo více než 28 % semenáčků. U zbylých dvou populací nedosahovala míra mortality tak vysokých hodnot. To může být způsobené tím, že populace z Plas a Třeboně patří do pahorkatinného ekotypu, zatímco populace z Děčína patří do ekotypu náhorního. Klimatické podmínky arboreta Sofronka jsou, zvláště co se týče úhrnu srážek a průměrné teploty, bližší podmínkám původu populací z Plas a Třeboně.

Odlišné výsledky však popisuje studie z roku 2016, která se zabývala mortalitou sazenic borovice lesní různých proveniencí. Nebyl nalezen jasný spojitý vztah mezi mírou úmrtnosti proveniencí a klimatem v jejich místě původu. Mezi zkoumané faktory patřila například právě průměrná roční teplota a průměrný roční úhrn srážek (Seidel *a Menzel*, 2016).

### 6.1.2. Porovnání ekotypů na základě měření kontaktní sondou

Na základě výsledků získaných pomocí kontaktní sondy je vidět, že se v rámci celého měřeného spektra vždy alespoň jeden ekotyp od ostatních statisticky významně ( $\alpha = 0,05$ ) odlišuje (obrázek 13).

Optické vlastnosti v oblasti VIS jsou ovlivňovány především fotosyntetickými pigmenty. Chlorofyly absorbují modré a červené světlo: chlorofyl a nejvíce na vlnových délkách 430 a 660 nm, chlorofyl b na vlnových délkách 450 a 650 nm (Albrechtová *a kol.*, 2017). Pokud se zaměříme na oblast NIR, optické vlastnosti jsou ovlivňovány zvláště morfologií jehlic. Jde především o rozptyl záření v houbovitém mezofyly (Jensen, 2014). Oblast NIR je také citlivá na fyziologický stav rostlin. Změny mohou být indikátorem měnících se podmínek prostředí, poškození nebo houbového onemocnění rostliny (Larcher, 2003). Dominantním faktorem pro odrazivost vegetace je v oblasti SWIR obsah vody v listech (Jensen, 2014).

Pokud porovnáme ekotypy z Plas a Třeboně (obrázek 14), největší odlišnost nalzáme v oblasti VIS a RED-EDGE. Na základě toho můžeme usuzovat, že se tyto dva ekotypy liší zvláště díky různému zastoupení fotosyntetických barviv. V oblasti SWIR se ekotypy statisticky odlišují, nejedná se však o tak vysoké hodnoty jako v předchozích oblastech. Jehlice se tedy liší i obsahem vody, rozdíly však nebudou nijak markantní. V oblasti NIR se tyto dva ekotypy statisticky neodlišují. Z toho můžeme odvodit, že zmíněné ekotypy se morfologickou strukturou jehlic neliší.

Při srovnání ekotypů z Plas a Děčína (obrázek 15) zjišťujeme, že se ekotypy liší téměř v celé měřené oblasti. Odlišnost nebyla odhalena v oblasti přibližně do 500 nm a na několika místech v oblasti 650–700 nm. Z toho lze vyvodit, že se tyto dvě populace liší zastoupením fotosyntetických pigmentů, morfologií i obsahem vody. Na rozdíl od předchozí dvojice je zde však rozdíl v obsahu vody značný.

Pokud se zaměříme na srovnání populací z Třeboně a Děčína (obrázek 16), nacházíme statisticky významné rozdíly v oblastech NIR a SWIR. V oblasti VIS jsou populace odlišné pouze do přibližně 450 nm. Vyplývá z toho tedy, že se populace neliší v obsahu pigmentů. Rozdíl v morfologii, tedy v oblasti NIR, je srovnatelný s předchozí dvojicí. Stejně tak rozdílnost v obsahu vody, tedy oblast SWIR, je srovnatelná.

Z těchto poznatků tedy vyplývá, že se nejvíce odlišuje populace z Děčína a nejvíce podobné (přestože jsou zde statisticky významné rozdíly) jsou populace z Třeboně a Plas.

To rovněž odpovídá faktu, že poslední dvě zmíněné populace se řadí do pahorkatinného ekotypu, zatímco populace z Děčína patří k ekotypu náhornímu.

