

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin



Česká
zemědělská
univerzita
v Praze

**Kvantifikace genetické variability
multispektrální reflektance v rámci lokálních
populací borovice lesní**

Diplomová práce

Autor: Bc. Daniel Provazník

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

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Daniel Provozník

Lesní inženýrství
Lesní inženýrství

Název práce

Kvantifikace genetické variability multispektrální reflektance v rámci lokálních populací borovice lesní

Název anglicky

Quantification of genetic variability of multispectral reflectance within local pine populations

Cíle práce

Cílem práce je získat informace o geneticky podmíněné variabilitě multispektrální reflektance, kvalitativních parametrech (např. architektura koruny) a vývoji roubovanců v semenných sadech borovice lesní. Součástí práce je též genetická evaluace daných ukazatelů.

Výběr rodičů na základě údajů z testů potomstev se obvykle označuje jako zpětná selekce. Odhady těchto odchylek jsou dalším cílem testování potomstev podmíněné genetickou evaluací naměřených dat. Tyto odhady jsou využívány pro budoucí šlechtění a predikci možných zisků ze šlechtění. Do tohoto zažitého vzorce vstupujeme s fyziologickými znaky, které mohou evaluaci zpřesnit a následně také zlevnit. Jako inovativní prvek genetické evaluace budou hodnoceny také fyziologické parametry a to přímo v semenných sadech první a nově též druhé generace, konkrétně multispektrální reflektance zjišťovaná metodami laboratorní spektroskopie. Tyto informace budou zásadní především vzhledem k fyziologickému stavu roubovanců, přičemž cílíme též na projevy hydrického stresu. Výhodou semenných sadů je možnost využít klonálních replikací (ramet), čímž je v rámci statistické analýzy efektivně zpřesněn odhad genetického rozptylu. Tyto znaky nebyly v kontextu semenných sadů v našich podmínkách ani ve světě dosud studovány.

Metodika

Studované semenné sady reprezentují tři zájmové lokální populace – Plzeňsko, Třeboňsko a Děčínsko (náhorní ekotyp borovice lesní). Design semenných sadů vychází z kompletního znáhodnění, kdy každý zastoupený klon (průměrný počet klonů na sad je 100) je replikován minimálně deseti rametami.

Odběry letorostů budou probíhat v počtu řádově stovek kusů během vegetační sezóny 2020. Následné měření proběhne v nejbližších dnech po odběru. Tato měření přinesou zásadní informace především vzhledem k fyziologickému stavu stromů, přičemž sledujeme též projevy hydrického stresu.

Vyhodnocení získaných dat proběhne během podzimních měsíců 2020 s využitím smíšených lineárních modelů (software ASReml).

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

Doporučený rozsah práce

60 stran

Klíčová slova

borovice lesní, semenné sady, reflektance, chlorofyl

Doporučené zdroje informací

- 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.
- Češka, P. (2014). Zakládání a rozvoj semenných sadů lesních dřevin u VLS ČR, s.p. Disertační práce. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin.
- 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.
- 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

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Jan Stejskal, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin

Elektronicky schváleno dne 25. 10. 2020

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

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25. 10. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 28. 10. 2020

"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Kvantifikace genetické variability multispektrální reflektance v rámci lokálních populací borovice lesní vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jan Stejskala, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové 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 20. 4. 2021

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Janu Stejskalovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a vynaložený čas. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Jaroslavu Čeplovi, Ph.D. za pomoc se zpracováním dat a interpretací výsledků. V neposlední řadě patří můj velký dík celé mé rodině za jejich podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Cílem práce bylo získat informace o geneticky podmíněné variabilitě multispektrální reflektance, kvalitativních parametrech a vývoji roubovanců v semenných sadech borovice lesní (*Pinus sylvestris*). Namísto původně plánované multispektrální reflektance, bylo využito přesnější hyperspektrální reflektance. Ta byla na vzorcích jehlic měřena ve třech semenných sadech reprezentujících tři zájmové lokální populace – Plzeňsko, Třeboňsko a Děčínsko. K demonstrování genetických rozdílů byly v práci vytvořeny dvě případové studie – případová studie porovnání proveniencí v semenném sadu Doubrava a případová studie porovnání dvou klonů v semenném sadu Holičkovna. Mezi zkoumanými semennými sady byly v hyperspektrálních vlastnostech jehlic borovice lesní prokázány statisticky významné rozdíly, které se projeví také v obsahu dusíku a fosforu v jehlicích. Porovnání odlišných populací z jednotlivých semenných sadů však nelze považovat za rigorózní. Nelze přesně a objektivně rozlišit, do jaké míry je odlišnost dána genotypem či faktory prostředí. Byl prokázán statisticky významný rozdíl v rámci spekter odrazivosti jehlic i jejich interpretací vegetačními indexy mezi některými proveniencemi. V interpretaci hyperspektrální reflektance vegetačními indexy se statisticky významně odlišovaly také dva porovnávané klony. Informace o hyperspektrální reflektanci jehlic by mohly být využity při šlechtění rezistentních jedinců v rámci zlevnění a zpřesnění stávajících metod genetické evaluace. V další studii by bylo žádoucí volit pro porovnání semenné sady obsahující stejné genotypy, což by usnadnilo získání informace o geneticky podmíněné variabilitě fyziologických znaků.

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

Abstract

The aim of this study was to obtain information about genetically dependent variability of multispectral reflectance, qualitative parameters, and the development of graftings in seed orchards of Scots pine (*Pinus sylvestris*). Instead of originally planned multispectral reflectance, the more precise hyperspectral reflectance was used in the study. The hyperspectral reflectance of pine needles was measured in three seed orchards, each representing a single local population of interest - Plzeňsko, Třeboňsko and Děčínsko. To demonstrate the genetic differences, two case studies were arranged - a case study for the comparison of provenances in the seed orchard Doubrava and a case study for the comparison of two clones in the seed orchard Holičkovna. Statistically significant differences in spectral properties of Scots pine needles were proven between individual seed orchards. The differences also manifested itself via needle nitrogen and phosphorus content. The comparison of different seed orchards cannot be considered rigorous. The environmental and genotypic factors cannot be accurately and objectively differentiated. A statistically significant difference was proven in the case of the provenance comparison in both spectral reflectance of pine needles and its interpretation by vegetation indices. In the interpretation of hyperspectral reflectance by vegetation indices the two compared clones also appeared to be significantly different. The information about hyperspectral reflectance of tree needles could be used for breeding resistant individuals, making existing methods for genetic evaluation cheaper and more accurate. In following studies, it would be desirable to compare seed orchards containing the same genotypes which would make the process of getting the information of genetically dependent variability of physiological traits easier.

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

Obsah

1	Úvod.....	16
2	Cíl práce	17
3	Literární rešerše.....	18
3.1	Borovice lesní.....	18
3.1.1	Biologie	18
3.1.2	Areál rozšíření a ekologické nároky	19
3.1.3	Hospodářský význam	20
3.1.4	Vliv sucha	21
3.1.5	Provenience a ekotypy borovice lesní.....	21
3.2	Šlechtění lesních dřevin.....	24
3.2.1	Princip šlechtění lesních dřevin	24
3.2.2	Semenné sady	24
3.2.3	Budoucnost šlechtitelských programů	28
3.3	Fyziologie lesních dřevin ve šlechtění	29
3.4	Fotosyntetické pigmenty	30
3.4.1	Fotosystémy	30
3.4.2	Chlorofyly	30
3.4.3	Karotenoidy.....	31
3.4.4	Pigmenty a reflektance	32
3.5	Spektroskopie	32
3.5.1	Multispektrální a hyperspektrální data.....	33
3.6	Křivka spektrální odrazivosti	33
3.7	Spektrální reflektance vegetace	34
3.7.1	Vegetační indexy.....	36
3.7.2	Spektrální reflektance a heritabilita	38

4	Metodika	40
4.1	Lokality	40
4.2	Meteorologická data	41
4.3	Odběr vzorků	43
4.4	Laboratorní měření	45
4.5	Statistická analýza dat	47
4.5.1	Popisná statistika.....	47
4.5.2	Matematická statistika.....	48
4.6	Vegetační indexy	52
5	Výsledky	58
5.1	Rozdílnost semenných sadů	58
5.1.1	Porovnání na základě hyperspektrální reflektance jehlic.....	58
5.1.2	Porovnání na základě obsahu vybraných makroprvků v jehlicích..	59
5.2	Případová studie porovnání proveniencí v semenném sadu Doubrava..	60
5.2.1	Porovnání na základě hyperspektrální reflektance jehlic.....	60
5.2.2	Porovnání na základě vegetačních indexů	65
5.3	Případová studie porovnání dvou klonů v semenném sadu Holičkovna	69
5.3.1	Porovnání na základě jednoduché morfologie jehlic	69
5.3.2	Porovnání na základě hyperspektrální reflektance jehlic.....	72
5.3.3	Porovnání na základě vegetačních indexů	73
6	Diskuse.....	75
6.1	Diskuse k rozdílnosti semenných sadů.....	75
6.2	Diskuse k případové studii porovnání proveniencí v semenném sadě Doubrava.....	77
6.3	Diskuse k případové studii porovnání dvou klonů v semenném sadě Holičkovna	79

7	Závěr	81
8	Seznam literatury a použitých zdrojů.....	83

Seznam tabulek a obrázků

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Všeobecné údaje o semenných sadech (vytvořeno z dat Lesy české republiky s.p. 2010).	40
Tabulka 2: Vybraná meteorologická data pro jednotlivé lokality (z dat InMeteo, s.r.o. 2021)	42
Tabulka 3: Skupina vegetačních indexů vytvořených pro odhad obsahu vody ve vegetaci.	53
Tabulka 4: Skupina vegetačních indexů vytvořených pro odhad obsahu chlorofylu ve vegetaci.....	54
Tabulka 5: Skupina vegetačních indexů vytvořených pro odhad zdravotního stavu vegetace.....	56
Tabulka 6: Skupina nezařazených vegetačních indexů nehodících se do Tabulek 3, 4 a 5.	57
Tabulka 7: Statistické shrnutí datových souborů délek jehlic klonů 2071 a 2077	69
Tabulka 8: Dvouvýběrový F-test pro rozptyl.....	70
Tabulka 9: Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů.....	70

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Křivka spektrální odrazivosti vegetace s rozdělením jednotlivých prvků zodpovědných za odrazivost v jednotlivých částech elektromagnetického spektra s vyobrazením červeného okraje (Roman a Ursu 2016 - přeloženo).	34
Obrázek 2: Křivka spektrální odrazivosti zdravé a stresované vegetace ve viditelné a NIR části elektromagnetického spektra (Roman a Ursu 2016 - přeloženo).....	36
Obrázek 3: Spektrální reflektance asimilačního aparátu vybraných dřevin, suché trávy a pískovce (Ustin a Gamon 2010 - přeloženo).	39
Obrázek 4: Poloha vybraných semenných sadů na mapě ČR. 1 - lokalita Plasy; 2 - lokalita Třeboň 3 – lokalita Děčín (mapový podklad z Mapy.cz 2021).....	41

Obrázek 5: Průměrné měsíční úhrny srážek na lokalitách semenných sadů (vytvořeno v MS Excel z dat InMeteo, s.r.o. 2021).....	42
Obrázek 6: Průměrné měsíční teploty na lokalitách semenných sadů (vytvořeno v MS Excel z dat InMeteo, s.r.o. 2021).	43
Obrázek 7: Průměrná měsíční doba slunečního svitu na lokalitách semenných sadů (vytvořeno v MS Excel z dat InMeteo, s.r.o. 2021).....	43
Obrázek 8: Klon 2077.	44
Obrázek 9: Klon 2071.	44
Obrázek 10: Spektroradiometr FieldSpec® 3.	46
Obrázek 11: Laboratorní měření.	46
Obrázek 12: Průměrná reflektance jehlic v jednotlivých semenných sadech: D – Děčín; T – Třeboň; P – Plasy.	58
Obrázek 13: Porovnání jehlic klonů ze semenných sadů na základě obsahu dusíku a fosforu	59
Obrázek 14: Rozdílnost reflektance jehlic jednotlivých dvojic proveniencí na měřených vlnových délkách.....	60
Obrázek 15: Odražený podíl záření o vlnové délce 381 vzorky jehlic z různých proveniencí.....	61
Obrázek 16: Odražený podíl záření o vlnové délce 478 vzorky jehlic z různých proveniencí.....	62
Obrázek 17: Odražený podíl záření o vlnové délce 1524 vzorky jehlic z různých proveniencí.	63
Obrázek 18: Odražený podíl záření o vlnové délce 1854 vzorky jehlic z různých proveniencí.	64
Obrázek 19: Odražený podíl záření o vlnové délce 2267 vzorky jehlic z různých proveniencí.....	65
Obrázek 20: Vegetační indexy Datt7 a Datt8	66
Obrázek 21: Vegetační indexy Vogelmann4 a SR7.....	66
Obrázek 22: Vegetační indexy DWSI3 a NDLI	67
Obrázek 23: Vegetační indexy NDVI a RDVI	68
Obrázek 24: Krabicový graf vyobrazující délku jehlic klonů 2071 a 2077 z lokality Třeboň.	71

Obrázek 25: Průměrná reflektance jehlic klonů 2071 a2077.....	72
Obrázek 26: Klonové rozdíly ve spektrální reflektanci zobrazené pomocí vybraných vegetačních indexů.....	73

Seznam použitých zkratk a symbolů

ANOVA = analýza rozptylu

CRI = vegetační index Chlorophyll Reflectance Index

ČHMÚ = Český hydrometeorologický ústav

ČR = Česká republika

ČZU = Česká zemědělská univerzita v Praze

Datt7 = Vegetační index Datt7

Datt8 = Vegetační index Datt8

DDn = vegetační index New Double Difference Index

DPI = vegetační index Double Peak Index

DWSI1 = vegetační index Disease water stress index 1

DWSI3 = vegetační index Disease water stress index 3

DWSI5 = vegetační index Disease water stress index 5

FLD = Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze

IUFRO = Mezinárodní unie lesnických výzkumných organizací

LČR = Lesy České republiky, s. p.

LS = lesní správa

LVS = lesní vegetační stupeň

MSI = vegetační index Moisture Stress Index

MŠMT = Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky

NDLI = vegetační index Normalized Difference Lignin Index

NDVI = vegetační index Normalized Difference Vegetation Index

NDWI = vegetační index Normalized Difference Water Index

NIR = blízká infračervená část elektromagnetického spektra záření

PLO = přírodní lesní oblast

PřF = Přírodovědecká fakulta

PVI = vegetační index Perpendicular Vegetation Index

PWI = vegetační index Plant Water Index

RDVI = vegetační index Renormalized Difference Vegetation Index

RED = červená viditelná část elektromagnetického spektra záření

RED EDGE = červený okraj

RVI = Jednoduchý poměrový vegetační index (Ratio Vegetation Index)

SPVI = vegetační index Spectral Polygon Vegetation Index

SR7 = vegetační index Simple Ratio 7

SRWI = vegetační index Simple Ratio 850/1240

Sum_Dr1 = vegetační index Sum_Dr1

Sum_Dr2 = vegetační index Sum_Dr2

SWIR = krátkovlnná infračervená část elektromagnetického spektra záření

ÚHÚL = Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem

UK = Univerzita Karlova

VOGELMANN4 = vegetační index VOGELMANN4

1 Úvod

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) je naše druhá hospodářsky nejdůležitější a zároveň druhá nejzastoupenější dřevina. Pro dlouhodobě udržitelné a ziskové hospodaření v lesích je šlechtění dřevin velmi důležitou disciplínou. Pomocí šlechtění se dosahuje genetického zisku v podobě větší produkce či požadované tvárnosti kmene, avšak do budoucna se vzhledem ke klimatické změně může cíl šlechtění změnit především na produkci rezistentních jedinců. Pro tento účel je zásadní zjistit informace o fyziologickém stavu rodičovských stromů a genetickou podmíněnost sledovaných znaků. Výhodou semenných sadů je možnost využití klonálních replikací (ramet), což v rámci statistické analýzy efektivně zpřesňuje odhad genetického rozptylu. Fyziologické parametry mohou být odhadnuty relativně přesně, rychle a levně pomocí metod laboratorní spektroskopie.

V práci měla být původně měřena multispektrální reflektance jehlic borovice lesní, nakonec bylo však přistoupeno k přesnější metodě měření reflektance hyperspektrální. Ta byla na vzorcích jehlic měřena ve třech semenných sadech reprezentujících tři zájmové lokální populace – Plzeňsko, Třeboňsko a Děčínsko. K demonstrování genetických rozdílů byly v práci vyčleněny dvě případové studie – případová studie porovnání proveniencí v semenném sadu Doubrava a případová studie porovnání dvou klonů v semenném sadu Holičkovna.

Data získaná v diplomové práci budou zároveň využita v rámci projektu Iter-Action s podporou MŠMT – Využití genetické variability hyperspektrální odrazivosti ekotypů borovice lesní pro selekci jedinců odolných vůči suchu (2020-2022), na kterém spolupracuje FLD ČZU s PřF UK Praha, University of Florida a University of Baltimore.

2 Cíl práce

Cílem práce je získat informace o geneticky podmíněné variabilitě multispektrální reflektance, kvalitativních parametrech a vývoji roubovanců v semenných sadech borovice lesní (*Pinus sylvestris*). Součástí práce je též genetická evaluace daných ukazatelů.

Výběr rodičů na základě údajů z testů potomstev se obvykle označuje jako zpětná selekce. Odhady těchto odchylek jsou dalším cílem testování potomstev podmíněné genetickou evaluací naměřených dat. Tyto odhady jsou využívány pro budoucí šlechtění a predikci možných zisků ze šlechtění. Do tohoto zažitého vzorce vstupujeme s fyziologickými znaky, které mohou evaluaci zpřesnit a následně také zlevnit. Jako inovativní prvek genetické evaluace budou hodnoceny také fyziologické parametry, a to přímo v semenných sadech. Konkrétně multispektrální reflektance zjišťovaná metodami laboratorní spektroskopie. Tyto informace budou zásadní především vzhledem k fyziologickému stavu roubovanců, přičemž cílíme též na projevy hydrického stresu. Výhodou semenných sadů je možnost využití klonálních replikací (ramet), čímž je v rámci statistické analýzy efektivně zpřesněn odhad genetického rozptylu. Tyto znaky nebyly v kontextu semenných sadů v našich podmínkách ani ve světě dosud studovány.

3 Literární rešerše

3.1 Borovice lesní

3.1.1 Biologie

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) je středně velká jehličnatá dřevina. Běžně dosahuje výšky 23-27 m, výjimečně však může dosahovat i přes 40 m. Obvykle se dožívá až 400 let (Durrant a kol. 2016).

V severním Finsku byly zaznamenány i případy borovic starých přes 800 let (Rantala 2011). Tloušťka kmene dospělé dřeviny se pohybuje většinou mezi 50 až 80 cm, maximální zaznamenaná tloušťka byla 150 cm (Pâques 2013).

Jehlice jsou tuhé a pokryté vrstvou vosku. Vyrůstají z brachyblastů po párech ve svazečku (Rantala 2011). Ve střední Evropě si stromy ponechávají jehlice 2-4 roky, zatímco ve Skandinávii, na Sibiři a v pohoří Altaj to může být 8-9 let. Jehlice jsou dobře adaptovány na sucho i zimu, jejich zanořené průduchy a vosková vrstva slouží jako obrana proti ztrátě vody (Pâques 2013).

Kmen borovice lesní bývá přímý, na extrémních stanovištích spíše křivolaký (Leugnerová 2007). Pro tuto dřevinu je typická oranžová v tenkých kouscích se odlupující kůra v horní části kmene a silná šedohnědá rozpraskaná borka na patě kmene (Durrant a kol. 2016).

Kořenový systém bývá mohutný, tvořený křivým kořenem spolu s kořeny bočními. Hlubší kořenový systém spolu se silnou borkou dělá borovici mimo jiné odolnější vůči lesním požárům (Leugnerová 2007). Nicméně kořeny borovice lesní jsou schopné adaptace na prostředí, a tak na podmáčených a jílových půdách vytvářejí plochý a mělký kořenový systém. Borovice lesní nevytváří adventativní kořeny, proto je oproti smrku náchylnější na špatné vysazení (Rantala 2011).

Podle různé literatury lze rozlišit u borovice lesní až tři typy tvaru korun. První tvar, typický pro oblast Skandinávie a vyšších nadmořských výšek, je konického tvaru. Koruna je úzká připomínající tvar smrku. Druhý typ je širší, na vrcholu zploštělý. Mívá silnější větve a tvarem může připomínat deštník. Je typický pro nižší a střední polohy střední Evropy. Třetí typ má nerovnoměrnou korunu, je

typický pro solitérní stromy na pobřeží, na zemědělské půdě nebo pro velmi nepříznivá stanoviště. Často mívá více kmenů (Pâques 2013).

Borovice jsou jednodomé dřeviny, každý jedinec nese jak samčí, tak samičí šištice. Dále jsou to dřeviny větrosnubné, sprášení probíhá mezi sousedními borovicemi za pomoci větru (Rantala 2011). Šišky dozrávají 2. sezonu po opylení a otevírají se až v předjaří 3. roku, během léta pak prázdné opadávají ze stromů (Leugnerová 2007).

3.1.2 Areál rozšíření a ekologické nároky

Rod borovice je jedním z nejpočetnějších rodů jehličnatých dřevin (Rantala 2011). Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) je nejrozšířenějším zástupcem tohoto rodu a druhým nejrozšířenějším jehličnanem po jalovci obecném (*Juniperus communis*). Areál přirozeného rozšíření borovice lesní se rozkládá přes značnou část Eurasie (Durrant a kol. 2016). Vzdálenost od nejzápadnějšího bodu výskytu v západní části Španělska po nejvýchodnější bod na východě Ruska je 10000 km. Vzdálenost mezi nejsevernějším výskytem ve Skandinávii a nejjižnějším ve španělském pohoří Sierra Nevada činí 3700 km. Zatímco většinu tohoto areálu tvoří souvislé území, existuje i velké množství menších oddělených populací například ve Skotsku, Španělsku, Francii, Bosně, Řecku nebo Turecku (Pâques 2013).

V České republice má borovice lesní původní rozšíření v mezofytiku, roztroušeně se vyskytuje v horských polohách a ojediněle také v termofytiku (Vacek a kol. 2018). Nyní je borovice lesní v českých lesích zastoupena 16,1 %, což jí dělá po smrku ztepilém (*Picea abies*) naší druhou nejrozšířenější dřevinou. Její přirozené zastoupení na našem území je jen 3,4 %, avšak doporučená skladba dosahuje až 16,8 % (Ministerstvo zemědělství 2019). Původní porosty borovice lesní, tzv. reliktní bory, se v ČR vyskytují jen ostrůvkovitě. Taková stanoviště jsou převážně na podloží písčiny sedimentů, hadců, světlé lesy na skalnatých výchozech, balvanitých svazích, sutích, lemech rašelinišť či extrémních podmínkách vápenců. Takto půdně odlišná stanoviště se vyskytují v různých nadmořských výškách, proto tvoří borovice v typologickém systému vlastní stupeň 0 – borová stanoviště, který není tak významně závislý na klimatických podmínkách jako ostatní lesní vegetační stupně (Vacek a kol. 2018).

