

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie**

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



**Bc. Renáta Suchá**

**STANOVENÍ OBSAHU LIGNINU V JEHLICÍCH SMRKU ZTEPILÉHO (PICEA  
ABIES L. KARST.) POMOCÍ LABORATORNÍ A OBRAZOVÉ SPEKTROSKOPIE**

**ASSESSMENT OF LIGNIN CONTENT IN NEEDLES OF NORWAY SPRUCE (PICEA  
ABIES L. KARST.) USING LABORATORY AND IMAGE SPECTROSCOPY**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.

Konzultanti: prof. RNDr. Jana Albrechtová, Ph.D., Mgr. Zuzana Lhotáková, Ph.D., Ing. Václav  
Dvořáček, Ph.D.

Praha, 2013

### **Prohlášení kvalifikační práce**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s využitím uvedených pramenů a literatury, na které odkazuji.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

Ve Žloutkovicích dne 13. 8. 2013

.....

Renáta Suchá

## **Poděkování**

Ráda bych na tomto místě poděkovala několika lidem, kteří mi během studia na vysoké škole i v průběhu zpracování diplomové práce poskytli pomoc a podporu, bez níž by tato práce nemohla vzniknout. Mé poděkování patří zejména RNDr. Lucii Kupkové, Ph.D., za odborné vedení mé diplomové práce, prof. RNDr. Janě Albrechtové, Ph.D., Mgr. Zuzaně Lhotákové, Ph.D., a doc. RNDr. Pavlu Cudlínovi, Csc., za odborné konzultace v oblasti biologie. Ing. Petru Lukešovi, Ph.D., děkuji za odborné rady v oblasti spektroskopie.

Můj dík patří především mé rodině a přátelům za trpělivost a laskavou podporu během celého studia na vysoké škole.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá stanovením obsahu biochemických látek (lignin, karotenoidy a voda) v jehlicích smrku ztepilého s využitím laboratorní a obrazové spektroskopie. V první části práce je zpracován přehled prací zabývajících se metodami odhadu obsahu ligninu a dalších biochemických látek. V práci jsou využity tři typy dat: 1. spektra pořízená kontaktní sondou se spektrometrem ASD FielSpec 4 Wide Res, 2. spektra pořízená integrační sférou se stejným spektrometrem a 3. hyperspektrální obrazová data pořízená senzorem APEX. Na spektra jsou aplikovány nejpoužívanější transformace, a to první derivace spektra a odstranění kontinua. Dále je zjišťován lineární vztah mezi naměřenými spektry a obsahem biochemických látek. Vícenásobná kroková lineární regrese je použita pro výběr vlnových délek sloužících k vytvoření vhodného modelu pro výpočet obsahu biochemických látek v jehlicích. Model je následně vypočítán a aplikován na úrovni obrazových hyperspektrálních dat. Výstupem této části práce jsou ligninové mapy. Dále jsou v práci porovnána spektra pořízená kontaktní sondou a integrační sférou. Zjišťován je i rozdíl mezi jednotlivými výzkumnými plochami na základě obsahu biochemických látek v jehlicích a vybraných prvků obsažených v půdě a na základě naměřených spekter. Analyzován je také vliv několika faktorů a prvků v půdě na obsah biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého.

### **Klíčová slova:**

Laboratorní spektroskopie, obrazová spektroskopie, APEX, smrk ztepilý (*Picea Abies*), lignin, karotenoidy, voda, vícenásobná kroková lineární regrese

## **ABSTRACT**

The master thesis deals with determination of selected biochemicals (lignin, carotenoids, water) content in Norway spruce needles using laboratory and imaging spectroscopy. The first part of thesis summarizes literature dealing with methods of estimating lignin and other biochemicals content. Three types of data are used in this thesis: 1. spectra measured by contact probe and ASD FieldSpec 4 Wide Res spectroradiometer, 2. spectra measured by integrating sphere and spectroradiometer and 3. aerial hyperspectral image data acquired by APEX sensor. The most useful transformation methods - first derivative and continuum removal are applied to the spectrum. Further the linear relationship between measured spectrum and content of biochemicals is analysed. Stepwise multiple linear regression is applied to select suitable wavelengths for modeling of biochemicals content in spruce needles. The model is also calculated and applied on the level of image hyperspectral data. Maps of lignin content in

Norway spruce are the final output of these part of this. Next part of the thesis compares spectra measured by contact probe and spectra measured by integrating sphere. Difference between the studied areas based on biochemicals content in spruce needles and several chemical elements in the soil and based on measured spectra is also evaluated. Influence of several factors and chemical elements in the soil on biochemicals content in Norway spruce needles is also examined.

**Keywords:**

Laboratory spectroscopy, image spectroscopy, APEX, Norway spruce (*Picea Abies*), lignin, carotenoids, water, stepwise multiple linear regression

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM BOXŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
1.1 CÍLE PRÁCE .....	12
<b>2 URČOVÁNÍ OBSAHU BIOCHEMICKÝCH LÁTEK Z HYPERSPEKTRÁLNÍCH DAT .....</b>	<b>14</b>
2.1 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ.....	14
2.1.1 <i>Stručný princip DPZ</i> .....	14
2.1.2 <i>Stručný princip spektroskopie</i> .....	15
2.2 HYPERSPEKTRÁLNÍ DATA A SENZORY .....	19
2.2.1 <i>APEX (Airborne Prism EXperiment)</i> .....	20
2.2.2 <i>Spektroradiometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res</i> .....	21
2.3 VYBRANÉ BIOCHEMICKÉ LÁTKY V LISTOVÍ OVLIVŇUJÍCÍ JEHO OPTICKÉ VLASTNOSTI .....	24
2.3.1 <i>Lignin</i> .....	24
2.3.2 <i>Voda</i> .....	26
2.3.3 <i>Karotenoidy</i> .....	27
2.4 STANOVENÍ OBSAHU BIOCHEMICKÝCH LÁTEK .....	28
2.5 SPEKTRÁLNÍ TRANSFORMAČNÍ METODY .....	29
2.6 STATISTICKÉ METODY POUŽITÉ PRO ODHAD BIOCHEMICKÝCH LÁTEK .....	31
<b>3 DATA A METODY .....</b>	<b>34</b>
3.1 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ .....	34
3.2 POPIS VÝZKUMNÝCH PLOCH .....	37
3.3 TERÉNNÍ KAMPAŇ.....	41
3.4 LABORATORNÍ MĚŘENÍ SPEKTER.....	42
3.4.1 <i>Kontaktní sonda</i> .....	42
3.4.2 <i>Integrační sféra</i> .....	43
3.5 SNÍMÁNÍ DAT SENZOREM APEX .....	46
3.5.1 <i>Kalibrace a zpracování obrazů APEX</i> .....	47
3.6 LABORATORNÍ STANOVENÍ OBSAHU BIOCHEMICKÝCH LÁTEK.....	48
3.6.1 <i>Laboratorní stanovení obsahu ligninu</i> .....	48
3.6.2 <i>Laboratorní stanovení obsahu karotenoidů</i> .....	49
3.6.3 <i>Laboratorní stanovení obsahu vody</i> .....	49
3.6.4 <i>Rozbory půd</i> .....	49
3.7 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA BIOCHEMICKÝCH LÁTEK Z LABORATORNÍCH DAT.....	50
3.7.1 <i>Spektrální transformace</i> .....	50
3.7.2 <i>Statistická analýza</i> .....	52
3.7.3 <i>Validace modelů</i> .....	56
3.7.4 <i>Spektrální analýza biochemických látek z obrazových dat APEX</i> .....	58
3.7.5 <i>Tvorba masky</i> .....	59
3.7.6 <i>Tvorba ligninové mapy</i> .....	61

3.8 SROVNÁNÍ INTEGRAČNÍ SFÉRY A KONTAKTNÍ SONDY .....	62
3.9 STATISTICKÉ HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VÝZKUMNÝCH PLOCH .....	64
3.10 POSOUZENÍ VLIVU DALŠÍCH PARAMETRŮ NA OBSAH BIOCHEMICKÝCH LÁTEK V JEHLICÍCH SMRKU ZTEPILÉHO .....	64
<b>4 VÝSLEDKY .....</b>	<b>66</b>
4.1 OBSAHY BIOCHEMICKÝCH LÁTEK .....	66
4.2 ANALÝZA LABORATORNÍCH SPEKTER.....	67
4.3 STATISTICKÉ HODNOCENÍ MODELŮ .....	73
4.4 POROVNÁNÍ LABORATORNÍCH A OBRAZOVÝCH DAT .....	79
4.5 VÝSLEDKY VALIDACE MODELŮ.....	80
4.5.1 Výsledky validace modelů pro Krkonoše .....	80
4.5.2 Výsledky validace na nezávislých datech .....	82
4.6 VÝSLEDNÉ MASKY .....	82
4.7 STATISTICKÉ SROVNÁNÍ SPEKTER MĚŘENÝCH POMOCÍ KONTAKTNÍ SONDY A INTEGRAČNÍ SFÉRY .....	85
4.8 STATISTICKÉ HODNOCENÍ VÝZKUMNÝCH PLOCH .....	86
4.8 HODNOCENÍ MOŽNÉHO PŮSOBENÍ DALŠÍCH VLIVŮ NA OBSAH BIOCHEMICKÝCH LÁTEK V JEHLICÍCH.....	91
<b>5 SHRNUÍ A DISKUSE .....</b>	<b>93</b>
5.1 DISKUSE PŘESNOSTI VSTUPNÍCH DAT .....	93
5.2 PŘESNOST SPEKTROSKOPICKÉHO MĚŘENÍ .....	93
5.3 DATA APEX .....	94
5.4 TVORBA MASKY .....	95
5.5 DISKUSE METOD TVORBY MODELŮ .....	96
5.6 MAPY OBSAHŮ BIOCHEMICKÝCH LÁTEK .....	98
5.7 POROVNÁNÍ INTEGRAČNÍ SFÉRY A KONTAKTNÍ SONDY .....	99
5.8 DISKUSE ROZDÍLŮ MEZI VÝZKUMNÝMI PLOCHAMI .....	99
5.9 HODNOCENÍ VLIVU DALŠÍCH FAKTORŮ NA OBSAH BIOCHEMICKÝCH LÁTEK .....	101
<b>6 ZÁVĚR .....</b>	<b>102</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY .....</b>	<b>105</b>
<b>8 PŘÍLOHY .....</b>	<b>111</b>

## Seznam obrázků

- Obrázek 1: Obrazová spektroskopie
- Obrázek 2: Interakce slunečního záření s tkání jehlice a optické vlastnosti jehlice
- Obrázek 3: APEX
- Obrázek 4: ASD Contact Probe
- Obrázek 5: Schéma integrační sféry
- Obrázek 6: Spektrální projevy složek buněčné stěny
- Obrázek 7: Spektra odrazivosti listu pro různé obsahy vody
- Obrázek 8: Zonace KRNAP
- Obrázek 9: Mapa KRNAPu (výzkumné plochy)
- Obrázek 10: Rámeček pro měření jehlic integrační sférou
- Obrázek 11: Správné seřazení jehlic
- Obrázek 13: Měření transmitance vzorku
- Obrázek 14: Letové linie pořízené APEX
- Obrázek 15: Odstranění kontinua (bílá – původní spektrum, červená – křivka kontinua)
- Obrázek 16: Původní křivka, křivka po odstranění kontinua
- Obrázek 17: Aplikace spectral unmixing (červená – les, půda – zelená, stín – modrá)
- Obrázek 18: Pásmo lesa
- Obrázek 20: Diagram
- Obrázek 21: Výsledné masky
- Obrázek 22: Ligninová mapa pro plochu Modrý důl
- Obrázek 23: Ukázka výběru pixelů

## Seznam tabulek

- Tabulka 1: Spektrální obory dálkového průzkumu Země
- Tabulka 2: parametry senzoru APEX
- Tabulka 3: Přehled vlnových délek použitých pro výpočet obsahu ligninu v několika studiích
- Tabulka 4: Přehled vlnových délek použitých pro výpočet obsahu vody v několika studiích
- Tabulka 5: Matematické transformace a jejich vlastnosti, výhody a nevýhody
- Tabulka 6: Stupně defoliace
- Tabulka 7: Charakteristika výzkumných ploch
- Tabulka 8: Označení vzorků
- Tabulka 9: Korelační koeficienty pro první derivaci spektra CP - lignin
- Tabulka 10: Korelační koeficienty pro spektrum s odstraněným kontinuem CP - lignin
- Tabulka 11: Vlnové délky s nejvyšším korelačním koeficientem (CP)
- Tabulka 12: Vlnové délky s nejvyšším korelačním koeficientem (CP)
- Tabulka 13: Korelační koeficienty pro vlnové délky z integrační sféry a lignin
- Tabulka 14: Korelační koeficienty pro vlnové délky z integrační sféry a karotenoidy
- Tabulka 15: Korelační koeficienty pro spektra integrační sféry a vodu



Tabulka 16: Korelační koeficienty pro první derivaci spektra obrazových dat APEX  
Tabulka 17: Základní parametry datových souborů  
Tabulka 18: Výsledky modelu „méně vlnových délek než vzorků“  
Tabulka 19: Výsledky modelu „1 : 10“  
Tabulka 20: Výsledky modelu „méně vlnových délek než vzorků“ pro obrazová data  
Tabulka 21: Výsledky modelu „1 : 10“ pro obrazová data  
Tabulka 22: Průměrné „laboratorní“ a „obrazové“ hodnoty obsahu ligninu pro jednotlivé plochy  
Tabulka 23: Výsledky validace modelů pro 1. derivaci spektra  
Tabulka 24: Vlnové délky použité do regresní rovnice  
Tabulka 25: Charakteristiky jednotlivých výzkumných ploch  
Tabulka 26: Výsledky hodnocení výzkumných ploch pomocí testu ANOVA

## Seznam grafů

Graf 1: Korelogram pro spektrum integrační sféry a lignin  
Graf 2: Spektrum obrazových dat  
Graf 3: Upravené spektrum obrazových dat  
Graf 4: Srovnání obsahu karotenoidů s obsahem chlorofylu  
Graf 5: Spektra pořízená kontaktní sondou  
Graf 6: Korelogram pro obsah ligninu a základní spektrum kontaktní sondy  
Graf 7: Spektra pořízená integrační sférou  
Graf 8: Srovnání spekter z CP a IS  
Graf 9: P-hodnoty modelu ANOVA  
Graf 10: Závislost C na humusu  
Graf 11: P-hodnoty pro vlnové délky z kontaktní sondy  
Graf 12: P-hodnoty pro vlnové délky z integrační sféry  
Graf 13: P-hodnoty pro vlnové délky z obrazových dat APEX

## Seznam boxů

Box 1: Výpočet korelačního koeficientu v programu R  
Box 2: Výpočet kritické hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu  
Box 3: Skript pro výpočet vícenásobné krokové regrese  
Box 4: Náhodný výběr  
Box 5: Výpočet jednoduché a mnohonásobné lineární regrese v programu R

## Seznam použitých zkratk

AISA:	Airborne Hyperspectral Imaging System
ANOVA:	Analysis of Variance
APEX:	Airborne Prism Experiment
ASAS:	Advanced Solid-state Array Spectroradiometer
ASD:	Analytical Spectral Devices
AVIRIS:	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
BRDF:	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CR:	Continuum Removed
DART:	Discrete Anisotropic Radiative Transfer
DPZ:	Dálkový průzkum Země
ESA:	European Space Agency
GPS:	Global Positioning System
KRNAP:	Krkonošský národní park
LIBERTY:	Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
NDLI:	Normalized Difference Lignin Index
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
NIR:	Near-Infrared
PCA:	Principal Component Analysis
PCR:	Principal Components Regression
PLSR:	Partial Least Squares Regression
PROSPECT:	Leaf Optical Properties Spectra
SMLR:	Stepwise multiple linear regression
SWIR:	Short Wave Infrared
VIS:	Visible

## 1 ÚVOD

Krkonoše jsou nejvyšším pohořím nejen České republiky, ale i střední Evropy severně od Alp. Navzdory malé rozloze a nízké nadmořské výšce oplývají mimořádnou pestrostí krajiny, flóry a fauny, která zdaleka přesahuje přírodní rozmanitost okolních evropských středohor. (KRNAP, 2010) K nejcenějším ekosystémům Krkonošského národního parku (KRNAP) patří původní horské smrčiny a podstatná část druhotných horských květnatých luk (Cudlín, 1995). Smrkové porosty a luční společenstva jsou zároveň plošně nejrozsáhlejšími ekosystémy na území KRNAPu.

Tato práce pojednává o využití spektroskopických metod a hyperspektrálních dat pro odhad obsahu ligninu v jehlicích smrku ztepilého (*Picea abies* L. Karst.) v horských smrčinách Krkonošského národního parku. Lignin je jedna z hlavních složek buněčné stěny rostlinných buněk, která zajišťuje mechanické zpevnění buněk a také odolnost proti různým typům stresu rostlin, jako je např. zasolení, vodní deficit či těžké kovy (Moura et al., 2010). V závislosti na faktorech vnějšího prostředí se mění obsah ligninu v listoví, proto bývá obsah ligninu využíván jako jeden z nespecifických indikátorů časně fáze stresu rostlin (Lewis a Yamamoto, 1990). Horské smrkové ekosystémy Krkonoš byly od konce 50. let 20. století vystaveny zvýšené úrovni znečištění ovzduší, zejména oxidem siřičitým. Krkonoše se spolu s Krušnými a Jizerskými horami v 70. a 80. letech nacházely v tzv. Černém trojúhelníku, tedy v nejméně postižené oblasti ve střední Evropě (Vacek a Podrázský, 2007). Dlouhotrvající znečištění ovzduší spolu s extrémními klimatickými podmínkami vedlo na konci 70. a během 80. let k jejich masivnímu rozpadu a odumírání (Vacek et al., 2007). První výraznější poškození smrkových porostů Krkonoš se projevilo po klimatickém zvratu v březnu 1977, dále pak počátkem roku 1979 a v souvislosti s kalamitou obaleče modřínového (Vacek a Podrázský, 2007).

Pro monitoring rozsáhlých cenných území jsou v současné době běžně používány data a metody dálkového průzkumu Země. V mnohých studiích bylo prokázáno, že s využitím hyperspektrálních dat je možné určovat množství některých biochemických látek v rostlinách. Jedná se například o lignin (Soukupová et al., 2002, Curran et al., 2001, Serrano et al., 2002, Takahashi et al., 2004), chlorofyl (Schlerf et al., 2010; Hernandez-Clemente et al. 2012), karotenoidy (Hernandez-Clemente et al., 2012) nebo vodu (Kokaly et al., 2009). Spektrální projevy jednotlivých sloučenin se ale mohou překrývat, jako např. lignin a různé fenolické látky (Soukupová et al., 2002) nebo chlorofyl a karotenoidy (Hernandez-Clemente et al., 2012). Největší problém ovšem nastává se spektrálním projevem vody, která má několik absorpčních vrcholů napříč celým infračerveným spektrem (Kokaly & Clark, 1999; Ramoelo et al., 2011).

K determinaci biochemických látek se používají různé spektroskopické a statistické metody využívající spektrální data, například mnohonásobná kroková lineární regrese, analýzy hloubky spektrálních příznaků, jednoduché poměry spektrálních pásem a další (Kokaly a Clark, 1999).

U látek, jejichž selektivní absorpce se vzájemně překrývají s dalšími parametry (karotenoidy - chlorofyly, celulóza - lignin - fenolické látky) nebo nevykazují tak výraznou hloubku, jsou postupy pro jejich přesné kvantitativní stanovení s pomocí obrazové spektroskopie stále poměrně málo prozkoumány. Přestože o predikci obsahu ligninu v listoví různých typů vegetace se pokoušelo mnoho autorů (Curran et al., 2001; Kokaly et al., 2009; Serrano et al., 2002; Soukupová 2002), vlnové délky, které byly těmito autory využity a doporučeny, se liší také v závislosti na rostlinném druhu, a vztah mezi spektrálními vlastnostmi listoví a obsahem ligninu v listoví je stále nejasný. Hlavní příčina může být vysvětlena rozdílem v biochemické podstatě ligninu, který je komplexem různých heterogenních polyfenolických složek, jejichž podíl je v různých rostlinách rozdílný (Buchanan et al., 2000).

V této práci byla využita jak spektrální data změřená v laboratoři, tak data získaná letecky. Pro laboratorní spektrometrii byly použity vzorky jehlic smrku ztepilého získané při terénní kampani v Krkonoších v červnu 2012. Měření byla provedena jak kontaktní sondou v červnu 2012, tak integrační sférou rovněž v červnu 2012 v Praze v laboratoři katedry experimentální biologie rostlin s využitím spektrometru ASD FieldSpec 4 Wide-Res. Letecká hyperspektrální data byla pořízena spektrometrem APEX v září 2012. Dále byly za spolupráce Katedry experimentální biologie rostlin, Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze laboratorně stanoveny obsahy ligninu, chlorofylu, karotenoidů a vody ze vzorků jehlic smrku ztepilého.

## 1.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce bylo analyzovat reflektanční křivky jehlic smrku ztepilého, vyhledat oblasti spektra charakteristické pro absorpci ligninu a určit závislost mezi laboratorně stanoveným obsahem ligninu a jeho spektrálním projevem. Na základě této závislosti vytvořit a validovat model pro predikci obsahu ligninu v listoví. K řešení tohoto cíle byly využity a) různé metody zpracování spekter např. odstranění kontinua (CR - continuum removal) nebo derivace spektra a za b) vícenásobná kroková lineární regrese.

Dalším cílem práce bylo porovnat laboratorní spektra získaná dvěma způsoby: měřením kontaktní sondou a v integrační sféře, vyhodnotit rozdíly v měření těmito dvěma způsoby a posoudit, který způsob měření je vhodnější pro hledání vztahu mezi laboratorně

a spektroskopicky stanoveným obsahem biochemických/biofyzikálních látek/parametrů (lignin, karotenoidy, obsah vody).

Okrajově by se práce měla zabývat také analýzou závislosti obsahu ligninu, případně dalších látek (např. karotenoidů, obsahu vody), ve smrkových porostech na podmínkách prostředí (půdní charakteristiky, nadmořská výška, expozice apod.) a vlivu těchto faktorů na spektrální projev jehlic smrku ztepilého.

Dalším záměrem bylo analyzovat vztah mezi biochemickými a biofyzikálními parametry listoví smrku ztepilého a jejich odrazivostí, což bylo provedeno jak s použitím dat laboratorní spektroskopie tak dat získaných z leteckého senzoru APEX.

Výstupem práce je ligninová mapa zájmové oblasti Krkonoš a návrh metody pro odhad obsahu ligninu, karotenoidů a vody v jehlicích smrku ztepilého na základě spektrálních informací.

## 2 URČOVÁNÍ OBSAHU BIOCHEMICKÝCH LÁTEK Z HYPERSPEKTRÁLNÍCH DAT

### 2.1 Dálkový průzkum Země

Data dálkového průzkumu Země (DPZ) jsou běžně používána pro určení charakteristik vegetace, minerálů a ostatních materiálů na povrchu Země. Přestože metody dálkového průzkumu Země jsou považovány za velmi efektivní, je stále kladen velký důraz na posilování a rozvíjení nových metodik. S rozvojem satelitních a leteckých senzorů je možné sledovat oblasti na Zemi, které původně nebylo možné monitorovat. Mapování vegetace je prováděno na rozsáhlých plochách a data jsou dnes pravidelně aktualizována (Kumar et al., 2006). Je to jediný způsob jak pozorovat celou planetu a monitorovat změny v přírodě, které probíhají v průběhu času na povrchu naší planety. DPZ pomocí satelitů a leteckých senzorů umožňuje provádět měření v požadovaném prostorovém a časovém rozlišení (Piwowar a kol., 1998).

#### 2.1.1 Stručný princip DPZ

Nositel informací v DPZ je elektromagnetické záření tvořené elektromagnetickými vlnami. Základním fyzikálním jevem, na kterém je celý princip dálkového průzkumu založen, je interakce elektromagnetického záření se zkoumaným látkovým objektem. Informace o průběhu této interakce udává jediná fyzikální veličina – energie výsledného záření neboli zářivá energie. Podle způsobu, jakým látka odráží nebo vyzařuje záření různých vlnových délek, který je typický pro každý objekt nebo látku, dokážeme určit, o jakou látku se jedná (Kolář, 2008). Když elektromagnetické záření dopadne na povrch objektu, je buď absorbováno nebo propuštěno nebo se odrazí. Odrazivost je definována jako poměr intenzity odraženého záření k intenzitě ozáření. Intenzita záření dopadajícího i odraženého závisí na směru,  $\theta$  je zenitní úhel a  $\varphi$  je azimut směru záření dopadajícího z prostorového úhlu  $\Omega$  a měřenou plochu. Úhly  $\theta_1$  a  $\Phi_1$  určují směr odraženého záření měřeného v prostorovém úhlu  $\Omega_1$  (Meer, 2006). Elektromagnetické záření je ovlivněno prostředím zemské atmosféry, kterou prochází cestou od objektu k měřicímu zařízení a také od Slunce k povrchu Země. Zemská atmosféra pohltí část nesené energie, nebo ji rozptýlí do jiných směrů. Velikost absorpce a rozptylu závisí na vlnové délce záření, na délce dráhy procházející atmosférou a na okamžitém stavu zemské atmosféry. Rozptyl zvyšuje hodnoty naměřeného záření především v kratších vlnových délkách. Absorpce je způsobena určitými plyny obsaženými v atmosféře, a to především plynnými molekulami oxidu uhličitého a vody, které pohlcují energii v určitých intervalech vlnových délek (Kolář, 2008).

Tabulka 1: Spektrální obory dálkového průzkumu Země

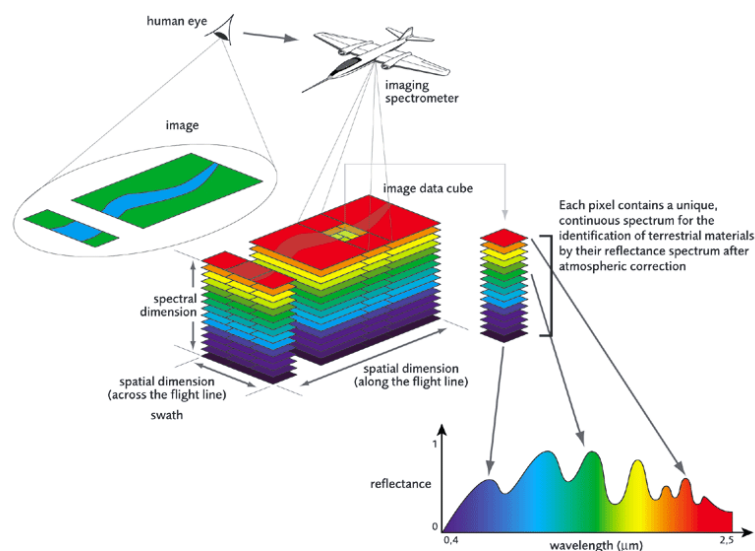
Spektrální obor	Vlnový rozsah
ultrafialové záření (UV)	0,1 až 0,4 $\mu\text{m}$
viditelné záření (V)	0,4 až 0,7 $\mu\text{m}$
infračervené záření blízké (NIR)	0,7 až 1,4 $\mu\text{m}$
infračervené záření střední (SWIR)	1,4 až 3 $\mu\text{m}$
tepelné záření (TIR)	3 $\mu\text{m}$ až 1 mm
mikrovlnné záření (MW)	1 mm až 1m

Zdroj: Kolář, 2008

### 2.1.2 Stručný princip spektroskopie

Data z multispektrálních senzorů ukázala, že mohou být užitečná v mnoha směrech, ale také že mají svá omezení. Šířky pásem mohou být kolem 100 až 200 nm a pásma nejsou spojitá, tedy jejich největším omezením je počet kanálů a široká pásma, ve kterých je spousta informací o odrazivosti rostlin (povrchu) ztracena průměrováním. Multispektrální senzory průměrují odrazivost v širokém rozsahu, tím se ztrácejí úzké spektrální vlastnosti a jsou maskovány nebo ztraceny kvůli jiným, silnějším vlastnostem v jejich okolí (Kumar et al., 2006).

Hyperspektrální senzory snímají v úzkých (od 1 nm šířky) na sebe navazujících pásmech, což umožňuje detekovat jemné rozdíly povrchových vlastností, které by jinak maskovala široká pásma multispektrálního skeneru (Mutanga, 2009). Obrazy snímané s vysokým spektrálním rozlišením podávají informace o hodnotě odrazivosti každého pixelu obrazu (Meer, 2006).



Obrázek 1: Obrazová spektroskopie

Zdroj: APEXesa (2013)

Obrazová spektroskopie umožňuje sběr dat s vysokým spektrálním rozlišením. Síla spektroskopie spočívá v dostupnosti velkého počtu úzkých a navazujících spektrálních pásem, což umožňuje odhalit jemné rozdíly v odrazivosti povrchových vlastností (např. druhy vegetace) (Mutanga 2009).

Stanovení chemického složení objektů na zemském povrchu (např. horniny půda, vegetace) je konvenčně stanovováno laboratorními chemickými metodami. Spektroskopie představuje rychlejší a mnohdy levnější alternativu těchto laboratorních analýz. Další výhodou spektroskopie je fakt, že spektrometry lze použít jak ze vzduchu (letecké spektrometry), z vesmíru (družicové spektrometry), tak i z povrchu Země (Meer, 2006). Obrazová spektroskopie je schopná dodávat detailní spektrální informace o rostlinném pokryvu. Využívá úzká (1–10 nm) pásma místo širokých (50–200 nm), což znamená nový potenciál pro dálkový průzkum Země aplikovaný na vegetační pokryv. Při studiu radiometrické odpovědi rostlinného pokryvu bylo prokázáno, že 90 % informací o rostlinném porostu je obsaženo v červeném a infračerveném pásmu (Guyot, 1992).

## Spektroskopie

Základem spektroskopie jsou spektrální vlastnosti materiálů, což jsou vlastnosti, které specifikují odpověď materiálů na všech vlnových délkách (Suits, 1983, cit in Kumar, 2006). Spektrální vlastnosti charakterizují materiál složený z molekul v plynném, tekutém nebo pevném stavu. Záření generované z molekuly je charakterizováno typem molekuly. Molekuly,



jako jsou např. oxid uhličitý nebo voda, mají velký počet rozdílných charakteristických frekvencí (Kumar, 2006).

Spektrometrie se zabývá měřením energie fotonů jako funkce vlnové délky. Přímé měření je prováděno se spektrografickými zařízeními, jako jsou letecký skener nebo laboratorní spektrometr. Spektrometr je optický nástroj pro měření elektromagnetického záření emitovaného z cíle v jednom nebo více pásmech vlnových délek, nebo sekvenčně napříč celým spektrem (Kumar, 2006).

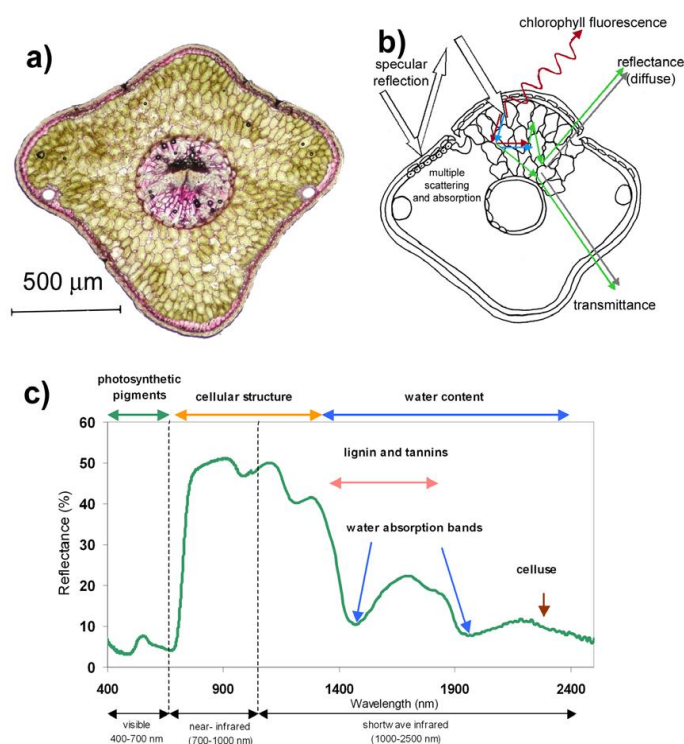
### **Odraživé vlastnosti materiálů**

Absorpci fotonů způsobí změna z jednoho energetického stavu do vyššího. K emisi fotonů dochází v důsledku změny energetického stavu na nižší. Foton nikdy není emitován na stejné vlnové délce, jako je absorbován, a proto se mohou objevit absorpční vlastnosti na jiných vlnových délkách, než byla frekvence původního stavu. Vegetace, tedy všechny zelené rostliny, využívají při procesu fotosyntézy sluneční záření jako zdroj energie pro zabudování uhlíku do organických látek. Vzhledem k tomu, že jde o proces relativně dost energeticky náročný, většina záření absorbovaná rostlinami je charakterizována krátkými vlnovými délkami (VIS - červená, modrá + NIR) (Kumar, 2006).

### **Odraživé vlastnosti vegetace**

Záření přicházející od Slunce je primárním zdrojem energie pro většinu biologických procesů v rostlině. Interakce mezi sluneční energií a rostlinou může být rozdělena do tří kategorií: termální efekty, fotosyntetické efekty a fotomorfogenetické efekty. Přes 70 % přichozího záření je absorbováno a rostlinou přeměněno na teplo (využito pro zachování teploty rostliny a pro transpiraci (Slatyer, 1967 cit in Kumar, 2006). Optické vlastnosti vegetace ve viditelné a infračervené části spektra závisejí na mnoha faktorech, z nich ty nejdůležitější jsou: povrchová struktura listu (přítomnost vosků, trichomů) a biochemické složení listoví (obsah chlorofylu, karotenoidů), v blízké infračervené části spektra pak přichází v úvahu vliv dalších biochemických látek jako je lignin, fenolické látky, dále obsah vody, obsah sušiny a vnitřní struktura listu (Gates et al., 1965). Sluneční záření dopadající na povrch listu je buď odraženo, absorbováno nebo propuštěno. Poměr závisí na vlnové délce záření, úhlu dopadu, drsnosti povrchu a na rozdílných optických vlastnostech a obsahu biochemických látek v listu. První kontakt přichozího záření je s povrchem listu - pokožkou. Některé listy mají na pokožce silnou kutikulu, vosk nebo chloupky, které ovlivňují zejména podíl dopadajícího záření, který se dál

dostane do kontaktu s dalšími pletivy listu. Vlastnosti povrchu listu mění především velikost takzvané zrcadlové odrazivosti, jejíž spektrální složení se výrazně neliší od dopadajícího záření (Gates et al., 1965). Záření, které je absorbováno nebo propuštěno listem, je závislé na vlnové délce (Kumar, 2006).



a) příčný řez jehlicí smrku ztepilého obarvený floroglucinolem pro rozlišení ligninu (červená barva v buněčných stěnách)

b) interakce slunečního záření s tkání jehlice.

c) křivka odrazivosti jehlice smrku ztepilého. Barevné šipky ukazují oblasti spektra je možné určit biochemické a strukturální vlastnosti jehlice

Obrázek 2: Interakce slunečního záření s tkání jehlice a optické vlastnosti jehlice

### Odrazivost (400–700 nm)

Spektrální projev vegetace ve viditelné části spektra je charakteristický nízkými hodnotami odrazivosti a propustnosti, což je způsobeno silnou absorpcí fotosyntetických pigmentů obsažených v listu (Kumar, 2006). Odrazivé vlastnosti vegetace ve viditelné části spektra jsou tedy zejména dány absorpčními vlastnostmi fotosyntetických pigmentů, jako je u vyšších rostlin chlorofyl *a* a chlorofyl *b*, které absorbují modré a červené záření, konkrétně absorpční maxima ve vlnových délkách v 660 a 680 nm (Meer, 2006). Chlorofyl absorbuje modré a červené záření, které využívá pro fotosyntézu. Zelené světlo absorbováno není, proto většinu rostlin vnímáme jako zelené (Kumar, 2006).

### **Red edge (690–720 nm)**

Charakteristická oblast spektrálního projevu vegetace a nejstudovanější oblast ve spektrální křivce se nachází na přechodu viditelného (červeného) a infračerveného regionu elektromagnetického spektra a je označována jako "červený okraj" - anglicky "red edge". Oblast *red edge* je charakteristická nízkou odrazivostí v červené části spektra způsobené absorpcí chlorofylu a vysokou odrazivostí kolem 800 nm, která souvisí s vnitřní strukturou listu (Gates et al., 1965) a obsahem vody (Kokaly a Clark, 1999). Tato oblast je široká asi 30 nm (Kumar, 2006).

### **NIR (700–1 300 nm)**

Vegetace má v NIR oblasti spektra vysokou odrazivost a propustnost listu. Na rozdíl od viditelného spektra není záření v NIR části spektra využito pro fotochemické reakce a není ani absorbováno chlorofyly a ostatními pigmenty. Odrazivost v NIR závisí hlavně na vnitřní struktuře listu a koreluje s množstvím mezibuněčných vzduchových prostor (Kumar, 2006) a velikostí plochy vnitřního povrchu listu (Slaton et al., 2001). Kromě uspořádání pletiv a buněk má zásadní vliv na odrazivost listoví v NIR i biochemické složení buněčných stěn, např. obsah celulózy a ligninu (Kokaly et al., 2009) a obsah vody v listoví (Kokaly a Clark, 1999).

Spektroskopie se vztahuje i na údaje získané leteckým nebo kosmickým obrazovým spektrometrem a na analytické metody používané na takto získaná data (Vane et al., 1993). Výhodou spektroskopického měření je možnost využití absorpčních oblastí pro rozlišení charakteristických tvarů křivky na jednotlivých vlnových délkách, které mohou souviset s materiálem vyskytujícím se v pixelu. Tento materiál je díky absorpcím charakteristickým daným chemickým složením možné identifikovat. Hodnota odrazivosti na jednotlivých vlnových délkách může odhalit chemické složení a fyzikální vlastnosti materiálu. Všechna vegetace obsahuje některé stejné základní složky, zahrnující např. chlorofyly a další světlo absorbující pigmenty (např. karotenoidy), vodu, proteiny, škroby, vosky a strukturální biochemické molekuly, jako jsou lignin a celulóza (Elvidge, 1990). I když do určité míry je biochemické složení listoví univerzální, stejně je spektrální signál závislý na rostlinném druhu, případně podmínkách prostředí, ve kterém daný druh roste (Kokaly et al., 2009).

## **2.2 Hyperspektrální data a senzory**

K měření odrazivosti je využíváno různých spektrometrů spojených případně s dalším vybavením uzpůsobeným pro práci s daným typem objektu (např. půda, horniny, listoví). Následující text se bude přímo věnovat spektrometrům a jejich příslušenství (kontaktní sonda, integrační sféra), které byly využity pro měření odrazivosti v této práci. Pozornost bude nejprve

zaměřena jak na spektroskopii kombinovanou s leteckým DPZ, dále se budu věnovat laboratorní spektroskopii listoví.

Hyperspektrální obrazové spektrometry získávají pro studium zemského povrchu sérii navazujících a úzkých spektrálních pásem (v rozsahu 380 až 2500 nm) (Meer, 2006). Obrazové spektrometry byly po několik let využívány pouze pro vojenské účely k detekci maskovaných objektů od skutečné vegetace. První obrazový spektrometr *Scanning Imaging Spectroradiometer* (SIS) byl postaven v 70. letech americkou kosmickou agenturou (NASA). První civilní letecká spektrometrická data byla získána v roce 1981. Od roku 1987 začala NASA operovat se systémem AVIRIS (letecký VIS/NIR obrazový spektrometr). Od této doby začal rapidní vývoj obrazových spektrometrů. Příkladem je např. finský spektrometr AISA, ASAS vyvinutý agenturou NASA, australský HyMAP (Meer, 2006).

Hyperspektrální data jsou specifická velkým počtem úzkých na sebe navazujících pásem. Skenery jsou schopné snímat až stovky pásem (AVIRIS 224 pásem, AISA 288 pásem, HyMAP 126 pásem). Šířka pásem se u některých spektrometrů pohybuje mezi 10 a 20 nm. Spektrální rozsah se liší pro každý spektrometr (např. AVIRIS od 400 do 2 500 nm, AISA od 430 do 900 nm, HyMAP od 400 do 2 500 nm) (Meer, 2006).

### 2.2.1 APEX (Airborne Prism EXperiment)



Obrázek 3: APEX

Zdroj: APEXesa

V této práci byla použita data z leteckého obrazového hyperspektrálního spektrometru APEX. APEX je navržený a vyvinutý ESA-PRODEX (Programme pour le développement des expériences) a švýcarsko-belgickým konsorciem. Plánování APEX začalo v roce 1993, snímky pak aktivně pořizuje od léta 2001. APEX pracuje v rozsahu vlnových délek od 380 do 2 500 nm s 313 volně nastavitelnými pásmy (až 534 pásem v celém spektrálním módu) s prostorovým rozlišením

od 2 do 5 m (APEXesa, 2013). APEX je zaměřený na pozorování Země, zejména na studium procesů na zemském povrchu, např. monitorování vodních par, územní monitorování nebo detekce lesních požárů.

APEX se skládá z několika dílčích jednotek: z optické sub-jednotky zahrnující citlivou optiku, která je klíčovým prvkem tohoto nástroje. Platforma je řízena navigačním systémem, který obdrží informace o orientaci z inerciální měřicí jednotky. Orientace a informace o poloze jsou následně synchronizovány s obrazovými daty. Přístroj je teplotně a tlakově stabilizovaný (APEXesa, 2013).

Světlo do spektrometru vstupuje přes zakřivenou štěrbinu. Kolimátor přesměrovává světlo směrem k děliči, který odděluje VNIR vlnové délky (380–1 000 nm) od SWIR vlnových délek (950–2 500 nm). Lze zaznamenat až 335 pásem ve VNIR a 199 pásem ve SWIR (APEXesa, 2013).

Tabulka 2: parametry senzoru APEX

<b>Spektrální rozsah</b>	VNIR	380,5–971,7 nm
	SWIR	941,2–2 501,5 nm
<b>Spektrální rozlišení</b>	VNIR	0,7–9,7 nm
	SWIR	6,2–12 nm
<b>Spektrální pásma</b>		více než 532 (základ: 312)

Zdroj: APEXesa (2013)

V poslední době se využívá propojení dálkového průzkumu Země s metodami laboratorní spektroskopie, což bylo využito v několika studiích (Kokaly et al., 2002, Kokaly et al., 2009, Soukupova et al., 2002 a další). Laboratorní spektrometry v kombinaci s dalším specializovaným vybavením mohou měřit optické vlastnosti čerstvých listů např. přímo v terénu, v tomto případě se často využívá měření kontaktní sondou, nebo integrační sférou v laboratoři. Pro měření spekter sušiny se využívají laboratorní spektrometry (např. NIRS nebo ANTARIS). Laboratorní spektrometry mohou pracovat ve spektrálním rozsahu od 350 do 2 500 nm. Šířka pásem se pohybuje od 0,5 nm do 20 nm.