### **6.1.3. Porovnání ekotypů na základě optického kabelu**

Vzhledem k tomu, že měření pomocí optického kabelu není kontaktní jako měření sondou, a také nedisponuje vlastním zdrojem světla, je zde více patrný vliv aktuálních okolních podmínek. Optický kabel je tedy závislý na momentálním osvitu. Do jisté míry se však dá tento vliv odstranit častou normalizací vzhledem k bílé referenci. Dalším faktorem, který je na grafech patrný, je vliv vodní páry. Vodní pára je zdaleka nejsilnějším modifikátorem přicházejícího spektra. Vodní pára má absorpční vlastnosti pokrývající oblasti 1350–1450 nm, 1800–1950 nm a oblast okolo 2500 nm. Zároveň se obsah páry ve vzduchu mění v čase i prostoru (ASD Inc. 2010).

Při srovnání všech tří spektrálních křivek odrazivosti (obrázek 17) se výsledky měření optickým kabelem liší v rámci celého spektra. Jde o statisticky významný rozdíl vždy alespoň mezi dvěma ekotypy.

Při srovnání ekotypů z Plas a Třeboně (obrázek 18) vidíme největší odlišnosti okolo 550 nm v rámci VIS, v oblasti NIR a SWIR se liší ekotypy ve všech vlnových délkách. Pokud vezmeme v potaz optické vlastnosti vegetace zmíněné v předchozí kapitole, liší se ekotypy především strukturou jehlic a obsahem vody. Oblast 550 nm odpovídá zelené části viditelného spektra (Taiz a Zeiger, 2002). Rozdílnost neodpovídá oblastem absorpce chlorofylů. Oblast 400–570 nm pohlcuje karotenoidy (Tomášková a Kubásek, 2016).

Při srovnání plaského a děčínského ekotypu (obrázek 19) vidíme drobnější rozdíly v oblasti VIS okolo 630–700 nm. Jedná se o oblasti absorpce chlorofylů (Jensen, 2014), ekotypy se tedy budou pravděpodobně lišit v jejich obsahu, a tedy i účinnosti fotosyntézy. V oblasti NIR a SWIR se liší zmíněné ekotypy v rámci všech vlnových délek, lze tedy na základě měření optickým kabelem očekávat rozdílnost jak v morfologii jehlic, tak v obsahu vody.

Na rozdíl od předchozích dvojic se odlišnost ekotypu z Třeboně a Děčína (obrázek 20) vyskytuje pouze v oblasti VIS a RED-EDGE. Dle metody měření pomocí optického kabelu se tedy liší tyto ekotypy převážně zastoupením fotosyntetických pigmentů. Tyto rozdíly mají vliv jak na barvu, tak i na funkci fotosyntézy.

## 6.2. Porovnání metod

Metoda měření optickým kabelem je nová a neexistují tedy vědecké studie zabývající se tímto tématem. Porovnání s dalšími autory je proto obtížné.

Jediná studie srovnávající metody měření spekter odrazivosti a propustnosti listů porovnává dva typy integračních sfér („*single integrating sphere*“ a „*small double integrating sphere*“) a listovou komoru („*leaf clip*“). Autoři dochází k závěru, že výsledky pro reflektanci z integračních sfér se prakticky neliší, zatímco měření listovou komorou nadhodnocovalo výsledky průměrně o 14 % (Hovi *a kol.*, 2017).

Z obrázku 21 je jasně patrné, že se výsledky měření optickým kabelem a kontaktní sondou statisticky významně odlišují. Prvním, již dříve zmíněným důvodem je vliv prostředí. Při měření kontaktní sondou jsou tyto vlivy omezeny. Sonda má vlastní zdroj světla, a navíc se při měření sadbovače přenášely do tmavého skleníku. Okolní světelné změny a oblačnost byly tímto víceméně eliminovány. Jak název napovídá, jedná se o kontaktní metodu. Sonda je přiložená přímo na měřený vzorek a není zde prostor pro vliv vodní páry. U metody využívající optický kabel je naopak potřeba s těmito problémy počítat. Vliv ozáření a oblačnosti lze do jisté míry odstranit normalizací vzhledem k bílé referenci. S vlivem vodní páry je však potřeba nadále počítat.

