

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Gabriela Pinlová

**URČOVÁNÍ OBSAHU CHLOROFYLU
VE VYBRANÝCH TRAVNÍCH SPOLEČENSTVECH KRKONOŠKÉ TUNDRY
NA ZÁKLADĚ TERÉNNÍ SPEKTROSKOPIE A LETECKÝCH HYPERSPEKTRÁLNÍCH DAT**

DETERMINATION OF CHLOROPHYLL CONTENT
IN SELECTED GRASS COMMUNITIES OF KRKONOŠE TUNDRA
BASED ON FIELD SPECTROSCOPY AND AERIAL HYPERSPECTRAL DATA

Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Lucie Červená, Ph.D.

Praha, 2022

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Gabriela Pinlová**

Datum a místo narození: **15.10.1996, České Budějovice**

Studijní obor: **Kartografie a geoinformatika**

Garant studijního programu/oboru vám schválil přidělení této diplomové práce:

Téma práce: Určování obsahu chlorofylu ve vybraných travních společenstvech krkonošské tundry na základě terénní spektroskopie a leteckých hyperspektrálních dat

Předběžná náplň práce

Teoretická část práce bude zaměřena především na metody určování obsahu chlorofylu z dat dálkového průzkumu Země. Důraz bude kladen na travnaté porosty.

Hlavním cílem praktické části práce je vytvoření chlorofylové mapy pro čtyři nejrozšířenější druhy krkonošské travnaté tundry (smilka tuhá, třtina chloupkatá, bezkoleneček modrý, metlice trsnatá) na základě hyperspektrálních obrazových dat pořízených kamerou Headwall NANO Hyperspec® nesenou dronem DJI Matrice 600 Pro. Pro dosažení tohoto cíle je potřeba zodpovědět ještě dílčí výzkumné otázky:

Úroveň listu:

- Jaký je vztah mezi obsahem chlorofylu měřeným na úrovni listu destruktivně v laboratoři a nedestruktivně pomocí chlorofylmetru CCM-300?

- Jak korelují získané obsahy chlorofylu s vegetačními indexy spočítanými ze spekter naměřených kontaktní sondou spektrometrem ASD FieldSpec 4 Wide-res?

Úroveň porostu:

- Jaký je vztah mezi indexem listové plochy (LAI) naměřeným v terénu pomocí přístroje Licor LAI-2200C Plant Canopy Analyzer a tzv. greenLAI, který se získá rozebráním biomasy z dané plochy na zelenou a suchou a naskenováním té zelené?

- Jsou vegetační indexy spočítané ze spekter naměřených spektrometrem v terénu srovnatelné s vegetačními indexy spočítanými z leteckých obrazových hyperspektrálních dat?

- Jak koreluje obsah chlorofylu na úrovni porostu s vybranými indexy?

Pro zodpovězení dílčích otázek je potřeba se podívat na jednotlivé druhy samostatně i dohromady, stejně tak jako na jednotlivé termíny, ve kterých data byla pořizována (červen, červenec, srpen), i na celou sezónu.

Práce zahrnuje i spoluúčast na pořizování dat přímo v terénu a měření spekter pomocí kontaktní sondy v laboratoři.

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Lucie Červená, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: 17.12.2019

Termín odevzdání diplomové práce: dle harmonogramu příslušného akademického roku

V Praze dne 7.4.2022

.....
Garant studijního programu/oboru

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 22. dubna 2022

.....
Gabriela Pinlová

Poděkování

Ráda bych poděkovala především Mgr. Lucii Červené, Ph.D. za vedení diplomové práce, věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěla poděkovat kolegům z Katedry experimentální biologie rostlin a Katedry aplikované geoinformatiky a kartografie za spolupráci při pořizování dat. Poděkování patří i mému skvělému okolí, Dádě, Alexovi, Honzovi, Martinovi, rodině a všem dalším, kteří mi byli velkou oporou při zpracování této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na stanovení obsahu chlorofylu z hyperspektrálních dat v travních společenstvech krkonošské tundry, jmenovitě smilky tuhé (*Nardus stricta*), bezkolence modrého (*Molinia caerulea*), třtiny chloupkaté (*Calamagrostis villosa*) a metlice trsnaté (*Deschampsia cespitosa*). Hodnoty obsahu chlorofylu na úrovni listu (LCC) byly naměřeny destruktivně spektrofotometricky v laboratoři a nedestruktivně chlorofylmetrem CCM-300. Hodnoty indexu listové plochy (LAI) pro výpočet obsahu chlorofylu na úrovni porostu (CCC) byly stanoveny taktéž destruktivně na základě odběru biomasy a nedestruktivně přístrojem LAI-2200C. Práce se věnuje popisu vlastností naměřených hodnot LCC, LAI a CCC a jejich korelací s vegetačními indexy odvozenými z příslušných spekter, tj. spekter na úrovni listu naměřených kontaktní sondou spektrometru ASD FieldSpec 4 Wide-Res, na úrovni porostu pořízených optickým kabelem a vyextrahovaných spekter z hyperspektrálních snímků (HSI) pořízených kamerou Headwall Nano-Hyperspec® upevněnou na dronu DJI Matrice 600 Pro. Práce zahrnuje vytvoření chlorofylových map na základě výsledku modelu mnohonásobné krokové lineární regrese (MSLR) aplikované na HSI. Pro model odvozený z nedestruktivního sběru dat využitý pro mapu LCC bylo dosaženo RMSE 66,55 mg/m².

Klíčová slova: obsah chlorofylu na úrovni listu, obsah chlorofylu na úrovni porostu, index listové plochy, laboratorní a obrazová spektroskopie, Krkonoše, tundra, smilka tuhá, bezkolence modrý, třtina chloupkatá, metlice trsnatá

Abstract

The thesis focuses on the determination of chlorophyll content from hyperspectral data in grass communities in the arctic-alpine tundra in the Krkonoše Mountains, namely *Nardus stricta*, *Molinia caerulea*, *Calamagrostis villosa*, and *Deschampsia cespitosa*. Leaf chlorophyll content (LCC) was measured using two methods – spectrophotometric destructive determination in the laboratory, and the LCC assessed non-destructively by fluorescence portable chlorophyll meter CCM-300. Leaf area index (LAI) values for canopy chlorophyll content (CCC) retrieval were also acquired by destructive biomass sampling and indirectly using LAI-2200C. Relationships were established between the LCCs, LAI, CCCs, and vegetation indices (VI) calculated from respective spectra, i.e. leaf level spectra acquired with contact probe coupled with an ASD FieldSpec4 Wide-Res spectroradiometer, canopy level spectra measured by the spectroradiometer and extracted from hyperspectral images (HSI) acquired by Headwall Nano-Hyperspec® mounted on the DJI Matrice 600 Pro drone. Chlorophyll content maps were created based on the results of multiple stepwise linear regression applied to HSI. For the model, derived from the non-destructive data sampling and used for the LCC map, a RMSE of 66.55 mg/m² was achieved.

Keywords: leaf chlorophyll content, canopy chlorophyll content, leaf area index, laboratory and image spectroscopy, Krkonoše Mts., tundra, *Nardus stricta*, *Molinia caerulea*, *Calamagrostis villosa*, *Deschampsia cespitosa*

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Přehled použitých zkratk | 10 |
| Seznam obrázků a tabulek | 11 |
| 1 Úvod | 13 |
| 2 Úvod do problematiky | 14 |
| 2.1 Laboratorní spektroskopie | 15 |
| 2.2 Terénní spektroskopie | 16 |
| 2.3 Obrazová spektroskopie | 16 |
| 2.4 Chlorofyl v DPZ | 17 |
| 2.4.1 Referenční hodnota chlorofylu na úrovni listu | 17 |
| 2.4.2 Referenční hodnota chlorofylu na úrovni porostu | 19 |
| 2.4.3 Parametr struktury porostu | 20 |
| 2.5 Metody pro stanovení obsahu chlorofylu z hyperspektrálních dat | 21 |
| 2.6 Případové studie | 23 |
| 3 Data a metody | 26 |
| 3.1 Popis dat a jejich předzpracování | 26 |
| 3.1.1 Referenční hodnoty vlastností vegetace | 28 |
| 3.1.2 Spektroskopická data | 30 |
| 3.2 Zpracování dat | 34 |
| 3.2.1 Chlorofyl na úrovni listu | 34 |
| 3.2.2 Chlorofyl na úrovni porostu | 34 |
| 3.2.3 Chlorofylové mapy | 36 |
| 3.3 Zájmové území | 38 |
| 4 Výsledky práce a diskuze | 39 |
| 4.1 Chlorofyl na úrovni listu | 39 |
| 4.1.1 Porovnání naměřených hodnot LCC | 39 |
| 4.1.2 Porovnání hodnot LCC s VI | 42 |
| 4.2 Chlorofyl na úrovni porostu | 44 |
| 4.2.1 Porovnání parametrů struktury | 44 |
| 4.2.2 Obsah chlorofylu na úrovni porostu | 47 |
| 4.2.3 Spektra na úrovni porostu a jejich VI | 48 |
| 4.2.4 Porovnání hodnot CCC s VI | 50 |
| 4.3 Chlorofylové mapy | 54 |
| 4.3.1 Chlorofylová mapa odvozená z destruktivního sběru dat | 54 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.2 | Chlorofylové mapy odvozené z nedestruktivního sběru dat | 56 |
| 5 | Závěr | 59 |
| | Seznam použité literatury | 61 |
| | Seznam příloh..... | 66 |

Přehled použitých zkratek

| | |
|-------------|--|
| CCC | Canopy Chlorophyll Content/ obsah chlorofylu na úrovni porostu |
| CCM-300 | CCM-300 Chlorophyll Content Meter; Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, USA |
| CD | Compact Disc/ kompaktní disk |
| CFR | Chlorophyll Fluorescence Ratio/ poměr fluorescence |
| DPZ | Dálkový Průzkum Země |
| FieldSpec 4 | ASD FieldSpec 4 Wide-Res spectroradiometer; Analytic Spectral Devices, Boulder, USA |
| FOV | Field of View/ zorné pole |
| FWHM | Full Width at Half Maximum/ spektrální pološířka |
| <i>GLAI</i> | v praktické části označení pro GreenLAI zjištěné laboratorně |
| GreenLAI | poměr plochy adaxiální strany zelených listů na jednotku plochy |
| HSI | Hyperspectral image/ hyperspektrální obrazová data |
| KRNAP | Krkonošský národní park |
| LAI | Leaf Area Index/ index listové plochy |
| <i>LAI</i> | v praktické části označení pro LAI zjištěné nedestruktivně |
| LCC | Leaf Chlorophyll Content/ obsah chlorofylu na úrovni listu |
| LMA | Leaf Dry Mass per Area/ suchá hmotnost listu na jednotku plochy |
| PAR | Photosynthetically Active Radiation/ fotosynteticky aktivní radiace |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index/ normalizovaný diferenční vegetační index |
| MSLR | Multiple Stepwise Linear Regresion/ mnohonásobná kroková lineární regrese |
| R_{700} | odrazivost v dané vlnové délce |
| REIP | Red-Edge Inflection Point/ inflexní bod červeného okraje |
| RMSE | Root Mean Square Error/ střední kvadratická chyba |
| RTM | Radiative Transfer Models/ modely přenosu záření |
| SPAD 502 | SPAD 502 leaf chlorophyll (Soil Plant Analysis Development); Konica Minolta Sensing, Inc., Sakai, Osaka, Japan |
| UAS | Unmanned Aircraft Systems/ bezpilotní systémy |

Seznam obrázků a tabulek

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 1 | Ukázka naaranžovaných listů pro měření kontaktní sondou | 15 |
| Obr. 2 | Rozmístění odběrových míst a zájmových území snímaných hyperspektrální kamerou | 27 |
| Obr. 3 | Schéma designu měření na jedné ploše | 27 |
| Obr. 4 | Plošky 10 × 10 cm | 29 |
| Obr. 5 | Měření spektrů kontaktní sondou | 30 |
| Obr. 6 | Kontrolní bod v terénu pro hodnocení polohové přesnosti mozaiky | 31 |
| Obr. 7 | Gaussovy křivky pro převzorkování spekter | 32 |
| Obr. 8 | Schéma metodiky pro první a druhou část zpracování práce | 36 |
| Obr. 9 | Schéma postupu pro chlorofylovou mapu odvozenou z nedestruktivního sběru dat... .. | 37 |
| Obr. 10 | Bílá louka | 38 |
| Obr. 11 | Porovnání hodnot LCC stanovených laboratorní metodou a přístrojem CCM-300 za celé sledované období | 39 |
| Obr. 12 | Porovnání hodnot LCC stanovených laboratorní metodou a přístrojem CCM-300 v jednotlivých termínech měření..... | 41 |
| Obr. 13 | Regresní modely indexu MCARI/OSAVI ze spekter na úrovni listu | 43 |
| Obr. 14 | Regresní modely indexu REP_Li ze spekter na úrovni listu..... | 43 |
| Obr. 15 | Příprava pro měření listů kontaktní sondou | 44 |
| Obr. 16 | Porovnání hodnot LAI stanovených laboratorní metodou a přístrojem LAI-2200C za celé sledované období | 45 |
| Obr. 17 | Porovnání hodnot LAI stanovených laboratorní metodou a přístrojem LAI-2200C v jednotlivých termínech měření..... | 46 |
| Obr. 18 | Vzájemné porovnání vypočtených CCC | 47 |
| Obr. 19 | Ukázka průměrných nepřevzorkovaných spektrálních křivek z laboratorních a terénních spekter a spekter z HSI za daný druh/měsíc | 48 |
| Obr. 20 | P-hodnoty párového t-testu porovnávající spektra z terénu se spektry vyextrahovanými z dronu na příslušných vlnových délkách | 49 |
| Obr. 21 | Regresní modely CCC indexu REP_Li ze spekter z HSI..... | 52 |
| Obr. 22 | Regresní modely CCC indexu Vogelmann2 ze spekter z HSI..... | 53 |
| Obr. 23 | Chlorofylové mapy odhadující hodnoty CCC odvozené z destruktivního sběru dat ... | 55 |
| Obr. 24 | Mapy odhadující hodnoty CCC, LAI a LCC nad srpnovým snímkem na území U zahrádky | 56 |
| Obr. 25 | Mapy odhadující hodnoty CCC, LAI a LCC nad srpnovým snímkem na území U Luční boudy | 57 |

| | | |
|---------|---|----|
| Tab. 1 | Počet naměřených dat pro jednotlivé druhy. | 26 |
| Tab. 2 | Přehled měřených dat. | 27 |
| Tab. 3 | Prostorová přesnost mozaik..... | 31 |
| Tab. 4 | Vybrané chlorofylové vegetační indexy pro stanovení obsahu chlorofylu | 33 |
| Tab. 5 | Souhrnná statistická tabulka naměřených hodnot chlorofylu..... | 40 |
| Tab. 6 | Porovnání naměřených hodnot LCC stanovených laboratorní metodou a přístrojem CCM-300 | 41 |
| Tab. 7 | Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu za celé sledované období | 42 |
| Tab. 8 | Souhrnná statistická tabulka naměřených hodnot LAI..... | 45 |
| Tab. 9 | Porovnání naměřených hodnot LAI stanovených laboratorní metodou a přístrojem LAI-2200C | 46 |
| Tab. 10 | Porovnání VI odvozených z terénních spekter a vyextrahovaných spekter..... | 49 |
| Tab. 11 | Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI odvozenými z terénních spekter..... | 50 |
| Tab. 12 | Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI odvozenými z vyextrahovaných spekter z HSI. | 51 |
| Tab. 13 | Hodnocení modelu odvozeného z destruktivního sběru dat pro tvorbu mapy | 51 |
| Tab. 14 | Hodnocení modelů odvozených z nedestruktivního sběru dat pro tvorbu map | 51 |

1 Úvod

Pro vyhodnocení obsahu chlorofylu, a i dalších biochemických a biofyzikálních parametrů vegetace, z pozemních spektrálních či obrazových dat dálkového průzkumu Země (DPZ) lze využít empirické nebo fyzikální metody. Aby bylo možné z těchto metod získat kvantitativní odhad obsahu daného parametru, jsou jako vstupní parametr nezbytná spolehlivá trénovací data zjištěná přímo v terénu. Nedestruktivní měření obsahu chlorofylu na úrovni listu v krkonošských travinách bylo náplní mé bakalářské práce. Diplomová práce volně navazuje a řeší otázku přenosu hodnoty obsahu chlorofylu z úrovně listu na úroveň porostu, která je zásadní pro data dálkového průzkumu. Na rozdíl od lesů (Croft a kol. 2014) a zemědělských plodin (Gitelson 2005, Croft a kol. 2020) nejsou pro travní porosty tyto postupy v literatuře příliš zkoumány (Darvishzadeh a kol. 2008).

Hlavním úkolem diplomové práce je tedy řešit otázku přenosu hodnoty chlorofylu z úrovně listu na úroveň porostu pro čtyři vybrané druhy travin arktickoalpínské tundry (bezkolenec, modrý, metlice trsnatá, smilka tuhá a třtina chloupkatá) a stanovit pro ně odhad obsahu chlorofylu z hyperspektrálních dat pořízených spektrometrem ASD FieldSpec 4 Wide-Res na úrovni porostu a obrazových dat snímaných hyperspektrální kamerou Headwall Nano-Hyperspec® na dronu DJI Matrice 600 Pro (UAS, Unmanned Aerial Systems). Tomuto cíli předchází popis a porozumění fungování vztahů parametrů vegetace LCC (obsah chlorofylu na úrovni listu) a LAI (index listové plochy). Oba parametry vegetace byly v terénu stanoveny destruktivní a nedestruktivní metodou a diplomová práce se bude zabývat jejich porovnáním a zhodnocením zaměnitelnosti sběru dat různými metodami pro stanovení CCC (obsah chlorofylu na úrovni porostu). Další částí práce bude předzpracování a porovnání spekter pořízených spektrometrem na úrovni listu a porostu a spekter extrahovaných z obrazových dat pořízených UAS. Dále budou ze spektrálních dat vypočteny vegetační indexy (VI) za účelem korelace se zjištěnými hodnotami chlorofylu na úrovni porostu.

Cílem práce je vytvoření chlorofylové mapy na základě modelu vytvořeného z naměřených dat. Vzhledem k tomu, že je chlorofyl brán jako indikátor zdravotního stavu vegetace, může i tato mapa posloužit ke zhodnocení zdravotního stavu rostlin.

2 Úvod do problematiky

Hyperspektrální neboli spektroskopická data poskytují podrobné informace o odrazivých vlastnostech povrchu objektu pomocí vysokého počtu kontinuálních pásem s úzkými rozsahy vlnových délek v širokém elektromagnetickém spektru (Feilhauer a kol. 2015). Obrazovou spektroskopií je pak označován letecký hyperspektrální průzkum, který započal v 80. letech a v současnosti vytváří data s mimořádnou radiometrickou kvalitou a velmi vysokým spektrálním rozlišením (Zemek 2014). Kromě leteckého či družicového sběru dat lze spektrální křivku odrazivosti povrchu získat pozemním měřením za použití přenosného spektrometru. Mezi nejpoužívanější spektrometry patří modelová řada FieldSpec od americké firmy ASD Inc., jimiž je možné měřit odrazivost vegetace pomocí optického kabelu s pistolovým nástavcem na úrovni porostu nebo kontaktní sondou či integrační sférou v laboratoři na úrovni listu. Spektrometry dále umožňují připojit klipsnu, s níž lze měřit spektra na úrovni listu i nedestruktivně v terénu.