Borovice lesní je světlomilná pionýrská dřevina, proto dokáže snadno kolonizovat stanoviště narušené různými disturbancemi. Je to na půdní podmínky velmi nenáročná dřevina, navíc má dobrou toleranci vůči suchu a mrazu. Nicméně znečištění atmosféry nebo slané pobřežní větry nesnáší příliš dobře. Na úrodnějších stanovištích je vytlačována konkurenčně zdatnějšími druhy, většinou smrkem nebo listnatými dřevinami (Durrant a kol. 2016). Borovice lesní je tzv. R-stratég, využívá méně konkurenční ekologické niky a nestabilní prostředí, v kterém produkuje velké množství potomků. Jakožto světlomilná dřevina borovice lesní rychle kolonizuje otevřené prostory a disponuje rychlým růstem v mladém věku. Její reprodukční systém umožňuje jedincům na odlehklých místech samosprašení, což dává možnost i takto izolovaným jedincům šířit své potomstvo. (Pâques 2013). Autogamie neboli samosprašení není však mimo takovéto extrémní podmínky výhodná. V dlouhodobém horizontu vede k dominanci homozygotů, ti mívají nižší fitness a často bývají z populace přirozeně selektováni (Tomášková a Kubásek 2017). Produkce semen probíhá u borovice lesní téměř každoročně. Relativně krátká doba mezi generacemi a schopnost šíření pylu i semen na dlouhou vzdálenost přispívá k velké genetické variabilitě této dřeviny (Pâques 2013).

3.1.3 Hospodářský význam

Borovice lesní je jedna z hospodářky nejvýznamnějších dřevin v Evropě, obzvláště pak v severovýchodních státech (Durrant a kol. 2016). V ČR je borovice dnes ve významnosti využití druhá nejdůležitější dřevina za smrkem. Dřevo má výrazně odlišené jádro a běl, je tvrdší i těžší než smrkové, avšak poměrně křehké. Zpracovává se velmi podobně jako to smrkové, buďto na pilařskou kulatinu nebo na vlákninu. Vyrábějí se z něj například telegrafní sloupy, pražce, mosty, dýhy, nábytek či další truhlářská výroba. Jako většina jehličnatých dřevin mohou být borovice využity i jako vánoční stromky. V minulosti se z nich také těžila pryskyřice na výrobu terpentýnu (Štícha a kol. 2017). Borové dřevo je díky vysokému obsahu pryskyřice dobře odolné ve vlhkých podmínkách, proto se hojně používá pro vodní stavby a výdřevu v dolech (Leugnerová 2007). Velké množství pryskyřice však znesnadňuje moření, barvení a lakování (Štícha a kol. 2017). V neposlední řadě slouží borové dřevo i jako výhřevné palivo (Leugnerová 2007).

3.1.4 Vliv sucha

V posledních letech postihuje ČR stále častěji extrémní klima, které je spojeno zejména s vysokými teplotami a srážkovým deficitem, což v kombinaci vede ke snižování hladiny spodní vody. Tyto změny mají výrazný vliv na zdravotní stav dřevin, včetně borovice, a na jejich zvýšenou náchylnost vůči houbovým patogenům nebo podkornímu hmyzu. Ty se tak mohou výrazně podílet na jejich prosychání až odumírání (Pešková a kol. 2016). Situace v ČR není v Evropě jedinečná, podobné problémy mají i ostatní evropské státy. Případy zvýšeného odumírání borovic lesních z důvodu sucha zaznamenávají i ve Švýcarsku nebo Německu. Evropské lesní ekosystémy byly doposud relativně odolné výkyvům v dostupnosti vody, po naplnění určitého prahu však dochází ke značnému navýšení počtu odumírajících stromů. To poukazuje na nelineární vztah mezi suchem a odumírání dřevin (Senf a kol. 2020).

Během posledních let přibývá vedle nahodilých těžeb smrku i nahodilých těžeb borovice, a to i na stanovištích, kde měla doposud borovice optimální podmínky pro růst. Důvodem je již zmíněné sucho spolu s dalšími navazujícími faktory. Hospodářské borové porosty bude nejspíš nutno do budoucna nějakým způsobem podpořit, aby byly schopny více odolávat dlouhotrvajícím období sucha (Eber 2019).

Jedním ze způsobů, jak dosáhnout větší odolnosti porostů nejen proti suchu, je výsadba smíšených porostů namísto monokultur. Pozitivní vliv na odolnost borovice lesní vůči suchu se zdá mít kombinace s bukem lesním nebo dubem zimním (Pardos a kol. 2020). Dále je možné snížit zakmenění a poskytnout borovicím větší prostor nejen pro tvorbu asimilačního ústrojí, ale i kořenového systému. Pravidelné uvolňování korun ve všech vývojových stádiích zaručuje větší vitalitu, mělo by se však jednat o geneticky kvalitní porosty (Eber 2019).

3.1.5 Provenience a ekotypy borovice lesní

Borovice lesní je díky svému rozsáhlému areálu rozšíření jednou z nejlépe prostudovaných lesních dřevin. Je to dřevina velmi proměnlivá a dobře adaptovaná na celou řadu různých podmínek prostředí. Lze u ní relativně dobře vyhranit různé

klimatypy a ekotypy (Šindelář a kol. 2007). Oproti tomu termín provenience odkazuje na specifickou geografickou polohu uvnitř areálu přirozeného rozšíření. Rozdíly mezi proveniencemi mohou být velmi výrazné, zejména u druhů, které mají velmi rozsáhlý přirozený areál rozšíření. U většiny proveniencí se během mnoha generací vytvořily adaptace na lokální podmínky, což je dělá v daných podmínkách konkurenčně zdatné. Rozdíly mezi proveniencemi jsou genetického původu, což bylo prokázáno tzv. provenienčními experimenty, které spočívají v porovnávání růstu několika proveniencí stejného druhu na experimentálních plochách (White a kol. 2007).

První experiment s proveniencemi borovice lesní byl uskutečněn ve Francii už v roce 1820 s dobrými výsledky baltské borovice. Adam Schwappach koordinoval první pokus IUFRO v letech 1907 a 1908, kde bylo použito 13 oddílů osiva borovice vybraného ze Skotska, Švédska, Francie, Belgie, Nizozemska, Německa, Československa, Polska, Lotyšska, Bulharska a Ruska. Nejméně osm z těchto proveniencí bylo vysazeno na dvaceti zkusných plochách kooperujících institucí, z toho devět těchto ploch existuje dodnes. Engler ve Švýcarsku souběžně vytvořil podobný experiment v ještě větším rozsahu, který přinesl podobné výsledky. Tyto rané pokusy sice nebyly dostatečně randomizované a replikované, nicméně jsou jedinečné svým stářím a velikostí experimentálních ploch, která umožňuje přepočítat zásoby vztažené k ploše. Wiedeman v roce 1930 z pokusu IUFRO stanovil, že rozdíly mezi proveniencemi jsou významné, a že provenience pocházející z podmínek extrémního klimatu nejsou vhodné pro použití ve střední Evropě. Jako nejlepší provenience pro širší hospodářské využití byly stanoveny ty z Belgie a severního Polska. Giertych došel v roce 1979 ke stejnému závěru, ale navíc zdůraznil, že domácí provenience si ve většině vedou nejlépe nebo minimálně nadprůměrně (Pâques 2013).

V ČR se rozlišují dva hlavní ekotypy borovice lesní na základě LVS, respektive nadmořské výšky, a to tzv. náhorní ekotyp vyšších poloh tzv. borovici pahorkatin. Oba typy jsou charakterizovány vlastnostmi kmene, koruny, růstem a adaptací na přírodní podmínky. V lesnické praxi se však rozlišují spíše regionální ekotypy. Mezi hlavní patří borovice jihočeská (též třeboňská), šumavská (stožecká), polabská, týništská (východočeská), západočeská, severočeská,

svratecká, heraldická, záhorská nebo karpatská. Všechny tyto regionální populace se vyznačují svými specifickými vlastnostmi, většinou různými růstovými charakteristikami, nebo také jakostí dřeva. U některých regionálních populací lze hovořit i jako o nezáměrně vzniklých kulturních odrůdách, jsou sice adaptovány na lokální podmínky, jejich původ však většinou není známý (Šindelář a kol. 2007). Míra genetické variability mezi populacemi borovice lesní v ČR je relativně malá. Významnější se zdá být diferenciace na vnitropopulační úrovni, s čímž se shodují i data z dalších evropských výzkumů (Máchová a kol. 2016).

Tyto genetické rozdíly mezi ekotypy se dají lehce demonstrovat na rytmu růstu v provenienčních pokusech. Například náhorním borovicím klesá dramaticky mezi 6. až 9. rokem výškový přírůst, poté však intenzivně stoupá, a to až natolik, že do věku 40 let předrůstají ostatní. Naopak borovice pionýrského typu se drží na prvních místech ve výškovém přírůstu v mladém věku, od 20 let začínají oproti ostatním prudce zaostávat (Kaňák 2002).

Kalela na základě pokusů existujících na začátku 20. století došel k závěru, že čím teplejší a více oceánské klima původu provenience, tím více jsou stromy náchylné k poškození mrazem, sněhem a napadení houbovými patogeny v lesních školkách. Čím více má strom tlustší větve, tím má pokroucenější kmen. Čím má strom větší korunu, tím má menší hustotu dřeva a větší přírůst. Čím má provenience menší úmrtnost semenáčků, tím méně má pak dospělý strom deformací kmene a jeho výškový přírůst je méně narušován změnou podmínek (Pâques 2013).

3.2 Šlechtění lesních dřevin

3.2.1 Princip šlechtění lesních dřevin

Šlechtění lesních dřevin pozměňuje selekcí genotypové složení populace stromů tak, aby stromy lépe vyhovovaly cílům člověka. Snaží se zejména o ekonomickou efektivnost. Ta spočívá převážně v maximalizaci produkce za časovou jednotku a pokud možno s co nejmenšími náklady (Alan 2020).

Mimo klasického hospodářského cíle šlechtitelských programů, které se zaměřují zejména na produkci dřevní hmoty pro dřevozpracující průmysl, existují také další, méně evidentní, jako například kultivace vánočních stromků nebo produkce stromů k zalesnění nelesních ploch probíhající na Islandu (Eriksson a kol. 2006).

Pro dlouhodobě udržitelné a ziskové hospodaření v lesích je šlechtění lesních dřevin velmi důležitou disciplínou, která by se v praxi pro dosažení maximální efektivity měla doplňovat se správnou výchovou porostů. Šlechtění lesních dřevin využívá genetické principy, na základě kterých vybírá nadprůměrné jedince pro zakládání semenných sadů nebo rovnou produkci dalších populací (Alan 2020).

Před začátkem každého šlechtitelského programu musí být rozhodnuto, které znaky dřeviny je požadováno vylepšit. Čím více jich je vybráno, tím je šlechtění jedinců s takovými znaky obtížnější. Dále je důležité stanovit genetickou variabilitu těchto znaků v populaci a zároveň jejich dědičnost (Eriksson a kol. 2006).

3.2.2 Semenné sady

3.2.2.1 Obecné informace

Semenné sady jsou výsadby dřevin založené za účelem sběru reprodukčního materiálu (Kaňák a kol. 2008). Existují 2 druhy semenných sadů podle způsobu jejich založení. V ČR je většina semenných sadů založena z roubovanců vybraných klonů, tedy vegetativním způsobem. Možné je i založení z řízkovanců. Dále existují ještě tzv. jádrové sady, které jsou založeny výsadbou generativního potomstva rodičovských stromů (Rambousek 2003). Jádrové sady jsou vhodné zejména pro

rychle plodící dřeviny, v ČR existuje pouze jeden pro borovici pokroucenou (Kaňák a kol. 2008).

K roku 2001 bylo v celé ČR registrováno 130 semenných sadů. Semenné sady borovice lesní u nás převládají nad ostatními semennými sady ostatních dřevin svým počtem i souhrnnou výměrou. Druhou příčku zaujímá modřín opadavý, třetí smrk ztepilý. Mezi listnatými dřevinami jsou nejhojnější semenné sady buku lesního. První semenný sad na našem území vznikl pro modřín opadavý již v roce 1958, a to na území dnešní LS Šternberk LČR (Rambousek 2003).

Semenné sady se zakládají za účelem získání geneticky hodnotného osiva v dostatečném množství, navíc s relativně snadnou dostupností pro sběr úrody. Dalším záměrem pro založení semenného sadu může být umožnění vzájemného opylení kvalitních jedinců, mezi kterými by v přirozených podmínkách kvůli jejich vzájemné vzdálenosti opylení proběhnout nemohlo. Vedle hospodářského významu hrají semenné sady také významnou roli při záchraně genofondu ohrožených populací (Kaňák a kol. 2008). V neposlední řadě může jít o produkci rezistentních jedinců vůči abiotickým a biotickým činitelům (Ivanek a kol. 2010). Poslední zmíněné záměry v současnosti díky klimatickým změnám ještě více nabývají na důležitosti.

Všechny semenné sady musí být oplocené, a to především kvůli tomu, aby se předešlo škodám způsobených zvěří. Dále je doporučeno umístit do sadu chatku k uskladnění drobné mechanizace a poskytnutí úkrytu pro pracovníky v případném nepříznivém počasí (Kaňák a kol. 2008). Semenné sady musí být udržované tak, aby byly dobře přístupné pro obhospodařování. Mezi údržbu patří i odborně vedené tvarování, ošetření rezných ran a včasné odstranění materiálu, který byl odřezán. Dále je potřeba vést evidenci mortality, fruktifikace, zajistit doplnění uhynulých ramet a pravidelně kontrolovat růst podnoží (Ivanek a kol. 2010).

3.2.2.2 Semenné sady 1. generace

V prvotní fázi šlechtitelských programů se využívá pouze individuální fenotypová selekce. Informace o genetické kvalitě většinou není známa. Na této bázi jsou založeny všechny semenné sady 1. generace a většina semenných sadů v ČR (Ivanek a kol. 2010).

Při výběru klonů pro semenný sad 1. generace je nutno respektovat hranice PLO, povolené přenosy reprodukčního materiálu v rámci LVS a ekotyp dřeviny. Rouby je možno sbírat z jedinců uznaných jako kvalifikovaný zdroj reprodukčního materiálu. Odběr rouby probíhá většinou z horní třetiny stromu v době vegetačního klidu. Velmi důležitá je evidence každého odebraného rouby a po roubování i roubovance. 2–3 roky po roubování lze začít s výsadbou roubovanců. Jako minimální doporučený počet pro semenný sad 1. generace je uváděn počet 50 klonů. Umístění semenného sadu by mělo odpovídat ekologickým nárokům dřeviny, výhodný rovinný terén, který usnadňuje použití mechanizace. Osvědčily se také slunné polohy. Samotná výsadba musí probíhat podle projektu výsadby, rozmístění ramet (skupina potomků získaná vegetativním způsobem ze stejného výchozího jedince) na ploše je velmi důležité, aby stejné klony byly co nejdále od sebe (Kaňák a kol. 2008). Výsadba rovněž probíhá v pravidelném sponu, aby se dosáhlo dobrého vzájemného opylení jedinců různých klonů a zároveň bylo co nejvíce omezeno sprášení stromy mimo semenný sad (Ivanek a kol. 2010). Semenný sad lze uznat, pokud v něm zůstal zachován potřebný počet klonů v dobrém zdravotním stavu a u více jak poloviny klonů nastoupila plodnost (Kaňák a kol. 2008).

Na základě fenotypového výběru nelze vzhledem k nezanedbatelnému vlivu prostředí dosáhnout vysoké míry genetické odezvy. Pro dosažení většího šlechtitelského efektu je nutno získat informace o genetické kvalitě klonů v semenném sadu. Pro tento účel se využívají experimentální testy potomstev (Ivanek a kol. 2010).

3.2.2.3 Testování potomstev semenných sadů

Aby se ověřilo, zda semenné sady opravdu plní svoji funkci, zjišťuje se, zda jejich potomstvo odpovídá kritériím výběru, respektive jestli jsou tato kritéria dědičně podmíněna (Ivanek a kol. 2009). Toho se dosahuje pomocí paralelně založených testů potomstev, které jsou realizovány v rámci dlouhodobých šlechtitelských programů. Na základě vyhodnocení testů potomstev lze odhadnout šlechtitelské hodnoty rodičovských stromů pro zpětnou selekci a šlechtitelské hodnoty jejich potomků pro zakládání semenných sadů vyšší generace. (Češka

2014). Testovaný semenný sad poté může být uznán jako zdroj testovaného reprodukčního materiálu, po otestování je ho také možno využít při zakládání semenných sadů vyšší generace (Kaňák a kol. 2008).

Ověřovací genetické výsadby mohou být zakládány na různých plochách. Mezi hlavní patří lesní pozemky, pozemky lesních školek nebo již nevyužívané zemědělské půdy. Tyto plochy by však pro testy potomstev měly být co nejvíce homogenní (Češka 2014).

Testovat lze dvojím způsobem, buď se testuje celý semenný sad jako celek nebo se testují jen jednotlivé klony. Pozitivně testované semenné sady nebo vyselektované směsi klonů pak slouží pro produkci testovaného reprodukčního materiálu. U testování za účelem založení semenného sadu vyšší generace se buďto testují potomstva jednotlivých klonů z kontrolovaného křížení vybraných klonů, tzv. plonsterská potomstva, nebo potomstva z jednotlivých ramet, kde známe pouze mateřský strom, jedná se o tzv. polonsterská potomstva (Kaňák a kol. 2008).

3.2.2.4 Semenné sady 1,5 generace

Pomocí selekce nejlepších jedinců z kandidátské populace se dosáhne genetického zisku, to však na druhou stranu znamená ztrátu genetické diverzity. V rámci šlechtitelských populací se podle počtu selekčních cyklů n rozlišují semenné sady n . generace. Semenné sady 1,5 generace jsou zvláštní případ, tyto semenné sady obsahují pouze klony vybrané na základě testování polonsterských potomstev klonů ze semenných sadů 1. generace, známe tedy u nich pouze mateřský strom (Ivanek a kol. 2010). Semenný sad 1,5 generace lze získat nejen vysazením takto otestovaných klonů, ale také odstraněním geneticky nevhodných klonů ze semenného sadu 1. generace (Kaňák a kol. 2008). Tento způsob se nazývá genetická probírka, je však potřeba důsledně zvážit, zda se její použití opravdu vyplatí. Nejen, že se sníží produkce semen a navýší náklady na likvidaci, ale také se naruší prostorové schéma, což může vést ke změnám v reprodukční dynamice sadu (Ivanek a kol. 2010).

3.2.2.5 Semenné sady vyšších generací

Z pozitivně testovaných klonů plnosesterských lze zakládat semenné sady vyšších generací. Pro možné použití klonů z polosesterských generací by musely být nejprve pomocí genetických markerů zjištěny otcovské klony (Kaňák a kol. 2008). Touto alternativu umožňuje tzv. koncept Breeding without Breeding (šlechtění bez šlechtění), ten využívá právě polosesterských potomstev z volného opylení, testování je tak značně zjednodušeno. Rodokmen testovaných jedinců je stanoven s využitím otisku DNA otcovského příspěvku nebo úplnou rodokmenovou rekonstrukcí (Češka 2014).

Výsadba složená výhradně z pozitivně ověřených klonů představuje semenný sad 2. generace, ve světě se lze setkat i se semennými sady až 6. generace (Ivanek a kol. 2010).

3.2.3 Budoucnost šlechtitelských programů

Jedním ze zásadních problémů šlechtění lesních dřevin je, že charakteristiky, které jsou cílové u dnešních šlechtitelských programů, nemusí již v době obmýtlí vysazovaných porostů přinášet požadovanou hodnotu. Další velkou nejistotou této disciplíny jsou změny klimatu. Během doby obmýtlí se mohou změnit postupy při výchově porostů, druhová stavba lesů, hospodářské využití dřevin atd. Klimatická změna je přesto největším problémem současnosti, na rozdíl od šlechtění obilnin není u dřevin možné měnit kultivary v rámci let. Efektivní šlechtitelské programy by proto měly být plánovány taky, aby byly schopné přizpůsobit se nejen budoucím změnám ve šlechtitelských cílech, ale především právě klimatickým změnám (Eriksson a kol. 2006).

3.3 Fyziologie lesních dřevin ve šlechtění

Šlechtitelské programy a programy pro záchranu genových zdrojů lesních dřevin jsou základem dlouhodobě udržitelného hospodaření v lesích a managementu chráněných území. Fyziologické znaky mohou být inovativním prvkem využitelným pro evaluaci a predikci možných zisků ze šlechtění. U nás i ve světě je toto téma předmětem mnoha nových výzkumů.

Mezi příklady předmětů nových výzkumů tohoto tématu se řadí třeba zkoumání genové exprese dehydrinů ekotypů smrku ztepilého (*Picea abies*) vztahující se k výkyvům počasí. U smrku ztepilého se dají rozlišit tři hlavní ekotypy v závislosti na tom, z jaké nadmořské výšky pocházejí. Fyziologické optimum pro každý ekotyp se může díky probíhající klimatické změně postupně posouvat, zejména co se týče dostupnosti vody. Efektivní hospodaření s ní může představovat zásadní adaptaci. Proteiny, které slouží ke zmírnění nepříznivých účinků dehydratace se nazývají dehydriny. Vzory genové exprese dehydrinu se jeví jako vhodný marker pro hodnocení stresu rostlin. Tato studie odhalila významné rozdíly v genetických expresích dehydrinu mezi ekotypy (Čepl a kol. 2020).

Dalším příkladem nově realizovaného výzkumu může být aktuální studium fenoménu ohýbání větví odumřelých stromů. V tomto výzkumu byla zaznamenána synchronizovaná reverzibilní změna úhlů sklonu větví smrku pichlavého (*Picea pungens*) pomocí bezpilotního leteckého laserového skenování. Matice bodových mračen jednotlivých stromů byly využity k tvorbě zobecněného lineárního modelu klasifikujícího případné morfologické změny. Sklon úhlů větví hraje zásadní roli ve schopnosti zachycení slunečního záření, tudíž ovlivňuje účinnost fotosyntézy. Změna úhlu sklonu u větví mrtvých stromů může být důkazem funkčních mykorhizálních propojení mezi kořeny živých a mrtvých stromů. Schopnost měnit sklon větví u živých stromů může naopak znamenat větší konkurenceschopnost (Slavík a kol. 2020).

Posledním zmíněným příkladem může být výzkum umělé hybridizace a schopnosti přežití u rodu jedle (*Abies*). Ve studii byl zkoumán vliv hybridizace na schopnost přežití jedlí. Bylo porovnáno 7 čistých nekřížených druhů jedle s 21 hybridy. Výsledky potvrdily, že vyšší míra hybridizace u jedlí opravdu může vést k vyššímu přežití (Stejskal a kol. 2016).

3.4 Fotosyntetické pigmenty

Rozlišují se tři základní skupiny fotosyntetických pigmentů: chlorofyly, karotenoidy a fykobiliny (pouze u některých sinic a řas). Chlorofyly a karotenoidy jsou uloženy v tylakoidních membránách uvnitř pigment-proteinových komplexů tzv. fotosystémů. Při oxgyenní fotosyntéze je energie fotonů slunečního záření využita pro tvorbu organických sloučenin, které jsou bohaté na energii, z látek anorganických. Ty představuje především oxid uhličitý, ale také voda. Voda v procesu slouží jako donor elektronů a protonů, kyslík je vedlejším produktem fotosyntézy a je uvolňován do atmosféry. Fotosyntéza dokáže energeticky využít jen 40 % slunečního záření. Této části se říká fotosynteticky aktivní záření a zhruba odpovídá viditelnému světlu (Tomášková a Kubásek 2016). Zelené světlo je odraženo chlorofylem obsaženým v chloroplastech v palisádových buňkách. Modré a červené světlo je absorbováno a využito chlorofylem pro fotosyntézu (Roman a Ursu 2016).