Dalším faktorem, kvůli kterému se výsledná data pravděpodobně liší, byl směr měření jehlic. Kontaktní sonda se přikládala k jehlicím ze strany a zabírala všechna patra jehlic, zatímco optický kabel mířil na jehlice shora a největší záběr směřoval pouze na svrchní jehlice.

U jehličnanů bývají slunné jehlice větší než ostatní. Mohou být kruhovitější, a tedy s větší vrstvou mezofylu (Tomášková a Kubásek, 2016). Zároveň se liší vnitřní a vnější strana jehlic. Vnitřní strana je šedozelená a plochá, zatímco vnější strana je vypouklá a tmavě zelená. Šedozelená barva na vnitřní straně je způsobena pruhy modravě ožiněných průduchů (Hejný *a Slavík*, 1988). Obsah fotosyntetických pigmentů i vody se liší podle polohy i ročníku jehlic v koruně. Jehlice se rozdělují podle polohy na zastíněné bazální, dolní produkční a horní produkční (Albrechtová *a kol.*, 2017). U semenáčků nelze jehlice takto diferenciovat, přesto je možné, že v závislosti na vystavení slunci se jejich morfologie bude mírně lišit.

Kontaktní sonda byla využívána k měření reflektance již dříve. Navíc jsou zde omezeny vlivy prostředí. Na rozdíl od optického kabelu vychází z výsledků měření kontaktní



sondou nejpodobněji populace z Plas a Třeboně. To odpovídá i faktu, že zmíněné populace se řadí do pahorkatinného ekotypu, zatímco nejodlišnější populace z Děčína patří do ekotypu náhorního.

Statistické rozdíly v rámci fotosyntetických pigmentů dosahují u metody optického kabelu nižších hodnot. Na druhou stranu v oblasti NIR jsou u dvojic Plasy – Třeboň a Plasy – Děčín statistické rozdíly výrazně významnější než u kontaktní sondy. Optický kabel tedy zaznamenal odlišnosti spíše v morfologii jehlic než v obsahu pigmentů. Nejpodobnější byly ekotypy z Třeboně a Děčína. Zároveň je potřeba vyzdvihnout fakt, že měření pomocí optického kabelu bylo časově i technicky méně náročné.

### **6.3. Propojení obou metod algoritmem**

Algoritmus PDS se obvykle používá pro přenos dat z jednoho přístroje na druhý. Může však být použit i k propojení metod, jak je popsáno zde. Ve studii zaměřené na možnosti odstranění vnějších vlivů z různých spekter pro predikci půdního organického uhlíku dávala metoda PDS do vztahu spektra suché půdy a spektra půdy mokré. Nejde zde tedy o přenos dat z přístrojů, ale o propojení metod (Munnaf a Mouazen, 2022).

Z našich předchozích výsledků je patrné, že relevantnější výsledky jsou získány pomocí kontaktní sondy. Na druhou stranu je měření pomocí optického kabelu jednodušší a ve výsledku rychlejší než měření kontaktní sondou. Jde pouze o namíření optického kabelu na sazeničku. Měření lze provádět v terénu a personálně je měření možné za přítomnosti jednoho člověka (jeden člověk zvládne namířit optický kabel a zároveň obsluhovat laptop). Měření kontaktní sondou je složitější. Jsou potřeba alespoň dva lidé (jeden nastavuje a přitlačuje kontaktní sondu, druhý obsluhuje laptop), zároveň je vhodnější omezit vliv okolního světla, takže pokud je to možné, měřit v neosvětleném prostoru. Je také potřeba skládat jehlice tak, aby zabíraly co největší část měřeného prostoru. Na druhou stranu jsou u metody kontaktní sondy eliminovány vlivy prostředí jako je vodní pára nebo změny osvětlení.