Obvykle pozemní měření odrazivosti pořízená spektrometry na úrovni porostu (dále označováno také jako terénní spektra) slouží ke zpřesnění korekcí odstraňujících vliv atmosféry v obrazových datech (spektra získaná pomocí UAS/letadla/družice) nebo k hodnocení kvality těchto korekcí (Zemek 2014), ale lze je využít i pro odvození vlastností vegetace jako je obsah chlorofylu pomocí metodologických postupů popsanych níže v kapitole 2.5. Odrazivost na úrovni listu měřená s pomocí různých nástavců (dále jako laboratorní spektroskopie) je často preferovaná pro testování nových analytických algoritmů, protože na rozdíl od odrazivosti na úrovni porostu (terénní spektra nebo obrazová data) není ovlivněna atmosférickými vlivy (rozptyl, absorpce, intenzita slunečního světla) či podmínkami prostředí (Bhadra a kol. 2020). Při upscalingu, jak je v literatuře označován přenos parametrů vegetace z úrovně listu na úroveň porostu (Kattenborn a kol. 2019; Zhao a kol. 2021; Lukeš a kol. 2020), jsou spektrální data při postupu na vyšší úroveň více zatížena šumem. Aby nepřevažoval šum nad informací, využívají se různé metody pro potlačení šumu jako například průměrování více měření, transformace spekter odrazivosti pomocí derivací prvního či druhého řádu, filtry, odmaskování pásem s vysokým šumem, převzorkování do menšího počtu pásem nebo snížení prostorového rozlišení. S těmito metodami je nutné pracovat opatrně, aby naopak nedošlo k zesílení šumu a ztrátě informace, což by mohlo negativně ovlivnit modelování na základě těchto dat.

2.1 Laboratorní spektroskopie

Jak již bylo řečeno, spektra na úrovni listu lze získat spektrometrií s různými nastaveními. Při měření kontaktní sondou, která má vlastní zdroj světla, jsou vzorky umístěny do černě nabarvené misky, která pohlcuje většinu listem projitého záření. Problematika měření spekter u travin spočívá v jejich velmi úzkých a malých listech, které samostatně nepokryjí celé zorné pole (FOV – field of view) kontaktní sondy, a je proto nutné měřit kontaktní sondou více listů vedle sebe. Obdobným problémem trpí obecně všechny vzorky malých rozměrů, kterými je také jehličí (Einmann a kol. 2014; Potůčková a kol. 2016b) a ke stejnému problému dochází i při měření integrační sférou. Uspořádání listů při měření spekter (mezery, překryty či směr jednotlivých vzorků) má do určité míry vliv na výsledné spektrum odrazivosti (Mesarch a kol. 1999).

Metodikou pro měření spekter travin krkonošské tundry v laboratorním prostředí s využitím kontaktní sondy se zabývala Tomcová (2019) ve své diplomové práci. Tomcová (2019) testuje různá rozložení stébel pod kontaktní sondou a hledá nejstabilnější postup měření spekter na základě nejmenší směrodatné odchylky spočtené pro stejně uspořádaná stébla při měření. V závěru jsou nalezeny odlišné metodiky pro jednotlivé druhy travin v závislosti na jejich struktuře a vlastnostech. Pro smilku tuhou vycházely nejlepší výsledky při měření 120 stébel ve dvou vrstvách, pro bezkolenec modrý měření abaxiálních stran listů v jedné vrstvě, pro třtinu chloupkatou zas měření vrstvy listů, kde se vedle sebe střídají listy s adaxiální a abaxiální stranou. Metlice trsnatá nebyla součástí této práce.

Měření v praxi při produkci desítek vzorků v rámci experimentu však nedovoluje takto komplikované a náročné postupy skládání listů za pomoci izolepy (obr. 1).



Obr. 1 Ukázka naaranžovaných listů pro měření kontaktní sondou; vlevo 60 stébel smilky tuhé se stejným směrem špičky stébel, vpravo listy bezkolence modrého, kde se vedle sebe střídají listy s adaxiální a abaxiální stranou a s opačnými směry špiček (zdroj: Tomcová 2019)

Naměřená spektrální křivka vegetace na úrovni listu je ovlivněna především biochemickými vlastnostmi (chlorofyly, karotenoidy, flavonoidy, ...) v pásmu vlnových délek 400 – 700 nm, vnitřní strukturou listu (tloušťka listu, distribuce pigmentů v listu) ve vlnových délkách 700 – 1300 nm a obsahem vody v 1300 – 3000 nm (Croft a Chen 2017).

2.2 Terénní spektroskopie

Terénní spektra jsou nejčastěji měřena v nadiru nad porostem obvykle ve výšce jednoho metru optickým kabelem spektrometru s FOV 25°, tedy měřenou plochou je obvykle kruh o průměru 44 cm (Zhao a kol. 2021; Darvishzadeh a kol. 2008).

Spektrální křivka vegetace na úrovni porostu se skládá především z optických vlastností listů, nicméně dále je ovlivněna kromě vnějších podmínek měření (atmosférické vlivy) také strukturními parametry rostlin jako je zapojenost porostu (hustota stébel), orientace listů, druhové zastoupení, vliv substrátu a podrostu apod. (Albrechtová a kol. 2017). V případě stromů je křivka odrazivosti porostu ovlivněna ještě optickými vlastnostmi kůry (Lukeš a kol. 2020). U travin krkonošské tundry je podrostem především suchá biomasa. Tyto faktory komplikují a znesnadňují odhad obsahu chlorofylu z terénních spekter, neboť maskují změny odrazivosti způsobené množstvím chlorofylu (Gitelson 2005).

2.3 Obrazová spektroskopie

Letecká hyperspektrální data umožňují studium zemského povrchu na základě jeho spektrálních charakteristik, neboť spektrální křivky jsou obsaženy v pixelech nasnímaného obrazu. Hyperspektrální snímky (HSI – hyperspectral image) lze charakterizovat jejich spektrálním a prostorovým rozlišením. Nejčastějším nosičem hyperspektrálního senzoru (např. AISA, APEX, CASI/SASI) jsou letadla. Dostupná jsou také satelitní hyperspektrální data, ta se však obvykle potýkají se špatným prostorovým rozlišením (senzory např. vyřazený Hyperion, plánovaný EnMAP).

V posledních letech se na trhu objevují hyperspektrální systémy, které mohou být použity na malých bezpilotních letounech (UAS; Zemek 2014). Mezi tyto systémy patří kamera Headwall Nano-Hyperspec® nesená dronem DJI Matrice 600 Pro. Tato hyperspektrální kamera pořizuje snímky v intervalu 400 – 1000 nm, v celkem 269 pásmech s pravidelným rozstupem 2,24 nm mezi pásmy. Jedná se o řádkovou kameru s šířkou záběru 640 pixelů

a ohniskem 17 mm. Více informací o pořízení a předzpracování dat nasnímaných kamerou Headwall Nano-Hyperspec je popsáno v článku Červené a kol. (2020b).

UAS ve srovnání se satelity umožňují rychlé a opakovatelné získávání snímků s vysokým radiometrickým rozlišením a prostorovým rozlišením v řádu centimetrů. Rychlý vývoj těchto systémů nabízí prostorový a časově kontinuální způsob mapování fyziologických vlastností rostlin a zachycuje tak mezidruhové a vnitrodruhové rozdíly vlastností vegetace a jejich vazby na taxonomickou rozmanitost, funkční rozmanitost a funkci ekosystému (Zhao a kol. 2021).

2.4 Chlorofyl v DPZ

Celkový obsah pigmentu či poměr chlorofylu $a : b$ ve vegetaci může změnit celá řada faktorů včetně růstové fáze, intenzity ozařování a různých stresových podmínek prostředí (Ustin a kol. 2009). Díky tomu, že změny chlorofylu v listu způsobují velké rozdíly ve spektrech odrazivosti a propustnosti (Albrechtová a kol. 2017), může být kvantifikace obsahu chlorofylu ze spektrálních dat brána jako indikátor zdravotního stavu vegetace, vitality či fyziologického stavu.

Pro analýzy obsahu chlorofylu z hyperspektrálních dat jsou nezbytné naměřené referenční hodnoty chlorofylu. Reprezentativní a současně dostatečný gradient hodnot je možné zajistit opakovaným měřením v různých růstových fázích vegetace (Mišurec a kol. 2019).

2.4.1 Referenční hodnota chlorofylu na úrovni listu

Určení obsahu chlorofylu v listoví (LCC – Leaf Chlorophyll Content) pomocí laboratorní extrakce s následnou spektrofotometrickou analýzou je považováno za nejpřesnější metodu pro stanovení obsahu pigmentu, která však vyžaduje vysoký stupeň přesnosti a preciznosti měření (Croft, Chen 2017). Zároveň je tento způsob destruktivní, pracný, časově náročný a závislý na možnostech laboratoře (Bhadra a kol. 2020). Tyto metody nemusejí být účinné pro vzorky malých velikostí a nejsou vhodné pro odběry velkého množství vzorků (Liu a kol. 2019).

Alternativní nedestruktivní metodou pro určování obsahu pigmentu jsou malé lehké příruční chlorofylmetry, které umožňují stanovit relativní či absolutní obsah chlorofylu v listu přímo v terénu během několika vteřin. Princip měření je založen na optických

vlastnostech listů, a to na propustnosti (např. atLEAF, Dualex 4, SPAD 502) nebo fluorescenci chlorofylu (CCM-300; Pinlová 2019).

Výhodou přístroje CCM-300 je přímý výpočet obsahu chlorofylu v jednotkách mg/m^2 , který dokáže stanovit v rozsahu 41 – 675 mg/m^2 s chybou menší než 40 mg/m^2 (Gitelson 1999). Další předností tohoto chlorofylmetru založeného na principu fluorescence je, že nemusí být při měření zakryté celé FOV přístroje, jako tomu je u chlorofylmetrů založených na propustnosti, a tudíž je vhodný i pro měření vzorků malých velikostí jako jsou trávy (Opti-Sciences Inc. 2011).

V bakalářské práci Pinlová (2019) byla ověřena závislost měření pomocí CCM-300 a laboratorně stanoveného obsahu chlorofylu pro bezkoleneček modrý v raných fázích jeho růstu s koeficientem determinace 0,94 a RMSE 45,9 mg/m^2 při použití výchozí rovnice převodu změřeného poměru fluorescence (CFR) na obsah chlorofylu ($\text{Chl} = 634 * \text{CFR} - 391$). Obsah chlorofylu stanovený chlorofylmetrem byl oproti laboratorním hodnotám systematicky podhodnocován. Po úpravě výchozí rovnice ($\text{Chl} = 658 * \text{CFR} - 375$) bylo dosaženo RMSE 22,4 mg/m^2 .

Obsah vs. koncentrace chlorofylu

Ve studiích DPZ je LCC kvantifikován dvěma metrikami, a to buď jako *obsah*, nebo jako *koncentrace chlorofylu*. Obsah chlorofylu je stanoven absolutní hodnotou v jednotkách hmotnosti pigmentu vztažené na jednotku plochy např. $\mu\text{g/cm}^2$ nebo mg/m^2 , popř. $\mu\text{mol/m}^2$. Oproti tomu koncentrace chlorofylu je relativní hodnotou a je výsledkem podílu hmotnosti pigmentu a suché hmotnosti celého vzorku s jednotkami mg/g , anebo se uvádí v procentech po vynásobení stem (Kattenborn a kol. 2019).

Obě tyto metriky se zásadně liší, avšak v řadě publikací je tento fakt opomíjen. Příkladem může být studie Liu a kol. (2019), kde jsou porovnávány hodnoty obsahu chlorofylu lišejníků měřeného pomocí CCM-300 [mg/m^2] s laboratorní metodou, kde byla zjištěna koncentrace chlorofylu v jednotkách μg pigmentu/ mg sušiny. V literatuře jsou také pojmy obsah a koncentrace chlorofylu velmi často zaměňovány (např. Ustin a kol. 2009; Potůčková a kol. 2016a). Podle Kattenborna a kol. (2019) by v DPZ mělo být upřednostňováno stanovení LCC na plochu s jednotkami $\mu\text{g/cm}^2$, neboť koncentrace listového chlorofylu je nejednoznačná pro hodnocení množství pigmentu, protože primárně

odráží variabilitu hmotnosti listu na plochu, a nikoliv samotného pigmentu. Tenký list s vysokou koncentrací může mít stejný obsah chlorofylu jako silnější list s nízkou koncentrací.

Vzájemný vztah mezi obsahem a koncentrací chlorofylu lze vyjádřit rovnicí:

$$\text{Chl}_{\text{koncentrace}} = \text{Chl}_{\text{obsah}} / \text{LMA},$$

kde LMA [g/cm^2] představuje suchou hmotnost listu na plochu (Leaf Dry Mass per Area; Kattenborn a kol. 2019).

2.4.2 Referenční hodnota chlorofylu na úrovni porostu

Při upscalingu hodnoty LCC na úroveň porostu (CCC – Canopy Chlorophyll Content) je potřeba zohlednit strukturu porostu pomocí indexu listové plochy (LAI – Leaf Area Index). Tento index představuje celkovou plochu horních stran listů na horizontální jednotku plochy porostu jako bezrozměrnou veličinu, popř. s jednotkami m^2/m^2 . LAI může být kvantitativním ukazatelem celkové listové plochy, která může absorbovat záření potřebné pro procesy fotosyntézy (Dobrovolný 1998). Hodnotu CCC lze stanovit součinem LCC a LAI:

$$\text{CCC} = \text{LCC} * \text{LAI}$$

Měření LCC a LAI nejsou však vždy jednoduchým úkolem, neboť jsou velmi náchylná k nejistotám (Perry 2014).

Vylepšením oproti LAI je tzv. GreenLAI, který reprezentuje poměr pouze plochy zelených listů na plochu půdy a který se jeví pro stanovení CCC jako vhodnější ($\text{CCC} = \text{LCC} * \text{GreenLAI}$). Reprezentativnost odhadu CCC stanoveného na základě GreenLAI byla v publikaci Gitelson (2005) ověřována výpočtem: součet součinů hodnot chlorofylu každého listu v porostu a jeho listové plochy dělené plochou celého porostu. Listová plocha byla měřena přístrojem LI-3100A (LI-COR). Porovnání odhadu CCC pomocí GreenLAI a výpočtu na základě skenované plochy každého listu vyústilo v tvrzení, že odhad pomocí GreenLAI je dostatečně přesný.

2.4.3 Parametr struktury porostu

Obdobně jako hodnoty obsahu chlorofylu lze i LAI měřit v terénu destruktivním i nedestruktivním přístupem. V případě bylin spočívá destruktivní přístup v odběru veškeré nadzemní biomasy o určité ploše. Biomasa je následně tříděná na biomasu a nekromasu. Pokud není k dispozici přístroj, který automaticky skenuje všechny listy biomasy (např. LI-3100C Area Meter od firmy LI-COR), využívá se skeneru a reprezentativního výběru listů z celkové biomasy. Několik listů z odebrané biomasy je vybráno a pomocí skeneru je zjištěna jejich plocha. Na základě hmotnosti sušené biomasy naskenovaného vzorku a celého odběru je následně hodnota převedena na celou plochu odběru. Tímto způsobem je získána hodnota GreenLAI. Obdobně lze stanovit z naskenované plochy průměrnou plochu jednoho listu a vynásobením celkového počtu listů v odběru získat GreenLAI. Ideálně by měl odběr biomasy v zájmovém území probíhat z plochy 1 m², což však není možné na území národních parků.

Měření nedestruktivním přístupem lze provést více přístupy v závislosti na velikosti nebo růstové fázi vegetace. Princip měření vychází stejně jako u chlorofylmetrů z optických vlastností listů. V případě raných fází zemědělských plodin, kde je podrostem pouze substrát, lze využít hemisférické fotky (Mišurec a kol. 2019). Další možností pro rychlé stanovení LAI jsou přístroje typu LAI-meter, např. od firmy LI-COR (LAI-2200 či novější verze LAI-2200C Plan Canopy Analyzer) nebo SunScan Canopy Analysis System od firmy Delta-T.

Měření indexu listové plochy přístrojem LAI-2200C spočívá v měření rozptýleného záření v pěti zenitových úhlech, při kterých je využita čočka s efektem rybího oka (FOV 148°).

Před samotným měřením rozptýleného záření pod porostem je provedeno měření záření nad porostem, které popisuje vlastnosti oblohy. Toto měření je následně použito jako referenční hodnota k následnému měření pod porostem, díky čemuž lze měřit přístrojem za libovolných světelných podmínek. Výsledná hodnota LAI je vypočtena implementovaným modelem přenosu záření. Dle brožury (LI-COR, Inc. 2014) je tento přístroj vhodný pro měření travních porostů a pro měření na malých plochách. Metodami měření LAI v terénu a konkrétně i přístrojem LAI-2200C se zabývala v diplomové práci Šudová (2019), jejíž cílem bylo navrhnout protokol pro sběr hodnot LAI pro obiloviny v terénu.

Úskalím těchto přístrojů je, že v hodnotě LAI jsou obsaženy i nefotosyntetické složky rostlin. V případě travin krkonošské tundry jsou do hodnoty LAI započteny i suché listy z předešlých vegetačních sezón, které neobsahují chlorofyl.

Dalším alternativním způsobem, který však zatím není v literatuře hojně zastoupen, ale mohl by mít potenciál pro vyhodnocení podílu biomasy, jsou digitální fotografie. Tento přístup by představoval cenově přívětivý způsob získání informací z terénu a zpracování fotek by bylo možné zautomatizovat s relativně malým úsilím. Zajímavou studií je (Liu, Pattey 2010), kde pomocí jednoduché transformace RGB pásem z digitální fotografie

$$\text{Greenness} = 2G - B - R$$

stanoví prahovou hodnotu pro oddělení biomasy a nekromasy na základě histogramu a distribuční funkce pro Greenness, na jejímž základě je stanovena hodnota, která vstupuje do výpočtu LAI. Další studií, která vyhodnocuje množství biomasy z digitálních fotografií je Vanamburg a kol. (2015). V této studii je použita neřízená a řízená klasifikace, avšak výsledky nad RGB fotografií jsou velmi slabé a autoři tento způsob hodnotí jako nedostatečný.

Stejně jako obsah chlorofylu lze metodami popsanými v kapitole 2.5 získat hodnoty LAI z dat DPZ s přijatelnou přesností (Atzberger 2015, Passoli 2015).

2.5 Metody pro stanovení obsahu chlorofylu z hyperspektrálních dat

Metody pro získávání biofyzikálních a biochemických proměnných, mezi které spadá obsah chlorofylu, ze spektrálních dat DPZ jsou obecně rozdělovány do dvou základních metodologických přístupů:

1. **empirické modely** – stanovující statistický vztah mezi obsahem chlorofylu, který je změřen přímo v terénu, a hodnotami odrazivosti z dat DPZ,
2. **fyzikální modely** – využívající modely přenosu záření (RTM – Radiative Transfer Models), které simulují přenos slunečního záření daným prostředím.

Oba přístupy se postupně vyvíjejí a rozšiřují do podkategorií a jejich kombinací. Tyto kombinace jsou označovány jako hybridní metody (Verrelst a kol. 2015). Současné možnosti pro modelování různých vlastností vegetace jsou téměř neomezené.

Fyzikální modely jsou založeny na algoritmech, které simulují přenos slunečního záření nějakým prostředím. V tomto případě se jedná o matrice, které nahrazují prostředí a strukturu jednotlivých listů i celého vegetačního porostu. Modely dávají do souvislosti biochemické a strukturní vlastnosti porostu a jeho dílčích částí (listy), s množstvím odraženého slunečního záření od daného porostu (Zemek 2014). RTM mají potenciál pro získání přesnější a stabilnější předpovědi obsahu pigmentu, neboť jsou založené na obecně platných fyzikálních zákonech, které nejsou místně ani časově specifické (Mišurec a kol. 2019), tudíž nevyžadují kalibraci při každém použití. K robustnosti modelů přenosu záření přispívá využití celého spektra vlnových délek. Výsledné predikce optických vlastností listů jsou však závislé na pochopení všech procesů ovlivňujících odrazivost a jejich zohlednění v daných modelech. Na rozdíl od empirických modelů vyžadují více vstupních parametrů a pokud jsou nesprávně modelovány či jsou špatná vstupní data, mohou empirické modely vycházet lépe (Ustin 2009).