3.4.1 Fotosystémy

Vnější části fotosystémů zachycují fotony a předávají energii do reakčního centra. Reakční centrum se nachází v jádru fotosystému, jeho součásti slouží k přeměně energie fotonů na chemickou energii. Rozlišují se dva typy fotosystémů: fotosystém I, který absorbuje nejvíce elektromagnetického záření kolem 700 nm a fotosystém II s největší absorpcí elektromagnetického záření kolem 680 nm. Zelené rostliny využívají sériového zapojení obou fotosystémů (Tomášková a Kubásek 2016).

3.4.2 Chlorofyly

Chlorofyly jsou schopny absorpce fotonů červené a modré části viditelného elektromagnetického záření, proto se člověku jeví jako zelené, v této oblasti mají minimální absorpci (Pavlová 2006). Modré a červené světlo je ve fotosyntéze nejúčinnější, rostliny však částečně využívají i zelené a žluté světlo. Jedním z důvodů je přítomnost dalších fotosyntetických pigmentů. (Tomášková a Kubásek 2016). Chlorofyl *a* a chlorofyl *b* se dají považovat za nejdůležitější

z fotosyntetických pigmentů, protože jsou zásadní pro konverzi energie ze záření na energii chemickou, která pohání biosféru (Richardson a kol. 2002).

3.4.2.1 Chlorofyl *a*

Chlorofyl *a* je základní molekulou fotosystémů a hlavní součástí reakčních center. Je schopen rozdělení náboje a předání elektronu jiné molekule. Konkrétně je toho schopna dvojice chlorofylů nazývaná specifický pár (Tomášková a Kubásek 2016).

3.4.2.2 Chlorofyl *b*

Chlorofyl *b* patří mezi pigmenty schopné předávat excitaci (excitovaný stav) směrem ke specifickému páru. Chlorofyl *b* je produktem řízené oxidace chlorofylu *a*. Chlorofyly dokáží mezi sebou přenášet energii s téměř 100 % účinností (Tomášková a Kubásek 2016).

3.4.3 Karotenoidy

Karotenoidy se dají rozdělit na dvě skupiny: bezkyslíkaté karoteny a kyslíkaté xantofyly. Oba typy karotenoidů převládají v chromoplastech, což jsou plastidy, které nemají fotosyntetickou funkci, dávají barvu především plodům a květům. Část karotenoidů se však nachází i v chloroplastech (Tomášková a Kubásek 2016).

Karotenoidy na rozdíl od chlorofylů absorbují elektromagnetické záření v jeho fialové a modré části, člověku se jeví jako žluté až oranžové. Karotenoidy hrají významnou roli v ochraně rostliny v případech, kdy na list dopadá více energie, než je fotosyntetický aparát schopen využít. Nadbytek energie by totiž mohl vést k poškození fotosyntetického aparátu. (Pavlová 2006). Stres způsobený nadměrnou ozářeností se nazývá oxidativním stresem. Stav, při kterém dochází k nadměrné ozářenosti asimilačního aparátu, nastává v podmínkách sucha, mrazu, či nedostatku CO₂ v listu vlivem zavřených průduchů (Tomášková a Kubásek 2016). Dále jsou karotenoidy významné i pro absorpci energie pro fotosyntézu (Pavlová 2006). Dokáží předávat energii chlorofylům a podílet se tak na procesu fotosyntézy, účinnost přenosu energie je ale oproti chlorofylům mnohem nižší (Tomášková a Kubásek 2016).

3.4.4 Pigmenty a reflektance

Protože obsah fotosyntetických pigmentů v asimilačních orgánech odpovídá podmínkám prostředí, je často používán jako indikátor stresu. Snížené koncentrace chlorofylu mohou snižovat fotosyntetický potenciál a tím pádem i primární produkci (Croft a kol. 2014). Standardní metody pro determinaci, zjištění množství a analýzu vlastností chlorofylu vyžadují destrukci vzorků během procesu, navíc jsou relativně časově náročné. Existují však také nedestruktivní optické metody, které jsou založené na reflektanci nebo absorbanci neporušeného listu nebo jehlice. Optické metody jsou navíc rychlé a využitelné také v terénu (Richardson a kol. 2002). Nedestruktivní měření v terénu dovoluje opětovné snímání vzorku, a tak i sledování postupného vývoje jeho vlastností (Gamon a Surfus 1999).

Množství záření odraženého, propuštěného a pohlceného listem nebo jehlicí je převážně podmíněno koncentrací fotosyntetických pigmentů. Obsah těchto pigmentů a obsah některých dalších látek může být odhadnut ze spektrální odrazivosti vegetace naměřené pomocí spektrometru v laboratorních podmínkách nebo analýze obrazových dat získaných pomocí metod dálkového průzkumu země (Croft a kol. 2014).

Informace o fyziologickém stavu rostlin může podobně poskytnout také například analýza fluorescence chlorofylu (Čepl a kol. 2016).

3.5 Spektroskopie

Spektroskopie je fyzikální obor, který se zabývá vlastnostmi spekter elektromagnetického záření při interakci se zkoumaným vzorkem (Albrechtová a kol. 2017) Spektrometr je optický přístroj, který využívá jiné detektory než fotografický film k měření distribuce záření v určité oblasti vlnových délek. Spektrometr je druh spektrometru, který dokáže měřit vyzařovanou energii (záření i ozáření) zdroje každé vlnové délky skrz spektrum. (ASD Inc. 2010).

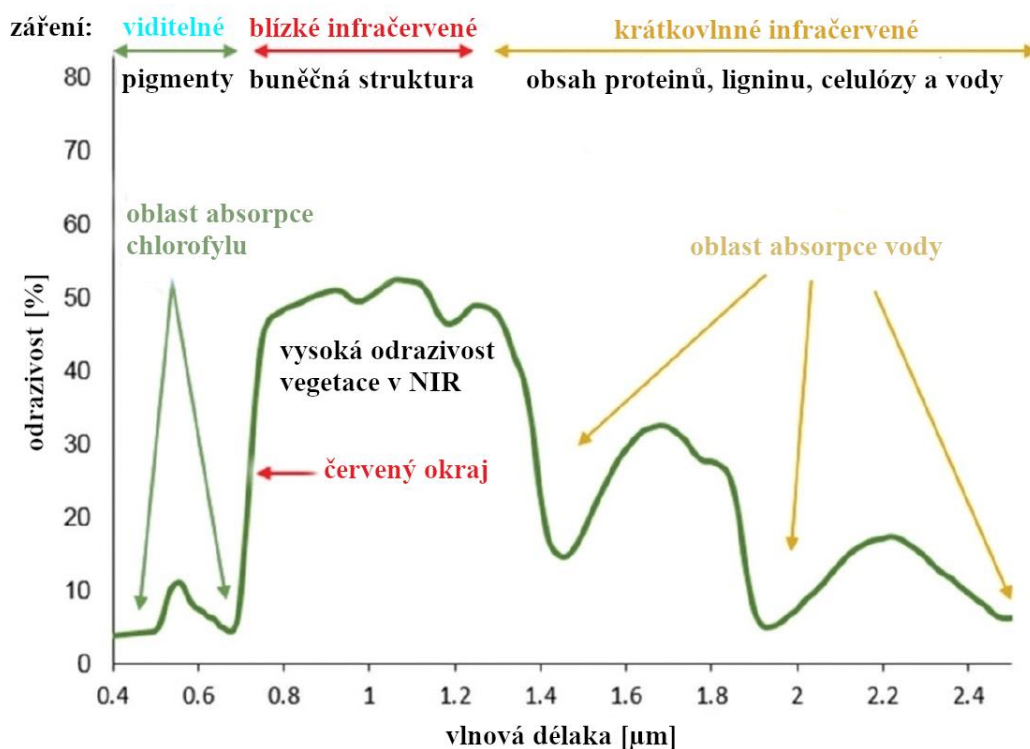
Laboratorní spektroskopie nevyužívá obrazová data, ale jednotlivé spektrální křivky zkoumaných objektů, které jsou získávány měřením pomocí laboratorních spektrometrů (Albrechtová a kol. 2017).

3.5.1 Multispektrální a hyperspektrální data

Rozdíl mezi multispektrálními a hyperspektrálními daty spočívá v šířce měřených spektrálních pásem, a především v jejich souvislosti. Multispektrální data zahrnují menší počet relativně širokých (desítky – stovky nm) spektrálních intervalů, mezi kterými jsou mezery, tudíž na sebe nenasazují. Hyperspektrální data obsahují mnohem užší pásma (3-15 nm), kterých bývají stovky a navazují na sebe bez přerušování. Přesnější hyperspektrální data jsou nezbytná například pro určení pozice inflexního bodu červeného okraje (RED EDGE), který se používá pro posuzování fyziologického stavu vegetace (Albrechtová a kol. 2017).

3.6 Křivka spektrální odrazivosti

Spektrální chování různých povrchů se dá popsat pomocí křivky spektrální odrazivosti, ta zobrazuje reflektanci v celém senzorem nasnímaném spektru vlnových délek. V některých intervalech vlnových délek, například ve viditelném záření, je možné, že různé objekty odráží podobné množství energie a jejich křivky spektrální odrazivosti se tak v těchto intervalech překrývají. Proto je výhodné využívat i další intervaly, v kterých jsou už spektrální vlastnosti objektů odlišné. Spektrální křivku odrazivosti lze měřit pomocí spektrometru (Albrechtová a kol. 2017). Spektrální vlastnosti vegetace jsou vyobrazeny na obrázku 1 pomocí křivky spektrální odrazivosti vegetace.



Obrázek 1: Křivka spektrální odrazivosti vegetace s rozdělením jednotlivých prvků zodpovědných za odrazivost v jednotlivých částech elektromagnetického spektra s vyobrazením červeného okraje (Roman a Ursu 2016 - přeloženo).

3.7 Spektrální reflektance vegetace

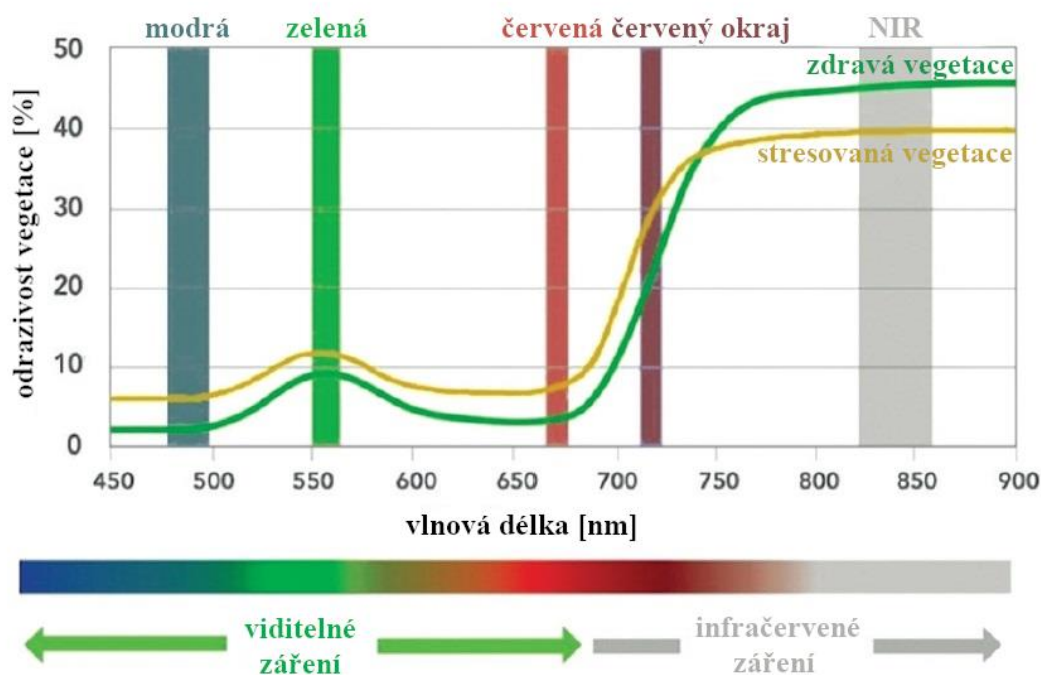
Obsah pigmentů, vody, dusíku a stavební komponenty buněk (lignocelulóza) mají na odrazivost (reflektanci) a další optické vlastnosti asimilačních orgánů podstatný vliv (Ustin a Gamon 2010). Konvenční metody zjišťování těchto biochemických znaků listů a jehlic jsou pracné a především nákladné. Proto je výhodné použití kvantitativních metod spektroskopie k modelování vztahů mezi spektrálními vlastnostmi asimilačního aparátu a obsahem chlorofylu, dusíku, ligninu, celulózy nebo i taninů (Lhotáková 2013).

Absorpce a odrazivost rozdílných vlnových délek záření u vegetace, jak již bylo zmíněno, má na svědomí buněčná struktura asimilačního aparátu. Zdravé listy a jehlice absorbují 70–90 % viditelného záření v jeho modré (kolem 450 nm) a červené (kolem 670 nm) části. Naopak většinu zelené části viditelného záření (kolem 533 nm) odrážejí, proto se lidskému oku jeví zelené (Roman a Ursu 2016). Konkrétně chlorofyl *a* má maximální absorpci v červené oblasti spektra elektromagnetického záření kolem 642 nm a chlorofyl *b* kolem 626 nm. V modré

oblasti se různí autoři zacházejí, jedni uvádějí pro maximum absorpce v modré části spektra hodnoty kolem vlnových délek 430 nm pro chlorofyl *a* a 450 nm pro chlorofyl *b* (Albrechtová a kol. 2017), zatímco jiní uvádějí hodnoty kolem vlnových délek 372 nm pro chlorofyl *a* a 392 nm pro chlorofyl *b* (Milne a kol. 2015). Spektrální projevy dalších pigmentů jsou většinou maskovány absorpcí chlorofylu. Absorpce elektromagnetického záření karotenoidy se projevuje v oblasti kolem 450 nm, obsah dalších pigmentů se projevuje zejména, pokud je obsah chlorofylu snížený, což se děje především na podzim nebo při vystavení rostliny stresu (Albrechtová a kol. 2017). Oblasti vysoké absorpce elektromagnetického záření chlorofylem jsou vyobrazeny na obrázku 1.

Vlnové délky v NIR (blízké infračervené) části elektromagnetického záření asimilačním aparátem převážně procházejí a jsou rozptýleny mezofylem (asimilačním pletivem). Stres u rostlin značně pozmění jejich spektrální vlastnosti, hodnoty reflektance viditelné části elektromagnetického spektra od přibližně 530 nm do 670 nm se zvyšují. To se děje především díky změně ve složení pigmentů v listech nazývaných jako chloróza. Dochází ke žloutnutí díky dominanci karotenoidů nad chlorofyly. Změny v odrazivosti stresovaných rostlin lze sledovat i v NIR části elektromagnetického záření (Roman a Ursu 2016). Rozdíly ve spektrální odrazivosti mezi zdravou a stresovanou vegetací jsou vyobrazeny pomocí křivek spektrální odrazivosti vegetace na obrázku 2.

Významné oblasti absorpce elektromagnetického záření vodou obsaženou ve vegetaci, se nacházejí kolem 1450 nm a 1950 nm, obsah vody se také nepřímo projevuje reflektancí kolem 550 nm v zelené oblasti elektromagnetického spektra (Kureel a kol. 2021). Oblasti vysoké absorpce elektromagnetického záření vodou obsaženou ve vegetaci je možno vidět na obrázku 1.



Obrázek 2: Křivka spektrální odrazivosti zdravé a stresované vegetace ve viditelné a NIR části elektromagnetického spektra (Roman a Ursu 2016 - přeloženo).

3.7.1 Vegetační indexy

Zatímco odrazivost viditelné části elektromagnetického záření může být snadno vizuálně interpretována, k interpretaci zbytku odraženého elektromagnetického záření je zapotřebí rozdělení do intervalů a formulace matematických výrazů (Roman a Ursu 2016). Právě intervaly vlnových délek, které odpovídají absorpčním minimům či minimům sledované látky bývají základem pro formulaci vegetačních indexů (Albrechtová a kol. 2017). Vegetační indexy jsou ve většině případů odvozeny z dat odrazivosti v RED (interval červené viditelné části spektra) a NIR části elektromagnetického záření. Fungují na bázi kontrastu mezi vysokou absorpcí chlorofylu v RED a vysokou reflektancí mezofylu v NIR části elektromagnetického záření (Roman a Ursu 2016).

Empirické vegetační indexy jsou velmi populární a přímou metodou odhadování obsahu chlorofylu z odrazivosti. Tyto indexy jsou formulovány poměrem vlnových délek, které jsou citlivé na obsah určitého pigmentu, látky nebo specifickou vnitřní strukturu listu (Croft a kol. 2014). K vlastnímu vyhodnocení obsahu chlorofylu v asimilačním aparátu využívají vegetační indexy kombinace odrazivostí z několika spektrálních pásem (Klem a kol. 2014). Charakteristiky

spektrální odrazivosti jehlic kvantifikované vegetačními indexy mohou přiblížit fyziologický stav stromu, porostu nebo populace (Čepl a kol. 2018). Vegetační indexy reflektance mohou odhadovat obsah chlorofylu dokonce přesněji než při měření absorpce (Richardson a kol. 2002).

Vegetační indexy vyjadřují vztah mezi reflektancí v intervalu červené viditelné části spektra – RED (600–700 nm) a v blízké infračervené části spektra – NIR (700–900 nm). Indexy se dají dělit do různých skupin, nejznámější a nejpoužívanější jsou tzv. poměrové indexy (Dobrovolný a kol. 2001). Velmi důležitým bodem pro výpočet některých vegetačních indexů je pozice inflexního bodu červeného okraje (RED EDGE) (Albrechtová a kol. 2017)

3.7.1.1 Poměrové indexy

Tyto indexy dávají do vztahu jednoduchý nebo normalizovaný poměr odrazivosti povrchů v RED a NIR (Dobrovolný a kol. 2001). Mezi základní a nejčastěji používané poměrové indexy patří:

Jednoduchý poměrový vegetační index: $RVI = \frac{NIR}{RED}$

Normalizovaný diferenční vegetační index: $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$

3.7.1.2 Ortogonální indexy

Ortogonální indexy jsou lineární kombinací původních pásem multispektrálního obrazu. Mezi tyto indexy patří například index PVI (perpendicular vegetation index), pomocí kterého lze do určité míry rozlišit odrazivost vegetace a půdního substrátu. Je proto důležitý zejména při využití metod dálkové průzkumu země a zpracování obrazových hyperspektrálních dat (Dobrovolný a kol. 2001).

3.7.1.3 Inflexní bod křivky v oblasti červeného okraje (RED EDGE)

V oblasti vlnových délek 680–800 nm, známé jako červený okraj, nastává náhlá změna v odrazivosti vegetace. Je způsobena vysokou absorpcí viditelné části spektra chlorofylem a nízkou absorpcí blízké infračervené části spektra buněčnými

strukturami. RED EDGE je hojně využíván při identifikaci vegetace ze snímků pořízených pomocí metod dálkového průzkumu země. Bod maximálního sklonu ve spektru odrazivosti vegetace udává polohu RED EDGE. Poloha RED EDGE a obsah chlorofylu spolu silně korelují, je proto využívána jako indikátor pro řadu environmentálních faktorů ovlivňujících asimilační aparát, jako jsou stres, sucho a buněčné stárnutí. K odhadu polohy RED EDGE se využívají různé numerické metody (Baranoski a Rokne 2005). RED EDGE je vyznačen na křivce spektrální odrazivosti vegetace na obrázku 1 i obrázku 2 v českém překladu – červený okraj.

3.7.2 Spektrální reflektance a heritabilita

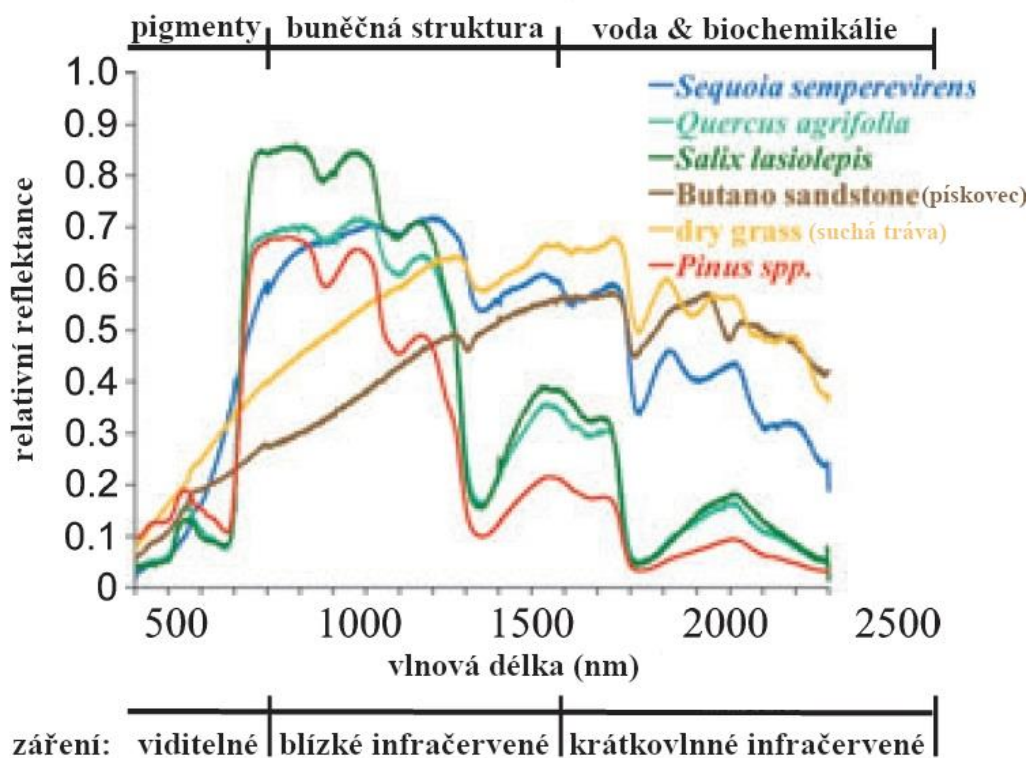
Spektrální reflektance jehlic může sloužit jako nástroj pro objasnění genetických rozdílů mezi populacemi. U rodu borovice již bylo prokázáno pomocí spektrální reflektance jehlic, že je možné pomocí ní rozlišovat mezi druhy a hybridy (Čepl a kol. 2018). Příklady rozdílnosti v reflektanci vegetace lze sledovat na křivce spektrální odrazivosti na obrázku 3.

Pro využití spektrální reflektance ve šlechtitelských programech je zásadní informace o obsahu pigmentu a heritabilitě v užším slova smyslu charakteristických rysů pigmentů. Tyto rysy pak mohou být využity pro výběr genotypů odolných suchu nebo jiným stresům. Šlechtitelské programy by tímto mohly značně ušetřit na nákladech za genotypizaci (Čepl a kol. 2018).

