

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin



Diplomová práce

**Ekotypově podmíněná variabilita obsahu
fotosyntetických pigmentů a hyperspektrální reflektance
v testech potomstev borovice lesní**

Autor: Bc. Veronika Řehořová

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivana Tomášková, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Veronika Řehořová

Lesní inženýrství

Lesní inženýrství

Název práce

Ekotypově podmíněná variabilita obsahu fotosyntetických pigmentů a hyperspektrální reflektance v testech potomstev borovice lesní

Název anglicky

Ecotype-dependent variability in the photosynthetic pigments content and hyperspectral reflectance in Scots pine progeny tests

Cíle práce

Cílem práce bude zhodnocení obsahu fotosyntetických pigmentů a hyperspektrální reflektance jehlic dvou klíčových ekotypů borovice lesní.

Metodika

Diplomová práce bude realizována ve dvou testech potomstev borovice lesní (LS Svitavy a LS Telč), které pocházejí ze semenného sadu Damníkův (Svitavy). Cílem práce je zhodnocení ekotypově podmíněné variability fyziologických parametrů v testech potomstev borovice lesní. Vzorky budou odebrány na konci vegetační sezóny v počtu 180 ks na plochu. Spektrální reflektance bude měřena s využitím přenosného spektrometru ASD FieldSpec 4 Wide-Res (ASD Inc., USA). Znalost reflektance jednotlivých vlnových délek bude využita ke konstrukci vegetačních indexů, které přímo souvisí s obsahem fotosyntetických pigmentů (SR, ND, REIP). Pigmenty budou analyzovány standardním postupem na spektrofotometru DR 6000 (Hach Company, Loveland, CO, USA) a obsah pigmentů bude určen dle přepočtových vztahů (Wellburn 1994). K vyhodnocení budou využitý program R (Package ASReml). Smíšené lineární modely poslouží k odhadu genetických parametrů a zvýrazní případné rozdíly mezi ekotypy. Práce budou probíhat ve vegetační době 2021 a v zimním období 2021/22, kdy budou odevzdány první verze práce.

Doporučený rozsah práce

50-60 stran

Klíčová slova

ekotyp, chlorofyl, genetická evaluace, vegetační index,

Doporučené zdroje informací

- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. J. (2017). Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sens*, 9(11), 1110.
- Bínová, Z., Korecký, J., Dvořák, J., Bílý, J., Zádrapová, D., Jansa, V., & Lstibůrek, M. (2020). Genetic Structure of Norway Spruce Ecotypes Studied by SSR Markers. *Forests*, 11(1), 110.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer.
- Miron, M. S., & Sumalan, R. L. (2015). Physiological responses of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) seedlings to drought and overheating stress conditions. *J Hortic For Biotech*, 19(2), 146-151.
- Santini, F., Serrano, L., Kefauver, S. C., Abdullah-Al, M., Aguilera, M., Sin, E., & Voltas, J. (2019). Morpho-physiological variability of *Pinus nigra* populations reveals climate-driven local adaptation but weak water use differentiation. *Environ Exp Bot*, 166, 103828.
- Wallin, G., Karlsson, P. E., Sellén, G., Ottosson, S., Medin, E. L., Pleijel, H., & Skärby, L. (2002). Impact of four years exposure to different levels of ozone, phosphorus and drought on chlorophyll, mineral nutrients, and stem volume of Norway spruce, *Picea abies*. *Phys Plant*, 114(2), 192-206.
- Wellburn, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J Plant Physiol*, 144(3), 307-313.
- Yang, H., Yang, X., Zhang, Y., Heskell, M. A., Lu, X., Munger, J. W., ... Tang, J. (2017). Chlorophyll fluorescence tracks seasonal variations of photosynthesis from leaf to canopy in a temperate forest. *Glob Change Biol*, 23(7), 2874-2886.
- Zou, C., Han, S., Xu, W., & Li, D. (2003). Eco-physiological responses of *Picea mongolica* ecotypes to drought stress. *J Appl Ecol*, 14(9), 1446-1450.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Ivana Tomášková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra genetiky a fyziologie lesních dřevin

Konzultant

Jan Stejskal

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

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

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 19. 02. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Ekotypově podmíněná variabilita fotosyntetických pigmentů a hyperspektrální reflektance v testech potomstvech borovice lesní" jsem vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Ivany Tomáškové, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

Jsem si vědoma, 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 5. 4. 2023

Podpis: Bc. Veronika Řehořová

Poděkování

Ráda bych touto cestou vyjádřila velké poděkování vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Ivaně Tomáškové, Ph.D. za trpělivost a odborné vedení v průběhu psaní diplomové práce. Rovněž bych ráda poděkovala mému školiteli Ing. Janu Stejskalovi, Ph.D. za odbornou pomoc a dohled nad praktickou částí diplomové práce. Dále děkuji RNDr. Jaroslavu Čeplovi, Ph.D. za pomoc se zpracováním dat. Také bych ráda poděkovala Ing. Dagmar Zádrapové za asistenci při realizaci praktické části diplomové práce v laboratoři.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala za neutuchající podporu během studií své rodině a partnerovi.

Ekotypově podmíněná variabilita obsahu fotosyntetických pigmentů a hyperspektrální reflektance v testech potomstev borovice lesní

Abstrakt

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) je druhou nejrozšířenější a nejzkoumanější lesní dřevinou ve světě. Řadí se mezi pionýrské dřeviny a její nenáročnost na klimatické a půdní podmínky ji napomáhají obsadit i extrémní stanoviště, kde nemá žádnou jinou konkurenci. V rámci jejího rozšíření po euroasijském kontinentu se vyvinula řada reliktních a ekotypů. V České republice byly vylišeny u borovice lesní dva hlavní ekotypy, a to ekotyp náhorní, typický pro vyšší polohy a pahorkatinný, jinak označován jako chlumní, typický pro nižší polohy. S nastupujícími klimatickými změnami podnebí se zaznamenal zhoršující se stav borových porostů. Ukazatelem fyziologické vitality dřevin jsou fotosyntetické pigmenty chlorofyly *a*, *b* a karotenoidy. Rozdílnost fyziologických parametrů a genetické variability mezi těmito dvěma skupinami ekotypů, jejichž vzorky byly odebrány z klonů na testovacích plochách Svitavy a Telč, byla testována za využití metody hyperspektrální reflektance. Tato metoda dokáže velmi přesně zobrazit odrazivost záření vegetace ve formě spektrálních křivek odrazivosti. Ze zjištěných spektrálních křivek a za využití znalostí vlastností fotosyntetických pigmentů byl vyhodnocen vegetační index spojený s obsahem chlorofylů. Metodou extrakce ve spojení se spektrální reflektancí je možné stanovit obsah fotosyntetických pigmentů. Všechny tyto metody napomohly ke zhodnocení rozdílnosti ekotypů borovice lesní v rámci testovacích ploch. Z naměřených hyperspektrálních dat vyplynula signifikantní rozdílnost zjištěné heritability a reflektancí ekotypů mezi testovacími plochami, významné hodnoty byly zaznamenány v oblasti RED EDGE. Rozdíly mezi plochami v rámci stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů mezi testovanými plochami však nebyl nalezen.

Klíčová slova: ekotyp, chlorofyl, genetická evaluace, vegetační index

Ecotype-dependent variability in the photosynthetic pigments content and hyperspectral reflectance in Scots pine progeny tests

Abstract

Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is the world's second most widespread and most studied forest tree species. It is one of the pioneer tree species, and its unpretentiousness to climatic and soil conditions helps it occupy even extreme habitats with no other competition. Several relics and ecotypes have evolved as part of its spread across the Eurasian continent. In the Czech Republic, two central ecotypes have been distinguished for Scots pine: the upland ecotype, typical of higher altitudes, and the hilly ecotype, otherwise known as *chlumni*, typical of lower altitudes. With the onset of climate change, the condition of pine stands has deteriorated. The photosynthetic pigments chlorophylls a, b and carotenoids are indicators of the physiological vigour of trees. The difference in physiological parameters and genetic variability between the two groups of ecotypes sampled from clones in the Svitavy and Telč test plots was obtained using the hyperspectral reflectance method. This method can very accurately display the reflectance of vegetation radiation in the form of spectral reflectance curves. From the observed spectral curves and using knowledge of the properties of photosynthetic pigments, vegetation index directly related to chlorophyll content was evaluated. In conjunction with spectral reflectance, the extraction method can be used to determine the content of photosynthetic pigments. All these methods helped to evaluate the differences between Scots pine ecotypes within the test plots. The measured hyperspectral data showed significant differences in reflectance of heritability and reflectance of ecotypes between test plots with significant readings in the RED EDGE area. However significant differences between areas in the content of photosynthetic pigments were not confirmed.

Keywords: ecotype, chlorophyll, genetic evaluation, vegetation index

Obsah

1 Úvod	13
2 Cíl práce	14
3 Literární rešerše	15
3.1 Borovice lesní (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	15
3.1.1 Systematické zařazení a specifická taxonomie	16
3.1.2 Přirozený areál rozšíření rodu <i>Pinus</i>	17
3.1.3 Přirozený areál rozšíření <i>Pinus sylvestris</i> L. v Evropě a Asii	17
3.1.4 Areál rozšíření v ČR	18
3.1.5 Ekologické nároky	19
3.1.6 Klimatypy, ekotypy a regionální populace v ČR	19
3.2 Šlechtění lesních dřevin	21
3.2.1 Šlechtitelské programy	21
3.2.2 Semenné sady a jejich význam	21
3.2.2.1 Zakládání semenných sadů	22
3.2.2.2 Druhy semenných sadů dle varianty založení	23
3.2.2.3 Generace semenných sadů	23
3.2.2.4 Testování semenných sadů	24
3.3 Vliv stresu a konkrétních stresových faktorů na rostlinu	24
3.3.1 Stres a změna obsahu fotosyntetických pigmentů	25
3.3.2 Stres z nedostatku vody	26
3.3.3 Vliv teploty prostředí	27
3.4 Význam fotosyntézy a fotosyntetických pigmentů	28
3.4.1 Fotosyntéza jako ukazatel zdravotního stavu rostliny	28
3.4.2 Fotosyntetické pigmenty	28
3.4.2.1 Chlorofyly	29
3.4.2.2 Karotenoidy	29
3.5 Spektroskopie	32
3.5.1 Spektrální reflektance	33
3.5.2 Hyperspektrální technika zobrazování	33
3.5.2.1 Odrazivost vegetace	34
3.6 Vegetační indexy a jejich využití	35
3.6.1 Charakteristika jednotlivých vegetačních indexů	36
3.7 Genetická diverzita	37
4 Metodika	39

4.1	Popis zkoumaných lokalit – testovací plochy Svitavy a Telč	39
4.1.1	Semenný sad Nad Damníkovem	39
4.1.2	Testovací plocha Svitavy – charakteristika LS Svitavy	39
4.1.3	Charakteristika testovací plochy Svitavy	40
4.1.4	Testovací plocha Telč – charakteristika testovací plochy Telč	41
4.2	Odběr materiálu v terénu pro laboratorní měření	44
4.2.1	Postup odběru letorostů	44
4.2.2	Design testovacích ploch a odebíraných vzorků	45
4.3	Postup hyperspektrálního laboratorního měření	47
4.3.1	Spektroradiometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res	48
4.4	Statistická analýza dat	49
4.4.1	Charakteristiky popisné statistiky	49
4.4.2	Charakteristika matematické statistiky	50
4.4.3	Charakteristika statistického softwaru ANOVA	51
4.4.4	Charakteristika statistického softwaru ASReml	51
4.4.4.1	Lineární smíšené modely	52
4.4.4.2	Genetické modely	52
4.4.4.3	Prostorové modely	53
4.5	Konstrukce vegetačních indexů	54
4.6	Laboratorní měření a stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů	55
4.6.1	Dimethylamid kyseliny mravenčí	55
4.6.2	Spektrofotometr DR 6000 UV-VIS s technologií RFID	55
4.6.3	Postup extrakce fotosyntetických pigmentů	56
4.6.4	Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů	57
4.6.4.1	Statistické zhodnocení obsahu fotosyntetických pigmentů	58
5	Výsledky	59
5.1	Hyperspektrální analýza dat	60
5.1.1	Spektrální reflektance testovací plochy Telč – 2021 a 2022	60
5.1.2	Porovnání testovacích ploch Telč a Svitavy z hlediska reflektance v roce 2021	64
5.2	Stanovení vegetačního indexu mNDVI	68
5.3	Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů	69
6	Diskuze	71
6.1	Porovnání hyperspektrálních dat	71
6.2	Zhodnocení indexu mNDVI	73
6.3	Porovnání obsahu fotosyntetických pigmentů	74
7	Závěr	76
8	Seznam použitých zdrojů	77

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Areál rozšíření <i>Pinus sylvestris</i> L. v Evropě a Asii v kontextu se zeměpisnou délkou a šířkou (Carlise a Brown 1968)	18
Obrázek 2 – Schéma toku fotonů listem za působení nepříznivých stresových faktorů (Lichtenthaler 1996)	26
Obrázek 3 - Schéma působícího stresu na sazenici borovice lesní (Meng et al. 2023).....	27
Obrázek 4 – Grafické znázornění křivek zobrazující relativní absorpci jednotlivých pigmentů a variabilitu fluorescence chlorofylu <i>a</i> v závislosti na světelné vlnové délce (chlorofyl <i>a</i> označen zelenou barvou, karotenoidy poté černě zbarvenou křivkou) (Papageorgiou 2004).....	31
Obrázek 5 – Porovnání spektrálních křivek odrazivosti mezi chlorofyly <i>a + b</i> , vodou, proteiny, celulórou a ligninem (Liang 2004).....	32
Obrázek 6 – Spektrální křivka odrazivosti – porovnání odrazivosti mezi vegetací, půdou a vodou (Smith 2012).	33
Obrázek 7 – Testovací plocha Svitavy (Řehořová 2021)	41
Obrázek 8 – Porostní mapa lesního hospodářského celku Svitavy, testovací plocha označena červeným křížkem (Lesy ČR, s.p. 2023b)	41
Obrázek 9 – Sazenice na testovací ploše Telč (Řehořová 2021).....	43
Obrázek 10 - Porostní mapa lesního hospodářského celku Jemnice, výzkumná plocha označena červeným křížkem (Lesy ČR, s.p. 2023b)	43
Obrázek 11 – Odebraný letorost označený štítkem připravený s měření hyperspektrální reflektance (Řehořová 2021)	45
Obrázek 12 – Spektrometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res s optickým kabelem (Malvern Panalytical 2016)	48
Obrázek 13 – Spektrofotometr DR 6000 (Řehořová 2022).....	56
Obrázek 14 - Vzorky jehlic naložené v DMF připravené k týdenní extrakci (Řehořová 2022).....	57
Obrázek 15 - Průměrná relativní spektrální reflektance a signifikantní heritabilita vzorků na testovací ploše Telč (2021)	60
Obrázek 16 – Průměrná relativní spektrální reflektance (černá křivka) a heritabilita (modrá křivka) vzorků na testovací ploše Telč (2022).....	61
Obrázek 17 - Diagnostika modelu pro hodnoty ve vlnové délce 1250 nm.....	62
Obrázek 18 - Průměrná relativní reflektance a <i>p</i> -hodnota Wald testu rozdílu ekotypů testovacích ploch Telč (2022).....	63
Obrázek 19 – Průměrné relativní reflektance a heritabilita vzorků testovacích ploch Svitavy a Telč (2021).....	64
Obrázek 20 - Průměrná spektrální reflektance a rozdíly reflektance mezi jednotlivými ekotypy obou testovacích ploch (2021)	65
Obrázek 21 - Průměrná spektrální reflektance a <i>p</i> -hodnota rozdílu reflektancí mezi jednotlivými testovacími plochami (2021).....	66
Obrázek 22 – Porovnání naměřených reflektancí vzorků (<i>t</i>) a kontrolních vzorků (<i>k</i>) ve vlnové délce 740 nm testovacích ploch Telč a Svitavy	67
Obrázek 23 – Porovnání obsahu chlorofylu <i>a</i> ($\mu\text{g/g}$) ve vzorcích (<i>treatments</i>) a kontrolních vzorcích (<i>c</i>) na testovacích plochách Telč a Svitavy (2021)	69
Obrázek 24 - Porovnání obsahu chlorofylu <i>b</i> ($\mu\text{g/g}$) ve vzorcích (<i>treatments</i>) a kontrolních vzorcích (<i>c</i>) na testovacích plochách Telč a Svitavy (2021)	70
Obrázek 25 - Porovnání obsahu karotenoidů ($\mu\text{g/g}$) ve vzorcích (<i>treatments</i>) a kontrolních vzorcích (<i>c</i>) na testovacích plochách Telč a Svitavy (2021)	71

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní lesnické informace o testovací ploše Svitavy (ÚHÚL 2000).....	40
Tabulka 2 - Základní lesnické informace o testovací ploše Telč (ÚHÚL 2001).....	42
Tabulka 3 - Design testovací plochy Svitavy	46
Tabulka 4 – Design testovací plochy Telč.....	47
Tabulka 5 – Vzorec pro vegetační index spojený s výpočtem obsahu chlorofylu ve vegetaci (Index DataBase 2023)	55
Tabulka 6 – Přehled rovnic pro výpočet jednotlivých fotosyntetických pigmentů (Wellburn 1994).....	58
Tabulka 7 – Hodnoty indexu mNDVI na lokalitě Telč	68
Tabulka 8 – Hodnoty indexu mNDVI na lokalitě Svitavy	68
Tabulka 9 – Průměr a směrodatná odchylka hodnot mNDVI v rámci ploch Telč a Svitavy	68

Seznam použitých zkratk

ANOVA – analýza rozptylu
BLUP – best linear unbiased prediction
CRI – Chlorophyll Reflectance Index
ČR – Česká republika
DMF – dimethylamid kyseliny mravenčí
DPZ – dálkový průzkum Země
LAI – index listové plochy
LČR – Lesy České republiky
LHC – světlosběrné komplexy
LS – lesní správa
LVS – lesní vegetační stupeň
mNDVI – Modified Normalizes Differences Vegetation Index
MWIR – mediumwave-infrared reflectance
NDVI – normalizovaný diferenční vegetační index
NDWI – normalizovaný diferenční vodní index
NIR – blízké infračervené spektrum světla
PAR – fotosynteticky aktivní radiace
PLO – přírodní lesní oblast
PRI – index fotochemické reflektance
RED – spektrum viditelného červeného světla

REIP – Red Edge Inflection Point

SR – Simple Ratio

SWIR – shortwave-infrared reflectance

ÚHÚL – Ústav pro hospodářskou úpravu lesa

UV – ultrafialové záření

1 Úvod

Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) představuje druhou nejrozšířenější hospodářskou dřevinu ve světě s ekologickým a ekonomickým přesahem. Porosty borovice lesní zaujímají 70 % porostní plochy severní polokoule (Floran et al. 2011). Rovněž v ČR je druhou nejzastoupenější hospodářsky významnou dřevinou (Ministerstvo zemědělství 2021). Borovice patří mezi pionýrské dřeviny a je velmi dobře odolná vůči mrazu či suchu – je schopna zaujmout extrémní stanoviště s přímým slunečním zářením i silně podmáčené lokality (Houston Durrant et al. 2016). Avšak v poslední době čelí borovice stále většímu stresoru v podobě sucha. Nedostatek srážek a stále se zvyšující průměrné roční teploty jsou pro borovici stresující faktory, které zapříčiňují rozsáhlé devastace borových porostů tohoto druhu (Podrázský et al. 2020).

S přizpůsobením se na probíhající klimatické změny může borovici lesní pomoci její genetická variabilita, která se dlouhou řadu let zjišťovala na základě provenienčních experimentů za rozdílných podmínek (Máchová et al. 2016). Avšak nyní je možné informace o fyziologickém stavu lesních dřevin možné získávat na základě hyperspektrální metody, která je založena na experimentálním oboru spektroskopii (Danusevičius et al. 2014; Smith 2012).

V ČR se za celou řadu let vylíšily dva hlavní ekotypy borovice lesní, a to ekotypy náhorní a pahorkatinný (Kaňák 2011). Porovnání jedinců dvou významných ekotypů borovice lesní ze dvou lokalit ČR nastíní zdravotní stav rostlin při nastupujících periodách sucha, tedy jakým způsobem se od sebe tyto dva ekotypy odlišují jak fyziologicky, tak rovněž na úrovni genetické variability.

Odrazivost vegetace, která je spektroradiomentrem převedena z elektromagnetického záření do digitální formy, je zobrazena v podobě spektrální křivky odrazivosti. Na základě zjištěných hyperspektrálních dat je možné vypočítat hodnotu vegetačních indexů, díky kterým je rovněž možné zhodnotit fyziologický stav porostu.

Dalšími fyziologickými ukazateli stavu vegetace jsou fotosyntetické pigmenty, mezi které patří chlorofyly a karotenoidy. Obsah chlorofylů a karotenoidů přímo odráží stav, kdy je rostlina ovlivňována stresovými faktory (Lichtenthaler 1996).

Hyperspektrální reflektance, vegetační indexy, ale i obsah fotosyntetických pigmentů jsou metody využívané právě ke zhodnocení fyziologického stavu vegetace.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zhodnocení obsahu fotosyntetických pigmentů a hyperspektrální reflektance potomstev dvou klíčových ekotypů borovice lesní a jejich vzájemné porovnání v rámci dvou testovacích ploch.

V literární rešerši je přiblížena borovice lesní jako jedna z nejvýznamnějších lesních dřevin v ČR, která se dokáže adaptovat na extrémní podmínky a jsou zde popsány dva významné ekotypy, které budou porovnávány. Jsou zde rovněž uvedeny stresové faktory, které mohou mít vliv na fyziologický stav borovic. Klíčovými ukazateli fyziologického stavu borovic jsou v této práci jednak obsah fotosyntetických pigmentů a také hyperspektrální odrazivost vegetace a z ní vycházející zhodnocení vegetačních indexů, které jsou rovněž podrobně rozebrány v literární rešerši.

Na rešeršní část naváže praktická část diplomové práce, kde budou porovnávány obsahy fotosyntetických pigmentů dvou hlavních ekotypů borovice lesní, nacházející se na dvou testovacích plochách, tedy chlorofylů *a* a *b* spolu s karotenoidy a xantofyly na základě laboratorní analýzy za pomoci spektrofotometru – přístroje vyhodnocujícího koncentraci látek na základě vlnových délek. Získání hyperspektrálních křivek klonů borovice lesní bude uskutečněno za pomoci spektroradiometru, který je schopen zachytit elektromagnetické záření vegetace. Na základě dat z hyperspektrální reflektance proběhne vyhodnocení vegetačních indexů, které jsou přímo spojeny s obsahem chlorofylu.

3 Literární rešerše

Borovice lesní je rozšířena po celém evropském kontinentu a její přirozený výskyt zasahuje až do východní Asie. Jedná se o vůbec nejrozšířenější taxon tohoto rodu napříč Eurasií. Díky takto rozsáhlému areálu je geneticky velmi variabilní a je známa řada poddruhů a variant. Jakožto pionýrská dřevina má zastoupení na extrémních stanovištích, je schopna odolat mrazu i vyšším teplotám. Její dřevo je velice ekonomicky i kulturně ceněno, a to především v severních zemích Evropy (Houston Durrant et al. 2016). Za hojným rozšířením borovice může především nenáročnost této dřeviny ke klimatickým, ale i půdním podmínkám (Máchová et al. 2016). V České republice se za dlouhou řadu let vyvinula řada regionálních populací borovice lesní, které náleží ke dvěma ze dvou hlavních ekotypů na našem území, a to k náhornímu či chlumnímu ekotypu, jejichž rozdílné fyziologické parametry budou zkoumány laboratorní hyperspektrální metodou (Kaňák 2011).

3.1 Borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.)

Borovice lesní je druhou nejvýznamnější hospodářskou lesní dřevinou na území České republiky, prvenství si v tomto žebříčku stále udržuje smrk ztepilý (*Picea abies* L.). Jedná se vůbec o jednu z nejzkoumanějších lesních dřevin v rámci Evropy, pravděpodobně i proto, že je velmi adaptabilní. Její kvalitní tvrdé diferenciované dřevo na jádro a běl s dobrými mechanickými vlastnostmi umožňuje rozsáhlé využití v nejrůznějších odvětvích, začínaje dřevozpracujícím průmyslem, přes truhlářství či stavebnictví, až po využití v chemickém průmyslu (výroba kalafuny, terpentýnu, laků a jiné) či farmacii (aroma oleje) (Cvrčková et al. 2017; Mátyás et al. 2004; Úradníček et al. 2009).

Zastoupení borovice lesní v dřevinné skladbě na území České republiky je dle Zelené zprávy z roku 2020 16,1 %, což je oproti letům 2000–2010 pokles o necelé procento. Borové porosty jsou zakládány zejména v nížinách a pahorkatinách do 500 m n. m. na méně úrodných půdách (Špulák et al. 2018; Ministerstvo zemědělství 2021). Vzhledem k probíhajícím klimatickým změnám je nutné zahrnout do predikcí pokles přírůstu borovic, ačkoliv borovice je dřevina velmi adaptabilní a tolerantní ke klimatickým výkyvům. Avšak přetrvávající období sucha má za následek zhoršení zdravotního stavu tohoto druhu dřevin (Čihák a Vejpusťková 2021; Hanewinkel et al. 2013). Aktuálně borovice v Evropě roste v

areálu o velikosti více jak 28 mil. ha, což se rovná 20 % půdy hospodářského lesa (Čihák a Vějpustková 2021).

Borovice lesní je obvyklá domácí dřevina na území České republiky, která se pěstuje v monokulturách nebo je sázena jako příměs do smíšených porostů (Businksý a Velebil 2011). Borovice se řadí mezi dřeviny dosahující výšky až 45 m, s průměrem kmene až 100 cm a dožívají se věku kolem 300 let, avšak i více. Pro borovici je signifikantní do oranžova zbarvená borka na novějších částech kmene. Jehlice se nacházejí ve svazku po 2 na brachyblastech. Oproti smrku ztepilému netrpí borovice vývraty, což souvisí s typem kořene, který má kulovitý tvar. Výjimkou je pouze její výskyt na podmáčených půdách, kde je zakořeněna mělce. Jiná situace nastává ve chvíli, kdy jsou větve borovice pod námahou sněhu a námrazy – tehdy může dojít k vrcholovým zlomům. Tato dřevina zásadně neutváří výmladky a rovněž ji nelze zakořenit z řízku; také nedisponuje tzv. rezervními spícími pupeny, tzn., že pupeny poničené okusem zvěří či jinými abiotickými vlivy již dřevina neobnoví (Mátyás et al. 2004; Úradníček et al. 2009).