Modely přenosu záření jsou vyvinuty na dvou prostorových úrovních, a to na úrovni listu a na úrovni porostu. Nejpoužívanějším modelem na úrovni listu je model PROSPECT, jehož výhodou je malé množství vstupních parametrů (Albrechtová a kol. 2017). Na úrovni porostu je nejběžněji používán model SAIL. Obsah chlorofylu je jedním z klíčových vstupních parametrů modelů přenosu záření, a tudíž může být kvantitativně získán z dat DPZ pomocí inverzí modelů přenosu záření (Zemek 2014).

Empirické modely jsou založené na přímé korelaci mezi spektrálními hodnotami a pozemním měřením obsahu chlorofylu. Nejjednoduššími postupy jsou parametrické regresní modely, jejichž princip spočívá v matematicky definovaných kombinacích spektrálních pásem s lineární či nelineární regresí na hodnoty obsahu chlorofylu. Kombinací spektrálních pásem mohou být vegetační indexy (VI), které byly původně vyvinuty pro první aplikace multispektrálních satelitních dat. Pro hyperspektrální data je možné vytvořit 2D korelační matice zahrnující korelace všech možných pásmových kombinací pro dvoupásmový index. Tento postup umožňuje dojít k optimální kombinaci pásem pro odhad chlorofylu, avšak výsledný index je silně specifický pro konkrétní případy. Dnes existuje nespočet publikovaných vegetačních indexů. Výčty chlorofylových indexů pro úroveň listu a porostu lze nalézt v publikacích Main a kol. (2011) či le Maire a kol. (2004) či v databázi indexů (<https://www.indexdatabase.de>). VI je možné vypočítat

také z transformovaných spektrálních křivek pomocí první či druhé derivace nebo integrálu.

Jinou možností, jak redukovat spektrální křivku do jedné hodnoty pro aplikaci v regresním modelu je využití tvaru spektrální křivky. Z tvaru spektrální křivky lze získat inflexní bod v oblasti Red-edge (REIP), který se typicky používá k odvození CCC. Další technikou je transformace pomocí odstranění kontinua, které umožňuje normalizaci hodnot odrazivosti vůči tzv. kontinuu, kterým je křivka spojující lokální maxima spektrální křivky. Tímto způsobem jsou odstraněny absolutní hodnoty odrazivosti, které mohou být ovlivněny různými vlivy, jež s obsahem chlorofylu přímo nesouvisí.

Kromě jednoduché lineární regrese, která modeluje vztah mezi vybraným VI, popř. jinou hodnotou odvozenou ze spektrální křivky a parametrem vegetace, je možné využít neparametrické regresní modely, které využívají informace z celého spektra (Verrelst a kol. 2015). Jedním z modelů je mnohonásobná kroková regrese (MSLR – Multiple Stepwise Linear), jejímž cílem je maximalizovat predikci s pokud možno co nejmenším počtem vlnových délek, které jsou statisticky relevantní pro určování daného parametru (Albrechtová a kol. 2017). Často používanou metodou je metoda PLSR (Partial Least Square Regression), která transformuje původní data na méně nekorelovaných komponent (tzv. latentní proměnné) a zároveň maximalizuje společnou variabilitu vzhledem ke sledované proměnné (Darvishzadeh a kol. 2008).

Dále je možné pro kvantitativní mapování parametru vegetace z dat DPZ využít postupy tzv. strojového učení, které byly dříve používané výhradně pro klasifikaci obrazu např. umělé neuronové sítě, Support Vector Machines, Kernel Ridge Regression (Zemek 2014; Verrelst a kol. 2015).

2.6 Případové studie

Analýza rostlinného pigmentu na úrovni laboratorní a obrazové spektroskopie prošla dlouhým vývojem a dnes je publikováno velké množství studií detekujících chlorofyl v různých typech vegetace za použití široké škály metod. Nedávné studie prokazují, že funkční vlastnosti rostlin, zejména fyziologické, je možné z obrazových hyperspektrálních dat úspěšně odvodit (Zhao 2020), avšak míra, do jaké lze odhadnout obsah listového

chlorofylu z naměřených hodnot odrazivosti porostu a následně v krajinném měřítku zůstává nejistá (Wong 2013).

Nejčastěji je obsah chlorofylu z dat DPZ vyhodnocován pro různé typy lesů (Croft a kol. 2014, Zemek 2014) či zemědělské plodiny (Gitelson 2005, Croft a kol. 2020, Mišurec a kol. 2019). Studií, které by se zabývaly travinami, je málo (Darvishzadeh a kol. 2008).

Nejstarší zde citovanou publikací, která se zabývá určením CCC, je studie Gitelsona (2005). V této studii jsou hledány optimální vlnové délky pro stanovení CCC ve dvou strukturou odlišných zemědělských plodinách – kukuřici a sóji. Spektra na úrovni listu byla pořízena spektrometrem Ocean Optics USB2000 a LCC byl pro omezený počet vzorků měřen laboratorně. Hodnoty LCC velmi silně korelovaly ($R^2 = 0,75$; $RMSE = 60,7 \text{ mg/m}^2$) s indexem $(R_{750-800} / R_{710-730}) - 1$, kde $R_{750-800}$ a $R_{710-730}$ reprezentují hodnoty odrazivosti listu v rozmezí vlnových délek NIR a red edge. Zbylé hodnoty LCC byly následně vypočteny z rovnice lineární regrese vytvořené na základě tohoto indexu a laboratorně naměřených dat obsahu chlorofylu. Spektra na úrovni porostu byla v rozsahu 400 – 900 nm měřena opět za použití Ocean Optics USB2000. CCC byl odhadnut jako součin LCC a GreenLAI v jednotkách g/m^2 . GreenLAI bylo stanoveno destruktivním způsobem. Pro určení optimálních vlnových délek pro odhad CCC byla v této studii využita mnohonásobná kroková lineární regrese a výsledkem byl model $(R_{\text{NIR}} / R_{\text{red edge}}) - 1$. K testování diskretních pásem využili dostupné rozsahy pásem senzorů MODIS (zelené: 545 – 565 nm; NIR: 840 – 870 nm) a MERIS (red edge: 703,75 – 713,75 nm; NIR: 750 – 757,5 nm) a vytvořili dva modely. Oba modely vykazovaly vysokou přesnost odhadu celkového chlorofylu v porostu ($R^2 > 0,92$), avšak separátně pro oba druhy plodin a tudíž kalibrační koeficienty jsou druhově specifické v obou modelech.

Dále se autoři snažili optimalizovat model, aby byl robustní pro obě strukturou odlišné plodiny. Nalezli model $(R_{840-870} / R_{720-730}) - 1$ odhadující celkový obsah chlorofylu v porostu v rozsahu hodnot 0,03 – 4,33 g/m^2 s $RMSE 0,32 \text{ g/m}^2$. Vzhledem k velmi odlišným architekturám porostu a strukturám listů kukuřice a sóji se autoři domnívají, že by tento model mohl mít potenciál i pro jiné plodiny.

Obsahem chlorofylu na úrovni porostu se zabývá Darvishzadeh (2008) z terénních spekter v heterogenních mediteránních trávách v Itálii. Ve studii jsou využívány VI a modely MSLR a PLSR. Jejich závěrem bylo, že složitější metody vycházejí lépe pro odhad obsahu

chlorofylu na úrovni porostu než jednodušší založené na VI. Naopak studie Kennedy a kol. (2020) zaměřená na arktickou vegetaci hodnotí jako více efektivní jednoduché empirické modely s vhodně vybranými vlnovými délkami pro modelování obsahu chlorofylu a LAI než složitější empirické či fyzikální modely.

Ve studii Zhao a kol. (2021) je cílem porovnávat vhodnost modelování vlastností rostlin (obsah chlorofylu, karotenoidů, ligninu, uhlíku, dusíku, vody, ...) vztažených na plochu [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] a na hmotnostní koncentraci [mg/g], popř. [%] pro kvantifikace vlastností vegetace v metodách DPZ. Výzkum byl proveden ve Vnitřním Mongolsku (Čína) pro dvacet heterogenních rostlinných druhů v osmdesáti travních monokulturách o velikostech $1,2 \times 1,2$ m. S využitím modelů PLSR došli k závěrům, že mapování vlastností listů pomocí DPZ by mělo být založeno spíše na ploše než vztažené na hmotnost, zejména u vlastností listů souvisejících s fotosyntézou a obsahem živin. Tento závěr je v souladu se studií Kattenborn a kol. (2019).

3 Data a metody

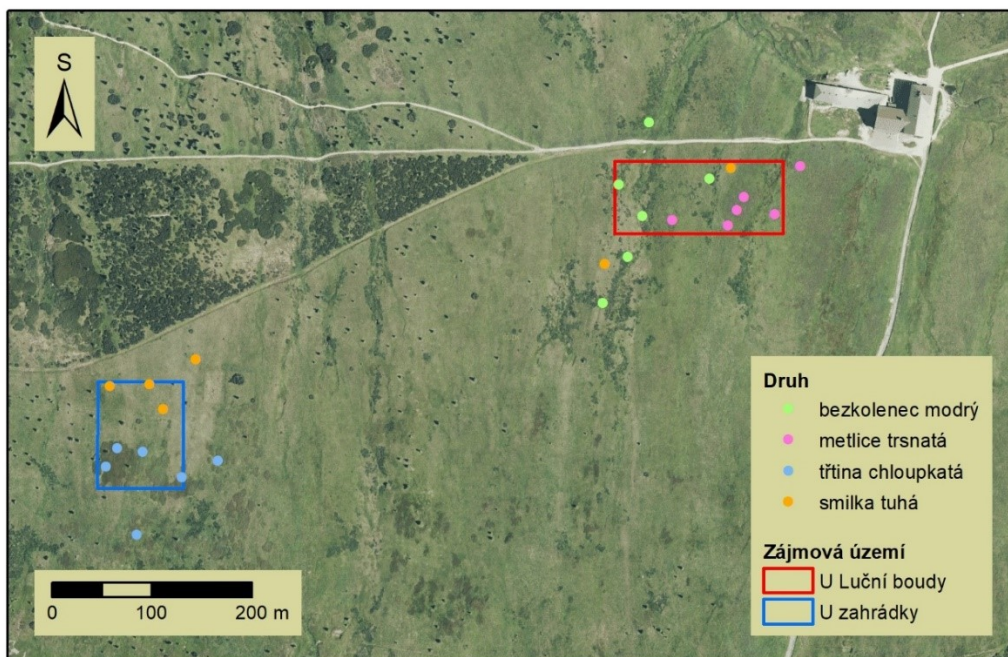
První část praktické části se věnuje popisu a porozumění fungování vztahů LCC, LAI a CCC a jejich korelací s VI vypočítaných z příslušných spekter, tj. spekter naměřených na úrovni listu kontaktní sondou a na úrovni porostu naměřených optickým kabelem či hyperspektrální kamerou na dronu. Dále práce zahrnuje aplikování vybraného modelu na HSI v podobě chlorofylové mapy.

3.1 Popis dat a jejich předzpracování

Sběr dat byl proveden v krkonošské tundře během vegetačního období roku 2020 ve třech termínech (v červnu, červenci a srpnu) v rámci kampaní pro projekt Inter-Action LTAUSA18154. Na začátku projektu bylo v terénu vytyčeno kolíkem a zaměřeno GNSS přístrojem šest homogenních ploch pro každý travní druh – bezkolenec modrý, metlice trsnatou, smilku tuhou a třtinu chloupkatou. Tyto plochy (dále označovány jako plochy 2 m) byly stejné pro všechny termíny odběrů, jejich rozmístění je zobrazeno na obr. 2. Na obr. 3 je znázorněno schéma designu měření na jedné ploše. V každém termínu byly do vzdálenosti jednoho metru od vytyčeného kolíku (bod C na obr. 3) provedeny dva odběry biochemických, biofyzikálních a spektrálních charakteristik vegetace v náhodně zvolených ploškách 10 × 10 cm (plošky A a B na obr. 3). Plošky byly taktéž změřeny GNSS přístrojem. Terénní sběr dat v každém termínu probíhal ve dvou dnech, během nichž byla i dronem nasnímána hyperspektrální data (HSI) dvou zájmových území. Přehled počtu odběrových míst je v tab. 1, přehled měřených dat je shrnut v tab. 2. Podrobný popis měření následuje v dalších podkapitolách.

| | počet ploch 2 m v HSI | | počet ploch 2 m mimo HSI | celkem plošek 10 cm | |
|------------|-----------------------|------------|--------------------------|---------------------|------------|
| | U L. boudy | U zahrádky | | v HSI | HSI + mimo |
| bezkolenec | 3 | - | 3 | 18 | 36 |
| metlice | 5 | - | 1 | 30 | 36 |
| smilka | 1 | 3 | 2 | 24 | 36 |
| třtina | - | 4 | 2 | 24 | 36 |
| celkem | 9 | 7 | 8 | 96 | 144 |

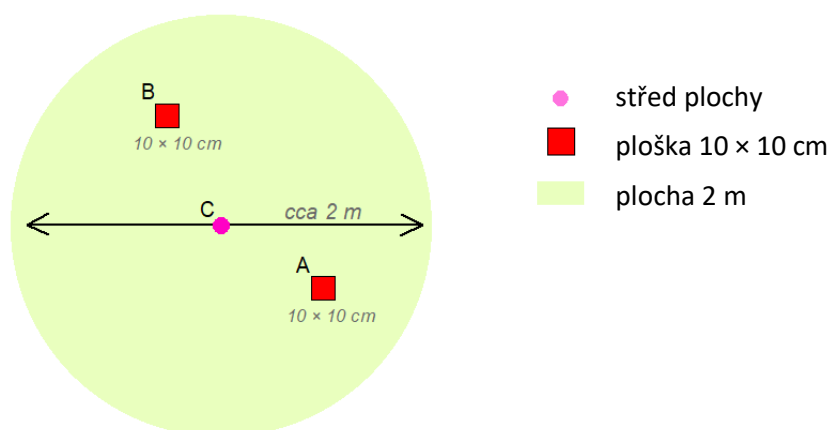
Tab. 1 Počet naměřených dat pro jednotlivé druhy. Hodnoty ve sloupcích celkem plošek 10 cm odpovídají počtu odběrů biologických dat během třech termínů. V posledním sloupci HSI + mimo jsou zahrnuta pozemní měření i mimo území snímaných UAS.



Obr. 2 Rozmístění odběrových míst a zájmových území snímaných hyperspektrální kamerou. Podkladová mapa WMS – Ortofoto, 2021 ČÚZK. Autor: vlastní zpracování

| | |
|-----------------|------------------------------------|
| CCM-300 | 2 listy v ploše 10 cm ¹ |
| lab. chl | 2 listy v ploše 10 cm ¹ |
| LAI | 5 × v ploše 2 m |
| GLAI | celá ploška 10 cm |
| lab. spektra | 5 × výběr listů z plošky 10 cm |
| terénní spektra | 3 × celá ploška 10 cm |
| letecká spektra | pixel od 3 cm |

Tab. 2 Přehled měřených dat.



Obr. 3 Schéma designu měření na jedné ploše. Měření popsána v tab. 2. Autor: vlastní zpracování

¹ Hodnoty chlorofylu byly měřeny oběma přístupy na stejných listech

3.1.1 Referenční hodnoty vlastností vegetace

3.1.1.1 LCC

Měření obsahu chlorofylu v listech byla provedena jak nedestruktivní, tak destruktivní laboratorní metodou. Na každém odběrovém místě v plošce 10 cm byly změřeny dva náhodné listy travin v jedné třetině své délky od apexu chlorofylmetrem CCM-300 a následně byly naměřené hodnoty LCC v plošce zprůměrovány. Pro přepočítání naměřených hodnot CFR na absolutní hodnoty chlorofylu byla využita výchozí rovnice přístroje. Z měřené části listu byl oříznut vzorek o přibližné délce dva a půl centimetru a stanovena plocha jeho jedné strany pomocí mobilní aplikace LeafByte, do které vstupovala fotografie vzorku. Stanovení plochy touto metodou nebylo možné pro smilku tuhou kvůli jejímu specifickému pevně svinutému listu, pro který nelze jednoznačně jednostrannou plochu vymezit pomocí fotografie, a proto stanovení její plochy bylo založeno na laboratorním řezu a délce vzorku.

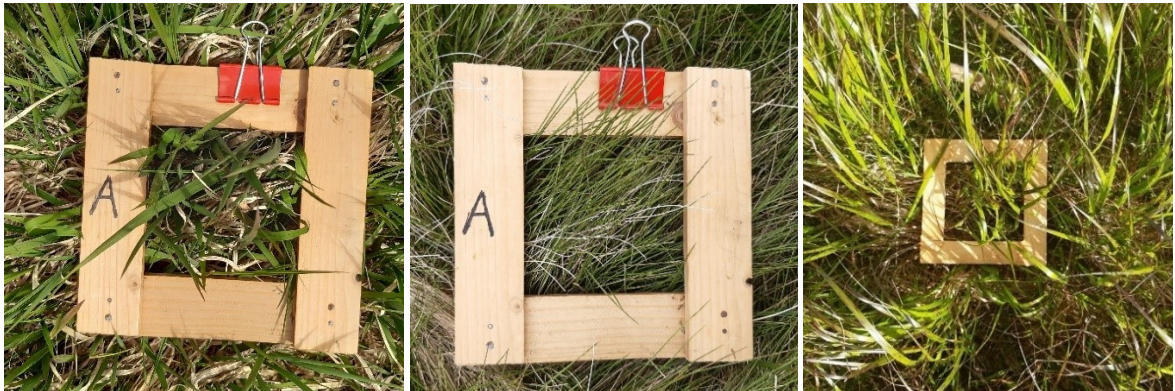
V terénu oříznutý vzorek o známé ploše byl uchován v chladničce a převezen do laboratoře pro následné laboratorní stanovení obsahu chlorofylu, které bylo provedeno extrakcí pigmentu v 5 ml dimethylamidu kyseliny mravenčí podle Porra a kol. (1989) a Wellburna (1994) a vztaženo na plochu s jednotkami mg/m^2 . Celkem bylo analyzováno chlorofylmetrem a laboratorní metodou 288 vzorků (24 ploch \times 2 plošky \times 3 termíny \times 2 listy).

3.1.1.2 LAI

Měření indexu listové plochy bylo taktéž provedeno jak destruktivní, tak nedestruktivní metodou. Přístrojem LAI-2200C Plant Canopy Analyzer bylo měřeno na pěti náhodných místech ve vzdálenosti do jednoho metru od vytyčeného kolíku reprezentujícího plochu. Každá hodnota LAI byla vypočtena přístrojem z referenčního měření záře nad porostem a měřením pod porostem. Měření probíhala při zatažené obloze, případně ve vlastním stínu měřitele. Z pěti měření byl vypočítán medián, který je v analýzách vztažen k oběma odpovídajícím ploškám.

Pro destruktivní stanovení LAI byla odebrána veškerá biomasa a nekromasa z plošky 10×10 cm, uložena do chladničky a odvezena do laboratoře. Následně byla ručně roztržena na zelenou biomasu a suchou nekromasu, usušena a zvážena. Z čerstvé ještě

neusušené biomasy bylo několik listů oskenováno a následně taktéž usušeno a zváženo pro výpočet GreenLAI. Poměr suché hmotnosti naskenovaných listů a jejich plochy zjištěné ze skeneru umožňuje dopočítat plochu listů v odebraném čtverečku 1 dm² o známé suché hmotnosti. Výsledná hodnota byla převedena na referenční plochu 1 m².