### 2.2.2 Spektrometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res

Pro měření spekter listoví v laboratoři byl využit spektrometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res dodávaný firmou ASD Inc. Spektrometr umožňuje měření v plném rozsahu (VIS/NIR), tzn. od 350 nm do 2500 nm, spektrální rozlišení je 3 nm při 700 nm a 30 nm při 1400/2100 nm,

vzorkovací interval je 1,4 nm při 350–1 050 nm a 2 nm při 1 000–2 500 nm. Měření reflektance pomocí spektrometru slouží jednak pro kalibraci povrchové odrazivosti, pro metody letecké zobrazovací spektroskopie (měření odrazivosti kalibračních povrchů přímo v terénu). Zároveň slouží jako laboratorní spektroradiometr a používá se společně s kontaktní sondou (contact probe) nebo integrační sférou (integrating sphere) (ASDweb, 2013) pro měření optických vlastností na úrovni výhonů či listu.

### **Kontaktní sonda (CP)**



*Obrázek 4: ASD Contact Probe*

*Zdroj: ASD web (2013)*

Kontaktní sonda je vytvořena pro kontaktní měření pevných čerstvých i suchých materiálů, jako jsou minerály, půda, obilniny a další zrnité materiály. Lze ji využít i k měření odrazivosti čerstvých vzorků listoví. V takovém případě je nevýhoda kontaktní sondy skutečnost, že získáme pouze reflektanci vzorku listu, nikoliv jeho transmitanci. Kontaktní sonda má vlastní zdroj světla a jeho intenzita se liší u modelů určených pro snímání vzorků neživých a vzorků čerstvé vegetace, kdy sonda pro snímání odrazivosti vegetace používá slabší intenzitu záření, aby se zamezilo přehřívání a degradaci vzorků. Konstrukce kontaktní sondy byla vyvinuta pro minimalizaci chyby měření spojené s rozptýlením světla (ASDweb, 2013).

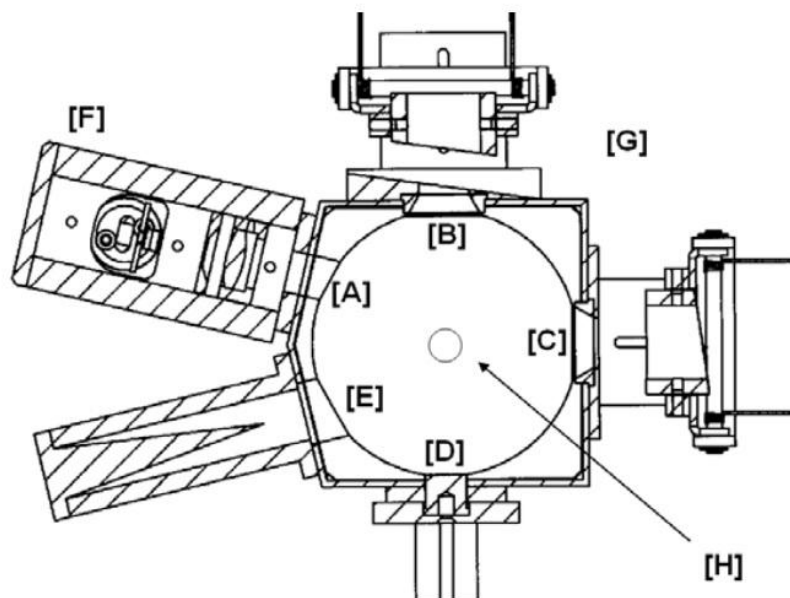
## Integrační sféra (IS)

Integrační sféra je vytvořena pro měření záření, které může být odraženo nebo propuštěno vzorkem (relektance, transmitance vzorku). Integrační sféra sbírá záření odražené od vzorku přes celou hemisféru (hemisférická reflektance). Integrační sféra díky své vnitřní difuzi odrazu a integraci energie není citlivá na směr odraženého záření od vzorku, v důsledku toho podává opakované „zprůměrované“ hodnoty odrazivosti (ADS Manual, 2008).

Vnitřek integrační sféry je vytvořen ze zenith-difuzního polymerového materiálu. Zenith je vysoce reflexní (> 95 %), poskytuje tedy maximální účinnost a optický výkon. Speciálně navržená žárovka slouží jako světelný zdroj blízký slunečnímu světlu. Integrační sféra shromažďuje veškeré záření odražené nebo propuštěné vzorkem, které se rovnoměrně šíří po celé sféře (ASD manual, 2008).

Integrační sféra použitá v této práci je navržena tak, aby se dala použít společně se spektrometrem ASD FieldSpec 4 Wide-Res (ASD manual, 2008).

Základ sféry obsahuje šest portů, které mají držáky pro vkládání vzorku, pro montáž světelného zdroje, světelné pasti, záslepy portu atd. (ASD manual, 2008).



Obrázek 5: Schéma integrační sféry

Zdroj: ASD manual (2008)

## 2.3 Vybrané biochemické látky v listovní ovlivňující jeho optické vlastnosti

Chemické vlastnosti vegetace mohou posloužit pro získání informací o funkční a biologické diverzitě v ekosystému. Obrazová spektroskopie je jednou z nejdůležitějších technologií pro získávání informací o biochemii rostlin ve větším prostorovém měřítku. Několik prací se zabývalo odvozením obsahu fotosyntetických pigmentů, vody, celulózy a ligninu z odrazivosti ve viditelném a infračerveném spektru (např. Curran, 1989; Kokaly et al., 2009; Ustin et al., 2009). V současné době se studie zaměřují na odhadování obsahu N, ligninu a dalších chemických složek v korunách stromů nebo travinných porostů (Asner et al., 2011; Skidmore et al., 2010). Spektrální vlastnosti listovní jsou podmíněny jeho chemickým složením, tedy obsahem takových biochemických látek v listu, které absorbují záření. Obrazová spektroskopie se zabývá odhadem koncentrace dusíku, ligninu a dalších chemických složek v listu a lesních korunách.

### 2.3.1 Lignin

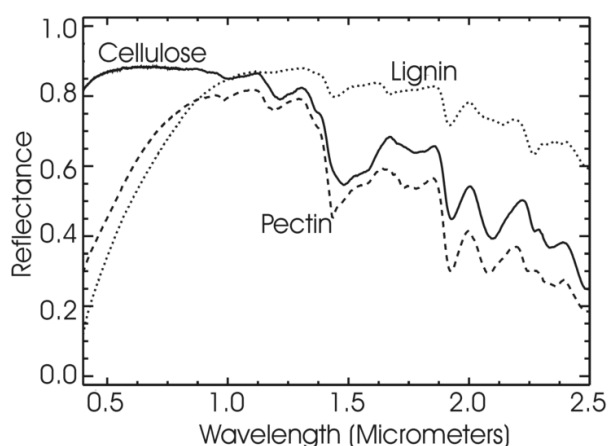
Lignin je heteropolymer složený s fenolických alkoholů (coniferyl, synapyl a p-kumaryl alkohol), jeho přesná struktura ve smyslu konkrétního uspořádání a podílu jednotlivých fenolických alkoholů není přesně známa a liší se mezi různými skupinami rostlin (např. trávy, jehličany) (Buchanan, 2000; Moura et al., 2010). Syntéza ligninu - lignifikace - probíhá v buněčných stěnách. Lignin je primární složka rostlinné buněčné struktury a je po celulóze nejhojnější organickou substancí na Zemi.

Z funkčního hlediska lignin dodává pevnost buněčné stěně (mechanická podpora, stání rostlin), umožňuje transport vody rostlinnými cévami. Hraje hlavní roli při obraně proti patogenům, hmyzu a dalším herbivorům (Hatfiel et al., 2005). Obsah ligninu v listovém opadu je důležitý z hlediska biochemických cyklů prvků - lignin je těžko rozložitelná látka a meziproducty jeho degradace mnohdy inhibují činnost půdní mikroflóry a zpomalují tak obrat živin. Část ligninu je rozpustná ve vodě, je odplavována pryč a další část je akumulována v půdě jako hlavní součást organické matrice (Takahashi, 2004). Ligniny představují zdroj rozpuštěného organického uhlíku pro lesní půdy (Albrechtová et al., 2008).

Zastoupení ligninu v listech rostlin se pohybuje kolem 15 % v travinách a 24 % v jehličnatých stromech. Různé typy abiotických stresů, jako je deficit minerálních živin, sucho, ultrafialové-B záření (UV-B) a nízká teplota, stejně jako biotické stresy, jako jsou houbová infekce, bakterie a viry, způsobují změny obsahu ligninu v rostlině. Nižší obsah ligninu byl zaznamenán u rostlin trpících vodním stresem, signifikantně vyšší obsah ligninu zase u rostlin s mechanickým poškozením tkáně (Moura et al., 2010).



Díky své aromatické struktuře je lignin schopen absorbovat záření a tím ovlivňuje optické vlastnosti listové zejména v krátkovlnném infračerveném pásmo spektru s vrcholem kolem 2 110 nm (Morris et al., 2008). Dle Meera (2006) se absorpční vlastnosti ligninu nacházejí na vlnových délkách 1 450, 1 680, 1 930, 2 050–2 140, 2 270, 2 330, 2 380 a 2 500 nm. Některé látky se mohou spektrálně projevovat podobně jako lignin, např. spektrální projevy celulózy a taninu jsou velmi podobné, lignin má též podobné projevy s fenolickými a polyfenolickými látkami (Soukupová et al., 2002). Podle Kokalyho et al. (2009) obsah ligninu koreluje s vlnovou délkou 1 750 nm.



Obrázek 6: Spektrální projevy složek buněčné stěny

Zdroj: Meer (2006)

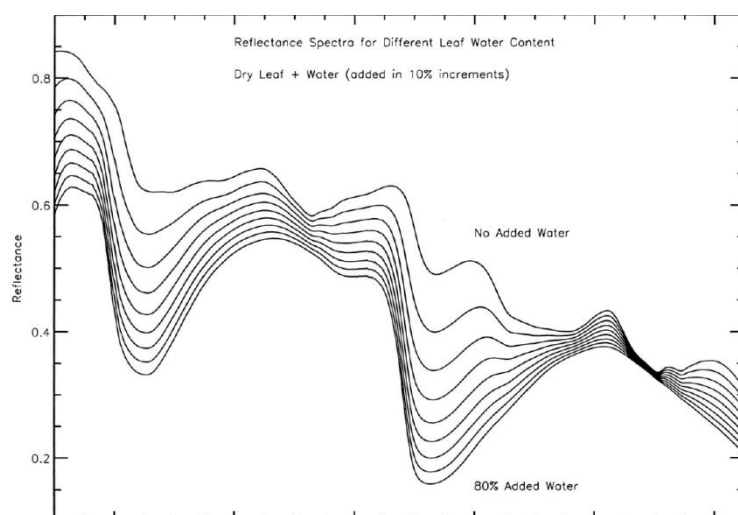
Tabulka 3: Přehled vlnových délek použitých pro výpočet obsahu ligninu v několika studiích

Autor	Vlnové délky [nm]
Guo, 2010	1 116, 1 284
Soukupová, 2002	1 470, 1 688, 1 870, 1 933, 2 008, 2 143, 2 287
	1 452–1 458, 1 668, 1 846, 1 920–1 922, 2 008, 2 146–2 148, 2 272
Serrano, 2002	972, 1 599, 2 048
Curran, 2001	1 124
Kokaly a Clark, 1999	1 730, 2 100, 2 300
Kokaly, 2009	1 750
Meer, 2006	1 450, 1 680, 1 930, 2 050–2 140, 2 270, 2 330, 2 380, 2 500
Takahashi, 2004	Kyselinový detergent: 1456, 1820, 2310; acetyl-bromid: 1951

### 2.3.2 Voda

Voda je jedním z nejdůležitějších faktorů regulujících růst rostliny a vývoj ekosystému. Efekt omezení přístupu vody je evidentní v aridních a semiaridních oblastech, kde se rostliny adaptují a vytvářejí fyziologické i anatomické adaptace pro zadržení vody. U mezofytních typů listů je voda potřebná i pro udržení jeho struktury a tvaru, u všech typů listů je voda nezbytná pro termoregulaci a fotosyntézu (Kokaly et al., 2009). Obsah vody je průměrně 60 % čerstvé hmotnosti pro listy opadavých stromů a jehlice (Kokaly et al., 2009).

Obsah vody lze měřit i pomocí DPZ, a to použitím obrazové spektroskopie (v rozsahu vlnových délek od 800 do 1 300 nm). Pozorování v tomto spektrálním rozsahu může určit obsah vodní páry v atmosféře, ale i obsah vody ve vegetaci (Asner et al., 2004). Voda má několik silných absorpčních pásem, která se vyskytují v blízkém a středním infračerveném spektru, tato absorpční pásma mohou zamaskovat jemnější absorpční rysy dalších biochemických sloučenin (Soukupová et al., 2002). Meer (2006) uvádí, že se absorpce vody nachází v blízkosti vlnových délek 1 400 nm a 1 900 nm a v 970 nm, 1 200 nm a 1 770 nm. Kokaly a Clark (1999) ve své studii uvádějí, že voda má dominantní vliv na odrazivost zelených listů a korun stromů. Centra vodní absorpce jsou podle něho ve vlnových délkách 760 nm, 970 nm, 1 190 nm, 1 450 nm a 1 940 nm. Vliv absorpce vody je nejvýraznější v blízké infračervené části spektra. Spektrální projevy ostatních chemických složek jsou z velké části vodou maskovány (Kokaly a Clark, 1999). Kokaly a Clark (1999) měřili odrazivost suchých listů s přidanou vodou, pokusem bylo zjištěno, že maskování spektra suchého listu narůstá s vyšším obsahem vody (viz obrázek 7).



Obrázek 7: Spektra odrazivosti listu pro různé obsahy vody

Zdroj: Kokaly (1999)

Tabulka 4: Přehled vlnových délek použitých pro výpočet obsahu vody v několika studiích

Autor	Vlnové délky
Asner et al., 2004	800–1 300
Meer, 2006	1 400, 1 900, 970, 1 200, 1 770
Kokaly a Clark, 1999	760, 970, 1 190, 1 450, 1 940

### 2.3.3 Karotenoidy

Mezi fotosyntetické pigmenty vyšších rostlin patří chlorofyl a karotenoidy. Chlorofyly C<sub>a</sub> a C<sub>b</sub> jsou esenciální pigmenty, jež absorbují energii světla, jsou součástí světloběrných komplexů na thylakoidní membráně chloroplastu. Specifický pár molekul chlorofylu pak tvoří reakční centrum, kde dochází k oddělení elektronu a díky jeho transportu přenašeči thylakoidní membrány je zářivá energie konzervována v chemických vazbách molekuly ATP. Tato práce je zaměřena především na karotenoidy, které mají jednak funkci světloběrnou a dále hrají roli ochrannou, zejména v prostředí vysoké ozářenosti (Demmig-Adams et al., 1996). Karotenoidové pigmenty jsou různorodá skupina látek (c<sub>x</sub> a c – xantofyly a karoteny), nejčastěji jsou u vyšších rostlin reprezentovány dvěma karoteny (α- a β-) a pěti xantofyly (Hernandez-Clemente et al., 2012). Karotenoidy mají několik fyziologických funkcí přidružených k fotosyntéze zahrnující strukturální roli v organizaci fotosyntetické membrány, účastní se přesunu energie do reakčního centra. Obsah karotenoidů je známý tím, že koreluje s rostlinným stresem a fotosyntetickou kapacitou. Bylo zjištěno, že obsah některých karotenoidů roste při vysoké úrovni ozáření a vysoké teplotě okolního prostředí nebo při nástupu stárnutí listů. Xantofyly jsou zapojeny v procesu rozptýlení přebytečné energie. Na základě výše zmíněných fyziologických funkcí karotenoidů je možné využít jejich obsah, nebo jejich poměr ku chlorofylům jako nespécifický indikátor stresu rostlin (Hernandez-Clemente et al., 2012).

Absorpce chlorofylu a karotenoidů se ve viditelném spektru překrývá, proto je obtížné rozeznat chlorofyl *a* a *b* a karotenoidy *x* a *c*. Absorpce karotenoidů souvisí s významným spektrálním „peakem“ umístěným na vlnové délce 520 nm. Odrazivost byla citlivá na obsah karotenoidů na vlnových délkách kolem 510 nm (Hernandez-Clemente et al., 2012). Dle studie Hernandez-Clemente et al. (2012) se absorpce karotenoidů projevuje především na vlnových délkách od 450 nm do 555 nm a překryv chlorofylové absorpce je převážně od 550 nm do 555 nm.

## 2.4 Stanovení obsahu biochemických látek

Využitím spektroskopických metod pro stanovení obsahu biochemických látek v rostlině či porostu se již zabývalo množství studií využívajících různých senzorů či různých statistických metod. Stanovení obsahu ligninu, proteinů, celulózy, škrobu a cukrů, stejně jako základní elementární složení včetně dusíku, může být odvozeno z odrazivosti v NIR části spektra (Curran, 1989).

Stanovení obsahu chemických sloučenin včetně ligninu v jehlicích smrku ztepilého na základě odrazivosti a absorpce v blízkém infračerveném záření pomocí hyperspektrálních dat se zabývala Soukupová et al. (2002). Pozornost byla věnována tomu, že některé fenolické látky mají podobnou chemickou strukturu jako lignin a mohou mít i podobné spektrální projevy, především je zmiňována podobnost odrazivosti ligninu a celulózy, které jsou často kvantifikovány spolu, jako jeden celek. Také spektrální projevy ligninu a taninu se ukázaly jako velmi podobné. Ve studii byly použity první, druhé a třetí ročníky jehlic smrku ztepilého, jehlice byly nasbírány z dvaceti dospělých stromů v Krušných horách. Stromy se lišily viditelným poškozením, které bylo stanoveno na základě ztráty listoví, zdravé stromy (poškození 0–10 % listové ztráty) od velmi poškozených stromů (nad 90 % listové ztráty). Spektrální projevy rozpuštěného ligninu a fenolických látek byly získány ze spektrometru GER 2600 ve spektrálním rozsahu od 350 nm do 2 500 nm. Ve studii byl řešen problém predikce obsahu ligninu jak z čerstvého, tak ze sušeného rostlinného materiálu. Pro lignin se ukázaly charakteristické absorpční vlastnosti v rozmezí od 1 400 nm do 2 350 nm, centra absorpce ligninu byla v 1 470 nm, 1 688 nm, 1 870 nm, 1 933 nm, 2 008 nm, 2 143 nm a 2 287 nm. Výrazný rozdíl mezi ligninem a taninem byl pozorován v kratších vlnových délkách mezi 800 a 1 300 nm. V této spektrální oblasti odrazivost ligninu stoupá s vlnovou délkou, ale odrazivost taninu v této části spektra s rostoucí vlnovou délkou klesá. Pro predikci obsahu ligninu se většinou používají rozdílné vlnové délky, což bylo vysvětleno hlavně různorodostí a rozmanitostí ligninu nejen v rámci rostlinných druhů, ale také v rámci rostlinných orgánů a vývojových stadií rostlin.

Další studii zabývající se stanovením obsahu ligninu ze spektroskopických dat publikoval Takahashi (2004). Ve studii bylo testováno spadané listí z 22 druhů rostlin (17 bylin a 23 dřevin) různými analytickými metodami pro stanovení obsahu ligninu z hyperspektrálních dat. Porovnány byly i dvě metody extrakce ligninu, a to kyselinovým detergentem a acetyl-bromidovou metodou. Spektrální měření posbíraného listí bylo provedeno v rozsahu 800–2 500 nm. Výsledkem byly vlnové délky, které nejvíce korelovaly s obsahem ligninu získaným extrakcí kyselinovým detergentem, a to 1 456 nm (tato vlnová délka odpovídá vazbám O-H a C-H), 1 820

nm a 2 310 nm. Pro vztah mezi obsahem ligninu určeným acetyl-bromidovou metodou a odrazivostí vyšla signifikantní pouze vlnová délka 1 951 nm.

Kokaly et al. (2009) ve své studii využil obrazovou spektroskopii pro odhad obsahu nepigmentových biochemických složek ve vegetaci zahrnujících vodu, dusík, celulózu a lignin. Zde byla snaha o vytvoření modelu, který by se dal využít pro předpověď odrazivosti (spektrální projevy) vegetace a pomocí inverzního modelu odhadnout chemické složení listu. Absorpce vody je na vlnových délkách 970, 1 200, 1 450 a 1 930 nm, ve spektru je to vyjádřeno lokálními poklesy odrazivosti. Lignin koreluje s odrazivostí na vlnové délce 1 750 nm.

Mnoho biochemických procesů, jako jsou fotosyntéza, respirace, evapotranspirace a dekompozice, souvisí s koncentrací biochemických složek, jako jsou chlorofyl, voda, dusík, lignin a celulóza. Curran et al. (2001) ve své studii vyvinul metody pro odhad koncentrace 12 biochemických složek (chlorofyl a, chlorofyl b, celkový chlorofyl, lignin, dusík, celulóza, voda, fosfor, protein, aminokyseliny, nestrukturní sacharidy a škrob) z odrazivosti spektra jehlic borovice. Odhad obsahu biochemických látek v rostlinách může poskytnout hodnotné informace pro pochopení funkce ekosystému. Byly využity tři absorpce kolem 1 730, 2 100, 2 300 nm (převzato od Kokaly a Clark, 1999) pro odhad ligninu, dusíku a celulózy. Absorpce pro chlorofyl se nachází v modré a červené části spektra a absorpce vody má centra kolem 1 200, 1 400 a 1 900 nm.

Odhadem obsahu karotenoidů se ve své studii zabýval Hernández-Celemnte et. al. (2012), kteří využili indexy odvozené z odrazivosti ve viditelném oblasti spektra na úrovni listu i korun. Ve studii byly použity dva ročníky jehlic borovice. Absorpce karotenoidů byla prokázána především na vlnových délkách od 450 do 555 nm.

## 2.5 Spektrální transformační metody

Několik výše zmíněných studií pro odhad obsahu biochemických látek využívalo jak spektra základní, tak i transformovaná. Např. Guo (2012) ve své studii uvádí, že hyperspektrální dálkový průzkum Země sice podává detailní informace v malých intervalech vlnových délek, ale také generuje velký objem dat, která mohou být obtížně interpretována. Zpracování i interpretaci dat lze zjednodušit použitím algoritmů, které shrnou spektrální regiony s potřebnou informací. Pro hyperspektrální data jsou nejvíce používané transformační metody – první derivace spektra a continuum removal (vyjmutí kontinuální části spektra). První derivace spektra udává rychlosti změny v odrazivosti z jedné vlnové délky na druhou a počítá se podle rovnice:

$$R_{fd(i)} = \frac{R_{(j+1)} - R_{(j)}}{\Delta_\lambda},$$

kde  $R_{fd(i)}$  je první derivace odrazivosti ve vlnové délce  $i$  mezi vlnovým pásmem  $j$  a  $j+1$ .  $R_{(j+1)}$  je odrazivost na vlnové délce  $j+1$  a  $\Delta_\lambda$  je rozdíl ve vlnové délce mezi  $j$  a  $j+1$ .

Kokaly a Clark (1999) navrhli algoritmus pro detekci absorpční funkce a odhad obsahu biochemických látek s využitím spektroskopických metod. Pro odhad obsahu látek byla využita transformace nazývaná normalizovaná hloubka pásma vypočtená ze spektra s odstraněným kontinuem.

Normalizace hloubky pásma pomáhá překonat vliv faktorů, jako jsou atmosférická absorpce, voda a další absorbanty v listu nebo půda. Těmito faktory se odlišuje spektrum měřené laboratorně a měřené pomocí DPZ. Normalizační procedura na hloubku pásma se používá podobně jako metody pro redukci topografického a atmosférického efektu, např. u Landsatu. Normalizovaná hloubka pásma ( $D_n$ ) vypočtená ze spektra s odstraněným kontinuem je vypočtena dělením hloubky každého pásma hloubkou pásma v centru absorpce ( $D_c$ ).

$$D_n = \frac{D}{D_c},$$

kde centrum absorpce je minimální absorpce spektra s odstraněným kontinuem.

Schmid a Skidmore (2002) ve své studii zkoumali, zda je možné pomocí hyperspektrálních dat rozeznat vegetační společenstva ve viditelném a krátkovlnném infračerveném pásmu a jak dobře je možné rozeznat druhy na základě jejich spektra. Nejprve bylo statisticky testováno zda jsou vegetační typy signifikantně rozdílné v různých oblastech spektra (využili Mann-Whitney U-test). Dále bylo testováno, zda tato statistická rozdílnost může být zvýšena použitím odstranění kontinua. Odstranění kontinua je normalizační technika, jejímž výsledkem je křivka s hodnotami od 0 do 1, která zdůrazňuje hloubku individuálních absorpcí. Pro vegetaci je albedo stanoveno půdním povrchem, obsahem vody a strukturou porostu. Když je ve sledovaném prostoru rozdílný obsah pigmentů a rozdílná struktura porostu, což určuje rozdíl ve vegetaci, pak tato metoda může zvýšit možnost rozlišit jednotlivé druhy vegetace. Použití odstranění kontinua některých případech může vést ke zvýšení počtu statisticky rozdílných vlnových pásem. Výsledek studie prokázal, že použitím spektra s odstraněným kontinuem se navyšuje počet vegetačních typů, které mají statisticky rozdílné odrazivosti ve žluté části spektra, a snižují se signifikantní rozdíly v blízkém infračerveném spektru.

Thulin et al. (2012) ve své studii uvádí, že na spektrum je nečastěji aplikována derivace spektra, dále se používá matematická transformace – „logaritmus reciproké odrazivosti“ ( $\log(1/R)$ ), kde  $R$  je hodnota odrazivosti, a odstranění kontinua. Odstranění kontinua se široce používá jako praktická metoda pro izolaci absorpčních funkcí a pro predikci biochemické koncentrace v suchém materiálu i živé vegetaci. Odstranění kontinua může také zčásti limitovat projevy vodní absorpce v NIR spektru.

Tabulka 5: Matematické transformace a jejich vlastnosti, výhody a nevýhody

Transformace	Popis	Vlastnosti, <b>výhody</b> , <i>nevýhody</i>
R	Reflektance	Záře senzoru normalizovaná na přichozí záři, odstraněn atmosférický šum. <b>Absorpce snadno rozeznatelné.</b> <i>Vlnová délka závislá na odrazu objektu</i>
R-D	První derivace	Jako pro R. <b>Zvýrazňuje změny spektrálního regionu. Odstraňuje efekty způsobené osvětlením a půdním pozadím. Redukuje efekty odrazu.</b> <i>Citlivý na šum.</i>
LOG1R	Pseudo-absorbance LOG(1/R)	Algoritmus absorbance. <b>LOG1R je přibližně lineární pro absorbování chemických koncentrací.</b>
LOG1R-D	První derivace LOGR	Stejně jako LOG1R. Zvyšuje regiony rapidní změny. <b>Redukuje efekty odrazu.</b> <i>Potenciálně citlivý na šum.</i>
CR	Continuum removed R	Normalizace spektra usnadňuje porovnání absorpčních funkcí. <b>Odstraňuje vlnové délky závislé na odrazových efektech a některé efekty způsobené obsahem vody v rostlině.</b>
CR-D	První derivace CR	Jako pro CR. <b>Zvýrazňuje změny v hodnotě transformace. Redukuje efekty odrazu.</b> <i>Citlivý na šum.</i>

Zdroj: Thulin et al. (2012)

## 2.6 Statistické metody použité pro odhad biochemických látek

Pro odhad biochemických látek v rostlině bylo zpracováno již množství studií a bylo také vyvinuto několik metod, jak data zpracovat a dosáhnout nejlepšího výsledku. V této práci je využita vícenásobná kroková lineární regrese.

Takahashi (2004) ve své studii využil NIR spektrum pro generování rovnic, které sloužily pro výpočet obsahu ligninu v listech. Vlnové délky byly transformovány do prvního a druhého řádu derivace a byly použity jako vysvětlující proměnné v mnohonásobné statistické analýze. Tento empirický přístup byl založen na předpokladu, že existuje přibližně lineární vztah mezi obsahem ligninu a vlnovou délkou. Nejprve byl vypočten Pearsonův korelační koeficient pro každou vlnovou délku NIR spektra a obsah ligninu, tím byl vyjádřen lineární vztah mezi proměnnými. Korelační koeficient se může pohybovat mezi  $-1$  a  $+1$ . Pozitivní korelační koeficient znamená kladný vztah, korelační koeficient blížící se k nule značí nezávislost

proměnných. Rovnice pro výpočet obsahu ligninu byla získána pomocí vícenásobné krokové regrese, která vybrala vlnové délky s maximálním koeficientem determinace. Stupeň přesnosti predikce byl hodnocen na základě koeficientu determinace, směrodatné odchylky a úrovní významnosti (p-hodnota). Následně byl vypočten korelační koeficient pro spektra transformovaná pomocí „ $\log 1/R$ “ transformace, první a druhé derivace spektra. První derivace spektra zdůraznila charakteristické vlnové délky s maximálním korelačním koeficientem kolem 0,8, druhá derivace spektra ovšem dala nižší korelační koeficient s hodnotou 0,66. Následně byla ze stejných dat provedena vícenásobná kroková regrese. Z celého datového souboru byly vybrány vlnové délky, které byly použity pro vytvoření konečné rovnice. Pro první vlnovou délku 1 456 nm měl koeficient determinace hodnotu 0,71. Další použité vlnové délky byly 1 820 nm a 2 310 nm.

Serrano et al. (2002) ve své studii odhadovala obsah dusíku a ligninu v rostlině. Testovala dvě metody, vícenásobnou krokovou lineární regresi založenou na první derivaci odrazivosti a vícenásobnou krokovou regresi počítanou z indexů odrazivosti. Uvažovala dva indexy, normalizovaný N index NDVI a normalizovaný diferencovaný index pro lignin NDLI. Data byla analyzována korelací a vícenásobnou krokovou lineární regresí v programu SPSS (spuštěna v módu *forward* – dopředu). Rovnice pro predikci dusíku a ligninu v listu byla získána pomocí vícenásobné krokové lineární regrese z první derivace spektra. Počet proměnných v regresní rovnici byl stanoven maximálně na tři, aby se zabránilo tzv. *overfittingu* (přesycení modelu).

Kokaly a Clark (1999) odhadovali koncentraci dusíku, celulózy a ligninu. Pro výběr vlnové délky byla využita vícenásobná kroková regrese. Největší problém při aplikaci těchto empirických metod pro analýzu čerstvých listů a komplexní vegetace představuje voda. Pro minimalizaci vlivu vody na odrazivost bylo použito odstranění kontinua a normalizovaná hloubka pásma, takto upravená data následně vstupovala do vícenásobné krokové regrese, pro výběr vlnové délky, která bude nejvíce korelovat s dusíkem, ligninem a celulózou v listu. Výsledkem statistické analýzy je číslo vlnové délky (N) korelující se závislou proměnnou. Kroková regrese proběhla odděleně pro každou ze tří látek. Metoda byla následně aplikovaná na spektra transformovaná pomocí logaritmu ( $\log 1/R$ ). Nejlepší výsledek byl získán pro první a druhou derivaci spektra, které bylo transformováno pomocí ( $\log 1/R$ ), koeficient determinace pro lignin vyšel od 0,65 do 0,83 (pro různé druhy vegetace).

Kokaly et al. (2009) ve své studii uvádí výhody použití PLS regrese (*partial least-squares regression*). Použití krokové regrese podle něj přináší jisté limity pro predikci obsahu biochemických látek. Kroková regrese může být totiž ztížena tzv. *overfittingem* v případě, že je v modelu přítomno příliš mnoho nezávislých proměnných pro predikci jedné závisle proměnné.



Další problém je v použití výsledné rovnice na jiné datové soubory než jsou ty, na kterých byl model vytvořen. Proto se některé studie začaly věnovat statistické metodě, která spoléhá na matematické zpracování celého spektra, kterou je PLS regrese.

Thulin et al. (2012) využil PLS regresi pro odhad chemické koncentrace protejnů, ligninu a celulózy v travní vegetaci. Uvádí, že PLS regrese je schopná redukovat množství pásem pořízených hyperspektrálními senzory do méně proměnných. To je důležité pro snížení objemu dat, takže mohou být snadno zpracovatelná bez ztráty informace. PLSR je hojně užívaná v NIR spektroskopii, a to především v posledních deseti letech. PLSR metoda je technika spektrální komprese dat související s hlavními komponentami a analýzou PCA a regresí hlavních komponent (PCR) a spadá pod hlavičku bi-lineárních (měkkých) modelování. Je to typ faktorové analýzy, kde je redukován velký počet proměnných na menší složky – hlavní komponenty, ty nazýváme také latentní proměnná nebo faktor. V každé komponentě je obsažena maximální kovariance mezi  $Y$  a všemi možnými lineárními funkcemi  $X$ . PLSR metoda je efektivní rovněž pro minimalizaci vlivu odrazů záření (*non-target*). PLSR byla spuštěna s „cross validací“, kde každý vzorek byl jednou vyjmut a použit pro předpověď. Výstup z každé PLSR analýzy s „cross validací“ je model s optimálním počtem hlavních komponent založený na vztahu mezi chybou predikce a procentem variace vysvětlené modelem.

Dalším způsobem určování obsahu biochemických látek je použití modelu radiativního transferu. Model radiativního transferu simuluje optické vlastnosti na úrovni listů nebo korun stromů. Tento model požaduje různé vstupní hodnoty (biochemické složky v listu, informace o jeho vnitřní struktuře). Při použití inverzního modelu jsou vstupními parametry optické vlastnosti listu a výsledkem jsou obsahy biochemických látek. Například Malenovský et al. (2006) použil model radiativního transferu PROSPECT pro odhad obsahu chlorofylu v jehlicích smrku ztepilého. Tento model navrhli Jacquemod a Baret (1990). Dnes je to nejvyužívanější model pro modelování radiativního transferu. Model PROSPECT je velmi hojně používán pro svou jednoduchost a malé množství vstupních parametrů. Více o modelu PROSPECT ve studii Lukeš et al. (2011). Dalším modelem radiativního transferu je LEAFMOD, který byl vyvinut pro simulaci spektrálních vlastností listu. Model má možnost zahrnout biochemické složky jako klíčové elementy. Více informací ve studiích Morris et al. (2008) a Ganapol et al. (1998). Dalším typem modelu je model DART, který simuluje dvousměrnou odrazivou distribuční funkci (BRDF) a obraz 3D scény pro různé směry pohledu. Více ve studii Gastellu-Etchegorry (2000) nebo v diplomové práci Jana Mišurce (2010).

### 3 DATA A METODY

#### 3.1 Popis zájmového území

Krkonoše leží na hranicích České republiky a Polska (polsky *Karkonosze*, anglicky *Giant Mts*). Na obou stranách hranice pro zachování přírodních hodnot vznikly národní parky a UNESCO deklarovalo tuto oblast jako bilaterální biosférickou rezervaci. Relativní převýšení Krkonoš je přes 1 000 m, absolutní výška přesahuje 1 602 m n. m. (Jeník a Soukupová, 1992).

K nejcennějším ekosystémům Krkonošského národního parku (KRNAP) patří původní horské smrčiny a podstatná část druhotných horských květnatých luk (Cudlín, 1995). Smrkové porosty jsou zároveň plošně nejrozsáhlejšími ekosystémy na území KRNAPu.

Další cenné ekosystémy jsou výrazně zastoupeny ve stupni subalpínském a alpínském. Celé bezlesí má nesporné biogeografické znaky tundry, v níž se prolínají populace rostlin a živočichů s afinitou k severské oblasti a populace s afinitou k nejvyššímu stupni Alp. Jde o organismy sdružené v travních, skalních, rašelinných i klečových ekosystémech (Soukupová 1995). Pro alpínský potažmo subalpínský stupeň je v Krkonoších důležitý též azonální ekosystém strukturovaných rašelinišť, jež se vyznačují mnoha mikrotopografickými prvky, které jsou typické pro severské ekosystémy (Jeník a Soukupová, 1992).

Co se týká lesních porostů, současná druhová skladba, věková struktura a produkce jsou výsledkem taxačních šetření při popisu porostů dle jednotlivých prostorových skupin v rámci tvorby lesních hospodářských plánů či plánů péče o lesní ekosystémy v národním parku. Cílová druhová skladba je určitým kompromisem mezi přirozenou a současnou druhovou skladbou s akcentem ke stavu prostředí a provozním možностям. Výhledově by se měla blížit skladbě přirozené (Vacek, 2000).

*Přirozená* druhová skladba lesních porostů Krkonoš: převládá smrk ztepilý (53 %), buk lesní (25 %), jedle bělokorá (12 %), borovice kleč (5 %), vtroušené dřeviny javor klen (1 %), jeřáb ptačí (1 %). Jehličnaté dřeviny zaujímají 71 % a listnaté dřeviny 29 % (Vacek, 2000).

*Současná* druhová skladba v Krkonoších je výsledkem více než 600 let trvajících exploatačních zásahů do lesních porostů i přes 200 let trvajících snahy o zlepšení stavu lesů, a zejména pak posílení jejich ekologické stability. V české části Krkonoš v současné druhové skladbě výrazně převládá smrk ztepilý (80 %), relativně hojně je zastoupena borovice kleč (7 %), buk lesní (4 %), jeřáb ptačí (3 %), bříza bělokorá (2 %), javor klen (1 %), modřín opadavý (1 %), olše lepkavá (1 %). Jehličnaté dřeviny zaujímají 89 % a listnaté dřeviny 11 %. Podíl introdukovaných dřevin včetně modřínu opadavého je necelé 2 % (Vacek, 2000).

Z porovnání přirozené a současné skladby Krkonoš vyplývá výrazné zvýšení podílu smrku ztepilého (o 27 %). Mírné zvýšení je i u borovice kleče, břízy bělokoré a jeřábu ptačího. Výrazně snížené je zastoupení jedle bělokoré (o 11 %) a buku lesního (o 20 %). Podíl jehličnatých dřevin je o 17 % zvýšený na úkor dřevin listnatých. Výrazná je dynamika smrkových porostů a porostů s dominantním výskytem smrku ve vyšších horních polohách. Smrk představuje dřevinu, která má ve vyšších nadmořských výškách největší konkurenční schopnost a toleruje podmínky na horní hranici lesa, třebaže i jeho optimum z hlediska růstu a dosažených dimenzí leží níž. Dynamika smrkových přírodních porostů se pak výrazně liší podle nadmořské výšky a stanovištních podmínek. V nižších polohách je ve vyrovnaných terénních a stanovištních podmínkách patrná tendence vytvářet homogenní porosty s výrazným horizontálním zápojem. Ty jsou však výrazně různověké. Celková doba trvání vývojového cyklu může dosáhnout až 300–400 let (Vacek, 2007).

Horské smrkové ekosystémy Krkonoš byly od konce 50. let 20. století vystaveny zvýšené úrovni znečištění ovzduší, zejména oxidem siřičitým. Dlouhotrvající znečištění ovzduší spolu s extrémními klimatickými podmínkami vedlo na konci 70. a v průběhu 80. let k jejich masivnímu rozpadu a odumírání (Vacek et al., 2007). V této době se jednalo o nejzatíženější území ve střední Evropě (tzv. Černý trojúhelník). Hlavní příčinou chřadnutí porostů v období imisní ekologické kalamity byly imise, s nimiž negativně spolupůsobila řada dalších biotických škůdců i abiotických činitelů. Byla vylišena tři charakteristická období. V období prvních příznaků poškození (1976–1980) u studovaných porostů docházelo ke snížení odlistění v průměru do 1 % za rok. V období silného poškození (1981–1988) roční odlistění v průměru okolo 3–16 %. V období ústupu poškození (1989–2006) roční odlistění okolo 0–4 % a docházelo k nárůstu průměrného olistění o 1–3 %. Výrazné imisně ekologické stresy se projevovaly nejen poškozením až odumíráním dřevinné složky ekosystémů, ale i výraznými změnami v bylinném a mechovém patře a v půdním prostředí. Nejhorší ekologická kalamita se projevila v monostrukturních stejnověkových smrkových porostech. Proto je nezbytné tyto porosty přeměnit a ekologicky stabilizovat účelným, přírodě blízkým managementem (Vacek et al., 2007).

Vacek a Podrázský (2007) prováděli ekologickou analýzu vlivu imisí na ekosystém lesa. Byly získány poznatky o tom, jak jsou narušovány nebo měněny vztahy uvnitř dřevinné složky. Analýza vycházela z dendrologických reakcí jednotlivých stromů v rámci textury porostů. Dynamika zdravotního stavu bukových, bukovosmrkových a smrkových porostů v české části Krkonoš je dlouhodobě hodnocena podle olistění (foliace) a stupně odlistění (defoliace) podle stupnice v tabulce.

Tabulka 6: Stupně defoliace

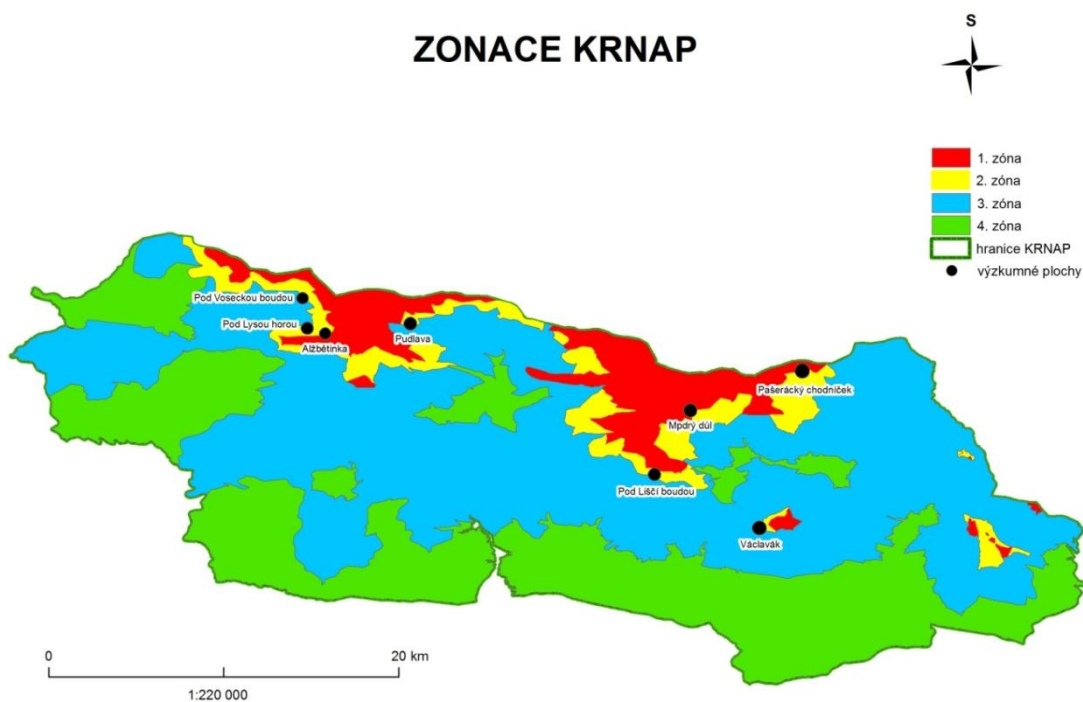
Stupeň odlistění	% olistění
0	91–100
1	71–90
2	51–70
3	31–50
4	1–30
5	0

Zdroj: Vacek (1992)

Z výsledku je patrný základní vztah, tj. přibývání poškození se stoupající nadmořskou výškou. Celkově byl nejvíce poškozen smrkový lesní vegetační stupeň. Průměrné olistění smrku se v nižších polohách (do 800 m n. m.) v letech 1979–1989 pohybovalo v rozpětí mezi 96–80 %, ve středních partiích (800–1 000 m n. m.) činilo 93–72 % a ve vyšších částech pohoří (nad 1 000 m n. m.) činilo 83–54 %. V mozaice poškození převládala vazba na klimaticky exponované, nebo naopak kryté porosty (Vacek, 1984). Dna údolí byla poškozena méně než exponované vrcholové polohy.