V litevském pokusu zahrnujícím čtyři provenience borovice lesní z Litvy, Ukrajiny a Ruska (dvě provenience) bylo prokázáno, že existují statisticky významné rozdíly mezi spektrální reflektancí různých proveniencí (Danusevicius a kol. 2014)

U borovice lesní existuje také statisticky významná genetická variabilita spektrální reflektance rozdílných vlnových délek záření. Nejvyšší hodnota heritability v užším slova smyslu byla zaznamenána pro reflektanci o vlnové délce 722 nm, což přesně odpovídá oblasti RED EDGE (Čepl a kol. 2018). Interval odrazivosti elektromagnetického záření 710–750 nm představuje významnou oblast i pro odlišení proveniencí a variabilitu obsahu chlorofylu u borovice lesní (Danusevicius a kol. 2014). Toto zjištění podtrhuje biologickou důležitost tohoto inflexního bodu na křivce spektrální odrazivosti vegetace, který představuje vždy

jednu konkrétní vlnovou délku. Relativně vysokým hodnotám heritability odpovídají také NIR a SWIR (krátkovlnné infračervené) části elektromagnetického spektra (Čepl a kol. 2018).



Obrázek 3: Spektrální reflektance asimilačního aparátu vybraných dřevin, suché trávy a pískovce (Ustin a Gamon 2010 - přeloženo).

4 Metodika

4.1 Lokality

Odběr vzorků pro měření probíhal ve třech semenných sadech borovice lesní ze třech rozdílných částí ČR. Všechny tři semenné sady jsou spravovány státním podnikem Lesy České republiky. Poloha jednotlivých semenných sadů je vyobrazena na mapě na obrázku 4. Lokality byly pojmenovány podle LS u LČR, které dané semenné sady spravují. Všeobecné informace o jednotlivých semenných sadech jsou zaneseny do tabulky 1.

Borovice lesní na lokalitě Děčín odpovídá na rozdíl od dalších dvou lokalit náhornímu ekotypu. Borovice lesní z lokalit Plasy a Třeboň představují zástupce pahorkatinného ekotypu (západočeská borovice a třeboňská borovice).

Tabulka 1: Všeobecné údaje o semenných sadech (vytvořeno z dat Lesy české republiky s.p. 2010).

LS LČR	Plasy	Třeboň	Děčín
místní název	Doubrava	Holičkovna	Hrádek
rok založení	1980	1981	2003
počet klonů	86	108	78
rozloha [ha]	6,48	5,35	1,33
souřadnice WGS84	49.9087617 N 13.4427394 E	49.0166106 N 14.8247583 E	50.8191364 N 14.1172131 E
PLO	6 Západočeská pahorkatina	15b Jihočeské pánve - část třeboňská pánev	19 Lužická pískovcová vrchovina
LVS	2 bukodubový	3 dubobukový	5 jedlobukový a 6 smrkobukový
nadmořská výška [m n. m.]	385	430	465



Obrázek 4: Poloha vybraných semenných sadů na mapě ČR. 1 - lokalita Plasy; 2 - lokalita Třeboň 3 – lokalita Děčín (mapový podklad z Mapy.cz 2021).

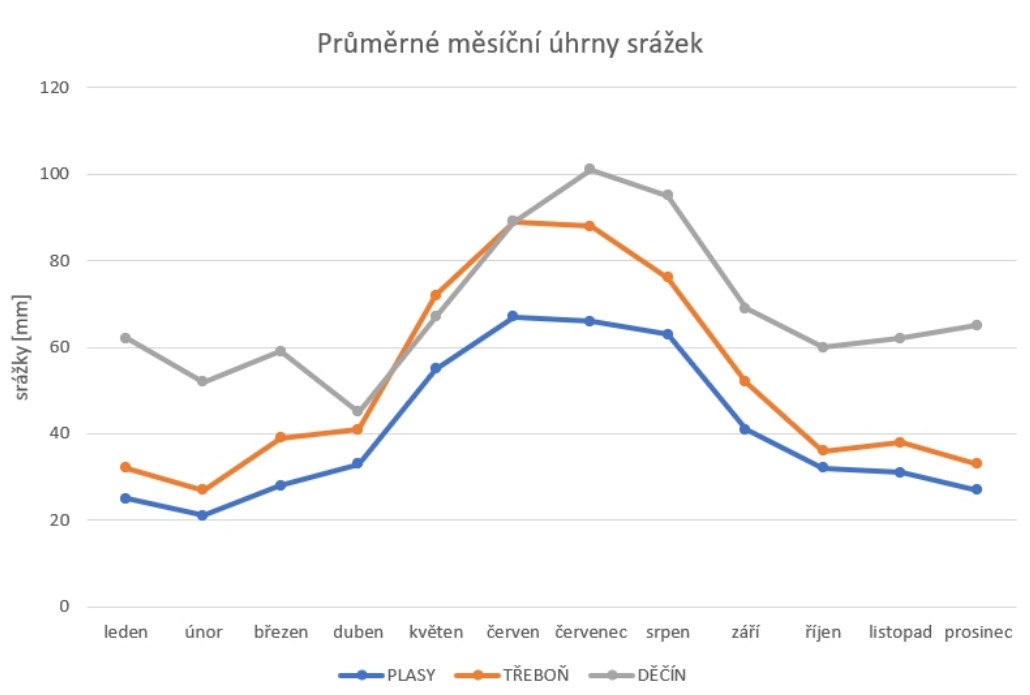
4.2 Meteorologická data

Meteorologická data pro jednotlivé sady byla převzata ze čtyř různých meteostanic, jejichž provozovatelem je ČHMÚ. Pro semenný sad na lokalitě Plasy to byla meteostanice Kralovice (Plzeňský kraj, 449 m n. m.). Pro semenný sad na lokalitě Třeboň to byla meteostanice Třeboň (Jihočeský kraj, 428 m n. m.). Pro semenný sad na lokalitě Děčín byly využity dvě meteostanice, a to meteostanice Sněžník (Ústecký kraj, 569 m n. m.) pro hodnoty úhrnu srážek a teplot, a meteostanice Děčín (Ústecký kraj, 172 m n. m.) pro hodnoty doby slunečního svitu, neboť o něco bližší meteostanice Sněžník tyto hodnoty neposkytuje.

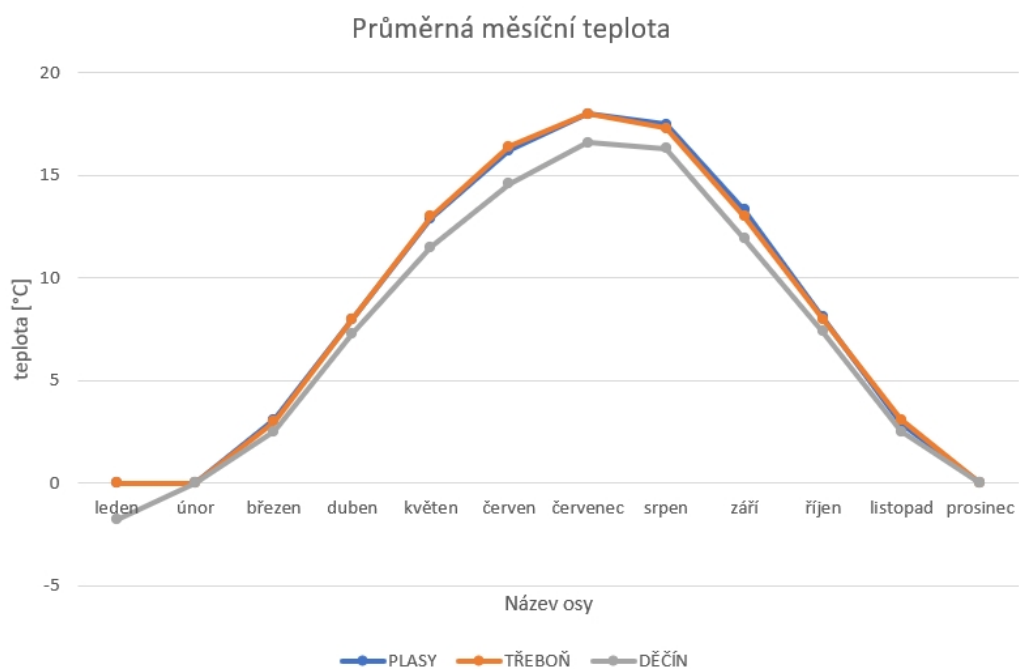
Na základě vybraných meteorologických dat si jsou lokality Plasy a Třeboň navzájem více podobné než s lokalitou Děčín. Průměrná denní teplota je pro Plasy i Třeboň 11,1 °C, doba slunečního svitu se mezi těmito lokalitami také neliší až tak významně jako od lokality Děčín, mírně větší rozdíl představuje jen úhrn srážek, kterých je na lokalitě Plasy o něco méně. Vybraná meteorologická data jsou uvedena v tabulce 2. Průměrné měsíční hodnoty pro úhrn srážek, teploty a doby slunečního svitu jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 5, 6 a 7.

Tabulka 2: Vybraná meteorologická data pro jednotlivé lokality (z dat InMeteo, s.r.o. 2021)

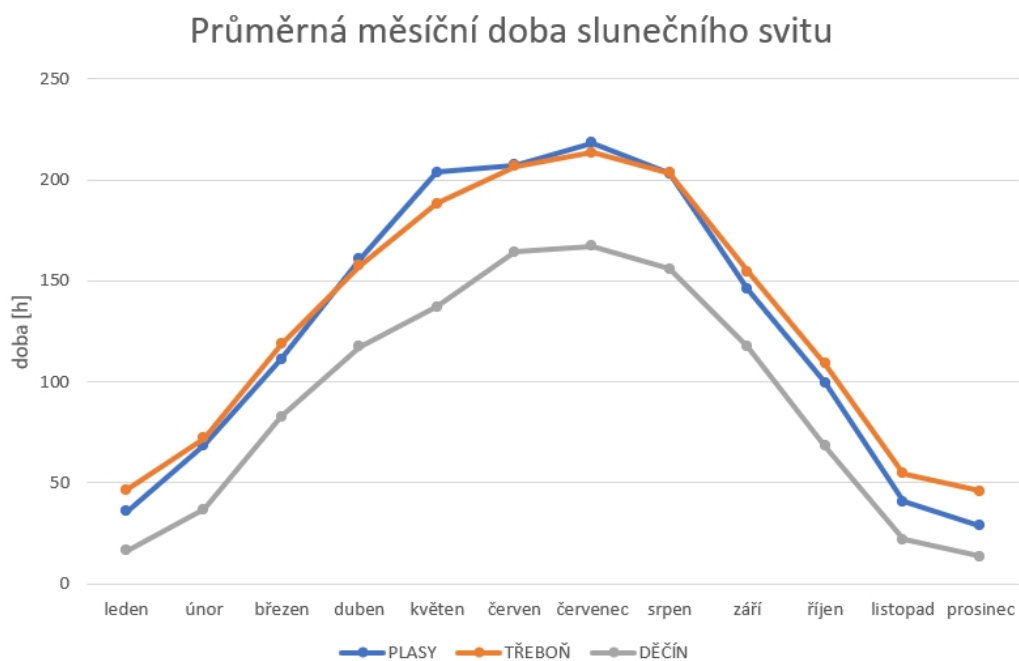
	PLASY	TŘEBOŇ	DĚČÍN
průměrný měsíční úhrn srážek [mm]	40,8	51,9	68,8
průměrný roční úhrn srážek [mm]	489	623	826
průměrná denní teplota [°C]	11,1	11,1	8,9
průměrná doba slunečního svitu v měsíci [h]	127,0	131,00	91,7
průměrná doba slunečního svitu v roce [h]	1524,3	1571,5	1099,9



Obrázek 5: Průměrné měsíční úhrny srážek na lokalitách semenných sadů (vytvořeno v MS Excel z dat InMeteo, s.r.o. 2021).



Obrázek 6: Průměrné měsíční teploty na lokalitách semenných sadů (vytvořeno v MS Excel z dat InMeteo, s.r.o. 2021).



Obrázek 7: Průměrná měsíční doba slunečního svitu na lokalitách semenných sadů (vytvořeno v MS Excel z dat InMeteo, s.r.o. 2021).

4.3 Odběr vzorků

Sběr vzorků jehlic proběhl během srpna roku 2020 ve třech zmíněných semenných sadech. Pro zajištění dostatečného počtu jehlic pro laboratorní měření

byly odebírané jako vzorek celé letorosty. Z každé ramety předurčené pro odběr (minimálně jedna každého klonu v daném semenném sadě) byl pomocí teleskopických nůžek odstrižen jeden letorost z osluněné části koruny, zpravidla na jižní straně. Při sběru dat byla zásadní evidence vzorků. Ke každému odebranému vzorku byl připnut štítek s označením klonu a polohou konkrétní ramety v daném semenném sadu dle schématu. Celkem bylo ve všech třech semenných sadech odebráno 280 vzorků z 265 různých klonů.

Pro demonstrování genetických rozdílů byly klony 2077 a 2071 v semenném sadě Holičkovna na lokalitě Třeboň vybrány k vzájemnému porovnání v rámci případové studie. Tyto klony byly vybrány pro nápadnou shodnou sousední polohu dvojic svých ramet. Z každé jejich ramety v semenném sadě bylo odebráno po jednom letorostu (vzorku), to dělalo 10 z klonu 2077 a 11 z klonu 2071. U těchto dvou klonů byla porovnávána nejen spektrální reflektance jehlic, ale také délka jejich jehlic, jakožto morfologický znak. Dvě vybrané ramety klonů 2077 a 2071 jsou vyobrazeny na obrázcích 8 a 9.



Obrázek 8: Klon 2077.



Obrázek 9: Klon 2071.

4.4 Laboratorní měření

Namísto měření multispektrální reflektance byla nakonec měřena podrobnější reflektance hyperspektrální. Použití přesnější metody umožnilo použití spektrometru schopného hyperspektrální reflektanci měřit.

Laboratorní měření hyperspektrální reflektance jehlic probíhalo v den odběru a ve dni jemu následujícím. Označené vzorky, které byly měřeny až v den následující po sběru, byly přes noc uskladněny v chladu. Měření probíhalo vždy na letošních jehlicích.

K měření hyperspektrální reflektance byl použit spektrometr *FieldSpec*® 3. Tento přístroj je víceúčelový spektrometr pro měření reflektance, transmittance, záření nebo ozáření. Výhodou tohoto spektrometru je jeho snadná přenosnost, možnost použití v terénu a přesnost. Disponuje spektrálním rozsahem 350–2500 nm a rychlostí zaznamenávání dat 10 spekter za sekundu. Součástí příslušenství spektrometru *FieldSpec*® 3 byl také ovladač přístroje – laptop, *RS3* software, optický kabel a halogenový světelný zdroj o teplotě světla 2900 K umístěný v kontaktní snímací sondě *Plant Probe AI22317* (ASD Inc. 2010). Použitý spektrometr *FieldSpec*® 3 je zachycen na obrázku 10.

Vzorky byly před měřením umístěny do Petriho misek obarvených matně černou barvou s velmi nízkou hodnotou reflektance, aby bylo minimalizováno odrazení záření, které jehlice propouštějí. Měření probíhalo na letošních jehlicích na sebraných letorostech. Jehlice byly rovnoběžně seřazeny a stlačeny k sobě tak, aby tvořily souvislou plochu o minimální šířce hlavičky sondy. Sonda byla při každém měření umístěna přímo na uspořádanou vrstvu jehlic, celá měřicí plocha hlavičky sondy byla zcela zakryta jehlicemi. Jehlice byly ve chvíli měření osvětleny konstantním zdrojem světla z měřicí sondy. Měření každého vzorku bylo pětkrát opakováno, u každého měření byly jehlice znovu náhodně přeskupeny. Souběžně s měřením probíhala evidence dat měření do textového dokumentu, aby bylo možné zpětně přiřadit daný vzorek k naměřeným hodnotám. Spektra záření byla jednou za každých 15 měření normalizována oproti bílé referenci – materiálu s téměř 100 % odrazivostí. Po každých 15ti měření také následovalo očištění hlavy sondy od pryskyřice, která se na ní nanášela po kontaktu s jehlicemi. Očištění bylo prováděno pomocí buničiny navlhčené lihem. Počet snímání pro vytvoření průměrné hodnoty

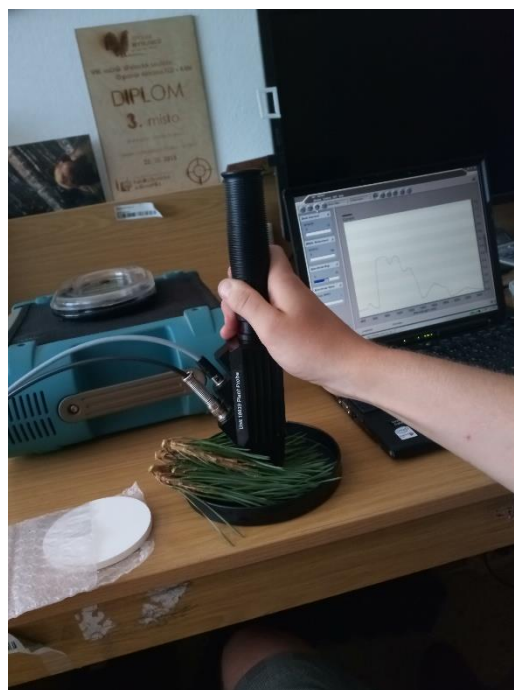
skanování byl nastaven na spektrometru na 25, aby se zabránilo přehřátí jehlic. Laboratorní měření je zobrazeno na obrázku 11.

Po dokončení měření byla naměřená data ve formátu .txt exportována do tabulky v programu *MS Excel*, v kterém byla jednotlivá měření spárována s konkrétními vzorky z textového dokumentu sloužícího pro evidenci měření. Z tabulky byly odmazány hodnoty bílé reference, jednotlivé vzorky byly přiřazeny ke třem semenným sadům.

Paralelně byla na sebraných jehlicích také provedena analýza obsahu makroprvků. Výsledky analýzy pro dusík a fosfor byly použity k demonstrování rozdílů mezi semennými sady na základě jiných než optických vlastností jehlic.



Obrázek 10: Spektrometr FieldSpec® 3.



Obrázek 11: Laboratorní měření.

K demonstrování genetických rozdílů v hyperspektrální reflektanci byly vytvořeny dvě případové studie.

První případová studie spočívala v porovnání proveniencí v semenném sadu Doubrava na lokalitě Plasy. Za účelem porovnání byly vytvořeny provenienční klastry západočeské borovice sloučením genotypů stejného původu z lokálních porostů. Vzorky odebrané v semenném sadu Doubrava byly doplněny o informaci původu jednotlivých klonů. Pro porovnání bylo vybráno 5 nejzastoupenějších

proveniencí. Vybrány byly provenience z lokalit Bolevec (13 klonů), Horšovský Týn (7 klonů), Kaliště (15 klonů), Nepomuk (10 klonů) a Plasy (38 klonů). Pro lepší interpretaci výsledků hyperspektrální reflektance bylo k porovnání využito i vegetačních indexů.

Druhá případová studie spočívala v porovnání dvou klonů třeboňské borovice ze semenného sadu Holičkovna na lokalitě Třeboň. První částí porovnání byly rozdíly v základní morfologii jehlic. Délka jehlic byla měřena digitálním posuvným měřítkem. Z každého vzorku byly změřeny 4 jehlice. Celkem bylo změřeno 84 jehlic z 21 ramet těchto dvou klonů. Klony byly také porovnány na základě surových spekter z měření hyperspektrální reflektance i její interpretace vegetačními indexy.

4.5 Statistická analýza dat

Pro zpracování naměřených dat bylo využito popisné statistiky a vybraných metod matematické statistiky, konkrétně F-testu, dvouvýběrového t-testu s nerovností rozptylů, analýzy rozptylu (ANOVA) a smíšeného lineárního modelu. Statistická analýza byla provedena pomocí programů *MS Excel*, *STATISTIKA 12*, softwaru *R* a jeho datových balíčků *ASReml* a *hsdar*. Prostřednictvím těchto programů byly také vytvořeny použité grafy sloužící k interpretaci výsledků.

4.5.1 Popisná statistika

Popisná statistika určuje a prezentuje hromadná data formou přehledných tabulek a diagramů. Dále je nahrazuje malým počtem ukazatelů, přičemž nedochází k podstatné ztrátě informace (Puš 2007).

Použité statistické ukazatele a vzorce pro jejich výpočet:

4.5.1.1 Aritmetický průměr

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

4.5.1.2 Medián

a) Je-li $n = 2k+1$ liché číslo: $\tilde{x} = k + 1$

b) Je-li $n = 2k$ sudé číslo: $\tilde{x} = \frac{1}{2}(x_k + x_{k+1})$

4.5.1.3 Směrodatná odchylka

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

4.5.1.4 Rozptyl

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

4.5.2 Matematická statistika

Matematická statistika se na rozdíl od té popisné nezabývá pouze získáním přehledných informací o popisovaných objektech, ale slouží k odhalení vztahů a zákonitostí, které se v konkrétních datech odrážejí. Matematická statistika je založena především na teorii pravděpodobnosti (Puš 2007).

4.5.2.1 Testování statistických hypotéz

Princip testování hypotéz se využívá pro většinu statistických testů. Nejprve se zvolí hladina významnosti, zpravidla $p = 0,05$ (5 %). Dále se formuluje nulová hypotéza a volí testovací kritérium. Každé testovací kritérium má své určité rozdělení – například Fisherovo rozdělení. Poté se vypočítá velikost testovacího kritéria a porovná se s kritickou hodnotou. Nakonec se na základě předchozího kroku vysloví závěr – nulová hypotéza se zamítne nebo potvrdí (Kladivo 2013).

4.5.2.2 Dvouvýběrový F-test pro rozptyl

F-test slouží k určení významnosti rozdílu mezi dvěma rozptyly. Jako testované kritérium se uvažuje poměr odhadů dvou rozptylů základního souboru. Testované kritérium má Fisherovo rozdělení, kritické hodnoty Fisherova rozdělení lze nalézt v příslušných tabulkách (Kladivo 2013).

Testované kritérium:

$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2}.$$

Dvouvýběrový F-test byl použit pro porovnání rozptylů měřených délek jehlic u klonů 2071 a 2077 ze semenného sadu na lokalitě Třeboň. Hladina významnosti pro provedený F-test byla zvolena $p = 0,05$. Výsledek F-testu byl potřebný pro výběr dvouvýběrového t-testu buďto s rovností nebo nerovností rozptylu. Na základě výsledku F-testu byl vybrán dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů. F-test byl proveden pomocí programu *MS Excel*.

4.5.2.3 Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů

Studentův t-test se používá buďto k testování rozdílu výběrového průměru a známého průměru základního souboru, anebo k testování významnosti rozdílů dvou výběrových průměrů. Při testování významnosti rozdílů dvou výběrových průměrů se v závislosti na výsledku F-testu (důkaz rovnosti či nerovnosti rozptylů) použije dvouvýběrový t-test buďto s rovností nebo nerovností rozptylů. Po vypočtení t hodnoty se tato hodnota porovnává s kritickými hodnotami. Pokud F-test prokáže statisticky významný rozdíl rozptylů, testované kritérium k testování významnosti rozdílu dvou průměrů se vypočte podle vzorce:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1 - 1} + \frac{s_2^2}{n_2 - 1}}},$$

hodnota testovaného kritéria se v tomto případě neporovnává s kritickou hodnotou z tabulek, nýbrž s hodnotou t_p^+ vypočítanou podle vzorce:

$$t_p^+ = \frac{\frac{s_1^2}{n_1 - 1} \cdot t_p' + \frac{s_2^2}{n_2 - 1} \cdot t_p''}{\frac{s_1^2}{n_1 - 1} + \frac{s_2^2}{n_2 - 1}},$$

kde t_p' a t_p'' představují tabulkové hodnoty pro 1 a 2 stupňů volnosti (Kladivo 2013).