Obr. 4 Plošky 10 × 10 cm. Zleva bezkolenec modrý, smilka tuhá a třtina chloupkatá.
Autor: Lucie Červená

V praktické části (především v kap. 4.2.1) jsou měření pomocí přístroje LAI-2200C označovaná jako *LAI* a laboratorně stanovené GreenLAI jako *GLAI*.

3.1.1.3 Výpočet CCC

Z naměřené hodnoty chlorofylu v listu (LCC) je nutné získat reprezentativní hodnotu chlorofylu pro celý porost (CCC). Pro tuto úlohu jsou k dispozici hodnoty listového chlorofylu získané laboratorní analýzou a chlorofylmetrem CCM-300. Pro zohlednění struktury porostu při výpočtu CCC lze využít hodnoty LAI měřené LAI metrem LI-COR LAI-2200C Plant Canopy Analyzer nebo laboratorně stanovené GreenLAI na základě odebrané biomasy z terénu. Hodnota CCC je součinem LCC a LAI.

3.1.1.4 Doměření dat

V rámci srpnové kampaně bylo navíc naměřeno dalších 29 plošek nedestruktivními metodami. Pro každou plošku bylo chlorofylmetrem CCM-300 naměřeno deset náhodných listů v jedné třetině své délky od apexu a následně byl stanoven pro plošku medián obsahu chlorofylu. Dále byl na plošce pětkrát naměřen LAI přístrojem LAI-2200C a vypočten medián. Plošky byly taktéž zaměřeny geodetickou GNSS. Tato data budou využita pro validaci chlorofylové mapy v kap. 4.3.2.

3.1.2 Spektroskopická data

3.1.2.1 Sběr spektrálních dat

Spektroskopická data byla pořízena na třech úrovních:

1. spektrometrem s kontaktní sondou v laboratoři – úroveň listu
2. spektrometrem s pistolovým nástavcem v terénu – úroveň porostu
3. hyperspektrální kamerou pomocí UAS – úroveň porostu

Několik listů z odebrané biomasy z plošky bylo v laboratoři před usušením změřeno kontaktní sondou spektrometru ASD FieldSpec 4 Wide-Res v rozsahu vlnových délek 350 – 2500 nm s výsledným spektrálním rozlišením 1 nm.

Pro získání odrazivosti musí být nejprve změřena bílá reference pomocí Spectralonu (dále byla bílá reference opakovaně měřena po změření čtyř vzorků). Průměrování při měření spekter vzorků bylo nastaveno na 25. Každý vzorek z naskládaných listů na černé misce (obr. 5) byl měřen pětkrát na různých místech. Pro další analýzy v této práci bylo použito mediánové spektrum z těchto měření.



Obr. 5 Měření spekter kontaktní sondou. Autor: Lucie Červená

Spektra na úrovni porostu byla v terénu měřena stejným spektrometrem jako v laboratoři na úrovni listu, avšak s pistolovým nástavcem, který zaručí držení optického kabelu kolmo k povrchu. Optický kabel má FOV 25°. Každá ploška byla měřena ve výšce cca 55 cm nad porostem, tj. měřenou plochou byl kruh o průměru cca 22 cm. Změřena byla vždy tři spektra, z nichž bylo pro další analýzy opět využito mediánové spektrum. Bílá

reference byla měřena pomocí Spectralonu před měřením u každé plošky vzhledem k měnícím se podmínkám osvětlení.

Obrazová hyperpektrální data byla převzata již radiometricky korigovaná a ortorektifikovaná podle postupu popsaného v Červená a kol. (2020b). Data byla nasnímána hyperspektrální kamerou Headwall Nano-Hyperspec® na dronu DJI Matrice 600 Pro nad dvěma zájmovými územími označovanými jako *U Luční boudy* a *U zahrádky* o rozloze přibližně 12 000 m², respektive 9 000 m², tvořené ze šesti letových linií v případě území *U Luční boudy* a z deseti linií na území *U zahrádky*. Mozaik bylo celkem šest (dvě oblasti ve třech termínech). Snímky byly pořízeny v intervalu vlnových délek 400 – 1000 nm v celkem 269 pásmech s pravidelnými rozestupy 2,24 nm a prostorovým rozlišením 3 cm. Polohová přesnost mozaik byla hodnocena pomocí 7 kontrolních bodů, na každém zájmovém území vytyčených a označených CD (kompaktním diskem) s reflexní oranžovou barvou (obr. 6). Tyto body byly zaměřeny v terénu geodetickým GNSS přístrojem a poté byla určena poloha všech CD v každé z mozaik. Ze zjištěných dvojic souřadnic byla spočítána RMSE, která je pro všechna obrazová data uvedena v tab. 3. Závěry práce Červená a kol. (2020b) doporučují před dalším zpracováním snížení prostorového a radiometrického rozlišení, neboť data obsahují velké množství šumu.



Obr. 6 Kontrolní bod v terénu pro hodnocení polohové přesnosti mozaiky. Autor: Lucie Červená

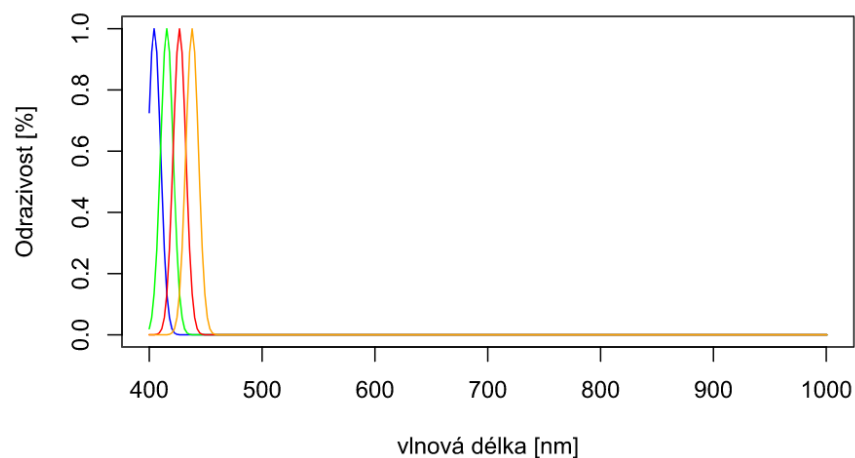
| termín snímání | RMSE [m] | |
|----------------|------------|---------------|
| | U zahrádky | U Luční boudy |
| 16.06.2020 | 0,098 | 0,034 |
| 13.07.2020 | 0,072 | 0,053 |
| 11.08.2020 | 0,093 | 0,108 |

Tab. 3 Prostorová přesnost mozaik

Z hotových mozaik bylo pro každou plošku extrahováno devět pixelů v okolí zaměřeného bodu pomocí GNSS reprezentující polohu plošky, z nichž bylo následně v prostředí R vypočteno průměrné spektrum. Tato spektra jsou v této práci označovaná jako *spektra z HSI*.

3.1.2.2 Předzpracování spektrálních dat

Veškerá spektra byla zpracovávána v software RStudio s využitím balíčku *hsdar*. Nejprve byly vytvořeny spektrální knihovny a dále byla spektra na úrovni porostu upravována tak, aby je bylo možné vzájemně porovnat. Tudiž byla odmaskována spektra kratší než 454 nm (výskyt NA hodnot v dronových datech v kratších vlnových délkách) a delší než 1000 nm. Protože letecká data jsou velmi zatížena šumem, došlo následně k převzorkování spekter z terénu a z dronu na 54 pásem v rozsahu vlnových délek 400 – 1000 nm se spektrálním rozlišením 11,2 nm dle doporučení Červená a kol. (2020b). Pro převzorkování byly využity Gaussovy křivky, kde střední hodnotou byla nová vlnová délka pásma a směrodatnou odchylkou polovina FWHM (spektrální pološířka; obr. 7).



Obr. 7 Gaussovy křivky pro převzorkování spekter. Zobrazeny gaussovy křivky pro převzorkování prvních čtyř pásem. Autor: vlastní zpracování

3.1.2.3 Výpočet vegetačních indexů

Z výše popsaných spektrálních knihoven byly vypočítány chlorofylové vegetační indexy dle tab. 4 obdobně jako v bakalářské práci Pinlová (2019).

| Index | Vzorec | Úroveň | Reference |
|---------------|---|--------|-----------------------------|
| Carter4 | $R710/R760$ | list | Caster (1994) |
| Datt | $(R850-R710)/(R850-R680)$ | list | Datt (1999) |
| Datt2 | $R850/R710$ | list | Datt (1999) |
| DD | $(R749-R720)-(R701-R672)$ | list | le Maire a kol. (2004) |
| Gitelson | $1/R700$ | list | Gitelson a kol. (1999) |
| Gitelson2 | $(R750-R800/R695-R740)-1$ | list | Gitelson a kol. (2003) |
| Maccioni | $(R780-R710)/(R780-R680)$ | list | Maccioni a kol. (2001) |
| MCARI2 | $((R750-R705)-0.2*(R750-R550))*(R750/R705)$ | porost | Wu a kol. (2008) |
| MCARI2/OSAVI2 | $MCARI2/OSAVI2$ | porost | Wu a kol. (2008) |
| MCARI/OSAVI | $MCARI/OSAVI$ | porost | Daughtry a kol. (2000) |
| MTCI | $(R754-R709)/(R709-R681)$ | porost | Dash, Curran (2004) |
| NDVI | $(R800-R680)/(R800+R680)$ | porost | Tucker (1979) |
| NDVI2 | $(R750-R705)/(R750+R705)$ | list | Gitelson, Merzlyak (1994) |
| OSAVI | $(1+0.16)*(R800-R670)/(R800+R670+0.16)$ | porost | Rondeaux a kol. (1996) |
| OSAVI2 | $(1+0.16)*(R750-R705)/(R750+R705+0.16)$ | porost | Wu a kol. (2008) |
| PSND | $(R800-R470)/(R800+R470)$ | list | Blackburn (1998) |
| PSSR | $R800/R635$ | list | Blackburn (1998) |
| REP_LI | $700+40*(((R670+R780)/2-R700)/(R740-R700))$ | list | Guyot, Baret (1988) |
| SR6 | $R750/R710$ | list | Zarco-Tejada, Miller (1999) |
| TCARI | $3*((R700-R670)-0.2*(R700-R550))*(R700/R670)$ | porost | Haboudane a kol. (2002) |
| TCARI/OSAVI | $TCARI/OSAVI$ | porost | Haboudane a kol. (2002) |
| Vogelmann | $R740/R720$ | list | Vogelman a kol. (1993) |
| Vogelmann2 | $(R734-R747)/(R715+R726)$ | list | Vogelman a kol. (1993) |

Tab. 4 Vybrané chlorofylové vegetační indexy pro stanovení obsahu chlorofylu s výpočtem, autorem a úrovní pro kterou byly stanoveny. $R\lambda$ značí odrazivost na příslušné vlnové délce λ . Autor: upraveno dle Main a kol. (2011), le Maire a kol. (2004), Zemek (2014) a Pinlová (2019)

Pro další analýzy bylo připraveno pět datasetů s vypočítanými vegetačními indexy ze spektrálních knihoven zahrnující:

- 1) spektra naměřená kontaktní sondou
- 2) původní spektra z terénu odmaskovaná na 454 – 1000 nm
- 3) převzorkovaná spektra z terénu
- 4) původní spektra z dronu odmaskovaná na 454 – 1000 nm
- 5) převzorkovaná spektra z dronu

3.2 Zpracování dat

3.2.1 Chlorofyl na úrovni listu

Za účelem zjištění, zda si odpovídají naměřené hodnoty LCC z obou přístupů měření (destruktivně v laboratoři a nedestruktivně pomocí CCM-300 v terénu), je nejprve potřeba porovnat hodnoty chlorofylu na úrovni listu s využitím lineární regrese hodnocené koeficientem determinace R^2 . Porovnání druhů z hlediska hodnot LCC je provedeno analýzou rozptylu (analysis of variance, ANOVA) a TukeyHSD testem, do kterých jsou použity jako vstupní data hodnoty LCC za celé sledované období. Dále jsou porovnány hodnoty LCC s vypočítanými VI ze spekter na úrovni listu opět pomocí lineární regrese a koeficientu determinace.

3.2.2 Chlorofyl na úrovni porostu

Pro upscaling hodnoty LCC na hodnoty CCC je potřeba využít hodnoty parametru struktury LAI ($CCC = LCC * LAI$). Stejný postup jako byl popsán pro porovnání hodnot LCC je použit pro porovnání destruktivně a nedestruktivně měřených hodnot LAI. Dále jsou vypočteny všechny kombinace CCC a vzájemně porovnány.

V další části jsou porovnána spektra na úrovni porostu naměřená v terénu s vyextrahovanými spektry z HSI pomocí párového t-testu. Taktéž jsou pomocí koeficientu determinace porovnány původní a převzorkovaná spektra z terénu, popř. extrahovaná původní s převzorkovanými spektry z HSI. Dále jsou vzájemně porovnány vegetační indexy odvozené z terénních spekter a vyextrahovaných spekter z HSI.

Tuto kapitolu uzavírá porovnání lineárních regresí pro CCC s VI. Tyto modely jsou stavěné na různých subdatasetech za účelem zjištění jejich predikčních schopností.

Motivace k jednotlivým subdatasetům:

- CCC – porovnání výpočtů:
 - průměrná hodnota chlorofyl z CCM-300 * průměrná hodnota LAI z LAI-2200C
 - průměrná hodnota chlorofyl z CCM-300 * GreenLAI z odběru biomasy
 - laboratorně stanovený chlorofyl * průměrná hodnota LAI z LAI-2200C
 - laboratorně stanovený chlorofyl * GreenLAI z odběru biomasy

Cílem je porovnat jednotlivé výpočty a zhodnotit, zda nedestruktivní přístupy jsou adekvátní náhradou destruktivních přístupů.

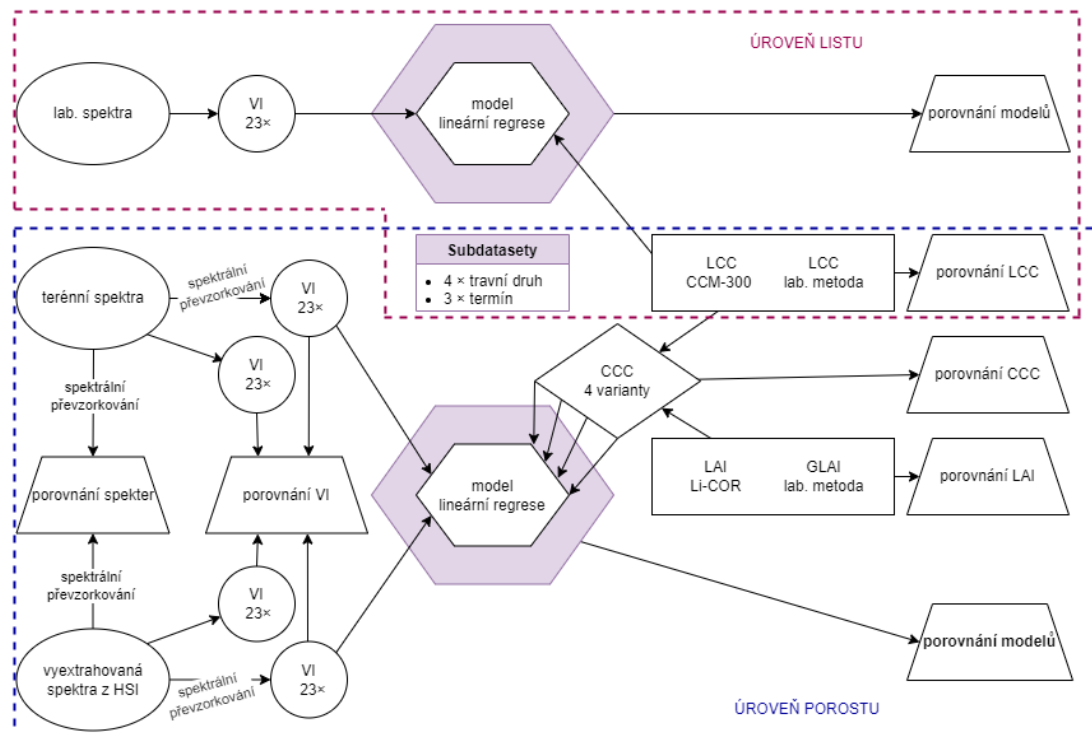
- Úroveň pořízených spekter
 - terénní spektra – úroveň porostu zachycená spektrometrem představuje větší prostor pro trénování modelů, neboť oproti UAS spektrům je k dispozici větší množství pozemních dat (tab. 1). Dále mají vyšší spektrální rozlišení a pro plošku jsou víckrát měřena.
 - extrahovaná spektra z HSI – cílem práce je vyhodnotit obsah chlorofylu z obrazových dat, zde slouží také k porovnání s výsledky z terénních spekter.
 - převzorkovaná spektra z terénu a z HSI, cílem je zjištění, zda převzorkovaná data jsou stejně reprezentativní jako původní data pro účely odhadu obsahu chlorofylu. Hyperspektrální data jsou velmi datově objemná a jejich převzorkování může usnadnit práci a zvýšit rychlost výpočtů. Též může pomoci lepším výsledkům odstraněním šumu a korelovaných informací.
 - laboratorní spektra² – úroveň listu by měla sloužit jako referenční, na jejímž základě lze zhodnotit maximální možnou kvalitu, kterou lze z dat vytěžit.
- VI – využití vytipované vegetační indexy pro odhad obsahu chlorofylu z tab. 4 na úrovni listu a porostu za účelem vyhodnocení použitého CCC.
- Travní druhy – snahou je získat robustní model pro všechny druhy trav, avšak množství chlorofylu se v jednotlivých druzích výrazně liší, a tudíž model pro všechny druhy dohromady bude pravděpodobně predikovat množství chlorofylu na základě variability chlorofylu mezi druhy, a ne na základě variability chlorofylu v rámci jednotlivých druhů. Z tohoto důvodu jsou lineární regrese počítány jak pro jednotlivé druhy, tak i pro všechny druhy dohromady.
- Termíny – měření ve třech termínech by mělo zajistit variabilitu a rozsah hodnot chlorofylu pro modely odhadu chlorofylu. Tento přístup by mohl také umožnit porovnání obsahu chlorofylu v čase.

Pro všechny kombinace CCC (4 způsoby výpočtu), VI (23 vybraných), druhů (jednotlivě čtyři + všechny dohromady), termínů (tři odběry + všechny dohromady) a úrovní

² Zpracovávána v první části práce, zde doplněna pouze pro úplnost dat

pořízených spekter (2× spektra na úrovni porostu + 2× převzorkování na menší počet pásem) byly vytvořeny lineární regresní modely za účelem porovnání jednotlivých kombinací a posouzení vhodnosti vstupních dat pro stanovení výsledného obsahu chlorofylu. Regrese byly hodnoceny koeficienty determinace.

Pro dosud popsané zpracování dat je využito programu Microsoft Office Excel 2016, software R a ArcGIS Pro 2.9.



Obr. 8 Schéma metodiky pro první a druhou část zpracování práce. Autor: vlastní zpracování

3.2.3 Chlorofylové mapy

Obrazová hyperspektrální data v podobě mozaik s prostorovým rozlišením 3 cm a spektrálním rozlišením 269 pásem jsou nejprve filtrována s okolím 3 × 3 pixelů pro výpočet průměru, který by měl co nejlépe odpovídat naměřeným pozemním datům v ploškách. Mozaiky jsou dále převzorkované na prostorové rozlišení 9 cm a spektrálně převzorkované na 54 pásem.