Imisně ekologicky kritickými byly roky 1981, 1984 a 1986, kdy se roční snížení olistění pohybovalo kolem 5,2–9,6 % (Vacek, 1996). Období ústupu poškození (léta 1989–2006) olistění smrku kolísalo mezi 47,7–54,6 %.

Současné práce dokazují, že následky imisního poškození v oblasti Černého trojúhelníku stále přetrvávají a jejich eliminace bude trvat ještě velmi dlouho (Vacek, 2007). Slodičák et al. (2007) uvádí, že ani přes radikální snížení depozice síry nelze předpokládat rychlé zlepšení stavu půd (zvýšení neutralizační kapacity). Relativně výrazné snížení kyselé zátěže bude eliminováno vysokou depozicí oxidů dusíku. To povede k dalšímu prohlubování procesů acidifikace a eutrofizace. Následná dalekosáhlá nutriční degradace půdy negativně ovlivní vitalitu porostů a bude omezovat rekonstrukci a stabilitu ekosystémů. Z těchto důvodů je nutné stav lesních porostů a ostatních cenných ekosystémů i nadále sledovat.



Obrázek 8: Zonace KRNAP

Zdroj: Autor, data KRNAP

### 3.2 Popis výzkumných ploch

Pro analýzu bylo vybráno 8 výzkumných ploch na české straně Krkonoš. V západní části Krkonoš to jsou plochy Modrý důl, Pašerácký chodníček, Pod Liščí boudou a Václavák, ve východní části pak plochy Alžbětinka, Pod Voseckou boudou, Pod Lysou horou a Pudlava (viz obrázek č. 9). Všechny tyto plochy byly v minulosti dlouhodobě sledovány. Doc. Pavel Cudlín, Csc., (CZECHGLOBE – centrum výzkumu globální změny AV ČR) sledoval plochy Alžbětinka, Modrý důl, Pudlava a Pašerácký chodníček, prof. RNDr. Stanislav Vacek, DrSc., (Výzkumná stanice Opočno) sledoval plochy Pod Lysou horou, Pod Voseckou boudou, Pod Liščí boudou Modrý důl a Václavák. (Základní informace o všech plochách shrnuje tabulka č. 7). Výzkumné plochy byly voleny podle několika faktorů prostředí, které mohou mít vliv na obsah ligninu v listoví: 1) původní smrčina, 2) dvě oblasti východ a západ podle podloží, 3) gradient v nadmořské výšce a 4) podmíčené a nepodmíčené smrčiny. Byla vybrána škála ploch (s rozdílnými faktory) kvůli zajištění velké variability vzorků pro vytvoření modelu pro výpočet obsahu ligninu.

Tabulka 7: Charakteristika výzkumných ploch

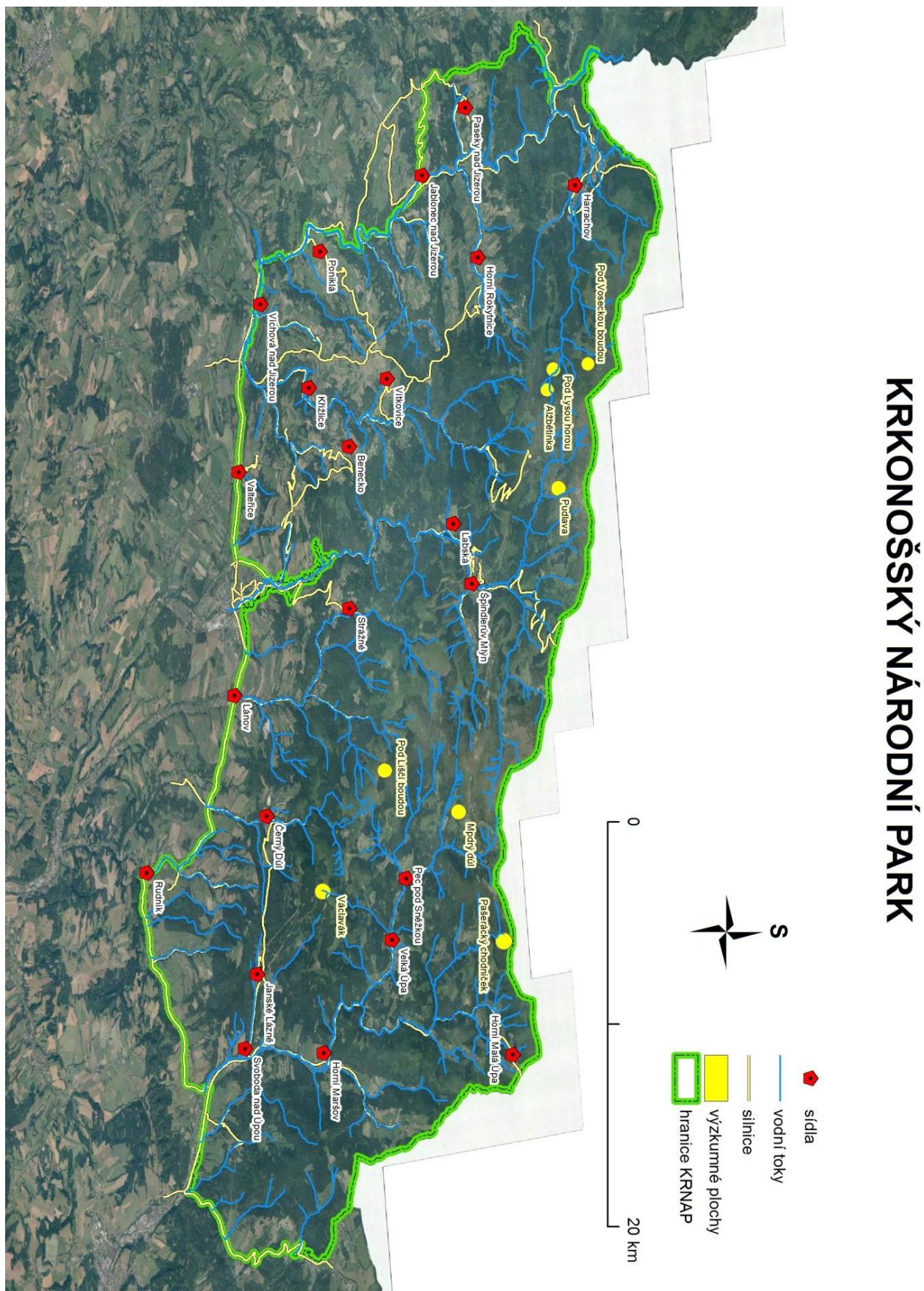
	Název plochy	Stáří	Nadm. výška	Mateční hornina	Půdní typ	Orientece	Sklonost
V	Alžbětinka	203	1 192	žula	ranker, organozem, podzol	SZ	14
	Pod Voseckou boudou	224	1 180	biotická žula	organozem, glej	JZ	12
	Pod Lysou horou	243	1 130	biotická žula	glej	SZ	17
	Pudlava	188	1 240	biotická žula	podzol, glej	J	16
Z	Modrý důl	124	1 237	rula	podzol, ranker	J	22
	Pašerácký chodníček	148	1 317	svor	podzol, ranker	JZ	18
	Pod Liščí boudou	228	1 260	svor, fylit	podzol	JZ	19
	Václavák	192	1 190	ortorula	organozem	SV	4

Zdroj: Vacek, 2010; Cudlín 2013; úpravy autor

Z terénního šetření dále vyplynuly následující informace o jednotlivých plochách. Na ploše *Alžbětinka* je viditelné poškození smrků z 80. let vlivem SO<sub>2</sub> s průměrnou defoliací 35 %, stadium rozpadu smrkového porostu je zde „značně rozpadlý“ (Cudlín, 2013). *Pod Lysou horou* je průměrná defoliace od 40 do 50 %. Z vývoje průměrného olistění a podílů stupňů defoliace v autochtonní smrčině je zřejmé, že u smrku ztepilého v letech 1981 až 1987 docházelo k výrazné defoliaci. V letech 1989–1994 se trend olistění stabilizoval a po roce 1996 je víceméně setrvalý. K výraznější defoliaci došlo pouze v roce 2002. Od roku 2008 na ploše opět dochází k výskytu stromů zdravých (Vacek et al., 2010). *Pod Voseckou boudou* se nachází podmáčená smrčina a defoliace je zde kole 50–55 %, některé stromy kolem 40 %. Některé stromy byly ve špatném zdravotním stavu, např. se suchými vrcholy. Je zřejmé, že na této ploše v letech 1981 až 1987 docházelo k výrazné defoliaci. Po roce 1988 se trend olistění relativně stabilizoval. Mírný nárůst defoliace smrku ztepilého byl zaznamenán v roce 2007. V roce 2010 pak došlo k výraznějšímu nárůstu olistění a k výskytu stromů zdravých (Vacek et al., 2010). *Pudlava* je velmi podmáčená plocha, která byla postižena silným větrem, jsou zde tedy značné vývraty. Na ploše *Pod Liščí boudou* je autochtonní smrčina, u smrku ztepilého zde docházelo k výrazné defoliaci v letech 1982 až 1988. V roce 1997 v důsledku žíru lýkožrouta smrkového došlo k výraznému poklesu olistění a od roku 2002 je jeho stav relativně stabilizovaný (Vacek et al., 2010). *Pašerácký chodníček* se nachází na kamenném zlomu, přítomny jsou typické malé „hrboly“, což jsou pozůstatky po vývratech, na kterých se nyní tvoří čerstvý porost, nachází se zde nezapojený porost, tzv. světliny, stadium smrkového porostu je středně až značně rozpadlý (Cudlín, 2013). *Václavák* je autochtonní rašelinná smrčina. U smrku ztepilého docházelo v letech 1981 až 1988 k výrazné defoliaci. Markantní nárůst olistění byl zaznamenán v roce 2009 (Vacek et al., 2010). Poslední plochou je *Modrý důl*. Z vývoje průměrného olistění a podílů stupňů defoliace je zřejmé, že u smrku ztepilého v letech 1983 až 1988 docházelo ke značné defoliaci. Po

roce 1988 se trend olistění relativně stabilizoval. Od roku 2008 na ploše dochází k výskytu a k nárůstu stromů zdravých (Vacek et al., 2010).

Na každé ploše bylo vybráno 5 stromů, které svým stupně odlistění reprezentovaly stav na zkoumané ploše. Poloha stromů, z nichž byly odebírány vzorky, je na v příloze 6.



Obrázek 9: Mapa KRNAPu (výzkumné plochy)

Zdroj: Autor, KRNAP



### 3.3 Terénní kampaň

V červnu 2012 proběhla terénní kampaň pro sběr vzorků z výzkumných ploch v Krkonošském národním parku (KRNAP). Za spolupráce zaměstnanců KRNAPu, doc. RNDr. Pavla Cudlína, CSc., z CZECHGLOBE (centrum výzkumu globální změny AV ČR), který se dlouhodobě zabývá sledováním zdravotního stavu smrkových porostů, a odborníků z katedry experimentální biologie rostlin bylo vybráno 8 výše zmíněných ploch. Na každé ploše bylo vybráno 5 stromů, vzdálených od sebe 2–3 metry, aby je bylo možné následně rozeznat na leteckém snímku. Každý strom byl u paty zaměřen pomocí GPS s přesností od 20 cm do 6 m. Následně byly na každém stromě vybrány 2 větve z produkční (osluněné) části koruny: vždy jedna ve vyšší poloze (na přechodu juvenilní a produkční části koruny a druhá ze střední části produkční koruny. Stromolezci z každého stromu uřízli dvě vybrané větve, které byly následně přepraveny na základnu, kde byla zřízena laboratoř. U paty každého stromu byl odebrán vzorek půdy. Pro západní část Krkonoš se základna nacházela ve Rokytnici na Jizerou a východní v Peci pod Sněžkou. Základna sloužila k rozřídění větví na jednotlivá stanoviště a stromy. Z větví byly odebrány vzorky druhých a třetích ročníků jehlic pro snímání kontaktní sondou (umístěny do plastových sáčků s navlhčenou gázou) a integrační sférou, dále byly vzorky odebírány do tří typů předem zvážených zkumavek pro chemické analýzy ligninu, chlorofylu a karotenoidů. Jeden typ zkumavek obsahoval jehlice nastříhané na kousky (ty sloužily pro extrakci chlorofylu), v dalším typu zkumavek byly celé jehlice (pro analýzu obsahu vody v jehlicích) a poslední typ zkumavek sloužil jako záložní. Vzorky musely být uchovány v chladu, vlhku a temnu, proto byl převoz zajištěn v plastových sáčcích s navlhčenou gázou a v chladičích boxech s mrazicí vložkou, následné uchovávání bylo zajištěno v lednici. Základna také sloužila pro měření spekter kontaktní sondou ze vzorků jehlic, tyto vzorky byly následně přemístěny do papírových sáčků, na katedře experimentální biologie rostlin UK v Praze byly na dobu 48 hodin vloženy do sušárny s teplotou 70 °C, vzorky byly vysušeny do konstantní hmotnosti. Ostatní vzorky byly ponechány v lednici v plastových zip sáčcích s navlhčenou gázou. Značení vzorků shrnuje tabulka 8.

Tabulka 8: Označení vzorků

Zkratka	Plocha	Označení stromu	Větev – dolní, horní	Ročník – 2., 3.
VB	Pod Voseckou boudou	14, 24, 27, 45, 47	D, H	2, 3
LH	Pod Lysou horou	28, 33, 37, 39, 58	D, H	2, 3
A	Alžbětinka	C11, C12, F2, F3, F4	D, H	2, 3
P	Pudlava	P1, P2, P3, P4, P5	D, H	2, 3
PA	Pašerácký chodníček	E1, C7, E8, E10, C1	D, H	2, 3
MD	Modrý důl	A, B, F, H, K	D, H	2, 3
LI	Pod Liščí boudou	102, 81, 91, 52, 56	D, H	2, 3
V	Václavák	44, 48, 91, 93, 146	D, H	2, 3

Zdroj: Autor

### 3.4 Laboratorní měření spekter

#### 3.4.1 Kontaktní sonda

Měření probíhalo v laboratoři zřízené přímo při terénní kampani, což umožnilo měření vzorků bezprostředně po nasbírání jehlic. Pro měření spekter byl využit spektrometr ASD FieldSpec 4 Wide-Res s připojenou kontaktní sondou (*contact probe*). K dispozici byl také notebook s nainstalovaným programem RS<sup>3</sup>m, který umožňuje nastavit např. z kolika měření se bude výsledná křivka průměrovat, čas jednoho měření a další parametry. Pro měření sondou bylo vybráno cca 6 až 8 výhonů s jehlicemi (v závislosti na hustotě jehlic). Výhony byly srovnány do souvislé vrstvy na černou skleněnou misku. Při měření je nutné nejprve provést optimalizaci světelných podmínek, k tomu slouží bílý terč (*spectralon*), který zapůjčila Česká zemědělská univerzita v Praze. Následně je možné přejít k měření samotných vzorků. Kontaktní sonda se přiloží na jehlice, je nutné vyčkat, než se zobrazovaná křivka ustálí, a poté je možné křivku uložit pod kódem vzorku. Tento postup se opakuje pětkrát pro každý vzorek, kontaktní sonda je vždy přiložena na jiné místo vzorku a uloží se křivka. Z těchto pěti křivek je následně vypočítán průměr. Při měření je nutné zavést protokol, do kterého se ukládají čísla spekter k příslušným kódům vzorků.

### 3.4.2 Integrační sféra

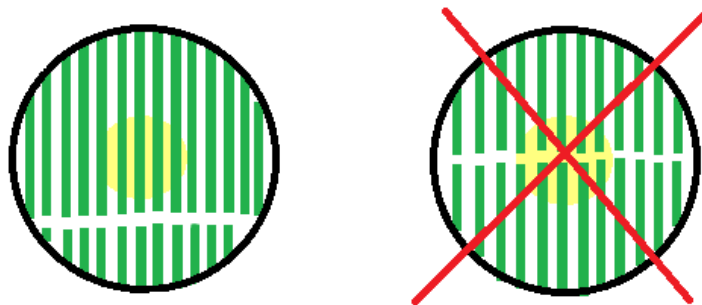
Měření v integrační sféře probíhalo v Praze v laboratoři Katedry experimentální biologie rostlin UK v následujících 3 dnech poté, co proběhla terénní kampaň. K dispozici byla integrační sféra (ASD 190 RTS-3ZC), ASD FieldSpec 4 Wide-Res spektrometr, notebook a scanner Epson Perfection V500 PHOTO. Pro měření jehlic není integrační sféra uzpůsobená, proto bylo nutné nechat vyrobit rámečky pro upevnění jehlic podle Malenovský et al. (2006). Rámeček (viz obrázek 10) je složen ze dvou plochých kovových destiček o tloušťce 1 mm, uprostřed rámečku je kruhový otvor o průměru 16,5 mm, do kterého se skládají jednotlivé jehlice (upevňují se pomocí gumových lepicích čtverečků – „kancelářská plastelína“). Dvě části rámečku jsou následně spojeny (viz obrázek 10).



Obrázek 10: Rámeček pro měření jehlic integrační sférou

Zdroj: Autor

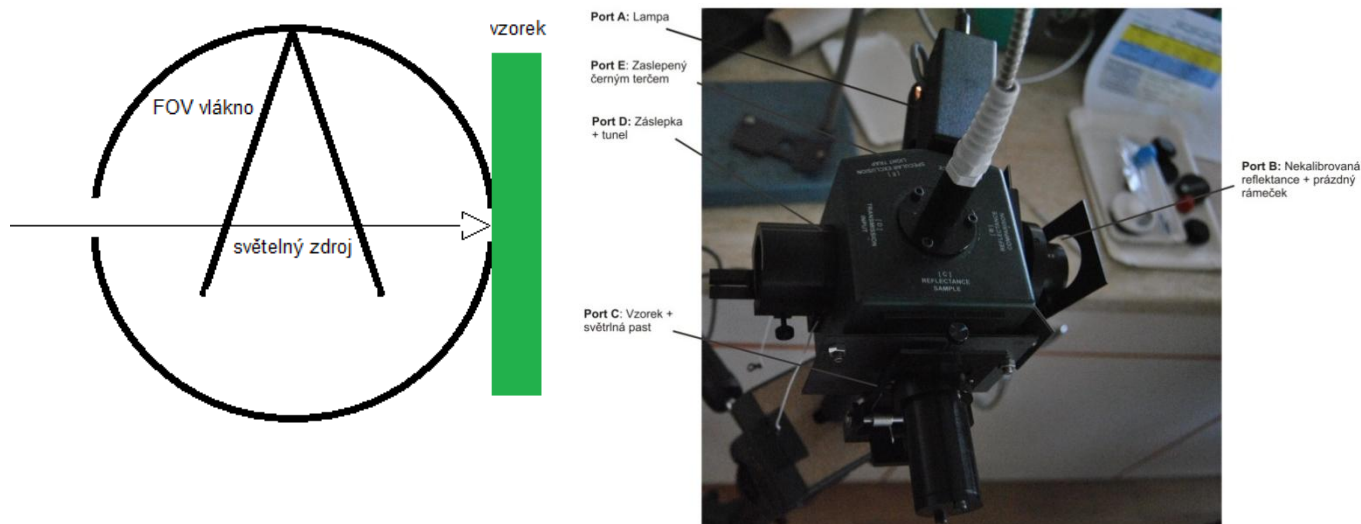
Pro měření bylo nutné nejprve vzorky jehlic otrhat z dřevěných výhonů a odstranit hnědé konce jehlic. Z každého vzorku bylo použito cca 20 jehlic, které byly před samotným měřením zváženy. Ke vzorku byl přilepen papírek s kódem vzorku, hmotností a počtem jehlic, následně na něj bylo dopsáno i číslo spektra. Poté byly jehlice pomocí pinzety a jehly naskládány do rámečku. V případě, že jehlice byly dostatečně dlouhé, skládaly se tak, aby překrývaly celý otvor rámečku a aby mezi jehlicemi vznikly co nejmenší mezery, ale aby se jehlice vzájemně nedotýkaly a nepřekrývaly. Pokud jsou jehlice příliš krátké, je nutné zamezit tomu, aby mezera mezi spodními a horními jehlicemi byla v osvětlené části otvoru (viz obrázek 11). Pro měření bylo nutné připravit ještě jeden „univerzální vzorek“m který slouží při měření reflektance bílé reference jako materiál s reflektancí téměř shodnou jako měřené vzorky (ASD manual, 2008).



Obrázek 11: Správné seřazení jehlic

Zdroj: Autor

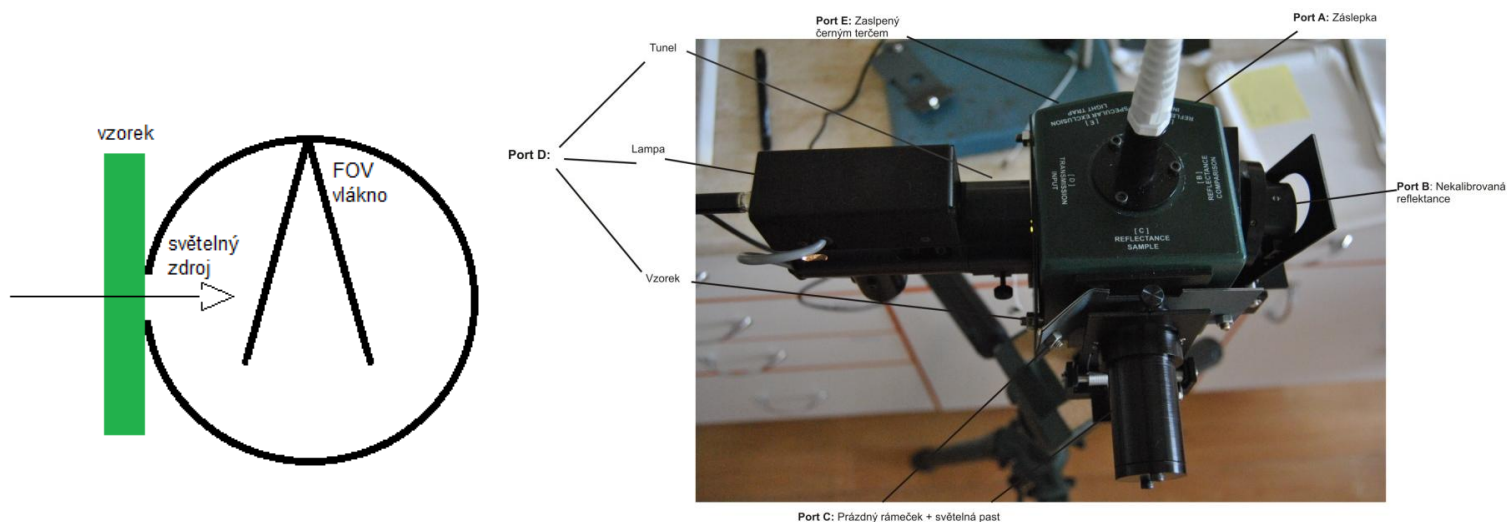
Následně bylo možné přistoupit k měření optických vlastností jehličí, tedy k měření reflektance a transmittance jednotlivých vzorků. Nejprve bylo nutné provést optimalizaci, která se dělá vždy na začátku měření, stejně jako *stray light* neboli zbloudilé světlo. Následně se provádí měření *dark current* neboli temného proudu (měří se před každým vzorkem), což slouží ke kalibraci spektrometru. Pro každý druhý vzorek se měří tzv. *white reflectance* – odrazivost bílé reference (blíží se 100%), a *white transmittance* – tedy 100% transmittance, a to tak, že místo vzorku je v portu umístěn nekalibrovaný standard odrazivosti. Při měření vlastních vzorků se používá jiné nastavení pro odrazivost vzorku, kdy je vzorek umístěn naproti světelnému zdroji (viz obrázek 12).



Obrázek 12: Měření odrazivosti vzorku

Zdroj: Autor

Pro měření transmittance vzorku je nutno integrační sféru nastavit tak, aby světelný zdroj byl umístěn ve stejném portu jako vzorek a lampa vzorek prosvětlovala (viz obrázek 13).



Obrázek 13: Měření transmittance vzorku

Zdroj: Autor

Naměřené křivky odrazivosti a transmittance vzorků byly uloženy a do protokolu ke správným kódům vzorku byla přiřazena čísla spekter, optimalizačních křivek, měření *stray light*, *WR* a *WR-T*. Tyto parametry posloužily k výpočtu celkové odrazivosti a transmittance vzorků. Následně byly rámečky s naskládanými jehlicemi skenovány, vždy byla skenovaná stejná strana rámečku, která přiléhala k integrační sféře, dále byly skenovány samotné jehlice a v posledním kroku byly jehlice znovu zváženy a vloženy do zkumavek. Více o postupu měření vzorků jehlic je popsáno v nepublikovaném návodu od Nýdrleho a Suché (2012).

### Výpočet celkové odrazivosti a transmittance vzorku

Pro získání celkové odrazivosti vzorku je nutné na naměřená spektra aplikovat následující rovnici:

$$R_s = \frac{(I_s - I_d) \cdot R_r}{(I_r - I_d)},$$

$$T = \frac{(I_s - I_d)}{(1 - I_d)},$$

kde  $I_s$  je odrazivost vzorku,  $I_d$  je *stray light*,  $I_r$  je *white reflectance* a  $R_r$  je odrazivost kalibrovaného referenčního standardu. Podle této rovnice uvedené v manuálu pro integrační sféru je možné vypočítat celkovou reflektanci nebo transmittanci vzorku, pokud se nejedná o jehlice. Malenovský et al. (2006) ve své studii uvádí rovnici, která je optimalizovaná pro výpočet celkové odrazivosti jehlic. Do rovnice bylo nutné přidat další parametr, *gap fraction*, což je plocha mezer mezi jehlicemi v každém vzorku. Pro výpočet *GF* je nutné zjistit plochu

osvětlenou při měření odrazivosti či transmitance. Právě k výpočtu  $GF$  jsou potřeba naskenované rámečky. Pomocí vzorce, naskenovaného snímku a vyfotografované plochy osvětlené lampou byla vypočtena plocha jehlic a mezer mezi jehlicemi. Výsledné číslo vyjadřuje, kolik procent z celku zabírají mezery mezi jehlicemi. V rovnici je  $GF$  uvedeno jako relativní číslo. Průměrné hodnota  $GF$  pro mód odrazivosti je 0,355.

Výsledná rovnice optimalizovaná pro výpočet odrazivosti jehlic a pro ASD integrační sféru byla poskytnuta Petrem Lukešem (2013a).

$$R_s = \frac{\frac{I_s - I_d \cdot R_r}{1 - I_d}}{1 - GF},$$

$$T = \frac{\frac{I_s}{I_{WR}} - GF}{1 - GF},$$

kde  $I_s$  je odrazivost vzorku,  $I_d$  je *stray light* (hodnota je stabilní a většinou se počítá jedna průměrná hodnota pro všechna měření),  $I_r$  je *white reflectance* a  $R_r$  je odrazivost kalibrovaného referenčního standardu (hodnoty se dodávají k integrační sféře a většinou se pohybují kolem 1),  $I_{WR}$  je hodnota bílé odrazivosti/transmitance,  $GF$  je vypočítaný podíl „mezer“ ve vzorku jehlicí naskládaného do rámečku.

### 3.5 Snímání dat senzorem APEX

Letecké snímky ze senzoru APEX byly pořízeny v rámci projektu EUFAR Transnational Access project HyMountEcos (*Hyperspectral Remote Sensing for Mountain Ecosystems*) 10. září 2012. Snímky byly pořízeny ve dvou letových výškách: 5 750 m a 6 065 m. Snímání probíhalo v časovém rozmezí od 10:35 do 14:13 hodin. Pořízeno bylo 15 letových linií (viz obrázek 14) a 4 přidané „BRDF“ linie v oblasti Sněžky (APEX, 2012).



Obrázek 14: Letové linie pořizené APEX

Zdroj: APEX (2012)

Pořízený soubor dat obsahuje 19 letových linií. Pro snížení velikosti byl soubor rozdělen na 4 části pojmenované HYME1, HYME2, HYME3 a HYMEB. Kvůli velikosti skenované linie byly jednotlivé letové linie dále rozděleny na části. Data byla pořizena ve formátu HDF5, následně byl soubor zpřístupněn pro uživatele pomocí APEX FTP serveru. Soubor dat pro Českou republiku obsahoval 7 letových linií, na kterých byly provedeny atmosférické a geometrické korekce, dále spektra byla shlazena a převzorkována na vlnové délky, v nichž senzor měří během spektrální kalibrace. Konečná data byla dodána v ENVI formátu, 27 párů \*.img a \*.hdr souborů. Výsledná data byla georeferencována na základě DEM zpracovaného na základě dat laserového skenování s hustotou 5 bodů/m<sup>2</sup>, zeměpisné souřadnice (šířka, délka) a výška jsou na elipsoidu WGS84 (APEX 2012).

### 3.5.1 Kalibrace a zpracování obrazů APEX

Radiometrické, spektrální a geometrické kalibrace obrazů APEX se provádějí pomocí kalibrační kostky generované z dat měřených a sesbíraných z *APEX Calibration Home Base*, zpracované v DLR Oberpfaffenhofenu v Německu. Tato kalibrace se provádí na začátku a v závěru každé letové mise a výstupem jsou data první úrovně (APEX 2012).

APEX je znám tzv. *smile* efekty. Vzhledem ke spektrální nestabilitě APEX způsobené tlakem a/nebo teplotními výkyvy se analýza posunu vlnové délky provádí na základě atmosférické absorpce pro přiřazení nové centrální vlnové délky každému pixelu (APEX 2012).

Geometrická korekce je prováděna pomocí C++ modulu vyvinutého VITO (*vision on technology*, více na <http://www.vito.be>) na základě přímého georeferencování. Během geometrické korekce se využívají pro vstup data ze senzoru GPS/IMU a uživatelem specifikovaný digitální model terénu. Na konec jsou data převedena do systému UTM (WGS84, zóna 33N) (APEX 2012).

Atmosférická korekce získaných dat APEX je prováděna pomocí CDPC (*Central Data Processing Center* – více v Biesemans et al., 2007) s radiativním transferem MODTRAN4 (APEX 2012).

Spektrální shlazení dat se provádí za účelem odstranění šumu a extrémů, které zbudou po atmosférické korekci (APEX 2012).

Více o kalibraci dat APEX je popsáno ve studii Schläfer et al., 2000.

## **3.6 Laboratorní stanovení obsahu biochemických látek**

### **3.6.1 Laboratorní stanovení obsahu ligninu**

Pro stanovení obsahu ligninu v jehlicích smrku ztepilého byla použita extrakce v kyselině thioglykolové. Metoda vychází z článku Lange et al. (1995). Pro stanovení ligninu je nutné použít homogenizovanou sušinu, proto byly předem nasušené jehlice pomocí mlýnků namlety na velice jemný prášek. Ten se následně odváží do zkumavek a nechá se dva dny sušit při 80 °C. Pak se vzorek promyje v NaCl a následně v 1% SDS. Vzorek se opakovaně vmývá v Met-OH a rotoku chloroformu a methanolu. Nakonec byly vzorky usušeny. Tímto postupem ze vzorku zbyly buněčné stěny, které se po vysušení znovu zvažily. Poté nastává extrakce ligninu kyselinou thioglykolovou sloučenou s 2M HCl, v této fázi se uvolní deriváty ligninu. Nakonec se pelet proplachuje NaOH a okyseluje se extraktem HCl. Pak už se konečný pelet vysuší v sušárně a může se měřit na spektrometru. Pro měření na spektrometru je nutné vzorek rozpustit v 0,5M NaOH, měření probíhá na vlnové délce 280 nm. Výsledný obsah ligninu je vypočten podle rovnice:

$$y = 22,379x + 0,0179,$$

kde  $y$  je naměřená absorbance a  $x$  výsledný obsah ligninu. Tato kalibrační rovnice byla vytvořena na základě koncentrační řady roztoků ligninového standardu.



### 3.6.2 Laboratorní stanovení obsahu karotenoidů

Extrakce karotenoidů se provádí zároveň s extrakcí chlorofylu. Stanovení obsahu karotenoidů se provádí s čerstvých jehlic, které jsou nastříhané na segmenty cca 3 x 3 mm. Jelikož se množství výsledných karotenoidů (chlorofylu) vztahuje na suchou hmotnost, je nutné mít paralelní sadu vzorků, u které je znám poměr suchá/čerstvá hmotnost. Jehlice se vloží do 10 ml rozpouštědla (DMF – dimethylformamide) a nechají se 7 dní extrahovat, je nutné vzorky ponechat v chladu a temnu. Po sedmi dnech je nutné zkontrolovat, zda extrakce proběhla dokonale, jehličí musí být světle žluté až bílé, nesmí obsahovat stopy zelené. Před měřením se extrakt znovu ředí v poměru 1 : 4 s čistým DMF a měří se na spektrometru v rozmezí 400–800 nm. Z výsledné absorpční křivky byly odečteny hodnoty absorbance při vlnových délkách 480, 647, 664 a 750 nm. Celková koncentrace karotenoidů a xantofylů se vypočítá podle rovnice:

$$c_{(x+y)} = \frac{1000 \cdot A_{480} - 0,09C_a - 52,02C_b}{245} \left( \frac{\mu g}{ml} \right),$$

kde  $A_{480}$  je absorpce na vlnové délce 480 nm,  $C_a$  je koncentrace chlorofylu *a* a  $C_b$  je koncentrace chlorofylu *b*.

Obsah fotosyntetických pigmentů se vztahuje na 1 g suché hmotnosti jehlic. Podrobnější postup je uveden ve studiích Lichtenthaler (1987), Porra et al. (1989) a Wellburn (1994).

### 3.6.3 Laboratorní stanovení obsahu vody

Pro laboratorní stanovení obsahu vody je nutné nejprve zjistit hmotnost čerstvých jehlic. Tyto zvážené vzorky se následně nechají sušit minimálně 48 hodin při 70 °C (dokud jehlice nejsou vysušeny na konstantní hmotnost). Následně jsou usušené jehlice znovu zváženy. Z naměřených hmotností se vypočte procentuální podíl vody v jehlicích.

### 3.6.4 Rozbory půd

U paty každého stromu byl odebrán vzorek půdy pomocí žlábkového vrtáku. Směsný vzorek obsahoval organické půdní horizonty: fermentační, humusový a horizont A. Nasbírané vzorky byly následně usušeny. V listopadu 2012 byly vzorky půd přesívány, nejprve na hrubém sítu a následně na jemném (některé vzorky z extrémně podmáčených ploch byly dosušeny v sušárně). Takto zpracované vzorky byly odeslány na chemické analýzy do Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy v Praze - Zbraslavi. Zde byly zpracovány následující analýzy: obsahy

Ca, Mg, K, T, S, V a humus v půdě, poměr C/N a pH půdy dle standardních metodik (VÚMOP, 2013).

### 3.7 Spektrální analýza biochemických látek z laboratorních dat

Pro analýzu biochemických látek byla k dispozici data ze dvou laboratorních spektroskopických měření (z integrační sféry a kontaktní sondy). Statistické metody slouží k testování existence závislosti mezi obsahem biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého, v tomto případě ligninu, karotenoidů a vody, na odrazivost v naměřených vlnových délkách. V případě, že je shledána signifikantní závislost mezi obsahem látky a odrazivostí, je po validaci možno získané modely využít i pro odhad množství biochemických látek v rostlině.

#### 3.7.1 Spektrální transformace

Pro analýzu byla použita naměřená spektra a jejich transformace. Pro každé spektrum byla provedena 1. derivace a odstranění kontinua.

##### První derivace spektra

Rychlost změny v odrazivosti z jedné vlnové délky na jinou. První derivace transformace spektra odrazivosti ( $R_{fd}$ ), která se počítá jako sklon hodnot odrazivosti může být derivována podle rovnice:

$$R_{fd(i)} = (R_{(j+1)} - R_{(j)})/\Delta\lambda,$$

kde  $R_{fd}$  je první derivace odrazivosti ve vlnové délce,  $i$  bod mezi vlnovým pásmem  $j$  a  $j+1$ .  $R_{(j+1)}$  je odrazivost ve vlnové délce  $j+1$  a  $\Delta\lambda$  je rozdíl ve vlnové délce mezi  $j$  a  $j+1$  (Thulin et al., 2011).

První derivace spektra byla vypočtena podle vzorce výše v programu MS Excel. Protože data mají spektrální rozsah 1 nm, parametr  $\Delta\lambda$  se v tomto případě rovnal 1, stačilo tedy jednotlivé vlnové délky odečíst.

##### Odstranění kontinua

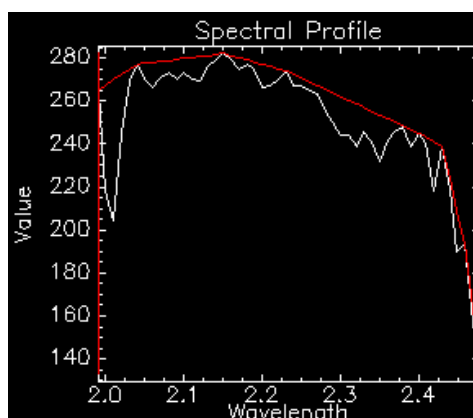
Odstranění kontinua je normalizační technika, jejímž výsledkem je křivka s hodnotami od 0 do 1, která zdůrazňuje lokaci a hloubku individuální absorpční funkce, bez ohledu na celkové albedo. Pro vegetaci je albedo stanoveno půdním povrchem, obsahem vlhkosti a strukturou porostu.

Když je ve sledovaném prostoru rozdílný biochemický obsah, který určuje rozdíl ve vegetaci, pak tato metoda může zvýšit možnost rozlišit jednotlivé druhy vegetace. Kontinuum je konvexní obal přiléhající přes vrchol spektra využívající přímkový segment, který spojuje lokální maxima. Mezi konvexním obalem a spektrem odrazivosti je minimalizován počet kontaktních bodů, které jsou spojeny přímkami, jež nekříží vlastní spektrum (Schmidt, 2002). Odrazivost po odstranění kontinua je možné vypočítat dělením hodnoty odrazivosti pro každou vlnovou délku  $i$  v absorpční funkci odrazivostí na úrovni linie kontinua:

$$R'_{(\lambda)i} = \frac{R_{(\lambda)i}}{R_{c(\lambda)i}}$$

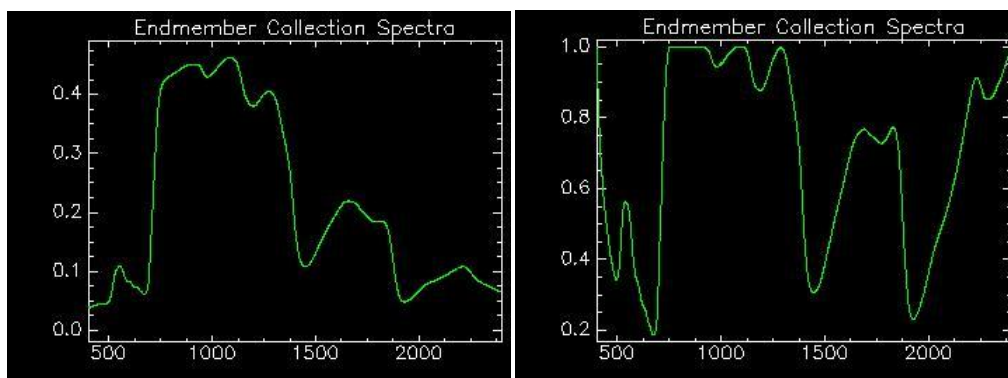
kde  $R'_{(\lambda)i}$  odrazivost po odstranění kontinua,  $R_{(\lambda)i}$  je odrazivost pro jednotlivou vlnovou délku a  $R_{c(\lambda)i}$  je hodnota odrazivosti na úrovni linie kontinua. (Mutanga et al., 2004)

Odstranění kontinua bylo provedeno v softwaru ENVI 4.7, kam byla nahrána jednotlivá spektra získaná kontaktní sondou a integrační sférou (*Spectral/Spectral libraries/spectral library builder/Import/from ASCII file*). Po zobrazení grafu spekter je možné použít funkci *Continuum removed* neboli odstranění kontinua (*Plot\_function/Continuum removed*).



Obrázek 15: Odstranění kontinua (bílá – původní spektrum, červená – křivka kontinua)

Zdroj: ENVI help (2013)



Obrázek 16: Původní křivka, křivka po odstranění kontinua

Poznámka: Spektrum jehlic smrku ztepilého z kontaktní sondy

Zdroj: autor

### 3.7.2 Statistická analýza

Statistická analýza byla prováděna pro všechny typy dat z integrační sféry, kontaktní sondy i obrazová, pro spektra základní i transformovaná. Datový soubor zahrnoval údaje o obsahu biochemických látek pro jednotlivé vzorky a jejich naměřená spektra. Vzorky jehlic byly pořízeny buď z horní nebo spodní větve produkční části koruny, a to druhé a třetí ročníky jehlic. Soubor nebyl rozdělen na jednotlivé ročníky, protože bylo statisticky prokázáno, že spektra 2. a 3. ročníků se signifikantně neliší.

#### Korelogram

Pro každé spektrum naměřené i transformované a pro jednotlivé zkoumané látky byl vytvořen korelogram – graf, který má na ose  $x$  vlnové délky (od 350 do 2 500 nm pro kontaktní sondu, od 400 do 2 400 nm pro integrační sféru) a na ose  $y$  je vyneseno Pearsonův korelační koeficient, který byl vypočten pro každou vlnovou délku a zkoumanou látku.

Pearsonův korelační koeficient slouží pro měření síly lineární závislosti mezi dvěma spojitými veličinami, lze ho vypočítat podle rovnice:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_x^2} \sqrt{\sigma_y^2}} = \frac{\sum(x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum(x_i - \mu_x)^2} \sqrt{\sum(y_i - \mu_y)^2}}$$

kde  $\sigma_x^2$  a  $\sigma_y^2$  jsou rozptyly a  $\sigma_{xy}$  je kovariance,  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  jsou průměry hodnot,  $n$  je počet hodnot.