Bylo by tedy výhodné získat data odpovídající kvalitě z kontaktní sondy a zároveň s menším úsilím, jako data z metody optického kabelu. K tomu slouží algoritmus PDS. Metoda měření pomocí kontaktní sondy byla vzata jako cílová kvalita měření. Z výsledků (obrázek 22) je patrné, že zlomový je poměr 3:1, případně 4:1. U takovýchto poměrů mizí okolní šumy změřené optickým kabelem a grafy začínají odpovídat tvaru získanému z měření kontaktní sondou. Pro standardizaci při měření optickým kabelem je tedy

potřeba naměřit přibližně 30–40 % kontaktní sondou a optickým kabelem a zbytek lze měřit rychlejší metodou s využitím optického kabelu.

Při porovnání obrázku 25 a 21 zjistíme, že vyobrazené spektrální křivky jsou identické. Křivka ze standardizovaných dat pouze nahrazuje křivku z dat získaných kontaktní sondou. Stejně tak je identická i šedá křivka určující statistický rozdíl mezi daty.

#### **6.4. Predikce příslušnosti k ekotypu na základě reflektance**

Predikce a klasifikace vzorků pomocí modelu RF se začíná dostávat do povědomí vědecké komunity, a to i v lesnických vědách. Přesto studie srovnatelná s tímto měřením, i vzhledem k originalitě metody optického kabelu, neexistuje.

Můžeme ale porovnat výsledky přiřazení ke správnému druhu rostlin na základě jiných metod. V subtropických lesích byla například zkoumána klasifikace dřevin pomocí dat LiDAR, což je metoda dálkového průzkumu země. Bylo klasifikováno šest dřevin. Model RF zde správně rozřadil všech šest druhů s přesností 68,6 %. Přesnost 82,2 % vykazoval model při rozřazení jehličnatých a listnatých stromů (Cao *a kol.*, 2016).

Model RF byl v naší studii použit k predikci příslušnosti k ekotypu na základě změřených reflektančních dat. Nejpřesnější výsledky RF dostáváme z dat změřených optickým kabelem. Pravděpodobnost správného zařazení je zde 80,76 %. Z obrázku 22 je patrné, že data naměřená optickým kabelem mají největší rozptyl. Pokud tento rozptyl snižujeme například ořezem podezřelých vlnových délek nebo standardizací dat, snižuje se i pravděpodobnost správného zařazení. Z toho lze usuzovat, že právě variabilita dat získaných optickým kabelem zvyšuje pravděpodobnost přiřazení ke správnému ekotypu.

Podíváme-li se však opět na obrázek 22, je vidět, že rozptyl standardizovaných dat je násobně menší než u dat změřených kontaktní sondou, a přesto RF dokáže predikovat příslušnost ke správnému ekotypu s vyšší pravděpodobností. Je tedy pravděpodobné, že metoda optického kabelu získává data vhodnější pro predikci ekotypu metodou RF. To může být způsobeno podstatnějsími rozdíly v morfologii, které, jak již bylo zmíněno v kapitole 6.2., dokáže lépe zaznamenat optický kabel.

Závěrem je dobré zmínit, že pokud by pravděpodobnost správného určení klesla na 33,33 %, respektive odhad chybovosti by se rovnal nebo překračoval 66,66 %, bylo by zařazování do 3 ekotypů nesmyslné. Taková predikce by vlastně znamenala náhodné přiřazení k ekotypu.

## 7. Závěr

Výsledky ukazují statisticky významné rozdíly mezi populacemi. Co se mortality a výšky týče, jako nejodlišnější se jeví děčínská populace, která je jediná řazena k náhornímu ekotypu. Populace z Plas a Třeboně si v těchto parametrech byly výrazně bližší. Statisticky významné odlišnosti v hyperspektrální reflektanci prokázalo měření jak sondou, tak i optickým kabelem.

Z porovnání metod nám vychází jako přesnější, zvláště pro nižší ovlivnění vlivy prostředí, kontaktní sonda. Měření optickým kabelem je na druhou stranu časově i personálně méně náročné. Statistické rozdíly se při porovnání metod objevovaly v rozdílných oblastech, ač se některé regiony opakují v rámci obou metod. Optický kabel zaznamenává spíše morfologickou odlišnost, zatímco kontaktní sonda nachází rozdíly spíše v oblasti reflektance pigmentů.