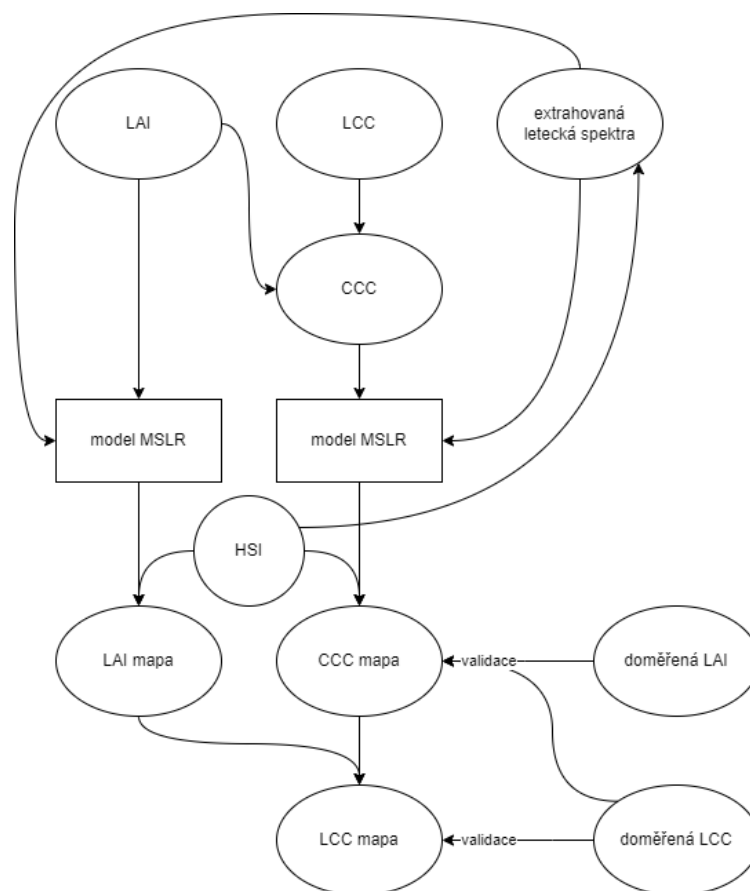
Protože lineární regrese pro CCC založená na vegetačních indexech nedává přesvědčivé výsledky (více v kap. 4.2.4), je pro chlorofylové mapy využita mnohonásobná kroková lineární regrese (Multiple Stepwise Linear Regression, MSLR).

V této práci jsou vytvořeny dva typy chlorofylové mapy:

- a) na HSI aplikovaný model MSLR odvozený z destruktivního sběru dat znázorňující odhad hodnot CCC v jednotlivých měsících
- b) modely MSLR odvozené z nedestruktivního sběru dat pro odhad CCC a LAI aplikované na srpnový HSI a následně je proveden výpočet mapy pro odhad LCC z obrazu CCC vyděleného obrazem LAI

Model MSLR pro chlorofylovou mapu typu *a* je hodnocen pomocí křížové validace. Chlorofylové mapy typu *b* jsou hodnoceny na základě validačních dat popsanych v kap. 3.1.1.4.

Chlorofylové mapy doplňuje klasifikace s travními druhy podle Ježka (202x). Použita je klasifikace maximální věrohodnosti z deseti pásem výsledku transformace Minimum Noise Fraction ze všech tří termínů na základě trénovacích množin nasbíraných v terénu botaniky. Celková přesnost hodnocena validačními body dosáhla u obou klasifikací cca 90 %. Pro odstranění izolovaných pixelů z výsledné klasifikace byl použit Majority filter.



Obr. 9 Schéma postupu pro chlorofylovou mapu odvozenou z nedestruktivního sběru dat.
Autor: Vlastní zpracování

Pro tvorbu chlorofylových map byly použity software R, Microsoft Office Excel 2016, ArcGIS Pro 2.9 a ENVI 5.3.

3.3 Zájmové území

Reliktní arктоalpínská tundra nacházející se nad horní hranicí lesa (cca 1350 m n. m.) patří k nejhodnotnějším ekosystémům Krkonošského národního parku (KRNAP), neboť je unikátním ekosystémem, kde dochází k průniku výskytu severské a vysokohorské fauny a flóry (Štursa, Wild, 2014). Vymezují se zde tři hlavní typy tundry – kryo-eolická neboli lišejníková tundra rozléhající se na nejvyšších vrcholech a hřebenech, kryo-vegetační označovaná jako travnatá tundra rozprostírající se na náhorních plošinách u Luční a Labské boudy a niveo-glacigenní nazývaná též jako květnatá tundra na závětrných svazích ledovcových karů (Soukupová a kol, 1995).

Bílá louka (obr. 10), na které byl proveden sběr dat pro tuto práci, se nachází pod Luční boudou mezi Luční a Studniční horou. Převládají zde zapojené alpínské trávníky s dominancí smilky tuhé, avšak rozšiřují se zde konkurenční trávy, jako je třtina chloupkatá (Hejcman a kol. 2009) či bezkolenec modrý (Hejcman a kol 2010).



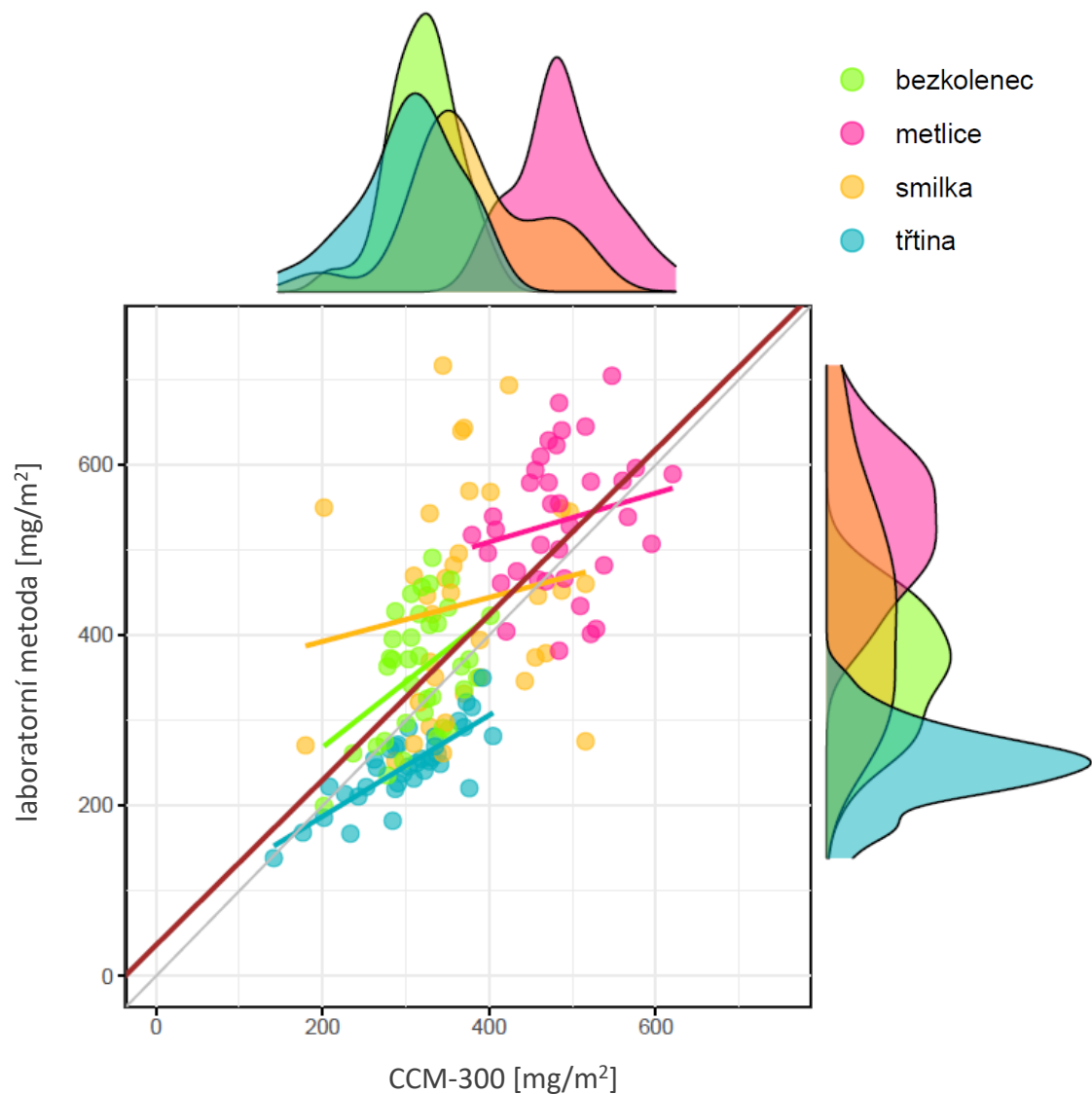
Obr. 10 Bílá louka. Autor: Lucie Kupková

4 Výsledky práce a diskuze

4.1 Chlorofyl na úrovni listu

4.1.1 Porovnání naměřených hodnot LCC

Hodnoty chlorofylu (LCC) naměřené destruktivním a nedestruktivním přístupem jsou bohužel zatížené významnými rozdíly. Přesto je možné na základě obou metod pozorovat odlišné hodnoty chlorofylu v jednotlivých travních druzích. Grafické znázornění je na obr. 11 a obr. 12, číselné hodnoty v tab. 5 a detailnější statistický popis je v příloze 1.



Obr. 11 Porovnání hodnot LCC stanovených laboratorní metodou a přístrojem CCM-300 za celé sledované období. Hnědá čára značí regresní křivku vytvořenou na základě hodnot ze všech druhů
Autor: vlastní zpracování

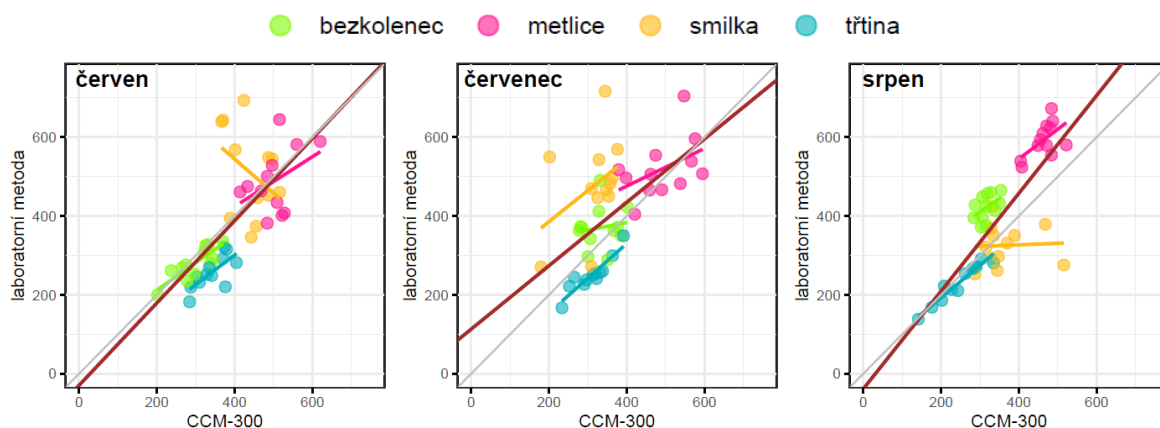
Odlišnost druhů z pohledu množství chlorofylu za celou sezónu byla prokázána analýzou rozptylu s p-hodnotou menší než 0,05 v obou přístupech měření. Tukeyho testem bylo

zjištěno, že pouze v jednom případě, a to mezi třtinou a bezkolencem z pohledu měření přístrojem CCM-300, nebyla odlišnost druhů prokázána ($p = 0,63$).

| | laboratorní metoda | | | | | | CCM-300 | | | | | |
|------------|--------------------|-------|--------|-------|-------------|---------------|--------------|-------|--------|-------|-------------|---------------|
| | počet plošek | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot | počet plošek | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot |
| bezkoleneč | 36 | 199.7 | 357.8 | 490.8 | 72.8 | 291.1 | 36 | 201.8 | 316.3 | 401.5 | 41.2 | 199.7 |
| metlice | 36 | 381.8 | 534.1 | 704.3 | 80.6 | 322.5 | 36 | 379.3 | 486.6 | 620.2 | 56.4 | 240.9 |
| smilka | 36 | 252.8 | 437.5 | 716.3 | 127.1 | 463.5 | 36 | 179.6 | 373.7 | 515.6 | 78.2 | 336.0 |
| třtina | 36 | 138.5 | 246.3 | 350.0 | 44.9 | 211.5 | 36 | 141.6 | 299.1 | 404.7 | 61.3 | 263.1 |

Tab. 5 Souhrnná statistická tabulka naměřených hodnot chlorofylu. Detailnější popisná statistika je součástí přílohy 1. Autor: vlastní zpracování

Korelace mezi hodnotami z laboratorního měření a přístrojem CCM-300 je hodnocena koeficientem determinace, který napříč všemi druhy a termíny nabývá hodnoty 0,46 (tab. 5). Protože byla prokázána odlišnost mezi druhy z pohledu množství chlorofylu, je nezbytné pohlížet na druhy také jednotlivě. U hodnot bezkolence modrého z pohledu laboratorních dat lze pozorovat nárůst množství chlorofylu v listech během sledovaného období. Naopak 90 % naměřených hodnot listů bezkolence získaných druhým přístupem pomocí CCM-300 se nachází v krátkém intervalu 260 – 380 mg/m² a rozdíly mezi měsíci jsou minimální. Za pozornost stojí červenové hodnoty, kdy koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,7. Tato měření lze porovnat s výsledky bakalářské práce, kde byly měřeny v laboratorním prostředí také listy bezkolence modrého v raném stádiu růstu přístrojem CCM-300 a laboratorní metodou a výsledky vykazovaly významný lineární vztah s koeficientem determinace 0,94 (Pinlová 2019). Metlice trsnatá má prokazatelně naměřené vyšší hodnoty chlorofylu než ostatní traviny, a to v obou přístupech měření, nicméně jejich vzájemná korelace je velmi nízká ($R^2 = 0,04$). Smilka tuhá je zde nejobtížněji měřitelnou travinou a její hodnoty jsou velmi variabilní. Naměřené srpnové hodnoty z listů smilky se zdají být na první pohled v grafu korelované, ale výsledky korelace jsou silně ovlivněné dvěma vlivnými pozorováními. Nejlepších výsledků dosahovaly hodnoty chlorofylu třtiny chloupkaté za celé sledované období ($R^2 = 0,66$), avšak na poměrně krátkém rozsahu hodnot chlorofylu, přibližně 200 mg/m².



Obr. 12 Porovnání hodnot LCC stanovených laboratorní metodou a přístrojem CCM-300 v jednotlivých termínech měření. Autor: vlastní zpracování

| | celé období | červen | červenec | srpen |
|-----------------|-------------|--------|----------|-------|
| druhy dohromady | 0.46 | 0.51 | 0.34 | 0.65 |
| bezkolenec | 0.19 | 0.70 | 0.02 | 0.22 |
| metlice | 0.04 | 0.18 | 0.21 | 0.33 |
| smilka | 0.03 | 0.15 | 0.17 | 0.00 |
| třtina | 0.66 | 0.52 | 0.83 | 0.93 |

Tab. 6 Porovnání naměřených hodnot LCC stanovených laboratorní metodou a přístrojem CCM-300 pomocí koeficientu determinace.

Výsledky především srpnového měření oběma přístupy naznačují, že měření na jednotlivých ploškách v rámci druhu si jsou v daném termínu podobná a hodnoty chlorofylu v listech se mezi ploškami příliš nemění. Z tohoto zjištění lze předpokládat, že na základě množství chlorofylu v listu bude možné odhadnout travní druh, nicméně řešení úlohy odhadující kvantitativní množství chlorofylu v listu v daném travním druhu bude velmi problematické z důvodu vysoké variability naměřených dat na malém rozsahu hodnot LCC.

Zajímavostí také je, že společná regresní křivka ($y = 0,97x + 36,3$), vytvořená na základě všech naměřených hodnot a vizualizovaná hnědou čarou na obr. 11, má velmi podobné parametry jako regresní křivka ($y = 1,04x + 31,2$) z bakalářské práce, která byla stanovena na základě naměřených hodnot LCC bezkolence modrého, třtiny chloupkaté a smilky tuhé. Stejně jako v bakalářské práci z měření vyplývá, že obsah chlorofylu stanoveného přístrojem CCM-300 je oproti laboratorním hodnotám podhodnocován.

Protože se hodnoty z obou přístupů měření chlorofylu významně liší, budou v dalších analýzách zohledněny oba přístupy.

4.1.2 Porovnání hodnot LCC s VI

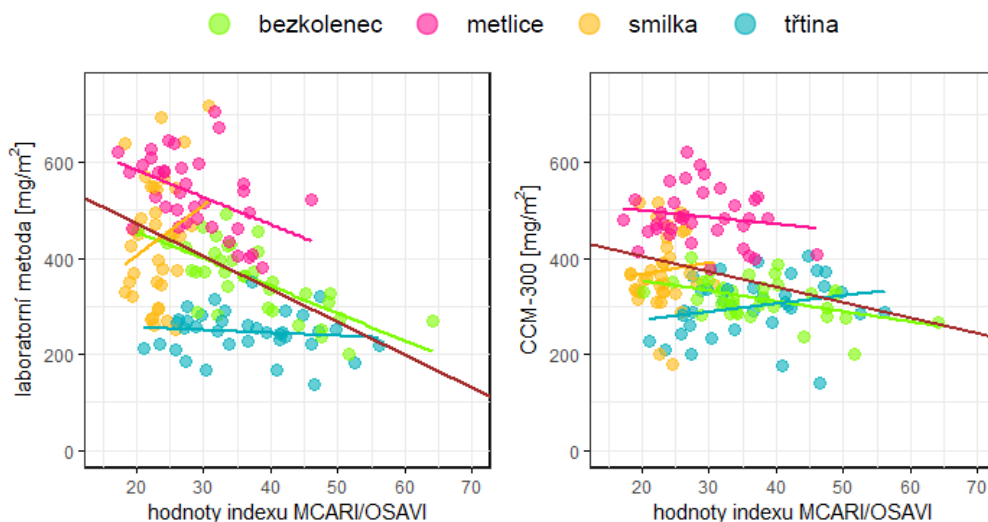
Velmi slabý vztah byl nalezen mezi vypočítanými VI ze spekter na úrovni listu s hodnotami LCC pořízenými jak destruktivní, tak nedestruktivní metodou, a to ve všech kombinacích vstupních dat (tab. 7). Tabulky pro jednotlivé měsíce jsou součástí přílohy 3, 4 a 5.