Korelační koeficient nabývá hodnot od  $-1$  do  $1$ , kde  $1$  je největší možný koeficient a znamená, že veličiny jsou maximálně korelovány, a očekávají se tedy velké hodnoty jedné z náhodných veličin při velkých hodnotách druhé z nich. U záporného korelačního koeficientu

k velkým hodnotám jedné z veličin jsou očekávané spíše malé hodnoty druhé z nich. Korelační koeficient odhaluje pouze lineární závislost (Zvára, 2004).

Korelační koeficient pro každou vlnovou délku a jednotlivé obsahy biochemických látek byl vypočten v programu R.

*Box 1: Výpočet korelačního koeficientu v programu R*

```
cor (proměnná1, proměnná2)
```

*Zdroj: R help (2013)*

Následně byla zjištěna kritická hodnota korelačního koeficientu pro každý soubor dat. Kritické hodnoty lze vyčíst z tabulek pro jednotlivé hladiny významnosti a stupně volnosti. Stupeň volnosti je  $(n - 2)$ , tj. počet údajů bez dvou. Korelační koeficient můžeme prohlásit za významný právě tehdy, bude-li jeho absolutní hodnota větší než kritická hodnota při daném stupni volnosti a hladině významnosti. V tomto případě byla zvolena hladina významnosti 0,05 a kritická hodnota korelačního koeficientu vypočtena v MS Excel:

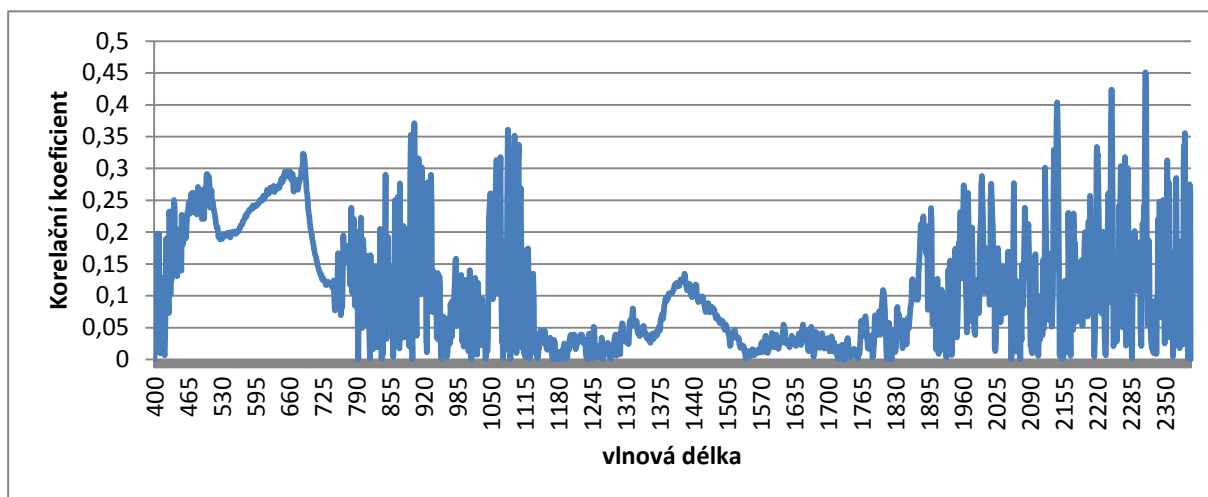
*Box 2: výpočet kritické hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu*

```
TINV(hladina významnosti; stupně  
volnosti),  
ODMOCNINA(TINV^2/(TINV^2+ N))
```

*Zdroj: Excel help (2013)*

kde TINV je funkce pro výpočet hodnoty  $t$  distribuční funkce studentova  $t$ -rozdělení jako funkce pravděpodobnosti a stupňů volnosti.

Z korelogramu byly vybrány vlnové délky pro následnou vícenásobnou krokovou lineární regresní analýzu. Vlnové délky byly vybrány na základě kritických hodnot korelačního koeficientu a podle toho, kde korelogram tvořil tzv. *peaky*, tedy vlnové délky, které jsou na danou proměnnou nejcitlivější.



Graf 1: Korelogram pro spektrum integrační sféry a lignin

Zdroj: Autor

Z korelogramu bylo vždy vybráno méně vlnových délek, než je počet vzorků v souboru, aby bylo zabráněno *overloadingu* (*overfittingu*), což se dá vysvětlit jako přesycení modelu, které má za následek, že se model jeví jako téměř dokonalý (koeficient determinace se blíží 1 nebo se rovná 1), což v tomto případě neznamena, že model daný vztah popisuje dobře. Nejprve byl vybrán takový počet vlnových délek, aby bylo splněno pravidlo, že počet vlnových délek bude nižší než počet vzorků. Následně byly vlnové délky vybrány znovu, aby bylo zachováno pravidlo o poměru „počet vlnových délek : počtu vzorků“ se rovná „1 : 10“. Následná kroková regrese byla provedena pro každý soubor dat dvakrát, nejprve pro pravidlo „méně vlnových délek než vzorků“ a následně pro pravidlo „1 : 10“.

### Vícenásobná kroková lineární regrese

Vícenásobná kroková lineární regrese byla spuštěna pro výběr vlnových délek, které budou následně vstupovat do modelu pro predikci obsahu biochemických látek. Vícenásobná kroková lineární regrese stanoví pořadí nezávisle proměnných (vlnové délky) z hlediska jejich vlivu na závisle proměnnou (lignin, karotenoidy, voda). Je to metoda nalezení nejlepšího modelu, proměnné se do modelu vkládají postupně, nikoliv najednou. Každý model se liší tím, že je v něm o jednu nezávisle proměnnou více než v předchozím. Do modelu vstupují jen ty proměnné, které jsou statisticky významně vztaženy s proměnnou závislou (mají nejvyšší koeficient determinace). Model posuzuje nezávisle proměnnou v každém kroku přidáním, nebo odstraněním proměnných z modelu, každý krok posuzuje každou nezávisle proměnnou individuálně (Takahashi, 2004). Touto metodou byly vybrány vlnové délky, které jsou statisticky

nejvýznamnější. Výpočet vícenásobné krokové regrese proběhl v programu R pro soubor dat, z kterého bylo vyjmuto deset vzorků použitých jako testovací soubor pro validaci.

*Box 3: Skript pro výpočet vícenásobné krokové regrese*

```
regrese= read.delim("tabulka.txt")
attach(regrese)
null= lm (lignin~1, data=regrese)
full= lm (lignin~., data=regrese)
step (null, scope=list(lower=null, upper=full),
direction= "forward")
```

*Zdroj: Autor*

Program R společně s koeficienty pro konečnou regresní rovnici udává i základní statistické ukazatele, mimo jiné i to, které z vlnových délek jsou statisticky signifikantní na různých hladinách významnosti (v SW R je znázorněna "\*", "." a " "). Základní statistické ukazatele dávají i výsledky koeficientu determinace, směrodatnou odchylku reziduí a další.

Z konečného výsledku byly získány hodnoty *estimate*, tedy konkrétní hodnoty regresní funkce, pro každou vybranou vlnovou délku a průsečík *intercept*. Pro získání predikce obsahu biochemických látek je nutné hodnoty odrazivosti pro vybrané vlnové délky vynásobit vypočtenou hodnotou regresní funkce. Pro získání predikované hodnoty se sečtou všechny vypočtené hodnoty pro jeden vzorek. Výslednou regresi je možné vyjádřit vícenásobnou regresní funkcí, která je konstruována jako lineární kombinace jednoduchých regresních funkcí.

Rovnice má tvar:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n,$$

kde  $\beta$  jsou parametry regresní funkce a  $x$  jsou hodnoty vysvětlující proměnné (odrazivost) (Zvára, 2004).

Tento výpočet byl aplikován jak na základní, tak i na transformovaná spektra z kontaktní sondy a integrační sféry. Pro lignin nebylo možné použít základní spektrum kontaktní sondy, protože zde nebyla nalezena jediná vlnová délka, která by měla vyšší korelační koeficient, než byla vypočtená kritická hodnota, proto pro lignin byla použita pouze spektra transformovaná. Výsledné modely jsou hodnoceny několika statistickými parametry.

### Směrodatná odchylka reziduí (RSE = residual standard error)

RSE je statistickou mírou odchýlení dat od regresní čáry. Rezidua jsou rozdíly mezi predikovanými hodnotami a těmi, které byly použity k vytvoření modelu. V případě, že je RSE přesně 0, je možné říct, že se model dokonale hodí pro data (Gaško et al., 2008). Poskytuje nám důležitou informaci o variabilitě reziduí  $e_i = y_i - y'_i$  a tím i o shodě modelem predikovaných hodnot  $y'_i$  s pozorovanými hodnotami  $y_i$  (Tvrdík, 2003)

$$RSE = s_y \sqrt{\frac{(n-1)(1-r^2)}{(n-2)}}$$

(Gaško et al., 2008).

### Koeficient determinace

Porovnává variabilitu náhodné veličiny  $Y$  popsanou součtem čtverců odchylek od průměru  $\sum(Y_i - Y)^2$  s reziduálním součtem čtverců  $S_e$ . Koeficient determinace se často udává v procentech, neboť udává relativní velikost variability závisle proměnné, kterou se požadovanou závislostí podařilo vysvětlit. V modelu lineární regrese leží hodnota koeficientu determinace ( $R^2$ ) v intervalu od 0 do 1. Udává procentuální podíl celkové variance vysvětlený vícenásobnou regresí (Heřmanová, 1991).

$$R^2 = 1 - \frac{S_e}{S_t}$$

kde  $S_e$  je reziduální součet čtverců a  $S_t$  je celkový součet čtverců odchylek od průměru  $[\sum(Y_i - Y)^2]$  (Zvára, 2004).

#### 3.7.3 Validace modelů

Validace byla provedena pouze pro modely s nejvyšším koeficientem determinace, tedy pro modely z dat 1. derivace spektra integrační sféry. Pro validaci bylo vybráno 10 vzorků z původního souboru dat (testovací soubor) pořízených integrační sférou, tato data nebyla použita pro vytvoření modelu. Vzorky byly vybrány náhodným výběrem v SW R.



*Box 4: Náhodný výběr*

```
data<- read.delim("tabulka.txt")
attach (data)
sample (oznaceni, 10) # náhodně vybere
10 vzorků
```

*Zdroj: R help (2013)*

Následně byly porovnány hodnoty obsahu biochemických látek vypočtené modelem pro testovací soubor a hodnoty naměřené. Pro zhodnocení správnosti odhadu byly vypočteny základní statistiky.

Validace byla provedena i na nezávislých datech, na spektrech pořízených kontaktní sondou v roce 2010 na Sokolovsku. Nejprve byl na validační soubor Sokolovska aplikován model vypočtený pro Krkonoše a následně byl zopakován celý postup tvorby modelu pro první derivaci spektra z kontaktní sondy.

### **Aritmetický průměr**

Průměr je součet všech hodnot dělený jejich počtem. Průměr charakterizuje hodnotu, okolo níž kolísají jednotlivé prvky seznamu dat. Průměr závisí na každé hodnotě  $x_1 + x_2 + \dots + x_n$  (je stejně ovlivněn všemi hodnotami).

$$x' = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n),$$

kde  $x'$  je průměr hodnot,  $x_1$  až  $x_n$  jsou měřené hodnoty a  $n$  je počet hodnot (Zvára, 2004).

### **Směrodatná odchylka**

Směrodatná odchylka vyjadřuje odchylku hodnot od průměru. Pokud je vzdálenost od průměru malá, je malá i směrodatná odchylka a naopak. Vypočítá se jako odmocnina z rozptylu (průměrný čtverec odchylky od průměru). Směrodatná odchylka na rozdíl od rozptylu má stejný fyzikální rozměr jako původní veličina.

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

kde  $x$  je hodnota měření,  $x'$  je průměrná hodnota,  $n$  je počet hodnot (Zvára, 2004).

### RMSE (root mean square error)

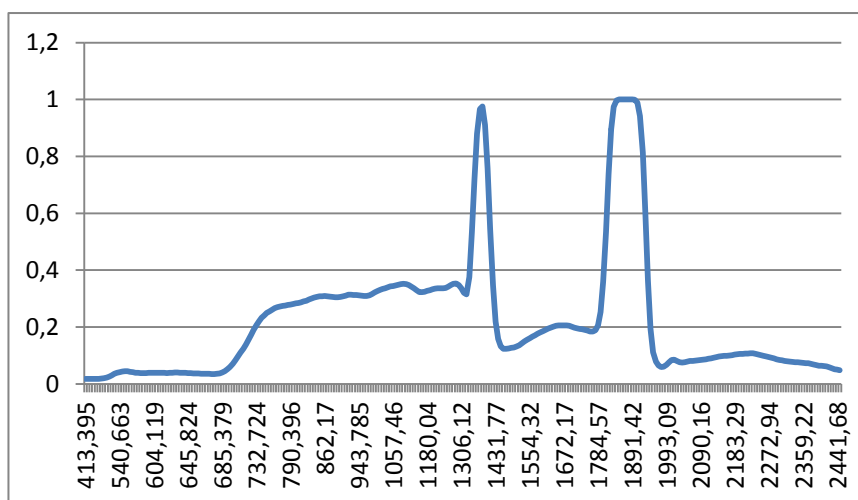
Střední kvadratická chyba měří rozdíl mezi hodnotou měřenou a hodnotou, která byla odhadnuta modelem. Rovnice vypadá takto:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - y'_j)^2},$$

kde  $y$  jsou odhadnuté hodnoty,  $y'$  jsou měřené hodnoty,  $n$  je počet hodnot (ERSI help, 2013).

#### 3.7.4 Spektrální analýza biochemických látek z obrazových dat APEX

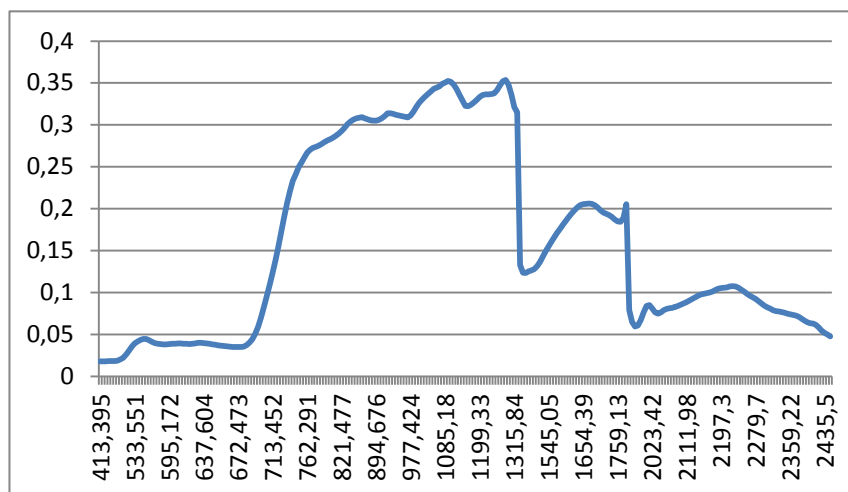
V SW ENVI byly z obrazu vybrány skupinky pixelů reprezentující jednotlivé stromy (oblasti zájmu – ROI), které byly nalezeny pomocí souřadnic zaměřených pomocí GPS přímo v terénu (body byly v SW ArcGIS převedeny do souřadnicového systému WGS 84, v němž je i samotný snímek APEX). Vzhledem k přesnosti zaměření stromů byla ve většině případů vybrána skupinka stromů v nejbližším okolí zaměřeného bodu. Pro každou skupinku stromů byla následně vygenerována spektrální křivka odrazivosti. Grafy spekter jednotlivých stromů ukázaly oblasti vodní absorpce, které nebyly upraveny. Jedná se o intervaly od 1 335 nm do 1 441 nm a od 1 792 nm do 1 938 nm, celkem je postiženo 33 pásem (viz graf 2).



Graf 2: Spektrum obrazových dat

Zdroj: Autor

Vlnové délky postižené chybou byly z následujících modelů vyřazeny (funkce *spectral subset* v SW ENVI). Modely byly tedy aplikovány na spektrum, které je zobrazeno na grafu 3.



Graf 3: Upravené spektrum obrazových dat

Zdroj: Autor

Pro obrazová data, stejně jako pro data z kontaktní sondy a z integrační sféry, byla zjišťována závislost pro obsah ligninu, karotenoidů a vody. Protože pro obrazová data jsou k dispozici pouze spektrální křivky pro celé stromy, byly hodnoty obsahů biochemických látek průměrovány pro vybrané stromy. V cílovém souboru bylo tedy 40 vzorků (stromů) a 255 spektrálních pásem.

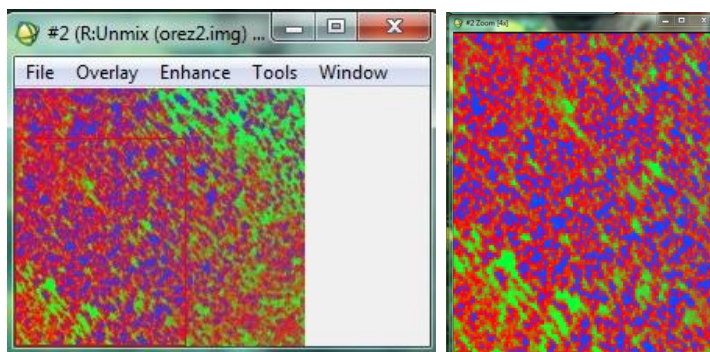
Protože pro laboratorní data vycházely nejlépe modely vytvořené pro první derivaci spektra, byla pro obrazová data použita pouze tato transformace vypočtená podle vzorce popsaného výše. V tomto případě se hodnota  $\Delta_\lambda$  pohybovala cca od 6 do 13 nm. Následně byl zopakován postup tvorby korelogramu, výpočtu kritické hodnoty pro Pearsonův korelační koeficient (0,304 849) pro hladinu významnosti 0,05. Nakonec byla provedena vícenásobná kroková regrese pro původní spektrum a pro první derivaci spektra.

Výsledná rovnice modelu pro lignin a první derivaci spektra byla aplikována na samotná obrazová data. Aby bylo možno provést tuto operaci, bylo nejprve nutno vytvořit masku výskytu smrku ztepilého.

### 3.7.5 Tvorba masky

Maska lesa byla vytvořena z výřezu snímku APEX. Výřez byl proveden v SW PCI Geomatica funkcí *Clipping and Subsetting*, kde je možné pořídít výřez snímku a zachovat všechna pásma a následně uložit do formátu \*.img.

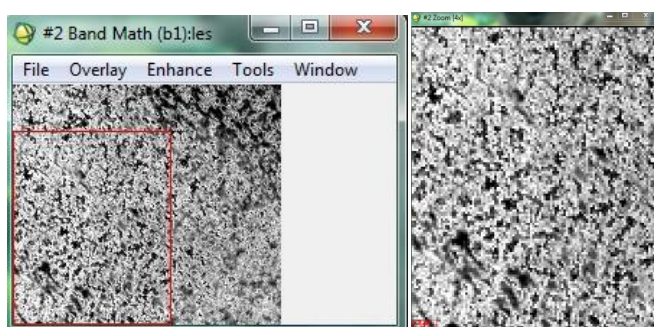
Do SW ENVI byl nahrán výřez snímku APEX, nejprve byly ve snímku vybrány oblasti zájmu (ROI) pro smrky, půdu, stíny, zástavbu a případně oblačnost a třída ostatní. Následně byla využita klasifikační metoda *spectral unmixing* (*Spectral/Mapping Methods/Linear Spectral Unmixing*), kde byly jako koncové členy použity vytvořené ROI (*Import/from ROI/EVF from input file*). Více o této metodě je popsáno ve studii Zeng et al. (2007) nebo v ENVIhelp (2013).



Obrázek 17: Aplikace spectral unmixing (červená – les, půda – zelená, stín – modrá)

Zdroj: Autor

Výsledkem klasifikace je několik frakcí, které zastupují rozložení krajinných typů v obraze. Na obrázku 17 červená barva představuje lesní porost, modrá barva zastíněné oblasti a zelená barva travnatou plochu. Nástrojem band math (*Basic tools/band math*) bylo z výsledného obrázku vybráno pouze pásmo lesa, na obrázku 18 je les představován nejsvětějšími pixely.



Obrázek 18: Pásmo lesa

Zdroj: Autor

Z tohoto výsledku byla vytvořena maska lesa (*Basic tools/masking/built mask*), pomocí prahových hodnot. Prahové hodnoty byly vybrány podle hodnot nejsvětějších pixelů představující les. Prahové hodnoty byly zadány od 1,2 do 1,8. Hodnota 1,2 byla zvolena na základě porovnání pásma lesa (viz obrázek 18) a snímku zobrazeného v pravých barvách, tyto snímky byly propojeny funkcí *Link Displays* a následně bylo zjišťováno, zda pixel určité hodnoty

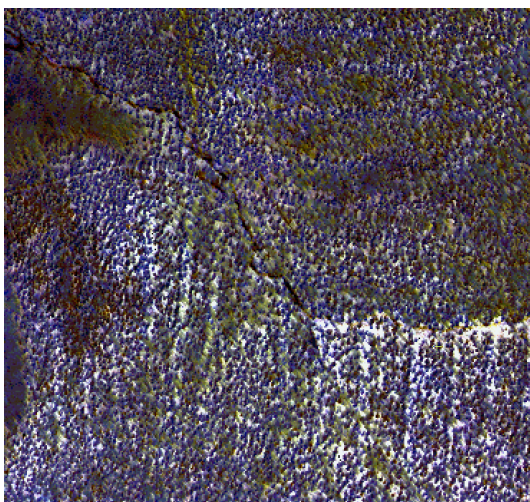
ještě spadá do lesního porostu. Hodnota 1,8 byla maximální hodnota pixelu ve snímku na obrázku 18. Výsledná maska má pouze hodnoty 1 a 0, kde hodnota 1 představuje les (bílá) a hodnota 0 (černá) zbylé oblasti (stín a půdu).

Následně byly na původní výřez aplikovány indexy pro rozlišení typů lesa.

$$\frac{2150 \text{ nm}}{558 \text{ nm}}, \frac{1650 \text{ nm}}{558 \text{ nm}} \text{ a } \frac{750 \text{ nm}}{558 \text{ nm}}$$

(Buřičová, 2011).

Indexy byly aplikovány pomocí funkce *bnd math* a následně spojeny do jednoho obrazu pomocí funkce *layer stacking*.



Modrá barva odpovídá smrkovému porostu, bílá barva stínům, zelená až hnědá představuje listnaté lesy, zatravněné plochy nebo holou půdu. Tmavě hnědá až černá představuje zastavěnou plochu.

Obrázek 18: Aplikace indexů

Zdroj: Autor

Na obraz s aplikovanými indexy (viz obrázek 18) byla přiložena maska lesa. Díky tomu bylo možné masku upravit a odstranit pixely listnatého lesa a v některých případech i nesprávně klasifikované pixely travnaté plochy a stinných oblastí. Znovu byly vybrány oblasti zájmu, provedeno *spectral unmixing* a vytvoření masky podle prahových hodnot. Tento postup byl aplikován na všech osm výřezů. Výsledné maky jsou v kapitole 4 na obrázku 21.

### 3.7.6 Tvorba ligninové mapy

Pro vytvoření ligninové mapy bylo nutné nejprve na výřezy snímků aplikovat vytvořené masky (*Basic Tools/Masking/Aply Mask*). Podle hodnocení jednotlivých modelů bylo rozhodnuto, že pro tvorbu ligninové mapy bude použit model s první derivací spektra. Protože SW ENVI nemá funkci, která by obraz transformovala na první derivaci, musela být transformace provedena

pomocí nástroje *band math*, kde byla aplikována výše zmíněná rovnice pro výpočet první derivace, ale jen pro pásma, která byla obsažena v modelu (kroková regrese vybrala do modelu 5 pásem, první derivace byla tedy vypočtena pouze pro těchto 5 pásem). Pásma byla následně nástrojem *layer stacking* vložena do jednoho obrazu. Na těchto 5 pásem byla aplikována výsledná regresní rovnice s koeficienty a pásmy vypočtenými pomocí vícenásobné krokové regrese.

$$y = 26,014 - 7760,422 \cdot \lambda_1 - 1616,257 \cdot \lambda_2 + 830,775 \cdot \lambda_3 + 10018,991 \cdot \lambda_4 - 1015,034 \cdot \lambda_5,$$

kde  $y$  je výsledný obsah ligninu,  $\lambda_1$  až  $\lambda_5$  jsou první derivace odrazivosti na vlnových délkách:  $\lambda_1 = 2\,162,12$  nm,  $\lambda_2 = 960,432$  nm,  $\lambda_3 = 2\,008,31$  nm,  $\lambda_4 = 622,051$  nm,  $\lambda_5 = 2\,441,68$  nm.

Výsledná mapa již obsahovala pixely s hodnotou obsahu ligninu v mg/g. Tato mapa byla převedena do formátu \*.tif. Výsledný mapový výstup byl zpracována v prostředí ArcMap (SW ArcGIS), kam byl soubor \*.tif nahrán a klasifikován do tříd. Výsledné mapy obsahují čtyři klasifikované třídy podle obsahu ligninu v intervalech 0–25 mg/g, 25–26 mg/g, 26,1–27 mg/g, 27 a více mg/g.

### 3.8 Srovnání integrační sféry a kontaktní sondy

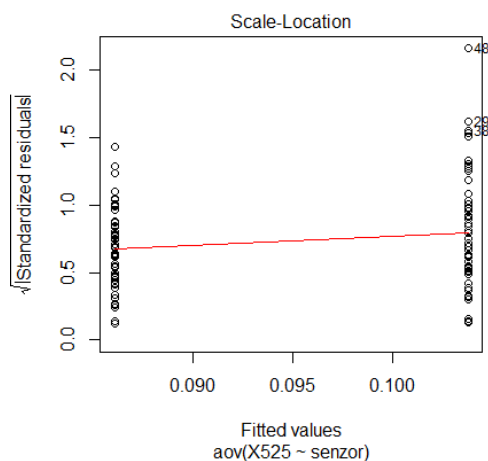
Jak již bylo zmíněno výše, pro analýzu byla použita data z kontaktní sondy a z integrační sféry. Jedním z cílů práce bylo porovnání jednotlivých spekter a výsledků z jednotlivých typů měření.

Srovnání proběhlo nejprve graficky, kdy byla do grafu vynesena průměrná spektra z jednotlivých přístrojů a jejich rozdíl. Dále byla vypočtena jednoduchá regrese pro obsah ligninu a jednotlivá spektra a do grafu byly vyneseny koeficienty determinace pro jednotlivé vlnové délky, křivky byly odečteny a zároveň s rozdílem vyneseny do grafu. Nakonec byla graficky porovnána spektra s odstraněným kontinuem.

Statistické porovnání proběhlo pomocí analýzy rozptylu ANOVA. Rozdíl mezi jednoduššími typy ANOVA a regresními modely je pouze v tom, že v případě ANOVA jsou vysvětlujícími proměnnými faktory. ANOVA model lze spočítat stejně dobře jako lineární regresní model, v němž je faktor nahrazen sérií tzv. *dummy variables*. Každá s těchto proměnných odpovídá jedné hladině faktoru a obsahuje pro dané pozorování hodnotu 1 jen tehdy, pokud dané pozorování nabývá danou hladinu faktoru, jinak je hodnota nulová. Z toho vyplývá, že v sérii *dummy variables* kódujících jeden faktor má každé pozorování jednu jedničku, ostatní hodnoty jsou nuly (Šmilauer, 1998–2007).

Model byl aplikován na každou vlnovou délku zvlášť. Proměnnou tedy vždy byla vlnová délka a přístroj. Proměnná „vlnová délka“ udává odrazivost na příslušné vlnové délce, proměnná „přístroj“ udává, jak byla data měřena (integrační sférou nebo kontaktní sondou). Pro každý přístroj je k dispozici 51 pozorování (předpoklad vyrovnaného uspořádání). ANOVA popisuje rozdíly odrazivosti na určité vlnové délce pro jednotlivé přístroje. Test odpovídá nulové hypotéze, že se odrazivosti těchto dvou typů měření mezi sebou neliší (tj. přístroje dávají stejná spektra odrazivosti).

Ke grafickému posouzení modelu je možné použít diagram, ve kterém jsou vynášeny odmocniny z absolutních hodnot regresních reziduálů proti fitovaným hodnotám. (Šmilauer, 1998–2007)



Obrázek 20: Diagram

Zdroj: Autor

Diagram na obrázku 20 ukazuje, že skupina s vyšší hodnotou odrazivosti (svislý pruh bodů vpravo) má o něco vyšší variabilitu než skupina bodů vlevo. To znamená, že může být porušena homogenita variancí, závažnost posuzuje Bartlettův test.

Protože pro většinu vlnových délek byla hypotéza o shodě variance zamítnuta na hladině menší než 0,05, bylo potřeba jednotlivá spektra transformovat. Byl proveden logaritmus spektra  $[\log(\text{odrazivost}+1)]$  a ANOVA byla vypočtena znovu podle postupu uvedeného výše. Nulová hypotéza, která bude potvrzena nebo vyvrácena, říká, že se od sebe jednotlivé senzory neliší.

### 3.9 Statistické hodnocení jednotlivých výzkumných ploch

Pro hodnocení jednotlivých výzkumných ploch a jejich rozdílů byly nejprve počítány základní statistiky, jako jsou průměr, směrodatná odchylka, minimum, maximum a další pro každé stanoviště a pro každou zkoumanou látku, jak pro obsah ligninu, karotenoidů a vody v jehlicích smrku ztepilého, tak i pro jednotlivé prvky v půdě.

Následně byl aplikován model ANOVA (popsaný výše), tentokrát do něj vstupovaly proměnné výzkumná plocha a jednotlivé výše zmíněné látky. Model bude tedy popisovat rozdíly v obsazích biochemických látek nebo prvků v půdě pro jednotlivé plochy. Pro některé prvky byla vytvořena transformace (odmocnina dané hodnoty), protože nespĺňovaly homogenitu variancí (výpočet Bartlettova testu).

Následně bylo provedeno mnohonásobné porovnání tzv. Tukeyho test, který odhalí odlišnosti mezi jednotlivými plochami (které se od sebe navzájem nejvíce liší). Metoda je vytvořena pro porovnání všech párů populačních průměrů pro množinu nezávislých stejně rozdělených, se stejným rozptylem (Katina, 2006). Tato metoda na zvolené hladině  $\alpha$  zamítne hypotézu  $H_0$ , že se od sebe jednotlivé plochy neliší.

Nakonec byla pomocí jednosměrného modelu ANOVA porovnána i samotná spektra pro jednotlivé plochy. Zvláště bylo porovnáno spektrum kontaktní sondy, integrační sféry a spektra obrazová.

Tento postup byl zopakován, ale místo proměnné výzkumná plocha do modelu vstupovala proměnná oblast, která označuje, zda se vzorek půdy či jehlic odebíral z plochy ležící na západě nebo na východě Krkonošského národního parku.

### 3.10 Posouzení vlivu dalších parametrů na obsah biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého

K jednotlivým plochám byly uvedeny i další parametry, které by mohly mít vliv na obsah biochemických látek v jehlicích smrku, např. nadmořská výška stanoviště, stáří stromů, sklonitost. Tento vliv byl testován pomocí dvoucestné analýzy variace modelu ANOVA. Jako jedna proměnná do modelu vstupovala biochemická látka (lignin, karotenoidy, voda). Dvoucestná ANOVA umožňuje odpovědět na otázku, zda má na obsah biochemických látek vliv nadmořská výška, stáří stromů nebo sklon reliéfu. Následně byly zobrazeny i odpovídající koeficienty, které říkají, jaký je vliv jednotlivých parametrů (pozitivní, negativní) a které parametry mají vliv vyšší a které nižší (Šmilauer, 1998–2007). Do modelu byla přidána i interakce parametrů, která ve většině případů neprokázala žádné zlepšení modelu.



Posouzení látek obsažených v půdě bylo provedeno pomocí jednoduché a mnohonásobné lineární regrese v programu R. Jednoduchá lineární regrese zkoumá vztah mezi dvěma veličinami, kde jedna z nich nezávisle proměnná má ovlivňovat závisle proměnnou. Mnohonásobná lineární regrese zkoumá závislost závisle proměnné na několika nezávisle proměnných. Střední hodnota závisle proměnné může být funkcí několika nezávisle proměnných (Zvára, 2004).

*Box 5: Výpočet jednoduché a mnohonásobné lineární regrese v programu R*

```
jednoduchá<-lm(závislá~nezávislá, data=tabulka)
mnohonásobná<-lm(závislá~nezávislá1 + nezávislá2
+ ...+ nezávisláN, data=tabulka)
```

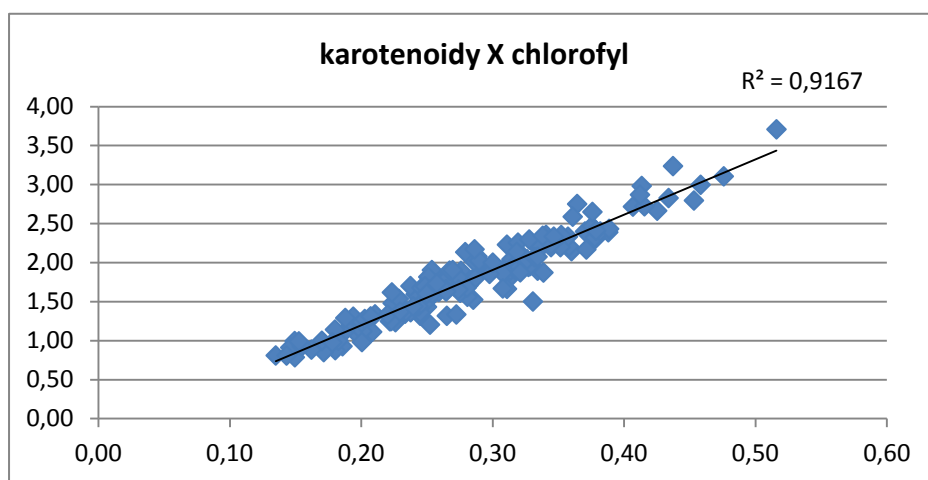
*Zdroj: R help*

## 4 VÝSLEDKY

### 4.1 Obsahy biochemických látek

Maximální obsah ligninu zjištěný laboratorní chemickou analýzou byl 41,789 mg/g, tato hodnota náleží vzorku s označením LH-37-D3 (Pod Lysou horou, strom 37, dolní větev, třetí ročník jehlic), minimální obsah ligninu je 16,408 mg/g pro vzorek s označením LI-102-D3 (Pod Liščí boudou, strom 102, dolní větev, 3. ročník jehlic). Průměrná hodnota obsahu ligninu je 27,86 mg/g a směrodatná odchylka 5,21 mg/g.

Maximální obsah karotenoidů byl zaznamenán u vzorku P-P3-D2 (Pudlava, strom P3, dolní větev druhý ročník jehlic) s hodnotou 0,135 pigment/mg sušiny a maximum u vzorku A-F4-D3 (Alžbětinka, strom F4, dolní větev, 3. ročník jehlic) s hodnotou 0,516 pigment/mg sušiny. Směrodatná odchylka je 0,075 7 a průměr má hodnotu 0,285 pigment/mg sušiny. Graf 4, kde je na vodorovné ose vynesena obsah karotenoidů a na svislé ose obsah chlorofylu, ukazuje, že stejné vzorky s maximální a minimální hodnotou je možné očekávat také u chlorofylu.



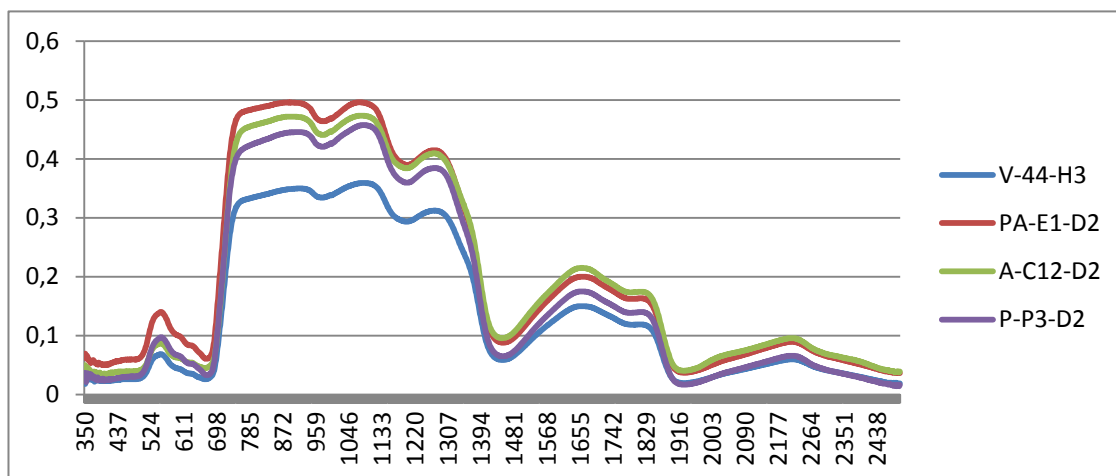
Graf 4: Srovnání obsahu karotenoidů s obsahem chlorofylu

Zdroj: Autor

Maximální obsah vody byl zaznamenán u vzorku MD-F-H2 (Modrý důl, strom F, horní větev, druhý ročník jehlic) s hodnotou 59,667 %, minimum připadá vzorku A-C12-H3 (Alžbětinka, strom C12, horní větev, třetí ročník jehlic) a má hodnotu 43,726 %. Směrodatná odchylka je 2,237 % a průměr má hodnotu 48,466 %.

## 4.2 Analýza laboratorních spekter

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, laboratorní spektra byla snímána dvěma způsoby, kontaktní sondou (přímo v terénní laboratoři) a integrační sférou (v laboratoři PřF UK v Praze). Graf 5 ukazuje spektra 4 různých vzorků pořízená kontaktní sondou. Vzorek V-44-H3 má nejnižší odrazivost v celém souboru dat, naopak vzorek PA-E1-D2 má nejvyšší odrazivost. Další dva vzorky slouží k porovnání spekter integrační sféry uvedené v grafu 7.

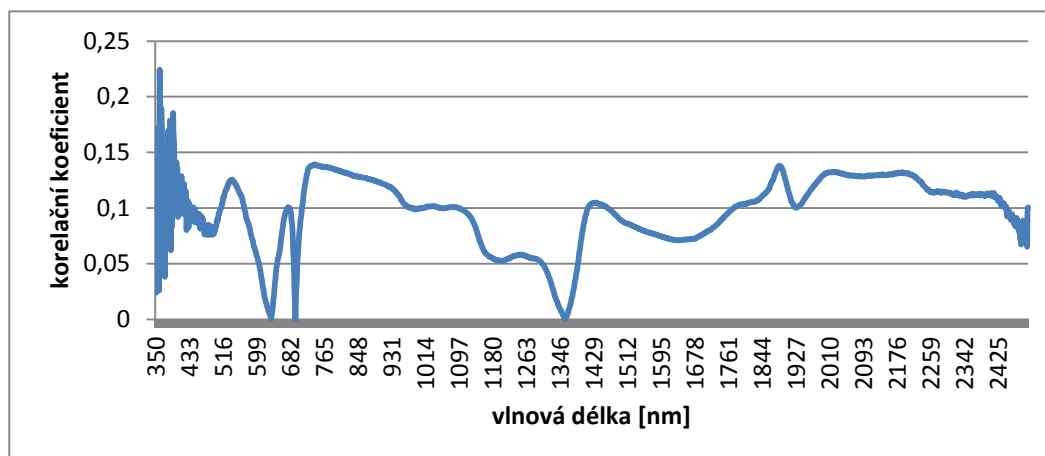


Graf 5: Spektra pořízená kontaktní sondou

Zdroj: Autor

Pro spektra z kontaktní sondy byla zjišťována lineární závislost mezi obsahy biochemických látek a odrazivostí na jednotlivých vlnových délkách. Nejprve byla provedena jednoduchá regresní analýza pro jednotlivé vlnové délky a obsah ligninu. V následující tabulce je uvedeno deset vlnových délek s nejvyššími korelačními koeficienty.

Korelační koeficienty neprokázaly žádnou lineární závislost mezi vlnovými délkami (spektrum z CP) a obsahem ligninu. Hodnota korelačních koeficientů nepřesáhla vypočtenou kritickou hodnotu pro 72 stupňů volnosti a hladině významnosti 0,05, která je 0,225 8.



Graf 6: Korelogram pro obsah ligninu a základní spektrum kontaktní sondy

Zdroj: Autor

Jednoduchá lineární regrese pro první derivaci spektra již přinesla lepší výsledky. Bylo nalezeno 138 vlnových délek, které měly vyšší korelační koeficient, než je jeho kritická hodnota (0,225 8). V tabulce 9 je opět uvedeno deset vlnových délek s nejvyšším korelačním koeficientem pro obsahy ligninu.

Tabulka 9: Korelační koeficienty pro první derivaci spektra CP - lignin

Vlnová délka	Korelační koeficient	Vlnová délka	Korelační koeficient
388	0,410	2 323	0,352
427	0,394	426	0,350
2 217	0,393	959	0,348
2 224	0,379	1 924	0,343
874	0,365	806	0,338

Zdroj: Autor

Vlnové délky více odpovídají literatuře (viz kapitola 2), několik vlnových délek se však stále nachází ve viditelném spektru.

Lineární regrese pro spektrum s odstraněným kontinuem našla 21 vlnových délek, které měly vyšší korelační koeficient, než je kritická hodnota koeficientu (0,227), viz tabulka 10.

Tabulka 10: Korelační koeficienty pro spektrum s odstraněným kontinuem CP - lignin

Vlnová délka	Korelační koeficient	Vlnová délka	Korelační koeficient
854	0,340	1 077	0,271
889	0,307	1 076	0,265
775	0,299	774	0,261
765	0,289	1 078	0,258
351	0,271	839	0,255

Zdroj: Autor

Z výsledných tabulek je patrné, že s vlnovými délkami uvedenými v literatuře (viz kapitola 2) se nejvíce shodují vlnové délky první derivace spektra.

Následně byla zpracována jednoduchá lineární regrese pro obsah karotenoidů. Opět byla vytvořena pro základní spektrum, pro první derivaci spektra a pro spektrum s odstraněným kontinuem. Tabulka 11 uvádí vždy deset vlnových délek s největším korelačním koeficientem.

Tabulka 11: Vlnové délky s nejvyšším korelačním koeficientem (CP)

Základní spektrum		První derivace spektra		Spektrum s odstr. kontinuem	
Vlnová délka	r	Vlnová délka	r	Vlnová délka	r
706	0,472	688	0,546	857	0,251
705	0,472	692	0,544	886	0,241
707	0,471	691	0,543	760	0,239
704	0,471	693	0,542	352	0,231
708	0,470	690	0,542	856	0,227
709	0,469	689	0,542	354	0,219
703	0,469	644	0,539	786	0,207
710	0,468	694	0,538	788	0,202
702	0,467	687	0,532	887	0,201
711	0,465	695	0,532	877	0,184

Zdroj: Autor; poznámka: r je korelační koeficient

Studie Hernandez-Clemente et al. (2012) uvádí vlnové délky navržené pro odhad karotenoidů: 470, 500, 550, 635, 678, 680, 708, 760 nm. Tyto vlnové délky se nejvíce shodují s výsledkem první derivace spektra.