3.1.1 Systematické zařazení a specifická taxonomie

Borovice lesní patří do třídy *Coniferae*, řád *Pinales*, čeleď *Pinaceae*. Rod *Pinus* zahrnuje více jak sto druhů borovic, jejichž přirozené stanoviště se nachází na severní polokouli. Borovice lesní náleží podrodu *Diploxylon*, který se dále dělí na jednotlivé sekce. Do sekce *Eupitys* se řadí právě borovice lesní. Sekce nebo také oddělení *Eupitys* se vyznačuje svazky o dvou či třech jehlicích, vnitřními či okrajovými pryskyřičnými kanálky a menším vzrůstem šištic (Giertych a Mátyás 1991).

Na základě paleontologických dat je znám růst borovice lesní v Evropě již ve třetihorách (rod *Pinus* dokonce již v druhohorách) (Florin 1963). Borovice lesní je velmi rozmanitá a dobře se umí přizpůsobit podmínkám. Toho si všiml i Svoboda (1953) a borovice byla dle něj v rámci Evropy rozdělena do několika geograficky podmíněných klimatypů, které se dále dělily na jednotlivé varianty. Borovice na území České republiky je označena jako klimatyp borovice hercynské, konkrétně varianta *Pinus sylvestris hercynica* Münch. Tento klimatyp náleží při základní klasifikaci k borovici lesní – horské. Druhým základním typem je poté borovice severská, rovněž s četnými klimatypy (Šindelář et al., 2007). Další výzkum doložil, že se na našem území rovněž vyskytoval klimatyp borovice karpatské (Svoboda 1953).

Kromě geograficky určeného zařazení se borovice lesní dále dělí do specifických druhů dle: morfologických znaků kmene a koruny, dle habitu, produkce či typu jehlic a další (Giertych a Mátyás 1991; Svoboda 1953).

3.1.2 Přirozený areál rozšíření rodu *Pinus*

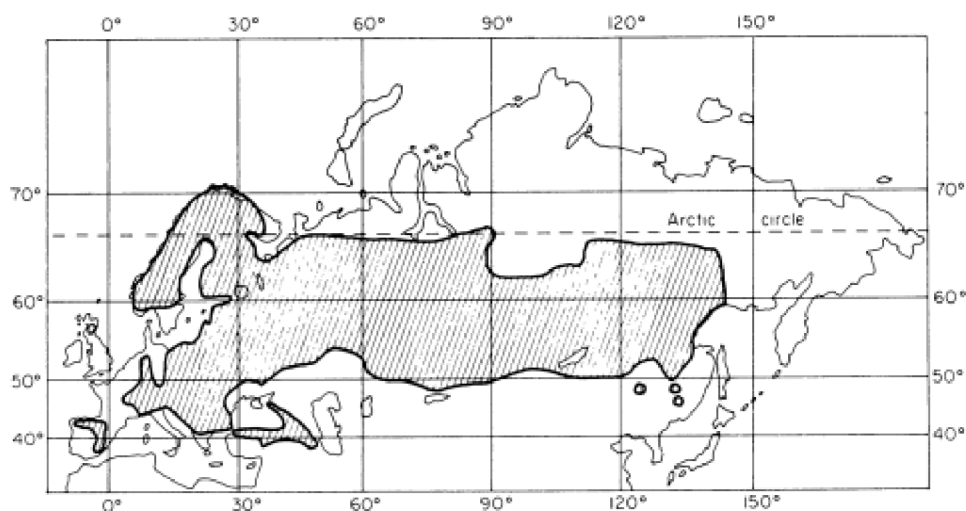
Jak již bylo zmíněno, rod *Pinus* se přirozeně vyskytuje na severní polokouli, pokrývá zejména mírné pásmo, zvláště potom pás boreálních lesů – tajgu. Tento pás se vyznačuje menší druhovou variabilitou borovic oproti jižněji položeným oblastem (Giertych a Mátyás 1991). Rod *Pinus* se nachází v Evropě, Severní, ale i Střední Americe, na severním pobřeží Afriky či v Asii (Critchfield a Little 1966).

3.1.3 Přirozený areál rozšíření *Pinus sylvestris* L. v Evropě a Asii

Pro borovici lesní je charakteristický rozsáhlý areál rozšíření, největší z celého rodu *Pinus*, a dokonce i z čeledi *Pinaceae*. Její areál zaujímá evropský kontinent, Eurasii až Asii (Giertych a Mátyás 1991). V severních oblastech je borovice často limitována klimatickými podmínkami a lze ji zařadit mezi dřeviny nížin, v horách se vyskytuje ostrůvkovitě a na menších plochách. Naopak v jižních částech areálu, která zaujímá, je spíše dřevinnou pahorkatin a vyšších poloh (Chmelař 1980; Svoboda 1953). Mezi faktory, které jsou pro její výskyt limitující, se řadí vysoké výkyvy teplot a nízké srážky. Je prokázáno, že borovice lesní neroste v oblastech s extrémním kontinentálním klimatem, kde průměrné roční teploty dosahují více jak 40 °C a průměrné roční srážky klesají pod 350 mm. Zvládne dokonce prosperovat v oblastech, které dosahují až 100 mrazivých dnů za rok (Giertych a Mátyás 1991; Koropachinskij 1983). Co se týká amplitudy nadmořské výšky, tento druh roste od hladiny moře až do výšky 2600 m n. m. (Mátyás et al. 2004). Naopak v jižních oblastech je její výskyt kromě již zmíněných teplot a srážek také limitovaný půdními podmínkami, především pak vlhkostí půdy. Tento případ je evidentní například v Asii na území Mongolska, kde je půda narušena lidskou činností v suchých stepích a lesostepích a často je vysušována (Giertych a Mátyás 1991; Svoboda 1971). Borovice lesní často expanduje do oblastí stepí a utváří hranici mezi stepí a lesem, a to především na Sibiři. Ve vyšších polohách se vyskytuje pouze v případě hlinitých půd a dostupné podzemní vody (Giertych a Mátyás 1991).

V horských oblastech borovice lesní nedosahuje takové variability jako jiné druhy čeledi *Pinaceae*, avšak je zajímavé, že původní druhy se vyskytují právě ve vyšších

polohách. Tyto původní populace jsou izolovány od souvislých pásem dnešního běžného výskytu borovic a řadí se mezi tzv. relikty; některé z nich najdeme v zónách pohoří Sierra Nevada, v Apeninských a Dinárských Alpách (Stara Planina), v jižních Karpatech nebo dokonce v Grampianech ve Skotsku (Giertych a Mátyás 1991). Borovice lesní byla rozšířena mnohem dále za svůj přirozený areál výskytu a díky lidské činnosti se utvořily rozsáhlé hospodářské porosty (Úradníček et al. 2009).



Obrázek 1 - Areál rozšíření *Pinus sylvestris* L. v Evropě a Asii v kontextu se zeměpisnou délkou a šířkou (Carlise a Brown 1968)

3.1.4 Areál rozšíření v ČR

Borovice lesní se na našem území dříve vyskytovala jako původní dřevina pouze ostrůvkovitě, především v zónách pahorkatin, na extrémních stanovištích, na sutích či skalnatých ostrožkách. Existují studie, které dokazují, že již ke konci období třetihor se zde borovice vyskytovala v příměsích listnatých lesních komplexů. V období starších čtvrthor se zformulovala do již klimaxového druhu (Mírov 1967; Šindelář 1995). Ve výše zmíněných extrémních prostředích se odhaduje její původní zastoupení na našem území kolem 3-4 % (Šindelář 1995). Avšak v nižších polohách se potom hojněji nacházela na písčítých a suchých půdách, obvykle roztroušena v kyselých doubravách, nejčastěji v lesním vegetačním stupni buku, jedle a smrku. V porostech smíšených s dubem a habrem, smrkem či jedlí pak mohla přežívat jen okrajově na úrovni borů (Šindelář et al. 2007).

Od poloviny 19. století došlo k nárůstu zastoupení borových porostů na území dnešního Česka vlivem zakládání nových umělých výsadeb. Tyto porosty byly založeny

z importovaných semen borovice z různých oblastí Evropy. Přirozeně postupem času došlo ke smíšení těchto nových porostů s těmi staršími vlivem klimatických podmínek, ale také hospodářskými zásahy. To dalo vzniknout novým kulturním typům borovice (Cvrčková et al. 2017; Svoboda 1953).

Stejně tak, jako se nacházejí relikty borovic v různých oblastech pahorkatin a hor Evropy, tak se takovéto reliktní typy vyskytují i v České republice. Tyto původní populace jsou nazývány reliktními bory (Musil a Hamerník 2007). Nachází se zejména v oblasti severovýchodních Čech, v Polabí, či v údolí řek Jihlavy nebo Dyje na písčitých půdách; na skalnatém podloží se poté vyskytují v oblasti Šumavy, v Dražanské či Českomoravské vrchovině. Známa je i výskytem na zrašeliněných místech v oblasti Třeboňské pánve (Cvrčková et al. 2017; Svoboda 1953; Šindelář 1992; Úradníček et al. 2009).

3.1.5 Ekologické nároky

Borovice lesní je označována jako pionýrská dřevina volných ploch; tento druh dřevin se poměrně snadno obnovuje jako jeden z prvních na lokalitách, kde došlo k rozsáhlé disturbanci a udržuje si své místo, pokud na této ploše nevznikne silnější konkurence či neustoupí z důvodu pastvy. Je to světlomilný druh, který ke svému růstu potřebuje dostatek prostoru. Získává vodu z větších hloubek, než jak je tomu u jiných dřevin, a právě proto se vyskytuje především na sušších stanovištích. Tato dřevina roste převážně na chudších, písčitých půdách, na skalách, dokonce na štěrku, ale zvládne růst i na podmáčených místech či na rašelinistích; na takto extrémních stanovištích nemá obvykle jiného konkurenta. Je velmi nenáročná na klimatické podmínky, avšak není schopná konkurovat stínomilným dřevinám, které jí vytlačují. Na živnější, hlubší půdě lépe přirůstá a dosahuje větších rozměrů (Cvrčková et al. 2017; Mátyás et al. 2004; Úradníček et al. 2009).

3.1.6 Klimatypy, ekotypy a regionální populace v ČR

Dle základní klasifikace se borovice lesní rozlišuje na borovici lesní horskou a borovici severskou. Právě zmíněné borovici horské náleží klimatyp borovice hercynská, která zahrnuje charakteristické populace rostoucí v horských oblastech a pahorkatinách hercynsko-sudetského regionu České republiky (Svoboda 1953).

Dle Svobody (1953) je pro populaci provenienční borovice hercynské typický průběžný kmen a úzká koruna s krátkými a jemnými větvemi. Avšak v nižších polohách je

pro borovici stále častěji charakteristická vyklenutá a širší koruna, zakřivený kmen a rovněž nižší vzrůst (Nárovcová a Nárovec 2008).

V České republice se vylišují dva primární přirozeně se vyskytující ekotypy borovice lesní, a to náhorní ekotyp typický pro oblasti vyšších poloh a chlumní ekotyp charakteristický pro nižší polohy (Kaňák 2011). Šindelář (1991) vylišuje tyto ekotypy jen pod jiným pojmenováním, a to pahorkatinný ekotyp, pro který je přirozené stanoviště v 1. – 4. lesním vegetačním stupni (LVS), tedy v nižších polohách a odpovídá chlumnímu ekotypu. Tento ekotyp se lépe přizpůsobuje suššímu podnebí, avšak je náchylný na zlomy v důsledku mokrého sněhu či ledovky. Druhý ekotyp je pojmenován jako horský, daří se mu v 5. – 7. LVS, oproti pahorkatinnému ekotypu není natolik tolerantní k suchu, avšak je adaptovaný na horské podnebí, je z morfologického hlediska proměnlivější a odpovídá náhornímu ekotypu (Čihák a Vejpusťková 2021).

Jak již bylo zmíněno, borovice lesní byla na území České republiky rozšířena především lidským přičiněním, které dalo vzniknout novým kulturním porostům; to se dělo zejména postupným nahrazováním či kontaminováním původních porostů novými výsadbami. Dnes se rozlehlé borové porosty nacházejí zejména v oblastech kyselých doubrav a bučin a tvoří samostatné obvody, v návaznosti na původní porosty. Současně se těmito vylišeným populacím říká regionální. Na území České republiky se z lesnického hlediska rozlišují tyto regionální populace: jihočeská (třeboňská), šumavská (stožecká), severočeská, západočeská, polabská, týništská (východočeská), svratecká, heraltická (oblast Nízkého Jeseníku), středočeská, středomoravská, záhorská (hodonínská či rohatecká) a karpatská (nižší oblasti Bílých Karpat). Všechny zmíněné regionální populace náleží klimatypu borovice hercynské, až na výjimku, kterou tvoří populace borovice záhorské a karpatské, které náleží z hlediska hojnosti spíše ke klimatypu *carpatica*, která se místy vyskytuje na území Slovenska (Šindelář et al. 2007; Giertych a Mátyás 1991). Kultury těchto regionálních populací obvykle vznikly bez předešlého záměru. Za jejich vznikem stojí především schopnost přizpůsobení se místním podmínkám a také původ, který je však často neznámý (Šindelář et al. 2007).

3.2 Šlechtění lesních dřevin

Význam šlechtění lesních dřevin spočívá především v zisku geneticky kvalitního a odolného osiva, čímž dojde i k zajištění zvýšené dřevní produkce jednotlivých dřevin, které jsou schopny lépe odolávat jak biotickým, tak abiotickým škodlivým faktorům. Pro dosažení těchto dvou hlavních cílů je nutné zajistit produkci geneticky kvalitního reprodukčního materiálu. Nejužívanější metodou v této oblasti je zakládání semenných sadů (Kobliha et al. 2007).

Důvodů, proč se šlechtěním lesních dřevin zabývat, je z lesnického pohledu řada. Jedním z hlavních benefitů může být zisk adaptabilnějších dřevin vůči klimatické změně. Další příčinou pro šlechtitelské aktivity může být snaha o zachování genofondu určité populace (ať už v přirozených nebo hospodářských lesích) či dosažení adaptace dřevin na určitá extrémní stanoviště. V neposlední řadě hraje roli také snaha o vylepšení genetických znaků, které jsou u dané populace významné (Erriksson et al. 2006; Namkoong 1984; White et al. 1993; Fries a Lindgren 1986).

3.2.1 Šlechtitelské programy

Šlechtitelské programy napomáhají stanovit systém aktivit tak, aby se dosáhlo splnění předem vytyčených cílů. Existuje mnoho faktorů, které je doporučeno z hlediska zisku geneticky vylepšeného reprodukčního materiálu následovat. Nejdůležitější body, které je vhodné sledovat, jsou cíl šlechtění, správně vybrané metody šlechtění, rovněž tak správně zvolený výchozí genetický materiál. Další je nutné zvážit, v jakých ekologických podmínkách bude program probíhat, v jakém časovém horizontu či jakým způsobem bude vyšlechtěný materiál namnožen (Šindelář 1992).

Zda daný šlechtitelský program bude či nebude zdárný, záleží na mnoho podmínkách. Jednou z těch předních je selekce jedinců z vybrané populace pro budoucí produkci reprodukčního materiálu. Volba jedinců se opírá zejména o fenotypový projev a rovněž s ohledem na konkurenceschopnost k okolním jedincům ve vybrané populaci (Hynek et al. 1997).

3.2.2 Semenné sady a jejich význam

Standardní postup, který se běžně využívá pro zisk operativního množství geneticky upraveného osiva pro hospodářské či vědecké účely, je zakládání tzv. semenných sadů (Zobel a Talbert 1984). Existuje mnoho definic pro vymezení tohoto pojmu, jednou z nich

je definice dle Zobel et al. 1958, která říká, že: semenný sad je plocha, kde se produkuje co nejkvalitnější osivo ve velkém množství, především co nejlevněji, a tak rychle, jak jen to je možné. Tato definice je více ekonomicky pojatá; jiná, pravděpodobně přesnější z hlediska genetické produkce říká, že: semenný sad je plantáž vyselektovaných klonů či potomků, kteří jsou izolováni tak, aby nedošlo k opylení z cizorodých zdrojů (tzv. kontaminaci) a hospodaří se s nimi za účelem co nejhojnější, nejčastější a nejsnadněji sklizené úrody osiva (Feilberg a Soegaard 1975).

Hlavní účel zakládání semenných sadů je tedy zisk specifického, geneticky vhodného materiálu s daným šlechtitelským cílem (Kaňák et al. 2009; Zobel a Talbert 1984). Toto osivo může být více odolné vůči patogenům, nebo může produkovat kvalitnější dřevo aj. Jednou z dalších výhod jejich zakládání je budoucí zisk osiva, které bude přizpůsobeno pro pěstování na specifické lokalitě (Nanson 1972). Mimo to semenné sady mohou zaručit produkci osiva v případě, že je po tomto osivu velká poptávka (Zobel a Talbert 1984).

V lesním hospodářství mají semenné sady též význam z hlediska zachování genofondu ohrožených populací (Kaňák et al. 2009) a rovněž slouží jako zdroj geneticky vhodného reprodukčního materiálu, který je při stávající změně klimatu velice potřebný (Kaňák et al. 2008).

3.2.2.1 Zakládání semenných sadů

Před založením nového semenného sadu je nejprve třeba zhodnotit, zda takový sad je potřebný a bude mít na dané lokalitě význam. Semenný sad se zakládá především z důvodu zachování ohrožené populace daného druhu nebo pro aktuální nedostatek geneticky vhodného osiva dané dřeviny na dané lokalitě. Mnohdy jsou sledována čistě ekonomická hlediska, kdy je vyžadován geneticky materiál, který zajistí kvalitní dřevní hmotu a v potřebném množství (Kaňák et al. 2008; 2009).

Pro založení takového sadu je třeba vybrat mateřské stromy (dle aktuální legislativy tzv. rodiče rodiny), ze kterých se genetický materiál určený k zakládání semenných sadů bude odebírat. Pokud je cílem sadu produkce významné hospodářské dřeviny, tedy zdroj geneticky vhodných jedinců dané populace, pak vyhledávání takových jedinců probíhá v maximálně o 1 LVS posunuté zóně, vybírají se jedinci z místní regionální populace, kteří pocházejí z uznaných porostů fenotypové třídy A či B, kteří jsou bez viditelných morfologických (genetických) vad, s nadprůměrnými parametry výčetní tloušťky a výšky, jedinci vitální (Kaňák et al. 2008).

Pokud se jedná o zakládání sadu z hlediska zachování genofondu daného druhu dřeviny, pak veškerý tento výčet podmínek pro výběr takových jedinců ustupuje do pozadí a cílem v tomto případě je nalézt alespoň 50 jedinců, kteří budou schopni další reprodukce. Avšak zachovává se podmínka zůstat ve stejném nebo maximálně o 1 LVS posunutém výškovém pásmu a zdrojem reprodukčního materiálu musí být opět vybraní jedinci z uznaných porostů (Kaňák et al. 2008).

Vyselektovaní jedinci, ze kterých má být odebrán materiál pro založení sadu, mohou plnit roli mateřskou, kdy dochází ke generativnímu způsobu množení; roli klonu, kdy dochází k vegetativnímu způsobu množení; anebo mohou být kombinací obojího (Kaňák et al. 2008).

3.2.2.2 Druhy semenných sadů dle varianty založení

Existuje řada druhů semenných sadů, avšak všechny semenné sady spadají do dvou hlavních kategorií – vegetativní reprodukci (roubováním) založené semenné sady neboli sady klonové a tzv. generativní semenné sady neboli jádrové. Vegetativní sady jsou zakládány pomocí vegetativního množení, mezi které patří například řízkování či roubování sazenic, ale také tkáňové kultury a další, zatímco semenné sady jádrové jsou zakládány z generativně vypěstovaných sazenic (Zobel a Talbert 1984; Kaňák et al. 2008).

Mnoho vegetativních semenných sadů bylo založeno roubováním. Při tomto zakládání však může docházet k nesourodosti (nekompatibilitě) mezi odnoží a podnoží, což může mít za následek mortalitu roubovanců. U borovice lesní je tato mortalita kolem 20 %, což je stále v mezi tolerance. Sady tohoto druhu se dají, i když poměrně obtížně, zakládat pomocí zakořeněných řízků či z tkáňových kultur. Tato metoda zabraňuje mortalitě štěpů (Zobel a Talbert 1984).

Jádrové sady se osvědčily u dřevin jako je např. smrk černý (*Picea mariana*), pro časně kvetoucí resp. plodící druhy dřevin, tedy pro pionýrské druhy jako je např. borovice nebo dřeviny produkující značnou část dřevní hmoty v mladém věku (Zobel a Talbert 1984; Kaňák et al. 2008).

3.2.2.3 Generace semenných sadů

Semenné sady se také dělí na základě generací – sady 1. či 2. generace nebo sady pokročilých generací v souvislosti s tím, kolik cyklů šlechtění reprezentují. Sady 1. generace

jsou sady netestované, ostatní sady vyšších generací jsou již sady testované (Zobel a Talbert 1984; Kaňák et al. 2008).

Sady 1. generace obvykle pocházejí z uznaných přirozených porostů či z neudržovaných výsadeb, nejčastěji pak z předem selektovaných jedinců. Rodokmeny rodičovských stromů jsou obvykle neznámé (Zobel a Talbert 1984).

Zvláštním druhem semenných sadů jsou sady 1,5 generace. Postup pro založení takových sadů je založen na výběru těch nejlepších genotypů z jiných, avšak stejně geograficky položených semenných sadů a pomocí těchto jedinců založit nový, dokonalejší sad 1. generace (Zobel a Talbert 1984). Semenný sad 1,5 generace lze rovněž získat při odstranění geneticky nevyhovujících klonů ze semenného sadu 1. generace (Kaňák et al. 2008).

K založení semenných sadů druhé generace je zapotřebí otestovat mateřské stromy ze sadu 1. generace. Toto testování ověřuje, zda daní jedinci získali geneticky podmíněné atributy. Tato testovaná potomstva lze považovat za zdroj kvalitního reprodukčního materiálu k založení sadu druhé generace (Kaňák et al. 2008).

3.2.2.4 Testování semenných sadů

Testování semenných sadů je prováděno tak, že se testují jednotlivé klony/ramety nebo celý semenný sad. Pro založení semenných sadů vyšších generací se testují klony daného sadu posuzováním jejich potomstev. Existují dvě možnosti, jak jednotlivé klony v sadech otestovat – buď lze získat potomstva kontrolovaným křížením selektovaných klonů, anebo se potomstva získávají z produkovaného osiva jednotlivých klonů (bez evidence samčího gametického příspěvku). U první možnosti se jedná o plnosesterská potomstva, jelikož jsou známi oba rodiče a v případě testování lze z testovaných potomstev založit sad vyšší generace. V druhém případě se hovoří o tzv. polosesterských potomstvech, protože je známa pouze matka a díky tomuto testování lze založit pouze sad 1,5 generace (Kaňák et al. 2008).

3.3 Vliv stresu a konkrétních stresových faktorů na rostlinu

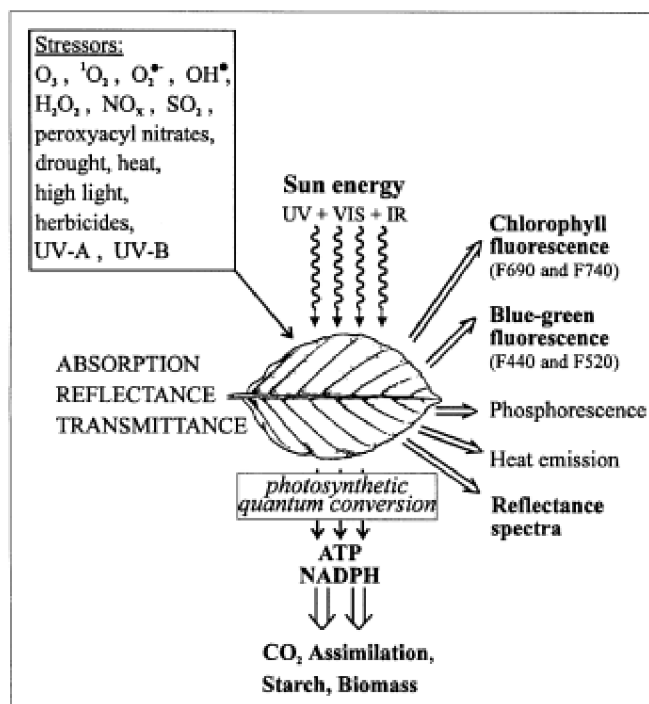
Stres rostlin je způsoben jak abiotickými, tak i biotickými ukazateli. Za stres lze považovat jakékoliv nepříznivé stavy a podmínky, které vyvolávají v rostlinách nepříznivé účinky, blokaci metabolismu či růstu a vývoje. Je třeba vnímat diferenci mezi krátkodobým

a dlouhodobým působením stresu. Mezi mírné projevy stresu se řadí např. přizpůsobení se aktuálním změnám (prostředí) či projevy korekce organismu. Zatímco dlouhodobý/chronický silný stres má za následek až odumírání rostlin (Lichtenthaler 1996).

Stres rostlin je možné detekovat za pomoci neinvazivních fyziologických metod, jednou takovou je metoda chlorofylové fluorescence, díky níž je možné zjistit obsah chlorofylů a s tím spojený stav fotosyntézy. Rostliny reagují na nastalý stres různými specifickými projevy; při nedostatku nebo naopak přemíře světla se umí tomuto stavu přizpůsobit různými úpravami, např. modifikací velikosti listů, ale i zvýšením koncentrace stresových enzymů či hormonů, které zabraňují trvalému poškození rostliny. Za stres by neměla být považována situace v případě, že je rostlina vystavena mírné změně teploty, zastínění vlivem oblačnosti či snížení vlhkosti vzduchu – rostliny jsou adaptovány rychle reagovat na takovéto změny a přizpůsobit se. Avšak rostliny, které jsou velmi často vystaveny náhlým a intenzivním tlakům a jsou nuceny reagovat omezením metabolických procesů z hlediska šetření energie, mohou být vlivem těchto opatření nenávratně poškozeny (Lichtenthaler 1996).

3.3.1 Stres a změna obsahu fotosyntetických pigmentů

Působením stresových faktorů na rostlinu se rovněž mění složení, respektive hladina fotosyntetických pigmentů, a tím se mění i absorpční a odrazivé vlastnosti jehlic/listů. Stres tedy souvisí s transformací podílu vstřebané světelné energie a má rovněž vliv na naměřené hodnoty fluorescence chlorofylu. Do jisté míry lze tedy říci, že zjišťování obsahu pigmentů a spektrální odrazivosti vegetace funguje jako ukazatel výskytu stresu u rostliny (Lichtenthaler 1996). Konkrétně stres ze sucha má za následek až rozklad chlorofylů a tím snížení funkce fotosyntézy (Zhao et al. 2006).