| úroveň | CP | | | | | | | | | |
|---------------|-----------|------|------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| spektra | původní | | | | | | | | | |
| termíny | všechny | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | bezkoleneč | | metlice | | smilka | | třtina | |
| chlorofyl | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab |
| Carter4 | 0.29 | 0.35 | 0.07 | 0.01 | 0.08 | 0.04 | 0.03 | 0.34 | 0.13 | 0.05 |
| Datt | 0.26 | 0.31 | 0.07 | 0.01 | 0.10 | 0.02 | 0.04 | 0.30 | 0.06 | 0.03 |
| Datt2 | 0.28 | 0.32 | 0.07 | 0.01 | 0.08 | 0.05 | 0.04 | 0.37 | 0.08 | 0.02 |
| DD | 0.26 | 0.33 | 0.07 | 0.01 | 0.08 | 0.05 | 0.03 | 0.35 | 0.12 | 0.04 |
| Gitelson | 0.23 | 0.26 | 0.16 | 0.33 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 |
| Gitelson2 | 0.11 | 0.08 | 0.01 | 0.26 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.06 | 0.03 |
| Maccioni | 0.27 | 0.34 | 0.08 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.03 | 0.30 | 0.08 | 0.05 |
| MCARI2 | 0.23 | 0.27 | 0.05 | 0.00 | 0.07 | 0.08 | 0.03 | 0.36 | 0.17 | 0.03 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.18 | 0.21 | 0.02 | 0.00 | 0.07 | 0.11 | 0.02 | 0.35 | 0.19 | 0.02 |
| MCARI/OSAVI | 0.10 | 0.22 | 0.22 | 0.48 | 0.03 | 0.21 | 0.01 | 0.06 | 0.06 | 0.01 |
| MTCI | 0.28 | 0.38 | 0.11 | 0.06 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 0.30 | 0.07 | 0.04 |
| NDVI | 0.20 | 0.15 | 0.00 | 0.11 | 0.04 | 0.18 | 0.02 | 0.32 | 0.26 | 0.02 |
| NDVI2 | 0.30 | 0.36 | 0.08 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.02 | 0.31 | 0.14 | 0.04 |
| OSAVI | 0.22 | 0.14 | 0.00 | 0.09 | 0.04 | 0.17 | 0.02 | 0.30 | 0.26 | 0.03 |
| OSAVI2 | 0.30 | 0.36 | 0.08 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.02 | 0.31 | 0.14 | 0.04 |
| PSND | 0.14 | 0.07 | 0.02 | 0.23 | 0.05 | 0.22 | 0.00 | 0.30 | 0.16 | 0.00 |
| PSSR | 0.28 | 0.20 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.01 | 0.28 | 0.15 | 0.02 |
| REP_Li | 0.26 | 0.31 | 0.08 | 0.00 | 0.10 | 0.03 | 0.04 | 0.29 | 0.11 | 0.05 |
| SR6 | 0.30 | 0.36 | 0.09 | 0.03 | 0.07 | 0.04 | 0.03 | 0.35 | 0.12 | 0.04 |
| TCARI | 0.08 | 0.11 | 0.10 | 0.34 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.06 | 0.07 | 0.00 |
| TCARI/OSAVI | 0.13 | 0.14 | 0.09 | 0.25 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 |
| Vogelmann | 0.28 | 0.36 | 0.07 | 0.01 | 0.07 | 0.04 | 0.03 | 0.38 | 0.10 | 0.03 |
| Vogelmann2 | 0.25 | 0.31 | 0.05 | 0.00 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.36 | 0.09 | 0.02 |

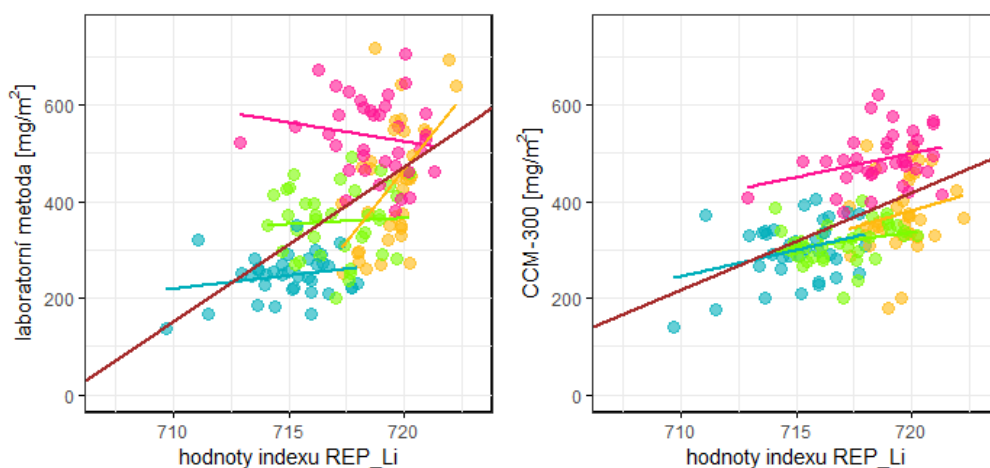
Tab. 7 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu za celé sledované období.

Dle přílohy 3 se zdá, že nejlepších výsledků bylo dosaženo na červenových datech při zohlednění všech druhů ($R^2 = 0,66$ pro Gitelson a laboratorně stanovený obsah chlorofylu), nicméně jednotlivé druhy v podstatě žádné korelace nevykazují.

Na obr. 13 a obr. 14 jsou zobrazeny korelace vybraných vegetačních indexů s obsahem chlorofylu.



Obr. 13 Regresní modely indexu MCARI/OSAVI ze spekter na úrovni listu. Vlevo laboratorní hodnoty obsahu chlorofylu, vpravo měření přístrojem CCM-300. Hnědá čára značí regresní křivku vytvořenou na základě hodnot ze všech druhů Autor: vlastní zpracování



Obr. 14 Regresní modely indexu REP_Li ze spekter na úrovni listu. Vlevo laboratorní hodnoty obsahu chlorofylu, vpravo měření přístrojem CCM-300. Hnědá čára značí regresní křivku vytvořenou na základě hodnot ze všech druhů Autor: vlastní zpracování

Určování obsahu chlorofylu ze spektrálních dat na úrovni listu by mělo být spolehlivější. Špatné výsledky této regrese mohou být zapříčiněny z několika důvodů. Nemalý vliv může mít měření a průměrování hodnot chlorofylu pouze dvou ze „stovky“ listů v plošce 10×10 cm. Tyto dva listy navíc nevstupovaly do měření kontaktní sondou, neboť byly zničeny při extrakci chlorofylu pro laboratorní odhad obsahu chlorofylu. Pravděpodobně se v projektu, v rámci kterého se data sbírala, předpokládalo, že listy v ploškách budou homogenní. Vliv také může mít samotný postup měření kontaktní sondou, kdy nebyly měřeny listy pouze v místech, kde se měřil obsah chlorofylu, tedy v jedné třetině délky od apexu, ale na různých místech (obr. 15). V bakalářské práci bylo prokázáno, že obsah chlorofylu se v délce listů bezkolence modrého, smilky tuhé a třtiny chloupkaté mění. Z praktických důvodů nešlo měřit listy kontaktní sondou pouze v oblasti měření

chlorofylu, protože jednak nebyly uchovány vcelku celé délky listů a jednak by to bylo velmi náročné na zpracování. V této práci se také měřilo více listů najednou (kvůli pokrytí FOV kontaktní sondy) a u listů při měření také nebyla zohledňována lícová a rubová strana či orientace listu. Vlastní roli mohla hrát také specifická struktura listů jednotlivých druhů.

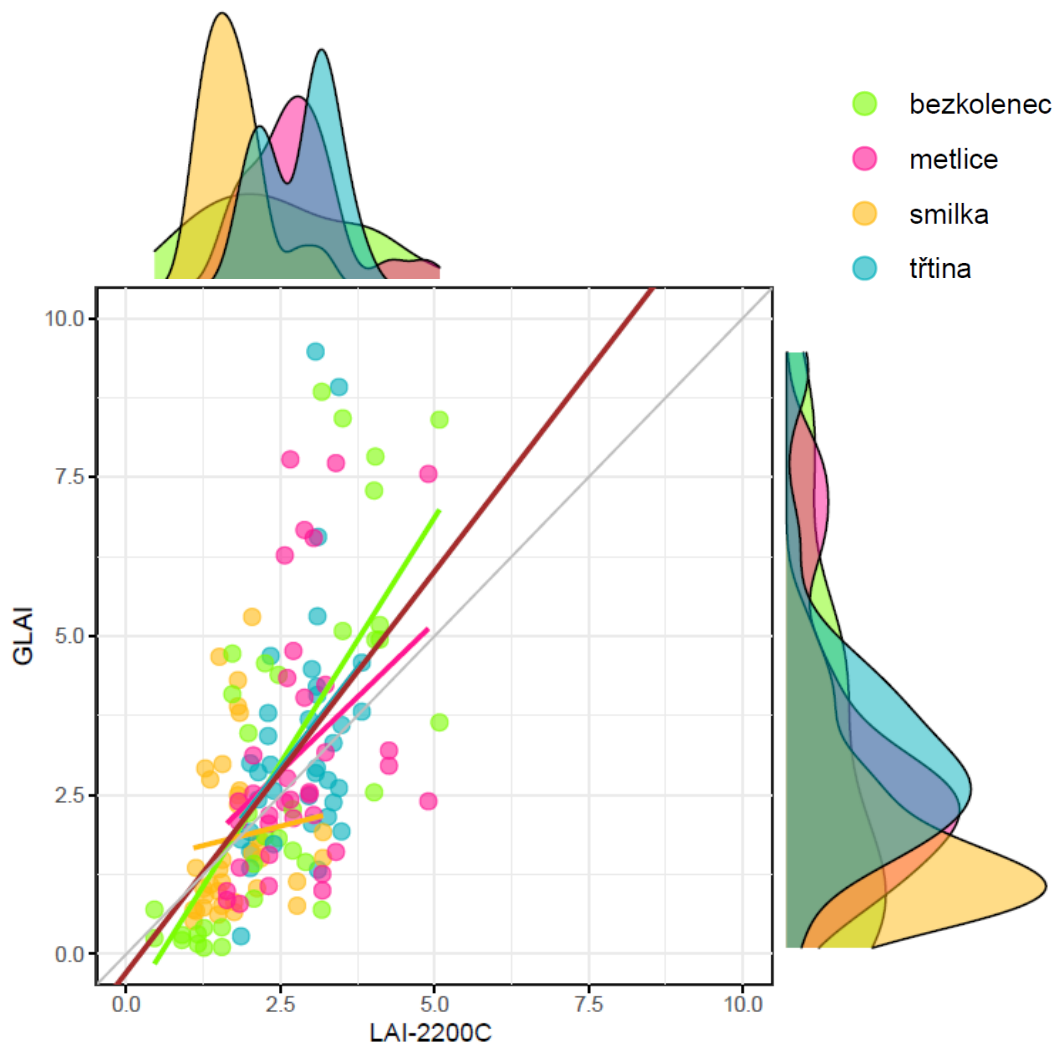


Obr. 15 Příprava pro měření listů kontaktní sondou v pořadí: bezkolenec modrý, metlice trsnatá, smilka tuhá a třtina chloupkatá. Autor: Lucie Červená

4.2 Chlorofyl na úrovni porostu

4.2.1 Porovnání parametrů struktury

Pomocí ANOVA a Tukeyho testu bylo zjišťováno, zda se druhy liší na základě jejich hodnot LAI. Signifikantně byla prokázána odlišnost hodnot smilky od ostatních druhů, a to jak v hodnotách *GLAI*, tak v hodnotách měřených přístrojem LAI-2200C při využití dat ze všech termínů. Odlišnost mezi ostatními druhy na 95% hranici významnosti (tj. $p < 0,05$) nebyla prokázána. Lze pozorovat v tab. 8, že průměrná hodnota pro smilku je o jednotku menší, než je tomu u ostatních druhů v obou přístupech. Tento jev je pravděpodobně způsoben úzkým tvarem listu smilky tuhé na rozdíl od plochých a širokých listů ostatních druhů (obr. 15).

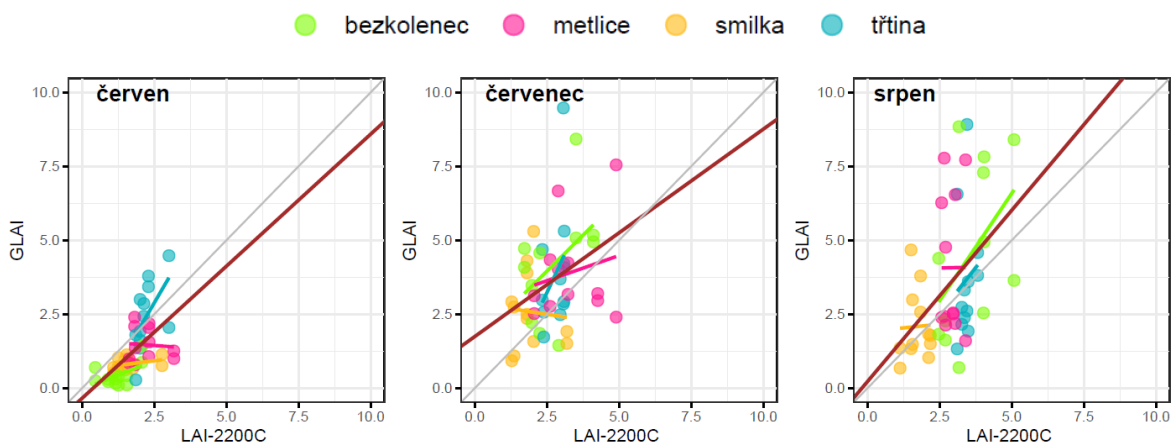


Obr. 16 Porovnání hodnot LAI stanovených laboratorní metodou a přístrojem LAI-2200C za celé sledované období. Hnědá čára značí regresní křivku vytvořenou na základě hodnot ze všech druhů. Autor: vlastní zpracování

Hodnoty LAI získané pomocí dvou odlišných přístupů měření se stejně jako hodnoty LCC významně liší. Koefficient determinace odvozený z lineární regrese nad všemi druhy a termíny dohromady nabývá hodnoty 0,32 (tab. 9).

| | GLAI | | | | | | LAI-2200C | | | | | |
|--------------|--------------|------|--------|------|-------------|---------------|-------------|------|--------|------|-------------|---------------|
| | počet plošek | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot | počet ploch | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot |
| bezkoleneček | 35 | 0.10 | 3.02 | 8.84 | 2.73 | 8.74 | 18 | 0.46 | 2.52 | 5.08 | 1.26 | 4.62 |
| metlice | 36 | 0.79 | 3.15 | 7.78 | 2.04 | 6.99 | 18 | 1.63 | 2.80 | 4.90 | 0.82 | 3.27 |
| smilka | 36 | 0.52 | 1.83 | 5.30 | 1.26 | 4.78 | 18 | 1.09 | 1.76 | 3.19 | 0.54 | 2.10 |
| třtina | 36 | 0.28 | 3.33 | 9.48 | 1.90 | 9.20 | 18 | 1.86 | 2.82 | 3.82 | 0.59 | 1.96 |

Tab. 8 Souhrnná statistická tabulka naměřených hodnot LAI. Detailnější popisná statistika je součástí přílohy 2.



Obr. 17 Porovnání hodnot LAI stanovených laboratorní metodou a přístrojem LAI-2200C v jednotlivých termínech měření. Autor: vlastní zpracování

Oba přístupy pro stanovení hodnoty LAI se také liší především rozsahem hodnot, neboť *GLAI* nabývá dvojnásobných hodnot než hodnoty z přístroje LAI-2200C (tab. 8). Z detailnější statistické tabulky v příloze 2 a obr. 17 lze pozorovat, že v červnu jsou naopak nižší hodnoty *GLAI* než hodnoty z nedestruktivního měření. Vyšší červené hodnoty měřené přístrojem LAI-2200C mohou být vysvětleny malým množstvím zelených listů a přítomností nekromasy z předchozí sezóny, které mohlo měření ovlivnit.

| | celé období | červen | červenec | srpen |
|-----------------|-------------|--------|----------|-------|
| druhy dohromady | 0.32 | 0.33 | 0.13 | 0.20 |
| bezkolenec | 0.52 | 0.27 | 0.21 | 0.22 |
| metlice | 0.14 | 0.00 | 0.04 | 0.00 |
| smilka | 0.01 | 0.12 | 0.01 | 0.00 |
| třtina | 0.15 | 0.32 | 0.13 | 0.02 |

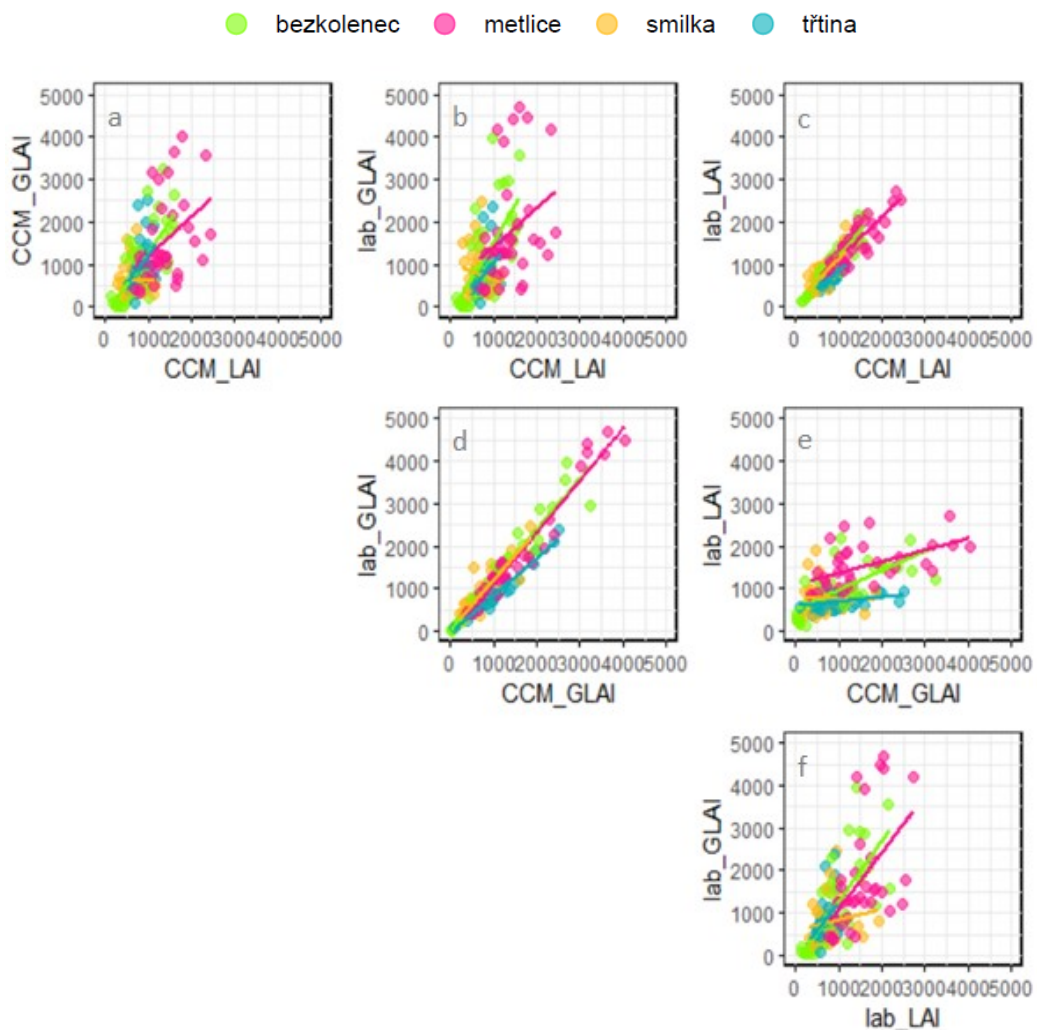
Tab. 9 Porovnání naměřených hodnot LAI stanovených laboratorní metodou a přístrojem LAI-2200C pomocí koeficientu determinace.

Odlíšnost hodnot mezi jednotlivými přístupy může být ovlivněna samotnou metodikou sběru dat, kdy jsou hodnoty *GLAI* stanovené pro plošku 10×10 cm srovnávané s měřením přístrojem LAI-2200C v ploše 2 m. Do hodnot *GLAI* vstupují celé délky listů z odebrané plošky 10×10 cm, avšak v některých případech tyto listy náležejí pro větší horizontální plochu než je 1 dm^2 (dlouhé zohýbané listy vlivem větru mění polohu apexu). Celý list tedy neleží nad půdorysem 10×10 cm, a tak tím může být hodnota *GLAI* nadhodnocena v porovnání s hodnotami *LAI* měřeného přístrojem v terénu. Tento jev nemusí platit pro listy smilky, neboť nepodléhají silnému ohybu listů. Naopak hodnoty pořizované nedestruktivní metodou jsou ovlivněné nekromasou a případně květenstvím.