Nakonec byla provedena lineární regrese pro obsah vody v jehlicích smrku. Tabulka 12 opět uvádí prvních deset vlnových délek s nejvyšším korelačním koeficientem pro základní spektrum pro první derivaci spektra a spektrum s odstraněným kontinuem.

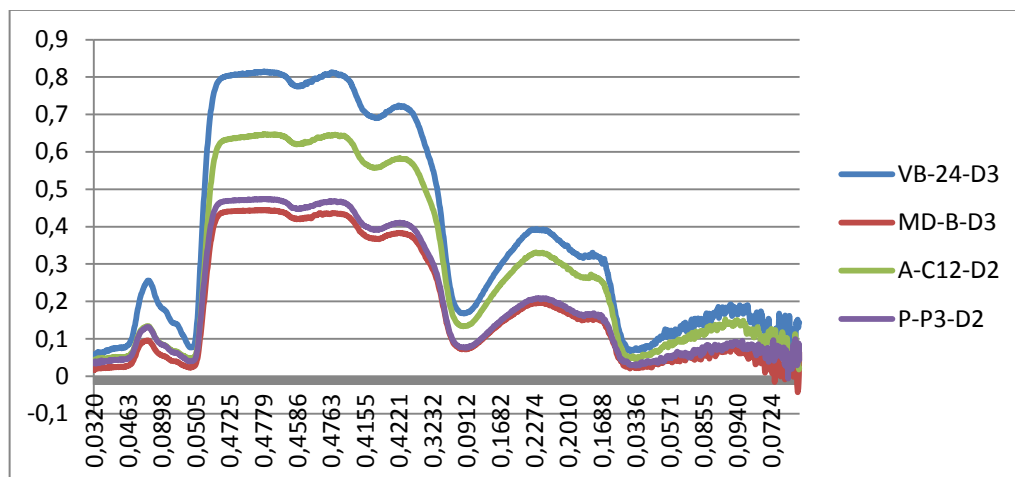
Tabulka 12: Vlnové délky s nejvyšším korelačním koeficientem (CP)

Základní spektrum		První derivace spektra		Spektrum s odstr. kontinuem	
Vln. délka	r	Vlnová délka	r	Vlnová délka	r
1 420	0,2120	1 825	0,405	1 396	0,303
1 421	0,2120	1 816	0,383	1 397	0,303
1 422	0,2120	1 817	0,378	1 395	0,303
1,423	0,2120	1 805	0,376	1 398	0,303
1 419	0,2120	1 686	0,374	1 394	0,303
1 424	0,2119	1 286	0,369	1 399	0,302
1 425	0,2119	1 820	0,367	1 393	0,302
1 418	0,2119	1 818	0,365	1 400	0,302
1 426	0,2117	1 809	0,360	1 392	0,302
1 417	0,2116	1 279	0,359	1 401	0,302

Zdroj: Autor ; poznámka: r je korelační koeficient

Literatura uvádí (viz kapitola 2), že absorpce vody se projevuje na vlnových délkách blízko 970 nm, 1 400 nm, 1 900 nm, 1 200 nm a 1 770 nm.

Stejný postup byl aplikován na spektra z integrační sféry. Graf 7 ukazuje spektra několika vzorků pořízených integrační sférou. Vzorek VB-24-D3 má nejvyšší odrazivost z celého souboru dat, MD-B-D3 naopak nejnižší.



Graf 7: Spektra pořízená integrační sférou

Zdroj: Autor

Původní spektra z integrační sféry jsou pořízena v rozsahu vlnových délek od 350 nm do 2 500 nm, protože je však začátek a konec spektra zatížen velkým podílem šumu, bylo spektrum „oříznuto“ na interval od 400 nm do 2 400 nm.

Nejprve byla opět provedena jednoduchá lineární regrese pro obsah ligninu a jednotlivé vlnové délky spektra pořízeného integrační sférou. V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty korelačních koeficientů pro základní spektrum, první derivaci spektra a pro spektrum s odstraněným kontinuem.

Tabulka 13: Korelační koeficienty pro vlnové délky z integrační sféry a lignin

Základní spektrum		První derivace spektra		Spektrum s odstr. Kontinuem	
Vlnová délka	r	Vlnová délka	r	Vlnová délka	r
502	0,345	2 218	0,508	2 313	0,451
484	0,345	2 060	0,452	2 314	0,427
438	0,344	2 174	0,451	2 312	0,424
501	0,343	1 901	0,450	2 247	0,424
471	0,343	2 164	0,436	2 142	0,404
439	0,342	1 065	0,43	2 248	0,397
467	0,342	2 173	0,426	2 143	0,389
474	0,342	668	0,408	2 141	0,373
437	0,340	1 581	0,399	902	0,371
429	0,340	1 081	0,394	2 246	0,370

Zdroj: Autor

Z tabulky je patrné, že podobně jako u spekter získaných kontaktní sondou se pro základní spektrum nejvyšší korelační koeficienty pohybují ve viditelném spektru, opět je možné tento jev považovat za náhodnou korelaci s jinou látkou či jevem. Nejvíce se literatuře přibližují vlnové délky získané po první derivaci spektra a po odstranění kontinua (viz kapitola 2).

Tabulka 14 shrnuje výsledky jednoduché lineární regrese pro karotenoidy a základní a transformovaná spektra.

Tabulka 14: Korelační koeficienty pro vlnové délky z integrační sféry a karotenoidy

Základní spektrum		První derivace spektra		Spektrum s odstr. kontinuem	
Vlnová délka	r	Vlnová délka	r	Vlnová délka	r
702	0,430	644	0,640	707	0,529
703	0,430	640	0,636	708	0,529
701	0,429	614	0,576	709	0,528
704	0,428	647	0,574	706	0,528
705	0,427	687	0,566	710	0,527
553	0,426	1 338	0,559	705	0,527
549	0,426	1 793	0,555	704	0,527
554	0,426	693	0,554	711	0,527
552	0,426	518	0,553	712	0,526
700	0,425	686	0,553	713	0,526

Zdroj: Autor

Tabulka 15: Korelační koeficienty pro spektra integrační sféry a vodu

Základní spektrum		První derivace spektra		Spektrum s odstr. kontinuem	
Vlnová délka	r	Vlnová délka	r	Vlnová délka	r
2 079	0,347	2 339	0,513	2 008	0,591
2 006	0,346	1 716	0,511	2 009	0,590
2 017	0,345	1 971	0,465	2 010	0,588
2 013	0,343	655	0,457	2 011	0,576
2 052	0,341	537	0,452	2 007	0,544
2 005	0,338	2 181	0,451	2 006	0,531
2 023	0,336	1 713	0,450	2 015	0,523
2 018	0,336	989	0,450	2 012	0,517
552	0,426	518	0,553	712	0,526
700	0,425	686	0,553	713	0,526

Zdroj: Autor

Následně byla stejným způsobem zpracována i obrazová data ze senzoru APEX. Byla zjišťována závislost pro spektra skupinek stromů získaná z obrazu. Skupinky stromů byly vybrány na základně zaměřených GPS bodů. V tabulce 16 jsou uvedeny pouze korelační koeficienty pro první derivaci spektra, protože základní spektra neprokázala signifikantní závislost s biochemickými obsahy látek (hodnoty korelačních koeficientů nepřesáhly kritickou hodnotu Pearsonova korelačního koeficientu 0,305).



Tabulka 16: Korelační koeficienty pro první derivaci spektra obrazových dat APEX

Lignin		Karotenoidy		Voda	
Vlnová délka	r	Vlnová délka	r	Vlnová délka	r
1 103,88	0,4403	666,28	0,530	930,55	0,384
2 162,12	0,439	663,24	0,519	2 378,62	0,368
2 008,31	0,431	578,43	0,465	938,176	0,355
2 169,20	0,401	582,48	0,455	2 385,04	0,333
2 030,93	0,389	669,35	0,450	945,96	0,327
2 038,42	0,366	1 039,24	0,410	968,89	0,313
1 113,29	0,365	672,47	0,384	943,79	0,313
1 228,37	0,342	574,47	0,374	960,432	0,313
2 441,68	0,342	660,24	0,369	952,06	0,313
960,43	0,340	1 296,4	0,367	713,45	0,311

Zdroj: Autor

### 4.3 Statistické hodnocení modelů

Podle postupu uvedeného v metodické části této práce byly vytvořeny jednotlivé modely pro odhad obsahu biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého. Model byl vytvořen na základě vícenásobné krokové regrese, do níž vstupovaly vlnové délky vybrané na základě vytvořených korelogramů. Kroková regrese následně vybrala signifikantní vlnové délky, které byly použity pro predikci obsahu biochemických látek. Modely byly vytvořeny pro data získaná kontaktní sondou, integrační sférou a nakonec pro obrazová data APEX a pro transformace spekter.

Tabulka 17 uvádí základní parametry datových souborů, které byly důležité pro výpočet jednotlivých modelů.

Tabulka 17: Základní parametry datových souborů

Látka	Senzor	Transformace	Kritická hodnota $r$	Počet vlnových délek vyšších než kritická hodnota $r$	Počet vlnových délek nižších než počet vzorků	Počet vzorků
<b>lignin</b>	<b>CP</b>	<b>X</b>	<b>0,225 753</b>	<b>0</b>	<b>73</b>	<b>74</b>
<b>lignin</b>	<b>CP</b>	<b>1. derivace</b>	<b>0,225 753</b>	<b>138</b>	<b>73</b>	<b>74</b>
<b>lignin</b>	<b>CP</b>	<b>CR</b>	<b>0,227 267</b>	<b>21</b>	<b>72</b>	<b>73</b>
<b>lignin</b>	<b>CP</b>	<b>CR+1.derivace</b>	<b>0,227 267</b>	<b>156</b>	<b>72</b>	<b>73</b>
karotenoidy	CP	X	0,166 005	812	137	138
karotenoidy	CP	1. derivace	0,166 005	773	137	138
karotenoidy	CP	CR	0,166 005	16	16	138
voda	CP	X	0,166 005	331	137	138
voda	CP	1. derivace	0,166 005	647	137	138
voda	CP	CR	0,166 005	1 443	137	138
<b>lignin</b>	<b>IS</b>	<b>X</b>	<b>0,294 330</b>	<b>192</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
<b>lignin</b>	<b>IS</b>	<b>1. derivace</b>	<b>0,294 330</b>	<b>119</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
<b>lignin</b>	<b>IS</b>	<b>CR</b>	<b>0,294 330</b>	<b>49</b>	<b>42</b>	<b>43</b>
karotenoidy	IS	X	0,294 330	170	42	43
karotenoidy	IS	1. derivace	0,294 330	258	42	43
karotenoidy	IS	CR	0,294 330	263	42	43
voda	IS	X	0,294 330	203	42	43
voda	IS	1. derivace	0,294 330	131	42	43
voda	IS	CR	0,294 330	593	42	43

Zdroj: Autor; Poznámka:  $r$  – Pearsonův korelační koeficient, CP – kontaktní sonda, IS – integrační sféra, CR – odstranění kontinua

Kritická hodnota korelačního koeficientu se mění s počtem vzorků v jednom souboru. Z toho důvodu byl u karotenoidů a vody nalezen signifikantní vztah s vlnovými délkami z kontaktní sondy u více vlnových délek než v případě integrační sféry.

Tabulka 18 uvádí parametry modelů (počet vlnových délek vstupujících do modelu, statistické parametry modelu) vytvořených pro odhad biochemických látek z dat kontaktní sondy a integrační sféry.

Tabulka 18: Výsledky modelu „méně vlnových délek než vzorků“

Látka	Senzor	Transformace	Počet vln. délek vybraných přes korelogram pro SMLR	Počet vln. délek ze SMLR	Koeficient determinace výsl. modelu	RSE modelu	p-hodnota modelu
Lignin [mg/g]	CP	X	0	0	0	0	0
Lignin [mg/g]	CP	1. derivace	50	10	0,674 90	3,392 00	5,19E-12
Lignin [mg/g]	CP	CR	19	1	0,074 62	5,381 00	0,01937
Lignin [mg/g]	CP	CR+1.der.	47	9	0,478 80	4,287 00	1,99E-06
Karotenoidy*	CP	X	137	9	0,435 00	0,058 97	1,60E-12
Karotenoidy*	CP	1. derivace	123	12	0,524 40	0,054 75	2,87E-15
Karotenoidy*	CP	CR	11	6	0,223 60	0,068 33	7,87E-06
Voda [%]	CP	X	120	4	0,163 10	2,093 00	8,53E-05
Voda [%]	CP	1. derivace	62	17	0,580 60	1,560 00	1,09E-15
Voda [%]	CP	CR	79	2	0,090 62	2,166 00	1,64E-03
Lignin [mg/g]	IS	X	10	1	0,119 10	5,295 00	2,52E-02
Lignin [mg/g]	IS	1. derivace	42	12	0,856 90	2,507 00	3,76E-09
Lignin [mg/g]	IS	CR	29	6	0,578 70	3,915 00	1,76E-05
Karotenoidy*	IS	X	28	1	0,185 20	0,065 45	4,45E-03
Karotenoidy*	IS	1. derivace	26	13	0,907 00	0,026 44	4,77E-11
Karotenoidy*	IS	CR	42	6	0,675 50	0,044 16	2,42E-07
Voda [%]	IS	X	34	3	0,318 70	1,821 00	2,03E-03
Voda [%]	IS	1. derivace	39	26	0,959 20	0,709 30	1,98E-06
Voda [%]	IS	CR	30	7	0,596 90	1,480 00	2,71E-05

Zdroj: Autor; Poznámka: SMLR – vícenásobná kroková regrese, RSE – směrodatná odchylka reziduí, RMSE – střední kvadratická chyba, CP – kontaktní sonda, IS – integrační sféra, CR – odstranění kontinua, \* – [pigment na mg sušiny]

Počty vlnových délek vstupujících do vícenásobné krokové regrese vybrané na základě korelogramu pro každou látku, transformaci a senzor. Vlnové délky byly vybrány na základě vrcholů, které značí vlnové délky nejcitlivější na danou látku, a vždy bylo vybráno tolik vlnových délek, aby jejich počet byl nižší než počet vzorků v souboru. Vícenásobná kroková regrese vybrala ty vlnové délky ze vstupního souboru, které byly statisticky signifikantní pro daný model. Nejvíce vlnových délek vybrala kroková regrese pro model vody z derivovaných dat integrační sféry (26) a kontaktní sondy (17). Koeficient determinace udává, jakou část z celkového součtu čtverců se podařilo regresní funkcí vysvětlit. Nejvyšší koeficient determinace vyšel pro model vody z první derivace spekter integrační sféry 0,959 2, dále pro karotenoidy z první derivace dat IS 0,907 a pro lignin z první derivace dat IS 0,856 9. Pro tyto modely vyšla

i nejnižší směrodatná odchylka reziduí. Hodnota  $P$  říká, zda nulová hypotéza, že vysvětlující proměnné nemají vliv na vysvětlovanou proměnnou, bude zamítnuta, nebo potvrzena. Ve všech případech se hypotéza zamítá alespoň na hladině významnosti nižší než 0,05. Vícenásobná kroková regrese ve svém výsledku určí i koeficienty, které slouží pro následný výpočet odhadu biochemických látek, koeficienty jsou uvedeny v příloze 4.

Koeficient determinace nefunguje dobře, pokud není počet pozorování větší než počet parametrů modelu. Šmilauer (1998–2007) ve své studii uvádí, že koeficient determinace je značně ovlivněn počtem vysvětlujících proměnných a velikostí výběru. Z toho důvodu byly vyzkoušeny také modely, kde do krokové regrese vstupovalo pouze tolik vlnových délek, aby byl zachován poměr, v němž je počet vlnových délek ku počtu vzorků roven 1 : 10. Výsledky modelu jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19: Výsledky modelu „1 : 10“

Látka	Senzor	Transformace	Počet vln. délek	Počet vln. délek ze SMLR	Koeficient determinace modelu	RSE modelu	p- hodnota modelu
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>CP</b>	<b>X</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>CP</b>	<b>1. derivace</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>0,437 7</b>	<b>4,326 00</b>	<b>5,33E-07</b>
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>CP</b>	<b>CR</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>CP</b>	<b>CR+1.der</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>0,087 2</b>	<b>5,383 00</b>	<b>0,04103</b>
karotenoidy*	CP	X	14	1	0,222 6	0,067 10	5,16E-09
karotenoidy*	CP	1. derivace	14	5	0,334 6	0,063 02	1,78E-10
karotenoidy*	CP	CR	14	8	0,260 1	0,067 20	3,60E-06
voda [%]	CP	X	14	4	0,168 6	2,087 00	5,69E-05
voda [%]	CP	1. derivace	14	5	0,331 8	1,878 00	2,31E-10
voda [%]	CP	CR	14	0	0	0	0
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>IS</b>	<b>X</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0,119 1</b>	<b>5,295 00</b>	<b>0,02518</b>
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>IS</b>	<b>1. derivace</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0,531 5</b>	<b>4,015 00</b>	<b>8,76E-06</b>
<b>lignin [mg/g]</b>	<b>IS</b>	<b>CR</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>0,362 9</b>	<b>4,621 00</b>	<b>0,0006002</b>
karotenoidy*	IS	X	4	1	0,185 2	0,265 45	0,04447
karotenoidy*	IS	1. derivace	4	2	0,471 9	0,053 36	3,71E-06
karotenoidy*	IS	CR	4	2	0,406 2	0,056 59	3,86E-05
voda [%]	IS	X	4	2	0,254 0	1,880 00	0,003302
voda [%]	IS	1. derivace	4	4	0,584 2	1,441 00	1,05E-06
voda [%]	IS	CR	4	3	0,463 1	1,616 00	2,59E-05

Zdroj: Autor; poznámka: SMLR – vícenásobná kroková regrese, RSE – směrodatná odchylka reziduí, RMSE – střední kvadratická chyba, CP – kontaktní sonda, IS – integrační sféra, CR – odstranění kontinua, \* – [pigment na mg sušiny]

Nejvyšších koeficientů determinace bylo opět dosaženo pro první derivace spektra integrační sféry, a to pro lignin 0,531 5, pro karotenoidy 0,471 9 a pro vodu 0,584 2.

### Hodnocení modelů pro obrazová data APEX

Na obrazová data APEX byla aplikována stejná metoda zpracování jako na data laboratorní. Opět proběhl výběr vlnových délek přes korelogram a následná vícenásobná kroková regrese. Výsledná rovnice pro výpočet obsahu ligninu byla následně aplikována na obrazová data.

Vypočtená kritická hodnota korelačního koeficientu pro hladinu významnosti 0,05 vyšla 0,304 849. V tomto případě byly také aplikovány dva modely s různým počtem vlnových délek.

Tabulka 20: Výsledky modelu „méně vlnových délek než vzorků“ pro obrazová data

Látka	Transformace	Počet vln. délek vyšších než kritická hodnota r	Počet vln. délek do SMLR	Počet vln. délek za SMLR	Koeficient determinace modelu	RSE	p-hodnota
lignin [mg/g]	X	4	4	1	0,127 7	3,909	0,02362
lignin [mg/g]	1. derivace	23	15	5	0,628 9	2,695	1,48E-06
karotenoidy*	X	0	0	0	0	0	0
karotenoidy*	1. derivace	33	18	3	0,375 7	0,0389	0,0006473
voda [%]	X	0	0	0	0	0	0
voda [%]	1. derivace	13	13	2	0,252 7	1,459	0,004565

Zdroj: Autor; poznámka: SMLR – vícenásobná kroková lineární regrese, RSE – směrodatná odchylka reziduí, \* – [pigment na mg sušiny]

Nejvyšší koeficient determinace vyšel pro první derivaci spektra a obsah ligninu v jehlicích smrku ztepilého 0,628 9. Výsledná rovnice byla aplikována na obrazová data. Rovnice má tvar:

$$y = 26,014 - 7760,422 \cdot \lambda_1 - 1616,257 \cdot \lambda_2 + 830,775 \cdot \lambda_3 + 10018,991 \cdot \lambda_4 - 1015,034 \cdot \lambda_5,$$

kde  $y$  je výsledný obsah ligninu,  $\lambda_1$  až  $\lambda_5$  jsou první derivace odrazivosti na vlnových délkách:  $\lambda_1 = 2\,162,12$  nm,  $\lambda_2 = 960,432$  nm,  $\lambda_3 = 2\,008,31$  nm,  $\lambda_4 = 622,051$  nm,  $\lambda_5 = 2\,441,68$  nm. Pro karotenoidy a vodu byly koeficienty determinace shledány jako příliš nízké, a proto nebyly karotenoidové mapy a mapy obsahu vody v porostech smrku ztepilého modelových území zpracovány.

Tabulka 21: Výsledky modelu „1 : 10“ pro obrazová data

Látka	Transformace	Počet vln. délek vyšších než kritická hodnota $r$	Počet vln. délek do SMLR	Počet vln. délek za SMLR	Koeficient determinace modelu	RSE	p-hodnota
lignin [mg/g]	X	4	4	1	0,127 7	3,909 0	0,023 620 0
lignin [mg/g]	1. derivace	23	4	3	0,392 7	3,351 0	0,000 402 1
karotenoidy*	X	0	0	0	0	0	0
karotenoidy*	1. derivace	33	4	2	0,343 2	0,039 4	0,000 419 8
voda [%]	X	0	0	0	0	0	0
voda [%]	1. derivace	13	4	2	0,252 7	1,459 0	0,004 565 0

Zdroj: Autor; poznámka: SMLR – vícenásobná kroková lineární regrese, RSE – směrodatná odchylka reziduí, \* – [pigment na mg sušiny]

Pro karotenoidy a vodu vyšly pro oba typy modelů velmi podobné výsledky. V obou případech nejvyšší koeficient determinace vyšel pro první derivaci spektra a obsah ligninu. V modelu „1 : 10“ byl pro lignin dosažen nižší koeficient determinace než v modelu „méně vlnových délek než vzorků“.

#### 4.4 Porovnání laboratorních a obrazových dat

Laboratorně stanovený obsah ligninu byl v rozsahu od cca 23 mg/g do 34 mg/g, po aplikaci výše uvedené rovnice z modelu „méně vlnových délek než vzorků“ na obrazová data byly vypočteny obsahy ligninu v intervalu od 24 mg/g do 32 mg/g. Na základě porovnání ligninových map (viz ligninové mapy v příloze 7) s daty pro konkrétní stromy je patrné, že při nízkých průměrných hodnotách obsahu ligninu vypočteného laboratorně je v mapě též nižší obsah ligninu vypočtený pomocí regresní rovnice.

Tabulka 22: Průměrné „laboratorní“ a „obrazové“ hodnoty obsahu ligninu pro jednotlivé plochy

Obsahy	Laboratorní		Obrazové
	SMODCH	Průměr	Průměr
<b>Celkem</b>	<b>5,210 324</b>	<b>27,859 0</b>	<b>25,839 3</b>
Alžbětinka	4,680 524	30,594 7	26,297 2
Pod Lysou horou	6,247 111	29,631 3	26,176 6
Pod Liščí boudou	4,148 884	25,911 7	25,243 5
Modrý důl	4,159 000	26,231 1	25,879 0
Pašerácký chodníček	3,926 000	30,323 9	26,052 3
Pudlava	4,536 000	25,197 3	25,717 6
Václavák	5,589 000	26,131 0	25,563 0
Pod Voseckou boudou	4,170 000	30,365 4	25,841 6

Zdroj: Autor

Konkrétně pro Alžbětinku se hodnoty obsahu ligninu uvedené v ligninové mapě pohybují mezi 26 až 27 mg/g, Pod Lysou horou mezi 25–26 mg/g, Pod Liščí boudou většinou pod 25 mg/g, Modrý důl většina pixelů má hodnotu pod 25 mg/g a několik do 26 mg/g, Pašerácký chodníček od 25 do 27 mg/g, Pudlava pod 25 mg/g a Pod Voseckou boudou od 26 do 30 mg/g.

## 4.5 Výsledky validace modelů

### 4.5.1 Výsledky validace modelů pro Krkonoše

Validace byla provedena pouze pro modely s nejvyšším koeficientem determinace a pouze pro modely získané z laboratorních dat. Pro validaci bylo náhodně vybráno 10 vzorků z původního souboru dat, tzv. validační soubor. Validace byla provedena pro oba typy modelů (méně vlnových délek než vzorků i 1 : 10). Vždy byly porovnány hodnoty měřené a hodnoty vypočtené pomocí regresní rovnice.



Tabulka 23: Výsledky validace modelů pro 1. derivaci spektra

Látka	Model	RMSE	Směrodatná odchylka	Průměrný rozdíl	Průměr odhadu	Průměr měřených
lignin [mg/g]	1	5,760 957	4,931 162 32	3,362 128 1	29,494 770	26,132 643 40
lignin [mg/g]	2	4,744 722	4,750 346 68	1,484 309 6	27,616 950	26,132 643 40
karotenoidy*	1	0,002 361	0,101 475 43	-0,031 812 0	0,294 399	0,262 587 46
karotenoidy*	2	0,085 716	0,090 258 33	0,003 909 9	0,266 497	0,262 587 46
voda [%]	1	4,300 577	3,984 910 52	2,050 219 4	50,839 640	48,789 421 50
voda [%]	2	2,143 990	2,200 404 87	0,488 967 6	49,278 390	48,789 421 50

Zdroj: Autor; poznámka: modely jsou pro 1. derivaci spektra integrační sféry, model 1 – „méně vlnových délek než vzorků“, model 2 – „1 : 10“, \* – [pigment na mg sušiny]; střžení kvadratická chyba (RMSE) je uvedena v jednotkách dané látky.

Z tabulky 23 je patrné, že pro model číslo 2 v případě ligninu a vody byla RMSE nižší než pro model 1, kde bylo do regresní rovnice použito více vlnových délek. Tedy i přesto, že koeficient determinace pro tyto modely vyšel podstatně nižší, dá se říci, že hodnoty testovaných obsahů biochemických látek odhadl lépe. O tom svědčí i ostatní vypočtené statistiky.

Tabulka 24 uvádí vlnové délky, které byly použity v regresní rovnici, podle níž byly vypočteny hodnoty obsahu biochemických látek pro validační soubor (10 náhodně vybraných vzorků).

Tabulka 24: Vlnové délky použité do regresní rovnice

Látka	Model	Vlnové délky [nm]
lignin	1	2 060, 1 081, 1 650, 780, 2 164, 1 922, 1 901, 1 977, 2 014, 2 386, 872, 795
	2	2 218, 2 060, 1 901, 2 174
karotenoidy	1	644, 1 922, 1 338, 1 862, 640, 1 793, 519, 509, 694, 886, 613, 594, 665
	2	644, 1 338
voda	1	2 339, 1 716, 4 90, 2 181, 989, 954, 1 971, 1 500, 1 667, 1 634, 1 022, 2 153, 862, 2 081, 1 471, 537, 1 330, 655, 1 885, 843, 464, 1 010, 1 534, 1 346, 970, 1 713
	2	2 339, 1 716, 1 971, 655

Zdroj: Autor; poznámka: model 1 – „méně vlnových délek než vzorků“, model 2 – „1 : 10“

#### 4.5.2 Výsledky validace na nezávislých datech

Validace na nezávislých datech proběhla u modelu pro stanovení obsahu ligninu z dat kontaktní sondy pro první derivaci spektra. Tento model vyšel statisticky nejvhodnější pro data kontaktní sondy pořízená v Krkonoších. Validace proběhla na souboru dat ze Sokolovska pořízených kontaktní sondou v roce 2010. Bylo vybráno 15 vzorků ze 3 oblastí Sokolovska (5 z každé oblasti). Nezávislá data pro validaci dat z integrační sféry nejsou dostupná. Deset vzorků bylo náhodně vybráno jako validační soubor.

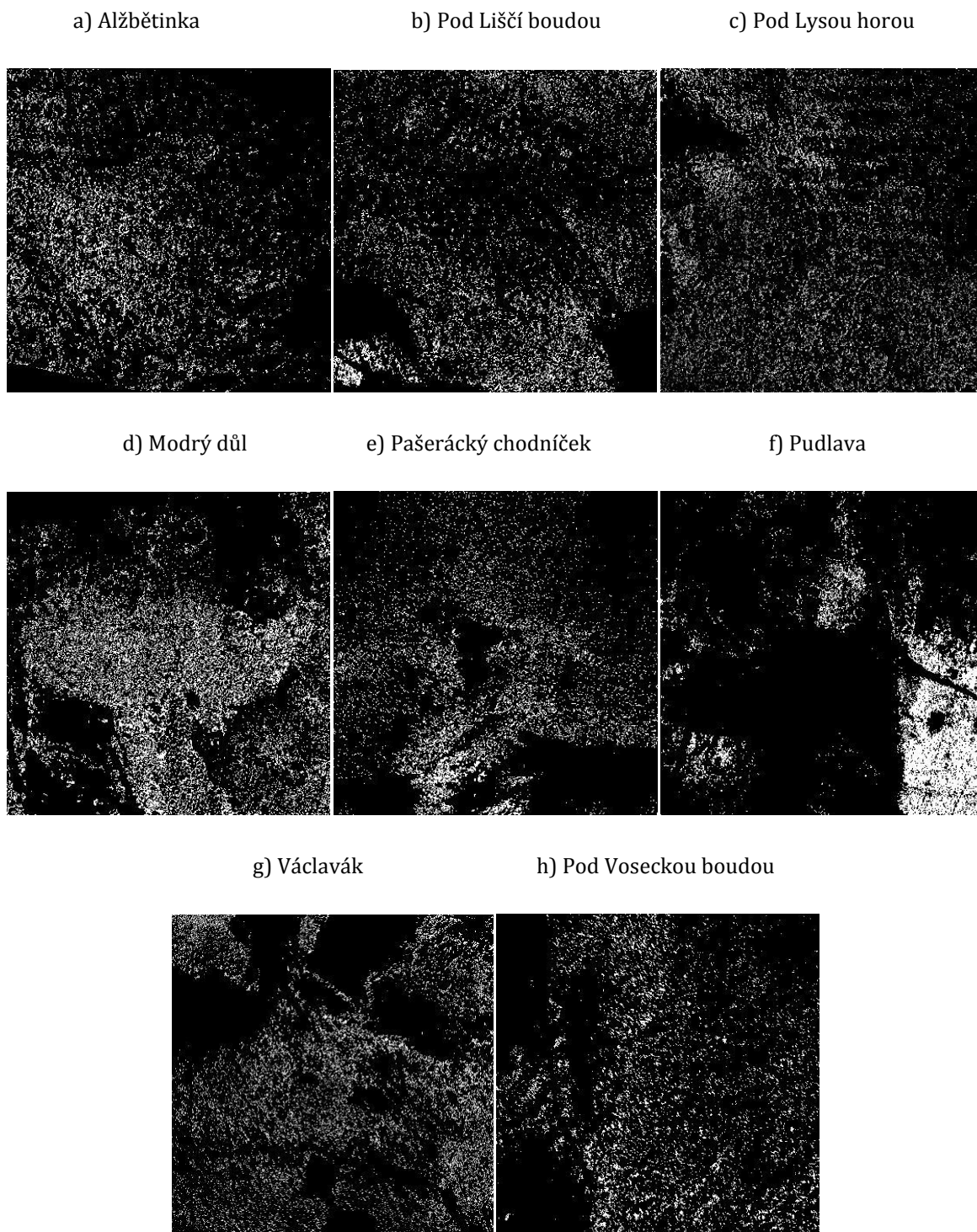
Nejprve byl na validační soubor aplikován model, který byl vypočten pro data pořízená v Krkonoších. Srovnání dat naměřených a vypočtených modelem dala RMSE 13,037. Je možné konstatovat, že tento model neodhaduje obsah ligninu dobře.

Následně byl zopakován postup zmíněný v kapitole 3. Do vícenásobné krokové regrese bylo z korelogramu vybráno 17 vlnových délek, SMLR jich následně pro model vybrala 11 (2 231, 2 206, 1 916, 2 122, 2 408, 2 481, 2 357, 893, 860, 445, 980 nm). Koeficient determinace modelu je 0,556 5, RSE vyšla 4,37 mg/g a p-hodnota  $4,654e^{-8}$ , což jsou výsledky srovnatelné s modelem pro první derivaci spektra kontaktní sondy z Krkonoš. Pomocí regresní rovnice získané pomocí SMLR byl vypočten obsah ligninu pro validační soubor. Výsledná RMSE byla 5,517.

Regresní rovnice je použitelná pouze pro oblast, pro kterou byla vytvořena. Bylo však prokázáno, že celý postup tvorby modelu je aplikovatelný i na jiný soubor dat. Ve vzorcích ze Sokolovska je podstatně vyšší obsah ligninu než ve vzorcích z Krkonoš (průměrný obsah na Sokolovsku je 40,08 a v Krkonoších je 27,85 mg/g).

#### 4.6 Výsledné masky

Výše zmíněná rovnice byla aplikována na obrazová data (výřezy pro všech 8 sledovaných ploch), která byla nejprve klasifikována tak, aby bylo možné vytvořit masky porostu smrku ztepilého pro jednotlivé plochy. Výsledkem tedy bylo osm masek. Masky mají hodnoty 0 a 1, kde 1 (bílá) značí oblasti výskytu smrků a 0 (černá) ostatní plochy (traviny, holá půda, zástavba atd.).

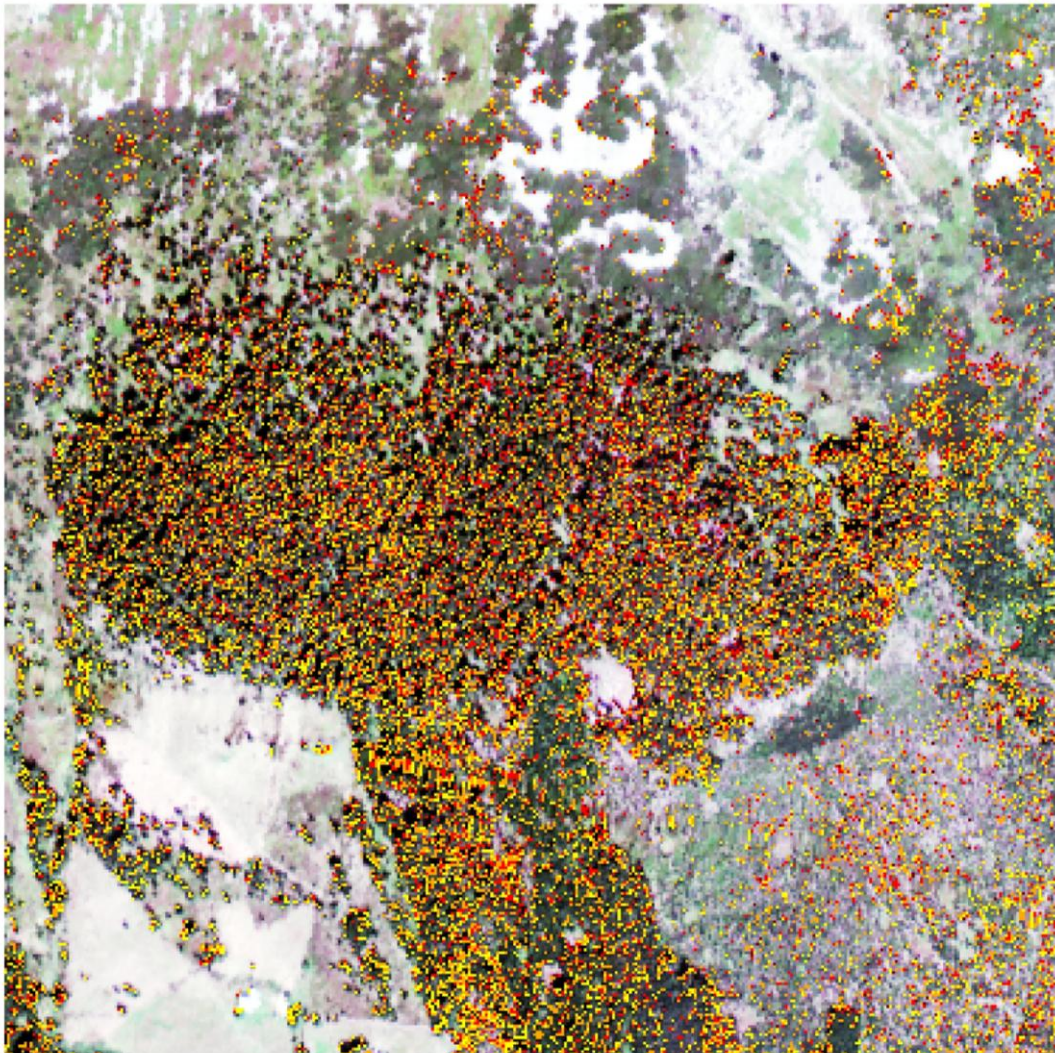


*Obrázek 21: Výsledné masky*

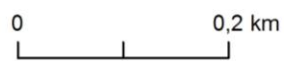
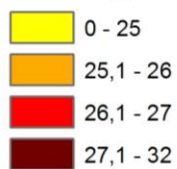
*Zdroj: Autor*

Tyto masky byly aplikovány na původní snímek a na takto upravený obraz byla následně aplikována regresní rovnice pro výpočet obsahu ligninu pro jednotlivé stromy v obraze (pixely, skupiny pixelů). Ukázka výsledné mapy viz obrázek 22, ostatní mapy jsou v příloze 7.

## MODRÝ DŮL



obsah ligninu [mg/g]

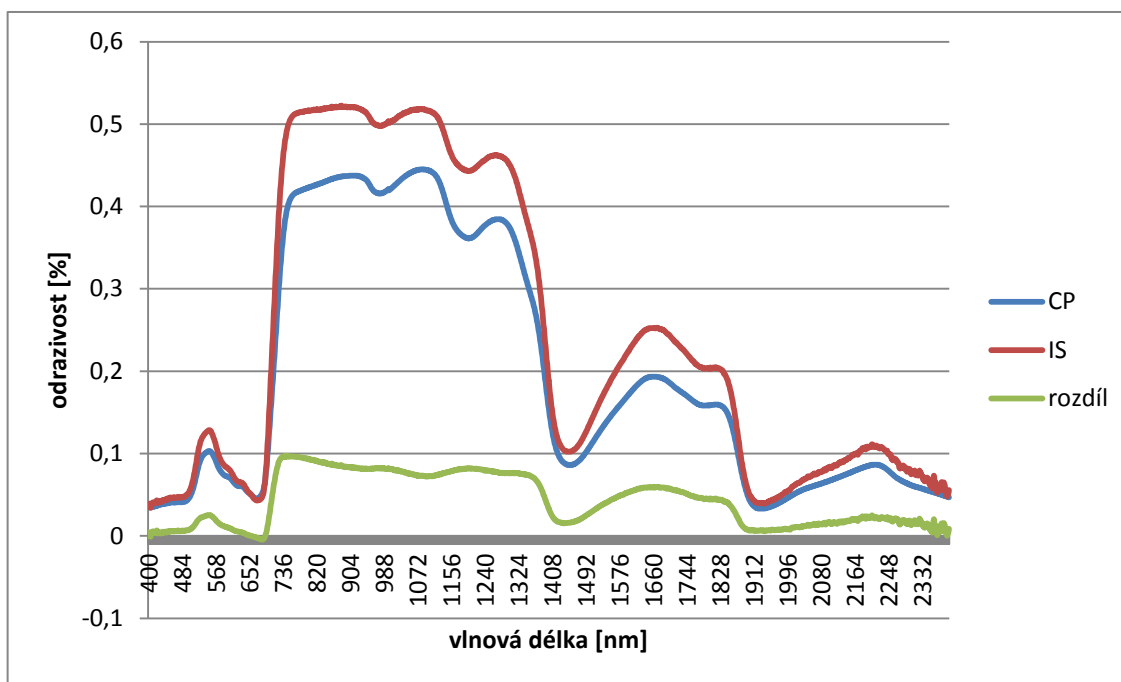


Obrázek 22: Ligninová mapa pro plochu Modrý důl

Zdroj: Autor

#### 4.7 Statistické srovnání spekter měřených pomocí kontaktní sondy a integrační sféry

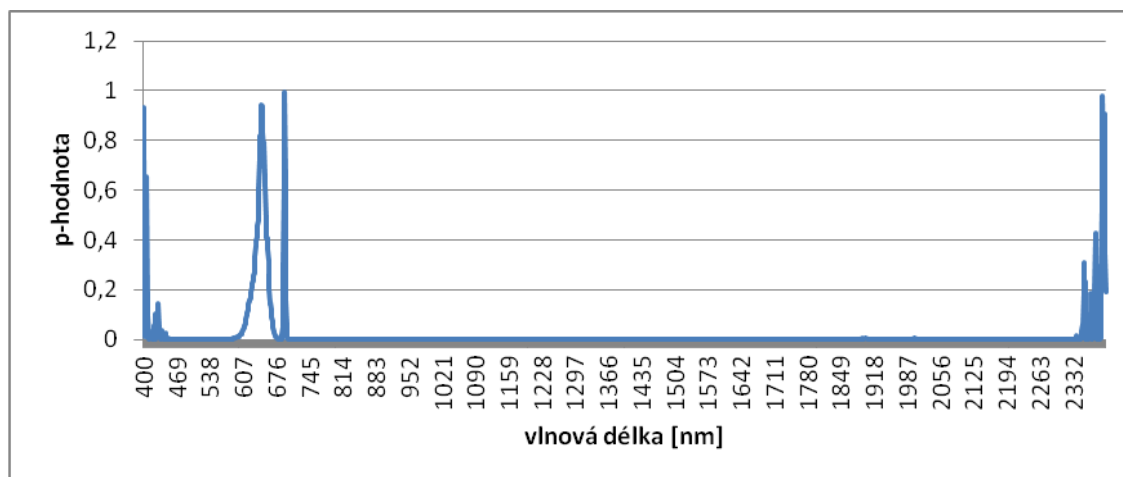
Pro srovnání těchto dvou způsobů měření byla nejprve porovnána průměrná křivka spekter z kontaktní sondy s průměrnou křivkou spekter z integrační sféry. Tyto průměry byly následně odečteny. Toto základní srovnání je vidět v grafu číslo 8.



Graf 8: Srovnání spekter z CP a IS

Zdroj: Autor

Z grafu je na první pohled patrné, že odrazivost naměřená integrační sférou je v několika intervalech podstatně vyšší než u spekter měřených kontaktní sondou. Aby byl rozdíl mezi těmito dvěma typy měření statisticky prokázán, byl aplikován jednosměrný model ANOVA pro jednotlivé vlnové délky. Z modelu byla zjištěna P-hodnota pro každou vlnovou délku, která nám řekne, na jaké hladině významnosti zamítáme nulovou hypotézu ( $H_0$  zní: senzory se od sebe neliší). P-hodnoty byly pro lepší orientaci vyneseny do grafu 9. Jedná se o výsledek ANOVA po transformaci spekter pomocí logaritmu (viz kapitola 3).