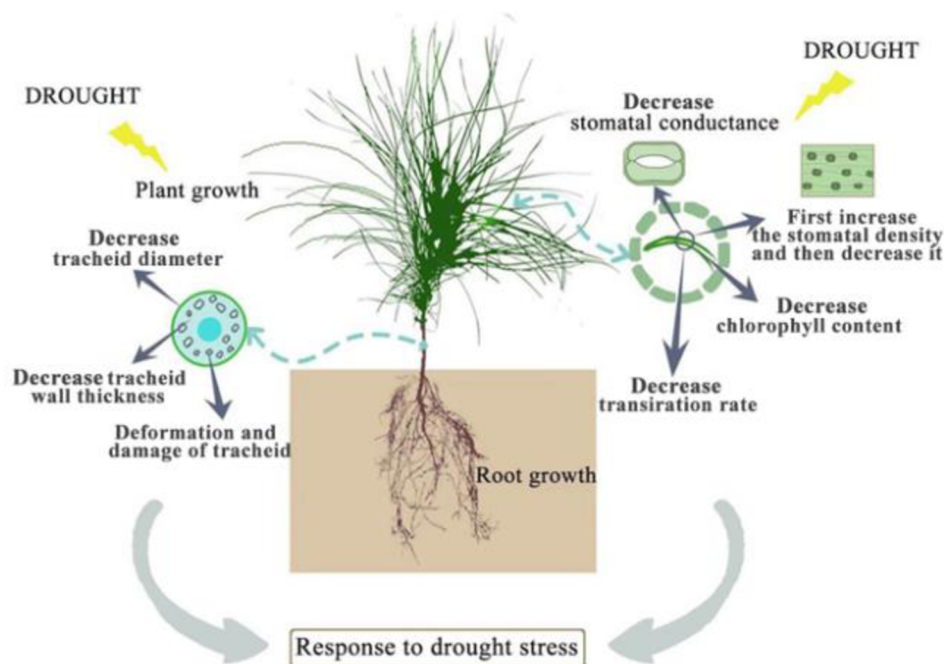


Obrázek 2 – Schéma toku fotonů listem za působení nepříznivých stresových faktorů (Lichtenthaler 1996)

3.3.2 Stres z nedostatku vody

V předchozích kapitolách již bylo zmíněno, že sucho je v posledních letech významným faktorem stresu nejen u borovice lesní. Jedním z významných ukazatelů poukazujících na stres rostliny ze sucha je aminokyselina prolin, jejíž hladina v organismu stoupá vlivem působení stresových faktorů a plní funkci ochrany vůči jejímu poškození; funguje jako osmoprotektant a napomáhá rostlině přijímat vodu (Giertych a Mátyás 1991; Hajná et al. 2016). Jeden z pokusů na sazenicích smrku (*Picea mongolica*) (Zou et al. 2003) ukázal, že stres ze sucha nepříznivě působí na výškový růst sazenic a urychluje tvorbu pupenů. Hladina prolinu se zvýšila, a naopak hladina chlorofylů *a* a *b* se snižovala s rostoucím stresem ze sucha.

Stres z nedostatku vody je rovněž spojen s možnou nedostatečnou půdní vlhkostí. V tomto kontextu byl proveden test se sazenicemi borovice lesní (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) v květináčích na reakce za situace nedostatečného obsahu vody v půdě – u sazenic byly porovnávány růstové indexy a fotosyntéza, přičemž se hodnotitelé zaměřili na kořenový systém sazenic. Intenzita stresu zapříčinila nejprve zvýšení hustoty stomat v jehličí, a poté následný pokles při vysoké hladině stresu. Ve srovnání s kontrolní skupinou rovněž poklesl obsah chlorofylů a došlo k poškození buněčných organel (Meng et al. 2023).



Obrázek 3 - Schéma působícího stresu na sazenici borovice lesní (Meng et al. 2023)

3.3.3 Vliv teploty prostředí

Vliv nízkých teplot působí negativně na biochemické procesy uvnitř rostliny – dochází k transformaci buněčných struktur, ke změně dostupnosti vody pro rostlinu aj. V případě, že u rostliny dochází vlivem nízkých teplot k mrznutí, a tím k poškození buněčných membrán, rostlina následkem tohoto stresu trpí dehydratací (Howarth a Ougham 1993).

Poškození borovice lesní vlivem nízkých teplot je nejčastěji pozorováno u populací vyskytujících se čím dál severněji od rovníku a zároveň je viditelné u populací s přechodem od oceánského klimatu na klima kontinentální. Tento fakt poukazuje na to, že populace nacházející se v severněji položených územích, které jsou adaptovány na teplejší klima, nebudou bez potřebné rezistence vůči nízkým teplotám vykazovat požadovanou produkci a kvalitu dřeva (Giertych a Mátyás 1991). Na základě jednoho z prvních takovýchto výzkumů dle Langleta (1936) populace borovice lesní, které se nachází v níže položených oblastech vykazují vyšší obsah vody v jehlicích během podzimních měsíců na rozdíl od populací nacházejících se severněji – jedná se tedy o možný ukazatel, který vypovídá, že borovice lesní je schopna se bránit vůči poškození nízkými teplotami takovým způsobem (Giertych a Mátyás 1991).

3.4 Význam fotosyntézy a fotosyntetických pigmentů

3.4.1 Fotosyntéza jako ukazatel zdravotního stavu rostliny

Biologický proces nazývaný fotosyntéza, jež je základním principem tvorby energie fotoautotrofních organismů – tedy řas, bakterií a rostlin, je rovněž vnímán jako důležitý ukazatel při charakterizování zdravotního stavu rostlin. Nezbytné je pro tento proces přítomnost slunečního záření, za kterého dochází k fixaci atmosférického oxidu uhličitého do chemické formy. Fotoautotrofní organismy si za pomoci chemických reakcí sestaví energeticky bohaté molekuly jako jsou sacharidy či lipidy z výchozích komponentů, kterými jsou voda a oxid uhličitý. Viditelná složka záření, ze které fotoautotrofní organismy prosperují a je tedy zásadní pro život na Zemi, se pohybuje ve vlnových délkách 380 – 750 nm (Britton 1983; Fracheboud a Leipner 2003); tento rozsah vlnových délek je rovněž označován jako fotosynteticky aktivní radiace (PAR) (Procházka et al. 1998).

V posledních 15 letech byla fotosyntéza značně zkoumána z hlediska možné interpretace zdravotního stavu rostlin na základě vývoje dostupných technologií a matematických modelů. Fotosyntéza je považována za ukazatel možného probíhajícího stresu rostlin; jednou z prvních pozorovatelných reakcí u rostlin vlivem nepříznivého prostředí je pokles rychlosti fotosyntézy (Fracheboud a Leipner 2003).

Fotosyntetický aparát je prokazatelně jedna z nejsenzitivnějších rostlinných částí na stres vlivem vysokých teplot, kterým je rostlina po určitou dobu vystavována. Při stresu z vyšších teplot (rozmezí 35-40°C) dochází u rostlin k inhibici fotosyntézy (Sinsawat et al. 2004; Berry a Björkman 1980). Avšak jeden z výzkumů (Havaux 1993) ukázal, že fotosyntetický aparát např. u lilku bramboru (*Solanum tuberosum*) je schopen se velice rychle (v řádu minut) adaptovat na působení vyšších teplot (okolo 35°C) – tedy krátkodobé vystavení rostliny mírně zvýšeným teplotám způsobí vyšší toleranci na tento stav. Rovněž další výzkum s kukuřicí (*Zea mays L.*) v této oblasti potvrdil lepší snášenlivost vůči vyšším teplotám při vystavení rostliny krátkodobému působení vyšších teplot (Sinsawat et al. 2004).

3.4.2 Fotosyntetické pigmenty

Fotosyntetické pigmenty jsou esenciálními prvky, které se účastní reakčního procesu fotosyntézy. Mezi tzv. fotosyntetické pigmenty se řadí dvě velké skupiny látek, a to chlorofyly a karotenoidy. Tyto látky, přítomné ve fotosyntetických anténních molekulách, jsou schopné absorbovat světelnou energii na membránách tylakoidů vyšších

zelených rostlin. Pokud je světelná energie fotosyntetickými pigmenty přijata, je poté převedena buď k řízení fotosyntetické reakce nebo může dojít k jejímu přetransformování do podoby tepla či je zpětně vyzářena s vlnovou délkou více jak 650 nm. Všechny tři reakce si vůči sobě konkurují a pokud se organismus pro jednu z nich rozhodne, vždy je to na úkor snížení výkonu u zbývajících dvou procesů. Již samotný obsah chlorofylu ve fotosyntetických pletivech udává celkovou schopnost fotosyntézy (Špulák et al. 2011; Misra 2012). Zjištěná hladina obsahu chlorofylů a karotenoidů může nastínit fyziologický stav vegetace (Hernández-Clemente et al. 2012).

3.4.2.1 Chlorofyly

Chlorofyly fungují jako primární fotoreceptory při průběhu fotosyntézy. Dělí se na chlorofyl *a*, *b*, *c* aj.; fotoautotrofní bakterie disponují bakteriochlorofyl *a* a bakteriochlorofyl *b*, který vstřebává energii v oblasti červeného záření (Larcher 2003). Chlorofyl *a* je označován jako primární chlorofyl, nacházející se v anténních membránách a je velmi často doprovázen vedlejším chlorofylem *b*, *c* či *d*. Chlorofyl *b* je přídatným chlorofylem vyskytující se nejčastěji u zelených řas, ale své místo má rovněž v aparátech vyšších rostlin. Chlorofyly *c* jsou lokalizovány v produktech sekundární endosymbiózy či v řasách. Chlorofyl *d* je možné pozorovat u některých druhů červených řas, ale primárně se nachází v prochlorofytech (Papageorgiou 2004; Heldt a Piechulla 2011; Larcher 2003).

Chlorofyl představuje cyklický tetrapyrrol, který je syntetizován z protoporfyrinu IX. Uvnitř cyklu, respektive kruhu, se nachází ion hořčíku. Chlorofyl je znám konjugovanými dvojnými vazbami, tzn., že jeho molekuly výrazně absorbují viditelné světlo – tedy část světelného spektra, v němž je intenzita slunečního záření nejsilnější, tedy pod 480 nm a poté mezi 550 až 700 nm. V rozmezí 480 až 550 nm se světlo neabsorbuje, nýbrž odráží – to je důvod, proč jsou části rostlin, které jsou schopné fotosyntetizovat, zelené (Heldt a Piechulla 2011). Chlorofyly přijímají nejúčinněji světelnou energii v oblasti modré a červené části viditelného spektra (Baker a Oxborough 2004).

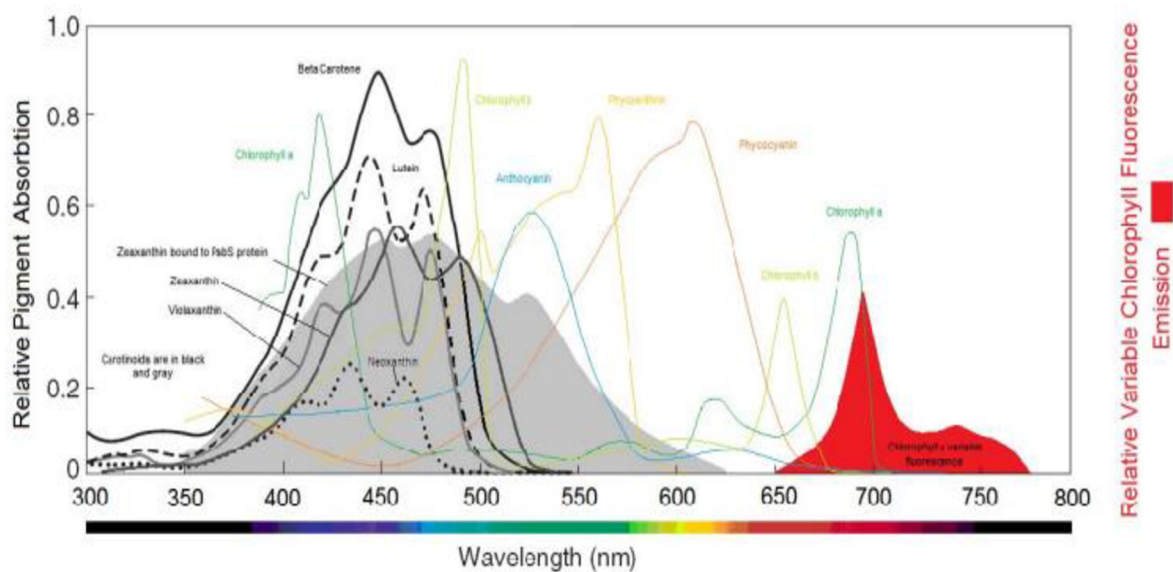
3.4.2.2 Karotenoidy

Karotenoidy patří mezi alifatické nenasycené uhlovodíky a pohlčují světelnou energii v oblasti spektra, kde chlorofyly mají omezenou schopnost absorpce světla, tedy v rozmezí vlnových délek 480 až 550 nm. Jsou rovněž označovány jako světlosběrné pigmenty a obsahují je kompletně všechny zelené rostliny a některé bakterie; jsou nejběžnějšími

doprovodnými pigmenty, které se nachází ve světlosběrných komplexech – karotenoidy jsou rozmístěny v anténních molekulách, v reakčních jádrech i v dalších částech těchto komplexů. Mezi hlavní karotenoidy se řadí především karoteny. Nejdůležitějšími karoteny jsou α -karoten a β -karoten. Dále mezi karotenoidy patří látky nazývané xantofyly, ty nejdůležitější jsou lutein, zeaxantin, violaxanthin, neoxanthin a antheraxanthin (Heldt a Piechulla 2011; Gitelson et al. 2002; Hernández-Clemente et al. 2012; Demmig-Adams a Adams III 1992).

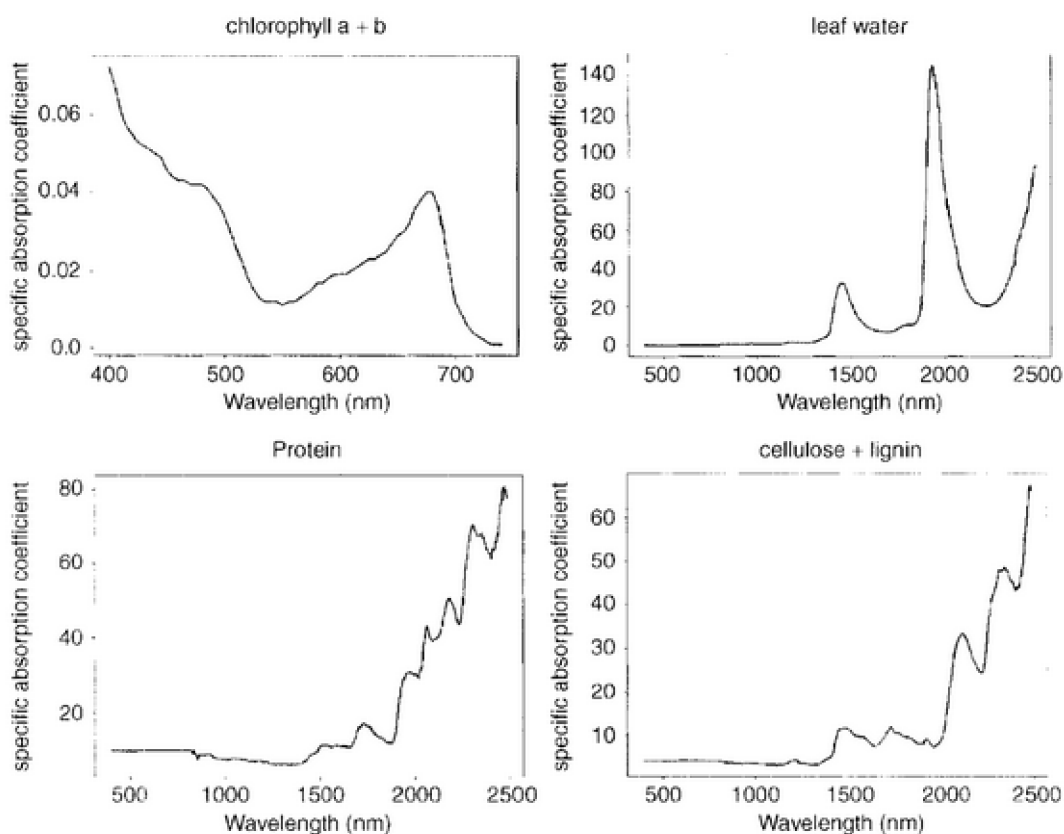
Karotenoidy se vyznačují řadou významných úloh v organismu. Tou hlavní je přenos světelné energie do reakčních center PSI a PSII. Naopak xantofyly se podílí na tzv. xantofylovém cyklu, který chrání rostlinu (organismus) před stresem z nadměrného ozáření v případě, že rostlina přijme nadměrné množství světelné energie. Zajímavé je, že poměr vstřebávání červeného a modrého světelného spektra rostlinou je závislý na míře intenzity aktinického světla (Bernacchi et al. 2002; Gitelson et al. 2002; Hernández-Clemente et al. 2012).

Karotenoidy umí rovněž blokovat volné radikály a volnou formu kyslíku; dále se starají o zhášení excitované formy chlorofylů nebo singletového kyslíku (Gitelson et al. 2002; Hernández-Clemente et al. 2012). Mezi další takové činnosti se řadí rovněž známá funkce obarvování květů a plodů rostlin (Heldt a Piechulla 2011). Jsou hojně využívány v potravinářském průmyslu (Britton 1983). Karotenoidy, především xantofyly, jsou esenciálními pigmenty pro stabilizaci LHC proteinů (Papageorgiou 2004). Rovněž byla prokázána spojitost mezi zvýšením obsahu karotenoidů v rostlinách za stresových podmínek, jakými jsou zvýšená teplota prostředí, senescence či nadměrné ozáření (Hernández-Clemente et al. 2012).



Obrázek 4 – Grafické znázornění křivek zobrazující relativní absorpci jednotlivých pigmentů a variabilitu fluorescence chlorofylu *a* v závislosti na světelné vlnové délce (chlorofyl *a* označen zelenou barvou, karotenoidy poté černě zbarvenou křivkou) (Papageorgiou 2004)

Na Obrázku 5 je možné pozorovat rozdíly mezi specifickou absorpcí energie fotosyntetických pigmentů, celulózy a ligninu, proteinů a vody obsažené ve vegetaci. Jak již bylo zmíněno, chlorofyly nejlépe vstřebávají světelnou energii v oblastech pod 480 nm a poté od 550 do 700 nm vlnové délky, tedy viditelnou červenou a modrou část spektra (Baker a Oxborough 2004). Voda, proteiny, cukry, celulóza a lignin absorbují světelnou energii v rozmezí 800-2500 nm. Je zajímavé, že nejvyšší peak absorpce se u vody, proteinů cukrů atd. nachází v obdobné oblasti, a to kolem 2500 nm vlnové délky (Liang 2004).



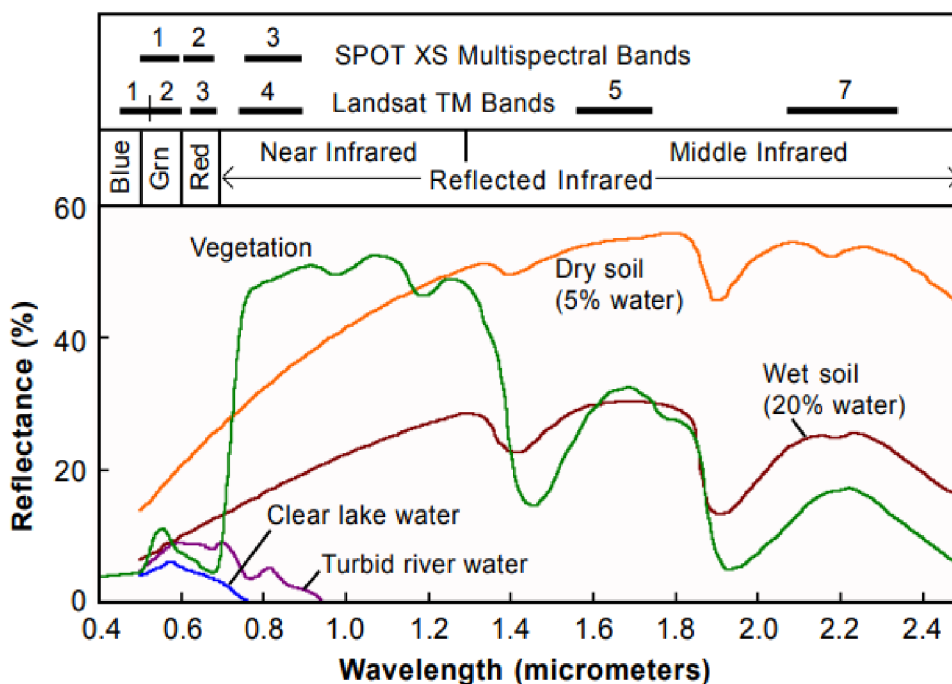
Obrázek 5 – Porovnání spektrálních křivek odrazivosti mezi chlorofyly *a + b*, vodou, proteiny, celulózu a ligninem (Liang 2004)

3.5 Spektroskopie

Spektroskopie je experimentální obor zabývající se elektromagnetickým zářením, konkrétně jeho pohlcováním, vyzařováním či jeho rozptylováním pomocí molekul a atomů. Elektromagnetické záření je definováno poměrně širokým spektrem vlnových délek, ať už se jedná o rádiové vlny či rentgenové nebo ultrafialové záření (Hollas 2004; Smith 2012). Přístroje, které jsou taková záření schopny zachytit a změřit jejich hodnotu, se nazývají spektrometry či spektroradiometry. Princip fungování spektroradiometrů je takový, že optický prvek obsažený v přístroji ve tvaru hranolu či mřížky je schopen záření rozmělnit na zúžená přilehlá pásma vlnových délek a energii v každém pásmu změřit samostatným detektorem. Za aplikace stovek takovýchto detektorů lze naměřit pásma úzká v rozmezí 0,4 – 2,4 μm (Smith 2012). Pokud je změřeno přístrojem více jak 10 takovýchto pásem a utvořen celistvý obraz, poté se hovoří o tzv. hyperspektrálním snímkování, v případě menšího počtu těchto pásem a větší vzdálenosti od sebe se měření označuje jako multispektrální (Borengasser et al. 2007).

3.5.1 Spektrální reflektance

Reflektance neboli odrazivost je popsána jako poměr odražené energie ku dopadající energii dané vlnové délky. Různé materiály odrážejí energii v různých vlnových délkách odlišně v závislosti na absorpci světla v určitých spektrech. Takovéto nuance mezi absorpcí energie v různých vlnových délkách se zobrazují na tzv. spektrální křivce odrazivosti. Pokud se křivka blíží směrem k ose zobrazující vlnové délky, znamená to, že daný materiál pohlcuje světelnou energii. Naopak odchylení křivky směrem od osy znamená míru odrazivosti energie daného materiálu. Tyto rozdíly mezi vlnovými délkami se nazývají absorpční pásma. Rozdíly v absorpčních pásmech jsou viditelné např. mezi odrazivostí vegetace, půdy a vody. Vegetace disponuje vyšší odrazivostí v případě spektra blízko infračerveného záření, a naopak menší odrazivostí v oblasti červeného záření na rozdíl od půdy či vody (Obrázek 6) (Smith 2012).



Obrázek 6 – Spektrální křivka odrazivosti – porovnání odrazivosti mezi vegetací, půdou a vodou (Smith 2012).

3.5.2 Hyperspektrální technika zobrazování

Technika hyperspektrálního zobrazování umožňuje spojit a zobrazit digitální snímání vzorků i spektroskopii jako takovou v jediném provedení. Zahrnuje měření odrazivosti v rámci stovek pásem elektromagnetického spektra. Takové měření lze provést ručními

spektroradiometry nebo pomocí snímacích přístrojů umístěných v satelitech, dronech či letadlech. Hyperspektrální kamery dokážou díky citlivým sensorům zachytit až stovky úzkých pásů blízko sebe. Podle druhu kamer jsou přístroje schopny zaznamenat elektromagnetické záření v různých spektrech vlnových délek – oblast viditelného záření, ultrafialové záření či blízké infračervené záření (NIR) (Danusevičius et al. 2014; Im a Jensen 2008). To umožňuje široký záběr identifikování vlastností materiálů, ale i určit druhy rostlin a rozdíly mezi nimi (Moorthy et al. 2008).

3.5.2.1 Odrazivost vegetace

Na křivce spektrální reflektance (Obrázek 6) je možné pozorovat obvyklou odrazivost zdravé vegetace. V místech, kde je zelená křivka blíže k ose vlnových délek, dochází k absorpci světla fotosyntetickými pigmenty – chlorofyl je schopen vstřebat světlo ve viditelném spektru modrých a červených vlnových délek, zatímco v oblasti zeleného spektra je jeho schopnost omezena (již zmíněný důvod, proč jsou rostliny viditelně zelené) (Heldt a Piechulla 2011; Smith 2012). Naopak v oblasti blízko infračervenému spektru jsou hodnoty odrazivosti vyšší – nejvyšších hodnot dosahuje okolo 700 nm, takové místo bývá označováno jako červený okraj neboli red edge (viz porovnání Obrázku 4 a 6). V případě strukturální změny listů, např. v důsledku stresových faktorů ovlivňující kondici rostliny, se tato skutečnost může projevit na poklesu odrazivosti v oblasti NIR a nárustu v oblasti viditelného červeného světla. Při projevujícím se stresu rostliny – senescence, nedostatek vody aj. dochází k úbytku chlorofylů a do popředí se dostávají další pigmenty, tj. karotenoidy, které se projevují na rostlinách zbarvením listů do žlutooranžové barvy (Smith 2012; Heldt a Piechulla 2011). Dle Datta (1998), který se zabýval obsahem chlorofylů *a* a *b* a karotenoidů v listech různých druhů eukalyptů pomocí poměrů pásem odrazivosti, vyplývá, že odrazivost energie ve spektru červených a modrých vlnových délek, kde dochází k nejvyššímu vstřebání světelné energie fotosyntetickými pigmenty (především chlorofyly), nereaguje na změny obsahu pigmentů. Naopak nejvíce se změna v citlivosti odrazivosti projevila v zeleném spektru vlnových délek. A vůbec nejlépe byla vidět citlivost reflektance na obsah pigmentů v oblasti blízko infračerveného spektra (Datt 1998). Gittelsohn et al. (2002) ve svém výzkumu dokázal, že maximální citlivost reflektance na obsah karotenoidů byla naměřena ve vrcholném bodě 520 nm ve viditelném spektru, což naznačuje pokročilé stáří rostliny.