Pro zjednodušení měření lze použít standardizaci pomocí algoritmu PDS. Při měření velkého počtu vzorků pak postačuje naměřit 30–40 % kontaktní sondou i optickým kabelem. Zbylou část lze změřit pouze rychlejší metodou optického kabelu a měření pomocí algoritmu standardizovat na data získaná kontaktní sondou. Výsledná odlišnost dat získaných pomocí PDS a dat získaných kontaktní sondou není statisticky významná, data se tedy prakticky neliší.

Na základě výsledků modelu RF lze usuzovat, že tato metoda lépe zařazuje data s vysokým rozptylem a data, ve kterých je patrnější morfologická odlišnost. Při omezení těchto parametrů se pravděpodobnost správné predikce příslušnosti k ekotypu snižuje. Nejlepších výsledků tedy dosahovala data získaná optickým kabelem.

Informace o odlišnosti hyperspektrální odrazivosti mezi populacemi mohou být využity ve šlechtitelských programech. Zároveň mohou sloužit k nenáročnému a nedestruktivnímu genetickému hodnocení na úrovni jednotlivých populací. Možnost standardizace dat na kontaktní sondu pak může toto hodnocení urychlit. Predikce příslušnosti k druhu na základě reflektance je v současnosti známá. Predikce příslušnosti k ekotypu však může být také použita pro výběr vhodných jedinců do šlechtitelských programů.

## 8. Seznam literatury a použitých zdrojů

1. ALBRECHTOVÁ, J.; KUPKOVÁ, L.; CAMPBELL, P. K. E. (eds.). *Hodnocení stavu smrkových porostů. - Případové studie sledování vývoje fyziologického stavu smrkových porostů v Krušných horách v letech 1998–2013*. 1. vyd. Praha: Geographica - Česká geografická společnost, 2017. s.401. ISBN 978-80-905642-9-9.
2. ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; a kol. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* [online]. 2010, vol. 259, no. 4 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.3390/rs8030221>> ISSN 03781127.
3. ANDĚL, J. *Statistické metody*. 2. přeprac. vyd. Praha: Matfyzpress, 1998. 274 s. ISBN 80-858-6327-8.
4. ASD Inc. *FieldSpec® 3 User Manual*. ASD Document 600540 Rev. J, 2010.
5. BLACKBURN, G. A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany* [online]. 2006, vol. 58, no. 4 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erl123>>. ISSN 0022-0957.
6. CAO, L. N.; COOPS, C.; INNES, J. L.; DAI, J.; RUAN, H.; SHE. G. Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2016, vol. 49 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.01.007>>.
7. CAVENDER-BARES, J.; MEIRELES, J.; COUTURE, J. a kol. Associations of Leaf Spectra with Genetic and Phylogenetic Variation in Oaks: Prospects for Remote Detection of Biodiversity. *Remote Sensing* [online]. 2016, vol. 8, no. 3 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.3390/rs8030221>>. ISSN 2072-4292.
8. ČEPL, J.; HOLÁ, D.; STEJSKAL, J. a kol. Genetic variability and heritability of chlorophyll a fluorescence parameters in Scots pine ( *Pinus sylvestris* L.). *Tree Physiology* [online]. 2016, vol. 36, no. 7 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1093/treephys/tpw028>>. ISSN 0829-318X.
9. ČEPL, J.; STEJSKAL, J.; LHOTÁKOVÁ, Z. a kol. Heritable variation in needle spectral reflectance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) peaks in red edge. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2018, vol. 219 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.001>>. ISSN 00344257.