Stejně jako hodnoty LCC se hodnoty z obou přístupů měření LAI významně liší, a tak budou v dalších analýzách zohledněny oba přístupy měření.

4.2.2 Obsah chlorofylu na úrovni porostu

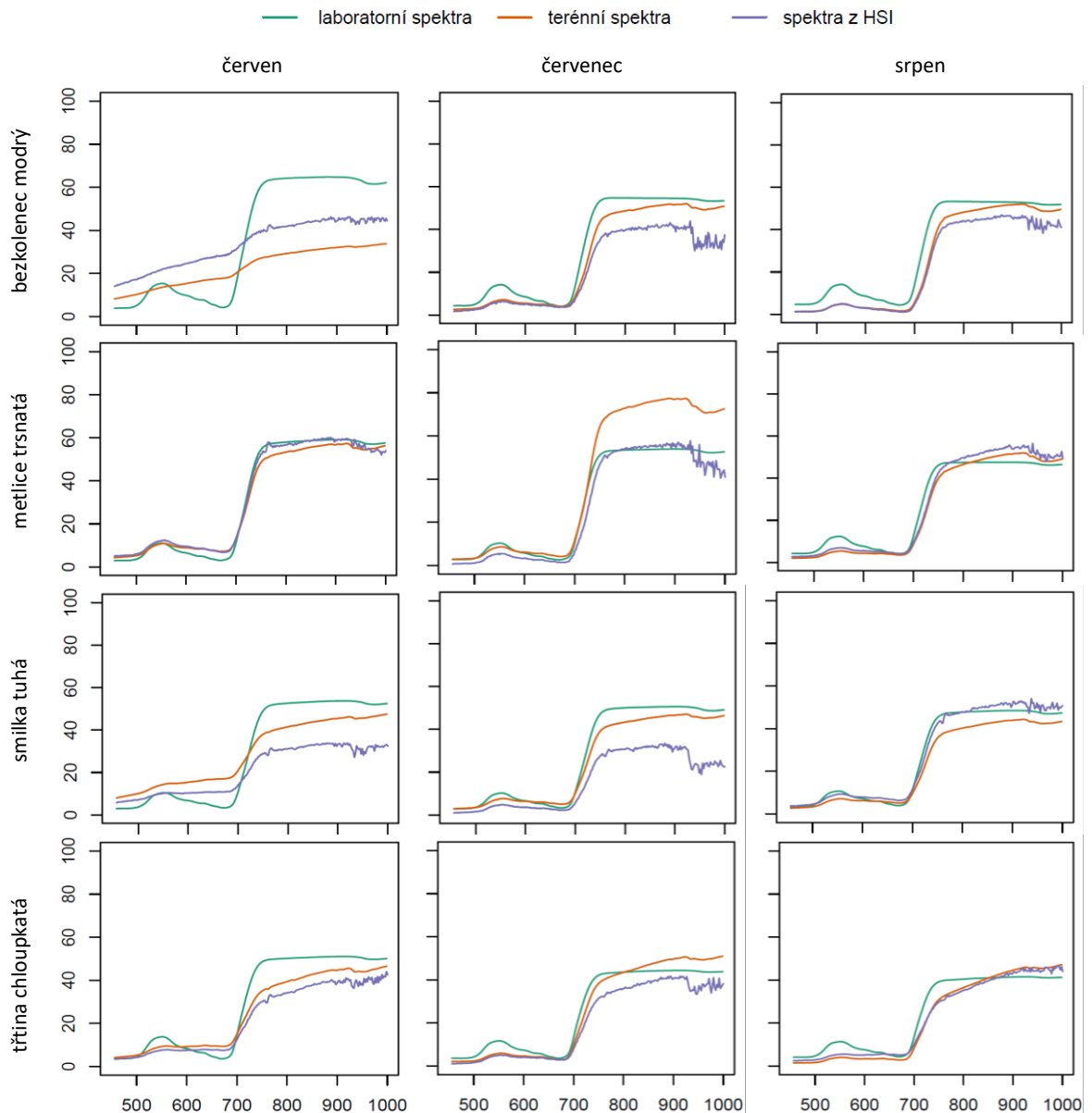
Na základě bodových grafů na obr. 18 lze vzájemně porovnávat všechny kombinace výpočtů CCC. Při porovnávání CCC s fixním LAI na obr. 18c a fixním GLAI na obr. 18d hodnoty více korelují než na jiných grafech a potlačují vliv rozdílných hodnot LCC. Naopak při fixním LCC (obr. 18a a obr. 18f) se vliv parametru struktury promítá do variability výsledné hodnoty CCC. Porovnání čistě destruktivně a nedestruktivně stanoveného CCC lze pozorovat na grafu na obr. 18b, který má podobný tvar jako graf na obr. 16. Dominantnější vliv LAI než LCC na CCC popisuje také Darvishzadeh a kol. (2008).



Obr. 18 Vzájemné porovnání vypočtených CCC. Zkratky na osách značí kombinace CCC, lab je obsah chlorofylu měřený laboratorně, CCM je měřený chlorofylmetrem CCM-300, GLAI je získaný laboratorně a LAI přístrojem LAI-2200C. Autor: vlastní zpracování

4.2.3 Spektra na úrovni porostu a jejich VI

Odlišnost travních druhů z pohledu spektrální odezvy byla řešena v dřívějších studiích. Například v článku Červená a kol. 2020a byly posuzovány druhy bezkolence modrého, třtiny chloupkaté a smilky tuhé na třech spektrálních úrovních (laboratorní, terénní a spekter z UAS) a na všech spektrálních úrovních byla nalezena spektrální odlišnost travních druhů.

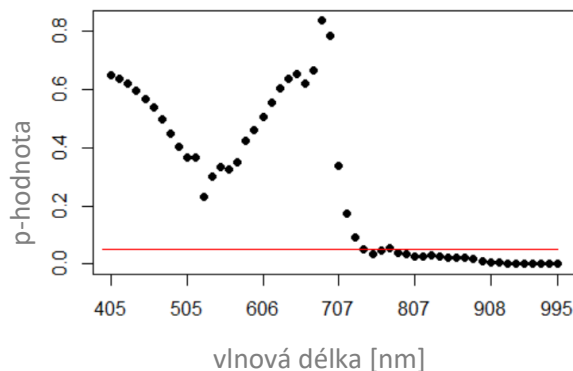


Obr. 19 Ukázka průměrných nepřevzorkovaných spektrálních křivek z laboratorních a terénních spekter a spekter z HSI za daný druh/měsíc. Na ose x je vlnová délka [nm], na ose y odrazivost [%].

Autor: vlastní zpracování

V této práci byla porovnána terénní spektra s vyextrahovanými spektry z HSI pomocí párového t-testu. Pro porovnání byly využity spektrální knihovny převzorkované na 54 pásem. Párový t-test na 95% hranici významnosti neprokázal odlišnost spekter pro

spektra s vlnovou délkou do 730 nm, avšak pro vyšší vlnové délky odlišnost prokázána byla s p-hodnotou menší než 0,05 (obr. 20). Tato odlišnost může být způsobená jinou strukturou porostu zachycenou v daných spektrálních datech, která má vliv na vyšší vlnové délky.



Obr. 20 P-hodnoty párového t-testu porovnávající spektra z terénu se spektry vyextrahovanými z dronu na příslušných vlnových délkách. Autor: vlastní zpracování

Hodnoty VI vypočítané z převzorkovaných spekter na 54 spektrálních pásech vedly k téměř identickým výsledkům jako VI vypočítané z původních nepřevzorkovaných dat, a to jak pro terénní spektra, tak pro extrahovaná spektra z dronu (tab. není prezentovaná, hodnoty R^2 obvykle 0,97 a vyšší). Z tohoto důvodu jsou dále používány VI pouze z převzorkovaných spekter.

Dále byly porovnány vegetačních indexy vypočtené z terénních spekter a vyextrahovaných spekter z HSI. Nejlepší výsledky koeficientu determinace byly kolem 0,8 (např. Carter4, NDVI, Vogelmann2). Tyto výsledky naznačují, že vybrané indexy odvozené z terénních spekter a z obrazových dat mohou být srovnatelné. Indexy mající ve vzorci pouze kratší vlnové délky než 730 nm (Gitelson, TCARI) se neukázaly jako lépe korelující než indexy obsahující i vyšší vlnovou délku.

| VI | R^2 | VI | R^2 | VI | R^2 |
|------------|-------|---------------|-------|-------------|-------|
| Carter4 | 0.82 | SR6 | 0.76 | REP_Li | 0.61 |
| OSAVI | 0.81 | Maccioni | 0.76 | Datt | 0.59 |
| NDVI | 0.81 | MTCI | 0.75 | TCARI | 0.41 |
| OSAVI2 | 0.81 | MCARI2 | 0.75 | MCARI/OSAVI | 0.34 |
| NDVI2 | 0.80 | Datt2 | 0.74 | Gitelson | 0.34 |
| Vogelmann2 | 0.79 | DD | 0.65 | Gitelson2 | 0.15 |
| PSND | 0.79 | MCARI2/OSAVI2 | 0.65 | TCARI/OSAVI | 0.09 |
| Vogelmann | 0.78 | PSSR | 0.64 | | |

Tab. 10 Porovnání VI odvozených z terénních spekter a vyextrahovaných spekter pomocí koeficientu determinace

4.2.4 Porovnání hodnot CCC s VI

Vegetační indexy odvozené z terénních spekter vs. vegetační indexy odvozené ze spekter HSI

Porovnání lineárních regresí pro vegetační indexy vypočítané ze spekter z HSI a spekter z terénu v souvislosti s různými kombinacemi výpočtů CCC napříč všemi termíny přináší podobné hodnoty koeficientů determinace nehledě na původ spekter, z nichž jsou VI vypočítané. Rozdíly koeficientů determinace mezi VI vypočítanými z terénních spekter (tab. 11) a VI ze spekter z HSI (tab. 12) se v průměru pohybují kolem $R^2 = 0,07$.

Mírně odlišně pro jednotlivé druhy (především bezkoleneček a třtiny) se chovají hlavně složitější VI vypočítané z většího množství spektrálních pásem (př. TCAVI/OSAVI, MCARI/OSAVI) a index Gitelson, který je naopak založen pouze na jenom spektrálním pásmu. Ostatní VI dosahují podobných výsledků.

| úroveň | terén | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------|------|------|--------------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| spektra | převzorkované na 54 pásem | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| termíny | všechny | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | | | bezkoleneček | | | | metlice | | | | smilka | | | | třtina | | | |
| chlorofyl | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | |
| parametr struktury | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI |
| Carter4 | 0.31 | 0.29 | 0.34 | 0.29 | 0.60 | 0.47 | 0.67 | 0.50 | 0.10 | 0.11 | 0.15 | 0.09 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.25 | 0.20 | 0.12 | 0.35 | 0.16 |
| Datt | 0.24 | 0.17 | 0.41 | 0.25 | 0.45 | 0.34 | 0.60 | 0.40 | 0.07 | 0.08 | 0.17 | 0.07 | 0.03 | 0.25 | 0.00 | 0.12 | 0.08 | 0.01 | 0.30 | 0.04 |
| Datt2 | 0.31 | 0.27 | 0.39 | 0.30 | 0.58 | 0.39 | 0.72 | 0.45 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.07 | 0.00 | 0.33 | 0.00 | 0.27 | 0.18 | 0.07 | 0.41 | 0.12 |
| DD | 0.44 | 0.30 | 0.45 | 0.31 | 0.61 | 0.49 | 0.69 | 0.54 | 0.16 | 0.07 | 0.06 | 0.02 | 0.00 | 0.24 | 0.01 | 0.20 | 0.16 | 0.15 | 0.21 | 0.17 |
| Gitelson | 0.08 | 0.11 | 0.13 | 0.13 | 0.44 | 0.26 | 0.55 | 0.30 | 0.00 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.00 | 0.26 | 0.00 | 0.22 | 0.11 | 0.02 | 0.23 | 0.03 |
| Gitelson2 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.33 | 0.15 | 0.43 | 0.18 | 0.09 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.01 | 0.16 | 0.06 | 0.02 | 0.17 | 0.04 |
| Maccioni | 0.26 | 0.20 | 0.42 | 0.27 | 0.52 | 0.40 | 0.64 | 0.45 | 0.07 | 0.07 | 0.14 | 0.05 | 0.01 | 0.33 | 0.00 | 0.21 | 0.11 | 0.04 | 0.28 | 0.08 |
| MCARI2 | 0.41 | 0.30 | 0.44 | 0.31 | 0.65 | 0.47 | 0.77 | 0.53 | 0.12 | 0.06 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.26 | 0.15 | 0.14 | 0.22 | 0.17 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.43 | 0.29 | 0.43 | 0.29 | 0.64 | 0.49 | 0.74 | 0.54 | 0.14 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.20 | 0.01 | 0.17 | 0.14 | 0.13 | 0.17 | 0.14 |
| MCARI/OSAVI | 0.24 | 0.19 | 0.12 | 0.11 | 0.62 | 0.49 | 0.59 | 0.48 | 0.12 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.01 | 0.06 | 0.10 | 0.08 | 0.10 | 0.08 |
| MTCI | 0.23 | 0.17 | 0.38 | 0.24 | 0.47 | 0.34 | 0.62 | 0.41 | 0.04 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 0.01 | 0.34 | 0.00 | 0.24 | 0.11 | 0.06 | 0.23 | 0.10 |
| NDVI | 0.28 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.63 | 0.49 | 0.68 | 0.51 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.11 | 0.00 | 0.29 | 0.00 | 0.25 | 0.20 | 0.12 | 0.34 | 0.16 |
| NDVI2 | 0.32 | 0.30 | 0.37 | 0.31 | 0.61 | 0.47 | 0.69 | 0.50 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.07 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.27 | 0.19 | 0.12 | 0.34 | 0.16 |
| OSAVI | 0.28 | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.63 | 0.49 | 0.68 | 0.51 | 0.11 | 0.14 | 0.16 | 0.11 | 0.00 | 0.29 | 0.00 | 0.25 | 0.20 | 0.12 | 0.34 | 0.15 |
| OSAVI2 | 0.32 | 0.30 | 0.37 | 0.31 | 0.61 | 0.47 | 0.69 | 0.50 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.07 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.27 | 0.19 | 0.12 | 0.34 | 0.16 |
| PSND | 0.27 | 0.28 | 0.24 | 0.24 | 0.62 | 0.48 | 0.67 | 0.50 | 0.12 | 0.18 | 0.20 | 0.16 | 0.00 | 0.27 | 0.00 | 0.24 | 0.19 | 0.10 | 0.39 | 0.15 |
| PSSR | 0.28 | 0.24 | 0.32 | 0.25 | 0.62 | 0.39 | 0.76 | 0.45 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.00 | 0.32 | 0.00 | 0.29 | 0.15 | 0.07 | 0.35 | 0.11 |
| REP_Li | 0.26 | 0.20 | 0.43 | 0.27 | 0.46 | 0.31 | 0.64 | 0.38 | 0.09 | 0.13 | 0.24 | 0.13 | 0.01 | 0.22 | 0.01 | 0.09 | 0.06 | 0.00 | 0.27 | 0.02 |
| SR6 | 0.30 | 0.26 | 0.39 | 0.30 | 0.60 | 0.41 | 0.72 | 0.46 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.04 | 0.00 | 0.34 | 0.00 | 0.29 | 0.17 | 0.10 | 0.32 | 0.14 |
| TCARI | 0.28 | 0.21 | 0.17 | 0.15 | 0.60 | 0.51 | 0.56 | 0.49 | 0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.11 | 0.01 | 0.11 | 0.09 | 0.08 | 0.05 | 0.06 |
| TCARI/OSAVI | 0.13 | 0.06 | 0.05 | 0.04 | 0.33 | 0.27 | 0.28 | 0.25 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Vogelmann | 0.32 | 0.28 | 0.41 | 0.31 | 0.59 | 0.42 | 0.71 | 0.48 | 0.09 | 0.08 | 0.10 | 0.05 | 0.00 | 0.33 | 0.00 | 0.28 | 0.17 | 0.11 | 0.32 | 0.15 |
| Vogelmann2 | 0.33 | 0.28 | 0.44 | 0.33 | 0.59 | 0.41 | 0.72 | 0.47 | 0.11 | 0.11 | 0.15 | 0.08 | 0.00 | 0.34 | 0.00 | 0.26 | 0.17 | 0.09 | 0.34 | 0.13 |

Tab. 11 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI odvozenými z terénních spekter.

Podobné trendy ve výsledcích lineárních regresí mezi VI odvozenými z různých datasetů spekter z úrovně porostu korelují se závěrem z předchozí kapitoly porovnávající samotné VI, tedy že VI z obou datasetů spekter mohou být srovnatelné. Z tohoto důvodu budou dále prezentovány výsledky pouze pro VI odvozené z převzorkovaných spekter z HSI.