Obsah fotosyntetických pigmentů – chlorofylů *a* a *b*, karotenoidů a xantofylů zkoumal Hernández-Clemente et al. (2012) na poškozených borových lesích za pomoci dat z DPZ – multispektrálního snímání s přístrojem, který byl součástí bezpilotního letounu a 3D modelace korun stromů v oblasti jihovýchodního Španělska, nejsušším regionu západní Evropy. Výsledky ukázaly, že nejvyšší zaznamenané vstřebávání energie na úrovni jehlic chlorofyly je v oblasti 550-700 nm, u karotenoidů je to oblast kolem 450-555 nm; na úrovni zápoje korun se mírně výsledky lišily v důsledku vstupujícího faktoru, a to struktury porostu a možným překryvem jednotlivých pigmentů ve viditelném spektru (Hernández-Clemente et al. 2012).

3.6 Vegetační indexy a jejich využití

Vývoj techniky DPZ a přístrojů v oblasti spektroskopie (spektroradiometrů) podpořily široké spektrum klasifikace vegetace a rovněž s tím spojený rozvoj jednoduchých vegetačních indexů (Cohen a Goward 2004). Postupem času přinesl další vývoj techniky s dokonalejšími modely pro přenos záření kvantitativní informace o vegetaci, např. obsah chlorofylu, hodnota LAI, obsah vody aj., tedy informace přínosné v oblasti biochemie a fyziologie rostlin (Myneni et al. 2002; Homolová et al. 2013). Rovněž se staly více zkoumanými znaky rostlin fotosyntetické pigmenty – chlorofyly a karotenoidy, o nichž se informace získávají právě pomocí hyperspektrální metody (Homolová et al. 2013; Malenovský et al. 2013).

Vegetační indexy znázorňují empirická měření vegetační aktivity na povrchu Země a jsou hojně využívány v oblasti DPZ při snímání změn vegetace na povrchu Země (Didan a Munoz 2019; Lyon et al. 1998). Hodnota vyzářené energie z povrchu vegetace ve viditelném spektru délek je nízká, a to z důvodu absorpce světelné energie v rostlinách vlivem fotosynteticky aktivních pigmentů, a to v oblasti červeného a modrého spektra vlnových délek. Téměř celé spektrum blízko infračerveného (NIR) záření je vegetací rozptylováno či odraženo zpět s nízkou hodnotou vstřebávání rostlinou, naopak energie viditelného červeného záření (RED) je rostlinou přijímána (v této oblasti spektra působí chlorofyl *a*). To vše záleží na několika faktorech, mezi nimi např. na indexu listové plochy (LAI), na velikosti a morfologii listu aj. (Didan a Munoz 2019).

3.6.1 Charakteristika jednotlivých vegetačních indexů

Hlavním a nejvíce využívaným vegetačním indexem je normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI), který zjednodušuje složitost multispektrálního snímkování. NDVI se využívá k stanovení obsahu chlorofylů, ale i k stanovení vlhkosti (Huang et al. 2020; Gamon et al. 1997). Hodnoty NDVI se pohybují v rozmezí -1 až 1, hodnoty okolo 0,8 tohoto indexu představují lepší zdravotní stav vegetace (Huang et al. 2020; Gu et al. 2007). K získání hodnoty NDVI je potřeba dát do poměru hodnoty NIR a RED:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho\text{NIR} - \rho\text{Red}}{\rho\text{NIR} + \rho\text{Red}}$$

Dalším indexem k prezentaci biofyzikálních vlastností vegetace je SR neboli Simple Ratio. Jedná se o poměrový index, který je vyjádřen za pomoci NIR a RED, stejně jako NDVI. Rovněž se využívá k pozorování obsahu chlorofylů u vegetace (Chen 1996; Glenn et al. 2008; Lei et al. 2011). Index SR se vypočítá poměrem odrazivosti referenční vlnové délky (R_{ref}) a indexové vlnové délky (R_{index}). Referenční vlnová délka se pohybuje v rozmezí 750–900 nm, zatímco indexová vlnová délka v rozmezí 660–720 nm. Pro výpočet byla sestavena rovnice :

$$\text{SR} = \frac{\rho\text{NIR}}{\rho\text{Red}}$$

Mezi další vegetační indexy ke zjišťování stavu půdy, vody či atmosféry patří EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) nebo ARVI (Atmospheric Resistant Index) (Didan a Munoz 2019).

Vegetační index fotochemické reflektance (PRI) se využívá jako citlivý ukazatel fyziologického stavu vegetace i jako indikátor stresového stavu; je citlivý na epoxidační situaci xantofylového cyklu, účinnost fotosyntézy nebo vstřebávání energie pigmenty; stanovuje tedy obsah karotenoidů (Hernández-Clemente et al. 2011). K určení celkového fyziologického stavu vegetace se poté využívá indexu REIP – Red Edge Inflection Point. Je definován jako parametr λ_{re} , který je využíván právě jako spektrální index. Reflexní bod lze definovat jako vlnovou délku maxima v derivaci reflektance o vlnové délce. Parametr reflexního bodu se pohybuje v rozmezí 670-740 nm. Předností tohoto indexu, respektive parametru je, že není ovlivněn přídatnými faktory, jako je např. odrazivost povrchu vegetace,

tedy měl by být přesnější oproti SR či ND. Tento bod je definován v oblasti spojující odrazivost červeného viditelného záření a záření NIR. Na spektrální křivce lze tento bod pozorovat v místě strmého nárůstu odrazivosti vegetace (Sims a Gamon 2002). Tento nárůst lze připisovat tomu, že v oblasti RED je absorpce pigmenty vysoká, zatímco v oblasti NIR nízká a odrazivost vysoká (Hermann et al. 2010). Normalized Difference Water Index (NDWI) neboli normalizovaný diferenční vodní index je sensitivní index využívaný k zjišťování obsahu vody uvnitř listu rostliny. Rovněž patří mezi indikátory vodního stresu – jeho hodnota je ovlivňována suchem, tedy indikuje i stresový stav ze sucha (Gu et al. 2007).

Hendandéz-Clemente et al. 2011 provedl studii, kdy využil index PRI jako indikátor stresu u borového lesa. Index PRI je ovlivňován na různých úrovních – na úrovni buněčné je to vodivost průduchů, obsah vody či epoxidační situací xantofylového cyklu (Gamon et al. 1992; Melzack et al. 1985). Na úrovni listu je to poté fotosyntetická aktivita, vnitřní uspořádání listu či teplota. Na úrovni porostu jej může ovlivnit hladina LAI, oblast PAR i hustota porostu (Hernández-Clemente et al. 2011; Melzack et al. 1985). Nízký obsah chlorofylu detekuje možnou změnu v obsahu vody, a tedy výskyt vodního stresu. Studovaný druh *Pinus sylvestris* je velice citlivý na hladinu vody a stres ze sucha, kterým v jižní Evropě borovice trpí. Jak již bylo zmíněno, projevuje se to např. poklesem rychlosti fotosyntézy a zvýšenou aktivitou xantofylů (Hernández-Clemente et al. 2011; Poyatos et al. 2008). Avšak velmi málo výzkumů za využití metod DPZ potvrdilo poškození porostů dřívě, než bylo viditelné (Hernández-Clemente et al. 2011).

3.7 Genetická diverzita

Genetická variabilita je jednou z nejdůležitějších ukazatelů udržitelnosti lesů, který může napomoci se správným hospodařením v lesích. Informace o genetické variabilitě je možné získat také pomocí hyperspektrálních měření odrazivosti vegetace na základě RED a NIR oblasti vlnových délek. S vývojem hyperspektrálního snímání je možné touto metodou získávat informace o fyziologickém stavu vegetace (Danusevičius et al. 2014; Moorthy et al. 2008).

Aplikování techniky hyperspektrálního snímání vegetace může v případě lesů vést k získání cenných dat o porostech (Danusevičius et al. 2013). Jak již bylo zmíněno v kapitole 1. a 3., borovice lesní se geograficky přizpůsobila podmínkám podnebí, např. nižší teploty – odolnost vůči poškození mrazem; délka fotoperiodicity aj. Tyto postupně získané

vlastnosti mohou mít vliv na genetickou variabilitu borovic; fenologické znaky takové adaptace slouží jako ukazatelé odlišných genetických znaků (Eriksson et al. 1980).

Relevantní výzkum uskutečnili i Danusevičius et al. (2014) na borovici lesní za užití techniky hyperspektrálního snímkování pomocí kamery se zabudovaným spektrometrem. Po vyhodnocení naměřených dat se ukázalo, že existuje signifikantní provenienční variabilita v naměřené odrazivosti jehlic borovice v závislosti na sběru vzorků (překryv vegetace, období sběru dat atd.).

Ukazatelem míry odlišnosti mezi rodinami či jednotlivými genotypy v rámci populací je heritabilita. Pokud je heritabilita udávána do poměru aditivní genetické variance ku celkové fenotypové varianci, poté se jedná o heritabilitu v užším smyslu (h^2) (White et al. 2007).

Odhad heritability je významný k pochopení přirozených struktur u lesních dřevin, ale i ve šlechtitelských programech dřevin. V rámci přirozených populací zafungovala mikroevoluce, která zaručila genetickou odlišnost populací od jiných populací nacházející se v jiném prostředí. Tedy pokud znak vykazuje jistou variabilitu, může se o něm tvrdit, že je dědičný ($h^2 > 0$) (Barton a Turelli 1989).

V rámci výzkumu odhadu heritability u lesních dřevin bylo provedeno mnoho experimentů. Sledovanými znaky byly fyziologické procesy, fenologie růstu či rychlost kvetení, v neposlední řadě kvalita dřeva. Cornelius (1994) provedl analýzu více než 50 publikovaných prací zabývajících se odhadem heritability (h^2) pro listnaté i jehličnaté dřeviny. Po přezkoumání provedených experimentů zhodnotil, že pro každý znak byly odhady heritability závislé především na homogenitě experimentálního prostředí a na velikosti sledovaného souboru; že konkrétní druhy v rámci zkoumané skupiny či věk dřevin nehrály roli (White et al. 2007; Cornelius 1994).

4 Metodika

Cílem praktické části diplomové práce je stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů laboratorní analýzou z jednotlivých vzorků jehlic borovice lesní (*Pinus sylvestris L.*) pomocí spektrofotometru a získání hyperspektrálních dat jednotlivých vzorků spektrometrem z obou lokalit. Tato zjištěná data poté budou vyhodnocena a porovnávána mezi jednotlivými lokalitami s vybranými jedinci a kontrolní skupinou.

4.1 Popis zkoumaných lokalit – testovací plochy Svitavy a Telč

Pro praktickou část diplomové práce byly vybrány 2 výzkumné testovací plochy s potomstvy semenných sadů s dvěma hlavními ekotypy borovice lesní (náhorní a pahorkatinná), kde byl uskutečněn sběr dat. Tyto plochy jsou spravovány podnikem LČR, s.p. Potomstva náhorní borovice pochází ze semenného sadu Nad Damníkovem, který byl založen v oblasti LS Svitavy. Tento klonový semenný sad (založen s roubovanci původních rodičů rodiny) je paralelní *ex-situ* výsadbou borovice Lánské, která se přirozeně vyskytuje v CHKO Žďárské Vrchy. První lokalita se tedy nachází na území LS Svitavy – lesní hospodářský celek Svitavy, zaujímající území s názvem Mladějovské lesy. Vybraná plocha se nachází v porostní skupině 256 B 1a. Druhá lokalita náleží pod LS Telč – lesní hospodářský celek Jemnice, v oblasti s názvem Zelená hora. Tato testovací plocha se nachází v porostní skupině 520 F 11 (Lesy ČR, s.p. 2023).

4.1.1 Semenný sad Nad Damníkovem

Semenný sad Nad Damníkovem byl založen roku 2001 s výměrou 0,7 ha v oblasti LS Svitavy. Roubovanci v sadě pochází z celkem 60 výběrových stromů, které byly vybrány na území PLO 25 – Orlické hory, dále z PLO 31 – Českomoravské mezihoří a PLO 26 – Předhoří Orlických hor. Všechny oblasti se nachází v 4. a 5. LVS. Záměr sadu je produkce toho nejkvalitnějšího osiva s genetickou i hospodářskou hodnotou, které bude možné využít především pro zakládání porostů v daných PLO (Jurásek 2002).

4.1.2 Testovací plocha Svitavy – charakteristika LS Svitavy

Lesní správa Svitavy LČR hospodaří na územním celku o velikosti 88 838 ha katastrální výměry na jihovýchodě Pardubického kraje, z toho spravuje na 17 148 ha lesních porostů. Tato lesní správa se člení celkem na 12 revírů.

Z geografického hlediska se potom správa rozprostírá na území Svitavské plošiny, severní části Českomoravské vysočiny a Českomoravského mezihoří až po brázdou Malé Hané. Zatímco pro severní a západní část území LS Svitav jsou typické zvlněné plošiny s převážným výskytem smrku ztepilého (*Picea abies* L.), jižní a východní část je značně členitá, a co se týká dřevinné skladby také různorodější. Nadmořská výška se na území LS Svitavy pohybuje v rozmezí od 285 m n.m. po 684 m n.m. Průměrné roční srážky jsou v rozmezí 600–700 mm a průměrné roční teploty okolo 6–9° C, v létě potom teploty dosahují v průměru 16–18° C. Délka vegetační doby je vymezena na 140-160 dnů v roce.

Nejrozlehlejší část území LS Svitavy se řadí do 4. LVS (79 %), tedy bukového. Další části tohoto územního celku spadají do 5. a 3. LVS, tedy do jedlobukového (19 %) a dubobukového (2 %) (Lesy ČR, s.p. 2023).

4.1.3 Charakteristika testovací plochy Svitavy

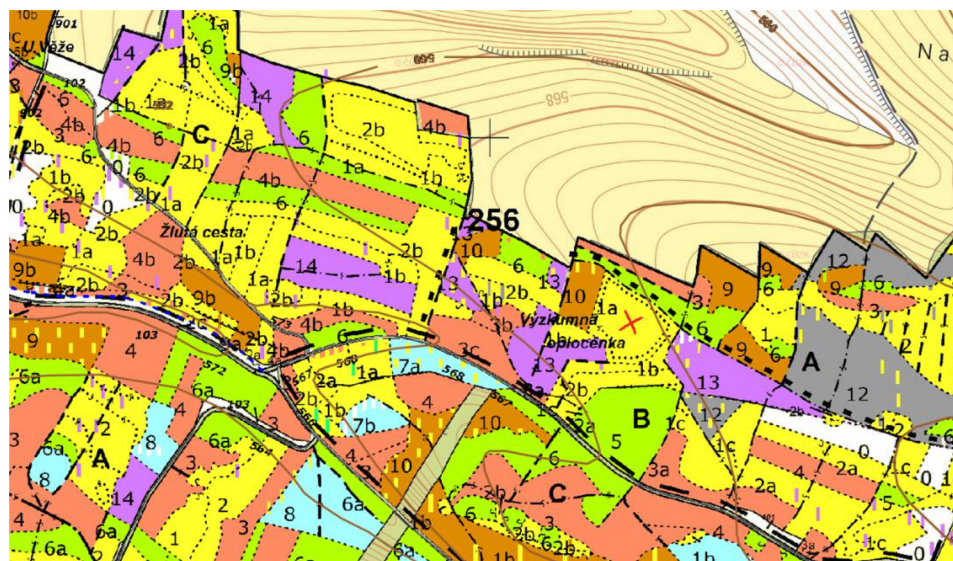
První testovací plocha se nachází v lesním komplexu Mladějovský les, nedaleko Svitav, jižně od obce Helvíkov. Porostní skupina 256 B 1a, ve které se výzkumná testovací plocha nachází, náleží konkrétně lokalitě Na podrostech – Výzkumná oplocenka. Plocha je oplocena z důvodu možného poškození sazenic okusem zvěře, avšak část sazenic poškozena okusem byla již při sázení. Na ploše byl rovněž velký výskyt buřeně, především ostružiníku křovitého (*Rubus fruticosus*). Tato testovací plocha náleží do přírodní lesní oblasti (PLO) 31 – Českomoravské mezihoří. Přírodní oblast je tvořena zvlněnými plošinami, úvaly či údolními a náleží soustavě Český masiv, oblast křída (ÚHÚL 2000; Lesy ČR, s.p. 2023).

Tabulka 1 - Základní lesnické informace o testovací ploše Svitavy (ÚHÚL 2000)

Přírodní lesní oblast	31
Soubor lesního typu	5K
Lesní typ	5K1 (kyselá jedlová bučina modální)
Cílový hospodářský soubor a podsoubor	53a
Lesní vegetační stupeň	5 – jedlobukový
Pásmo ohrožení imisemi	D



Obrázek 7 – Testovací plocha Svitavy (Řehořová 2021)



Obrázek 8 – Porostní mapa lesního hospodářského celku Svitavy, testovací plocha označena červeným křížkem (Lesy ČR, s.p. 2023b)

4.1.4 Testovací plocha Telč – charakteristika testovací plochy Telč

Druhá testovací plocha se rozprostírá na území lesní hospodářský celek Jemnice, v lesním komplexu s místním názvem Zelená hora, nedaleko obce Budiškovice. Jedná se o porostní skupinu 520 F 11. Tato testovací plocha náleží konkrétně lokalitě s označením

„U Dubu“. Testovací plocha Telč spadá do přírodní lesní oblasti 16 – Českomoravská vrchovina (ÚHÚL 2001; Lesy ČR, s.p. 2023). Plocha rovněž patří do soustavy Křižanovská vrchovina, konkrétně do Brtnické vrchoviny, pro níž je charakteristický dlouhý plochý hřbet, rozdělený sníženinami a mírně teplé podnebí (ÚHÚL 2001).

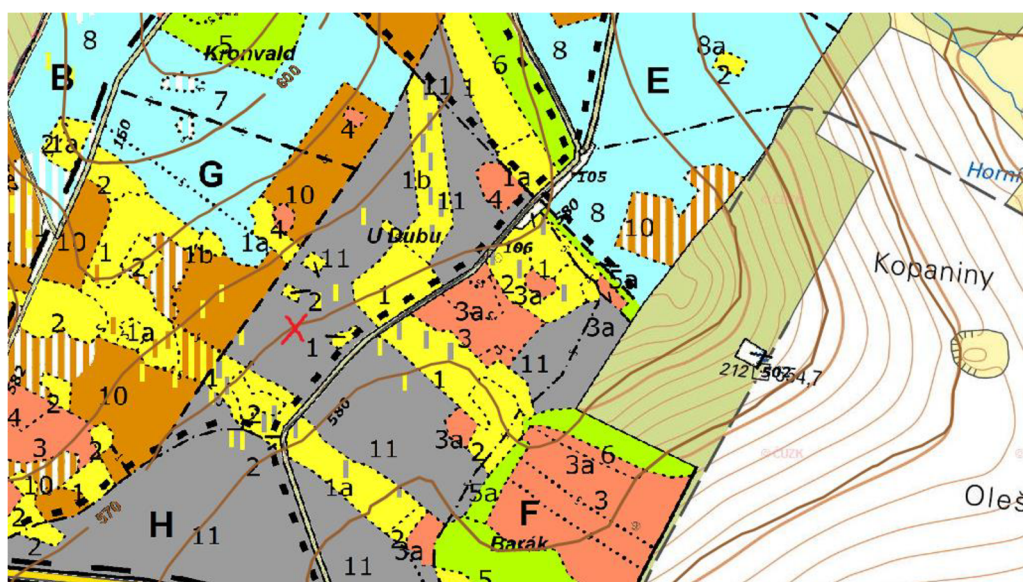
Přírodní oblast je tvořena zvlněnými tvary, relativně plochými hřbety a velkými plošinami, údolí jsou poté mělká a široká a postupně se do krajiny zařezávají. Průměrná roční teplota v PLO 16 se pohybuje mezi 5-10 °C (ve vegetačním období to je mezi 12-14 °C). Průměrné roční srážky poté v rozmezí 600-750 mm. Délka vegetační doby je stanovena přibližně na 130-150 dní. Převládající dřevinou této oblasti je smrk ztepilý následován borovicí lesní (ÚHÚL 2001).

Tabulka 2 - Základní lesnické informace o testovací ploše Telč (ÚHÚL 2001)

Přírodní lesní oblast	16
Soubor lesního typu	4S
Lesní typ	4S1 (svěží bučina modální)
Cílový hospodářský soubor	45b
Lesní vegetační stupeň	4 – bukový
Pásmo ohrožení imisemi	D



Obrázek 9 – Sazenice na testovací ploše Telč (Řehořová 2021)



Obrázek 10 - Porostní mapa lesního hospodářského celku Jemnice, výzkumná plocha označena červeným křížkem (Lesy ČR, s.p. 2023b)

4.2 Odběr materiálu v terénu pro laboratorní měření

Pro účely laboratorní analýzy a získání hyperspektrálních dat bylo nejprve třeba odebrat vzorky z jednotlivých klonů borovice lesní na testovacích plochách Svitavy a Telč. Cílem odběru bylo získat letorosty spolu se svazky jehlic, které později posloužily jako vzorky k měření a analýze. Následně v rámci několika hodin proběhlo laboratorní měření k získání hyperspektrálních dat za pomoci přístroje ASD FieldSpec 4 Wide-Res.

4.2.1 Postup odběru letorostů

První odběr se uskutečnil v druhé polovině srpna roku 2021, a to na ploše LS Svitavy, druhý odběr potom na začátku září 2021 na lokalitě LS Telč. Na daných plochách se předem vybraly konkrétní sazenice, ze kterých se letorost měl odebrat. Celkově se odebralo na lokalitě LS Svitavy 183 vzorků, na lokalitě LS Telč potom 181 vzorků.

Po provedeném odběru se vzorky přepravily na univerzitu, kde byly následující dny vždy změřeny spektrometrem, ihned uloženy do znovu uzavíratelných sáčků a zamrazeny na přibližně -80°C k uchování pro laboratorní analýzu.

Některé předem vybrané sazenice na dané lokalitě se z posloupnosti výběru vzorků musely vyloučit z důvodu poničení okusem zvěří, případně byly odstraněny nebo jejich zdravotní stav byl takový, že se z nich letorost již nedal odebrat. Vzorek se poté odebral ze sazenice, která ve sloupci následovala.



Obrázek 11 – Odebraný letorost označený štítkem připravený s měření hyperspektrální reflektance (Řehořová 2021)

4.2.2 Design testovacích ploch a odebíraných vzorků

Každá z lokalit byla rozdělena na zóny nekompletního blokového uspořádání se 4 opakováními. Testovací plocha Svitavy ve tvaru čtverce, s délkou jedné strany 72 m, byla rozdělena na další 4 oblasti ve tvaru čtverce a tyto čtverce byly rozděleny na další čtvrtiny o stejném tvaru. Každá ze 4 hlavních ploch ve tvaru čtverce byla rozdělena na 6 sloupců a 9 řad, celkově poté na 54 parcel, každá o velikosti 6x4 m. Na těchto parcelách byly vysázeny polosesterská potomstva semenného sadu 1. generace, pocházející ze semenného sadu Nad Damníkovem. Jedná se celkově o 53 klonů tohoto potomstva a jedné kontrolní parcely s označením 54. Na každé parcele se potom nacházelo celkově 16 sazenic. Předem byly vybrány sazenice tak, že se letorost odebíral vždy z každé čtvrté sazenice (tedy čtvrtá, osmá, dvanáctá atd.) v daném sloupci; tedy celkově se v jednom sloupci nachází 72 sazenic. Každý sloupec je pak rozdělen na další 4 dle vysázených sazenic, v něm se pak odebíraly letorosty z každé druhé sazenice. Ze 4 čtvercových ploch se vzorky odebíraly jen na 3 plochách, ve 4. se odebíraly vzorky ze sazenic na kontrolní parcele číslo 54, v tabulce vyznačena modrou barvou.

Testovací plocha Telč byla rovněž rozdělena na 4 části, avšak tentokrát obdélníkovitého tvaru, kdy délka dvou protilehlých stran činila 96x36 m. Každá ze 4 částí byla dále rozdělena na další 4 části, stejně jako v případě lokality Svitavy, jen ve tvaru obdélníku, rovněž každá ze 4 částí byla tvořena o 6 sloupcích a 9 řádcích a 54 parcelách o velikosti 4x6 m. Na těchto parcelách bylo vysázeno polosesterské potomstvo ze semenného sadu 1. generace, tedy opět 53 klonů a jedna kontrolní parcela s označením 54. Každá parcela čítala 16 sazenic. I zde se postupovalo s odběrem vzorků ve stejném designu, tedy vzorek byl odebrán z každé čtvrté sazenice a ob jeden sloupec v rámci každé parcely s tím, že se rovněž vynechala poslední oblast, kde se vzorky odebraly pouze z kontrolní parcely číslo 54, v tabulce je opět vyznačena modrou barvou.

Kritérium odběru každé čtvrté sazenice ve sloupci nebylo dodrženo ani na jedné ploše pouze v případě kontrolních parcel s číslem 54 – zde se odebíraly letorosty ze všech 16 sazenic.

Tabulka 3 - Design testovací plochy Svitavy

3	17	53	39	29	15	14	21	1	33	35	42
48	30	33	23	35	6	24	45	29	28	51	17
38	54	20	4	2	27	4	38	43	12	44	41
51	24	21	31	36	42	26	31	52	32	19	25
8	25	40	52	7	10	8	13	6	39	36	30
9	18	1	50	46	28	3	53	10	47	2	11
19	13	44	43	11	45	16	9	34	22	20	49
5	49	47	26	37	22	5	23	15	46	18	48
12	14	16	34	32	41	50	27	40	54	37	7
22	14	9	54	36	20	17	33	26	4	46	9
47	27	11	52	16	40	18	40	7	50	29	38
8	7	49	43	41	13	19	47	11	35	32	13
45	28	48	34	21	29	14	52	31	48	23	12
5	17	6	12	44	23	20	44	43	36	41	10
15	53	51	4	37	30	25	15	27	45	8	54
32	50	46	39	18	38	42	2	37	6	30	5
42	3	19	35	2	26	21	49	16	28	39	1
33	25	31	24	1	10	34	53	24	3	51	22

Tabulka 4 – Design testovací plochy Telč

3	17	53	39	29	15	14	21	1	33	35	42	22	14	9	54	36	20	17	33	26	4	46	9
48	30	33	23	35	6	24	45	29	28	51	17	47	27	11	52	16	40	18	40	7	50	29	38
38	54	20	4	2	27	4	38	43	12	44	41	8	7	49	43	41	13	19	47	11	35	32	13
51	24	21	31	36	42	26	31	52	32	19	25	45	28	48	34	21	29	14	52	31	48	23	12
8	25	40	52	7	10	8	13	6	39	36	30	5	17	6	12	44	23	20	44	43	36	41	10
9	18	1	50	46	28	3	53	10	47	2	11	15	53	51	4	37	30	25	15	27	45	8	54
19	13	44	43	11	45	16	9	34	22	20	49	32	50	46	39	18	38	42	2	37	6	30	5
5	49	47	26	37	22	5	23	15	46	18	48	42	3	19	35	2	26	21	49	16	28	39	1
12	14	16	34	32	41	50	27	40	54	37	7	33	25	31	24	1	10	34	53	24	3	51	22

4.3 Postup hyperspektrálního laboratorního měření

Vzorky z terénu byly převezeny do laboratoře na univerzitě, kde byly změřeny hodnoty hyperspektrální reflektance kontaktní sondou spektrometru. Vzorky do té doby byly uloženy v chladicím boxu.