Graf 9: P-hodnoty modelu ANOVA

Zdroj: Autor

Většina p-hodnot (až na vrcholy v grafu) zamítá nulovou hypotézu na nižší hladině významnosti, než je 0,005. To znamená, že měření se od sebe liší, kromě intervalů vlnových délek od 400 nm do 410 nm, od 595 nm do 676 nm, od 689 nm do 699 nm a od 2 349 nm do 2 359 nm. Hodnoty na začátku a na konci spektra jsou značně kolísavé, což je způsobeno kolísáním hodnot odrazivosti na křivkách integrační sféry.

Tyto typy měření je možné porovnat také na základě výsledků získaných z jednotlivých lineárních modelů. Lineární modely aplikované na spektra z integrační sféry vždy dosáhly vyšších korelačních koeficientů než data z kontaktní sondy. Co se týče modelů vytvořených vícenásobnou krokovou regresí, zde byly pro data z integrační sféry vždy dosaženy podstatně vyšší koeficienty determinace než pro modely z dat kontaktní sondy. Dá se tedy říci, že spektra z integrační sféry jsou pro odhad biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého vhodnější než data z kontaktní sondy.

#### 4.8 Statistické hodnocení výzkumných ploch

Výzkumné plochy byly nejprve zhodnoceny/porovnány pomocí základních statistik (průměr, směrodatná odchylka atd.) pro obsahy biochemických látek a prvků v půdě.

Tabulka 25: Charakteristiky jednotlivých výzkumných ploch

		Prvky obsažené v půdě									Látky v jehlicích smrků		
Plocha	Parametr	pH	Ca	Mg	K	S	N	C <sub>ox</sub>	Humus	C/N	Lignin	Voda	Kar.
Alžbětinka	<b>Průměr</b>	<b>2,80</b>	<b>2,18</b>	<b>0,86</b>	<b>0,39</b>	<b>22,35</b>	<b>0,86</b>	<b>11,53</b>	<b>19,83</b>	<b>13,64</b>	<b>30,59</b>	<b>48,06</b>	<b>0,33</b>
	SMODCH	0,16	1,03	0,45	0,12	10,94	0,27	2,75	4,73	1,44	3,20	1,48	0,06
	MIN	2,66	1,43	0,46	0,29	10,20	0,63	8,74	15,03	11,60	26,08	46,89	0,27
	MAX	3,03	3,87	1,55	0,54	39,30	1,17	15,43	26,54	15,60	33,86	50,60	0,39
Pod Lysou horou	<b>Průměr</b>	<b>3,01</b>	<b>2,10</b>	<b>0,84</b>	<b>0,51</b>	<b>25,02</b>	<b>1,01</b>	<b>14,35</b>	<b>24,68</b>	<b>14,28</b>	<b>29,63</b>	<b>48,30</b>	<b>0,29</b>
	SMODCH	0,13	0,92	0,41	0,13	6,00	0,29	3,79	6,52	1,58	5,69	1,09	0,03
	MIN	2,81	1,10	0,48	0,39	17,54	0,77	10,48	18,03	12,60	22,88	47,49	0,25
	MAX	3,13	3,56	1,49	0,71	33,03	1,51	20,07	34,52	16,20	37,95	50,15	0,33
Pod Liščí boudou	<b>Průměr</b>	<b>2,55</b>	<b>4,17</b>	<b>1,43</b>	<b>0,62</b>	<b>40,15</b>	<b>1,71</b>	<b>26,56</b>	<b>45,69</b>	<b>15,58</b>	<b>26,46</b>	<b>49,53</b>	<b>0,31</b>
	SMODCH	0,12	0,74	0,74	0,14	10,00	0,22	3,98	6,85	1,53	2,86	1,75	0,05
	MIN	2,44	3,41	0,88	0,47	32,27	1,44	22,11	38,03	13,80	23,66	46,43	0,25
	MAX	2,76	4,98	2,67	0,84	54,18	1,97	31,24	53,73	17,70	30,55	50,62	0,37
Modrý důl	<b>Průměr</b>	<b>3,17</b>	<b>3,52</b>	<b>1,18</b>	<b>0,34</b>	<b>21,21</b>	<b>0,89</b>	<b>11,50</b>	<b>19,79</b>	<b>13,16</b>	<b>26,45</b>	<b>47,46</b>	<b>0,28</b>
	SMODCH	0,39	4,14	0,82	0,08	2,58	0,32	3,55	6,12	1,73	3,34	2,29	0,05
	MIN	2,81	1,13	0,38	0,27	18,57	0,59	8,35	14,36	11,20	22,42	44,79	0,19
	MAX	3,76	10,89	2,09	0,45	25,08	1,38	17,12	29,45	15,60	30,35	49,88	0,34
Pudlava	<b>Průměr</b>	<b>3,02</b>	<b>1,92</b>	<b>0,56</b>	<b>0,46</b>	<b>16,64</b>	<b>0,86</b>	<b>12,36</b>	<b>21,25</b>	<b>14,44</b>	<b>26,14</b>	<b>48,22</b>	<b>0,26</b>
	SMODCH	0,06	0,41	0,25	0,05	3,82	0,07	1,04	1,78	1,07	4,68	2,01	0,02
	MIN	2,95	1,36	0,33	0,38	10,16	0,79	11,05	19,01	12,80	21,36	46,53	0,22
	MAX	3,09	2,49	0,87	0,52	19,85	0,97	13,89	23,89	15,50	32,88	50,46	0,28
Pašerácký chodníček	<b>Průměr</b>	<b>2,85</b>	<b>2,54</b>	<b>0,76</b>	<b>0,45</b>	<b>21,85</b>	<b>0,99</b>	<b>14,68</b>	<b>25,25</b>	<b>14,78</b>	<b>30,70</b>	<b>48,04</b>	<b>0,30</b>
	SMODCH	0,20	1,84	0,46	0,27	7,52	0,45	8,13	13,98	2,84	2,55	1,05	0,02
	MIN	2,64	0,84	0,25	0,20	13,10	0,39	6,93	11,92	11,40	28,21	46,46	0,27
	MAX	3,16	5,24	1,35	0,86	32,95	1,52	26,09	44,87	17,80	34,65	49,28	0,32
Václavák	<b>Průměr</b>	<b>2,92</b>	<b>2,44</b>	<b>0,48</b>	<b>0,35</b>	<b>22,70</b>	<b>1,04</b>	<b>17,58</b>	<b>30,23</b>	<b>16,48</b>	<b>26,12</b>	<b>48,38</b>	<b>0,25</b>
	SMODCH	0,11	1,06	0,30	0,14	10,87	0,24	6,78	11,66	3,22	4,46	2,17	0,05
	MIN	2,82	1,23	0,24	0,21	8,10	0,72	10,34	17,78	13,30	21,92	45,96	0,16
	MAX	3,08	3,74	0,99	0,58	38,61	1,24	26,09	44,87	21,50	32,84	51,35	0,29
Pod Voseckou boudou	<b>Průměr</b>	<b>2,93</b>	<b>2,01</b>	<b>0,62</b>	<b>0,37</b>	<b>24,52</b>	<b>1,02</b>	<b>14,01</b>	<b>24,10</b>	<b>14,00</b>	<b>30,52</b>	<b>49,37</b>	<b>0,26</b>
	SMODCH	0,10	0,89	0,26	0,11	17,42	0,36	3,73	6,42	1,82	3,70	0,78	0,04
	MIN	2,78	1,04	0,40	0,24	5,80	0,74	10,06	17,30	11,80	25,26	48,39	0,22
	MAX	3,06	3,41	1,05	0,48	48,12	1,64	19,38	33,33	15,70	34,91	50,10	0,32

Poznámka: pH KCl; jednotky: Ca, Mg, K, S (mmol/100g); N, C<sub>ox</sub>, humus (%); lignin (mg/g); kart. (pigment/mg sušiny); voda (%)

Zdroj: Autor na základě výsledků z VÚMOP Praha-Zbraslav

Největší rozdíly mezi plochami byly zaznamenány pro obsah síry v půdě. Pro potvrzení rozdílů mezi výzkumnými plochami byl proveden jednosměrný test ANOVA.

Tabulka 26: Výsledky hodnocení výzkumných ploch pomocí testu ANOVA

Látka	p-hodnota	Hladina významnosti, na které je zamítnuta H <sub>0</sub>	p-hodnota Bartlettova testu
pH	0,011	0,050	0,179 80
Ca	0,461	nezamítá se	0,018 80*
Mg	0,098	0,100	0,504 70*
K	0,055 1	0,100	0,122 90
S	0,579	nezamítá se	0,008 50
N <sub>tot</sub>	0,025	0,050	0,169 60
Cox	0,001 2	0,010	0,030 60*
humus	0,000 938	0,001	0,049 88*
C/N	0,243	nezamítá se	0,421 40
lignin	0,181	nezamítá se	0,802 40
voda	0,539	nezamítá se	0,452 90
karotenoidy	0,040 4	0,050	0,421 40

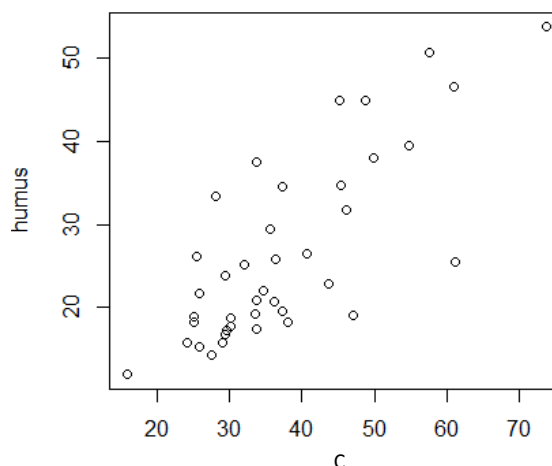
Zdroj: Autor; poznámka: \* provedena transformace pomocí odmocniny

Podle ANOVA se potvrzuje, že se plochy nejvíce liší v obsahu humusu v půdě a obsah uhlíku v půdě. Naopak byla zamítnuta původní teorie, že se jednotlivé plochy liší v obsahu síry v půdě. Co se týče biochemických látek obsažených v jehlicích smrku ztepilého, nejvíce se na základě jednotlivých ploch liší obsah karotenoidů.

Následně byl proveden Tukeyho test, který zjišťuje, které dvě plochy se od sebe nejvíce liší (porovnává všechny páry). Tento test byl proveden pouze pro látky, které prokázaly nejvyšší odlišnost ploch v předchozím testu. V obsahu humusu v půdě se nejvíce liší plochy Pod Liščí boudou a Modrý důl (p-hodnota: 0,000 397), plochy Pod Lysou horou a Alžbětinka s p-hodnotou 0,000 431, plochy Pod Liščí boudou a Pudlava s p-hodnotou 0,000 9, plochy Pod Liščí boudou a Pod Voseckou boudou s p-hodnotou 0,004, Pod Liščí boudou a Pod Lysou horou s (p-hodnota: 0,005 76) a Pod Liščí boudou a Pašerácký chodníček (p-hodnota: 0,007 56). V tomto případě se nejvíce odlišuje plocha Pod Liščí boudou. V případě obsahu C v půdě byly výsledky téměř totožné.

Vztah mezi obsahem uhlíku a humusu v půdě lze považovat za lineární (korelační koeficient je 0,77).

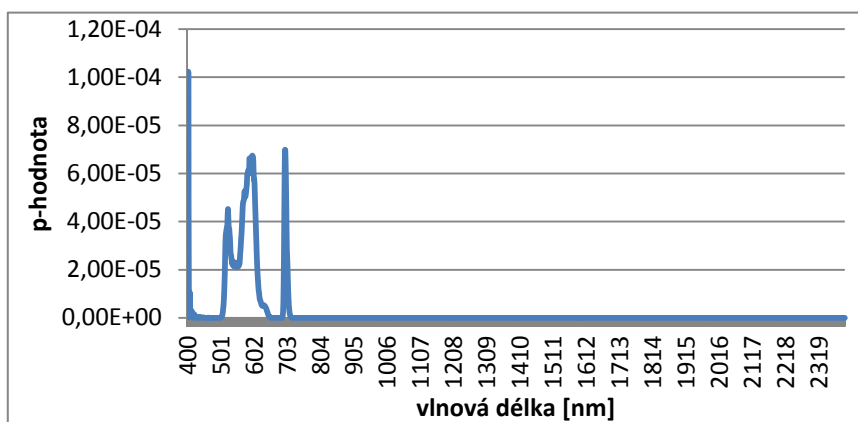




Graf 10: Závislost C na humusu

Zdroj: Autor

Nakonec bylo testováno, zda se pro jednotlivé výzkumné plochy liší spektra naměřená pomocí integrační sféry, kontaktní sondy a spektra obrazová. K tomu znovu posloužil jednosměrný test ANOVA. Nejprve byl aplikován pro spektra z kontaktní sondy. V tomto případě bylo zjištěno, že se pro jednotlivé výzkumné plochy spektra z kontaktní sondy liší a  $H_0$  (výzkumné plochy se neliší) se zamítá na hladině významnosti nižší než 0,001.

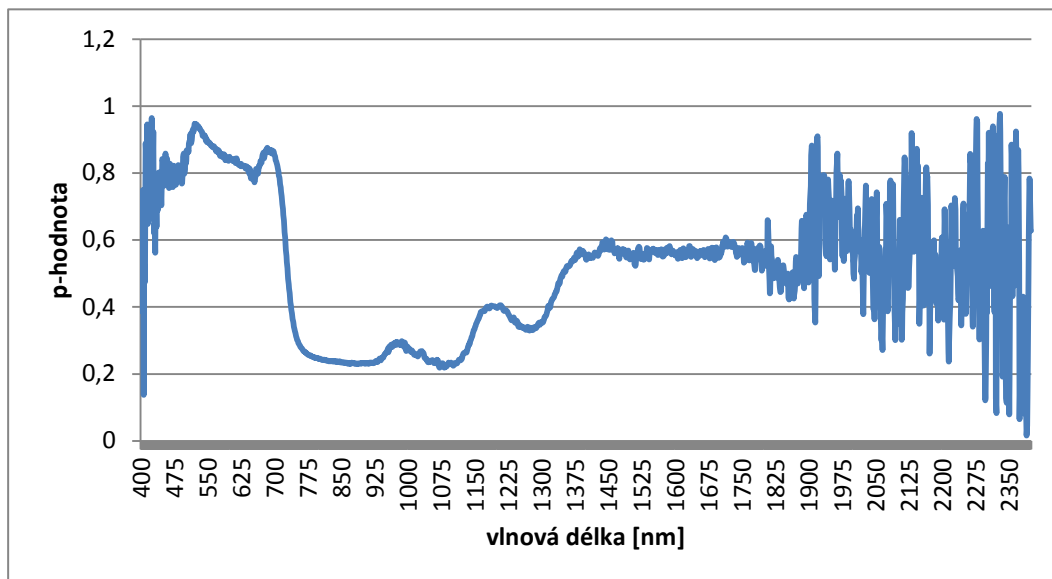


Graf 11: P-hodnoty pro vlnové délky z kontaktní sondy

Zdroj: Autor

V grafu 11 jsou patrné vrcholy, ale i tyto p-hodnoty jsou na takové hladině významnosti, že je možné  $H_0$  zamítnout.

Tentýž test byl využit pro spektra z integrační sféry

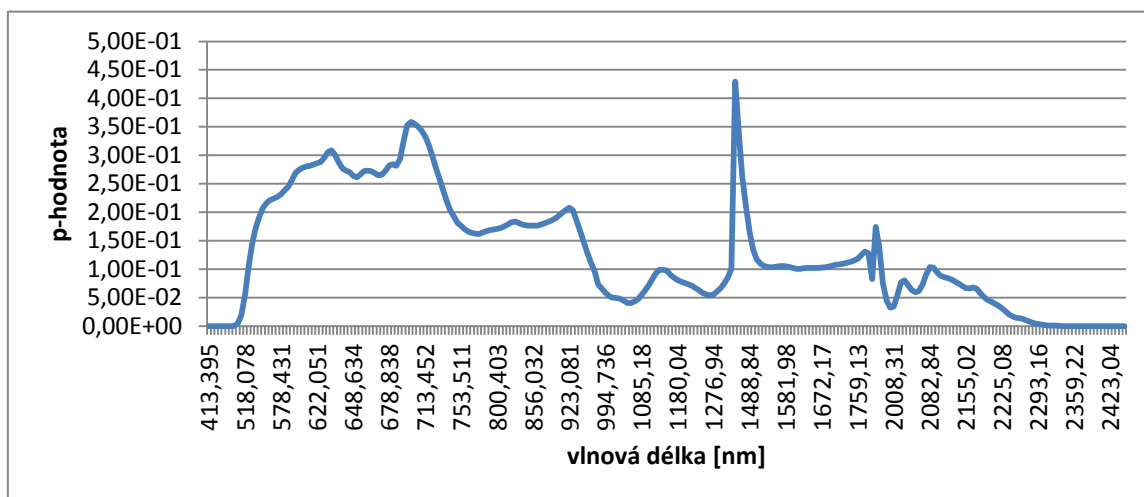


Graf 12: P-hodnoty pro vlnové délky z integrační sféry

Zdroj: Autor

V tomto případě hypotézu nelze zamítnout pro žádnou vlnovou délku kromě 2 390 nm, kterou je možno zamítnout na hladině významnosti 0,05.

Pro obrazová data vyšel jednosměrný model ANOVA následovně.



Graf 13: P-hodnoty pro vlnové délky z obrazových dat APEX

Zdroj: Autor

Zde je možné  $H_0$  zamítnout pro vlnové délky 413 nm až 490 nm na hladině významnosti 0,001, dále vlnové délky 1 021 až 1 075 nm na hladině významnosti 0,05, dále interval 1 993 nm až 2 008 nm na hladině významnosti 0,05 a interval od 2 190 nm až 2 448 nm na hladině významnosti 0,05 a nižší.

Z jednotlivých grafů je vidět, že se výsledky výrazně liší. V případě kontaktní sondy je možné říci, že se spektra pro jednotlivé plochy liší na všech vlnových délkách, na rozdíl od CP se pro jednotlivé plochy spektra z integrační sféry neliší. Pro obrazová data byl výsledek podobný jako u integrační sféry, především v části spektra od 400 nm do 1 300 nm.

Model ANOVA byl následně využit na posouzení rozdílů mezi oblastmi na východě a západě na základě prvků v půdě, biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého a na základě naměřených spekter. Nulovou hypotézu (proměnná na západě a východě se neliší) bylo možné zamítnout pouze pro N (p-hodnota=0,0496), C (p-hodnota=0,0241) a humus (p-hodnota=0,023) a to na hladině významnosti 0,05. Pro biochemické látky v jehlicích smrku ztepilého nebylo možné hypotézu zamítnout. V případě rozdílů ve spektrálním projevu výzkumných ploch východu a západu se ukázalo, že pro spektra pořízená kontaktní sondou se dá nulová hypotéza zamítnout pro všechny vlnové délky od 723 nm do 2400 nm. U spekter pořízených integrační sférou není možné nulovou hypotézu zamítnout u žádné z vlnových délek. U spekter získaných z obrazových dat APEX je možné nulovou hypotézu zamítnout na intervalu vlnových délek od 413,395 nm do 509,218 nm.

#### **4.8 Hodnocení možného působení dalších vlivů na obsah biochemických látek v jehlicích**

Dvoucestná ANOVA posloužila pro zhodnocení vlivu faktorů, jako jsou nadmořská výška, stáří stromů a sklon svahu, na obsah biochemických látek. Nejprve byl testován vliv sklonu a orientace svahu na obsah ligninu. Jednotlivé p-hodnoty nezamítly nulovou hypotézu, že tyto parametry nemají vliv na obsah ligninu v jehlicích, p-hodnota pro sklon vyšla 0,926 9 a pro orientaci 0,076 2. Nebyl prokázán ani vliv interakce mezi parametry. Dále byl zkoumán vliv stáří stromů a nadmořské výšky, zde se opět nepotvrdil vliv parametrů na obsah ligninu, ale byla zde prokázána interakce parametrů s p-hodnotou 0,016 1. Pro karotenoidy je možné hypotézu zamítnout pro orientaci svahu na hladině významnosti 0,05 (p-hodnota: 0,044 6) pro sklon svahu se vliv neprokázal, nebyl prokázán ani vliv interakce. Hypotézu bylo možné zamítnout také pro nadmořskou výšku na hladině významnosti 0,01 (p-hodnota: 0,006 93), vliv stáří stromů a interakce faktorů ve neprokázaly. Na obsah vody nemá vliv ani sklon a orientace svahu či interakce obou faktorů. Stejně tak nemá vliv na obsah vody ani stáří a nadmořská výška či interakce faktorů.

Následně pomocí jednoduché lineární regrese byla zkoumána závislost obsahu biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého na koncentraci prvků v půdě. Pro lignin nebyla

nalezena žádná lineární či exponenciální nebo logaritmická závislost s prvky obsaženými v půdě. Pro karotenoidy byla nalezena jediná závislost, a to s pH půdy, nulová hypotéza (pH nemá vliv na karotenoidy) byla zamítnuta na hladině významnosti 0,01 (p-hodnota: 0,001 52). U obsahu vody byla prokázána jediná závislost pro obsah síry v půdě na hladině významnosti 0,01 (p-hodnota: 0,001 64).

Dále byla provedena vícenásobná lineární regrese, kam jako vysvětlující proměnné vstupovaly prvky v půdě a vysvětlovanou proměnnou byla biochemická látka. V tomto případě se neprojevil žádný společný vliv prvků v půdě na obsahy biochemických látek.

Dále byl zkoumán vztah mezi jednotlivými biochemickými látkami. Pro lignin nebyla prokázána žádná závislost s obsahem vody či karotenoidů. Stejných výsledků bylo dosaženo i pro ostatní biochemické látky.

## 5 SHRNU TÍ A DISKUSE

V diplomové práci byl hledán vztah mezi spektrálním projevem jehlic smrku ztepilého a laboratorně stanovenými obsahy biochemických látek. Tímto tématem se zabývala již řada studií (např. Soukupová et al., 2002; Curran et al., 2001; Takahashi et al., 2004). Pro analýzu byla využita vícenásobná kroková regrese, která poskytla výslednou rovnici pro odhad obsahu biochemických látek. Analýza byla prováděna na třech typech spekter - z kontaktní sondy, integrační sféry a pro obrazová data APEX.

### 5.1 Diskuse přesnosti vstupních dat

Celý projekt začínal terénní kampaní, jak již bylo zmíněno výše, na každé z osmi ploch bylo vybráno pět stromů, jejichž poloha byla zaměřena pomocí GPS. Přesnost zaměřených stromů se většinou pohybuje kolem jednoho metru. U plochy Modrý důl u stromů A a F se přesnost zaměřením pohybuje přibližně od 4 do 6 m. Přesnost zaměřením je velmi důležitá pro nalezení korun stromů v jednotlivých snímcích, což je potřeba pro získání spektrálního projevu z obrazových dat. V tomto případě zaměřování proběhlo vždy jen u paty stromu. Protože v některých případech přesnost zaměřením není příliš vyhovující, bylo by dobré v terénu případně zaměřit i několik okolních stromů, přímo na místě zakreslit postavení stromů (případně změřit vzdálenost mezi stromy). Díky tomu by bylo jednodušší nalézt vzorový strom v hyperspektrálním snímku. V diplomové práci proto bylo využito vždy několik pixelů představujících skupinku stromů v okolí zaměřeného bodu.

### 5.2 Přesnost spektroskopického měření

Všech 180 vzorků bylo snímáno za pomoci kontaktní sondy v provizorní laboratoři vytvořené při terénní kampani. Jak již bylo zmíněno výše, měření probíhalo v černé Petriho misce, do které bylo naskládáno cca 6 výhonů. Možná nepřesnost, které je možné se při tomto postupu dopustit, je nedostatečná hustota jehlic, kdy jehlice nevytvoří homogenní plochy, a pak je možné, že kontaktní sonda nasnímá i podklad. Další nepřesnost spočívá v tom, že kontaktní sonda společně s jehlicemi nasnímá i dřevitou část výhonů. Právě snímání odrazivosti dřevitých částí výhonů může vést ke zkreslení spektra a ovlivnit absorpci ve vlnových délkách specifických pro lignin. Těmto chybám lze částečně zabránit odstraněním jehlic z dřevité části výhonu a homogenně

pokry t misku pouze jehlicemi, to by ovšem vyžadovalo mnohem větší časové vytížení a větší množství nasbíraných vzorků. V tomto případě je riziko, že při snímání jehlice oddělené od výhonu mohou ztrácet vodu. Do určité míry je možné se těchto projevů zbavit nasnímáním téhož vzorku na několika místech a výsledná spektra zprůměrovat. Tento postup byl také v práci použit. Kontaktní sondu ve své studii použil též Schaeapman et al (2007).

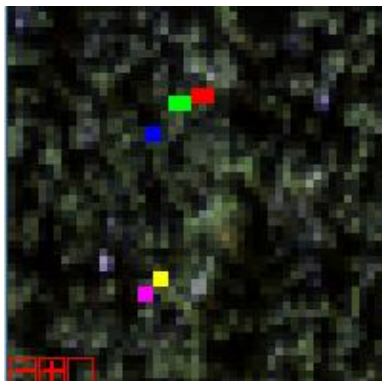
Integrační sférou bylo z důvodu časové náročnosti nasnímáno pouze 56 vzorků převážně ze spodních větví stromů. Protože integrační sféra není konstruovaná pro snímání jehlic, byly použity rámečky, do kterých se jehlice skládaly. Zde bylo dbáno na to, aby mezery mezi jehlicemi byly co nejmenší, ale zároveň aby se jehlice nepřekrývaly, což by mohlo následně způsobit chybu ve výpočtu poměru mezer a jehlic v rámečku. Při měření integrační sférou je možné se dopustit nepřesnosti v měření spekter tím, že železné rámečky zcela nepřiléhají k integrační sféře, tedy mezi rámečkem a sférou vznikne mezírka. Bohužel tomuto problému není možné zcela zabránit. Ideální by bylo použít pružný materiál, který by na sféru přilehl, na takový materiál by bylo obtížné připevnit jehlice a spojit obě části rámečku (Lukeš et al., 2012).

### 5.3 Data APEX

Snímání horských oblastí leteckými senzory je velmi často limitováno několika faktory. V první řadě je obtížné naplánovat leteckou kampaň kvůli oblačnosti, protože v horách, jako jsou Krkonoše, je přes rok minimum bezoblačných dní. Atmosférické podmínky jsou pravděpodobně nejdůležitějším, ale také nejvíce nepředvídatelným faktorem. Navíc většina technologií dálkového průzkumu Země potřebuje bezoblačné podmínky (akceptovatelný je pouze nízký výskyt oblaků typu cumulus). Jako další problém se může jevit i omezení vzdušného prostoru nad národním parkem. Dalším omezením je čas snímání, které by mělo probíhat ideálně kolem poledne ( $\pm 2$  hodiny), kdy je Slunce v NADIRU. Samotná terénní kampaň by měla probíhat současně s leteckým snímáním povrchu. V tomto případě terénní kampaň proběhla již v červu 2012 a přelet se konal až v září téhož roku. Pro odhad obsahu ligninu z jehlic starších jednoho roku to není velký problém. Obsah ligninu se v průběhu sezóny výrazně nemění, proto je možné odhadnout obsah ligninu i z obrazových dat. Naproti tomu, je to velký problém u karotenoidů a vody, jejichž obsah se v průběhu roku mění v závislosti např. na intenzitě slunečního svitu a dalších atmosférických podmínkách. Pro odhad těchto látek byl tento časový rozestup mezi terénní kampaní a snímáním leteckým senzorem příliš velký.

Podle zaměřených GPS bodů byly v hyperspektrálním snímku nalezeny pixely představující jednotlivé stromy, protože velikost pixelů se pohybuje mezi 2 a 3 metry,

a vzhledem k přesnosti zaměření bylo vždy vybráno více pixelů zastupujících skupinku stromů. Vždy bylo zvoleno cca 5 pixelů v nejbližším okolí zaměřeného bodu.



Obrázek 23: Ukázka výběru pixelů

Zdroj: Autor

V několika případech padl zaměřený bod do zastíněné oblasti, proto byly vybrány nejbližší nezastíněné pixely. Pro jednotlivé skupiny pixelů byly vyneseny spektrální křivky, z nichž bylo nutné pro další analýzy odstranit spektrum „neupravené“ vodní absorpce. Tato pásma byla pro typ analýz zpracovaných v této práci nepoužitelná. Největší problém vznikl při tvorbě regresního modelu pro odhad vody z obrazových dat, protože ve srovnání s výsledky modelů integrační sféry a kontaktní sondy se v odstraněném pásmu nacházely signifikantní vlnové délky, které nejvíce korelují s obsahem vody v jehlicích. Není tedy možné v případě vody dosáhnout stejného výsledku jako u spektra získaného laboratorně.

#### 5.4 Tvorba masky

Z výřezů obrazových dat APEX bylo nutné vytvořit masku porostu smrku ztepilého. Pro klasifikaci byly použity ROI (oblasti zájmu) pro lesní porost, holou půdu a zástavbu. Pro klasifikaci byla použita metoda *spectral unmixing*, na jejímž základě byla vytvořena „hrubá maska“. Následně byly na obraz aplikovány indexy, které zvýraznily hlavně stinné oblasti a louky. Po jejich odstranění vznikla finální maska. Ovšem ani přes tento postup nebylo možné se vyhnout náhodnému klasifikování pixelů do tříd, do které nepatří. Ke klasifikaci bylo využito i ortofotomapa, kde bylo možné rozlišit listnatou vegetaci. Pro dosažení větší přesnosti při klasifikaci smrkových porostů by bylo potřeba zaměřit i případný výskyt jiných jehličnatých porostů vyskytujících se v blízkosti zkoumané plochy. Letecké snímky obsahovaly hodně zastíněných oblastí, které se z větší části podařilo odstranit. Campbell et al. (2004) využila ve své studii data ASAS a uvádí, že pro minimalizaci stínů porostu byla data snímána v co možná

nejužším časovém intervalu kolem místního slunečního poledne. Ve své studii také využila spektra pouz z osluněné části korun. Na několika snímcích se objevily plochy s výskytem málo vzrostlých smrků, u těchto ploch nastával problém, že byly většinou klasifikovány jako nezalesněná plocha, tedy nebyly zahrnuty do masky. Aby se předešlo těmto problémům při klasifikaci, bylo by nutné obrazy klasifikovat ručně, což by ovšem bylo časově velmi náročné. Výsledné masky byly aplikovány na původní výřezy leteckých snímků APEX.

## 5.5 Diskuse metod tvorby modelů

Pro vytvoření jednotlivých modelů pro odhad obsahu biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého byla použita vícenásobná kroková lineární regrese, která byla použita také ve většině dosavadních studií (Kokaly a Clark, 1999). Modely byly vytvořeny pro základní i transformovaná spektra a pro všechny tři typy dat. Nejlépe, stejně jako i v několika jiných studiích, např. Takahashi, 2004, nebo Guo, 2012, vycházely modely pro první derivace spektra.

Pro všechny modely byl vypočten koeficient determinace, který říká, jaká část z celku je modelem vysvětlena. Z výsledné tabulky (tabulka č. 26) je velmi dobře vidět, že hodnota korelačního koeficientu je ovlivněna počtem vysvětlujících proměnných, tzn. čím více kroková regrese vybrala signifikantních vlnových délek, které následně byly použity do modelu, tím vyšší hodnota koeficientu determinace vycházela. Je nutné říct, že i přes to jsou výsledné modely korektní, protože je důležité, aby do modelu vstupovalo méně vlnových délek, než je počet vzorků v modelu (Šmilauer, 1998–2007). Nejvyšší koeficient determinace byl získán pro modely vytvořené z první derivace spektra integrační sféry, pro lignin  $R^2 = 0,8569$  (použito 12 vlnových délek), pro karotenoidy  $R^2 = 0,907$  (použito 13 vlnových délek) a pro vodu  $R^2 = 0,9592$  (použito 26 vlnových délek). Serrano (2002) použila ve své studii vícenásobnou krokovou lineární regresi (SMLR), do které vstupovaly pouze 3 vlnové délky, a pro modely pro predikci ligninu získala koeficienty determinace od 0,39 do 0,48 v závislosti na druhu rostliny. Takahashi, 2004, také dosáhl nejlepšího výsledku s první derivací spektra, do modelu použil 4 vlnové délky a dosáhl koeficientu determinace s hodnotou 0,71. Kokaly a Clark (1999) do modelu vytvořeného pomocí SMLR použili 6 vlnových délek a dosáhli koeficientu determinace v rozmezí od 0,65 do 0,83 v závislosti na druhu rostliny. Curran (2001) získal nejlepší výsledek pro první derivaci spektra a model vytvořený pomocí SMLR měl  $R^2$  0,79 pro lignin a 0,88 pro karotenoidy a chlorofyl, do modelu vstupovalo 3–5 vlnových délek. Poněvadž je koeficient determinace ovlivněn počtem vlnových délek v modelu, byl otestován model, do něhož vstupovala pouze desetina signifikantních vlnových délek proti počtu vzorků vstupujících do modelu. I v tomto typu modelu



bylo v modelu pro výpočet obsahu vody a ligninu ze spekter integrační sféry dosaženo koeficientu determinace 0,532 a 0,584.

Vícenásobná kroková lineární regrese vybrala signifikantní vlnové délky pro výpočet obsahu ligninu, karotenoidů a vody, které byly následně použity v regresní rovnici. Jak již bylo zmíněno výše, nejlepší výsledek dal model vytvořený z první derivace spektra integrační sféry, zde byly signifikantní vlnové délky 780, 795, 872, 1 081, 1 650, 1 901, 1 922, 1 977, 2 014, 2 060, 2 164, 2 174, 2 218, 2 386 nm. V porovnání s tabulkou 3 jsou vlnové délky rozdílnější než vlnové délky uvedené v některých studiích. Např. Soukupová (2002) použila vlnové délky od 1 452 do 2 287 nm. V této práci byly použity i vlnové délky 795, 872 nebo 1 081 nm. Vlnové délky z této oblasti spektra (972 nm) použila např. Serrano (2002). Použití rozdílných vlnových délek je způsobeno tím, že obsah ligninu je závislý na druhu rostliny, na působení různých stresů nebo na mechanickém poškození (Moura et al., 2010), tyto faktory jsou v každé oblasti jiné. Pro vodu SMLR vybrala vlnové délky 464, 490, 537, 655, 843, 862, 954, 970, 989, 1 010, 1 022, 1 330, 1 346, 1 471, 1 500, 1 534, 1 634, 1 667, 1 713, 1 716, 1 885, 1 971, 2 081, 2 153, 2 181, 2 339 nm. Použití vlnových délek pro výpočet obsahu vody se v jednotlivých studiích také liší. Asner et al. (2004) uvádí, že se voda projevuje v oblasti od 800 do 1 300 nm, Meer (2006) uvádí oblasti vlnových délek kolem 1 400, 1 900, 970, 1 200 a 1 770 nm, Kokaly a Clark (1999) uvádějí vlnové délky 760, 970, 1 190, 1 450 a 1 940 nm. Signifikantní vlnové délky pro obsah karotenoidů byly 509, 519, 594, 613, 640, 644, 665, 694, 886, 1 338, 1 793, 1 862, 1 922. Hernandez-Celmente (2012) uvádí, že karotenoidy nejvíce korelují s vlnovými délkami kolem 510 a 520 nm, dále se projevují v oblasti vlnových délek od 550 do 700 nm. V této práci karotenoidy korelovaly i s vlnovými délkami nad 1 300 nm, zde se může projevovat náhodná korelace.

Problémům s vícenásobnou krokovou lineární regresí, jako je overfitting nebo závislost koeficientu determinace na počtu vlnových délek, je možné předejít použitím metody PLSR, kterou použil např. Thulin et al., 2012 nebo Kokaly et al., 2009. Největší výhodou PLS regrese je, že je schopná redukovat množství pásem pořízených hyperspektrálními senzory do méně proměnných. Je to důležité pro snížení objemu dat, takže mohou být snadno zpracovatelná bez ztráty informace. Asner et al. (2011) použili pro výpočet ligninu, karotenoidů a vody (a dalších látek) PLSR, vypočtené obsahy biochemických látek porovnali pomocí lineární regrese s laboratorně získanými obsahy. Získané koeficienty determinace měly hodnotu 0,62 pro lignin, 0,88 pro vodu a 0,76 pro karotenoidy. Vícenásobná kroková lineární regrese byla vybrána pro tuto práci, protože byla úspěšně použita ve většině dosavadních studií (Serrano, 2002; Takahashi, 2004; Kokaly a Clark, 1999; Curran, 2001 a další), i v této práci podala dobré výsledky. Tato metoda je pro zpracování jednodušší než PLSR, která v některých statistických programech není zahrnuta, a vytvoření vlastního funkčního skriptu pro použití v SW R není zcela triviální. Pro přesnější určení a odhalení všech vlnových délek, které korelují s obsahem ligninu

a jiných látek v jehlicích smrku ztepilého, by bylo vhodné ze spektra odstranit vodu (*water removal*). Takto postupoval např. Ramoelo et al., 2011; Gao a Goetz, 1995, a další.

Pro modely vytvořené z první derivace spektra kontaktní sondy byla provedena validace, kde byly porovnány hodnoty obsahu ligninu vypočtené modelem a získané laboratorně. Nejlepšího výsledku dosáhl model, do kterého vstupovaly 4 vlnové délky, RMSE vyšla 4,745 mg/g, směrodatná odchylka vyšla 4,75 mg/g a průměrný rozdíl hodnot byl 1,484 mg/g. Pro karotenoidy se ukázal jako nejspolehlivější model, do kterého vstupovalo 13 vlnových délek, RMSE vyšla 0,002 pigment/mg sušiny. Pro vodu se ukázal jako nejlepší model se 4 vlnovými délkami, kde RMSE vyšla 2,143 %. Je možné konstatovat, že validace potvrdila spolehlivost modelů. Např. Serrano (2002) pro validaci vypočtených dat modelem vytvořeným pomocí SMLR dostala pro obsah ligninu RMSE 5,392; 6,004; 8,537 % v sušině pro různé modely. Kokaly a Clark (1999) dosáhli ve validaci RMSE od 2,52 % do 9,38 % pro různé druhy rostlin. Validace byla provedena i na nezávislých datech pořízených roku 2010 kontaktní sondou na Sokolovsku. Zde se potvrdil předpoklad, že výsledný model vypočtený pro oblast Krkonoš není přenositelný na jiné oblasti. Ačoliv v této práci nebyla prokázána závislost obsahu ligninu na namřské výšce ani stáří porostu, jedna z možností, proč validace modelu pro odhad ligninu neproběhla úspěšně na nezávislých datech ze Sokolova, je fakt, že stromy na Sokolovsku byly mladší (40 - 80 let) a vždy šlo o vysazované obhospodařované porosty na rozdíl od přirozených smrčin v Krkonoších. Avšak v případě, že byl pro Sokolovsko použit celý postup výpočtu modelu, model poskytl velmi podobné výsledky jako pro Krkonoše.

## 5.6 Mapy obsahů biochemických látek

Na výřez pod maskou byla aplikována výsledná rovnice získaná pomocí vícenásobné krokové regrese. Výsledkem byl rastrový obrázek s hodnotami pixelů odpovídajícími hodnotám obsahu biochemických látek. V případě ligninu bylo možné aplikovat model, který byl vytvořen z obrazových dat. Hodnoty laboratorně naměřeného ligninu se pohybují cca od 23 do 34 mg/g, v obraze se obsahy ligninu pohybují cca od 24 do 32 mg/g. Při porovnání jednotlivých ploch bylo zjištěno, že plocha s nízkým průměrným obsahem ligninu zjištěným v laboratoři má i nízké hodnoty v obraze a naopak, byl tedy zachován trend v obsahu ligninu. Mapa obsahu vody a karotenoidů nebyla vytvořena, protože model vytvořený z obrazových dat dostatečně nevysvětluje závislou proměnnou. Což je zřejmě způsobeno tím, že sběr vzorků proběhl v červnu 2012 a snímky jsou ze září téhož roku. Karotenoidy a voda nejsou látky, které by měly v rostlině stabilní obsah během roku (jako má lignin). Dá se tedy předpokládat, že v září byl obsah karotenoidů a vody v jehlicích podstatně jiný, než byl v červnu. Model vytvořený z laboratorních

dat na obraz použít nelze, protože mezi spektrem jednotlivého listu a spektrem koruny je velký rozdíl (vícenásobný odraz v koruně, orientace listů a větví, shlukování na úrovni listů a větví, vliv podrostu, optické vlastnosti kůry stromů, BRDF lesního porostu) (Lukeš, 2013b).

### 5.7 Porovnání integrační sféry a kontaktní sondy

Porovnání spekter z integrační sféry a kontaktní sondy probíhalo nejprve na základě naměřených spekter, která byla pro jednotlivé senzory zprůměrována a vynesena do grafu i s rozdílem průměrů. Už toto jednoduché srovnání ukázalo, že se oba nástroje od sebe liší. Následně bylo provedeno i statistické zhodnocení pomocí jednosměrného modelu ANOVA. Tento test prokázal, že na většině vlnových délkách se od sebe spektra z jednotlivých senzorů výrazně liší, výjimku tvořily pouze intervaly vlnových délek od 400 nm do 410 nm, od 595 nm do 676 nm, od 689 nm do 699 nm a od 2 349 nm do 2 359 nm. Hodnoty na začátku a na konci spektra jsou značně kolísavé, což je způsobeno kolísáním hodnot odrazivosti na křivkách integrační sféry. Následně byly senzory porovnány i na základě dosažených výsledků, jak korelace, tak vícenásobné krokové regrese. Vlnové délky získané z integrační sféry vždy daly vyšší korelační koeficienty pro jednotlivé obsahy biochemických látek než spektra z kontaktní sondy. Také modely vzniklé na základě spekter z integrační sféry dávaly vyšší koeficienty determinace. Je tedy možné konstatovat, že z hlediska laboratorních spekter je použití integrační sféry vhodnější pro predikci obsahu biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého než kontaktní sonda. Důvodem lepších výsledků modelů ze spekter získaných v integrační sféře může být též skutečnost, že v integrační sféře se získávají optické vlastnosti na úrovni jehlic v jedné vrstvě bez toho, aby do odrazivosti přispívaly další složky výhonu. Další výhodou integrační sféry je schopnost měřit i transmitanci vzorku, která je důležitým vstupním parametrem do modelů radiativního transferu. Snímání integrační sférou je ale technicky i časově mnohem náročnější než snímání kontaktní sondou.

### 5.8 Diskuse rozdílů mezi výzkumnými plochami

Původní předpoklad, na kterém byl postaven design experimentu, byl takový, že se jednotlivé výzkumné plochy nebo plochy na východě a na západě od sebe liší v obsahu biochemických látek nebo obsahem půdních prvků či naměřenými spektry. Dílčím cílem bylo hledat příčiny těchto rozdílů.