10. Český hydrometeorologický ústav. *Historická data – meteorologie a klimatologie* [online]. [2022] [cit. 2022-03-22]. Dostupné z WWW: <<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/>>.
11. EL-KASSABY, Y. A.; LSTIBŮREK, M. Breeding without breeding. *Genetics Research* [online]. 2009, vol. 91, no. 2 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1017/S001667230900007X>> ISSN 0016-6723.
12. ERIKSSON, G.; EKBERG, I.; CLAPHAM, D. *An introduction to forest genetics*. 2nd ed. Uppsala : Genetic Center, Department of Plant Biology and Forest Genetics, SLU, 2006. 186 s. ISBN 91-576-7190-7.
13. FOX, C. W.; REED, D. H. Inbreeding depression increases with environmental stress: an experimental study and meta-analysis. *Evolution* [online]. 2011, vol. 65, no. 1 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2010.01108.x>>. ISSN 00143820.
14. FRÝDL, J. *Metodické postupy ověřování zdrojů reprodukčního materiálu lesních dřevin v České republice: recenzovaná metodika*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2009. 61 s. ISBN 978-80-7417-020-1.
15. FUNDA, T.; EL-KASSABY, Y. A. Seed orchard genetics. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* [online]. 2012, vol. 7, no. 13 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z WWW: <<http://dx.doi.org/10.1079/PAVSNNR20127013>>. ISSN 17498848.
16. GILMOUR, A. R.; GOGEL, B. J.; CULLIS, B. R.; THOMPSON, R. *ASReml User Guide*. Hemel Hempstead : VSN International Ltd, 2009. 372 s.
17. GUILLAUME, H. Piecewise Direct Standardization (PDS). *GitHub: RNIR* [online]. 2018-11-03 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z WWW: <<https://guifh.github.io/RNIR/PDS.html>>.
18. HEJNÝ, S.; SLAVÍK, B. (ed.). *Květena České socialistické republiky: 1*. Praha: Academia, 1988.
19. HIEKE, K. *Encyklopedie jehličnatých stromů a keřů*. Brno: Computer Press, 2008. 246 s. ISBN 978-80-251-1901-3.
20. HOLLAND, S. M. *Principal components analysis (PCA)*. Athens: University of Georgia, Department of Geology, 2019. 11 s.
21. HOVI, A.; FORSSTRÖM, P.; MÖTTUS, M.; RAUTIAINEN, M. Evaluation of Accuracy and Practical Applicability of Methods for Measuring Leaf Reflectance and

- Transmittance Spectra. *Remote Sensing* [online]. 2018, vol. 10, no. 2 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.3390/rs10010025>>.
22. IVANEK, O.; NOVOTNÝ P.; FRÝDL J. *Metodika zakládání semenných sadů 1,5. generace: certifikovaná metodika*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2010. 29 s. ISBN 978-80-7417-037-9.
23. JAADI, Z. A step-by-Step Explanation of Principal Component Analysis (PCA). *builtin: data-science* [online]. 2021 [cit. 22-03-05]. Dostupné z WWW: <<https://builtin.com/data-science/step-step-explanation-principal-component-analysis>>.
24. JENSEN, J. R. *Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective*. 2nd ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2014. 614 s. ISBN 13:978-1-292-02170-6.
25. KAŇÁK, J. *Arboretum Sofronka: 1956-2016*. Plzeň: RAMAP, [2016]. ISBN 978-80-906648-0-7.
26. KAŇÁK, J. *Metodika zakládání semenných sadů: recenzovaná metodika*. Jiloviště: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2008. 24 s. ISBN 978-80-7417-007-2.
27. KAŇÁK, J.; KLÁPŠTĚ, J.; LSTIBŮREK, M. Úvodní genetické hodnocení semenných sadů borovice lesní v západních Čechách. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2009, vol. 53, no. 3, s. 189-204. ISSN 1805-9872.
28. KANTOR, J. a kol. *Zakládání lesů a šlechtění lesních dřevin*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1975. 526 s.
29. KOBLÍŽEK, J. *Systematická botanika lesnická*. Dot. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1999. 168 s. ISBN 80-715-7188-1.
30. KOMPRDOVÁ, K. *Rozhodovací stromy a lesy*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012. 98 s. ISBN 978-80-7204-785-7.
31. KWIECIEN, A. Pinus sylvestris range. *Wikimedia commons* [online]. 2017-12-10 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z WWW: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinus\\_sylvestris\\_range-01.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pinus_sylvestris_range-01.png)>.
32. LARCHER, W. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 513 s. ISBN 3-540-43516-6.
33. LORENC, F.; LIŠKA, J.(ed.). *Škodliví činitelé v lesích Česka 2019/2020 - Krize zdravotního stavu borovice lesní: Sborník referátů z celostátního semináře s*