Ze vzorku letorostu byl odňat svazek jehličí, který byl umístěn na Petriho misku – dno misky bylo pokryto černým nepropustným papírem z důvodu eliminace odrazu záření. Spektrometr byl nejprve nakalibrován tzv. bílou referencí – měření vzorku s úplnou reflektancí, která měla sloužit pro zpřesnění následného měření vzorků. Bílou referenci bylo nutné provést po cca 20 měřeních znovu a v případě, že přístroj vykazoval neměřitelné hodnoty. Vzorek jehličí byl stlačen co nejvíce tak, aby vykazoval co nejmenší plochu propustnosti. Následně byla přiložením sondy na vzorek změřena hodnota hyperspektrální reflektance a signálu byl následně převeden optickým kabelem do digitální podoby. Měření 1 vzorku bylo opakováno celkem třikrát, kdy se sonda přiložila ke vzorku pokaždé z jiné strany pro získání přesnějších dat tímto technickým opakováním (v rámci následné statistické analýzy toto zvažujeme jako tzv. pseudoreplikaci). Bylo nutné průběžně očišťovat sondu od nánosu pryskyřice za pomoci buničiny a lihu. Průběžně naměřená data byla zaznamenávána, aby bylo možné zpětně identifikovat naměřené vzorky a jejich hodnoty.

Po naměření hodnot všech vzorků z dané plochy byla naměřená data převedena do programu MS Excel, kde následně proběhlo přiřazení konkrétních vzorků k získaným naměřeným hodnotám.

4.3.1 Spektroradiometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res

V kapitole 3.5 bylo popsáno, na jakém principu funguje přístroj spektrometr. Hlavní předností tohoto přístroje je hyperspektrální rozsah, tedy nejpřesnější dostupná metoda měření odrazivosti. Rozměry a váha přístroje umožňují měření vzorků jak v terénu, tak i v laboratoři. Přístroj disponuje detekční kapacitou v rozmezí 350-2500 nm, tedy zahrnuje viditelné spektrum, dále NIR a SWIR (shortwave-infrared reflectance) oblast vlnových délek. Zároveň je jeho výhodou i vysoká rychlost (2 spektra za 1 s; doba skenování 200 ms) a přesnost měření ± 1 nm; má velmi dobrou propustnost signálu díky optickému kabelu. Chybovost se pohybuje v průměru 0,5 nm. Další výhodou je snadné propojení s laptopem a uživatelské spárování s Windows 10 (Malvern Panalytical 2016).



Obrázek 12 – Spektroradiometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res s optickým kabelem (Malvern Panalytical 2016)

Získaná hyperspektrální data poslouží zároveň k sestavení vegetačních indexů k porovnání fyziologického stavu vegetace jednotlivých ploch a ekotypů borovice lesní. Materiál byl z testu potomstev na LS Telč ze stejných sazenic opětovně odebrán k laboratornímu měření následující rok (2022) pro porovnání meziročních rozdílů.

4.4 Statistická analýza dat

K získání konečných výsledků bylo využito několika statistických metod z oblastí matematické a popisné statistiky. Z oblasti pravděpodobnosti bylo uplatněno spojitých rozdělení, a to Studentovo t-rozdělení (T-test) a F-rozdělení (F-test). Z popisné statistiky byl využit aritmetický průměr, rozptyl a směrodatná odchylka. Pro aplikaci smíšených lineárních modelů byly použity rovněž softwary ASReml a R. V software R byla rovněž vytvořena většina prezentovaných grafů. Statistický software Statistica, v kterém je obsažena analýza rozptylu ANOVA byl využit k interpretaci dat obsahu fotosyntetických pigmentů. A v neposlední řadě byl využit program MS Excel, především pro filtraci a vizualizaci spektrálních dat.

4.4.1 Charakteristiky popisné statistiky

Popisná statistika vyjadřuje číselné popisné charakteristiky statistického souboru, díky čemuž je možné určit vlastnosti zkoumaného komplexu. Pracuje se dvěma kategoriemi popisných měř, a to s mírou úrovně hodnoty a mírou variability hodnoty. K vypracování analýzy souborů je třeba znát hodnotu těchto dvou měř (Souček 2006).

Vyjádření úrovně jevu se uplatňuje na základě střední hodnoty. Primární kategorií středních hodnot jsou průměry (především aritmetický průměr), jenž jsou charakterizovány za všech naměřených hodnot znaku. Aritmetický průměr se využívá v případě, že je rozložení dat přibližně symetrické (Budíková et al. 2010; Souček 2006). Je jednou z charakteristik polohy (Bujok et al. 2015).

Aritmetický průměr je vyjádřen rovnicí, kde n vyjadřuje počet změřených jedinců a x_i naměřenou hodnotu (Souček 2006; Budíková et al. 2010):

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

Pokud naměřené hodnoty souboru nejsou rovnoměrné, avšak kolísají, poté se jedná o charakteristiku variability neboli proměnlivosti statistického znaku. Zjištění hodnoty variability napomůže k posouzení správnosti vypočtených údajů na úrovni jevu, které udala střední hodnota. Čím je posuzovaný komplex jednotnější (tedy s malou variabilitou), tím přesnější jsou hodnoty aritmetického průměru (Souček 2006). Charakteristika variability udává rozptýlení hodnot na číselné ose, tedy informaci o rozpětí jednotlivých hodnot (Bujok

et al. 2015). K hlavním charakteristikám variability se řadí rozptyl a směrodatná odchylka jakožto jeho odmocnina (Souček 2006).

Směrodatná odchylka je vyjádřena ze zjištěného aritmetického průměru, konkrétní naměřené hodnoty a celkového počtu měření (Bujok et al. 2015):

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

Rozptyl je poté vyjádřen touto rovnicí (Bujok et al. 2015):

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

4.4.2 Charakteristika matematické statistiky

Popisná statistika pomáhá odhalit vlastnosti zkoumaného komplexu číselným vyjádřením. Avšak matematická statistika napomáhá porozumět vztahům mezi jednotlivými znaky zkoumaných souborů. K tomuto porozumění je využívána hlavní část matematické statistiky, kterou se zabývá, a tou je pravděpodobnost (Bujok et al. 2015).

Je třeba předem sestavit dvě tvrzení (hypotézy) dle výběru parametru rozdělení, které budou následně porovnávány. První tvrzení se nazývá nulová hypotéza H_0 , která slouží k porovnání, respektive potvrzení aktuálního stavu. Druhá hypotéza se značí H_A (alternativní hypotéza) a naopak obhájí změnu situace (Nagy a Kratochvílová 2002). Výsledkem testu hypotéz je náhodná veličina T , tedy buď se nulová hypotéza potvrdí či vyvrátí. K tomu, aby mohly být hypotézy testovány, je nutné určit hladinu významnosti p ; nejčastěji se volí hodnota 0,01 (1 %) nebo 0,05 (5 %). K testování hypotéz se využívají statistické testy (Navara 2021; Záhora 2015).

Fisherovo F-rozdělení je testovací statistika poměrem průměrných čtverců rozptylu testovaného faktoru a reziduí. Provádí se v případě, že se testuje shoda/rozdílnost dvou rozptylů dle vzorce (Záhora 2015):

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

Studentovo T-rozdělení je odvozeno od normálního rozdělení. Používá se k porovnání průměrů naměřených souborů. V případě, že se potvrdí z F-testu rozdílnost dvou

porovnávaných rozptylů souborů, poté se dvouvýběrový t-test vypočte dle vzorce (Záhora 2015):

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

Studentův t-test byl použit k porovnání hladin naměřené hyperspektrální reflektance vzorků z obou lokalit; k tomuto porovnání posloužil statistický program R, ve kterém test proběhl. Dále byl využit k porovnání hodnot vegetačních indexů v rámci programu MS Excel.

4.4.3 Charakteristika statistického softwaru ANOVA

ANOVA (Analysis of Variance) neboli analýza rozptylu pracuje s celkovým rozptylem dat, rozkládá je do samostatných tříd a ty poté vyhodnocuje. Analýza rozptylu ANOVA je založena na metodě nejmenších čtverců (Isik et al. 2017). Používá se k porovnání průměrů u dvou a více skupin dat, v případě, že jsou porovnávány dvě skupiny dat, poté lze použít dvouvýběrový t-test. Naměřené hodnoty jsou spojitě náhodné veličiny a znaky, které definují porovnávané soubory, jsou kategorické; takový znak je označován jako faktor. Porovnává rozptyl uvnitř souboru jako hodnotu pro variabilitu (bez ovlivnění faktorem) s rozptylem mezi soubory, kde se projevil faktor (Záhora 2015).

4.4.4 Charakteristika statistického softwaru ASReml

ASReml je software používaný k analýze lineárních smíšených modelů za využití metody REML (Residual Maximum Likelihood). REML vytváří odhady parametrů, které jsou efektivní a konzistentní. Nevýhodou tohoto modelu je, že je speciálně navržen pouze pro analýzu smíšených modelů, nikoliv pro správu dat. Avšak je komplexním statistickým nástrojem užívaným právě v oblasti lesnické genetiky a šlechtění. ASReml je součástí balíčku programu R (Isik et al. 2017; Butler et al. 2009). ASReml je vyprojektován tak, aby odpovídal smíšenému lineárnímu modelu středně velkým datům množiny s komplexními modely rozptylů. Je vhodný k analyzování dat opakovaných měření, k analýze navržených experimentů, k metaanalýze aj. (Butler et al. 2009).

4.4.4.1 Lineární smíšené modely

Základní lineární smíšený model je popsán rovnicí, kde $\boldsymbol{\tau}$ je vektor pro fixní efekty, \mathbf{X} je matice pro fixní efekty, \mathbf{Z} vyjadřuje matici pro fixní efekty, \mathbf{u} je vektor pro náhodné efekty a \mathbf{e} je vektor reziduí (rovněž označován $\boldsymbol{\eta}$) (Butler et al. 2009):

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{Z}\mathbf{u} + \mathbf{e}$$

Rovnice lineárních smíšených modelů s fixním a náhodným efektem, kde \mathbf{R} je kovarianční matice reziduí, \mathbf{b} představuje vektor fixních účinků velkého průměru, \mathbf{X} je zde jako konstrukční matice, \mathbf{u} je vektor náhodných efektů s blokovým designem odpovídající navržené matici \mathbf{Z} a \mathbf{G} součet kovarianční matice náhodných efektů, má tento tvar (Butler et al. 2009; Chen et al. 2018):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{X} & \mathbf{X}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Z} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{X} & \mathbf{Z}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Z} + \mathbf{G}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{b}} \\ \hat{\mathbf{u}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y} \end{bmatrix}$$

Posledním modelem ze sekce smíšených modelů je tzv. BLUP (Best Linear Unbiased Prediction), který je určen k odhadu náhodných účinků právě ve smíšených modelech. Primárně byl určen pro predikci hodnot hospodářských zvířat, avšak dnes je rovněž využíván v oblasti šlechtění rostlin. Stanoví se dle následující rovnice, kde \mathbf{GZ}' představuje kovariační matici mezi pozorovanými a náhodnými efekty, \mathbf{V} značí rozptylovou matici pro pozorování a $\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$ je oprava individuálního pozorování za pomoci fixních efektů (Piepho et al. 2008):

$$\hat{\mathbf{g}} = \mathbf{GZ}'\mathbf{V}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})$$

4.4.4.2 Genetické modely

Dalším modelem, který byl v získání výsledků uplatněn, byl genetický model „half-sib crosses“. Na základě testů potomstev byla provedena selekce – u potomků je známa pouze matka, proto byl uplatněn „half-sib“ model. Potomci jsou poté hodnoceny pro určení rozptylu mezi testovanými rodinami. BLUP následně umožňuje odhad šlechtitelských hodnot testovaných rodičů (není součástí této práce). Rovnice pro tento model je navržena v tomto tvaru (Hansen a Nielsen 2010):

$$y = X\beta + Z_1b + Z_2f + e$$

Zde je několik vstupních složek v rovnici:

X = matice pro výpočty

β = vektor pro fixní efekty

Z_1, Z_2 = matice pro výpočty

b = vektor pro náhodné prostorové efekty

f = vektor pro náhodné efekty křížení

e = vektor pro náhodné reziduální efekty

Neméně důležitou součástí hodnocení potomstev borovice lesní byla získaná hodnota heritability. Odhad heritability v úzkém smyslu byl vypočten jako čtyřnásobek poměru rozptylu vzhledem ke genetickým odlišnostem mezi rodinami sourozenců (aditivní genetický rozptyl), kde byla známa pouze matka ku celkovému fenotypovému rozptylu (Corriveau et al. 1991):

$$h^2 = \frac{4V_a}{V_p}$$

4.4.4.3 Prostorové modely

Z prostorových modelů byl použit model, který využívá autoregresní prostorovou složku a náhodné prostorové efekty v základním modelu, kde ξ znamená fixní prostorové efekty a η označuje náhodné prostorové efekty, zbylé složky jsou stejné jako u základního modelu (Chen et al. 2018):

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

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

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

Zde je několik vstupních složek v rovnici:

σ_{ξ}^2 = fixní prostorová odchylka

σ_{η}^2 = náhodné prostorová odchylka

I = matice shody

\otimes = přímý součin (Kronecker) pro matice

$\mathbf{ARI}(p_{col})$ = autoregresní korelační matice ve směru sloupců

$\mathbf{ARI}(p_{row})$ = autoregresní korelační matice ve směru řádků

4.5 Konstrukce vegetačních indexů

Součástí praktické části je rovněž konstrukce vegetačních indexů, které jsou přímo spojené se zjištěním obsahu fotosyntetických pigmentů. Vegetační indexy byly konstruovány na základě získaných hyperspektrálních reflektancí jednotlivých ekotypů borovic a rovněž byly porovnány mezi jednotlivými lokalitami. Index, který je zde uvedený, byl vypočten dle uvedeného vzorce v MS Excel z dostupných dat ze softwaru R (Sims a Gamon 2002).

Jak již bylo zmíněno, obsah fotosyntetických pigmentů (především chlorofylů) reflektuje zdravotní stav vegetace. Hyperspektrální měření odrazivosti vegetace za účelem zjištění a následné analýzy obsahu chlorofylů je nedestruktivní metoda, která oproti klasičtějším extrakcím pigmentů není časově natolik náročná, a především umožňuje hodnocení změny obsahu pigmentů v průběhu času. Většina vztahů mezi reflektancí listů/jehličí a obsahem pigmentů byla odvozena empiricky (Sims a Gamon 2002). Empirické modely pro odhad obsahu chlorofylů jsou z poměrně velké části založeny na reflektanci v oblasti 550–700 nm, kde jsou chlorofyly schopny absorbovat nejvíce energie (Datt 1998). Avšak v oblasti kolem 550 nm může docházet k překryvu absorpcí chlorofylů a karotenoidů, proto mnohem přesnějších výsledků lze dosáhnout s pomocí indexů odvozených pro vlnovou délku kolem 700 nm (Sims a Gamon 2002).

K zjištění obsahu chlorofylu byly vyvinuty 3 základní indexy, a těmi jsou SR, ND a indexy červeného okraje. Pro klasický index NDVI je typické rozhraní vlnových délek 680-800 nm. Výpočet je založen na poměru součtu a odečtu jednotlivých reflektancí ve stanovených vlnových délkách. Index červeného okraje je založen na vlnové délce přechodu/zlomu bodu mezi nízkou reflektancí v oblasti RED a vysokou reflektancí v oblasti NIR (Sims a Gamon 2002).

Modifikovaný index mNDVI je založen na poměru rozdílu reflektancí a součtu reflektancí v oblasti RED a NIR pásma elektromagnetického záření v nabývající hodnotou mezi 0,1-10 (Skianis et al. 2009).

Tabulka 5 – Vzorec pro vegetační index spojený s výpočtem obsahu chlorofylu ve vegetaci (Index DataBase 2023)

Modifikovaný vegetační index NDVI spojený s obsahem chlorofylu ve vegetaci	
Název indexu	Vzorec indexu
mNDVI=	$\frac{800\text{nm}-680\text{nm}}{800\text{nm}+680\text{nm}-2445\text{nm}}$

4.6 Laboratorní měření a stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů

Obsah fotosyntetických pigmentů, tedy chlorofylu *a* a *b* a celkové množství karotenoidů a xantofylů, byl stanoven spektrofotometrickou metodou za použití chemické látky dimethylamid kyseliny mravenčí (DMF) a přístroje spektrofotometru DR 6000 UV-VIS s technologií RFID.

Tento postup stanovení obsahu chlorofylu patří mezi destruktivní metody, kdy je třeba uchovat vzorky sesbírané v terénu v co nejlepším stavu pro následnou analýzu. Vzorky, které byly použity pro extrakci chlorofylu za pomoci chemických rozpouštědel již nelze dále využít na rozdíl od získání dat o obsahu chlorofylu na základě hyperspektrální reflektance (Liu et al. 2019).

4.6.1 Dimethylamid kyseliny mravenčí

DMF, nebo také dimethylformamid, je toxická organická sloučenina patřící do skupiny formamidů, v níž jsou aminovodíky nahrazeny methylovými skupinami. Je výborným polárním rozpouštědlem (Muzart 2009).

Tato sloučenina je dobře mísitelná s vodou a většinou organických kapalin, avšak je těkavá. Je charakterizována jako bezbarvá kapalina aminovitého zápachu. Patří mezi polární aprotická rozpouštědla s vysokým bodem varu (152,5-153,5 °C) a bodem tání při -61 °C, pH se pohybuje při 20 °C v rozmezí 6-8, bod vzplanutí DMF je 58 °C. DMF je dobře rozpustný ve vodě (Lach-Ner, s.r.o 2022).

4.6.2 Spektrofotometr DR 6000 UV-VIS s technologií RFID

Spektrofotometr je přístroj, který funguje na principu digitálního odečtu hodnot absorpance či koncentrací specifických látek v určitých vlnových délkách. Vlnové délky se

pohybují v rozsahu 190–1100 nm (dostačující rozmezí pro odečty absorbancí rostlin) a přístroj je schopen naměřit hodnoty s přesností vlnových délek ± 1 nm s šířkou spektrálního pásma 2 nm. Viditelné spektrum vlnových délek je pokryto halogenovou lampou a UV spektrum je zajištěno deuteriovou lampou s fotometrickým měřícím rozmezím 200-900 nm (Hach Company 2021). Pro měření hodnot vzorků borovice byla využita halogenová lampa ve vlnových délkách 480, 647, 664 a 750 nm. Před samotným měřením je třeba vyzkoušet na přístroji tzv. referenční vzorek (kyveta naplněná samotným rozpouštědlem bez vzorku) pro získání reálných absorpčních hodnot vzorků. Po proniknutí paprsku světla vzorkem je světlo za pomoci detektoru převedeno na elektronický čitelný signál (Tom 2021).



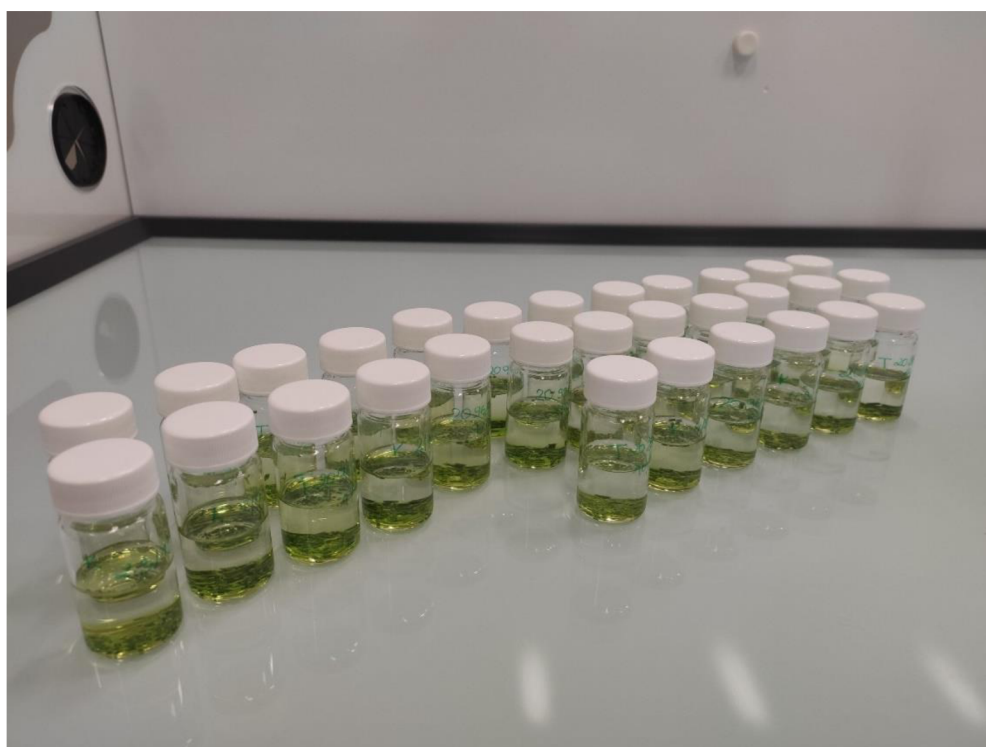
Obrázek 13 – Spektrofotometr DR 6000 (Řehořová 2022)

4.6.3 Postup extrakce fotosyntetických pigmentů

Prvním krokem pro extrakci byla příprava vzorků. Jednotlivé vzorky borovic byly uchovány v hluboko mrazícím boxu; po jejich vyjmutí bylo nejprve třeba nakrájet několik jehlic ze svazečku vzorku na velikost přibližně 5x5 mm, avšak čím menší velikost, tím se lépe extrahovaly. Vzorky nebylo třeba homogenizovat. Takto připravené vzorky jehlic se vložily do označených skleněných lahviček s teflonovým víčkem a navážily se na digitální laboratorní váze na požadovanou čerstvou hmotnost 0,1 g. Každá lahvička se vzorkem se

poté vzhledem k toxicitě výparů DMF naplnila v digestoři objemem 10 ml této sloučeniny a uložila do chladicího boxu. Vzorky bylo nutné uchovat po dobu 7 dnů v chladícím boxu při 4° C a zakryté, aby se zamezilo přístupu světla během extrakce. Extrahovaný materiál, tedy jehlice, postupně bělaly – v takovém případě došlo k úplné extrakci vzorku.

Po 7 dnech extrahování se přistoupilo k naměření absorbancí fotosyntetických pigmentů ve vzorcích. Nejprve bylo třeba provést na spektrofotometru kalibraci nulové absorbance za použití čistého DMF, který se vložil do skleněné kyvety. Po dokončení kalibrace se pomocí pipety ze vzorku odebralo 2 ml extrahované tekutiny, která se následně nalila do skleněné kyvety. Poté se kyveta s tekutinou vložila do spektrofotometru, který naměřil absorbanci ve vlnových délkách 480, 647, 664 a 750 nm. Naměřené hodnoty ve vlnových délkách 480, 647 a 664 nm nesměly přesáhnout hodnotu 1; hodnoty vlnové délky 750 nm poté nesměly přesáhnout hodnotu 0,006; v případě, že hodnota byla vyšší, extrakt tekutiny a vzorků se zředil čistým DMF a poměr se zaznamenal pro následný přepočít.



Obrázek 14 - Vzorky jehlic naložené v DMF připravené k týdenní extrakci (Řehořová 2022)

4.6.4 Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů

V Tabulce 6 jsou znázorněny použité výpočty koncentrace fotosyntetických pigmentů dle Wellburna (1994). V případě dosazovaných absorbancí do jednotlivých rovnic se již jedná

o upravené absorbance ve vlnové délce 750 nm, tedy v praxi je třeba od každé naměřené absorbance (480 nm, 647 nm a 664 nm) odečíst právě tu ve vlnové délce 750 nm. Teprve poté je možné hodnotu absorbance dosadit do vzorce.

Následně je stanovená hodnota z $\mu\text{g/ml}$ přepočtena na $\mu\text{g/g}$ – při přepočtu vstupují do rovnice čerstvá hmotnost vzorku a také objem rozpouštědla použitého k extrakci jehlic. V případě, že bylo nutné vzorek ředit čistým DMF z důvodu špatné extrakce vzorku a následného neprokazatelného měření absorpce, při přepočtu hodnot na $\mu\text{g/g}$ se navýšený objem rozpouštědla rovněž započítá.

4.6.4.1 Statistické zhodnocení obsahu fotosyntetických pigmentů

Při stanovení konečného výsledku obsahu fotosyntetických pigmentů byl využit statistický kategoriální program ANOVA v softwarovém programu Statistica (TIBCO Software Inc.). Proměnnými znaky zde byly jednotlivé pigmenty a kategoriemi (faktory) poté treatment (varianty) a lokality, ze které pocházely měřené vzorky. Byl určena hladina spolehlivosti na úrovni 95 %. Před samotným měřením byla data testována na homogenitu rozptylu a na normalitu. Pro post-hoc porovnání byl poté využit Fisherův LSD test.