Pro porovnání průměrů naměřených délek jehlic klonů 2071 a 2077 byl na základě výsledku F-testu vybrán dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů.

Zvolená hladina významnosti pro t-test byla $p = 0,05$. Nulová hypotéza byla stanovena: Rozdíl mezi průměry naměřených délek jehlic klonů 2071 a 2077 je na zvolené hladině významnosti statisticky nevýznamný. Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů k porovnání délky jehlic byl proveden pomocí programu *MS Excel*.

Dvouvýběrové t-testy s nerovností rozptylů byly také použity pro porovnání spektrálních reflektancí jehlic klonů 2071 a 2077. Jeden t-test byl proveden pro porovnání spektrální reflektance na každé měřené vlnové délce (350–2500 nm). Pro provedení t-testů byl využit statistický software *R*.

4.5.2.4 Analýza rozptylu (ANOVA)

Analýza rozptylu se používá při zkoumání vztahu mezi nezávislými a závislými proměnnými, zejména pro vyhodnocování experimentálních dat (Sebera 2012). Při použití této metody jakožto validační techniky se sleduje vliv rozdělení datového souboru do shluků na jednotlivé proměnné. Sleduje se, jestli mají proměnné v jednotlivých shlucích rozdílné hodnoty. Vybírá se počet shluků nejlépe oddělující požadované proměnné (Haruštiaková a kol. 2012). Variabilita se vyjadřuje v jednorozměrném případě pomocí součtu čtverců, ve vícerozměrném případě pak pomocí matic, u kterých hlavní diagonálu tvoří součty čtverců. (Sebera 2012).

Mnohonásobné porovnání hyperspektrální reflektance (10 kombinací dvojic na každé měřené vlnové délce) provenienčních klastrů bylo provedeno pomocí metody nejmenších čtverců ve statistickém softwaru *R*.

Vzájemná statistická významnost makroprvků obsažených v jehlicích v závislosti na semenných sadech byla ověřena Scheffeho testem, normalita byla ověřena Shapiro-Wilksovým testem, byla provedena analýza rozptylu. Statistické porovnání významnosti makroprvků obsažených v jehlicích klonů ze semenných sadů bylo provedeno v programu *STATISTIKA 12*.

4.5.2.5 ASReml

ASReml je statistický softwarový balíček přizpůsobující smíšené lineární modely využívající metodu maximální věrohodnosti (REML). Smíšené lineární

modely představují velice užitečný a flexibilní nástroj pro analýzu souborů dat z oborů zemědělských, biologických, medicíny a environmentálních studií (Gilmour a kol. 2009).

Smíšený lineární model s jednou proměnnou je dán výrazem:

$$Y = \mu + X_1a + X_2b + e,$$

byl použit k zhodnocení genetického rozptylu reflektance. Y odpovídá datovému vektoru, μ představuje celkový průměrný účinek, a je fixní vektor jednotlivých proveniencí (zde predikujeme průměry proveniencí pro následné mnohonásobné porovnávání), b je vektor náhodných genetických efektů a e je náhodný vektor chyby prostředí s

$$e \sim MVN(0, I_n \otimes R),$$

R je matice variance-kovariance. I_n je identifikující matice identifikující každý jednotlivý strom. Písmena X určují matice incidence pro všechny fixní efekty.

Jelikož semenný sad Doubrava byl založen základní metodikou znárodnění, využili jsme pro genetickou evaluaci této plochy tzv. prostorovou analýzu. Tato metoda umožňuje zohlednit vliv mikro-stanoviště s pomocí odhadu prostorových auto-korelací blízkých stromů.

Prostorový model využívá autoregresní prostorovou složku a náhodné prostorové efekty v základním modelu (Chen et al. 2018). Ostatní části jsou stejné jako u základního modelu, který je podrobně popsán výše:

$$y = Xb + Zu + \xi + \eta,$$

kde

ξ = fixní prostorové efekty,

η = náhodné prostorové efekty.

Prostorově fixní rezidua (ξ) se modelují pomocí kovarianční struktury, která předpokládá oddělitelný autoregresní proces v řádcích a sloupcích (Chen et al. 2018):

$$R = \sigma_{\xi}^2 [\text{AR1}(p_{col}) \otimes \text{AR1}(p_{row})] + \sigma_{\eta}^2 I,$$

kde

σ_{ξ}^2 = fixní prostorová odchylka,

σ_{η}^2 = náhodná prostorová odchylka,

I = matice shody,

\otimes = přímý součin (Kronecker) pro matice,

$\text{AR1}(p_{col})$ = autoregresní korelační matice ve směru sloupců,

$\text{AR1}(p_{row})$ = autoregresní korelační matice ve směru řádků.

Pro interpretaci rozdílů byla vytvořena zlogaritmovaná p hodnota ukazující, v kterých oblastech spektra elektromagnetického záření se průměrná reflektance jehlic alespoň jednoho semenného sadu statisticky významně liší od ostatních.

4.6 Vegetační indexy

Pomocí vybraných vegetačních indexů byly porovnány a interpretovány rozdíly v reflektanci jehlic borovic jednotlivých proveniencí z lokality Plasy a také klony 2071 a 2077 z lokality Třeboň. Vybrané vegetační indexy jsou definovány vzorci, v kterých R_{xxx} představuje reflektanci jehlic na vlnové délce xxx a D_{yyy} představuje derivaci hodnot reflektance na vlnové délce yyy . Každý vegetační index má také definovaný účel použití. Byly vybrány takové indexy, které prokazovaly statisticky významné rozdíly mezi proveniencemi či klony.

K výpočtu a interpretaci vegetačních indexů byl použit datový balíček *hsdar* pro statistický software *R*. Rozdílnost mezi jednotlivými proveniencemi nebo klony byla prokázána a interpretována do grafů pomocí standardní chyby rozdílu (Standard Error of the Difference).

Tabulka 3: Skupina vegetačních indexů vytvořených pro odhad obsahu vody ve vegetaci.

VEGETAČNÍ INDEXY PRO ODHAD OBSAHU VODY VE VEGETACI		
ZKRATKA	VZOREC	REFERENCE
Datt7	$Datt7 = \frac{R_{860} - R_{2217}}{R_{860} - R_{1928}}$	(Datt 1999)
Datt8	$Datt8 = \frac{R_{860} - R_{1788}}{R_{860} - R_{1928}}$	(Datt 1999)
NDWI	$NDWI = \frac{R_{860} - R_{1260}}{R_{860} + R_{1260}}$	(Gao 1996).
PWI	$PWI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$	(Penuelas a kol. 1997)

Datt7 a Datt8 jsou vegetační indexy vytvořené pro vzdálený odhad obsahu vody ve vegetaci (Datt 1999).

Vegetační index NDWI (normalized difference water index) slouží k odhadu obsahu vody uvnitř listů vegetace, tedy i hydrického stresu. Je méně ovlivnitelný atmosférickými jevy při pořizování dat z dálkového průzkumu země než index NDVI (Gao 1996).

Vegetační index PWI (Plant Water Index) byl vyvinut pro odhad koncentrace vody v asimilačním aparátu rostlin i dřevin z reflektance měřené na blízko – kontaktně (Penuelas a kol. 1997).

Tabulka 4: Skupina vegetačních indexů vytvořených pro odhad obsahu chlorofylu ve vegetaci.

VEGETAČNÍ INDEXY PRO ODHAD CHLOROFYLU VE VEGETACI		
ZKRATKA	VZOREC	REFERENCE
DDn	$DDn = 2 * (R_{710} - R_{660} - R_{760})$	(le Maire a kol. 2008)
DPI	$DPI = \frac{D_{688} - D_{710}}{D_{697}^2}$	(Zarco-Tejada a kol. 2003)
SPVI	$SPVI = 0,4 * (3,7 * (R_{800} - R_{670}) - 1,2 * ((R_{530} - R_{670})^2)^{0,5}$	(Vincini a kol. 2006)
SR7	$SR7 = \frac{R_{440}}{R_{690}}$	(Lichtenthaler a kol. 1995)
Sum_Dr1	$\sum_{i=626}^{795} D1i$	(Elvidge a Chen 1995)
Sum_Dr2	$\sum_{i=680}^{780} D1i$	(Fillela a Penuelas 1994)
VOG4	$VOGELMANN4 = \frac{R_{734} - R_{747}}{R_{715} + R_{720}}$	(Vogelmann a kol. 1993)

Vegetační index DDn (New Double Difference Index) je založen na vegetačním indexu DD (le Maire a kol. 2008). Vegetační index DD reprezentuje změny v prvním derivátu oblasti RED EDGE související se změnami v obsahu chlorofylu (le Maire a kol. 2004). Index DDn sdílí s indexem DD stejný základní princip založený na dvojitým vrcholu derivátů blízko RED EDGE, má však jednodušší formulaci (le Maire a kol. 2008).

Vegetační index DPI (Double Peak Index) slouží k detekci fluorescence z hyperspektrálních dat. Je založen na vlnových délkách z oblasti RED EDGE. Lze

ho použít i k pozorování dlouhodobého či krátkodobého stresu, díky degradaci pigmentu (Zarco-Tejada a kol. 2003).

Vegetační index SPVI (Spectral Polygon Vegetation Index) je založen na myšlence trojúhelníkových vegetačních indexů, avšak navíc bere v úvahu zelené spektrum reflektance, tedy koncentraci chlorofylu (Vincini a kol. 2006).

Vegetační index SR 7 (Simple Ratio 7) je založen na poměru spektrálních pásem významných pro fluorescenci, konkrétně v modré a červené oblasti (Lichtenthaler a kol. 1995).

Sum_Dr1 představuje derivační vegetační index, který ke svému výpočtu používá souvislou oblast spekter v oblasti RED EDGE (Elvidge a Chen 1995).

Sum_Dr1 představuje další derivační vegetační index. Ke svému výpočtu používá o něco menší souvislou oblast spekter v oblasti červeného okraje chlorofylu. Tento vegetační index může být využit nejen pro odhad chlorofylu, ale také pro zhodnocení hydrického stresu rostliny, to však pouze pokud je stres výrazný. (Fillela a Penuelas 1994).

Vegetační index VOGELMANN4 je poměrovým indexem používající vlnové délky z oblasti RED EDGE. Slouží především k odhadu obsahu chlorofylu na úrovni listů (Vogelmann a kol. 1993)

Tabulka 5: Skupina vegetačních indexů vytvořených pro odhad zdravotního stavu vegetace

VEGETAČNÍ INDEXY PRO ODHAD ZDRAVOTNÍHO STAVU		
ZKRATKA	VZOREC	REFERENCE
DWSI1	$DWSI1 = \frac{R_{800}}{R_{1660}}$	(Apan a kol. 2004)
DWSI3	$DWSI3 = \frac{R_{1660}}{R_{680}}$	(Apan a kol. 2004)
DWSI5	$DWSI5 = \frac{R_{800} - R_{550}}{R_{1660} - R_{680}}$	(Apan a kol. 2004)
MSI	$MSI = \frac{R_{1600}}{R_{817}}$	(Hunt a Rock 1989)

DWSI1, DWSI3 a DWSI5 jsou tři z pěti vegetačních indexů vyvinutých k rozlišení oblastí cukrové třtiny s napadením rzí *Puccinia kuehnii* od oblastí bez napadení pomocí analýzy hyperspektrálních obrazových dat (Apan a kol. 2004).

Vegetační index MSI (Moisture Stress Index) byl vyvinut k odhalení poškozených porostů jehličnatých dřevin z hyperspektrálních obrazových dat, dále může sloužit i k odhadu obsahu vody v asimilačním aparátu stromů, což bylo prokázáno mimo jiné i u rodu borovice (Hunt a Rock 1989).

Tabulka 6: Skupina nezařazených vegetačních indexů nehodících se do Tabulek 3, 4 a 5.

NEZAŘAZENÉ VEGETAČNÍ INDEXY		
ZKRATKA	VZOREC	REFERENCE
NDLI	$NDLI = \frac{\log \frac{1}{R_{1754}} - \log \frac{1}{R_{1680}}}{\log \frac{1}{R_{1754}} + \log \frac{1}{R_{1680}}}$	(Serrano a kol. 2002)
NDVI	$NDVI = \frac{R_{800} - R_{680}}{R_{800} + R_{680}}$	(Tucker 1979)
RDVI	$RDVI = \frac{R_{800} - R_{670}}{\sqrt{R_{800} - R_{670}}}$	(Roujean a Breon 1995)
SRWI	$SRWI = \frac{R_{850}}{R_{1240}}$	(Zarco-Tejada a kol. 2003)

Vegetační index NDLI (Normalized Difference Lignin Index) byl vytvořen k odhadu obsahu ligninu a dusíku ve snímaných zelených olistěných korunách stromů (Serrano a kol. 2002)

Vegetační index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) je velmi často užívaný vegetační index k rozpoznání vegetace od ostatních povrchů a k určení jejího zdravotního stavu (Gashaw a kol. 2015).

Vegetační index RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index) kombinuje vegetační indexy DVI a NDVI. Hlavní výhodou indexu DVI je, že je méně narušen reflektancí pozadí. RDVI tedy představuje vhodnější variantu pro měření reflektance vegetace při větším narušení reflektancí pozadí, než je NDVI (Roujean a Breon 1995).

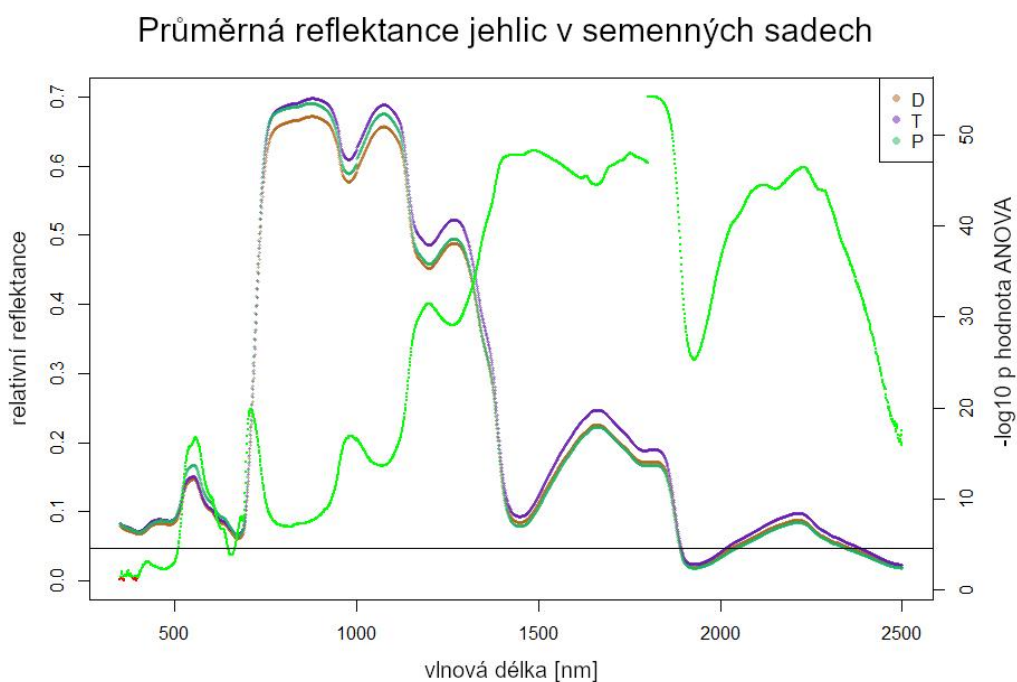
SRWI (Simple Ratio 850/1240) je jednoduchý poměrový index porovnávající R_{850} a R_{1240} .

5 Výsledky

5.1 Rozdílnost semenných sadů

Semenné sady byly porovnány na základě surových spekter z měření hyperspektrální reflektance jehlic borovice lesní. Dále byly semenné sady porovnány na základě analýzy obsahu vybraných makroprvků v jehlicích. Z makroprvků byly vybrány konkrétně dusík a fosfor k demonstrování rozdílů mezi semennými sady na základě jiných než optických vlastností jehlic borovic.

5.1.1 Porovnání na základě hyperspektrální reflektance jehlic

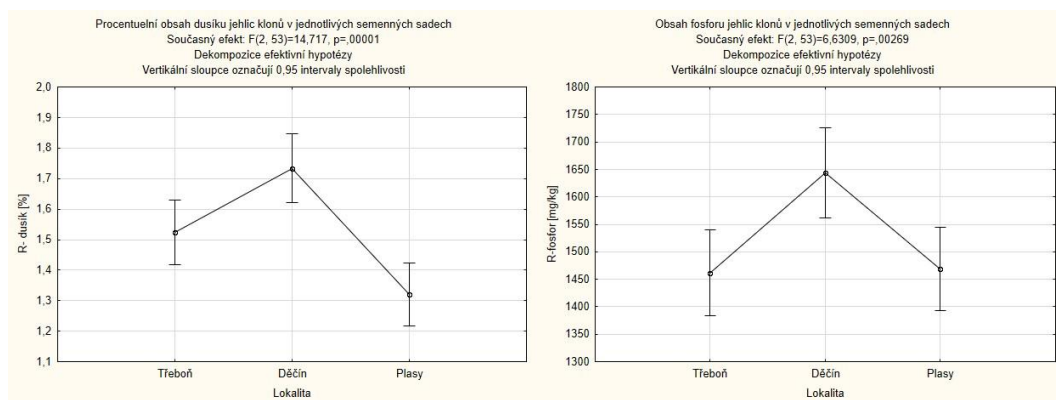


Obrázek 12: Průměrná reflektance jehlic v jednotlivých semenných sadech: D – Děčín; T – Třeboň; P – Plasy.

Na obrázku 12 lze pozorovat průměrné hodnoty reflektance jehlic všech tří semenných sadů jako barevné body dohromady tvořící 3 křivky spektrální odrazivosti jehlic. Zelená křivka představující zlogaritmovanou p hodnotu ukazuje, v kterých oblastech spektra elektromagnetického záření se průměrná reflektance jehlic alespoň jednoho semenného sadu statisticky významně liší od ostatních.

Pokud se tato zelená křivka nachází nad černou vodorovnou ryskou, je rozdíl na hladině pravděpodobnosti 95 % statisticky významný.

5.1.2 Porovnání na základě obsahu vybraných makroprvků v jehlicích



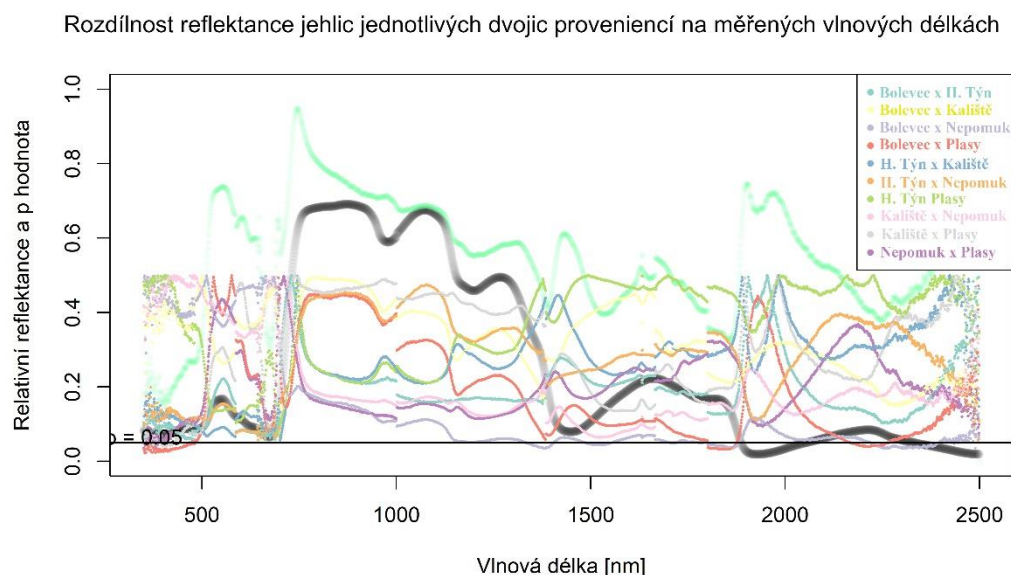
Obrázek 13: Porovnání jehlic klonů ze semenných sadů na základě obsahu dusíku a fosforu

Na obrázku 13 lze sledovat rozdíly obsahu dusíku a fosforu obsaženého v jehlicích v jednotlivých semenných sadech. V obsahu dusíku v jehlicích existují mezi všemi semennými sady statisticky významné rozdíly (Třeboň-Děčín: $p = 0,031388$; Třeboň-Plasy: $p = 0,029272$; Děčín-Plasy: $p = 0,000008$). Obsahem fosforu v jehlicích se liší pouze semenný sad na lokalitě Děčín od ostatních dvou (Třeboň-Děčín: $p = 0,008626$; Děčín-Plasy: $p = 0,010571$).

5.2 Případová studie porovnání proveniencí v semenném sadu Doubrava

K demonstrování genetických rozdílů v hyperspektrální reflektanci byla provedena případová studie spočívající v porovnání proveniencí v semenném sadu Doubrava patřícím pod LS Plasy. Pro mnohonásobné porovnání byly z lokálních porostů vytvořeny provenienční klastry západočeské borovice sloučením genotypů stejného původu. Provenience byly porovnány na základě surových spekter z měření hyperspektrální reflektance i její interpretace vegetačními indexy.

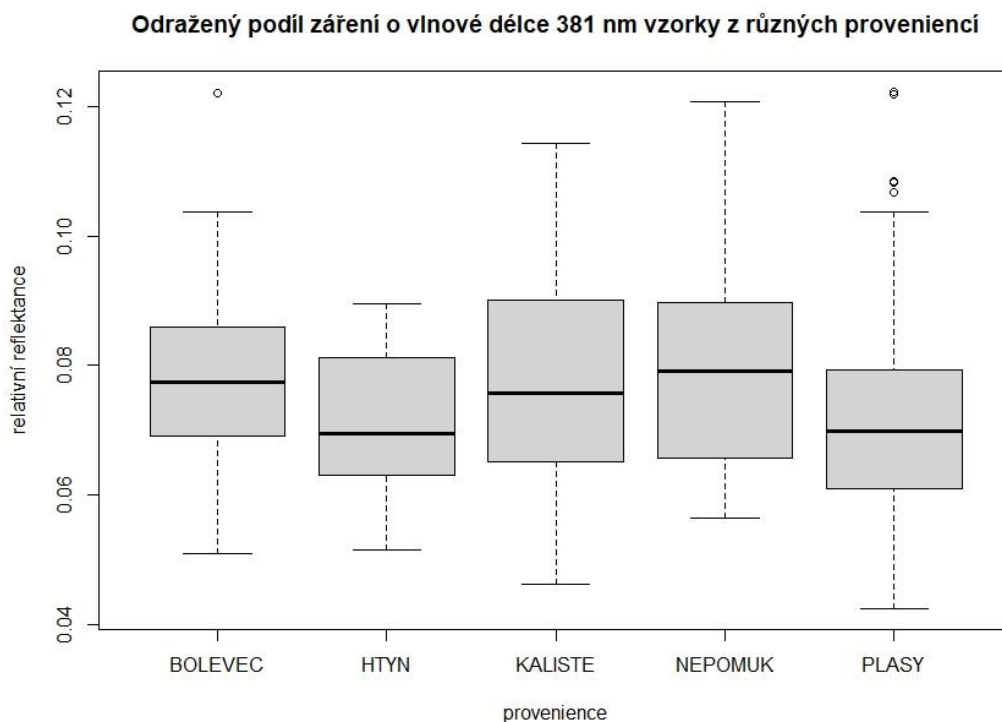
5.2.1 Porovnání na základě hyperspektrální reflektance jehlic



Obrázek 14: Rozdílnost reflektance jehlic jednotlivých dvojic proveniencí na měřených vlnových délkách.