Jednotlivé výzkumné plochy byly hodnoceny jak na základě obsahu biochemických látek v jehlicích, tak na základě prvků obsažených v půdě. Nejprve byly vypočteny základní statistiky, které neprokázaly příliš velké rozdíly. Následně byl proveden jednosměrný model ANOVA, který potvrdil největší rozdíl mezi plochami v obsahu humusu a uhlíku v půdě. Na rozdíl od látek v půdě se zjištěné obsahy biochemických látek v jehlicích mezi jednotlivými plochami neliší vůbec. Následně byl proveden Tukeyho test, který porovnává mezi sebou všechny dvojice ploch a dává informace o tom, které dvě plochy se vzájemně nejvíce liší. Tento test byl proveden pro obsah humusu a uhlíku v půdě. V konečném výsledku se od všech ploch liší plocha Pod Liščí boudou v obou zkoumaných parametrech. Tato plocha se nachází v nadmořské výšce 1 260 m nad mořem, což je nejvýše ze všech sledovaných ploch, nachází se také na druhém nejstrmějším svahu ze všech ploch (sklonitost 19%). V roce 1997 byla plocha zasažena výskytem lýkožrouta smrkového. Dá se tedy předpokládat, že kvůli poškození lesa lýkožroutem v té době probíhalo kácení poškozených stromů. Ve zvláště chráněném území se padlé stromy neodvážejí. Odumírající dřevo v průběhu rozkladu navrácí živiny zpět do půdy (Kajzarová, 2012). Tím se zvyšuje obsah uhlíku a kyslíku a s tím souvisí i zvýšený obsah humusu v půdě (Grendtová, 2011). Protože se plocha nachází ve vysoké nadmořské výšce, je možné předpokládat, že rozkladači kvůli chladnému prostředí, dřevo rozkládají pomaleji a tím je zajištěn trvalý přísun látek do půdy. Je nutné podotknout, že tyto dva parametry (uhlík a humus) spolu korelují. Stejně tak rozdíl mezi plochami na západě a na východě byl prokázán pouze pro N, C a humus v půdě. Tento rozdíl s největší pravděpodobností způsobuje plocha Pod Liščí boudou, která má výrazně rozdílné obsahy těchto půdních prvků od všech ostatních ploch. Pro biochemické látky v jehlicích smrku ztepilého nebyl žádný rozdíl prokázán.

Následně bylo zjišťováno, jak se mezi plochami liší naměřená spektra z jednotlivých senzorů. Tyto výsledky jsou rozporuplné. Pro testování byla opět provedena ANOVA, která potvrdila, že spektra z kontaktní sondy se pro jednotlivé plochy liší ve všech vlnových délkách. Spektra z integrační sféry se odlišovala pouze v jedné vlnové délce (2390 nm) a spektra z obrazových dat APEX se odlišovala na několika intervalech vlnových délek (413 nm až 490 nm; 1021 až 1075 nm; 1993 nm až 2008 nm; 2190 nm až 2448 nm). V případě rozdílů mezi plochami na východě a na západě se pro spektra kontaktní sondy rozdíl prokázal v intervalu vlnových délek od 723 nm do 2400 nm, pro spektra pořízená integrační sférou se žádný rozdíl neprokázal a spektra z obrazových dat APEX se lišila v intervalu vlnových délek od 413,395 nm do 509,218 nm. Spektra pořízená kontaktní sondou mohou být ovlivněna několika faktory, jako jsou odraz světla nebo snímání dřevitých částí, naproti tomu spektrum pořízené integrační sférou je možné považovat za nejčistší, je tedy možné předpokládat, že správný výsledek podala spektra z integrační sféry a že se plochy od sebe na základě spekter neliší. Obrazová data podávají

informace na úrovni korun, na této úrovni se může projevit např. poškození stromů, proto se mohou lišit i spektra získaná z obrazových dat APEX.

### 5.9 Hodnocení vlivu dalších faktorů na obsah biochemických látek

Pomocí dvoucestného modelu ANOVA byl testován vliv faktorů nadmořská výška, stáří stromů, orientace svahu a sklonitost svahu na obsah biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého. Pro lignin nebyl prokázán žádný vliv těchto faktorů, na obsah karotenoidů by mohla mít vliv nadmořská výška a orientace svahu a pro vodu opět nebyl žádný vliv těchto faktorů prokázán. Následně byla provedena lineární regrese pro zjištění vlivu obsahu jednotlivých prvků v půdě na obsah biochemických látek v jehlicích. Pro lignin opět nebyl zjištěn žádný vliv prvků v půdě, na obsah karotenoidů by mohlo mít vliv pH půdy a na obsah vody množství síry obsažené v půdě. Na výzkumných plochách se hodnota pH pohybovala kolem 3, což jsou půdy extrémně kyselé (Sáňka a Materna, 2004). Lesní půdy jsou sice kyselejší než půdy zemědělské, ale i tak jsou lesní půdy s pH nižším než 3,5 považovány za extrémně kyselé. Většina půd pod jehličnatými porosty spadá do kategorie velmi silně až extrémně kyselých půd (Sáňka a Materna, 2004). Se stoupající kyselostí klesá úrodnost lesních půd a jejich vhodnost pro růst náročnějších dřevin. Pod pH 4,2 pak se již může uplatnit toxický vliv sloučenin hliníku a železa, projevující se odumíráním jemných kořínků dřevin, narušením minerální výživy dřevin (Sáňka a Materna, 2004). Jak již bylo zmíněno výše, karotenoidy a voda jsou prvky velmi citlivé na okolní podmínky, proto pH či obsah síry může mít vliv na obsah karotenoidů a vody v jehlicích smrku ztepilého.

Tyto analýzy nebyly hlavním úkolem práce a potenciál dat nebyl tudíž zcela vyčerpán. Analýzy by v budoucnu mohly být dále rozpracovány se zřetelem na půdní vlastnosti i další charakteristiky prostředí a jejich vliv na smrkové porosty.

## 6 ZÁVĚR

V práci byla zkoumána závislost laboratorně stanovených obsahů ligninu, karotenoidů a vody na vlnových délkách spekter získaných měřeními kontaktní sondou, integrační sférou (s použitím spektrometru ASD FieldSpec 4 Wide-Res) a leteckým zobrazujícím spektrometrem APEX. Celé práci předcházela terénní kampaň, při níž byly sbírány vzorky jehlic smrku ztepilého z osmi různých ploch nacházejících se ve východní a západní části Krkonošského národního parku.

Analýza ligninu byla úspěšnější než analýza karotenoidů a vody. Podařilo se vytvořit modely pro predikci ligninu z různých datových zdrojů, z nichž nejúspěšnější byl model vytvořený z dat získaných integrační sférou. Dobré výsledky byly ovšem získány i z dat pořízených kontaktní sondou a hyperspektrálním leteckým senzorem APEX. Modely byly vytvořeny na základě vícenásobné krokové lineární regrese. Bylo zjištěno, že použití vícenásobné krokové regrese má omezení, co se týče počtu do regrese vstupujících vlnových délek. Vícenásobná kroková lineární regrese byla vybrána, jelikož byla použita ve většině dosavadních studií a zpracování dat touto metodou se jeví jako jednodušší, protože SMLR je dostupná ve všech dosavadních statistických softwarech. Aby se předešlo jistým omezením této metody, mohla by v budoucnu tato data být zpracována také pomocí PLS regrese.

Před samotnou analýzou byl vytvořen testovací soubor deseti náhodně vybraných vzorků, které sloužily pro porovnání obsahů biochemických látek získaných laboratorním rozborem a obsahů těchto látek získaných na základě statisticky vytvořeného modelu. Validace dat byla prováděna pouze pro modely získané ze spekter integrační sféry. Modely se jeví jako dobré, pro lignin bylo dosaženo RMSE 4,745 a 5,761 mg/g, pro karotenoidy 0,002 a 0,086 pigment/mg sušiny a pro vodu 4,3 a 2,144 %. Pro tento postup by bylo vhodné naměřit více spekter integrační sférou, pro tuto práci jich bylo naměřeno pouze 56, z toho 3 spektra byla odstraněna kvůli chybě měření, dalších 10 vzorků bylo odejmuto jako testovací soubor, pro samotnou statistickou analýzu zbyl minimální počet vzorků, na kterém je možné provádět statistickou analýzu.

Pomocí vícenásobné krokové lineární regrese byly získány signifikantní vlnové délky a jejich koeficienty, které byly následně použity do modelu. Rovnice, která byla aplikována na obrazová data, byla získána ze spekter z obrazových dat APEX a laboratorně získaných obsahů ligninu, které byly pro každý strom zprůměrovány. Po aplikaci rovnice na obrazová data vznikla ligninová mapa, kde jednotlivé pixely nesou hodnotu množství ligninu obsaženého ve smrku

ztepilém. Obsahy ligninu na mapách se prakticky shodují s výsledky získanými laboratorním stanovením obsahů ligninu.

Závislost obsahu ligninu, karotenoidů a vody se podařilo prokázat pro data z kontaktní sondy a integrační sféry, závislost obsahu ligninu se podařilo prokázat i pro spektrum pořízené leteckým senzorem APEX. Pro další zdokonalení analýzy by bylo vhodné pořídit stejné množství dat z integrační sféry jako z kontaktní sondy, umožnilo by to přesnější analýzy biochemického obsahu látek. Dále by bylo vhodné sbírat alespoň tři ročníky jehlic, aby bylo možné porovnávat jednotlivé ročníky mezi sebou. V této práci byly využity pouze druhé a třetí ročníky jehlic, které se od sebe obsahem biochemických látek signifikantně neliší. Dále by bylo vhodné již při terénní kampani vybrat na každé ploše stromy pro validační soubor.

Podařilo se najít vztah mezi obsahem biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého a vlnovými délkami. Vlnové délky signifikantní pro obsah ligninu se ve většině případů lišily od vlnových délek uvedených v literatuře. Absorpce ligninu a některých dalších biochemických látek je ovlivněna obsahem vody v listu. Pro přesnější určení a odhalení všech vlnových délek, které korelují s obsahem ligninu a jiných látek v jehlicích smrku ztepilého, by bylo vhodné ze spektra odstranit vodu (*water removal*). Takto postupoval např. Ramoelo et al., 2011; Gao a Goetz, 1995, a další. Tento postup ovšem vyžaduje některé parametry, které nebyly k dispozici, je to tedy metoda poněkud náročná, nad rámec této diplomové práce.

Z porovnání spekter získaných měření kontaktní sondou a integrační sférou jednoznačně vyplynulo, že se spektra od sebe signifikantně liší ve většině vlnových délek. Při porovnání spektrálních křivek v grafu bylo na první pohled patrné, že odrazivost získaná pomocí integrační sféry má vyšší hodnoty než spektra získaná měření kontaktní sondou. Porovnání výsledků získaných analýzou spekter z kontaktní sondy a integrační sféry ukázalo, že pro hledání vztahu mezi laboratorně a spektroskopicky stanoveným obsahem biochemických látek je vhodnější využívat spektra získaná integrační sférou. Některé studie uvádějí, že měření kontaktní sondou byla uskutečněna v tmavé místnosti kvůli minimalizaci odrazivosti okolního prostředí (Curran et al., 2001), i tento postup by mohl zvýšit přesnost měření kontaktní sondou.

Následně byl zjišťován rozdíl mezi jednotlivými výzkumnými plochami na základě prvků obsažených v půdě a biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého. Bylo prokázáno, že se plochy od sebe neliší obsahem biochemických látek v jehlicích smrku ztepilého (neliší se ani východní plochy od západních). Nejvíce se plochy lišily obsahem humusu a uhlíku v půdě. Bylo prokázáno, že tyto prvky spolu vzájemně korelují. Následně bylo zjištěno, že nejvíce se od všech ostatních ploch liší plocha Pod Liščí boudou, která leží ve východní části Krkonoš v nadmořské výšce kolem 1 260 metrů nad mořem, mateční horninou je zde svor a fylit a půdní typ podzol,

tato plocha druhou největší sklonitost a Na této ploše byl v minulosti zaznamenán také výskyt lýkožrouta smrkového.

Okrajově byla zjišťována závislost obsahu ligninu, karotenoidů a vody ve smrkových porostech na podmínkách prostředí. Tato závislost nebyla prokázána. Pouze u obsahu karotenoidů se projevil slabý vliv orientace svahu a nadmořské výšky. Při sledování vlivu prvků obsažených v půdě na obsah biochemických látek nebyl prokázán žádný vliv na obsah ligninu. Vliv na obsah karotenoidů byl prokázán pouze v případě pH půdy a na obsah vody pouze v případě množství síry obsažené v půdě. Tento úkol nebyl zpracován vyčerpávajícím způsobem a v budoucnu za pomoci pedologů a biologů by mohly být analýzy rozšířeny.

Pro práci by bylo zajímavé získat data o defoliaci jednotlivých stromů, která by mohla mít velký vliv na obsah biochemických látek ve smrku ztepilém a která hodně vypovídají o zdravotním stavu stromů. Analýzu biochemických látek by bylo možné rozšířit o radiativní modely transferu, např. PROSPECT pro analýzu chlorofylu a karotenoidů použitý již ve studii Malenovský et al. (2006). Pro analýzu ligninu a dalších biochemických prvků je vhodný např. model LIBERTY více v Dawson et al. (1998).



## 7 SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY

- Albrechtova, J. et al.** Spectral analysis of coniferous foliage and possible links to soil chemistry: Are spectral chlorophyll indices related to forest floor dissolved organic c and n? *Science of the Total Environment*, 2008, vol. 404 (2–3), s. 424–432.
- APEX** – Airborne Prism EXperiment. *APEX 2012 – September campaign HyMountEcos data delivery report*, 2012, s. 17.
- APEXesa** APEX – Airborne Prism EXperiment [online]. 2013. [cit. 2013-6-22]. Dostupný z: <<http://www.apex-esa.org/content/objectives>>.
- ASD manual** Integrating Sphere User Manual. *ASD Document 600660 Rev. B*, 2008, s. 29.
- ASDweb** ASD Inc. [online]. 2013. [cit. 2013-5-4]. Dostupný z: <<http://www.asdi.com/>>.
- Asner, G. P. et al.** Spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115 (12), s. 3 587–3 598.
- Biesemans, J. et al.** Image processing workflows for airborne remote sensing *Proc. 5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, EARSeL, Bruges, Belgium*, 2007, s. 8.
- Buchanan, B. et al.** Biochemistry and Molecular Biology of Plants, *John Wiley and Sons Ltd*, 2000, s. 1 286–1 300.
- Buřičová, M.** Stanovení obsahu luginu a rozpustných fenolických látek v jehlicích smrku ztepilého s využitím hyperspektrálních dat. *Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodo-vědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie*, 2011, s. 80.
- Campbell et al.** Detection of initial damage in Norway spruce canopies using hyperspectral airborne data. *Int. J. Remote Sensing*, 2004, vol. 25, č. 24, s. 5557 - 5583.
- Cudlín, P.** e-mailová komunikace [online]. 2013. [cit. 2013-8-6].
- Cudlín, P. et al.** Monitoring of Norway spruce forest stand response to the stress impact in the Krkonoše Mts. In: Flousek J. & Roberts G.C.S. (eds), *Proceedings of the Int. Conf. IUCN & MAB, Mountain National Parks and Biosphere Reserves: Monitoring and Management, Správa KRNAP Vrchlabí*, 1995, s. 75–80.
- Curran, P. J. et al.** Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry testing the kokaly and clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 2001, vol. 76 (3), s. 349–359.
- Curran, P. J.** Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 1989, vol. 30, s. 271–278.
- Dawson et al.** LIBERTY - Moedeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. *Remote Sens. Environ*, 1998, vol. 65, s. 50 - 60.

- Demmig-Adams, B. a Adams, W., W.** The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. Dept of Environment, 1996, vol. 1, s. 21 - 26.
- Elvidge, D., E.** Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *Remote Sensing of Environment*, 1990, vol. 11, s. 1 775–1 795.
- ENVI help** ENVI User's Guide 2009. ENVI Version 4.7, ITT Visual Information Solutions ENVI User's Guide, 2009. ENVI Version 4.7, ITT Visual Information Solutions.
- ESRI help** ESRI Dictionary [online]. 2013. [cit. 2013-7-5]. Dostupný z: <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/RMS%20error>.
- EXEL help** Office support [online]. 2013. [cit. 2013-10-5]. Dostupný z: <http://office.microsoft.com/en-us/excel-help/excel-help-and-how-to-FX101814052.aspx>
- Gao, B. C. a Goetz, A. F. H.** Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical-components of vegetation canopies from aviris data. *Remote Sensing of Environment*, 1995, vol. 52 (3), s. 155–162.
- Ganapol, B., D. et al.** Leafmod: A new within-leaf radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 1998, vol. 63 (2), s. 182–193.
- Gastellu-Etchegorry, J., P. a Bruniquel-Pinel, V.** A modeling approach to assess the robustness of spectrometric predictive equations for canopy chemistry. *Remote sensing of Environment*, 2000 vol. 7, s. 1–15.
- Gaško, R. et al.** Štatistické metódy pre klinickú epidemiológiu a laboratórnu prax. *APRILLA, Košice*. 2008, ISBN 978-80-89346-00-4.
- Gates, D., M. et al.** Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 1965, vol. 4, s. 11–20.
- Grendtová, I.** Vliv obhospodařování trvalých travních porostů na obsah organické hmoty v půdě. Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i. Praha, 2011, s. 5.
- Guo, X. et al.** Comparison of Laboratory and Field Remote Sensing Methods to Measure Forage Quality. *Environmental Resarch and Public Health*. 2012, vol. 7, s. 3 513–3 530, ISSN 1660-4601.
- Guyot, G., Baret, F., Jacquemoud, S.** Imaging spectroscopy for vegetation studies. *Imaging spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*, 1992, s. 145–165.
- Hatfield, R. a Fukushima, R., S.** Can Lignin Be Accurately Mesured? *Crop Science Society of America*, 2005, s. 832–839.
- Hernandez-Clemente, R. et al.** Carotenoid content estimation in a heterogeneous conifer forest using narrow-band indices and prospect plus dart simulations. *Remote Sensing of Environment*, 2012, vol. 127, s. 298–315.
- Heřmanová, E.** Vybrané vícerozměrné statistické metody v geografii. *Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta*, 1991, s. 133.

- Jacquemoud, S. a Baret, F.** Prospect – a model of leaf optical-properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 34 (2), s. 75–91.
- Jeník, J. a Soukupová, L.** Microtopography of subalpine mires in the Krkonoše Mountains, the Sudetes. *Preslia*, 1992, vol. 64, s. 313–326.
- Kajzarová, E.** Mrtvé dřevo – živý les. Správa Krkonošského národního parku, Vrchlabí, 2012, s. 36.
- Katina, S.** Bioštatistika a počítačová statistika, Štatistická analýza plánovaných experimentov. *Katedra aplikovanej matematiky a štatistiky. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky. Univerzita Komenského v Bratislave*, 2006, s. 33.
- Kokaly, R. F. et al.** Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, s.78–91.
- Kokaly, R. F. et al.** Mapping vegetation in Yellowstone National Park using spectral feature analysis of AVIRIS data. *Remote sensing of enviroment*, 2002, vol. 84, s. 437–456.
- Kokaly, R. F. a Clark, R. N.** Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 1999, vol. 67 (3), s. 267–287.
- Kolář, J.** Principy fungování a využívání pozorovacích satelitů. *Praha: Czech Space Office*, 2008, s. 62. ISBN 978-80-904163-5-2.
- KRNAPnet** Ochrana přírody a péče o NP [online]. 2013. [cit. 2013-10-5]. Dostupný z: <http://www.krnep.cz/ochrana-prirody-a-pece-o-np/>.
- KRNAP** (2013) Vektorové vrstvy, GIS oddělení KRNAP.
- Kumar, L. et al.** Imaging spectrometry and vegetation science. *Imaging Spectrometry, Basic Principles and Prospective Applications*, 2006, s. 111–255.
- Lange, B., M. et al.** Elicitor – Induced Spruce Stress Lignin, Structural Similarity to Early Develop-mental Lignins. *Plant Physiology*, 1995, vol. 108, s. 1 277–1 287.
- Lewis, N., G. and Yamamoto, E.** Lignin - occurrence, biogenesis and biodegradation. *Anual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1990, vol. 41, s. 455 - 496.
- Lichtenthaler, H. K.** Chlorofylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 1987, vol. 148, s. 350–382.
- Lukeš, P (2013a)** e-mailová komunikace [online]. 2013. [cit. 2013-1-24].
- Lukeš, P (2013b)** e-mailová komunikace [online]. 2013. [cit. 2013-8-5].
- Lukeš, P. et al.** Empirical test of the spectral invariants theory using imaging spectroscopy data from a coniferous forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, vol. 13 (4), s. 668–675.
- Malenovsky, Z. et al.** Applicability of the prospect model for norway spruce needles. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27 (23–24), s. 5 315–5 340.

- Meer, F., D., van der** Basic physics of spectrometry. *Imaging Spectrometry, Basic Principles and Prospective Applications*, 2006, s. 3–36.
- Mišurec, J.** Určování obsahu chlorofylu z hyperspektrálních obrazových dat. *Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie*, 2010, s. 82.
- Moura, J., C., M., S.** et al. Abiotic and Biotic Stresses and Changes in the Lignin Content and Composition in Plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2010, vol. 52 (4), s. 360–376.
- Morris, R. D. et al.** A Statistical Framework for the Sensitivity Analysis of Radiative Transfer Models. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, vol. 46 (12), s. 4 062–4 074.
- Mutanga, O. et al.** Predicting in Situ Pasture Quality in the Kruger National Park, South Africa, Using Continuum-removed Absorption Features. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 89 (3), s. 393–408.
- Nýdrle, J. a Suchá, R.** Měření optických vlastností jehlic smrku ztepilého v integrační sféře. *Nepublikovaný materiál dostupný na: Přírodovědecká fakulta univerzity Karlovy v Praze, katedra aplikované geoinformatiky a kartografie*, 2012, s. 11.
- Piwowar, J. M. et al.** Temporal Mixture Analysis of Artic Sea Ice Imagery. *A new Approach for Monitoring Environmental Change, Remote sens. Environ*, 1998, vol. 63, s. 195–207.
- Porra, R., J. et al.** Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochemica et Biophysica Acta*, 1989, vol. 975, s. 384–394.
- R help** Statistical Data Analysis R [online]. 2013. [cit. 2013-7-10]. Dostupný z: <http://127.0.0.1:31023/doc/html/index.html>.
- Ramoelo, A. et al.** Water-removed spectra increase the retrieval accuracy when estimating savanna grass nitrogen and phosphorus concentrations. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, vol. 66 (4), s. 408–417.
- Sáňka, M. a Materna, J.** Indikátory kvality zemědělských a lesních půd ČR. *Edice PLANETA*, 2004, s. 84.
- Schaepman, M., E. et al.** River Floodplain Vegetation Scenario Development Using Imaging Spectroscopy Derived Products as Input Variables in a Dynamic Vegetation Model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, vol. 73, s. 1179 - 1188.
- Schläpfer, D. et al.** Calibration and Validation Concept for the Airborne PRISM Experiment (APEX). *Remote Sensing Laboratories (RSL)*, 2000, s. 1–24.

- Schlerf, M. et al.** Retrieval of chlorophyll and nitrogen in norway spruce (*picea abies* l. Karst.) using imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, vol. 12 (1), s. 17–26.
- Schmidt, K. S. a Skidmore, A. K.** Spectral discrimination of vegetation types in coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 85, s. 92–108.
- Serrano, L. et al.** Remote sensing of nitrogen and lignin in mediterranean vegetation from aviris data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 81 (2–3), s. 355–364.
- Skidmore, A., K. et al.** Forage quality of savannas - Simultaneously mapping foliar protein and polyphenols for trees and grass using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2010, vol. 114, s. 64 - 72.
- Soldičák et al.** Lesnické hospodaření v imisní oblasti Krušných hor. *Souhrn projektu. Lesy České republiky s. p., Hradec Králové*, 2007, s. 21.
- Soukupova, J. et al.** Spectral characteristics of lignin and soluble phenolics in the near infrared – a comparative study. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, vol. 23 (15), s. 3 039–3 055.
- Soukupová, L. et al.** Artic – alpine tundra in the Krkonoše, the Sudetes. *Opera Corcontica*, 1995, vol. 32, s. 5–88.
- Šmilauer, P.** (1998–2007) Moderní regresní modely. *Biologická fakulta JU, České Budějovice*, s. 168.
- Takahashi, T. et al.** Estimation and comparison of acid detergent lignin and acetyl bromide lignin in fallen leaves using near-infrared spectroscopy. *Int. J. Remote sensing*, 2004, vol. 25 (24), s. 5 585–5 600.
- Thulin, S. et al.** Hyperspectral determination of feed quality constituents in temperate pastures: Effect of processing methods on predictive relationships from partial least squares regression. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, vol. 19, s. 322–334.
- Tvrdlík, J.** Analýza vícerozměrných dat. *Učební texty Ostravské univerzity, Přírodovědecká fakulta*, 2003, s. 120.
- Ustin, S., L. et al.** Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, s. 67 - 77.
- Vacek, S.** Ekologické souvislosti poškození v porostech na horní hranici lesa v Krkonoších. – *Opera Corcontica*, 1984, vol. 21, s. 157–165.
- Vacek, S.** Dynamika poškození horských ochranných lesů Krkonoš. *Hospodaření v lesích při horní hranici lesa. Sborník z mezinárodní konference. Kouty nad Desnou, červen 1992, Ministerstvo zemědělství a Čs. lesn. společnost*, 1992, s. 262–286.

- Vacek, S.** Vývoj zdravotního stavu lesních porostů na TVP v Krkonoších. *Sborník příspěvků z mezi-národní konference Monitoring, výzkum a management ekosystémů na území Krkonošského národního parku. Opočno 15.–17. 4. 1996. VÚLHM VS, 1996, s. 28–43.*
- Vacek, S.** Struktura, vývoj a management lesních ekosystémů Krkonoš. *Doktorská disertační práce, ČZU v Praze, VÚLHM VS, 2000, s. 684.*
- Vacek, S. a Podrázský, V.** Vývoj zdravotního stavu na výzkumných plochách v Krkonoších. *Geologické problémy Krkonoš. Sborn. mez. věd. konf. říjen 2006, Svoboda n. Úpou. Opera Corcontica, 2007, vol. 44/2, s. 493–498.*
- Vacek, S. et al.** Struktura a vývoj lesních ekosystémů v Krkonoších. *Geoekologické problémy Krkonoš. Sborn. mez. věd. konf., říjen 2006, Svoboda n. Úpou. Opera Corcontica, 2007, vol. 44/2, s. 453–462.*
- Vacek, S. et al.** Průběžná zpráva za řešení projektu 2B06012, Management biodiverzity v Krkonoších a na Šumavě v roce 2010. *Česká zemědělská univerzita v Praze, 2010, s. 70.*
- Vane, G. et al.** Imaging spectroscopy of the Earth and other solar system bodies. *Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition, 1993, s. 121–143.*
- VÚMOP** Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy R [online]. 2011. [cit. 2013-8-15]. Dostupný z: [http://www.vumop.cz/index.php?p=laboratorni\\_rozbory&site=default](http://www.vumop.cz/index.php?p=laboratorni_rozbory&site=default).
- Wellburn, A., R.** 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, 1994, vol. 44, s. 307–313.*
- Zeng, Y et al.** Using linear spectral unmixing of high spatial resolution and hyperspectral data for geometric-optical modeling. *ISPMSRS, Davos, Switzerland, 2007, vol. 36, s. 304–309.*
- Zvára, K.** Biostatistika. *Univerzita Karlova v Praze – Nakladatelství Karolinum, 2004, s. 213.*

## 8 Přílohy

### Seznam příloh

- Příloha 1: Obsah ligninu ve vzorcích jehlic smrku ztepilého
- Příloha 2: Obsah karotenoidů ve vzorcích jehlic smrku ztepilého
- Příloha 3: Obsah vody ve vzorcích jehlic smrku ztepilého
- Příloha 4: Koeficienty regresní rovnice použité pro validaci modelů
- Příloha 5: Velikosti pixelů leteckých snímků APEX
- Příloha 6: Výzkumné plochy
- Příloha 7: Ligninové mapy výzkumných ploch na západě
- Příloha 8: Ligninové mapy výzkumných ploch na východě

Příloha 1: Obsah ligninu ve vzorcích jehlic smrku ztepilého

kód vzorku	m lig/DW (mg/g)	kód vzorku	m lig/DW (mg/g)	kód vzorku	m lig/DW (mg/g)
A-C11-D2	32,95049391	LI-91-D3	24,58359399	P-P2-D3	25,92074361
A-C11-D3	34,76867757	LI-91-H2	25,31680975	P-P3-D2	34,35390188
A-C12-D2	22,17744371	LI-91-H3	24,50799497	P-P3-D3	31,41050895
A-C12-D3	29,97730323	MD-A-D2	28,35140938	P-P4-D2	30,62876699
A-F2-D2	21,54199711	MD-A-D3	29,94516543	P-P4-D3	27,2269975
A-F2-D3	35,49057341	MD-B-D2	34,00030641	P-P5-D2?	22,87184667
A-F3-D2	30,31171476	MD-B-D3	26,69336843	P-P5-D3	27,4540107
A-F3-D3	33,7523941	MD-F-D2	23,98260992	P-P5-H3	20,11490751
A-F4-D2	31,55908975	MD-F-D3	28,63778345	V-146-D2	31,87871016
A-F4-D3	33,41740477	MD-H-D2	24,0749168	V-146-D3	33,80586056
LH-28-D2	21,42556676	MD-H-D3	28,48486021	V-44-D2	30,74178827
LH-28-D3	24,3257794	MD-H-H3	19,52544796	V-44-D3	22,76746542
LH-33-D2	36,22811112	MD-K-D2	19,51802552	V-44-H2	26,40013006
LH-33-D3	22,47855664	MD-K-D3	25,32845064	V-44-H3	33,34944692
LH-37-D2	34,10397477	PA-C1-D2	25,15258652	V-48-D2	19,9943941
LH-37-D3	41,78872485	PA-C1-D3	27,53485552	V-48-D3	26,40524943
LH-39-D2	30,52895783	PA-C1-H2	33,41100666	V-91-D2	17,48290808
LH-39-D3	32,70788225	PA-C7-D2	27,56014831	V-91-D3	31,1157972
LH-58-D2	26,93465136	PA-C7-D3	34,25944033	V-93-D2	18,96659553
LH-58-D3	25,79061359	PA-E10-D2	29,77321689	V-93-D3	26,98890363
LI-102-D2	26,64262452	PA-E10-D3	30,40854464	V-93-H2	19,80556323
LI-102-D3	16,40783821	PA-E10-H2	24,45121211	VB-14-D2	28,1682541
LI-102-H2	27,91765632	PA-E1-D2	35,52243272	VB-14-D3	33,54535996
LI-52-D2	32,14075599	PA-E1-D3	26,51295113	VB-24-D2	26,19565477
LI-52-D3	22,4468324	PA-E8-D2	36,06097444	VB-24-D3	24,3337198
LI-56-D2	26,16312557	PA-E8-D3	33,2400164	VB-27-D2	30,21243268
LI-56-D3	29,59569674	P-P1-D2	22,59290829	VB-27-D3	32,6825468
LI-56-H3	25,22794902	P-P1-D3	21,83537451	VB-27-H3	23,61128498
LI-81-D2	28,69903209	P-P1-H2	19,25645341	VB-45-D2	35,82008343
LI-81-D3	32,40970569	P-P1-H3	21,76600604	VB-45-D3	33,99187745
LI-91-D2	20,70464642	P-P2-D2	22,13307052	VB-47-D2	35,68663384
				VB-47-D3	29,77169979



Příloha 2: Obsah karotenoidů ve vzorcích jehlic smrku ztepilého

vzorek	karotenoidy	vzorek	karotenoidy	vzorek	karotenoidy	vzorek	karotenoidy
LI-102-H2	0,238761	LH-28-D2	0,181948	A-C12-H2	0,336487	V-48-D2	0,154915
LI-102-H3	0,328629	LH-28-D3	0,370298	A-C12-H3	0,453171	V-48-D3	0,143193
LI-102-D2	0,313773	LH-33-H2	0,200918	A-C12-D2	0,275782	V-91-H2	0,248619
LI-102-D3	0,334234	LH-33-H3	0,313448	A-C12-D3	0,475882	V-91-H3	0,237602
LI-81-H2	0,458281	LH-33-D2	0,261018	A-F2-H2	0,319309	V-91-D2	0,233921
LI-81-H3	0,344435	LH-33-D3	0,338700	A-F2-H3	0,377802	V-91-D3	0,264621
LI-81-D2	0,259454	LH-37-H2	0,320967	A-F2-D2	0,275323	V-93-H2	0,152579
LI-81-D3	0,425220	LH-37-H3	0,358157	A-F2-D3	0,381903	V-93-H3	0,332044
LI-91-H2	0,221843	LH-37-D2	0,275917	A-F3-H2	0,162140	V-93-D2	0,200396
LI-91-H3	0,378391	LH-37-D3	0,375544	A-F3-H3	0,343702	V-93-D3	0,437258
LI-91-D2	0,210538	LH-39-H2	0,233433	A-F3-D2	0,228652	V-146-H2	0,229532
LI-91-D3	0,360025	LH-39-H3	0,222922	A-F3-D3	0,340669	V-146-H3	0,344495
LI-52-H2	0,281554	LH-39-D2	0,241362	A-F4-H2	0,280336	V-146-D2	0,180035
LI-52-H3	0,296990	LH-39-D3	0,317521	A-F4-H3	0,388645	V-146-D3	0,352208
LI-52-D2	0,193827	LH-58-H2	0,317774	A-F4-D2	0,375932	MD-A-H2	0,338138
LI-52-D3	0,226057	LH-58-H3	0,310939	A-F4-D3	0,515984	MD-A-H3	0,257443
LI-56-H2	0,313052	LH-58-D2	0,250313	PA-e1-H2	0,220074	MD-A-D2	0,239561
LI-56-H3	0,406755	LH-58-D3	0,338669	PA-e1-H3	0,343815	MD-A-D3	0,360932
LI-56-D2	0,270623	P-P1-H2	0,193953	PA-e1-D2	0,264426	MD-B-H2	0,297661
LI-56-D3	0,327269	P-P1-H3	0,433897	PA-e1-D3	0,371312	MD-B-H3	0,318397
VB-14-H2	0,185795	P-P1-D2	0,171497	PA-C7-H2	0,253778	MD-B-D2	0,279136
VB-14-H3	0,252371	P-P1-D3	0,186240	PA-C7-H3	0,288458	MD-B-D3	0,300139
VB-14-D2	0,285279	P-P2-H2	0,170060	PA-C7-D2	0,251022	MD-F-H2	0,202706
VB-14-D3	0,250067	P-P2-H3	0,308099	PA-C7-D3	0,413450	MD-F-H3	0,177991
VB-24-H2	0,265142	P-P2-D2	0,237481	PA-E8-H2	0,223342	MD-F-D2	0,187890
VB-24-H3	0,272375	P-P2-D3	0,334450	PA-E8-H3	0,327853	MD-F-D3	0,207218
VB-24-D2	0,208353	P-P3-H2	0,200544	PA-E8-D2	0,251429	MD-H-H2	0,334189
VB-24-D3	0,149512	P-P3-H3	0,357336	PA-E8-D3	0,285676	MD-H-H3	0,378676
VB-27-H2	0,197951	P-P3-D2	0,134959	PA-E10-H2	0,267240	MD-H-D2	0,286273
VB-27-H3	0,342783	P-P3-D3	0,388018	PA-E10-H3	0,346356	MD-H-D3	0,346532
VB-27-D2	0,246018	P-P4-H2	0,147745	PA-E10-D2	0,289741	MD-K-H3	0,249860
VB-27-D3	0,314334	P-P4-H3	0,149384	PA-E10-D3	0,345004	MD-K-D2	0,269652
VB-45-H2	0,244859	P-P4-D2	0,310888	PA-c1-H2	0,245926		
VB-45-H3	0,415542	P-P4-D3	0,266150	PA-c2-H3	0,412125		
VB-45-D2	0,286870	P-P5-H2	0,262699	PA-c1-D2	0,364307		
VB-45-D3	0,314338	P-P5-H3	0,326224	PA-c1-D3	0,273928		
VB-47-H2	0,180251	P-P5-D2	0,254432	V-44-H2	0,238342		
VB-47-H3	0,280827	P-P5-D3	0,286530	V-44-H3	0,351631		
VB-47-D2	0,264763	A-C11-H2	0,254049	V-44-D2	0,243485		
VB-47-D3	0,223934	A-C11-H3	0,307521	V-44-D3	0,307722		
LH-28-H2	0,258987	A-C11-D2	0,245003	V-48-H2	0,146011		
LH-28-H3	0,330655	A-C11-D3	0,321041	V-48-H3	0,182688		

Příloha 3: Obsah vody ve vzorcích jehlic smrku ztepilého

vzorek	voda (%)	vzorek	voda (%)	vzorek	voda (%)	vzorek	voda (%)
LI-102-H2	48,58671	LH-28-H3	47,92627	A-C11-D2	48,21826	V-44-D3	51,74901
LI-102-H3	50	LH-28-D2	50,29167	A-C11-D3	48,28845	V-48-H2	47,42715
LI-102-D2	50,03408	LH-28-D3	51,55152	A-C12-H2	47,87582	V-48-H3	48,46885
LI-102-D3	50,9287	LH-33-H2	47,01538	A-C12-H3	43,72637	V-48-D2	47,87387
LI-81-H2	49,98655	LH-33-H3	46,07903	A-C12-D2	49,71235	V-48-D3	47,46204
LI-81-H3	49,9837	LH-33-D2	51,14416	A-C12-D3	47,31183	V-91-H2	51,51782
LI-81-D2	50,52123	LH-33-D3	46,24816	A-F2-H2	48,52721	V-91-H3	48,71924
LI-81-D3	51,12007	LH-37-H2	48,14815	A-F2-H3	45,75812	V-91-D2	50,22375
LI-91-H2	45,12744	LH-37-H3	45,83583	A-F2-D2	47,99324	V-91-D3	48,57694
LI-91-H3	44,40928	LH-37-D2	48,76742	A-F2-D3	45,27742	V-93-H2	47,80164
LI-91-D2	48,05363	LH-37-D3	50,74786	A-F3-H2	46,64241	V-93-H3	44,36923
LI-91-D3	48,1295	LH-39-H2	47,74694	A-F3-H3	46,70732	V-93-D2	46,73457
LI-52-H2	50,27408	LH-39-H3	45,83973	A-F3-D2	48,9858	V-93-D3	44,92661
LI-52-H3	51,86426	LH-39-D2	48,63753	A-F3-D3	49,68051	V-146-H2	47,58595
LI-52-D2	51,40998	LH-39-D3	47,72952	A-F4-H2	50,11749	V-146-H3	46,0192
LI-52-D3	48,95154	LH-58-H2	48,73193	A-F4-H3	47,88432	V-146-D2	47,89216
LI-56-H2	49,92722	LH-58-H3	47,80285	A-F4-D2	51,58649	V-146-D3	46,54926
LI-56-H3	50,47434	LH-58-D2	48,04822	A-F4-D3	52,8086	MD-A-H2	44,72562
LI-56-D2	49,50417	LH-58-D3	46,90583	PA-e1-H2	46,97869	MD-A-H3	43,81797
LI-56-D3	51,26103	P-P1-H2	46,00892	PA-e1-H3	47,73048	MD-A-D2	45,93868
VB-14-H2	51,85347	P-P1-H3	45,41284	PA-e1-D2	48,80383	MD-A-D3	46,52335
VB-14-H3	48,67749	P-P1-D2	49,08517	PA-e1-D3	50,19363	MD-B-H2	47,34214
VB-14-D2	51,69492	P-P1-D3	46,12836	PA-C7-H2	50,01517	MD-B-H3	46,97815
VB-14-D3	48,12936	P-P2-H2	48,38337	PA-C7-H3	48,59917	MD-B-D2	52,46006
VB-24-H2	48,20801	P-P2-H3	50,39246	PA-C7-D2	49,64604	MD-B-D3	48,09871
VB-24-H3	48,65606	P-P2-D2	53,45455	PA-C7-D3	48,84995	MD-F-H2	59,66604
VB-24-D2	50,01562	P-P2-D3	49,59016	PA-E8-H2	47,46371	MD-F-H3	46,2947
VB-24-D3	48,02568	P-P3-H2	51,69395	PA-E8-H3	46,99565	MD-F-D2	46,51611
VB-27-H2	47,89091	P-P3-H3	49,78325	PA-E8-D2	45,47935	MD-F-D3	47,06215
VB-27-H3	47,85054	P-P3-D2	50,62482	PA-E8-D3	45,88899	MD-H-H2	48,04987
VB-27-D2	49,11961	P-P3-D3	49,30991	PA-E10-H2	48,68701	MD-H-H3	47,46894
VB-27-D3	48,68603	P-P4-H2	48,41788	PA-E10-H3	48,12819	MD-H-D2	49,8051
VB-45-H2	49,42592	P-P4-H3	46,89579	PA-E10-D2	47,89227	MD-H-D3	49,35375
VB-45-H3	49,83542	P-P4-D2	45,66013	PA-E10-D3	48,72835	MD-K-H3	45,64738
VB-45-D2	51,50915	P-P4-D3	45,1419	PA-c1 -H2	47,08872	MD-K-D2	43,92819
VB-45-D3	49,62147	P-P5-H2	46,6282	PA-c2-H3	45,72565		
VB-47-H2	49,33726	P-P5-H3	45,36741	PA- c1-D2	49,37975		
VB-47-H3	45,66616	P-P5-D2	49,83278	PA- c1-D3	48,50523		
VB-47-D2	51,10294	P-P5-D3	46,53313	V-44-H2	51,47849		
VB-47-D3	52,11406	A-C11-H2	47,75533	V-44-H3	50,57143		
LH-28-H2	50,8369	A-C11-H3	46,42113	V-44-D2	51,58161		

Příloha 4: Koeficienty regresní rovnice použité pro validaci modelů

látka	Lignin		látka	karotenoidy	
model 1	vlnová délka	koeficient	model 1	vlnová délka	koeficient
	Intercept	32,544		intercept	0,3034
	2060	455,484		644	49,6709
	1081	-517,728		1922	19,8751
	1650	1595,717		1338	15,2067
	780	-5214,79		1862	-4,1602
	2164	-395,604		640	77,8854
	1922	763,796		1793	27,3424
	1901	1213,292		519	35,3457
	1977	-827,491		509	-58,0149
	2014	-299,146		694	25,8842
	2386	-49,048		886	46,5713
	872	-3721,115		613	36,732
	795	-3526,831		594	45,1278
	model 2	intercept		29,4469	model 2
2218		-427,459	644	76,44942	
2060		634,6166	1338	34,93841	
1901		1061,7002			
2174		-269,8712			

látka	voda	
model 1	Intercept	45,396
	2339	58,601
	1716	-1092,88
	490	116,681
	2181	156,293
	989	328,467
	954	-1573,35
	1971	243,453
	1500	-4066,02
	1667	950,388
	1634	352,804
	1022	-1108,62
	2153	-315,505
	862	2877,431
	2081	102,835
	1471	11857,22
	537	-4378,25
	1330	-1214,37
	655	-1433,52
	1885	513,246
843	1806,321	
464	497,815	
1010	-526,016	
1534	1746,852	
1346	484,798	
970	-518,961	
1713	-248,352	
model 2		48,2447
	2339	-77,5813
	1716	-2572,13
	1971	266,6466
	655	1027,176