Tabulka 6 – Přehled rovnic pro výpočet jednotlivých fotosyntetických pigmentů (Wellburn 1994)

Jednotlivé rovnice vedoucí k výpočtu obsahu fotosyntetických pigmentů
Výpočet koncentrace chlorofylu <i>a</i> byl stanoven dle rovnice: $Ch_a = 11,65 * A_{664} - 2,69 * A_{647} (\mu\text{g/ml})$
Výpočet koncentrace chlorofylu <i>b</i> byl stanoven dle rovnice: $Ch_b = 20,81 * A_{647} - 4,53 * A_{664} (\mu\text{g/ml})$
Výpočet celkové koncentrace karotenoidů a xantofylů byl stanoven dle rovnice: $c(x + c) = (1000 * A_{480} - 0,89 C_a - 52,02 * C_b) / 245 (\mu\text{g/ml})$

5 Výsledky

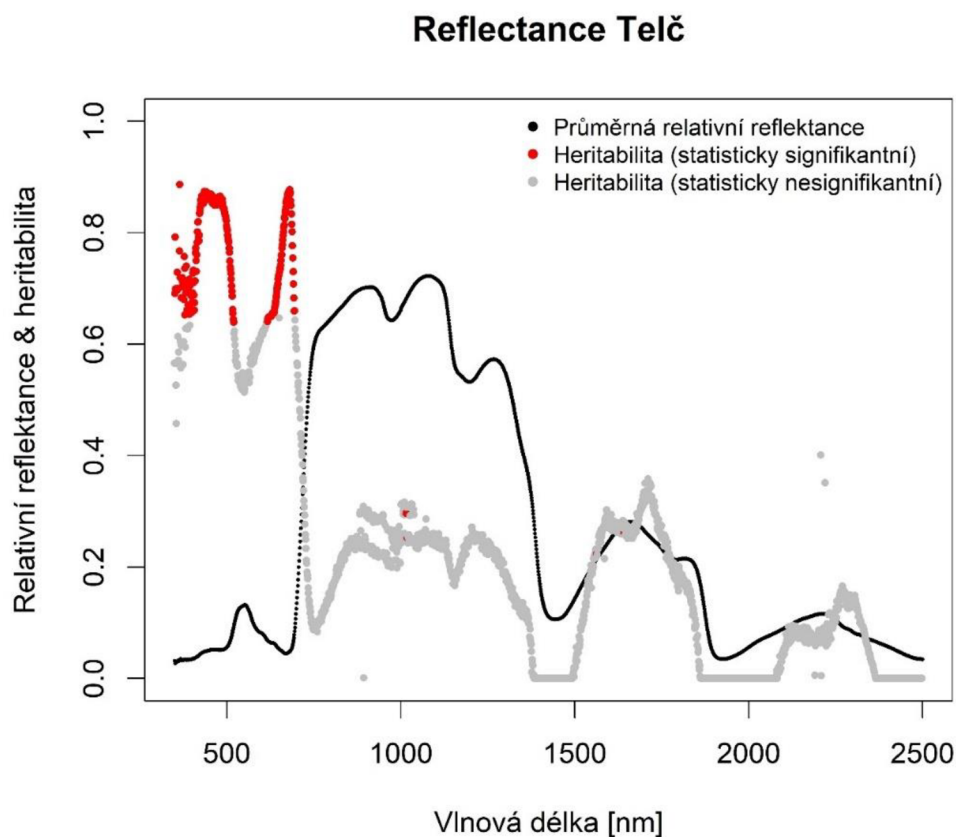
V rámci zhodnocených výsledků hyperspektrální reflektance byly porovnávány vzorky z každé testovací plochy a poté samotné testovací plochy mezi sebou včetně rozdílnosti ekotypů. Vzorky byly hodnoceny v softwarovém programu R, odkud byly převzaty výstupy dat ve formě grafů. V rámci srovnání byla data dobře interpretovatelná v případě testovací plochy Telč, přičemž na testovací ploše Svitavy data nebyla statisticky signifikantní. Více průkazné byly sledované rozdíly v případě, že byla porovnávána měření z obou testovacích ploch souborně.

Vegetační index mNDVI se vztahoval na zjištěná data z hyperspektrální reflektance jednotlivých vzorků a kontrolních vzorků.

Obsah fotosyntetických pigmentů byl porovnáván v rámci jednotlivých ploch, ale i mezi plochami. Grafické výstupy byly převzaty ze softwarového programu Statistica v rámci použité faktoriální analýzy ANOVA.

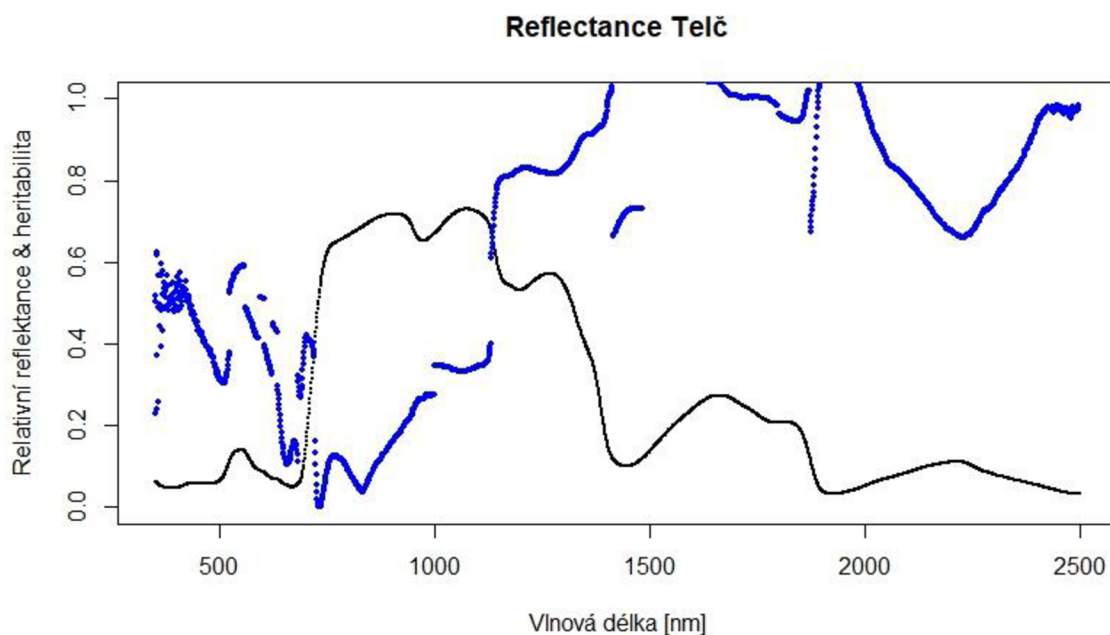
5.1 Hyperspektrální analýza dat

5.1.1 Spektrální reflektance testovací plochy Telč – 2021 a 2022



Obrázek 15 - Průměrná relativní spektrální reflektance a signifikantní heritabilita vzorků na testovací ploše Telč (2021)

Obrázek 15 zobrazuje graf s průměrnou relativní reflektancí vzorků jehlic (černá křivka) a signifikantní heritabilitu (h^2) (červená křivka) odhadnutou pro populaci vzorků odebraných na testovací ploše Telč v roce 2021. Naměřené hodnoty reflektance se pohybují ve vlnové délce 400–2500 nm. Statisticky signifikantní hodnoty heritability jsou lokalizovány v pásmu viditelného spektra elektromagnetického záření ve vlnových délkách okolo 500 nm a poté okolo 700 nm, tedy v oblasti red edge, která odpovídá nejvyšší naměřené hodnotě heritability (téměř 0,9). Od místa REIP poté dochází ke značnému poklesu jejích hodnot v oblasti NIR (odrazivost vegetace) a SWIR (odrazivost vody, proteinů atd.); heritabilita je zde již nesignifikantní. Signifikantní heritabilita odpovídá spektru modrého a červeného viditelného záření, tedy místům nejvyšší absorpce záření chlorofyly.

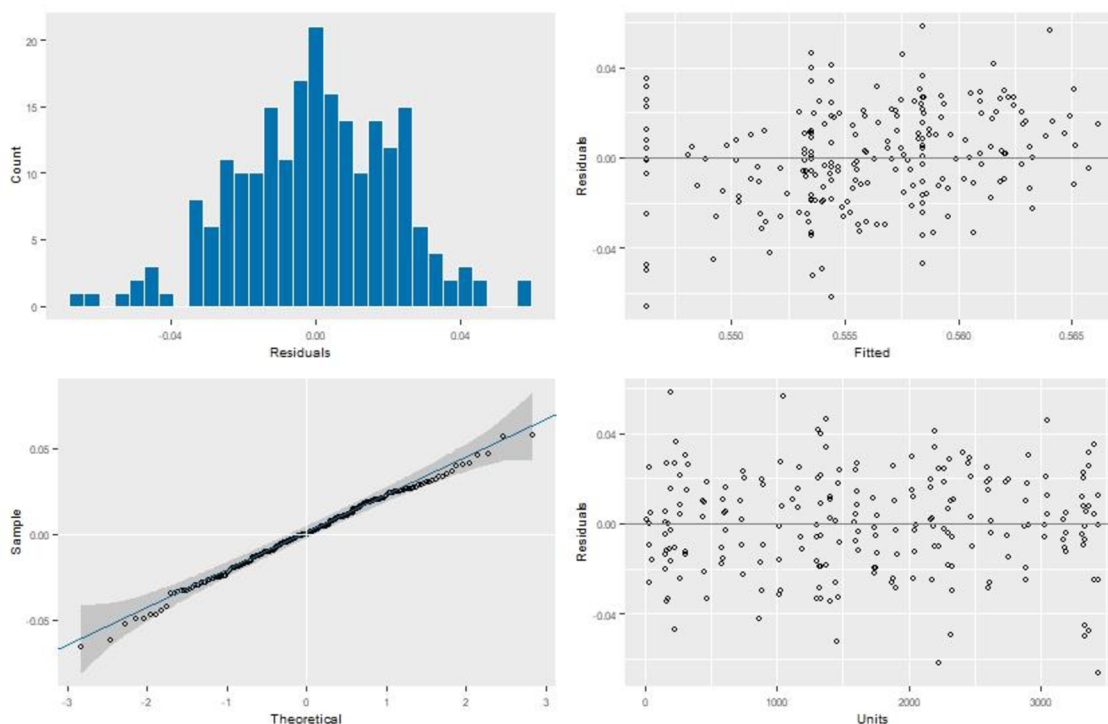


Obrázek 16 – Průměrná relativní spektrální reflektance (černá křivka) a heritabilita (modrá křivka) vzorků na testovací ploše Telč (2022)

Na dalším grafu (Obrázek 16) jsou zobrazeny hodnoty průměrné relativní spektrální reflektance spolu s hodnotami heritability, avšak ze vzorků odebraných v roce 2022 na testovací ploše Telč. Odebírány byly pro laboratorní měření hyperspektrální reflektance identické vzorky jako v roce 2021. Vyšší hodnoty heritability (okolo 0,6) byly naměřeny v oblasti viditelného spektra záření v rozmezí 400–450 nm, avšak v tomto místě a také v oblasti spektra vlnové délky okolo 2500 nm, kde se hodnota heritability přibližuje 1, je možné si povšimnout shluků měřených spekter. Takové naměřené hodnoty nelze klasifikovat jako signifikantní hodnoty heritability. Oproti grafu spektrální reflektance vzorků z roku 2021 jsou nejvyšší hodnoty naměřeny v oblasti SWIR a MWIR (mediumwave-infrared reflectance). V oblasti 1500-2000 nm byly naměřeny hodnoty heritability okolo 1. Některá spektra vykazovala hodnoty i vyšší než 1, kde již nebylo možné v rámci grafu tyto hodnoty zanechat. V oblastech, kde křivka vykazuje nespojená místa, spolu spektra koreluje.

Výkyvy v podobě příliš vysokých neměřitelných hodnot heritability a shlukům spekter si lze vysvětlit působením mnoha možných nepříznivých faktorů na vzorky – např. heterogenní prostředí, vliv klimatických podmínek na odebírané vzorky na dané ploše (výkyvy teplot, nedostatečné množství srážek daný rok; obsah vody v jehličí rovněž ovlivňuje variabilitu reflektance vzorků), příliš malý soubor vstupních dat aj.

Je zde však vidět společný trend, který křivka vykazuje na obou grafech. Vyšší hodnoty heritability jsou naměřeny v oblasti viditelného spektra záření v místech, kde dochází k nejvyšším absorpcím záření chlorofyly.



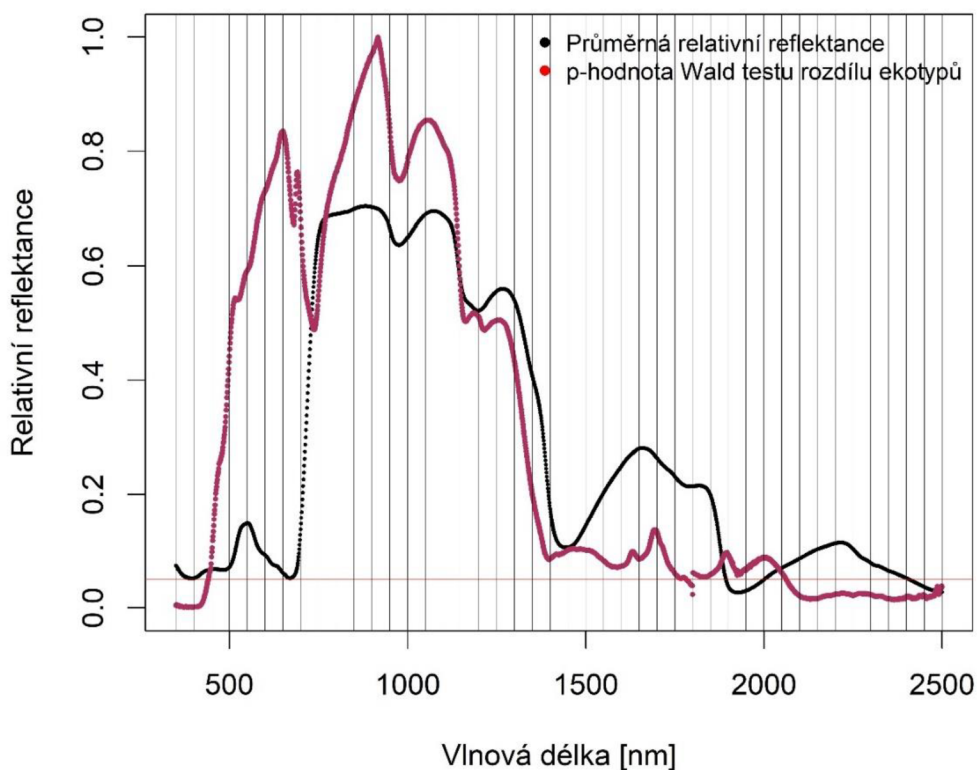
Obrázek 17 - Diagnostika modelu pro hodnoty ve vlnové délce 1250 nm

Grafy na Obrázku 17 zobrazují diagnostiku modelu užitého v programu R při vlnové délce 1250 nm. Vlevo dole je zobrazen tzv. QQplot s 95% úrovní intervalu spolehlivosti zobrazenou v oblasti tmavě šedé zóny kolem přímky, přičemž data jsou s lineární přímkou velmi soudržná. Nejsou platné žádné odlehle hodnoty.

Vlevo nahoře je zobrazen histogram residuí, která vykazují normální rozdělení, opět s úrovní intervalu spolehlivosti 95 %. Patrná je zde homogenita dat, kterou je možné zaznamenat v rámci QQplotu.

Grafy vpravo vykazují rozdílnost rozptylů měřených dat. Čím blíže jsou naměřené vzorky k ose zobrazující hodnotou 0, tím méně jsou porovnávány veličiny navzájem závislé. Tato diagnostika jasně ukazuje, že je oprávněné u většiny naměřených spektrálních dat použít smíšené lineární modely a standardní metody parametrické statistiky.

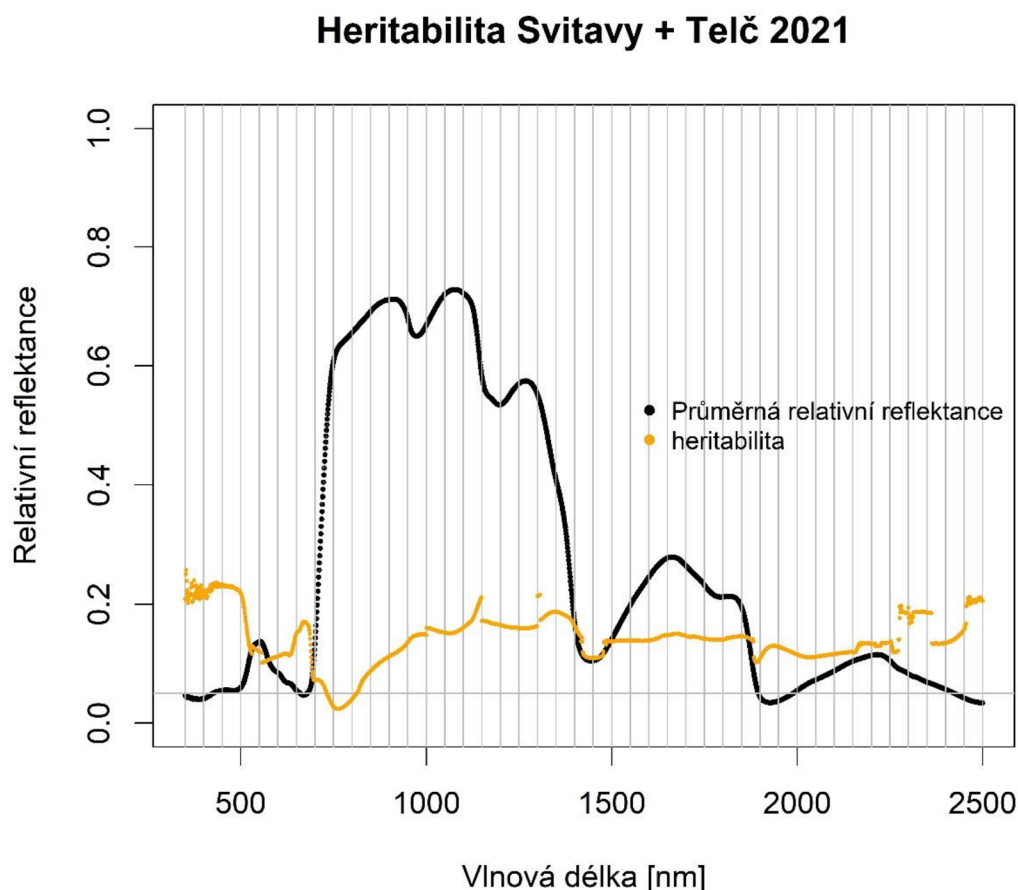
Reflektance Telč 2022



Obrázek 18 - Průměrná relativní reflektance a p -hodnota Wald testu rozdílu ekotypů testovací plochy Telč (2022)

Na grafu (Obrázek 18) je promítnuta průměrná relativní spektrální reflektance (černá křivka) vzorků na testovací ploše Telč odebraných v roce 2022 v porovnání s p -hodnotou Wald testu porovnávaných reflektancí dvou ekotypů (náhorní a pahorkatinný) na ploše Telč (červená křivka). Statisticky významné hodnoty křivky p -hodnot, kde zvolenou hodnotu $p=0,05$ představuje v grafu červená přímková čára, lze pozorovat v oblasti viditelného spektra záření kolem 400 nm a poté v rozmezí 2100-2500 nm, kde se červená křivka dostává pod oblast hodnoty p ; zde jsou statisticky významné rozdíly porovnávaných ekotypů. Nejvyšších hodnot, tedy statisticky nesignifikantních pro porovnání ekotypů, dosahuje červená křivka v oblasti NIR (až hodnoty 1) a rovněž v oblasti viditelného spektra záření a prudce klesá za dosaženým REIP. V rozmezích vlnových délek 1400-2100 nm se křivka alespoň přibližuje hodnotě p .

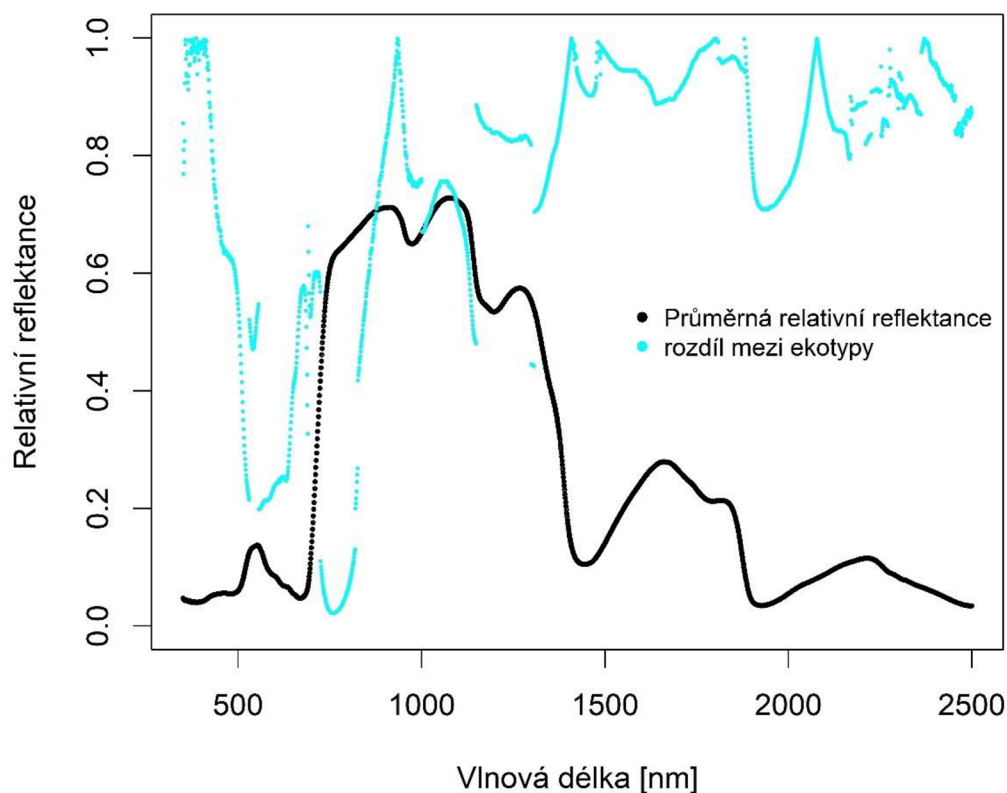
5.1.2 Porovnání testovacích ploch Telč a Svitavy z hlediska reflektance v roce 2021



Obrázek 19 – Průměrné relativní reflektance a heritabilita vzorků testovacích ploch Svitavy a Telč (2021)

Na grafu (Obrázek 19) je zobrazena průměrná relativní reflektance (černá křivka) vzorků z obou testovacích ploch Svitavy a Telč spolu s naměřenou heritabilitou (žlutá křivka). V jediném místě, kde se žlutá křivka dostává pod hladinu p je v oblasti 750 nm, již v pásmu NIR. Lze předpokládat, že heritabilita není signifikantní – to znamená, že v konkrétních spektrech se nalézají velmi nízká genetická variabilita pro daný vzorek populace. Na začátku grafu ve viditelném spektru elektromagnetického záření kolem 400 nm je opět vidět shluk reflektancí vzorků obou ploch, kde je hodnota heritability nejvyšší. Toto je však nejpravděpodobněji způsobeno větší chybovostí měření v těchto regionech.

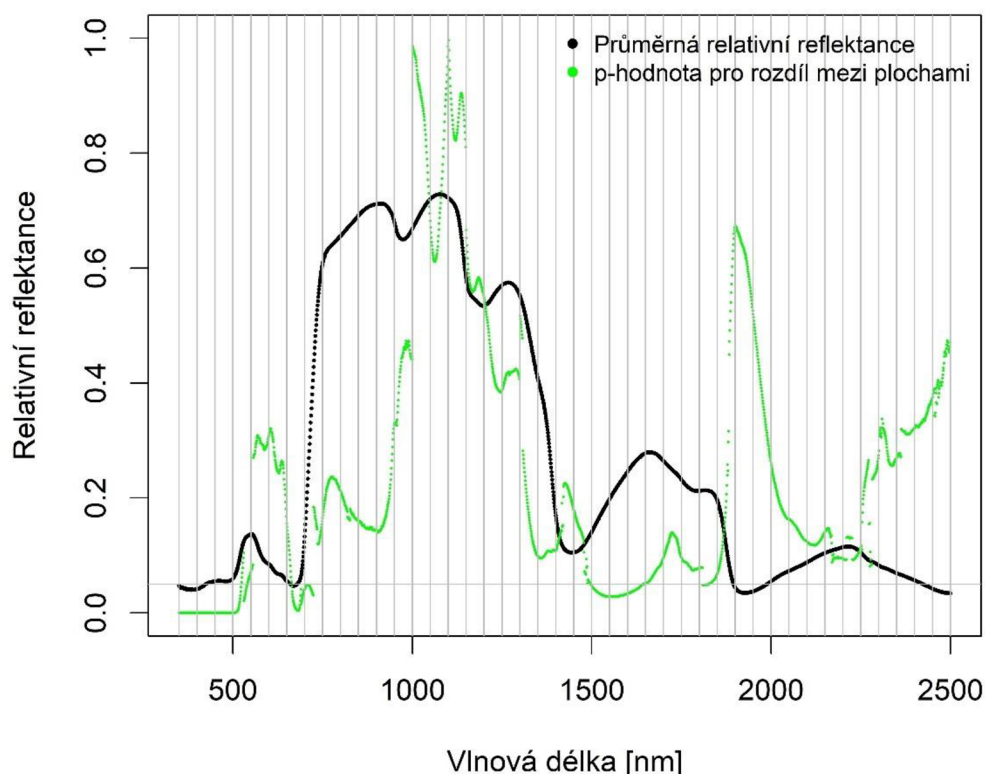
Rozdíl mezi ekotypy, Svitavy + Telč 2021



Obrázek 20 - Průměrná spektrální reflektance a rozdíly reflektance mezi jednotlivými ekotypy obou testovacích ploch (2021)

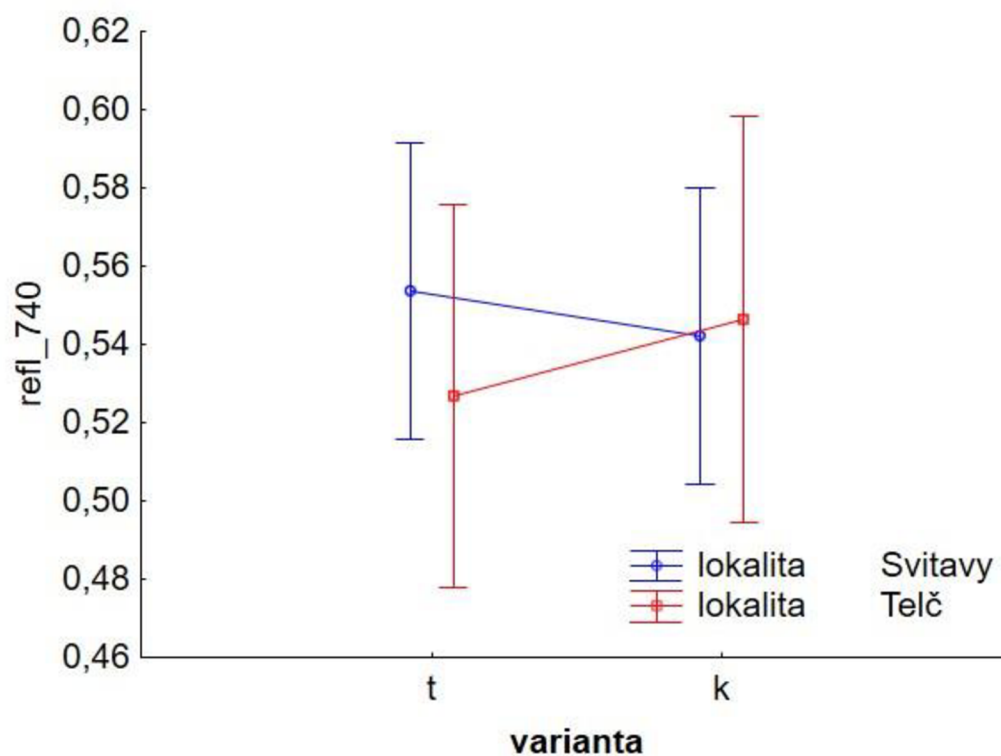
Na Obrázku 20 je znázorněn graf porovnávající rozdíly reflektancí jednotlivých ekotypů v rámci odebraných vzorků v roce 2021 z obou testovacích ploch. Opět je zde vynesena černá křivka znázorňující průměrnou relativní reflektanci ploch a modrá křivka znázorňuje právě rozdíly mezi ekotypy. Statisticky signifikantní rozdíly v ekotypech mezi plochami byly naměřeny v oblasti red edge po dosažení REIP a na začátku oblasti spektra NIR, kde modře znázorněná p-hodnota rozdílu mezi ekotypy klesá k hodnotě 0,05.