- mezinárodní účastí*. Praha: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2020. 76 s. ISBN 978-80-7417-200-7.
34. MADĚRA, P.; ÚRADNÍČEK, L. *Dřeviny České republiky*. Písek: Matice lesnická, 2001. 333 s. ISBN 80-862-7109-9.
35. MÁCHOVÁ, P.; CVRČKOVÁ, H.; POLÁKOVÁ, L.; TRČKOVÁ, O. Genetická variabilita vybraných populací borovice lesní v České republice. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2016, vol. 61, no. 3, s. 223-229. ISSN 1805-9872.
36. MÁRTONFI, P. *Systematika cievnatých rastlín*. 2. přeprac. vyd. Košice: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2006. 220 s. ISBN 80-7097-628-4.
37. MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Zelená zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2020*. Praha : Ministerstvo zemědělství 2021. ISBN 978-80-7434-625-5.
38. MUNNAF, M. A.; MOUAZEN, A. M. Removal of external influences from on-line vis-NIR spectra for predicting soil organic carbon using machine learning. *CATENA* [online]. 2022, vol. 211 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106015>>.
39. MUSIL, I.; HAMERNÍK J.; LEUGNEROVÁ, G. *Lesnická dendrologie 1: jehličnaté dřeviny : přehled nahosemenných (i výtrusných) dřevin*. 2. ed. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2002. 177 s. ISBN 80-213-0992-X.
40. PAULE, L. *Genetika a šľachtenie lesných drevín*. Bratislava: Príroda, 1992. 304 s. ISBN 80-07-00409-2.
41. POSPÍŠIL, J.; KOBLIHA, J. *Šlechtění lesních dřevin*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1988. 135 s.
42. RICHARDSON, D.; DUIGAN, S. P.; BERLYN, G. P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist* [online]. 2002, vol. 153, no. 1 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00289.x>>. ISSN 0028646X.
43. SAHOO, P.; *Probability and Mathematical Statistics*. 1th ed. Louisville: University of Louisville, 2015. 698 s.
44. SEIDEL, H.; MENZEL, A. Above-Ground Dimensions and Acclimation Explain Variation in Drought Mortality of Scots Pine Seedlings from Various Provenances. *Frontiers in Plant Science* [online]. 2016, vol. 7 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01014>>.



45. Seznam.cz, a.s. *mapy.cz* [online]. [2022] [2022-1-16] Dostupné z WWW: <<https://mapy.cz>>.
46. SLÁVIK, M.; BAŽANT, V. *Dřevařská dendrologie I*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2016. 107 s. ISBN 978-80-213-2622-4.
47. SVATOŠOVÁ, L.; KÁBA, B. *Statistické metody I*. Praha: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta, 2007. 132 s. ISBN 978-80-213-1672-0.
48. SVOBODA, P. *Lesní dřeviny a jejich porosty: Část I*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1953. 411 s.
49. ŠINDELÁŘ, J.; FRÝDL, J.; NOVOTNÝ P. Příspěvek k charakteristikám regionálních populací – ekotypů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v České republice. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2007, vol. 52., no. 2, s. 148-159. ISSN 1805-9872.
50. TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant Physiology*. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. ISBN 0878938230.
51. TOMÁŠKOVÁ, I.; KUBÁSEK, J. *Fyziologie lesních dřevin I.: fyziologie, produkce a stresy rostlin*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin, 2016. 267 s. ISBN 978-80-213-2608-8.
52. ÚRADNÍČEK, L.; CHMELÁŘ, J. *Dendrologie lesnická: I. část Jehličnany*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1995. ISBN 80-715-7162-8.
53. WHITE, T. L.; ADAMS, W. T.; NEALE, D. B. (eds.) *Forest genetics*. Wallingford: Cabi, 2007. 896 s. ISBN 978 0 85199 348 5.
54. ZICHA, O. borovice lesní. *BioLib* [online]. 2022-03-04 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z WWW: <<https://www.biolib.cz/cz/taxon/id2312/>>.