Obrázek 14 ukazuje rozdílnost reflektance jehlic mezi všemi možnými dvojicemi proveniencí. Barevné body, které dohromady vizuálně tvoří křivky, představují p hodnoty porovnání reflektance jehlic jednotlivých dvojic proveniencí na dané vlnové délce. Vodorovná černá linie představuje hodnotu $p = 0,05$, v oblastech, kde se křivky porovnání jednotlivých dvojic dostávají pod tuto linii, existuje mezi proveniencemi statisticky významný rozdíl. Silná černá křivka

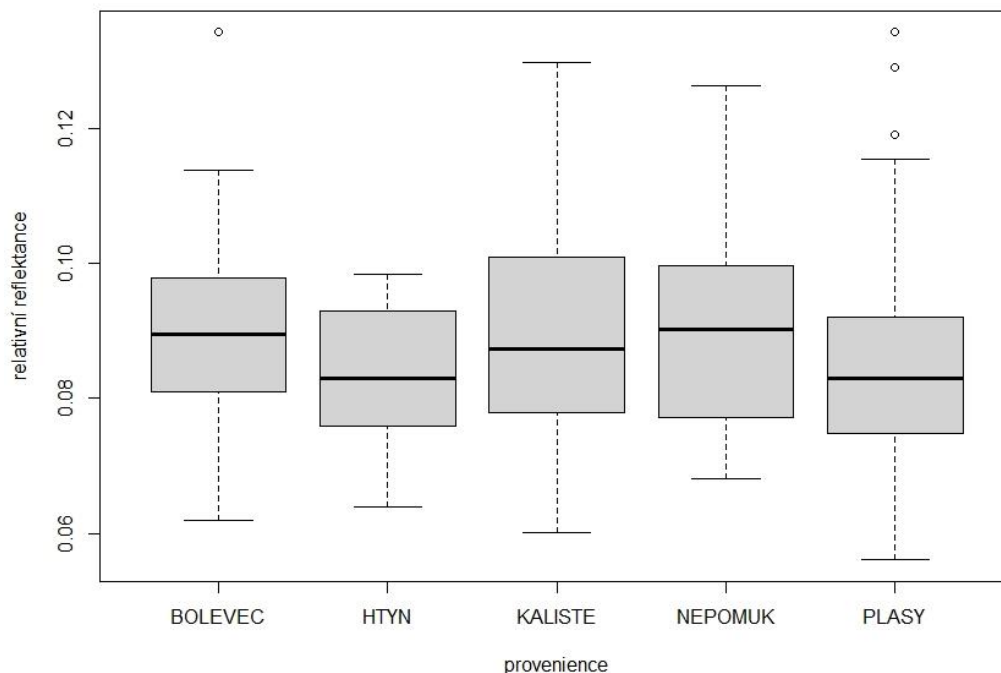
představuje křivku spektrální odrazivosti jehlic na lokalitě Plasy. Silná zelená křivka reprezentuje souhrnnou p hodnotu všech deseti porovnáání.



Obrázek 15: Odražený podíl záření o vlnové délce 381 vzorky jehlic z různých proveniencí.

Na obrázku 15 je vyobrazen krabicový graf reflektance jehlic na vlnové délce 381 nm jednotlivých proveniencí z lokality Plasy. Na této vlnové délce se statisticky významně liší reflektance jehlic provenience Bolevec od provenience Plasy ($p = 0,0246$), provenience Kaliště od provenience Plasy ($p = 0,0359$), a provenience Nepomuk od provenience Plasy ($p = 0,0415$). Hodnoty p statisticky významně rozdílných dvojic proveniencí lze také pozorovat v oblasti příslušné vlnové délky (381 nm) na obrázku 14 pod vodorovnou čarou reprezentující hodnotu $p = 0,05$.

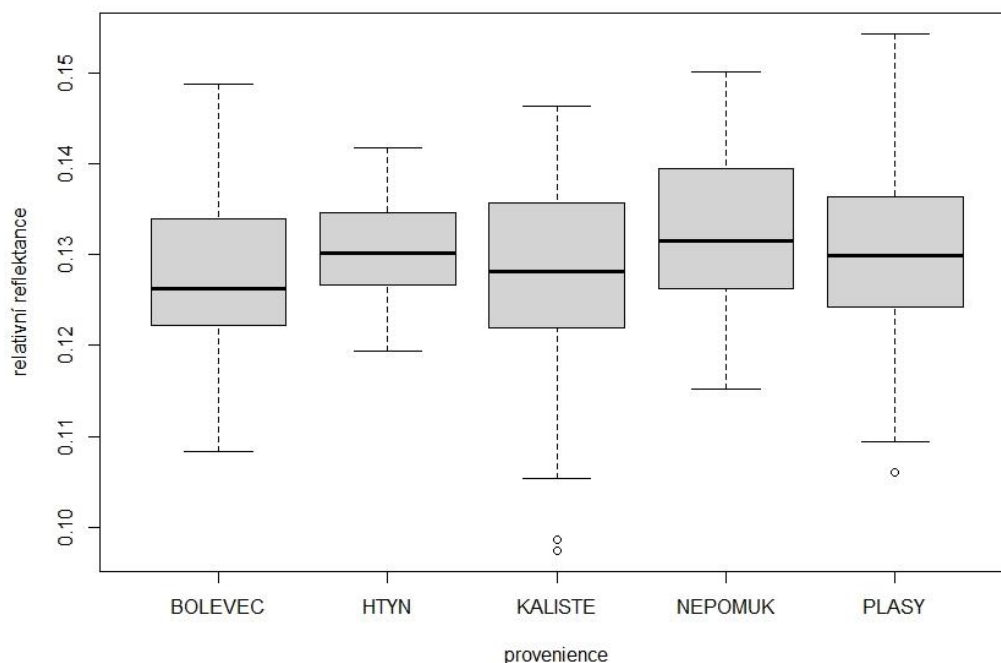
Odražený podíl záření o vlnové délce 478 nm vzorky z různých proveniencí



Obrázek 16: Odražený podíl záření o vlnové délce 478 vzorky jehlic z různých proveniencí.

Na obrázku 16 je vyobrazen krabicový graf reflektance jehlic na vlnové délce 478 nm jednotlivých proveniencí z lokality Plasy. Na této vlnové délce se statisticky významně liší reflektance jehlic pouze provenience Bolevec od provenience Plasy ($p = 0,0467$). Na této vlnové délce byl součet p hodnot všech 10 porovnání nejnižší $\sum_{i=1}^{10} p_i = 2,0586$, což znamená dohromady největší rozdíly mezi porovnávanými dvojicemi, i když ne vždy statisticky významné. Nejmenší souhrnnou p hodnotu lze sledovat na obrázku 14 jako nejnižší bod silné zelené křivky. Druhý největší byl rozdíl provenience Bolevec od provenience Horšovský Týn ($p = 0,0592$) a třetí největší byl rozdíl provenience Kaliště od provenience Plasy ($p = 0,0962$). Tyto dvě porovnání lze považovat za statisticky významné pouze na hladině spolehlivosti 90 %. Hodnoty p statisticky významně rozdílných dvojic proveniencí (na hladině spolehlivosti 95 %) lze také pozorovat v oblasti příslušné vlnové délky (478 nm) na obrázku 14 pod vodorovnou čarou reprezentující hodnotu $p = 0,05$.

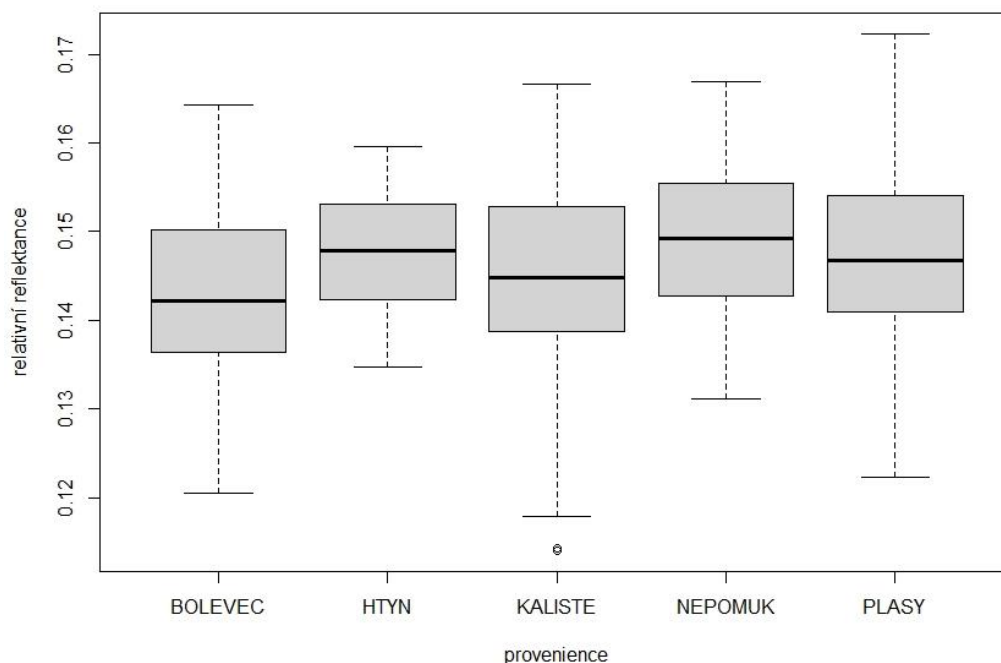
Odražený podíl záření o vlnové délce 1524 nm vzorky z různých proveniencí



Obrázek 17: Odražený podíl záření o vlnové délce 1524 vzorky jehlic z různých proveniencí.

Na obrázku 17 je vyobrazen krabicový graf reflektance jehlic na vlnové délce 1524 nm jednotlivých proveniencí z lokality Plasy. Na této vlnové délce se statisticky významně liší reflektance jehlic provenience Bolevec od provenience Nepomuk ($p = 0,0441$). Další relativně významný rozdíl byl mezi proveniencí Kaliště od provenience Nepomuk ($p = 0,0643$), lze jej však považovat za statisticky významný pouze na hladině 90 %. Hodnoty p statisticky významně rozdílných dvojic proveniencí lze také pozorovat v oblasti příslušné vlnové délky (1524 nm) na obrázku 14 pod vodorovnou čarou reprezentující hodnotu $p = 0,05$.

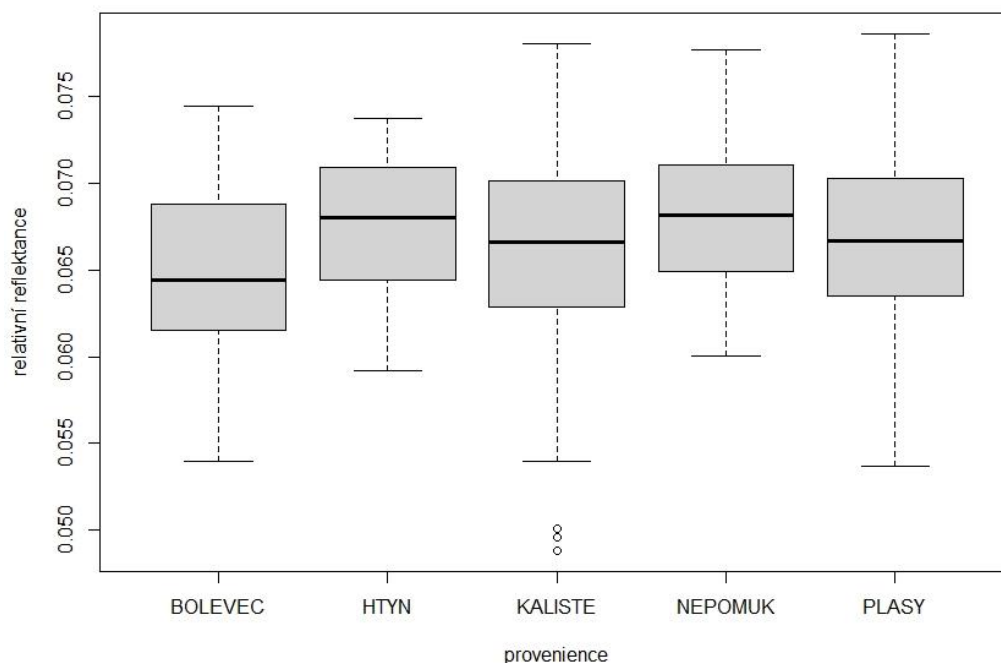
Odražený podíl záření o vlnové délce 1854 nm vzorky z různých proveniencí



Obrázek 18: Odražený podíl záření o vlnové délce 1854 vzorky jehlic z různých proveniencí.

Na obrázku 18 je vyobrazen krabicový graf reflektance jehlic na vlnové délce 1854 nm jednotlivých proveniencí z lokality Plasy. Na této vlnové délce se statisticky významně liší reflektance jehlic provenience Bolevec od provenience Nepomuk ($p = 0,0371$), a provenience Bolevec od provenience Plasy ($p = 0,0323$). Hodnoty p statisticky významně rozdílných dvojic proveniencí lze také pozorovat v oblasti příslušné vlnové délky (1854 nm) na obrázku 14 pod vodorovnou čarou reprezentující hodnotu $p = 0,05$.

Odražený podíl záření o vlnové délce 2267 nm vzorky z různých proveniencí



Obrázek 19: Odražený podíl záření o vlnové délce 2267 vzorky jehlic z různých proveniencí.

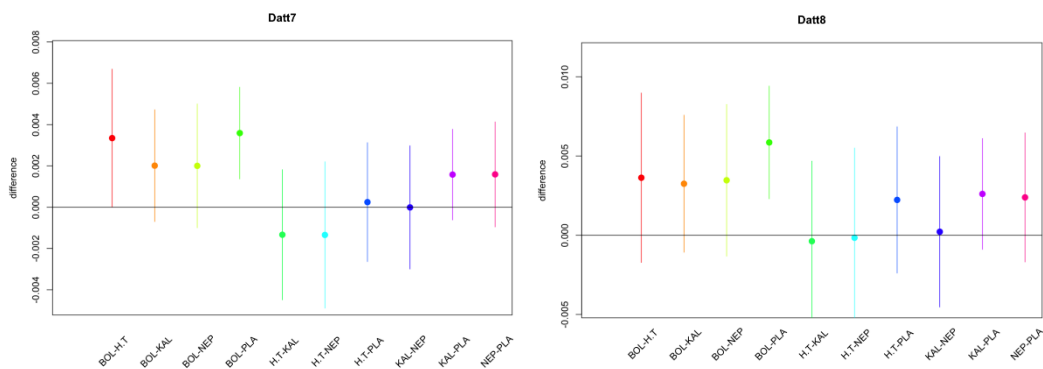
Na obrázku 19 je vyobrazen krabicový graf reflektance jehlic na vlnové délce 2267 nm jednotlivých proveniencí z lokality Plasy. Na této vlnové délce se statisticky významně liší reflektance jehlic provenience Bolevec od provenience Nepomuk ($p = 0,0355$), a provenience Bolevec od provenience Plasy ($p = 0,0497$). Hodnoty p statisticky významně rozdílných dvojic proveniencí lze také pozorovat v oblasti příslušné vlnové délky (2267 nm) na obrázku 14 pod vodorovnou čarou reprezentující hodnotu $p = 0,05$.

5.2.2 Porovnání na základě vegetačních indexů

Pro lepší interpretaci rozdílnosti provenienčních klastrů byly použity vegetační indexy. Demonstrovány jsou takové vegetační indexy z datového balíčku *hsdar*, v kterých se projevila na hladině spolehlivosti 95% rozdílnost alespoň mezi dvěma proveniencemi. Rozdílnost mezi jednotlivými dvojicemi proveniencí je vyobrazena v grafech pomocí standardní chyby rozdílu (Standard Error of the Difference). Pokud konfidenční interval (svislá čára) kolem rozdílu (tečka) neprotíná

vodorovnou linii s nulovou hodnotou rozdílu, je rozdíl mezi danými dvěma proveniencemi statisticky významný.

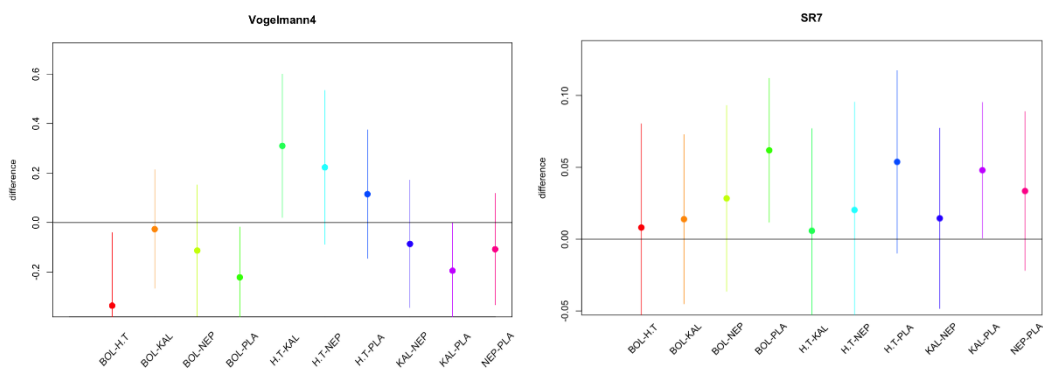
5.2.2.1 Indexy pro odhad obsahu vody



Obrázek 20: Vegetační indexy Datt7 a Datt8

Z obrázku 20 vyplývá, že v obou vegetačních indexech Datt7 i Datt8 jsou provenience Bolevec a Plasy navzájem statisticky významně odlišné. Ve vegetačním indexu Datt7 se jeví navíc vzájemně odlišné i provenience Bolevec a Horšovský Týn, byť tento rozdíl balancuje přímo na hraně statistické významnosti 95 %.

5.2.2.2 Indexy pro odhad obsahu chlorofylu

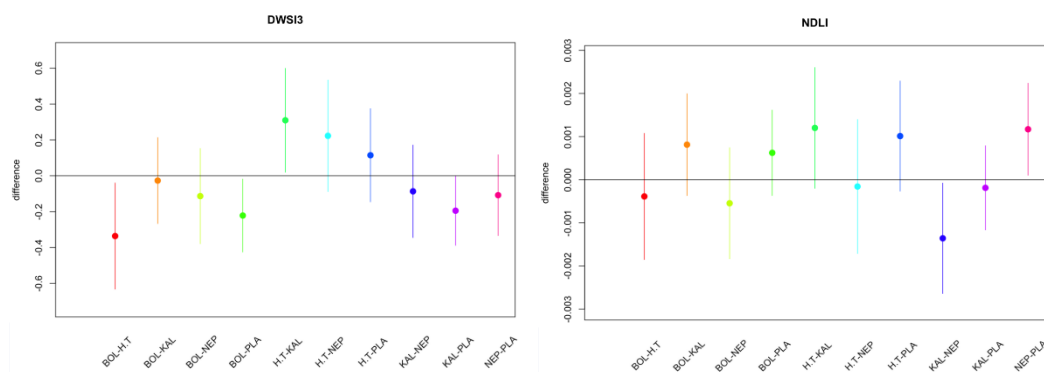


Obrázek 21: Vegetační indexy Vogelmann4 a SR7

Na obrázku 21 lze pozorovat statisticky významnou odlišnost provenience Bolevec od provenience Plasy, a také provenience Kaliště od provenience Plasy

v obou použitých vegetačních indexech pro odhad chlorofylu. Pouze ve vegetačním indexu Vogelmann4 se statisticky významně liší jen provenience Bolevec od provenience Horšovský Týn a provenience Horšovský Týn od provenience Kaliště.

5.2.2.3 Indexy pro odhad zdravotního stavu, obsahu N a ligninu

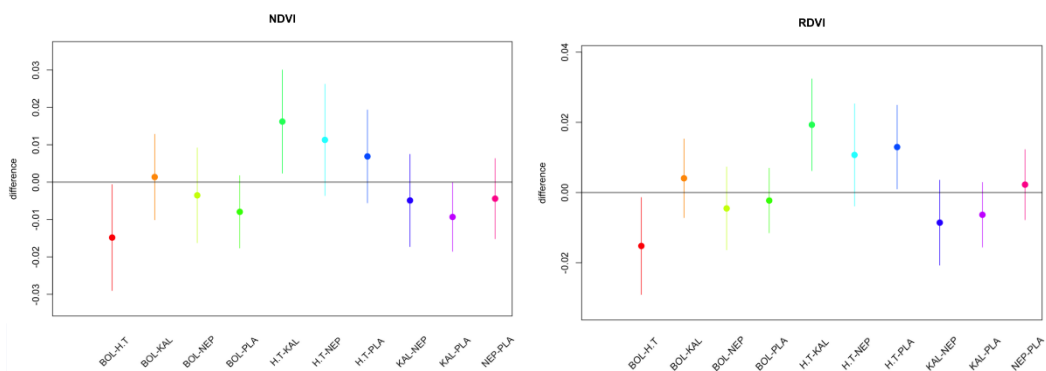


Obrázek 22: Vegetační indexy DWSI3 a NDLI

Pomocí vegetačního indexu DWSI3 jsou provenienční rozdíly zobrazeny vlevo na obrázku 22. DWSI3 může sloužit k odhadu zdravotního stavu roubovanců. Tento index vykazuje statisticky významný rozdíl provenience Bolevec od provenience Horšovský Týn, provenience Bolevec od provenience Plasy, provenience Horšovský Týn od provenience Kaliště a provenience Kaliště od provenience Nepomuk.

Vegetační index NDLI sestrojený pro odhad obsahu N a ligninu ukazuje statisticky významný rozdíl pouze mezi proveniencemi Kaliště od Nepomuk. Výsledky porovnání proveniencí pomocí vegetačního indexu NDLI jsou vyobrazeny na obrázku 22 vpravo.

5.2.2.4 Populární indexy používané zejména pro rozlišení vegetace



Obrázek 23: Vegetační indexy NDVI a RDVI

Na obrázku číslo 23 lze pozorovat statisticky významnou odlišnost provenience Bolevec od provenience Plasy a provenience Bolevec od provenience Horšovský Týn v obou vegetačních indexech NDVI i RDVI. Ve vegetačním indexu RDVI se provenience Horšovský Týn navíc statisticky významně liší od provenience Plasy. Dále se ve vegetačním indexu NDVI provenience Kaliště statisticky významně liší od provenience Plasy.