Reflektance 2021 - rozdíly mezi plochami



Obrázek 21 - Průměrná spektrální reflektance a p -hodnota rozdílů reflektancí mezi jednotlivými testovacími plochami (2021)

Na posledním grafu (Obrázek 21) je znázorněno porovnání reflektancí mezi jednotlivými plochami Svitavy a Telč za rok 2021. Opět je zde vynesena křivka průměrné relativní reflektance vzorků (černá křivka); zelená křivka je tvořena p -hodnotami porovnávající reflektanci vzorků z obou ploch. Vodorovná šedá přímka vyjadřuje hodnotu $p=0,05$. Statisticky významný rozdíl mezi plochami je možné pozorovat v oblasti viditelného spektra záření v rozmezí 400-550 nm a 650-720 nm (oblast absorpce záření chlorofyly). V pásmu NIR dosahuje reflektance vysokých hodnot (téměř 1). V místě, kde je délka vlnového záření na úrovni 1500 nm opět křivka klesá pod hodnotu $p=0,05$, tedy i zde je vidět významný rozdíl v reflektancích mezi plochami. Od 1500 nm křivka roste a hodnotě 0,05 se přibližuje či na ní přímo leží až v oblasti SWIR v rozmezí 1650-1800 nm.



Obrázek 22 – Porovnání naměřených reflektancí vzorků (t) a kontrolních vzorků (k) ve vlnové délce 740 nm testovacích ploch Telč a Svitavy

Na obrázku 22 je znázorněna reflektance vzorků (t) a kontrolních vzorků (k) z obou testovacích ploch při vlnové délce 740 nm. Tento graf byl získán ze statistického softwaru Statistica v rámci faktoriální analýzy ANOVA. Výsledné hodnoty nevykazují statisticky signifikantní rozdíly mezi vzorky a kontrolními vzorky v rámci samostatných ploch, avšak na ploše Telč vykazují vyšší hodnoty reflektancí kontrolní vzorky, zatímco u lokality Svitavy je tomu naopak. Významné rozlišení je znázorněno při porovnání vzorků a kontrolních vzorků souhrnně z obou ploch.

5.2 Stanovení vegetačního indexu mNDVI

Tabulka 7 – Hodnoty indexu mNDVI na lokalitě Telč

Lokalita - Telč	
Hodnoty mNDVI	
Kontrola	Treatment
8,94E-01	9,22E-01
9,10E-01	9,26E-01
9,15E-01	9,33E-01
9,34E-01	9,17E-01
9,55E-01	9,14E-01
9,28E-01	9,28E-01
1,08E+00	9,51E-01

Tabulka 8 – Hodnoty indexu mNDVI na lokalitě Svitavy

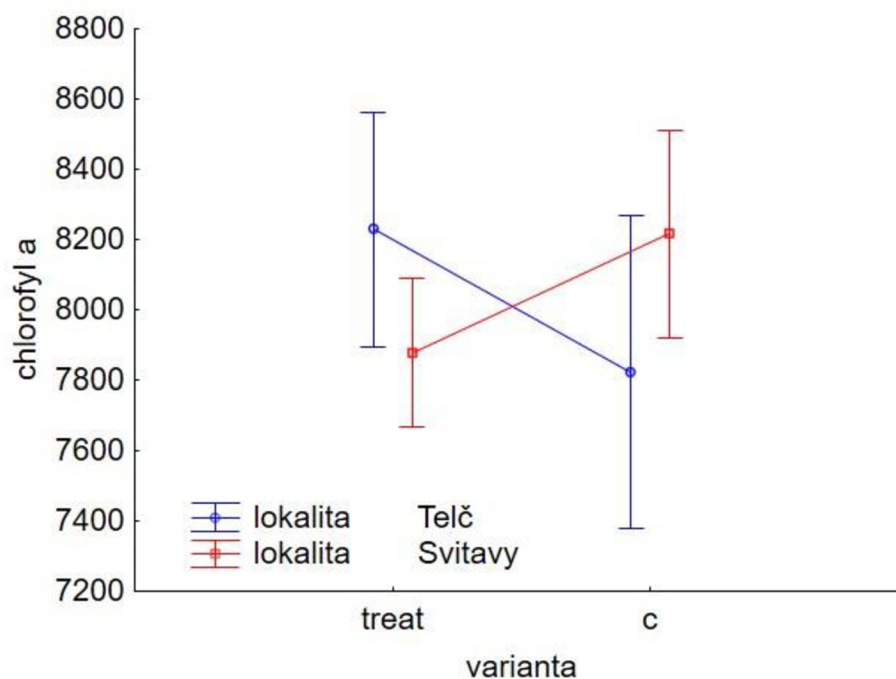
Lokalita - Svitavy	
Kontrola	Treatment
9,38E-01	9,31E-01
9,53E-01	8,96E-01
9,09E-01	9,00E-01
9,18E-01	8,75E-01
9,25E-01	8,80E-01
9,38E-01	9,17E-01
9,28E-01	8,80E-01

Tabulka 9 – Průměr a směrodatná odchylka hodnot mNDVI v rámci ploch Telč a Svitavy

Lokalita	mNDVI	
	Telč	Svitavy
Průměr	9,36E-01	9,06E-01
Směrodatní odchylka	0,043704	0,021538671

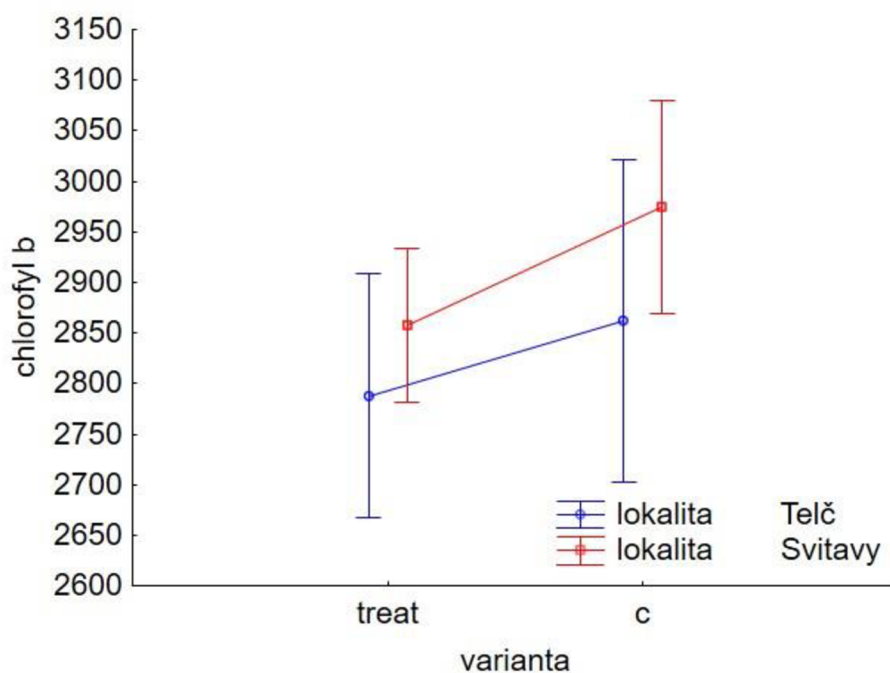
Výsledné hodnoty indexu mNDVI v rámci samostatných ploch i v rámci porovnání ploch mezi sebou nevykazují žádné signifikantní rozdíly. Srovnání průměrných hodnot mezi plochami rovněž neodpovídá výrazným variabilitám.

5.3 Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů



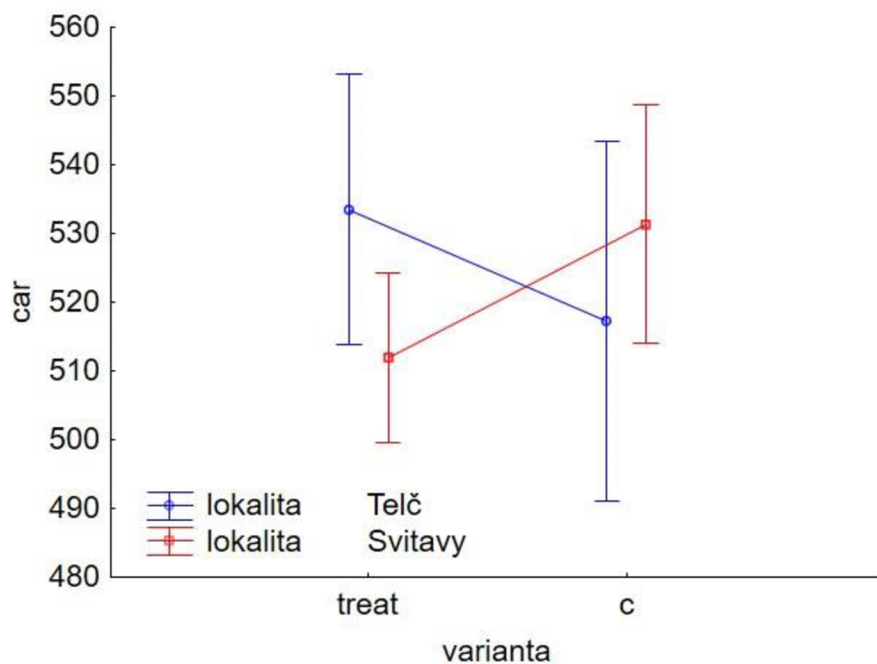
Obrázek 23 – Porovnání obsahu chlorofylu *a* (µg/g) ve vzorcích (treatments) a kontrolních vzorcích (c) na testovacích plochách Telč a Svitavy (2021)

Na grafu (Obrázek 23) je znázorněno porovnání obsahu chlorofylu *a* ve vzorcích (treatments – náhorní ekotyp) a v kontrolních vzorcích (c – pahorkatinný ekotyp) obou testovacích ploch (Telč – modrá úsečka a Svitavy – červená úsečka), i v rámci každé plochy zvlášť. Rozdíly obou ploch byly hodnoceny na hladině významnosti $p=0,05$. Z grafu vyplývá, že u zjištěných hodnoty obsahu fotosyntetických pigmentů nebyly nalezeny žádné signifikantní rozdíly v porovnání vzorků a kontrolních vzorků v rámci jedné testovací plochy. Avšak při porovnání vzorků a kontrolních vzorků při uvažování obou ploch jsou patrné signifikantní rozdíly. Překvapivý je rovněž vyšší obsah chlorofylů u kontrolních vzorků na obou plochách.



Obrázek 24 - Porovnání obsahu chlorofylu *b* (µg/g) ve vzorcích (treatments) a kontrolních vzorkách (c) na testovacích plochách Telč a Svitavy (2021)

Na dalším grafu (Obrázek 24) je porovnáván obsah chlorofylu *b* ve vzorcích (treatments – náhorní ekotyp) a v kontrolních vzorcích (c – pahorkatinný ekotyp) obou testovacích ploch Telč (modrá úsečka) a Svitavy (červená úsečka), i v rámci každé plochy zvlášť. Rozdíly obou ploch byly hodnoceny na hladině významnosti $p=0,05$. Z grafu lze rovněž vyhodnotit, že u zjištěných hodnot obsahu fotosyntetických pigmentů nebyly nalezeny žádné signifikantní rozdíly v porovnání vzorků a kontrolních vzorků v rámci jedné testovací plochy. Avšak při porovnání vzorků a kontrolních vzorků při uvažování obou ploch jsou patrné signifikantní rozdíly. Vyšší obsah chlorofylů je zde opět nalezen u kontrolních vzorků.



Obrázek 25 - Porovnání obsahu karotenoidů ($\mu\text{g/g}$) ve vzorcích (treatments) a kontrolních vzorkách (c) na testovacích plochách Telč a Svitavy (2021)

Obsah karotenoidů vykázal ze všech hodnocených pigmentů nejvyšší rozdíly v obsahu mezi jednotlivými plochami. Opět je uvažována zvolená hladina spolehlivosti 95 %. Na rozdíl od chlorofylů se vyšší hodnoty prokázaly u treatments v rámci testovací plochy Telč, avšak na lokalitě Svitavy je stále stejný trend, tedy vyšší hodnoty obsahu pigmentů u kontrolních vzorků (c).

6 Diskuze

6.1 Porovnání hyperspektrálních dat

Provedená hyperspektrální analýza dat z testovacích ploch Svitavy a Telč poukázala na signifikantní rozdílnost v případě porovnávání naměřených dat mezi oběma plochami. Tento výsledek byl dán větším souborem hodnocených dat po spojení měřených vzorků právě z obou ploch do jednoho hodnoceného souboru. Statisticky signifikantní hodnoty heritability byly rovněž naměřeny v rámci plochy Telč z dat odebraných v roce 2021. Rozdílnost heritability mezi grafy z plochy Telč v rozmezí let 2021 a 2022 vykazuje jistý trend podobnosti vyšších hodnot heritability v oblasti viditelného spektra záření, kde dochází k absorpci energie fotosyntetickými pigmenty – chlorofyly. Graf s daty z roku 2022

vykazuje neměřitelné a nesignifikantní hodnoty, jak bylo uvedeno ve výsledcích. Faktorů, které by mohly zapříčinit shluky spekter a hodnoty heritability vykazující 1 a více, existuje celá řada. Jedním z nich může být heterogenita prostředí – jak již bylo zmíněno v kapitole 3.7, že dle Cornelia (1994) homogenní prostředí vykazuje přesnější a vyšší hodnoty heritability. Dalším faktorem, který by mohl ovlivnit naměřená data, je nedostatečně velký soubor hodnocených dat, což také zmiňoval Cornelius (1994) v přezkoumání experimentů u dřevin pro odhad heritability. Za neprokazatelným měření reflektancí může stát i rozdílnost v klimatických podmínkách a v úhrnu srážek za daný rok.

Výzkum, který provedli Wang a Sousa (2009) na mangrovnících v oblasti panamského pobřeží s využitím hyperspektrálních dat za účelem posouzení zdravotního stavu vegetace porovnal zdravou vegetaci a stresovanou vegetaci. V oblasti pásma odrazivosti NIR a SWIR, nejlépe poté ve vlnových délkách 780-800 nm a 1480-1550 nm, prokázala měření reflektance signifikantní rozdíly mezi stresovanou vegetací a zdravou vegetací (Wang a Sousa 2009). Hyperspektrální data tedy průkazně vykazují rozdíly mezi odrazivostí v případě výskytu stresových faktorů. Je tedy možné uvažovat, že signifikantní rozdíly reflektancí mezi plochami v oblasti NIR mohou znamenat např. rozdílnost ploch v rámci klimatických podmínek či půdních podmínek.

Mezi plochami Telč a Svitavy jsou také zřejmé rozdíly v míře zabuřnění, a také byl pozorován větší vliv sousedící porostní stěny na ploše Svitavy spojený s vyšší lokální mortalitou.

Statisticky signifikantní rozdílnost reflektancí mezi jednotlivými testovacími plochami byla zaznamenána v oblasti pásma red edge (REIP) a NIR. Je zde patrná úzká korelace mezi hladinou obsahu chlorofylů v měřených vzorcích a oblastí REIP. To může úzce souviset právě s absorpcí elektromagnetického záření chlorofyly v tomto bodě. REIP je tedy možné označit za citlivý indikátor pro faktory prostředí, které mohou ovlivňovat hladinu chlorofylů – stres z nedostatku vody/stres ze sucha aj. (Baranoski a Rokne 2005). Avšak z některých grafů je rovněž možné vyčíst, že statisticky nesignifikantní rozdíly mezi plochami, ale i v rámci jedné plochy, jsou zaznamenány v oblastech, kde dosahuje chlorofyl nejvyšší absorpce záření, především v oblasti kolem 720 nm.

V terénním experimentu naměřili Čepl et al. 2018 signifikantní hodnoty heritability reflektancí u vzorků jehlic borovice lesní v oblasti red edge. Naopak statisticky nesignifikantní heritabilita byla naměřena v oblasti viditelného spektra záření, kde dochází k absorpci záření chlorofyly a v oblasti zeleného spektra dosahovala heritabilita zvýšených

hodnot, avšak ne tak výrazných, jako u pásma NIR a dále. Nižší naměřené hodnoty v oblasti viditelného spektra přisuzují možnému pohybu a překrytí níže uložených chloroplastů s chlorofyly, které se nachází blíže povrchu jehlic, a tím tedy dochází k pozměnění odrazivosti a možnému zkreslení spektrální křivky odrazivosti – avšak tento jev byl popsán prozatím pouze u listnatých dřevin (Čepl et al. 2018; Momayyezi a Guy 2017). Vyhodnocené grafy v této diplomové práci s vynesenu heritabilitou v rámci plochy Telč a rovněž mezi plochami nenesou trend se signifikantními hodnotami heritability ve stejných oblastech spektra vlnových délek jako u výše popsaného experimentu.

V rámci analyzování dat z testovací plochy Svitavy nebyla neprokázána statisticky významná rozdílnost mezi ekotypy, proti našim očekáváním. Pravděpodobně meziroční srovnání naměřených dat ukázalo významné rozdíly a velikost hodnoceného souboru ovlivňuje i větší pravděpodobnost chyby („sampling error“).

6.2 Zhodnocení indexu mNDVI

Výsledné hodnoty indexu mNDVI nevykazovaly signifikantní rozdíly mezi plochami ani v rámci jedné plochy mezi vzorky a kontrolními vzorky. Index vycházel z naměřených hodnot hyperspektrálních reflektancí každého vzorku, avšak navzdory signifikantním hodnotám reflektancí mezi plochami z oblasti red edge zde takové hodnoty index nevykazoval.

Sonobe a Wang (2017) využili hyperspektrálních indexů k zhodnocení obsahu chlorofylů *a* v rámci listnatého lesa chladné temporální oblasti na dvou lokalitách Japonska. Odebrané vzorky náležely dřevinám jako je buk, javor, habr aj. Za užití derivačně upravených hyperspektrálních indexů NDVI a SR, tedy dND a dSR, experiment ukázal, že nejprůkaznější hodnoty byly zjištěny v oblasti red edge (Sonobe a Wang 2017).

Deepak et al. (2020) prokázali ve studii zabývající se hodnocením variací spektrální odrazivosti listů a dalších znaků u 12 genotypů břízy bělokoré (*Betula pendula*) ve 3 proveniencích v rámci Finska, že obsah chlorofylů souvisí s hodnocenými indexy NDVI a CRI (Chlorophyll Reflectance Index). Spektrální odrazivost byla hodnocena v oblasti 400-2500 nm. Největší rozdíl mezi proveniencemi byl zaznamenán na spektrální křivce odrazivosti v oblasti red edge. Rovněž našli rozdíly v obsahu chlorofylů v rámci posuzované sezóny detekované v oblasti red edge v souvislosti na výsledných indexech v rámci

hodnoceného období, kdy docházelo ke zvyšování či snižování obsahu chlorofylů v listech (Deepak et al. 2020).

Studii hodnotící potenciál využití vegetačních indexů spektrální odrazivosti publikoval např. Lozada et al. (2020) za účelem predikce potenciálu výnosu a genetického zisku u ozimé přesnice. Indexy, které k tomu využil, byly NDVI, SR, NWI (Normalized Water Index) a NDRE (Normalized Difference Red Edge). Všechny tyto indexy lze použít k hodnocení korelujících znaků plodin spojených s výnosem a produkcí – mezi hodnocené znaky patřil např. stav vegetace a obsah vody. Z vyhodnocení výsledků vyplynuly pozitivní genetické korelace u indexů NDVI, SR a NDRE, zatímco negativní korelace se vyskytly u NWI, který vykazoval vyšší hodnoty, což pravděpodobně způsobil stres z nedostatku vody u konkrétních linií přenice. Index NDRE, který se hodnotí na základě reflektance v oblasti red edge vykázal nejvyšší pozitivní genetické korelace (Lozada et al. 2020). Další studii provedl Dong et al. (2015) a rovněž se mu potvrdila nejvyšší korelace u modifikovaného indexu SR v oblasti red edge. Také potvrdil, že indexy v oblasti red edge vykazují odolnost vůči vlivu pokryvu okolní vegetace (Dong et al. 2015). Avšak Chen (1996) uvedl, že jím hodnocené indexy z oblasti red edge mají zároveň nízkou citlivost k nadzemní vegetaci. Je tedy možné potvrdit, že existuje jistý trend, kdy v oblasti red edge jsou vykazovány vysoké hodnoty indexů na základě vysoké absorpce záření chlorofyly, které by poukazovaly na zdravotní stav rostlin.

Všechny výše zmíněné experimenty dokládají jasnou spojitost mezi indexy a oblastí red edge v rámci spektrální odrazivosti vegetace.

6.3 Porovnání obsahu fotosyntetických pigmentů

Po získání konečných výsledků ze softwarového programu Statistica bylo zjištěno, že obsah fotosyntetických pigmentů se statisticky signifikantně neliší v rámci jednotlivých testovacích ploch, avšak v porovnání obsahu pigmentů mezi oběma plochami průkazné rozdíly již patrné byly. Výsledné obsahy pigmentů vykazují vyšší hodnoty, než bylo očekáváno. Obsahy pigmentů v rámci porovnání vzorků a kontrolních vzorků souhrnně na jedné ploše ukázaly rozdíly v hodnotách mezi vzorky a kontrolními vzorky, kdy byl patrný jistý trend – vyšší hodnoty obsahu pigmentů vykazovaly kontrolní vzorky. Při porovnání výsledných hodnot s výsledky jiných prací nelze výsledky zcela porovnávat vzhledem k jiným jednotkám, ve kterých byly fotosyntetické pigmenty stanoveny, např. Wellburn

(1994) či Porra et al. (1989), který uvedl ve své práci výsledky v závislosti na ploše listu v μ/mol^2 , zatímco v této práci byl výsledný výpočet uveden $\mu\text{g}/\text{g}$.

Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů bylo provedeno na základě studie Wellburna (1994), který porovnával extrakci vzorků ke stanovení chlorofylů spolu s karotenoidy (a xantofyly) v mnoha rozpouštědlech. Po prvotním zvolení rozpouštědla acetonu se extrakce téměř nepodařila a naměřené hodnoty spektrofotometrem nebyly prokazatelně dostačující k stanovení rozdílů mezi ekotypy. Proto se poté přikročilo k užití rozpouštědla DMF, které bylo v extrakci vzorků prokazatelnější.

V provedeném experimentu Ritchie (2008) porovnával tři různá rozpouštědla, a to 90% aceton, 100% methanol a ethanol, vhodných ke stanovení obsahu pigmentů u řas. Ve své studii vysvětluje, že aceton je vhodným rozpouštědlem chlorofylů u některých druhů řas. Avšak konkrétně u zelených řas a některých cévnatých rostlin není toto rozpouštědlo dostatečně účinné (Ritchie 2008), což bylo prokázáno i v rámci extrakce jehlic borovice lesní v rámci praktické části diplomové práce.

Stanovením obsahu fotosyntetických pigmentů se podobně jako Wellburn (1994) zabývali ve své studii Porra et al. (1989), kdy za užití rozpouštědel a za pomoci stanovení absorpce fotosyntetických pigmentů spektrofotometrickou metodou srovnávali hladinu chlorofylů. Užitá rozpouštědla byla 80% aceton, DMF a methanol. Pro stanovení obsahu chlorofylu *a* a *b* použili listy špenátu (*Spinacia oleracea*) a výpočet provedli v upravených rovnicích a za užití vlastních specifických koeficientů sestavených pro určité vlnové délky. Po získání výsledků v této studii vyplynulo, že nejvyšší koncentrace chlorofylů *a* a *b* byla naměřena v 80% acetonu. Při extrakci listů v DMF zjistili, že nezáleží na tom, zda jsou listy rozemleté či jen nakrájené, při extrakci se vyextrahovalo přibližně stejné množství chlorofylů v obou případech. V případě této diplomové práce byly jehlice borovice nakrájeny na co nejmenší kousky právě pro snadnější extrakci. Obsah chlorofylů v listech se také liší dle polohy, odkud je extrahován – u špičky listu byla koncentrace chlorofylů vyšší, zatímco směrem ke stonku rostliny hladina klesá. Jako výhodu DMF uvedli, že je toto rozpouštědlo velmi stabilní a rovněž chlorofyly jsou v tomto rozpouštědlu stabilní při extrakci bez proniknutí světla. DMF se jako silnější rozpouštědlo pravděpodobně více hodí na užití u jehličnatých dřevin než aceton, který není v tomto ohledu dostatečně účinný i vzhledem k tomu, že jehlice borovic obsahuje značné množství silic.

7 Závěr

Výsledky získané ze vzorků borovice lesní za využití hyperspektrální reflektance potvrdily signifikantní rozdíly v rámci porovnání vzorků souhrnně mezi plochami. Statisticky odlišná heritabilita a reflektance ekotypů byla pozorována v rámci porovnání mezi plochami Svitavy a Telč a rovněž samostatně u plochy Telč. Nejvyšší pozorované hodnoty se nacházely v pásmu red edge a ve viditelném spektru elektromagnetického záření, což je spojeno s prokazatelným obsahem chlorofylů. Nesignifikantní hodnoty u plochy Svitavy jsou připisovány příliš vysoké heterogenitě prostředí, vlivu rozsáhlé buřně, možnému nedostatečně velkému hodnocenému souborů dat a v neposlední řadě možným klimatickým faktorům. Z hodnocení fotosyntetických pigmentů a vegetačního indexu nevyplývaly žádné významné rozdíly mezi jednotlivými ekotypy, jak bylo očekáváno. Odlišnost obsahu chlorofylů a karotenoidů mezi vzorky a kontrolními vzorky byla pozorována na úrovni samostatné plochy, kdy byl pozorován trend vyšších hodnot, které vykazovaly kontrolní vzorky, výjimkou byl obsah karotenoidů na ploše Telč.