## **9. Seznam příloh**

Příloha 1: Pořadí měření sadbovačů a jednotlivých semenáčků. ....	76
Příloha 2: Mapa živých a mrtvých semenáčků. ....	77
Příloha 3: Porovnání ekotypů na základě dat naměřených kontaktní po standardizaci. .	78

## 10. Přílohy

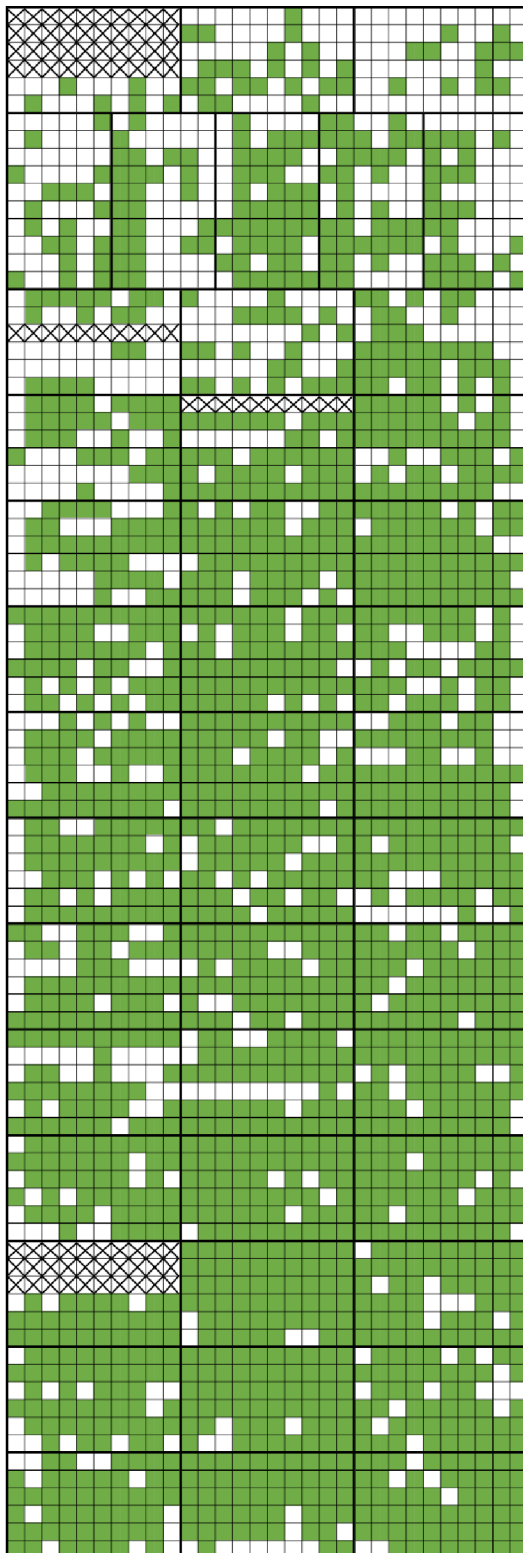
### Příloha 1: Pořadí měření sadbovačů a jednotlivých semenáčků.

Tučné čáry vyznačují jednotlivé sadbovače. Tenké čáry vyznačují jednotlivé buňky se sazeničkou v rámci sadbovačů. Čísla uprostřed udávají pořadí, ve kterém byly sadbovače měřeny. Proškrtnutá buňka udává první sazeničku měřenou v rámci sadbovače. Šipky udávají směr, ve kterém měření pokračovalo. Po změření celého sloupce se začal měřit vedlejší sloupec.

15		16		44
13	14	17	42	43
12		18		41
11		19		40
10		20		39
9		21		38
8		22		37
7		23		36
6		24		35
5		25		34
4		26		33
3		27		32
2		28		31
1		29		30

## Příloha 2: Mapa živých a mrtvých semenáčků.

Mapa je orientovaná stejně jako Příloha 1. Zelené buňky znamenají živý semenáček, bílé buňky znamenají semenáček mrtvý. Proškrtnuté buňky zastupují buňky sadbovače úplně bez stromku.



### Příloha 3: Porovnání ekotypů na základě dat naměřených kontaktní po standardizaci.

Grafy zobrazují spektrální křivky vytvořené z dat naměřených optickým kabelem po standardizaci. Zobrazují srovnání mezi jednotlivými ekotypy. Šedé body ukazují statisticky významnou odlišnost. Pokud se nachází nad vodorovnou ryskou, jsou křivky v daném bodě statisticky odlišné.