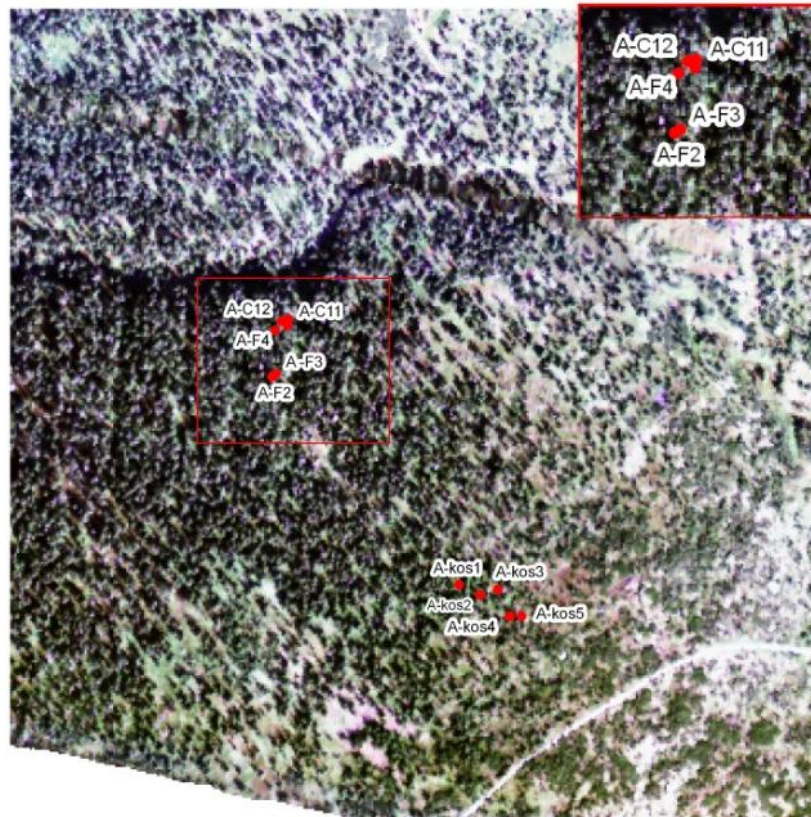
Poznámka: Model 1: "méně vlnových délek než je počet vzorků", model 2: "1:10"

*Příloha 5: Velikosti pixelů leteckých snímků APEX*

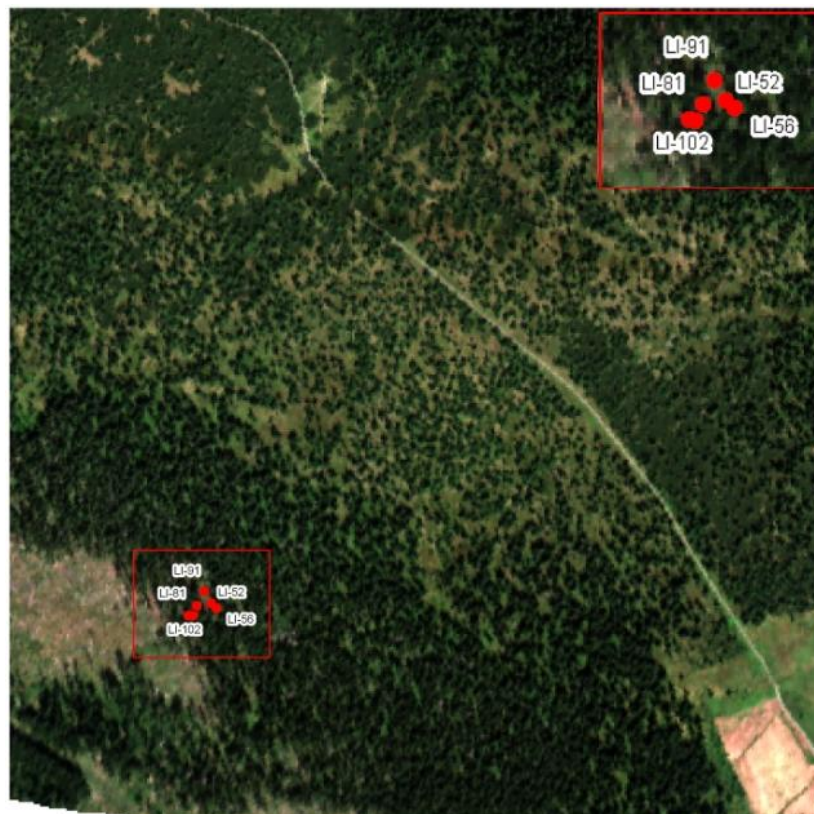
Snímek	Velikost pixelu (m)	Snímek	Velikost pixelu (m)
HYME 1 03rP1	2,830247	HYME 1 09rP2	2,897923
HYME 1 03rP3	2,430464	HYME 1 11rP1	2,670391
HYME 1 05rP1	2,696375	HYME 2 01rP2	2,834398
HYME 1 07rP1	2,687394	HYME 2 01rP3	2,49016
HYME 1 07rP2	2,803367	HYME 2 03rP0	2,624706
HYME 1 07rP3	2,591781	HYME 2 03rP1	2,572646

Příloha 6: Výzkumné plochy

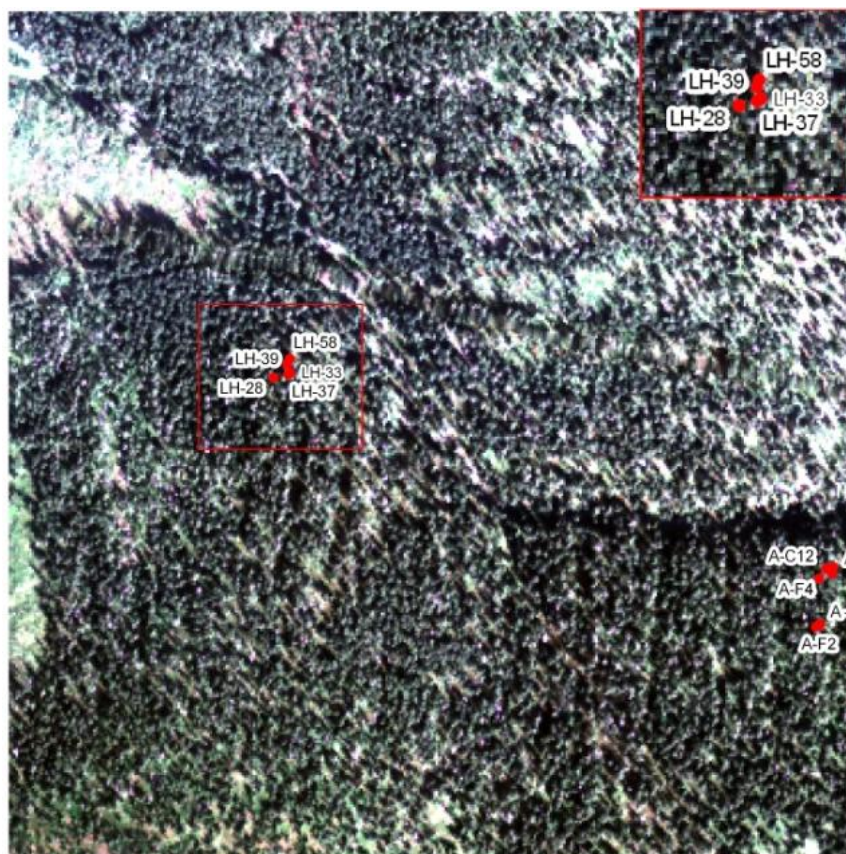
Alžbětinka



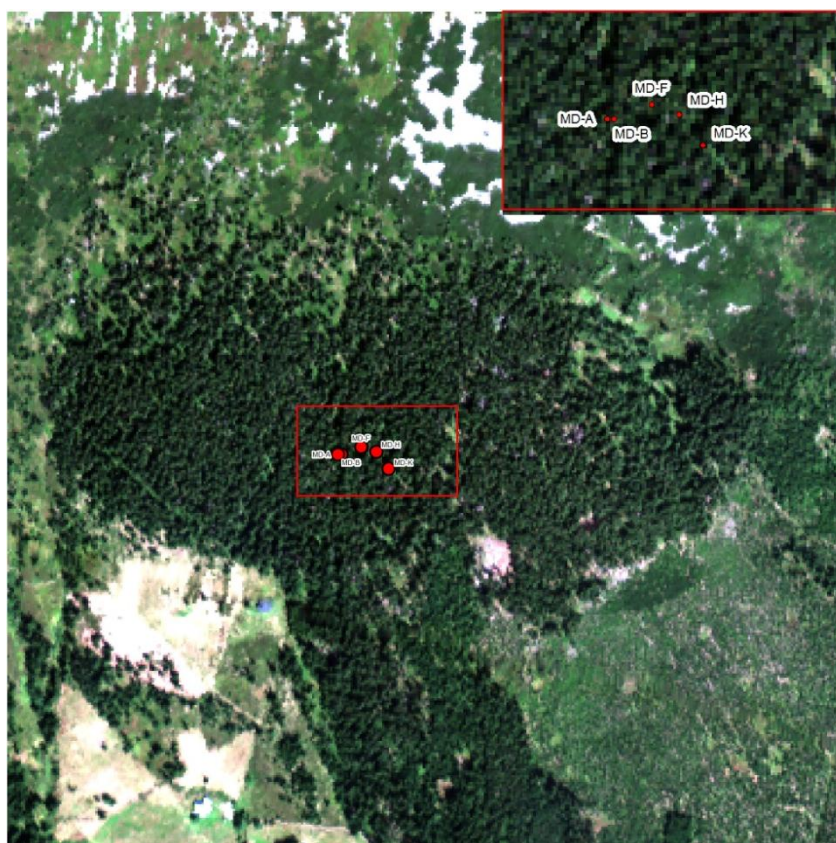
Pod Liščí boudou



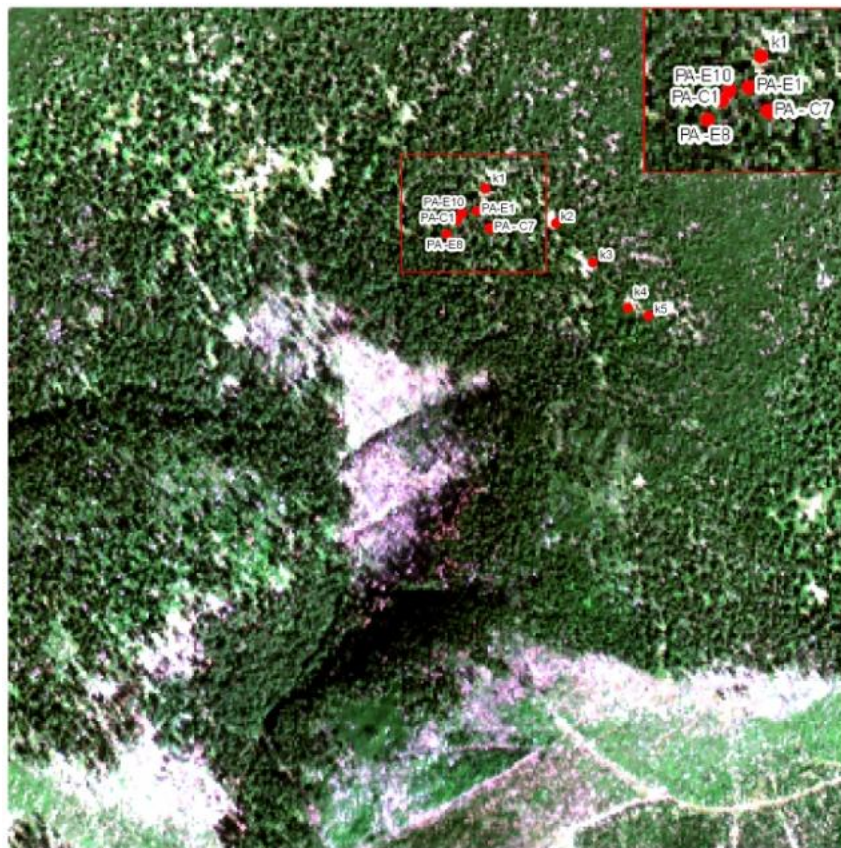
Pod Lysou horou



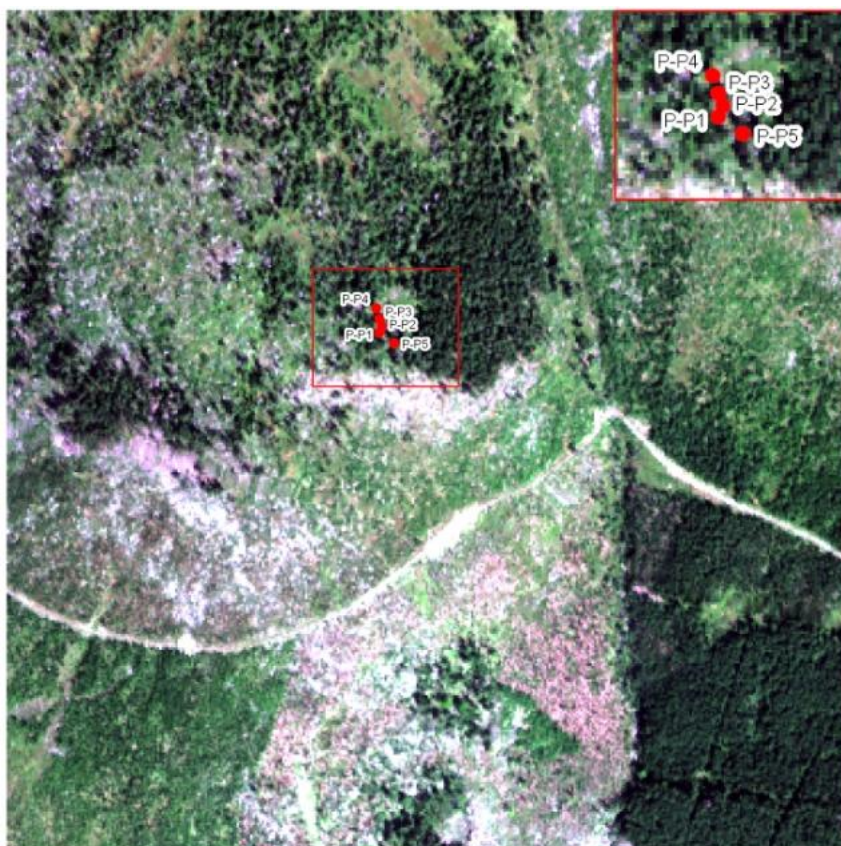
Modrý důl



Pašerácký chodníček



Pudlava

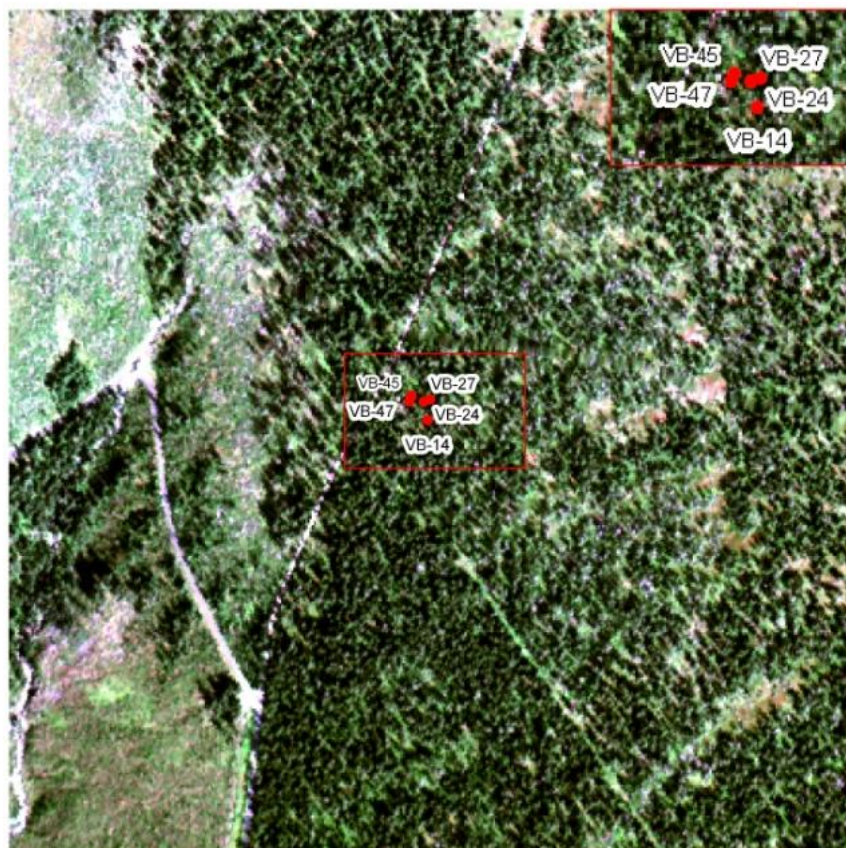




Václavák

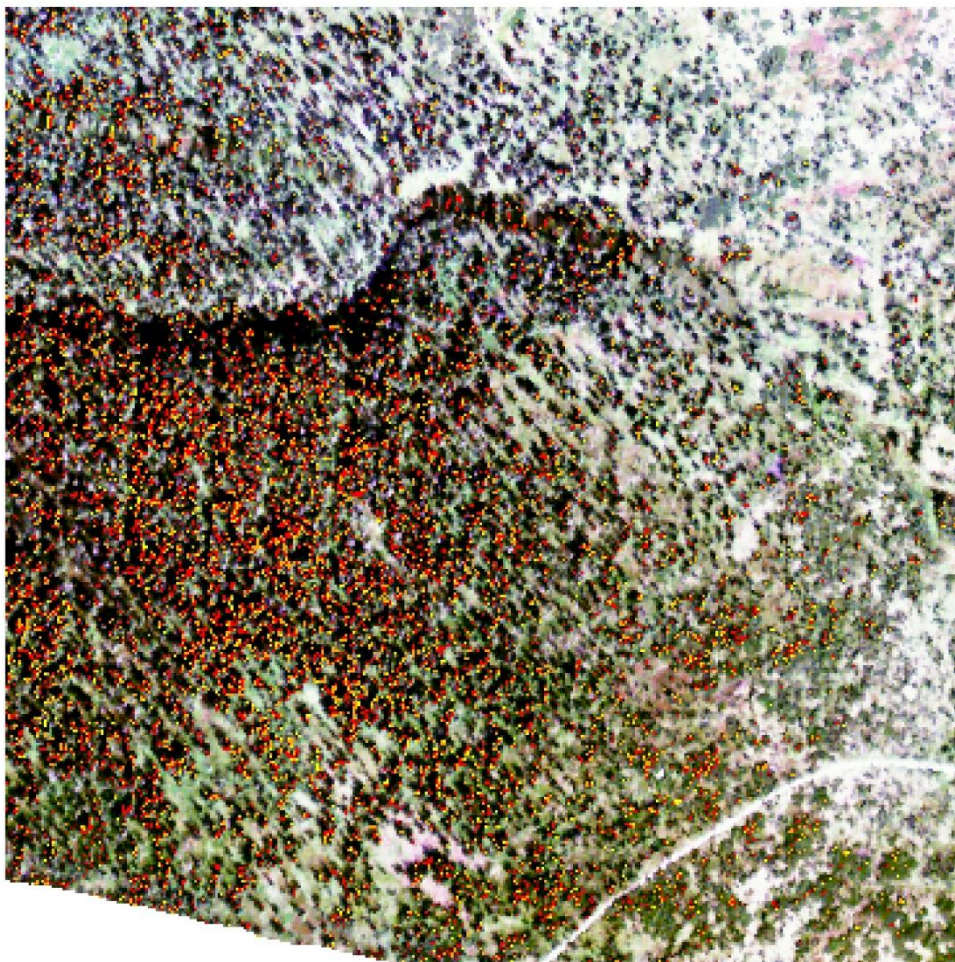


Pod Voseckou boudou

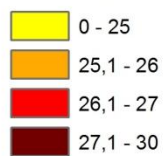


Příloha 7: Ligninové mapy výzkumných ploch na západě

## ALŽBĚTINKA



obsah ligninu [mg/g]

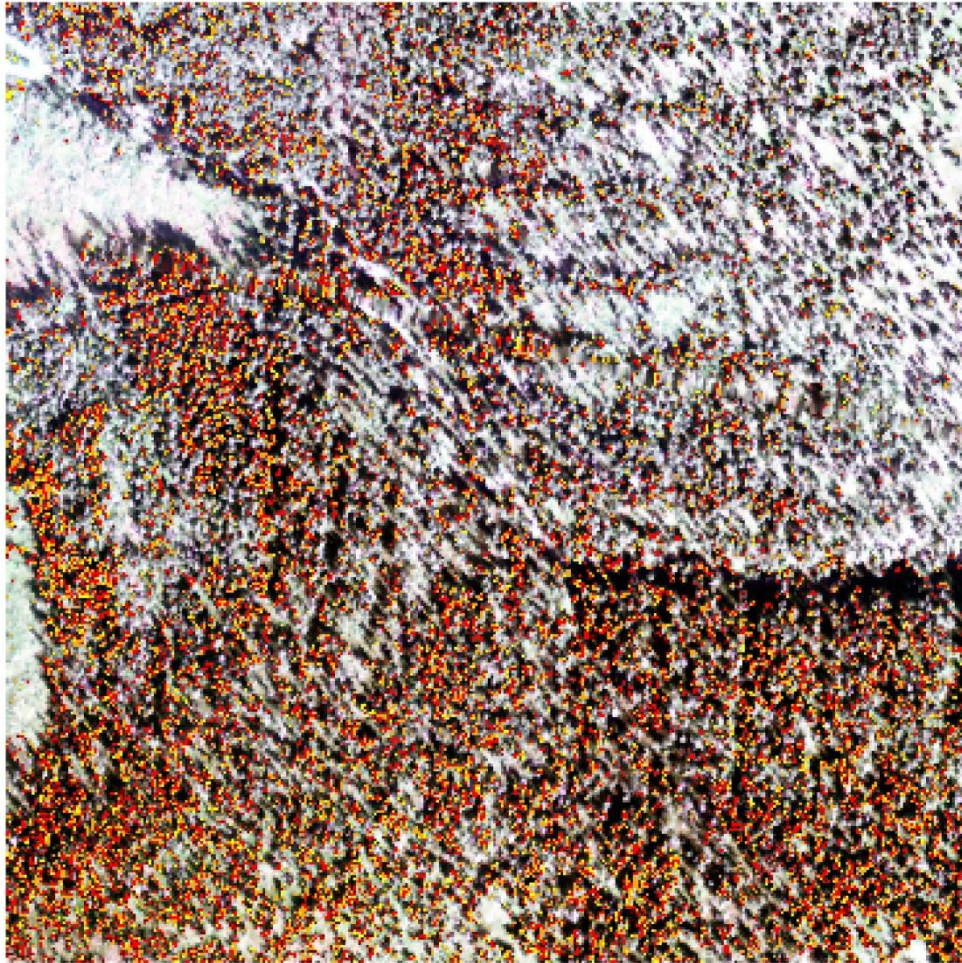


0 0,2 km

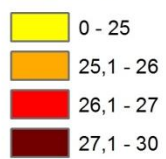


Renáta SUCHÁ  
srpen 2013

## POD LYSOU HOROU



obsah ligninu [mg/g]

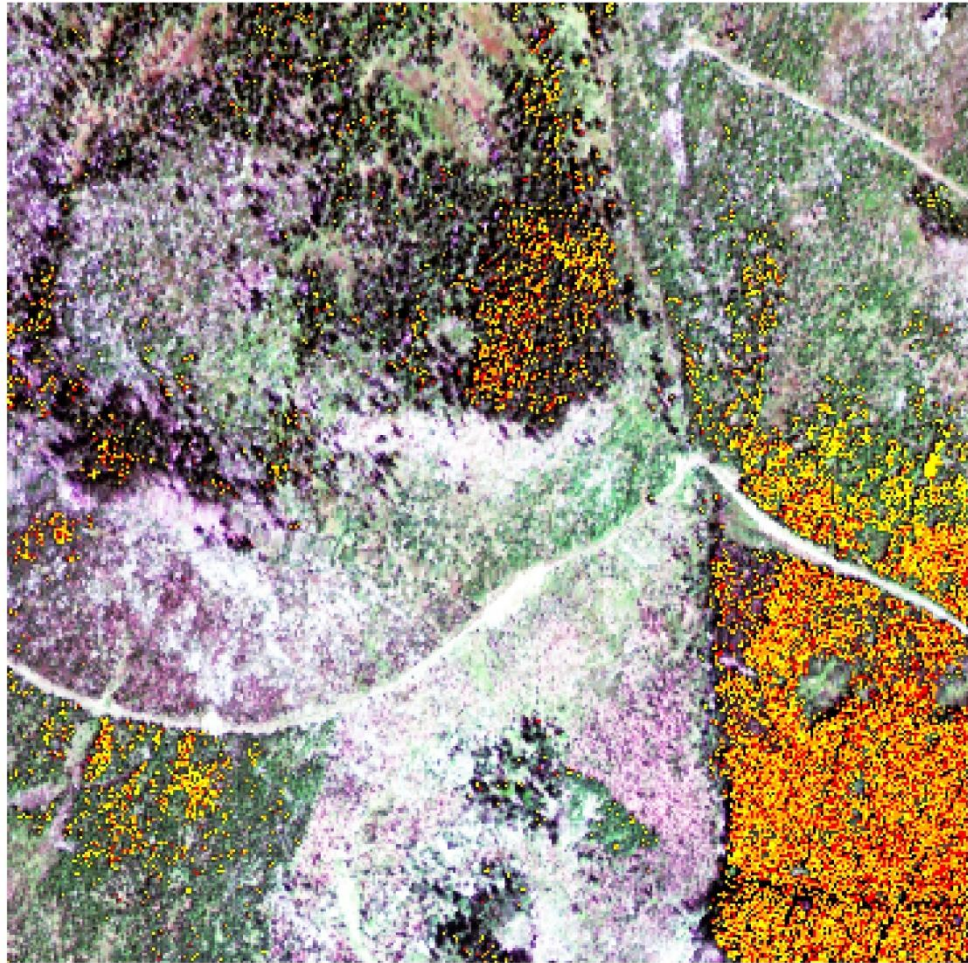


0 0,2 km

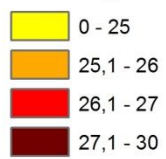


Renáta SUCHÁ  
srpen 2013

## PUDLAVA



obsah ligninu [mg/g]

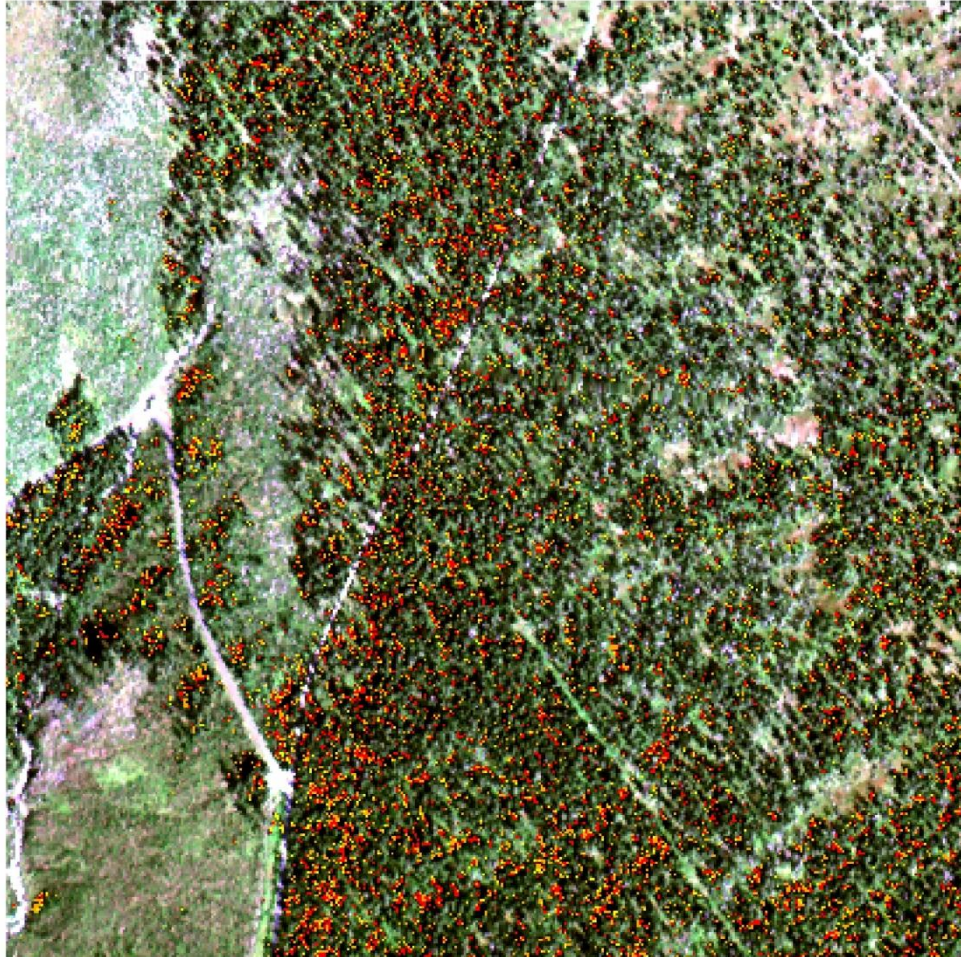


0 0,2 km

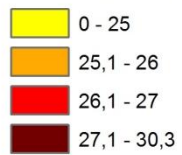


Renáta SUCHÁ  
srpen 2013

## POD VOSECKOU BOUDOU



obsah ligninu [mg/g]



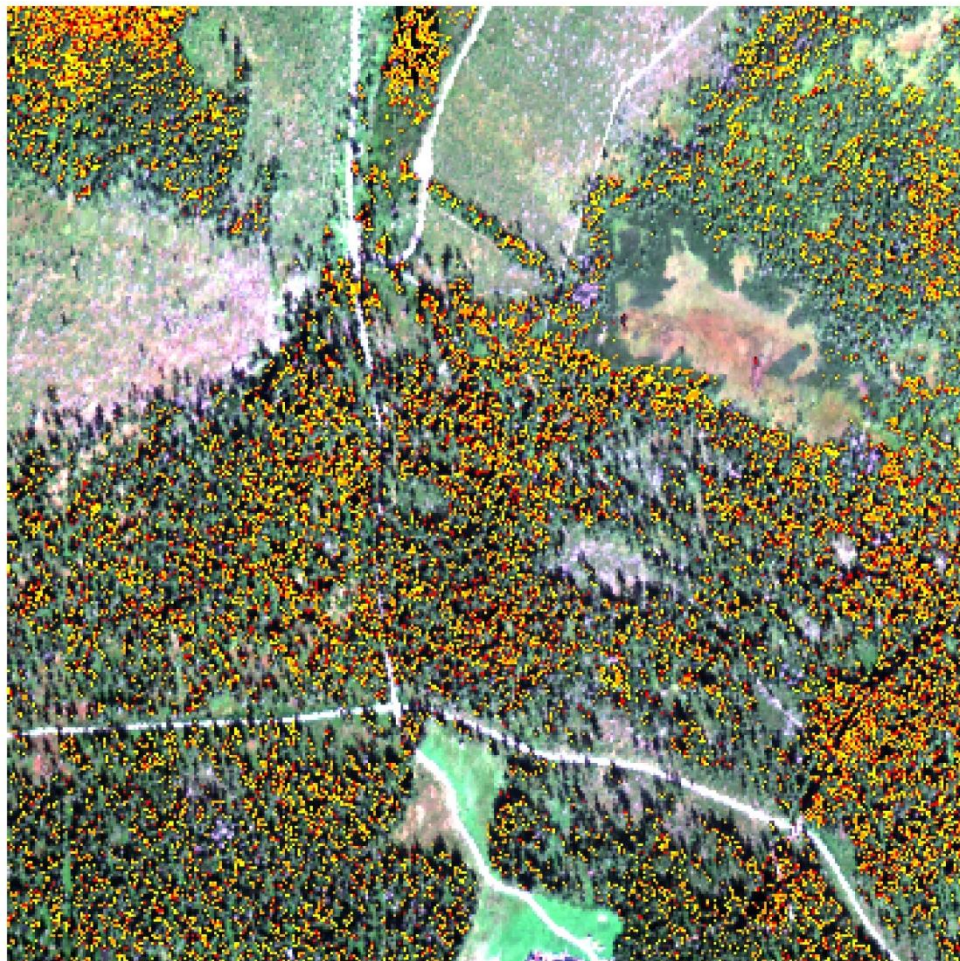
0 0,2 km



Renáta SUCHÁ  
srpen 2013

Příloha 8: Ligninové mapy výzkumných ploch na východě

## VÁCLAVÁK



obsah ligninu [mg/g]

0 - 25

25,1 - 26

26,1 - 27

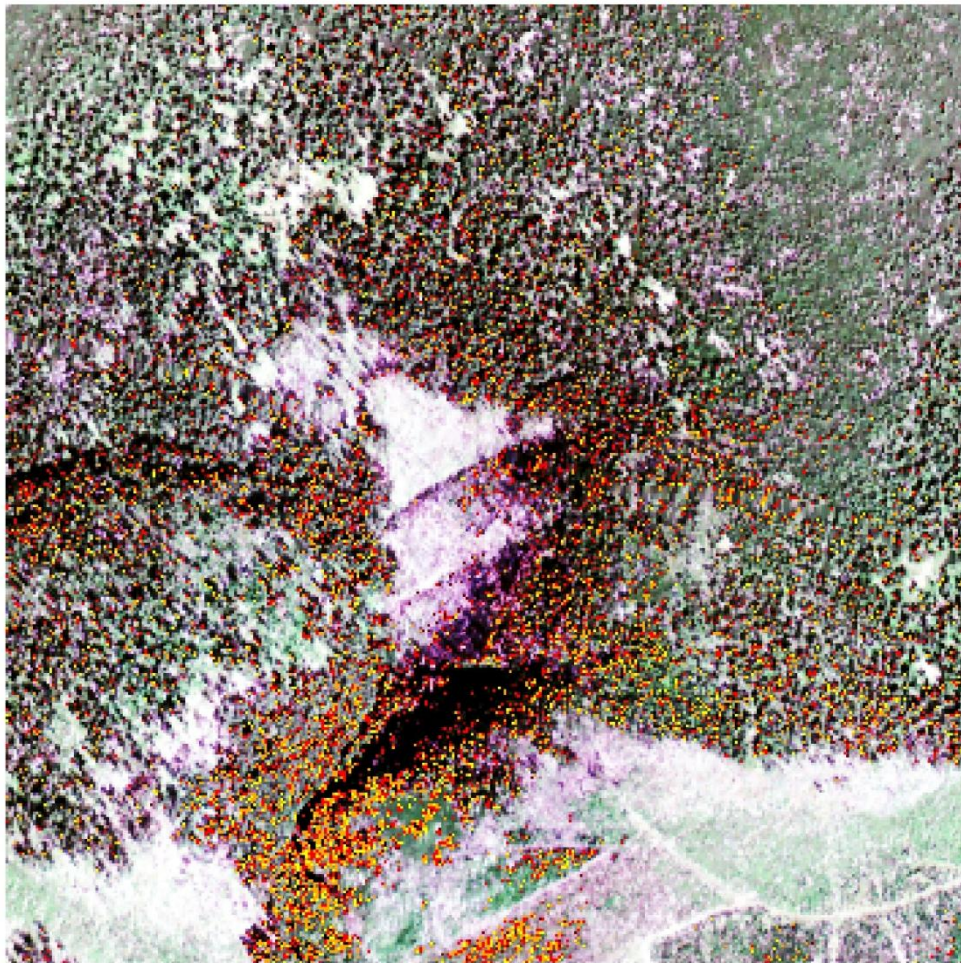
27,1 - 29

0 0,2 km



Renáta SUCHÁ  
srpen 2013

## PAŠERÁCKÝ CHODNÍČEK

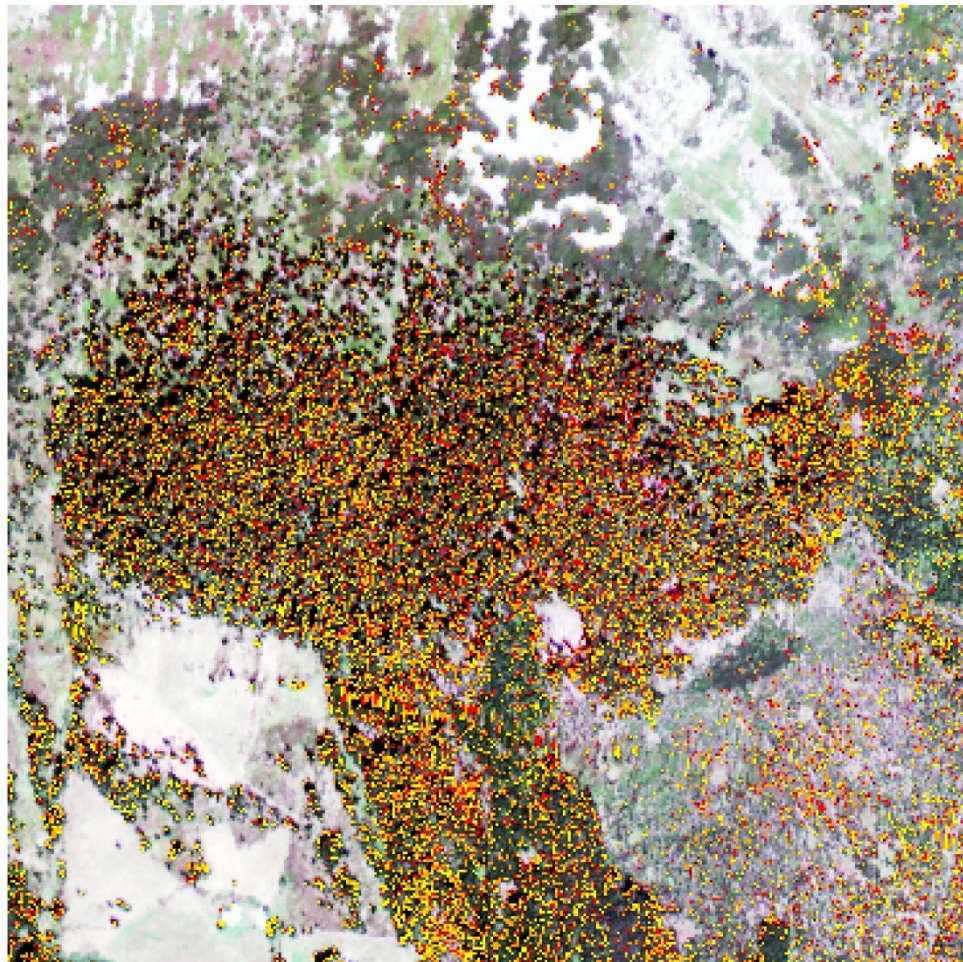


obsah ligninu [mg/g]



Renáta SUCHÁ  
srpen 2013

## MODRÝ DŮL



obsah ligninu [mg/g]



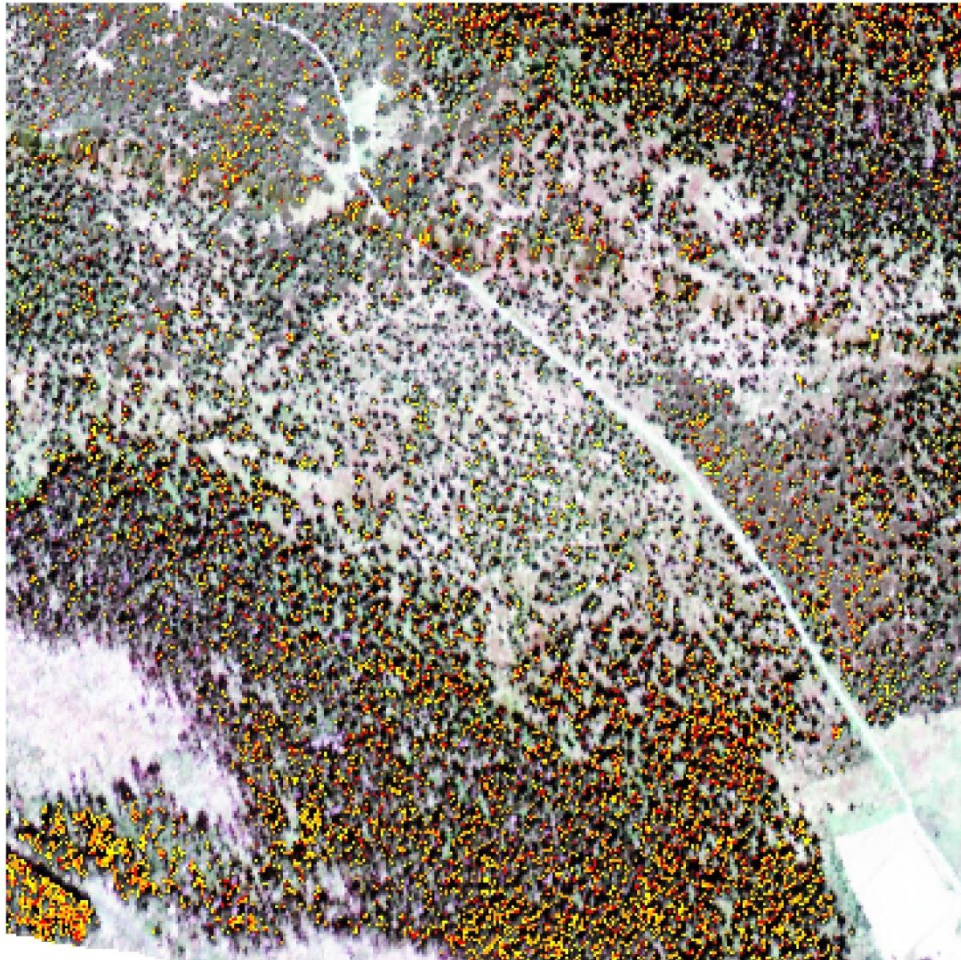
0 0,2 km



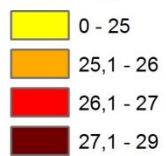
Renáta SUCHÁ  
srpen 2013



## POD LIŠČÍ BOUDOU



obsah ligninu [mg/g]



0 0,2 km



Renáta SUCHÁ  
srpen 2013