8 Seznam použitých zdrojů

- BAKER, N. R. a K. OXBOROUGH, 2004. Chlorophyll fluorescence as a probe of photosynthetic productivity. In: George PAPAGEORGIOU a GOVINDJEE, ed. *Chlorophyll a Fluorescence a Signature of Photosynthesis*. B.m.: Springer Netherlands, s. 66–79. ISBN 1-4020-3218-8.
- BARANOSKI, G. V. G. a J. ROKNE, 2005. A practical approach for estimating the red edge position of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. **26**(3), 503–521.
- BARTON, N. H. a M. TURELLI, 1989. Evolutionary quantitative genetics: How little do we know? *Annual Review of Genetics*. **23**, 337–370.
- BERNACCHI, C. J., A. R. PORTIS, H. NAKANO, S. VON CAEMMERER a S. P. LONG, 2002. Temperature Response of Mesophyll Conductance. Implications for the Determination of Rubisco Enzyme Kinetics and for Limitations to Photosynthesis in Vivo. *Plant Physiology* [online]. **130**(4), 1992–1998. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1104/pp.008250>
- BERRY, J. a O. BJÖRKMAN, 1980. Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants. *Plant Physiology* [online]. **31**, 491–543. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.002423>
- BORENGASSER, M., W. S. HUNGATE a R. WATKINS, 2007. *Hyperspectral Remote Sensing*. 1. ISBN 9780429138386.
- BRITTON, G., 1983. *The biochemistry of natural pigments*. 1. ISBN 0521248922.
- BUDÍKOVÁ, M., M. KRÁLOVÁ a B. MAROŠ, 2010. *Průvodce základními statistickými metodami*. B.m.: Grada. ISBN 978-80-247-3243-5.
- BUJOK, P., J. TVRDÍK a R. POLÁKOVÁ, 2015. *Základy pravděpodobnosti a statistiky*. B.m.: Ostravská univerzita.
- BUSINKSÝ, R. a J. VELEBIL, 2011. *Borovice v České republice. Výsledky dlouhodobého hodnocení rodu Pinus L. v kultuře v České republice*. B.m.: Průhonice, VÚKOZ.
- BUTLER, D. G., B. R. CULLIS, A. R. GILMOUR a B. J. GOGEL, 2009. *ASReml-R reference manual*. 2009.
- CARLISE, A. a A. H. F. BROWN, 1968. Pinus Sylvestris L. *Journal of Ecology*. **56**(1), 269–307.
- ČEPL, J., J. STEJSKAL, Z. LHOTÁKOVÁ, D. HOLÁ, J. KORECKÝ, M. LSTIBŮREK, I. TOMÁŠKOVÁ, M. KOČOVÁ, O. ROTHOVÁ, M. PALOVSKÁ, J. HEJTMÁNEK, A. KREJZKOVÁ, S. GEZAN, R. WHETTEN a J. ALBRECHTOVÁ, 2018. Heritable variation in needle spectral reflectance of Scots pine (Pinus sylvestris L.) peaks in red edge. *Remote Sensing of Environment* [online]. **219**, 89–98. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.001>
- CHEN, J. M., 1996. Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal

- Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online]. **22**(3), 229–242. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178>
- CHEN, Z., A. HELMERSSON, J. WESTIN, B. KARLSSON a H. X. WU, 2018. Efficiency of using spatial analysis for Norway spruce progeny tests in Sweden. *Annals of Forest Science* [online]. **75**(2). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s13595-017-0680-8>
- CHMELAŘ, J., 1980. *Dendrologie s ekologií lesních dřevin*. 1. B.m.: Vysoká škola zemědělská v Brně.
- ČIHÁK, T. a M. VEJPUSTKOVÁ, 2021. Produkční charakteristiky borovice lesní v České republice na základě informací z druhého cyklu národní inventarizace lesů (2011-2015). *Zprávy lesnického výzkumu*. **66**(2), 126–137.
- COHEN, W. B. a S. N. GOWARD, 2004. Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing. *BioScience* [online]. **54**(6), 535–545. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0535:LRIEAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LRIEAO]2.0.CO;2)
- CORNELIUS, J., 1994. Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. *Canadian Journal of Forestry Research*. **24**, 372–379.
- CORRIVEAU, A., J. BEAULIEU a G. DAOUST, 1991. Heritability and genetic correlations of wood characters of Upper Ottawa Valley white spruce populations grown in Quebec. *The Forestry Chronicle* [online]. **67**(7). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.5558/tfc67698-6>
- CRITCHFIELD, W. B. a E. L. jr. LITTLE, 1966. *Geographic distribution of the pines of the World*. B.m.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service Misc. Publ.
- CVRČKOVÁ, H., P. MÁCHOVÁ, L. POLÁKOVÁ a OI. TRČKOVÁ, 2017. *Hodnocení genetických charakteristik u borovice lesní s využitím mikrosatelitových markerů*. B.m.: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i. ISBN 978-80-7417-140-6.
- DANUSEVIČIUS, D., J. BUCHOVSKA, V. STANYS, J. B. ŠIKŠNIANIENE, V. MAROZAS a V. BENDOKAS, 2013. DNA marker based identification of spontaneous hybrids between *Pinus mugo* and *P. sylvestris* at the Lithuanian sea-side. *Nordic Journal of Botany* [online]. **31**(3), 344–352. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2012.01575.x>
- DANUSEVIČIUS, D., G. MASAITIS a G. MOZGERIS, 2014. Visible and near infrared hyperspectral imaging reveals significant differences in needle reflectance among Scots pine provenances. *Silvae Genetica* [online]. **63**(4), 169–180. Dostupné z: doi:[10.1515/sg-2014-0022](https://doi.org/10.1515/sg-2014-0022)
- DATT, B., 1998. Remote Sensing of Chlorophyll a, Chlorophyll b, Chlorophyll a+b, and Total Carotenoid Content in Eucalyptus Leaves. *Remote Sensing of Environment* [online]. **66**(2), 111–121. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00046-7)
- DEEPAK, M., S. KESKI-SAARI, L. FAUCH, L. GRANLUND, E. OKSANEN a M. KEINÄNEN, 2020. Spectral Reflectance in Silver Birch Genotypes from Three Provenances in Finland. *Remote Sensing* [online]. **12**(17). Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/rs12172677>

DEMMIG-ADAMS, B. a W. W. ADAMS III, 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* [online]. **43**, 599–626. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.43.060192.003123>

DIDAN, K. a A. B. MUNOZ, 2019. *MOD13: MODIS Vegetation Index User's Guide*.

DONG, T., J. MENG, J. SHANG, J. LIU a B. WU, 2015. Evaluation of Chlorophyll-Related Vegetation Indices Using Simulated Sentinel-2 Data for Estimation of Crop Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING* [online]. Dostupné z: doi:[10.1109/JSTARS.2015.2400134](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2400134)

ERIKSSON, G., S. ANDERSSON, V. EICHE, J. IFVER a A. PERSSON, 1980. *Severity Index and Transfer Effects on Survival and Volume Production of Pinus sylvestris in Northern Sweden*. ISBN 91-38-05858-8.

ERRIKSSON, G., I. EKBERG a D. CLAPHAM, 2006. *An introduction to Forest Genetics*.

FEILBERG, L. a B. SOEGAARD, 1975. Historical Review of Seed Orchards. *Forestry Comm. Bull.* **54**.

FLORAN, V., R. E. SESTRAS a M. R. GARCÍA, 2011. Organelle Genetic Diversity and Phylogeography of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* [online]. **39**(1), 317–322. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.15835/nbha3916103>

FLORIN, R., 1963. The distribution of Conifer and Taxed genera in time and space. *Acta Horti Berg.* **20**(4), 121–312.

FRACHEBOUD, Y. a J. LEIPNER, 2003. The Application of Chlorophyll Fluorescence to Study Light, Temperature, and Draught Stress. In: Jennifer R. DELL a Peter M. A. TOIVONEN, ed. *Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology* [online]. 1. vyd. B.m.: Springer New York, NY, s. 126–148. ISBN 978-1-4020-7440-0. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0415-3>

FRIES, A. a D. LINDGREN, 1986. Performance of plus tree progenies of *Pinus contorta* originating north of latitude 55 N in a Swedish trial at 64 N. *Canadian Journal of Forest Research.* (16), 427–437.

GAMON, J. A., J. PEÑUELAS a C. B. FIELD, 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment.* **41**, 35–44.

GAMON, J. A., L. SERRANO a J. S. SURFUS, 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia.* **112**, 492–501.

GIERTYCH, M. a C. MÁTYÁS, 1991. *Genetics of Scots Pine*. Vol. 3. B.m.: Elsevier Science Publishers, Amsterdam. ISBN 963 05 5891 2.

GITELSON, A.A., Y. ZUR, O.B. CHIVKUNOVA a M.N. MERZLYAK, 2002. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology* [online]. **75**(3), 272–281. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1562/0031->

8655(2002)0750272ACCIPL2.0.CO2

GLENN, E. P., A. R. HUETE, P. L. NAGLER a S. G. NELSON, 2008. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors* [online]. **8**(4), 2136–2160. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/s8042136>

GU, Y., J. F. BROWN, J. P. VERDIN a B. WARDLOW, 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Hydrology and Land Surface Studies*. **34**(6).

HACH COMPANY, 2021. *DR 6000 - Základní uživatelská příručka*.

HAJNÁ, V., J. MARTINEC a Z. NOVOTNÁ, 2016. PROLIN, VÝJIMEČNÁ AMINOKYSELINA ANEB, ZA CO VŠECHNO MŮŽE PROLIN V EUKARYOTICKÉ BUŇCE. *Bioprosect*. **26**(4), 87–90.

HANEWINKEL, M., D. A. CULLMANN, M-J. SCHELHAAS, G-J. NABUURS a N. E. ZIMMERMANN, 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change* [online]. (3), 203–207. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/nclimate1687>

HANSEN, O. K. a U. B. NIELSEN, 2010. Microsatellites used to establish full pedigree in a half-sib trial and correlation between number of male strobili and paternal success. *Annals of Forest Science* [online]. **67**. Dostupné z: doi:DOI: 10.1051/forest/2010028

HAVAUX, M., 1993. Rapid photosynthetic adaptation to heat stress triggered in potato leaves by moderately elevated temperatures. *Plant, Cell & Environment* [online]. **16**(4), 461–467. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00893.x>

HELDT, H-W. a B. PIECHULLA, 2011. *Plant Biochemistry*. 4. B.m.: Elsevier. ISBN 978-0-12-384986-1.

HERMANN, I., A. PIMSTEIN, A. KARNIELI, Y. COHEN, V. ALCHANTIS a D. J. BONFIL, 2010. ASSESSMENT OF LEAF AREA INDEX BY THE RED-EDGE INFLECTION POINT DERIVED FROM VEN μ S BANDS. *Proceedings of the ESA hyperspectral workshop*. **683**, 1–7.

HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., R. M. NAVARRO-CERILLO, L. SUARÉZ, F. MORALES a P. J. ZARCO-TEJADA, 2011. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. *Remote Sensing of Environment* [online]. **115**(9), 2360–2375. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.036>

HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R., R. M. NAVARRO-CERILLO a P. J. ZARCO-TEJADA, 2012. Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and PROSPECT + DART simulations. *Remote Sensing of Environment* [online]. **127**, 298–315. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.014>

HOLLAS, J. M., 2004. *Modern Spectroscopy*. 4. B.m.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0 470 84416 7.

HOMOLOVÁ, L., Z. MALENOVSKÝ, J. G. P. W. CLEVERS, G. GARCÍA-SANTOS a M.

- E. SCHAEPMAN, 2013. Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping. *Ecological Complexity* [online]. **15**, 1–16. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2013.06.003>
- HOUSTON DURRANT, T., D. DE RIGO a G. CAUDULLO, 2016. *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European Atlas of Forest Tree Species*. 132–133.
- HOWARTH, C. J. a H. J. OUGHAM, 1993. Gene expression under temperature stress. *New Phytologist* [online]. **125**(1), 1–26. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03862.x>
- HUANG, S., L. TANG, J. P. HUPY, Y. WANG a G. SHAO, 2020. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research* [online]. **32**(1), 1–6. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- HYNEK, V., V. BURIÁNEK, M. BENEDÍKOVÁ, J. FRÝDL a J. KAŇÁK, 1997. *Výběrové stromy a porosty uznané pro sběr osiva: základní kritéria*. Jiloviště-Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i.
- IM, J. a J. R. JENSEN, 2008. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. *Geography Compass* [online]. **2**(6), 1943–1961. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00182.x>
- INDEX, DataBase, 2023. *Index DataBase - A database for remote sensing indices* [online]. Dostupné z: <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>
- ISIK, F., J. HOLLAND a Ch. MALTECCA, 2017. *Genetic Data Analysis for Plant and Animal Breeding* [online]. 1. B.m.: Springer Cham. ISBN 978-3-319-55177-7. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-55177-7>
- JURÁSEK, M., 2002. Semenné sady javoru klenu u LČR, s.p. *Lesu zdar - Genetika 2002*. **8**, 8–9.
- KAŇÁK, J., 2011. *Návrh šlechtitelských postupů pro borovici lesní v západních a jižních Čechách*. B.m. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- KAŇÁK, J., J. FRÝDL, P. NOVOTNÝ a J. ČÁP, 2008. *Metodika zakládání semenných sadů*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i. ISBN 978-80-7417-007-2.
- KAŇÁK, J., J. KLÁPŠTĚ a M. LSTIBŮREK, 2009. Úvodní genetické hodnocení semenných sadů borovice lesní v západních Čechách. *Zprávy lesnického výzkumu*. **54**(3), 189–203.
- KOBLIHA, J., J. KLÁPŠTĚ a M. LSTIBŮREK, 2007. Význam lesní genetiky a šlechtění ve vztahu ke kvalitě reprodukčního materiálu ve Švédsku a v ČR. *Kvalita reprodukčního materiálu lesních dřevin: sborník příspěvků*. 18–19.
- KOROPACHINSKIY, I. YU., 1983. *Trees and shrubs of Siberia*. B.m.: Nauka, Novosibirsk.
- LACH-NER S.R.O, 2022. *6.: Bezpečnostní list*.

- LARCHER, W., 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. 4. B.m.: Springer. ISBN 3-540-43516-6.
- LEI, J., L. ZHANG, B. K. WYLIE a J. ROVER, 2011. On the terminology of the spectral vegetation index (NIR-SWIR)/(NIR+SWIR). *International Journal of Remote Sensing* [online]. **32**(21), 6901–6909. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2010.510811
- LESY ČR S.P., 2023a. *Charakteristika lesní správy* [online]. Dostupné z: <https://lssvitavy.lesycr.cz/charakteristika-lesni-spravy/>
- LESY ČR S.P., 2023b. *LHP - porostní mapa* [online]. Dostupné z: <https://geoportal.lesycr.cz/itc/?serverconf=default&wmcid=882>
- LIANG, S., 2004. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. B.m.: John Wiley and Sons. ISBN 978-0-471-28166-5.
- LICHTENTHALER, H. K., 1996. Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants. *Journal of Plant Physiology* [online]. **148**(1–2), 4–14. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80287-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80287-2)
- LIU, S., S. LI, X.-Y. FAN, G.-D. YUAN, T. HU, X.-M. SHI, J.-B. HUANG, X.-Y. PU a Ch.-S. WU, 2019. Comparison of two noninvasive methods for measuring the pigment content in foliose macrolichens. **141**, 245–257.
- LOZADA, D. N., J. V. GODOY, B. P. WARD a A. H. CARTER, 2020. Genomic Prediction and Indirect Selection for Grain Yield in US Pacific Northwest Winter Wheat Using Spectral Reflectance Indices from High-Throughput Phenotyping. *International Journal of Molecular Science* [online]. **21**. Dostupné z: doi:10.3390/ijms21010165
- LYON, J. G., D. YUAN, R. S. LUNETTA a Ch. D. ELVIDGE, 1998. A Change Detection Experiment Using Vegetation Indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensin.* **64**(2), 143–150.
- MÁCHOVÁ, P., H. CVRČKOVÁ, L. POLÁKOVÁ a O. TRČKOVÁ, 2016. Genetická variabilita vybraných populací borovice lesní. *Zprávy lesnického výzkumu*. **61**(3), 223–229.
- MALENOVSKÝ, Z., L. HOMOLOVÁ, R. ZURITA-MILLA, P. LUKEŠ, V. KAPLAN, J. HANUŠ, J.-P. GASTELLU-ETCHEGORRY a M. E. SCHAEPMAN, 2013. Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. *Remote Sensing of Environment* [online]. **131**, 85–102. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.015>
- MALVERN PANALYTICAL, 2016. *ASD FIELDSPEC® 4 - The industry-leading portable device for field spectroscopy*.
- MÁTYÁS, Csaba, Lennart ACKZELL a C J A SAMUEL, 2004. *Technical Guidelines for genetic conservation and use for Scots pine (Pinus sylvestris)*. B.m.: Euforgen. ISBN 92-9043-661-1.
- MELZACK, R. N., B. BRAVDO a J. RIOV, 1985. The effect of water stress on photosynthesis and related parameters in *Pinus halepensis*. *Physiologia Plantarum* [online]. **64**, 295–300. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1985.tb03343.x>

- MENG, F., T. ZHANG a D. YIN, 2023. The effects of soil drought stress on growth characteristics, root system, and tissue anatomy of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *PeerJ* [online]. **11**. Dostupné z: doi:10.7717/peerj.14578
- MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2021. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství v České republice v roce 2020*. B.m.: Ministerstvo zemědělství, Těšnov 17, 110 00, Praha 1. ISBN 978-80-7434-625-5.
- MIROV, N. T., 1967. *The genus Pinus*. New York: Ronald Press Company.
- MISRA, A. N., 2012. *Biophysics*. Rijeka, Croatia: InTech. ISBN 978-953-51-0376-9.
- MOMAYYEZI, M. a R. D. GUY, 2017. Blue light differentially represses mesophyll conductance in high vs low latitude genotypes of *Populus trichocarpa* Torr. & Gray. *Journal of Plant Physiology* [online]. **213**, 122–128. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.03.006
- MOORTHY, I., J. R. MILLER a T. L. NOLAND, 2008. Estimating chlorophyll concentration in conifer needles with hyperspectral data: An assessment at the needle and canopy level. *Remote Sensing of Environment* [online]. **112**(6), 2824–2838. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.013
- MUSIL, I. a J. HAMERNÍK, 2007. *Jehličnaté dřeviny*. B.m.: Academia, Praha.
- MUZART, J., 2009. N,N-Dimethylformamide: much more than a solvent. *Tetrahedron* [online]. **65**, 8313–8323. Dostupné z: doi:doi:10.1016/j.tet.2009.06.091
- MYNENI, R. B., S. HOFFMANN, Y. KNYAZIKHIN, J. L. PRIVETTE, J. GLASSY, Y. TIAN, Y. WANG, S. SONG, Y. ZHANG, G. R. SMITH, A. LOTSCH, M. FRIEDL, J. T. MORISETTE, P. VOTAVA, R. P. NEMANI a S. W. RUNNING, 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* [online]. **83**(1–2), 214–231. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00074-3
- NAGY, I. a J. KRATOCHVÍLOVÁ, 2002. *Matematická statistika*.
- NAMKOONG, G., 1984. A control concept of gene conservation. *Silvae Genetica*. **33**(4–5), 160–163.
- NANSON, A., 1972. The provenance seedling seed orchard. *Si. Gen.* **21**(6), 243–248.
- NÁROVCOVÁ, J a V NÁROVEC, 2008. PROMĚNLIVOST ASIMILAČNÍHO A TRANSPIRAČNÍHO KOMPARTMENTU BOROVICE LESNÍ. *Zprávy lesnického výzkumu*. **53**(2), 120–127.
- NAVARA, M., 2021. *Pravděpodobnost a matematická statistika*. Praha: České vysoké učení technické.
- PAPAGEORGIOU, G. Ch., 2004. Fluorescence of Photosynthetic Pigments in Vitro and in Vivo. In: George PAPAGEORGIOU a GOVINDJEE, ed. *Chlorophyll a Fluorescence a Signature of Photosynthesis*. B.m.: Springer Netherlands, s. 43–63. ISBN 1-4020-3218-8.

- PIEPHO, H. P., J. MÖHRING, A. E. MELCHINGER a A. BÜCHSE, 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica* [online]. **161**, 209–228. Dostupné z: doi:DOI 10.1007/s10681-007-9449-8
- PODRÁZSKÝ, V., Z. VACEK, S. VACEK, J. VÍTÁMVÁS, J. GALLO, A. PROKŮPKOVÁ a G. D'ANDREA, 2020. Production potential and structural variability of pine stands in the Czech Republic: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) vs. introduced pines – case study and problem review. *Journal of Forest Science* [online]. **66**(5), 197–207. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.17221/42/2020-JFS
- POYATOS, R., P. LLORENS a C. RUBIO, 2008. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and pubescent oak (*Quercus pubescens* Willd.) to soil and atmospheric water deficits under Mediterranean mountain climate. *Annals of Forest Science*. **65**, 306.
- PROCHÁZKA, Stanislav, Ivana MACHÁČKOVÁ, Jan KREKULE a Jiří a kol. ŠEBÁNEK, 1998. *Fyziologie rostlin*. B.m.: Academia.
- RITCHIE, R. J., 2008. Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls a, b, c, and d and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *PHOTOSYNTHETICA*. **46**(1), 115–126.
- SIMS, D. A. a J. A. GAMON, 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*. **81**, 337–354.
- ŠINDELÁŘ, J., 1992. *Proměnlivost borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) na území České a Slovenské republiky z hlediska rajonizace reprodukčního materiálu*. 2. B.m.: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti.
- ŠINDELÁŘ, J., 1995. Orientační představa o původním druhovém složení lesů na území České republiky. *Lesnictví-Foresry*. **41**(6), 293–299.
- ŠINDELÁŘ, J., J. FRÝDL a P. NOVOTNÝ, 2007. Příspěvek k charakteristikám regionálních populací - ekotypů borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.) v České republice. *Zprávy lesnického výzkumu*. **52**(2), 148–159.
- SINSAWAT, V., J. LEIPNER, P. STAMP a Y. FRACHEBOUD, 2004. Effect of heat stress on the photosynthetic apparatus in maize (*Zea mays* L.) grown at control or high temperature. *Environmental and Experimental Botany* [online]. **52**(2), 123–129. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.01.010
- SKIANIS, G. A., D. A. VAIPOULOS a K. G. NIKOLAKOPOULOS, 2009. Testing the performance of the MNDVI vegetation index. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology* [online]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1117/12.830262
- SMITH, R. B., 2012. Introduction to Hyperspectral Imaging. *MicroImages*.
- SONOBE, R. a Q. WANG, 2017. Towards a Universal Hyperspectral Index to Assess Chlorophyll Content in Deciduous Forests. *Remote Sensing* [online]. **9**(3). Dostupné z: doi:https://doi.org/10.3390/rs9030191
- SOUČEK, E., 2006. *Statistika pro ekonomy*. B.m.: Vysoká škola ekonomie a managementu.

- ŠPULÁK, O., J. VÍTÁMVÁS, D. KACÁLEK a I. KUNEŠ, 2011. Fluorescence chlorofylu, chemismus a obsah fotosynteticky aktivních pigmentů u listů buků vápěných do jamky. *Zprávy lesnického výzkumu*. **56**(4), 301–309.
- ŠPULÁK, Ondřej, Jiří SOUČEK a Jakub ČERNÝ, 2018. Do stand structure and admixture of tree species affect Scots pine aboveground biomass production and stability on its natural site? *Journal of Forest Science*. **64**(11), 486–495.
- SVOBODA, A. M., 1971. Contribution aux recherches sur la variabilité des cônes du Pin sylvestre et sur son extension en Mongolie. *Frag. Flor. Geobot.* (17,3), 367–374.
- SVOBODA, P., 1953. *Lesní dřeviny a jejich porosty*. 1. B.m.: Státní zemědělské nakladatelství, Praha.
- TOM, J., 2021. UV-Vis Spectroscopy: Principle, Strengths and Limitations and Applications. *Technology Networks*.
- ÚHÚL, 2000. *Oblastní plán rozvoje lesů (OPRL) - Přírodní lesní oblast 31 Českomoravské mezihří.*
- ÚHÚL, 2001. *Oblastní plán rozvoje lesů - Přírodní lesní oblast 16 Dražanská vrchovina.*
- ÚRADNÍČEK, L., P. MADĚRA, S. TICHÁ a J. KOBLÍŽEK, 2009. *Dřeviny České republiky*. 2. přeprac. B.m.: Lesnická práce, s. r. o. ISBN 978-80-87154-62-5.
- WANG, L. a W. P. SOUSA, 2009. Distinguishing mangrove species with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* [online]. **30**(5), 1267–1281. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/01431160802474014>
- WELLBURN, A. R., 1994. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology* [online]. **144**(3), 307–313. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- WHITE, T. L., W. T. ADAMS a D. B. NEALE, 2007. *Forest Genetics*. B.m.: CABI Publishing. ISBN 9780851990835.
- WHITE, T. L., G. R. HODGE a G. L. POWELL, 1993. An advanced-generation tree improvement plan for slash pine in the southeastern United States. *Silvae Genetica*. **42**(6), 359–371.
- ZÁHORA, J., 2015. *Učebnice statistiky*. B.m.: Univerzita Karlova v Praze, Lékařská fakulta v Hradci Králové. ISBN 978-80-88176-00-8.
- ZHAO, T. J., S. SUN, Y. LIU, J. M. LIU, Q. LIU, Y. B. YAN a H. M. ZHOU, 2006. Regulating the Drought- responsive Element (DRE)-mediated Signaling Pathway by Synergic Functions of Trans-active and Trans-inactive DRE Binding Factors in Brassica napus. *Journal of Biological Chemistry* [online]. **281**(16). Dostupné z: doi:DOI 10.1074/jbc.M510535200
- ZOBEL, B. J. a J. T. TALBERT, 1984. *Applied forest tree improvement*. B.m.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-09682-2.

ZOU, C., S. HAN, W. XU a D. LI, 2003. Eco-physiological responses of *Picea mongolica* ecotypes to drought stress. *The Journal of Applied Ecology*. **14**(9), 1446–1450.