5.3 Případová studie porovnání dvou klonů v semenném sadu Holičkovna

Druhá případová studie, která byla realizována za účelem prokázání případných genetických rozdílů, spočívala v porovnání dvou klonů třeboňské borovice ze semenného sadu Holičkovna patřící pod LS Třeboň. U dvou vybraných klonů byly nejprve porovnány rozdíly v základní morfologii jehlic. Klony byly dále porovnány na základě surových spekter z měření hyperspektrální reflektance i její interpretace s využitím vegetačních indexů.

5.3.1 Porovnání na základě jednoduché morfologie jehlic

Tabulka 7: Statistické shrnutí datových souborů délek jehlic klonů 2071 a 2077

	Klon 2071	Klon 2077
minimum [mm]	62,61	60,43
1. kvartil [mm]	81.12	72.92
medián [mm]	86,11	78,16
Aritmetický průměr [mm]	85,98	79,23
3. kvartil [mm]	90.97	84.38
maximum [mm]	103,04	103,13
Rozptyl	80,78609	98,88417

Tabulka 7 obsahuje shrnutí údajů o datových souborech z měření délky jehlic klonů 2071 a 2077.

Tabulka 8: Dvouvýběrový F-test pro rozptyl

	Klon 2071	Klon 2077
střední hodnota [mm]	85,98068	79,23
rozptyl	80,78609	98,88417
pozorování	44	40
počet stupňů volnosti	43	39
F hodnota	0,816977	
p hodnota (F<=f) (1)	0,0258464	
Kritická hodnota F (1)	0,596546	

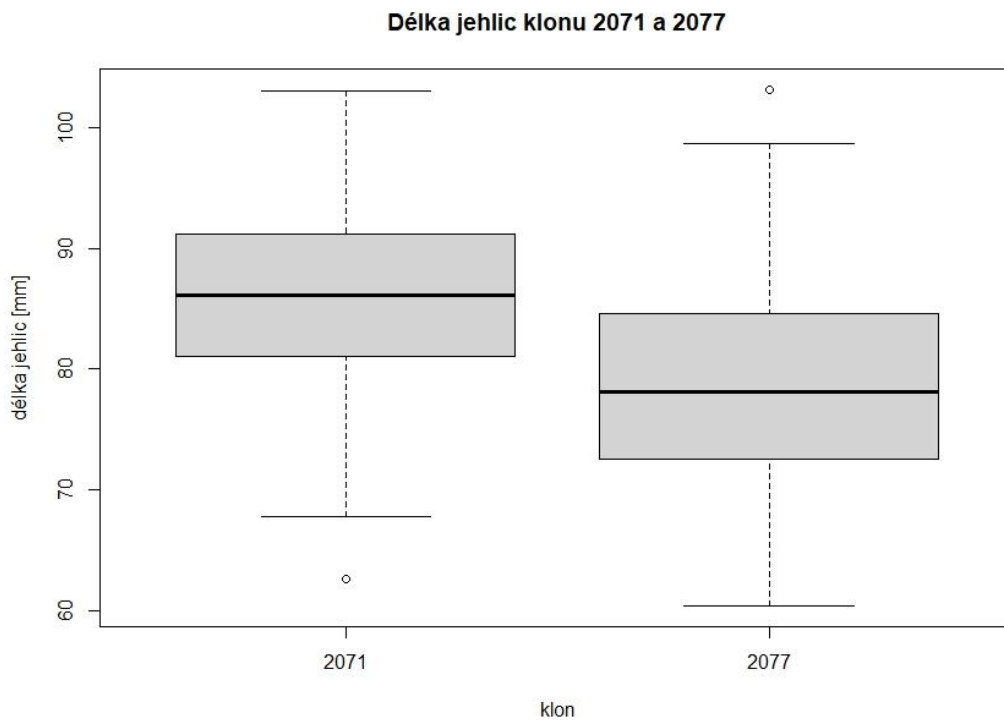
Z tabulky 8 vyplývá, že na hladině pravděpodobnosti 95 % nejsou rozptyly délek jehlic u klonů 2071 a 2077 stejné. Svědčí o tom hodnota $p = 0,0258467$.

Tabulka 9: Dvouvýběrový t-test s nerovností rozptylů

	Klon 2071	Klon 2077
střední hodnota [mm]	85,980681182	79,23
rozptyl	80,78609487	98,8841744
pozorování	44	40
hypotéza rozdíl stř. hodnot	0	
počet stupňů volnosti	79	
t hodnota	3,252386	
p hodnota (T<=t) (1)	0,000842	
kritická hodnota t krit (1)	1,664371	
p hodnota (T<=t) (2)	0,001684	
kritická hodnota t krit (2)	1,99045	

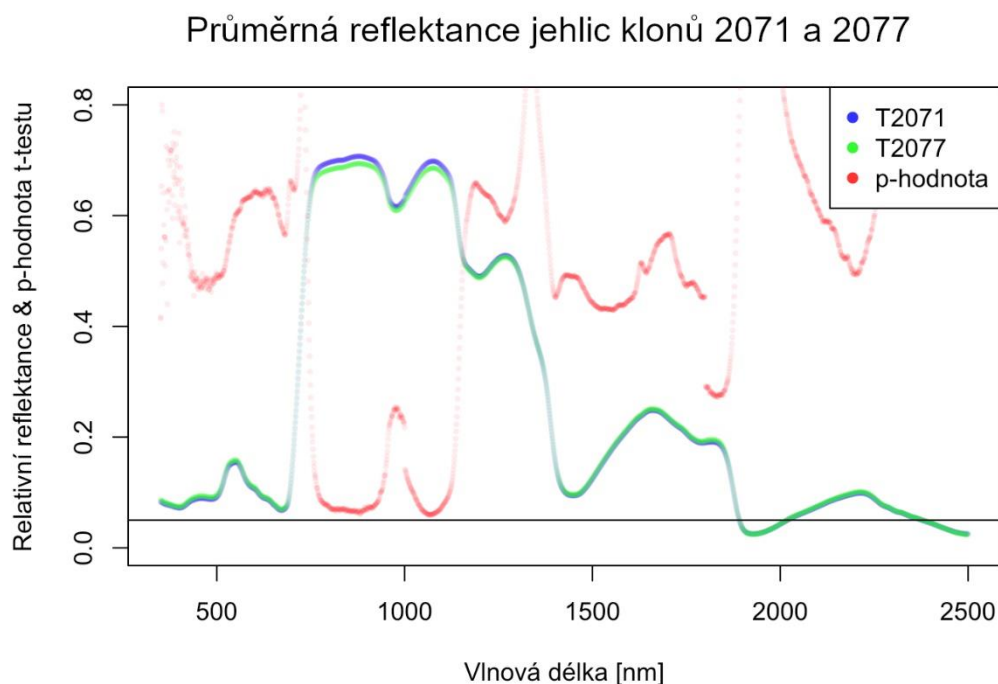
Z tabulky 9 vyplývá, že na hladině pravděpodobnosti 95 % můžeme nulovou hypotézu zamítnout, protože hodnota p je výrazně nižší než zvolená hladina 0,05. Průměry délek jehlic klonů 2071 a 2077 jsou statisticky významně odlišné.

Odlíšnost datových souborů měřených délek jehlic a jejich průměrů je vyobrazena pomocí krabicového grafu na obrázku 24. Z grafu je patrné, že průměr délky jehlic klonu 2071 se nenachází v mezikvartilovém rozpětí $Q_{0,75}$ - $Q_{0,25}$ (šedá barva v krabicovém grafu reprezentující středních 50 % hodnot proměnné) délky jehlic klonu 2077. Totéž platí i naopak, průměr délky jehlic klonu 2077 se nenachází v mezikvartilovém rozpětí klonu 2071.



Obrázek 24: Krabicový graf vyobrazující délku jehlic klonů 2071 a 2077 z lokality Třeboň.

5.3.2 Porovnání na základě hyperspektrální reflektance jehlic



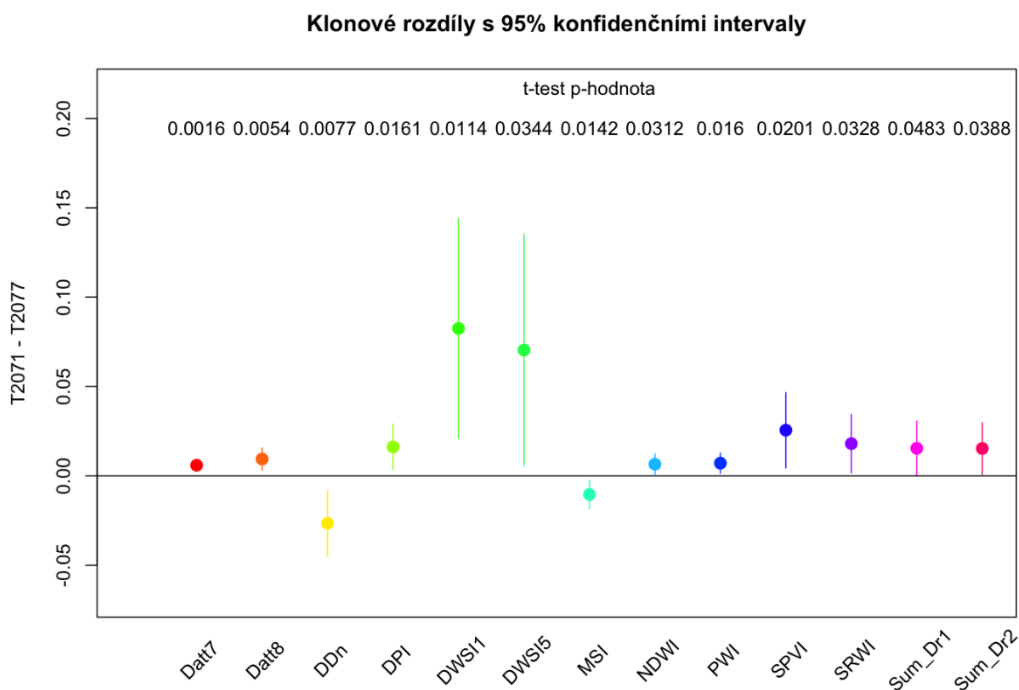
Obrázek 25: Průměrná reflektance jehlic klonů 2071 a 2077.

Na obrázku 25 lze pozorovat průměrné hodnoty reflektance jehlic klonů 2071 a 2077 z lokality Třeboň. Modré a zelené body tvoří dohromady křivky spektrální odrazivosti daných klonů. Červené body, které dohromady vizuálně tvoří křivku, představují p hodnoty porovnání reflektance jehlic dvou vybraných klonů na dané vlnové délce. Vodorovná černá linie představuje hodnotu $p = 0,05$, v oblastech, kde se červená křivka dostává pod tuto linii, existuje mezi proveniencemi statisticky významný rozdíl. Jak je na obrázku 25 zřetelně vidět, červená křivka se pod vodorovnou linii nedostává, klony tedy nejsou ve spektrální reflektanci na hladině spolehlivosti 95 % statisticky významně odlišné. V NIR části spektra elektromagnetického záření se však p vodorovné linii značně přibližují, v této části se dá hovořit alespoň o statisticky významné odlišnosti na hladině spolehlivosti 90 %.

5.3.3 Porovnání na základě vegetačních indexů

Pro lepší interpretaci rozdílnosti klonů v hyperspektrální reflektanci jehlic byly použity vegetační indexy. Rozdílnost mezi klony ve vegetačních indexech je vyobrazena v grafu na obrázku 26 pomocí standardní chyby rozdílu (Standard Error of the Difference). Pokud konfidenční interval (svislá čára) kolem rozdílu (tečka) neprotíná vodorovnou linii s nulovou hodnotou rozdílu, je rozdíl mezi klony v daném vegetačním indexu statisticky významný.

Na obrázku 26 jsou zastoupeny takové vegetační indexy vybrané ze všech již publikovaných indexů (datový balíček *hsdar*), v kterých se projevil na hladině spolehlivosti 95 % mezi klony rozdíl. V horním řádku jsou uvedeny hodnoty *p* porovnání klonů na základě každého z uvedených vegetačních indexů.



Obrázek 26: Klonové rozdíly ve spektrální reflektanci zobrazené pomocí vybraných vegetačních indexů.

Klony se mezi sebou liší ve čtyřech vegetačních indexech reflektujících obsah vody v jehlicích: Datt7, Datt8, NDWI a PWI. Co se týče vegetačních indexů pro odhad chlorofylu, klony se liší v pěti případech: DDn, DPI, SPVI, Sum_Dr1 a Sum_Dr2. Z vegetačních indexů pro odhad zdravotního stavu jsou rozdíly mezi

klony ve třech případech: DWSI1, DWSI5 a MSI. Klony se také liší v jednoduchém poměrovém indexu SRWI. Hodnoty p porovnání klonů na základě jednotlivých vegetačních indexů jsou vyobrazeny v horním řádku na obrázku 26 nad každým uvedeným vegetačním indexem.

6 Diskuse

6.1 Diskuse k rozdílnosti semenných sadů

Na základě surových spekter získaných měření hyperspektrální reflektance byl nalezen ve většině oblastí spektra elektromagnetického záření významný rozdíl mezi sledovanými semennými sady.

Oblast, v které významné rozdíly nalezeny nebyly, odpovídá oblasti absorpce chlorofylem. Rozdíly v reflektanci v oblasti RED EDGE však již významné jsou. Jelikož poloha RED EDGE a obsah chlorofylu spolu silně korelují (Baranoski a Rokne 2005), nelze s jistotou rozdílnost v obsahu chlorofylu v jehlicích vyloučit. Pro interpretaci informací v oblasti RED EDGE křivky reflektance by bylo třeba využít například některých vegetačních indexů, které s touto oblastí počítají, tak jak to bylo provedeno v případových studiích pro porovnání proveniencí a klonů.

Za nejčitelnější výsledek vyplývající z porovnání spektrálních křivek odrazivosti se dá považovat odvozený obsah vody v jehlicích. Významné oblasti absorpce elektromagnetického záření vodou obsaženou ve vegetaci, se nacházejí kolem 1450 nm a 1950 nm, obsah vody se také nepřímo projevuje reflektancí kolem 550 nm v zelené oblasti elektromagnetického spektra (Kureel a kol. 2021). Ve všech těchto oblastech jsou mezi semennými sady statisticky významné rozdíly. Semenný sad Doubrava na lokalitě Plasy se v obsahu vody v jehlicích na základě hyperspektrálních dat liší od ostatních nejvíce. Okolo vlnových délek 1450 nm a 1950 nm má nejnižší reflektanci, odpovídající vyššímu obsahu vody, což potvrzuje i vyšší reflektance tohoto sadu kolem vlnové délky 550 nm, nepřímo reflektující obsah vody. Jiný obsah vody v jehlicích naznačuje odlišné hospodaření s vodou této lokální populace. Lokalita Plasy vykazuje v porovnání s ostatními lokalitami nejmenší průměrný roční úhrn srážek, vyšší udržovaný obsah vody v jehlicích tak může představovat jistou adaptaci na sušší podmínky.

Stres u rostlin pozměňuje jejich spektrální vlastnosti, hodnoty reflektance viditelné části elektromagnetického spektra od přibližně 530 nm do 670 nm se u stresované vegetace zvyšují, dochází ke žloutnutí díky dominanci karotenoidů nad chlorofyly (Roman a Ursu 2016). Rozdíly v reflektanci v oblasti kolem 600 nm by mohly být vysvětleny také rozdílným vystavením borovic stresu.

Semenné sady se jeví rozdílné také v NIR části elektromagnetického spektra odrážející rozdílnou buněčnou strukturou (hlavně mezofylem). To může být zapříčiněno opět rozdílnou mírou stresu nebo genetickými rozdíly. V NIR oblasti se jeví nejvíce odlišný semenný sad Hrádek na lokalitě Děčín. V tomto semenném sadu se jako v jediném vyskytuje náhorní ekotyp borovice lesní, dalo by se tedy spekulovat o přímém vlivu genetické adaptace, která je zařizována v této lokální populaci. Semenný sad Hrádek (založen 2003) je navíc oproti zbylým dvěma semenným sadům (založeny 1980 a 1981) výrazně mladší, což se může také promítat v rozdílech NIR reflektance.

Mezi všemi porovnávanými semennými sady existuje statisticky významný rozdíl v obsahu dusíku v jehlicích, největší rozdílnost vykazovaly lokality Plasy a Děčín ($p = 0,000008$). Největší obsah dusíku měly jehlice borovic na lokalitě Děčín (1,73 %), dále na lokalitě Třeboň (1,52 %) a nejméně na lokalitě Plasy (1,32 %).

Největší zastoupení dusíku ve dřevině je v listech (1-2 %), nejméně pak ve dřevě. Dusík je základní složkou bílkovin, nejvíce se proto nachází v chloroplastech a mitochondriích. Nedostatek dusíku se může projevat mimo jiné chlorózami, při kterých listy žloutnou a usychají (Tomášková a Kubásek 2016).

Obsah dusíku v listech vysoce koreluje s reflektancí listů kolem vlnových délek 500 nm, 550 nm a v RED EDGE oblasti (Albayrak 2008). Semenné sady jsou v reflektanci jehlic na těchto vlnových délkách odlišné. Měřeným rozdíly v obsahu dusíku v jehlicích odpovídají zejména rozdíly reflektance jehlic na vlnové délce 550 nm. Měření hyperspektrální reflektance by proto mohlo být použitelnou metodou pro odhad obsahu dusíku, zejména při využití vegetačních indexů využívajících pro svůj výpočet zmíněné oblasti elektromagnetického spektra záření.

Mezi semenným sadem Hrádek pod LS Děčín a ostatními semennými sady byl statisticky významný rozdíl v obsahu fosforu v jehlicích (Děčín = 1644,2 mg/kg, Třeboň = 1461,79 mg/kg, Plasy = 1468,2 mg/kg).

Fosfor je součástí fosfátů, cukrů, nukleotidů, mnoha koenzymů a fosfolipidů. Fosfor je často limitující živinou pro růst a produkci lesních i nelesních ekosystémů. Nedostatek fosforu se u rostlin projevuje hlavně v mladých pletivech. U jehličnanů

je barva jehlic při deficienci fosforu zelená, jen poněkud mdlá, příliš se tedy nemění (Tomášková a Kubásek 2016). Odlišnost obsahu fosforu v jehlicích na lokalitě Děčín může být způsobeno buďto odlišným ekotypem borovice lesní nebo faktory prostředí. Promítat se může i stáří klonů v semenných sadech.

Porovnání semenných sadů, kde figurují odlišné populace, nelze považovat za rigorózní. Nelze přesně a objektivně rozlišit, do jaké míry je odlišnost dána genotypem či faktory prostředí.

6.2 Diskuse k případové studii porovnání proveniencí v semenném sadě Doubrava

V předchozích výzkumech již byly některé rozdíly ve spektrální reflektanci asimilačního aparátu mezi proveniencemi dřevin prokázány. Prvním příkladem mohou být provenience břízy bělokoré (*Betula pendula*) ve Finsku, u nichž byly prokázány signifikantní rozdíly mezi spektrálními vlastnostmi listů určujícími obsah chlorofylu, autoři pro interpretaci rozdílnosti používají vegetační indexy CRI (chlorophyll reflectance index) a NDVI (Deepak a kol. 2020). U borovice lesní (*Pinus sylvestris*) byly již v předchozích studiích prokázány rozdíly mezi spektrálními projevy jehlic některých proveniencí ve viditelné a NIR části elektromagnetického záření. Rozdíly v NIR části vycházejí u borovic podstatně významnější. Mohou být způsobeny odlišnostmi v buněčné struktuře, jako je lignifikace nebo rozdílná tloušťka buněčných stěn (Danusevicius a kol. 2014).

Provenienční klastry, které byly za účelem demonstrování genetických rozdílů vytvořeny sloučením genotypů shodného původu, vykazují v rámci spekter odrazivosti jehlic statisticky významné rozdíly.

První oblastí na spektrální křivce odrazivosti jehlic, v které se provenience vzájemně odlišovaly, byla oblast okolo vlnové délky 381 nm. V této oblasti se významně odlišovala provenience Plasy od proveniencí Bolevec, Kaliště a Nepomuk. Okolo této vlnové délky má chlorofyl maximální absorpční vlnu v modré oblasti spektra elektromagnetického záření (Milne a kol. 2015). Odlišnost na této vlnové délce by proto mohla být vysvětlena rozdílným obsahem chlorofylu v jehlicích jednotlivých proveniencí.

Na vlnové délce 478 nm byla souhrnná hodnota p hodnot všech deseti porovnání nejnižší, což udává informaci o největší variabilitě průměrné hodnoty reflektance jehlic proveniencí na měřené vlnové délce. V této oblasti se projevuje například absorpce karotenoidy (450 nm) (Albrechtová a kol. 2017), ale také absorpce chlorofylem, který ostatní pigmenty často maskuje (Roman a Ursu 2016). Statisticky významně se v této oblasti však liší jen dvojice proveniencí Plasy a Bolevec. Rozdílnost provenience Bolevec od provenience Horšovský Týn a provenience Kaliště od provenience Plasy lze potvrdit pouze na hladině spolehlivosti 90 %.

Další oblastí na spektrální křivce odrazivosti jehlic, v které se provenience vzájemně lišily, byla oblast okolo vlnové délky 1524 nm. V této oblasti se odlišovala provenience Nepomuk od provenience Bolevec na hladině spolehlivosti 95 % a od provenience Kaliště na hladině spolehlivosti 90 %. Není úplně jasné, zda je tento rozdíl způsoben různým obsahem vody v jehlicích. V grafu mnohonásobného porovnání rozdílnosti reflektance jehlic na obrázku 14 je vidět, že v oblasti vysoké absorpce elektromagnetického záření vodou v jehlicích (okolo 1450 nm) se hodnoty p všech porovnání dostávají nad vodorovnou linii určující statistickou významnost. Rozdíl v reflektanci v této oblasti by mohl být vysvětlen například různým obsahem některých makroprvků nebo proteinů v jehlicích.

V oblasti okolo vlnových délek 1854 nm i 2267 nm se statisticky významně odlišovala provenience Bolevec od proveniencí Nepomuk a Plasy. Důvody těchto rozdílností se zdají být stejné jako u vlnové délky 1524 nm.

Z výsledků porovnání proveniencí pomocí vegetačních indexů pro odhad obsahu vody ve vegetaci vyplývá rozdílnost provenience Bolevec od proveniencí Plasy a Horšovský Týn. Jelikož se provenience Bolevec a Plasy liší také v reflektanci zobrazené pomocí surových spekter v oblastech vysoké absorpce elektromagnetického záření vodou ve vegetaci, je velmi pravděpodobné, že mezi těmito proveniencemi opravdu existuje rozdíl v obsahu vody v jehlicích.

V porovnání proveniencí pomocí vegetačních indexů pro odhad obsahu chlorofylu se jevila nejvíce odlišná provenience Plasy, která se statisticky významně lišila od proveniencí Bolevec a Kaliště. Ve vegetačním indexu Vogelmann⁴ se navíc statisticky významně liší jen provenience Bolevec od

provenience Horšovský Týn a provenience Horšovský Týn od provenience Kaliště. Co se týče obsahu chlorofylu, provenience Plasy se jeví nejvíce odlišná od ostatních proveniencí v porovnání surových spekter i vegetačních indexů.

Vegetační index DWSI3 indikující zdravotní stav ukázal statisticky významný rozdíl provenience Bolevec od provenience Horšovský Týn, provenience Bolevec od provenience Plasy, provenience Horšovský Týn od provenience Kaliště a provenience Kaliště od provenience Nepomuk. Tento vegetační index byl však navržen pro zhodnocení zdravotního stavu cukrové třtiny, jeho vhodnost pro použití u dřevin není dosud zcela ověřena.

Vegetační index NDLI sestrojený pro odhad obsahu N a ligninu ukazuje statisticky významný rozdíl pouze mezi proveniencemi Kaliště a Nepomuk. Ač byl tento vegetační index sestrojen pro odhad obsahu ligninu ve vegetaci, funguje zejména pro determinaci obsahu dusíku (Serrano a kol. 2002).

Vegetační indexy NDVI i RDVI prokazují statisticky významnou odlišnost provenience Bolevec od proveniencí Plasy a Horšovský Týn. Navíc vegetační index RDVI ukazuje rozdíl i mezi proveniencemi Horšovský Týn a Plasy a vegetační index NDVI mezi proveniencemi Kaliště a Plasy. Vegetační index RDVI vychází z vegetačního indexu NDVI, proto jsou si ve výsledcích podobné.

Provenience Bolevec, která se spolu s proveniencí Plasy nejčastěji výrazně odlišovala od ostatních proveniencí, pochází ze stanovišť s chudou písčitou půdou. Je možné, že rozdílnost této provenience je zapříčiněna její adaptací na extrémní podmínky prostředí.

6.3 Diskuse k případové studii porovnání dvou klonů v semenném sadě Holičkovna

V druhé případové studii bylo prokázáno, že mezi jednotlivými klony můžou existovat rozdíly v základní morfologii jehlic, které se mohou dále manifestovat i v rámci reflektance. Dva testované klony se významně odlišovaly v délce jehlic, to však nemusí platit pro všechny klony v semenném sadě.

V hyperspektrální reflektanci jehlic se pomocí surových spekter nepodařilo prokázat na hladině spolehlivosti 95 % statisticky významný rozdíl. Na hladině spolehlivosti 90 % se již statisticky významný rozdíl objevoval, a to v NIR oblasti

elektromagnetického záření. Spektrální vlastnosti vegetace v této oblasti elektromagnetického záření jsou dány především buněčnou strukturou (Roman a Ursu 2016). Právě tato odlišnost by mohla korelovat s výrazně odlišnou délkou jehlic těchto dvou sledovaných genotypů.

Na bázi vybraných vegetačních indexů se klony mezi sebou statisticky významně odlišovaly již na hladině spolehlivosti 95 %, a to ve čtyřech vegetačních indexech reflektujících obsah vody v jehlicích (Datt7, Datt8, NDWI a PWI), v pěti vegetačních indexech reflektujících obsah chlorofylu v jehlicích (DDn, DPI, SPVI, Sum_Dr1 a Sum_Dr2), ve vegetačním indexu SRWI a ve třech vegetačních indexech reflektujících zdravotní stav (DWSI1, DWSI5 a MSI). Oproti porovnání proveniencí se klony významně liší ve výsledných hodnotách vegetačního indexu MSI, který reflektuje zdravotní stav, respektive míru stresu. MSI byl navíc pro tento účel testován i na borovicích, což dělá výsledek relevantnější oproti indexům DWSI1 a DWSI5 vyvinutých původně pro cukrovou třtinu.

Výběr dvou klonů 2071 a 2077 pro porovnání byl proveden po zjištění, že umístění všech jejich ramet spolu sousedí. Tento fakt nám pomáhá lépe napodobit blokové uspořádání statisticky designovaného experimentu. Zpravidla je rozmístění klonů v semenném sadu provedeno tak, aby spolu stejné klony sousedily v co nejméně případech. Tím se docílí co nejvyšší genetické diverzity potomstva.

7 Závěr

V práci byly prokázány statisticky významné rozdíly mezi zkoumanými semennými sady v hyperspektrálních vlastnostech jehlic borovice lesní. Rozdílnost semenných sadů se projevila také v obsahu dusíku a fosforu v jehlicích. Porovnání odlišných populací z jednotlivých semenných sadů však nelze považovat za rigorózní. Míru odlišnosti danou genotypem či prostředím nelze přesně a objektivně rozlišit.

Za účelem demonstrování genetických rozdílů byly v práci vytvořeny dvě případové studie. V první případové studii byly mnohonásobně porovnávány provenienční klastry vytvořené sloučením genotypů stejného původu z lokálních porostů v rámci semenného sadu Doubrava pod LS Plasy. Mezi některými ze zastoupených proveniencí byl prokázán statisticky významný rozdíl v rámci spekter odrazivosti jehlic i jejich interpretací vegetačními indexy. Rozdíly v hyperspektrální reflektanci jehlic indikují v různých regionech spektra informace o odlišném obsahu vody, obsahu chlorofylu, zdravotním stavu, buněčné struktuře nebo také obsahu dusíku. Tyto informace by mohly být využity při budoucím šlechtění, zejména pokud záměrem bude šlechtění rezistentních jedinců například vůči suchým podmínkám.

Druhá případová studie pro demonstrování genetických rozdílů mezi dvěma vybranými klony v semenném sadu Holičkovna pod LS Třeboň prokázala rozdílnost morfologie jehlic těchto dvou klonů. Statisticky významnou rozdílnost v hyperspektrální reflektanci jehlic se podařilo prokázat jen pomocí vybraných vegetačních indexů.

Jak již bylo řečeno, informace o hyperspektrálních projevech jehlic by mohly být využity při šlechtění rezistentních jedinců, dále by mohly zlevnit a zpřesnit stávající metody genetické evaluace. Jako obzvláště užitečné se ukázalo použití vegetačních indexů vytvořených pro speciální účel – predikci sledovaných fyziologických znaků.

Pro potenciální využití této metody ve šlechtění lesních dřevin bych navrhoval jako další krok vývin nových vegetačních indexů určených speciálně pro odhad požadovaných fyziologických vlastností u konkrétních dřevin. V další studii by bylo vhodnější zvolit pro porovnání semenné sady obsahující stejné genotypy, což

by usnadnilo získání informace o geneticky podmíněné variabilitě fyziologických znaků. Všechny sledované fyziologické vlastnosti jehlic by bylo záhodno současně přímo měřit, aby mohla být spolehlivost jejich predikce na základě měření hyperspektrální reflektance ověřena.

8 Seznam literatury a použitých zdrojů

1. ALAN, M. Silviculture and tree breeding for planted forests. *Eurasian Journal of Forest Science*. 2020, vol. 8, no. 1, s. 74-83. ISSN: 2147-7493.
2. ALBAYRAK, S. Use of Reflectance Measurements for the Detection of N, P, K, ADF and NDF Contents in Sainfoin Pasture. *Sensors*. 2008, vol. 8., no. 11, s. 7275-7286. ISSN 1424-8220.
3. 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.
4. APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane "orange rust" disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2004, vol. 25, no. 2, s. 489-498. ISSN: 1366-5901.
5. ASD Inc. *FieldSpec® 3 User Manual*. ASD Document 600540 Rev. J, 2010.
6. BARANOSKI, G. V. G.; RONKE, J. G. A practical approach for estimating the red edge position of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. 2005, vol. 26, no. 3, s. 503-521. ISSN 1366-5901.
7. CROFT, H.; CHEN, J. M.; ZHANG, Y. The applicability of empirical vegetation indices for determining leaf chlorophyll content over different leaf and canopy structures. *Ecological Complexity*. 2014, vol. 17., s. 119-130. ISSN 1476-945X.
8. ČEPL, J.; HOLÁ, D.; STEJSKAL, J.; KORECKÝ, J.; KOČOVÁ, M.; LHOTÁKOVÁ, Z.; TOMÁŠKOVÁ, I.; PALOVSKÁ, M.; ROTHOVÁ, O.; WHETTEN, R.; KAŇÁK, J.; ALBRECHTOVÁ, J.; LSTIBŮREK, M. Genetic variability and heritability of chlorophyll a fluorescence parameters in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Tree Physiology*. 2016, vol. 36, no. 7, s. 883-895. ISSN 1758-4469.

9. ČEPL, J.; STEJSKAL, J.; KORECKÝ, J.; HEJTMÁNEK, J.; FALTINOVÁ, Z.; LSTIBŮREKM, M.; GEZAN, S. The dehydrins gene expression differs across ecotypes in Norway spruce and relates to weather fluctuations. *Scientific Reports*. 2020, vol. 10, 20789. ISSN 2045-2322.
10. ČEPL, J.; STEJSKAL, J.; LHOTÁKOVÁ, Z.; HOLÁ D., KORECKÝ, J.; LSTIBŮREK, M.; TOMÁŠKOVÁ, I.; KOČOVÁ, M.; ROTHOVÁ, O.; PALOVSKÁ, M.; HEJTMÁNEK, J.; KREJZKOVÁ, A.; GEZAN, S.; WHETTEN, R.; ALBRECHTOVÁ, J. Heritable variation in needle spectral reflectance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) peaks in red edge. *Remote Sensing of Environment*. 2018, vol. 219, no. 16, s. 89-98. ISSN 0034-4257.
11. ČEŠKA, P. *Zakládání a rozvoj semenných sadů lesních dřevin u VLS ČR, s.p.* Disertační práce. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin, 2014.
12. DANUSEVICIUS, D.; MASAITIS, G.; MOZGERIS, G. Visible and near infrared hyperspectral imaging reveals significant differences in needle reflectance among Scots pine provenances. *Silvae Genetica*. 2014, vol. 63, no. 4, s. 168-180. ISSN 2509-8934.
13. DATT, B. Remote sensing of water content in Eucalyptus leaves. *Australian Journal of Botany*, 1999 vol. 47, no. 6, s. 909-923. ISSN 0067-1924.
14. DEEPAK, M.; KESKI-SAARI S.; FAUCH, L.; GRANLUND, L.; OKSANEN, E.; KEINÄNEN, M. Spectral Reflectance in Silver Birch Genotypes from Three Provenances in Finland. *Remote sensing*. 2020, vol. 12, no. 17, 2677. ISSN 2072-4292.
15. DOBROVOLNÝ P., HERBER, V.; HYNEK, A. *Výuka krajinné ekologie a DPZ*. [online]. Brno : Přírodovědecká fakulta MUNI, 2001 [cit. 2021-02-18] Dostupné z WWW: <<https://www.sci.muni.cz/~dobro/intro.html>>.
16. DURRANT, T.; RIGO, D.; CAUDULLO, G. *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; DE RIGO, D.; CAUDULLO, G.; HOUSTON DURRANT, T.; MAURI, A. (Ed.) *European Atlas of Forest Tree Species*. Luxembourg : Publication Office of the European Union, 2016, s. 132-133. ISBN 978-92-79-52833-0.

17. EBER, A. Jsou borové porosty připraveny odolávat suchu? : Jaký postup obnovy zvolit při adaptaci porostů na suchu? *LESNICKÁ PRÁCE*. 2019, vol. 2, s. 48-51. ISSN: 0322-9254.
18. ELVIDGE, C. D.; CHEN, Z. K. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indexes. *Remote Sensing of Environment*. 1995, vol. 54, no. 1, s. 38-48. ISSN: 0034-4257.
19. ERIKSSON, G.; EKBERG, I.; CLAPHAM, D. *An introduction to forest genetics*. 2. vyd. Uppsala : Genetic Center, Department of Plant Biology and Forest Genetics, SLU, 2006. 186 s. ISBN 91-576-7190-7.
20. FILELLA, I.; PENUELAS, J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*. 1994, vol. 15, no. 7, s. 1459-1470. ISSN: 1366-5901.
21. GAMON, J. A.; SURFUS, J. S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*. 1999, vol. 143., s. 105-117. ISSN 1469-8137.
22. Gao, B.-c. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996, vol. 58, no. 3, s. 257-266. ISSN: 0034-4257.
23. GASHAW, T.; TEFERI, B.; MEBRAT, W. Vegetation Stress Detection Using GIS Techniques in East of Lake Tana, Ethiopia. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*. 2015, vol. 2, no. 1, s. 8-10. ISSN 2394-5915.
24. GILMOUR, A. R.; GOGEL, B. J.; CULLIS, B. R.; THOMPSON, R. *ASReml User Guide*. Hemel Hempstead : VSN International Ltd, 2009. 372 S.
25. HRUŠTIAKOVÁ, D.; JARKOVSKÝ, J; LITTNEROVÁ, S.; DUŠEK, L. *Vícerozměrné statistické metody v biologii*. 1. vyd. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2012. 111 s. ISBN 978-80-7204-791-8.
26. HUNT, E. R.; ROCK, B. N. Detection of changes in leaf water-content using near-infrared and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. 1989, vol. 30, no. 1, s. 43-54. ISSN: 0034-4257.

27. CHEN, J.; SONG, L.; WAIWRIGHT, M. J.; JORDAN, M. I. Learning to Explain: An Information-Theoretic Perspective on Model Interpretation. *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*. 2018, Stockholm, PMLR 80.
28. INMETEO, s.r.o. (2021) - poskytování meteorologických informací. Dostupné z WWW: <<https://www.inmeteo.cz>>.
29. IVANEK, O.; BERAN, F.; ČÁP, J.; FRÝDL J.; KAŇÁK, J.; MANNOVÁ, J.; NOVOTNÝ, P. *ZAKLÁDÁNÍ SEMENNÝCH SADŮ DRUHÉ GENERACE PRO BOROVICE LESNÍ*. Strnady : Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., 2009.
30. IVANEK, O.; NOVOTNÝ, P.; FRÝDL J. *Metodika zakládání semenných sadů 1,5. generace*. [1. vyd.] Strnady : Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., 2010. ISBN 978-80-7417-037-9.
31. KAŇÁK, J.; FRÝDL J.; NOVOTNÝ, P.; ČÁP, J. *Metodika zakládání semenných sadů*. [1. vyd.] Strnady : Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., 2008. ISBN 978-80-7417-007-2.
32. KAŇÁK, K. Borovice lesní a prehistorie jejího rodu. *LESU ZDAR*. LČR 2002, vol. 1.
33. KLADIVO, P. *Základy statistiky*. 1.vyd. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2013. 62 s. ISBN 978-80-244-3842-9.
34. KLEM, K.; MÍŠA, P.; MÍŠA, M.; KŘEN, J. *Vy užití měření spektrální odrazivosti a odvozených specializovaných vegetačních indexů v pěstební technologii jarního ječmene*. Kroměříž; Brno; Havlíčkův Brod : Agrottest fito, s.r.o; Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.; GRYP HB, spol. s r.o.; Mendelova univerzita v Brně, 2014. 44 s. ISBN 978-80-87555-12-5.
35. 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.
36. KUREEL, N.; SARUP, J.; MATIN, S.; GOSWAMI S., KUREEL, K. Modelling vegetation health and stress using hypersepctral remote sensing data. *Modeling Earth Systems and Environment*. [online]. 2021, Dostupné z WWW: <<https://doi.org/10.1007/s40808-021-01113-8>>.

37. LE MAIRE, G.; FRANCOIS, C.; DUFRENE, E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2004, vol. 89, no. 1, s. 1-28. ISSN: 0034-4257.
38. LE MAIRE, G.; FRANCOIS, C.; SOUDANI, K.; BERVEILLER, D.; PONTAILLER, J.-Y.; BREDÁ, N.; GENET, H.; DAVI, H.; DUFRENE, E. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*. 2008, vol. 112, no. 10, s. 3846-3864. ISSN: 0034-4257.
39. LEUGNEROVÁ A. *Pinus sylvestris* L. – borovice lesní (sosna) / borovica lesná. *BOTANY.CZ* [online]. 2007-07-03 [cit. 2020-12-29] Dostupné z WWW:< <https://botany.cz/cs/pinus-sylvestris>>.
40. LHOTÁKOVÁ, Z.; BRODSKÝ, L.; KUPKOVÁ, L.; KOPAČKOVÁ-STRNADOVÁ, V.; POTŮČKOVÁ, M.; MIŠUREC, J.; KLEMENT, A.; KOVÁŘOVÁ, M.; ALBRECHTOVÁ, J. Detection of multiple stresses in Scots pine growing at post-mining sites using visible to near-infrared spectroscopy. *Environmental science. Processes & impacts*. 2013, vol. 15., no. 11, s. 2004-2015. ISSN 2050-7895.
41. LICHTENTHALER, H. K.; LANG, M.; SOWINSKA, M.; HEISEL, F.; MIEHE, J. A. Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *Journal of Plant Physiology*. 1996, vol. 148, no. 5, s. 599-612. ISSN: 0176-1617.
42. 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.
43. MAPY.CZ (2021) Mapová aplikace společnosti seznam.cz Dostupné z WWW: <<https://mapy.cz>>.
44. MILNE, B. F.; TOKER, Y.; RUBIO, A.; NIELSEN, S. B. Unraveling the Intrinsic Color of Chlorophyll. *Angewandte Chemie International Edition*. 2015, vol. 54, no. 7 s. 2170-2173. ISSN 1521-3773.

45. MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Zelená zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019*. Praha : Ministerstvo zemědělství 2020. ISBN 978-80-7434-571-5.
46. PÂQUES, 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.
47. PARDOS, M.; DEL RÍO, M.; PRETZSCH, H.; JACTEL, H.; BIELAK, K.; BRAVO, F.; BRAZAITIS, G.; DEFOSSEZ, E.; ENGEL, M.; GODVOD, K.; JACOBS, K.; JANSONS, A.; MORIN, X.; NOTHDURF, A.; ORETI, L.; PONETTE, Q.; PACH, M.; RIOFRÍO, J.; RUÍZ-PEINADO, R.; TOMAO, A.; UHL, E.; CALAMA, R. The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe. *Forest Ecology and Management*. 2021, vol. 481, 118687. ISSN: 0378-1127.
48. PAVLOVÁ, L. *Fyziologie rostlin*. 1. vyd. Praha : Karolinum, 2006. 254 s. ISBN 8024609851.
49. PENUELAS, J.; PINOL, J.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*. 1997, vol. 18, no. 13, s. 2869-2875. ISSN: 1366-5901.
50. PEŠKOVÁ, V.; SOUKUP, F.; KNÍŽEK, M. Biotičtí škodliví činitelé na borovici a sucho. *LESNICKÁ PRÁCE*. 2016, vol. 4, příloha s. 1-8. ISSN: 0322-9254.
51. PUŠ, V. *Popisná statistika*. 1.vyd. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, 2007. 44 s. ISBN 978-80-213-1662-1.
52. RAMBOUSEK, J. Semenné sady lesních dřevin v České republice. *LESNICKÁ PRÁCE*. 2003, vol. 1, s. 20-39. ISSN: 0322-9254.
53. RANTALA, S. (Ed.). *Finnish Forestry Practice and Management*. 1. vyd. Keuruu : Metsäkustannus Oy, 2011. 272 s. ISBN 978-952-5694-62-8.
54. RICHARDSON, A. D.; DUGAN, S. P.; BERLIN, G. P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*. 2002, vol. 153., s. 185-194. ISSN 1469-8137.

55. ROMAN, A.; URSU, T. Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. In OPREANU, C. H. (ed.). *LANDSCAPE ARCHAEOLOGY ON THE NORTHERN FRONTIER OF THE ROMAN EMPIRE AT POROLISSUM. An interdisciplinary research project*. Cluj-Napoca : Mega Publishing House, 2016, s. 141-150. ISBN 978-606-543-787-6.
56. ROUJEAN, J. L.; BREON, F. M. Estimating par absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*. 1995, vol. 51, no. 3, s. 375-384. ISSN: 0034-4257.
57. SEBERA, M.; *Statistika – vícerozměrné metody*. 1. vyd. Brno : Masarykova univerzita, 2012.
58. SENF, C.; BURAS, A.; ZANG, C. S., RAMMIG, A.; SEIDL, R. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*. 2020, vol. 11., article nr. 6200. ISSN 2041-1723.
59. SLAVÍK, M.; KUŽELKA, K.; MODLINGER, R.; TOMÁŠKOVÁ, I.; SUROVÝ, P. UAV Laser Scans Allow Detection of Morphological Changes in Tree Canopy. *Remote sensing*. 2020, vol. 12, no. 22, 3829. ISSN 2072-4292.
60. STEJSKAL, J.; HORÁK, J.; TYPTA, J. Effect of hybridization in the firs: artificial hybridization may lead to higher survival rate. *European Journal of Forest Research*. 2016, vol. 135, s. 1097-1105. ISSN 1612-4677.
61. SVOBODA, J.; ČERVENSKÝ, J.; DOHNAL, M.; DOHNANSKÝ, T.; FÍŠER, K.; HRDLIČKA, O.; JURÁSEK, M.; KOTRLA, P.; KRCHOV, V.; MORÁVEK, F.; NEZNAJOVÁ, Z.; PAŘÍZEK, M.; PŮLPÁN, L.; STONAWSKY, J. *Koncepce zachování a reprodukce genových zdrojů lesních dřevin u Lesů České republiky, s. p., na období 2010–2019*. Hradec Králové : Lesy České republiky, s. p., 2010. 37 s. ISBN 978-80-86945-21-7.
62. 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.

63. ŠTÍCHA, V.; GAŠPARÍK, M.; HRIB, M.; KABEŠ, A.; KUŠTA, T.; PODRÁZSKÝ, V.; PRKNOVÁ, H.; SLOUP, R.; ŠÁLEK, L.; ŠRŮTKA, P.; TOMÁNEK, J.; URBÁNEK, V.; KUŽELKA, K.; ZEIDLER, A. *LESNÍ HOSPODÁŘSTVÍ*. 2.vyd. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, 2017. 281 s. ISBN 978-80-213-2788-7.
64. TOMÁŠKOVÁ, I.; KUBÁSEK, J. *Fyziologie lesních dřevin I. : Fyziologie, produkce a stresy rostlin*. 1.vyd. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin, 2016. 269 s. ISBN 978-80-213-2608-8.
65. TOMÁŠKOVÁ, I.; KUBÁSEK, J. *Fyziologie lesních dřevin II. : Růst, vývoj a rozmnožování*. 1.vyd. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin, 2017. 215 s. ISBN 978-80-213-2800-6.
66. TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979, vol. 8, no. 2, s. 127-150. ISSN: 0034-4257.
67. USTIN, S. L.; GAMON, J. A. Remote sensing of plant functional types. *New Phytologist*. 2010, vol. 186., s. 795-816. ISSN 1469-8137.
68. VACEK, S.; REMEŠ, J.; VACEK, Z.; BÍLEK, L.; ŠTEFANČÍK, I.; BALÁŠ, M.; PODRÁZSKÝ, V. *Pěstování lesů*. 1.vyd. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, 2018. 391 s. ISBN 978-80-213-2891-4.
69. VINCINI, M.; FRAZZI, E.; D'ALESSIO, P. Angular dependence of maize and sugar beet VIs from directional CHRIS/PROBA data. In *Fourth ESA CHRIS PROBA Workshop*. 2006 ESRIN. Frascati, Italy, s. 19-21.
70. VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M., Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*. 1993, vol. 14, no. 8, s. 1563-1574. ISSN: 1366-5901
71. WHITE, T. L.; ADAMS, W. T.; NEALE, D. B. (Eds.). *Forest genetics*. [1. vyd.] Wallingford : Cabi, 2007. 896 s. ISBN 978 0 85199 348 5.

72. ZARCO-TEJADA, P. J.; PUSHNIK, J. C.; DOBROWSKI, S.; USTIN, S. L.
Steadystate chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative
reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment*.
2003, vol. 84, no. 2, s. 283-294. ISSN: 0034-4257.