| úroveň | dron | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------|------|------|-------------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| spektra | převzorkované na 54 pásem | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| termíny | všechny | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | | | bezkolencec | | | | metlice | | | | smilka | | | | třtina | | | |
| chlorofyl | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | |
| parametr struktury | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI |
| Carter4 | 0.31 | 0.26 | 0.30 | 0.26 | 0.73 | 0.50 | 0.68 | 0.52 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.28 | 0.08 | 0.20 | 0.29 | 0.10 | 0.35 | 0.13 |
| Datt | 0.24 | 0.19 | 0.35 | 0.26 | 0.52 | 0.36 | 0.55 | 0.43 | 0.08 | 0.13 | 0.16 | 0.11 | 0.04 | 0.06 | 0.11 | 0.01 | 0.04 | 0.00 | 0.18 | 0.02 |
| Datt2 | 0.32 | 0.27 | 0.33 | 0.29 | 0.65 | 0.46 | 0.65 | 0.52 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.04 | 0.01 | 0.27 | 0.06 | 0.20 | 0.29 | 0.03 | 0.40 | 0.06 |
| DD | 0.36 | 0.11 | 0.36 | 0.13 | 0.68 | 0.36 | 0.65 | 0.39 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.31 | 0.12 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 0.09 | 0.00 |
| Gitelson | 0.09 | 0.25 | 0.12 | 0.28 | 0.58 | 0.59 | 0.60 | 0.65 | 0.02 | 0.16 | 0.03 | 0.12 | 0.01 | 0.07 | 0.00 | 0.18 | 0.21 | 0.34 | 0.32 | 0.44 |
| Gitelson2 | 0.05 | 0.15 | 0.07 | 0.16 | 0.39 | 0.45 | 0.45 | 0.54 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.17 | 0.35 | 0.13 | 0.34 | 0.15 |
| Maccioni | 0.27 | 0.20 | 0.39 | 0.26 | 0.65 | 0.48 | 0.65 | 0.52 | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 0.03 | 0.01 | 0.16 | 0.06 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.19 | 0.13 |
| MCARI2 | 0.34 | 0.13 | 0.33 | 0.15 | 0.61 | 0.35 | 0.61 | 0.40 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.36 | 0.09 | 0.15 | 0.12 | 0.00 | 0.11 | 0.00 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.34 | 0.10 | 0.31 | 0.10 | 0.60 | 0.31 | 0.59 | 0.35 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.31 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.01 | 0.05 | 0.02 |
| MCARI/OSAVI | 0.23 | 0.06 | 0.14 | 0.04 | 0.35 | 0.12 | 0.35 | 0.14 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.27 | 0.01 | 0.10 | 0.15 | 0.01 | 0.08 | 0.01 |
| MTCI | 0.27 | 0.18 | 0.36 | 0.25 | 0.60 | 0.49 | 0.62 | 0.56 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.04 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.15 | 0.12 |
| NDVI | 0.28 | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.74 | 0.50 | 0.67 | 0.51 | 0.04 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.30 | 0.07 | 0.23 | 0.37 | 0.08 | 0.40 | 0.11 |
| NDVI2 | 0.31 | 0.26 | 0.31 | 0.26 | 0.73 | 0.51 | 0.68 | 0.53 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.06 | 0.22 | 0.30 | 0.09 | 0.35 | 0.12 |
| OSAVI | 0.28 | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.74 | 0.50 | 0.67 | 0.51 | 0.04 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.30 | 0.07 | 0.23 | 0.37 | 0.08 | 0.40 | 0.10 |
| OSAVI2 | 0.31 | 0.26 | 0.31 | 0.26 | 0.73 | 0.51 | 0.68 | 0.53 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 0.06 | 0.22 | 0.30 | 0.09 | 0.35 | 0.12 |
| PSND | 0.23 | 0.24 | 0.17 | 0.20 | 0.72 | 0.49 | 0.62 | 0.49 | 0.09 | 0.06 | 0.13 | 0.04 | 0.01 | 0.31 | 0.06 | 0.26 | 0.36 | 0.06 | 0.33 | 0.07 |
| PSSR | 0.21 | 0.16 | 0.21 | 0.16 | 0.47 | 0.39 | 0.50 | 0.45 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.01 | 0.21 | 0.31 | 0.01 | 0.33 | 0.01 |
| REP_Li | 0.33 | 0.25 | 0.43 | 0.31 | 0.65 | 0.43 | 0.68 | 0.49 | 0.13 | 0.13 | 0.24 | 0.12 | 0.02 | 0.18 | 0.09 | 0.08 | 0.11 | 0.03 | 0.28 | 0.08 |
| SR6 | 0.31 | 0.24 | 0.33 | 0.27 | 0.65 | 0.50 | 0.65 | 0.56 | 0.05 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.27 | 0.04 | 0.22 | 0.25 | 0.07 | 0.29 | 0.09 |
| TCARI | 0.10 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.54 | 0.19 | 0.47 | 0.19 | 0.16 | 0.27 | 0.26 | 0.25 | 0.01 | 0.23 | 0.09 | 0.04 | 0.07 | 0.07 | 0.14 | 0.13 |
| TCARI/OSAVI | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.04 | 0.15 | 0.26 | 0.26 | 0.23 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.32 | 0.16 | 0.43 | 0.23 |
| Vogelmann | 0.31 | 0.25 | 0.34 | 0.28 | 0.68 | 0.51 | 0.67 | 0.56 | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.27 | 0.06 | 0.23 | 0.24 | 0.10 | 0.26 | 0.12 |
| Vogelmann2 | 0.36 | 0.26 | 0.41 | 0.29 | 0.69 | 0.50 | 0.69 | 0.56 | 0.12 | 0.04 | 0.12 | 0.02 | 0.01 | 0.26 | 0.05 | 0.21 | 0.21 | 0.06 | 0.27 | 0.08 |

Tab. 12 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI odvozenými z vyextrahovaných spekter z HSI.

Porovnání jednotlivých VI

Samotné vegetační indexy obvykle vykazují podobné trendy ve výsledcích lineárních modelů v dané kombinaci s CCC (pohled na jednotlivé dílčí sloupce v tab. 11 a tab. 12). Pokud se nějaké indexy liší oproti jiným, jedná se obvykle o složitější VI jako je např. MCARI/OSAVI či TCARI/OSAVI nebo naopak jednoduchý index Gitelson, zmíněné již v předchozí kapitole, kde byly porovnávány výsledky VI z terénních spekter s výsledky VI z HSI.

Porovnání jednotlivých travních druhů

Z prvního pohledu na tab. 11 a tab. 12 se může zdát, že velmi příznivých výsledků dosahují hodnoty bezkolence (průměrné $R^2 = 0,51$ pro bezkolencec ze všech kombinací CCC a VI ze spekter z dronu). Bohužel jsou tyto výsledky zatížené nerovnoměrným zastoupením hodnot CCC, a to především vlivem nízkých hodnot GLAI, popř. LAI v červnu, kdy byla průměrná hodnota GLAI pouhých 0,44, respektive LAI 1,23 (příloha 2). Špatné výsledky korelací vyšly pro všechny ostatní druhy.

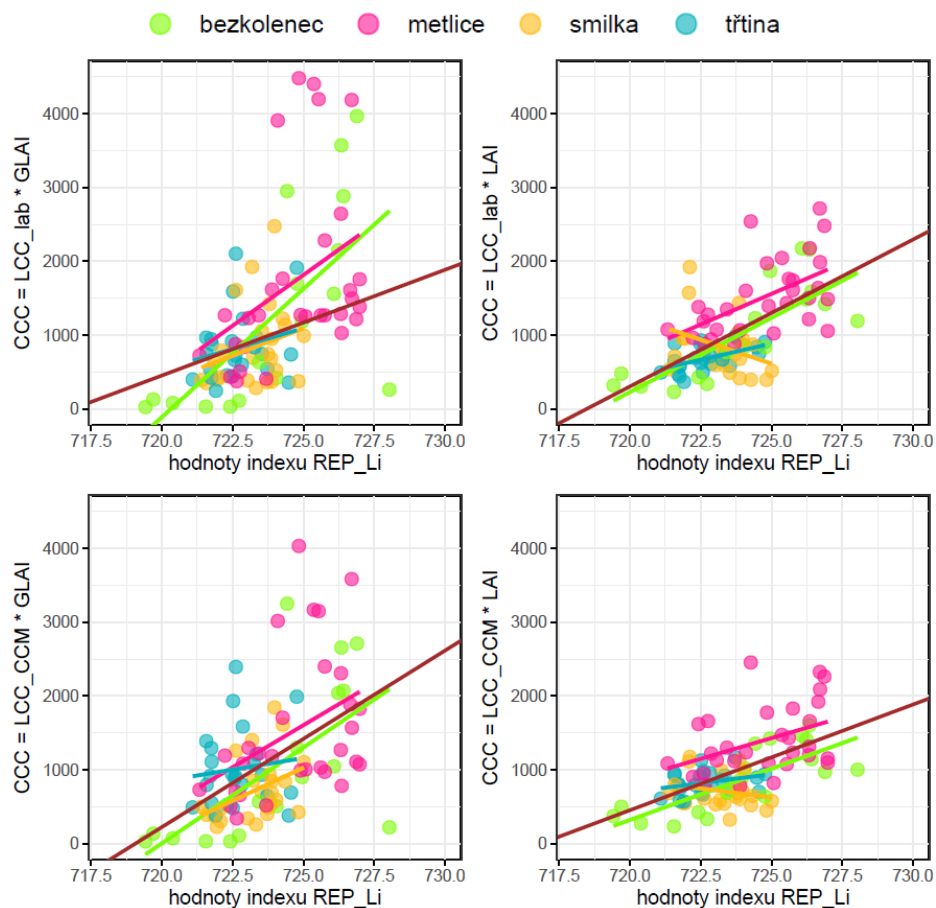
Bez ohledu na použité CCC je robustnějších výsledků dosaženo při kombinaci všech druhů dohromady než pro jednotlivé druhy zvlášť.

Porovnání jednotlivých termínů

Lineární modely byly sestaveny i pro subdatasety za jednotlivé měsíce. Hodnocení modelů pomocí koeficientů determinace je shrnuto v příloze 6, 7 a 8.

Zajímavých výsledků bylo dosaženo v červnu, kdy vyšlo vyšší mediánové $R^2 = 0,37$ (pro všechny druhy ze všech kombinací CCC a VI ze spekter dronu – tab. v příloze 6) v porovnání s mediánovým $R^2 = 0,27$ ze všech termínů dohromady (a všech druhů se všemi kombinacemi CCC a VI ze spekter dronu – tab. 12). Při uvážení vlivu LAI na hodnoty CCC komentované v kap. 4.2.2, pak variabilita hodnot LAI v červnu mezi druhy (příloha 2) podporuje lepší výkonnost modelu pro CCC s VI z červnových dat.

Ostatní měsíce nevykazují dobré výsledky. Pouze hodnoty bezkolence v srpnu v kombinaci s CCC obsahující hodnoty LAI mají medián koeficientu determinace 0,7. Tyto modely pro bezkolence v červnu jsou však založeny pouze na šesti pozorováních.

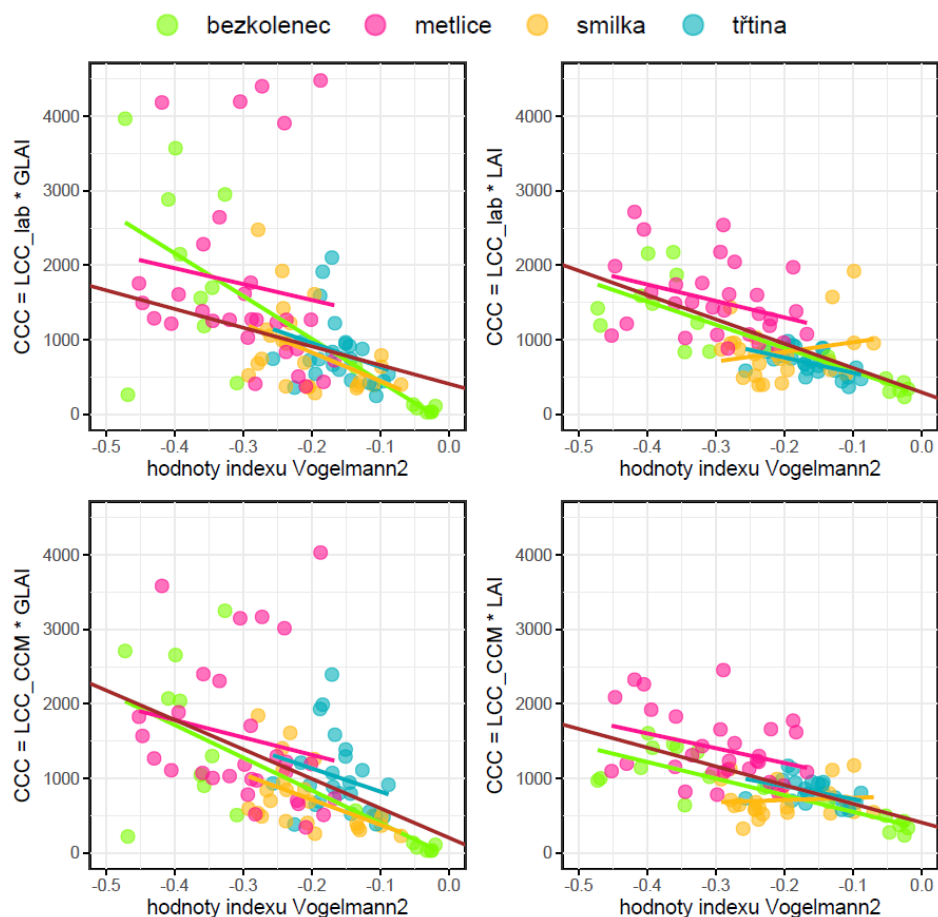


Obr. 21 Regresní modely CCC indexu REP_Li ze spekter z HSI. Vlevo nahoře destruktivní stanovení CCC, vpravo dole nedestruktivní stanovení CCC. Hnědá čára značí regresní křivku vytvořenou na základě hodnot ze všech druhů. Autor: vlastní zpracování

Porovnání jednotlivých výpočtů CCC

Grafická ukázka v podobě bodových grafů indexů REP_Li a Vogelmann2 odvozených ze spekter z HSI se všemi kombinacemi CCC pro všechny druhy a termíny je na obr. 21 a obr. 22.

Výsledky ukazují, že vztah CCC k VI je více ovlivněn hodnotami LAI než LCC. Tento jev je patrný ve většině případů všech kombinací v subdatasetech (druhy, termíny) a potvrzuje závěry z kap. 4.2.2. Na základě všech výsledků nelze jednoznačně zhodnotit, který výpočet CCC dosahuje nejlepších výsledků. Pro všechny druhy a termíny dohromady a VI ze spekter z dronu vychází nejlépe nedestruktivní přístup měření (LCC získané z měření přístrojem CCM-300 a LAI z měření přístrojem LAI-2200C).



Obr. 22 Regresní modely CCC indexu Vogelmann2 ze spekter z HSI. Vlevo nahoře destruktivní stanovení CCC, vpravo dole nedestruktivní stanovení CCC. Hnědá čára značí regresní křivku vytvořenou na základě hodnot ze všech druhů. Autor: vlastní zpracování

4.3 Chlorofylové mapy

4.3.1 Chlorofylová mapa odvozená z destruktivního sběru dat

Pro chlorofylovou mapu byl na základě vyextrahovaných a převzorkovaných spekter z HSI a naměřených hodnot LCC a LAI destruktivními přístupy ze všech termínů a druhů vytvořen model MSLR založený na čtyřech pásmech. Počet pásem byl stanoven modelem. Postupným přidáváním pásem do modelu bylo nalezeno lokální maximum R^2 , čímž byl určen výsledný model.

$$CCC_1 = 1904.8 + 2264.6 * R_{606} - 2130.9 * R_{617} - 366 * R_{740} + 242.9 * R_{807}$$

kde R_λ je odrazivost na příslušné vlnové délce. Model MLSR dosáhl koeficientu determinace 0,42 a RMSE po využití desetinásobné křížové validace bylo 834 mg/m² tab. 13. Výsledek aplikovaného modelu na HSI v podobě chlorofylových map odhadující CCC lze vidět na obr. 23. Výstup je doplněn o klasifikaci travních druhů (Ježek 202x) a výsledné chlorofylové mapy jsou překryty maskou kryjící jinou vegetaci než jsou vybrané travní druhy.

Navzdory maximální snaze pořídit ideální HSI, je snímání ovlivněno počasím v horách, které způsobuje nerovnosti v ozáření, jež mohou být vidět v obrazových datech. Mozaiky z června a července pro území U Luční boudy jsou bohužel postiženy těmito nerovnostmi ozáření. Nejnižší hodnoty CCC v červenci pro třtinu na území U zahrádky je pravděpodobně také způsobeno nekonzistentními světelnými podmínkami.

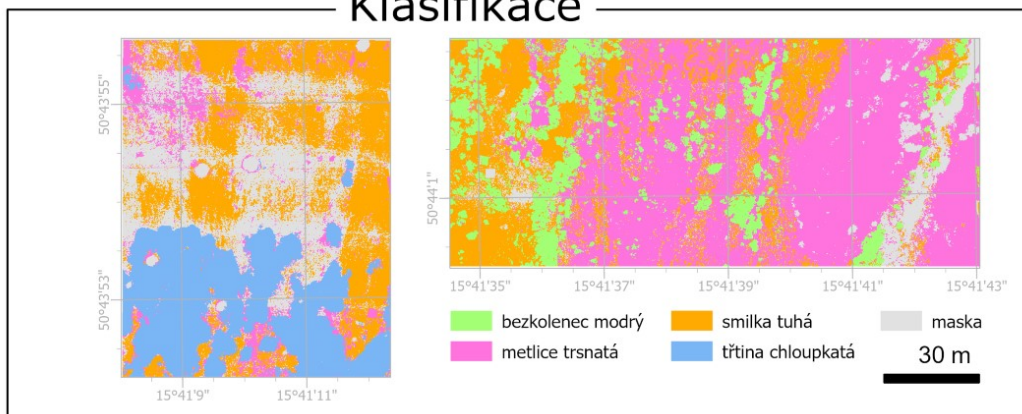
| | R^2 | RMSE |
|-----|-------|-----------------------|
| CCC | 0,42 | 834 mg/m ² |

Tab. 13 Hodnocení modelu odvozeného z destruktivního sběru dat pro tvorbu chlorofylové mapy.

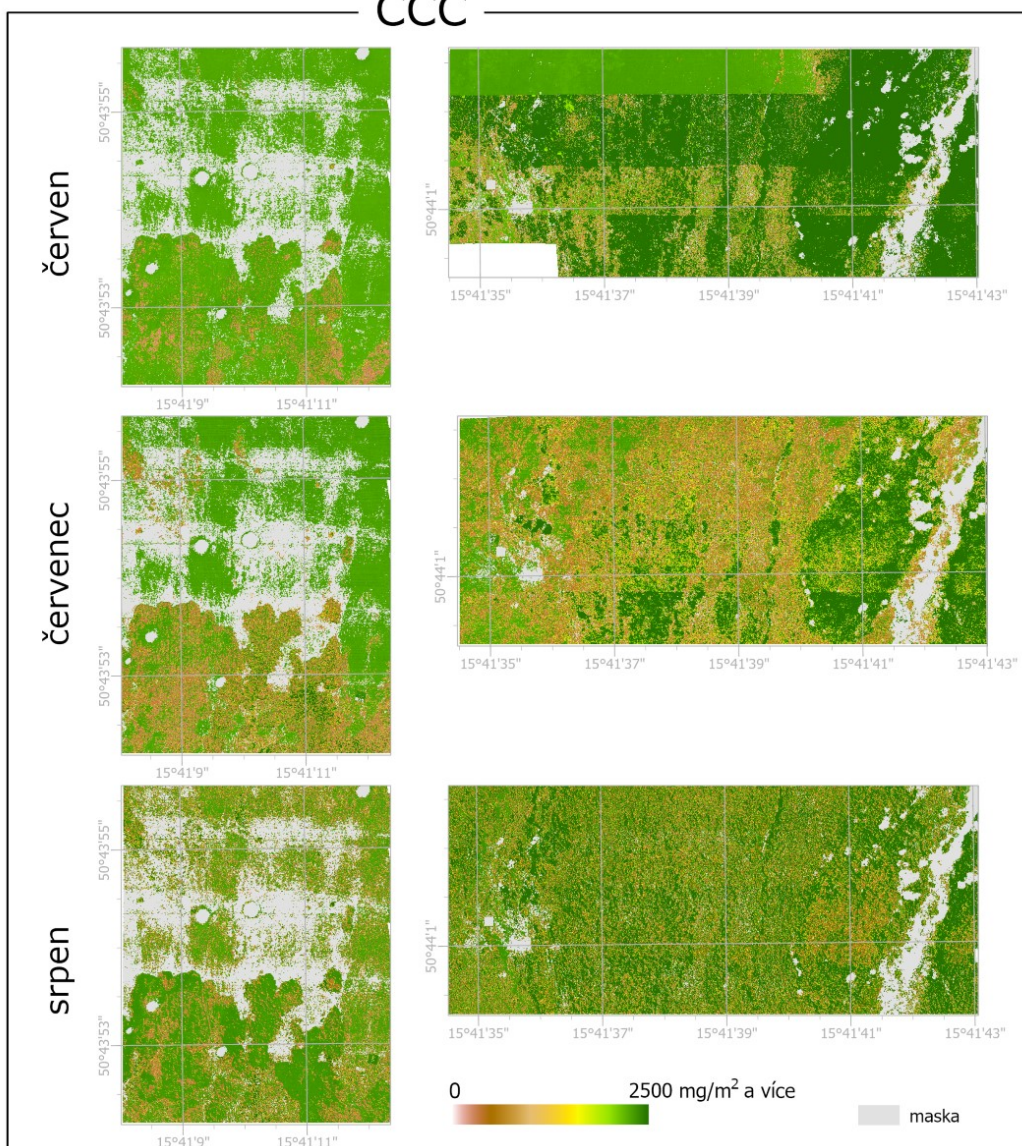
U ZAHRÁDKY

U LUČNÍ BOUDY

Klasifikace



CCC



Obr. 23 Chlorofylové mapy odhadující hodnoty CCC vytvořené aplikováním modelu MSLR sestaveného z naměřených dat destruktivním přístupem doplněná o klasifikaci dle Ježka (202x). Autor: vlastní zpracování

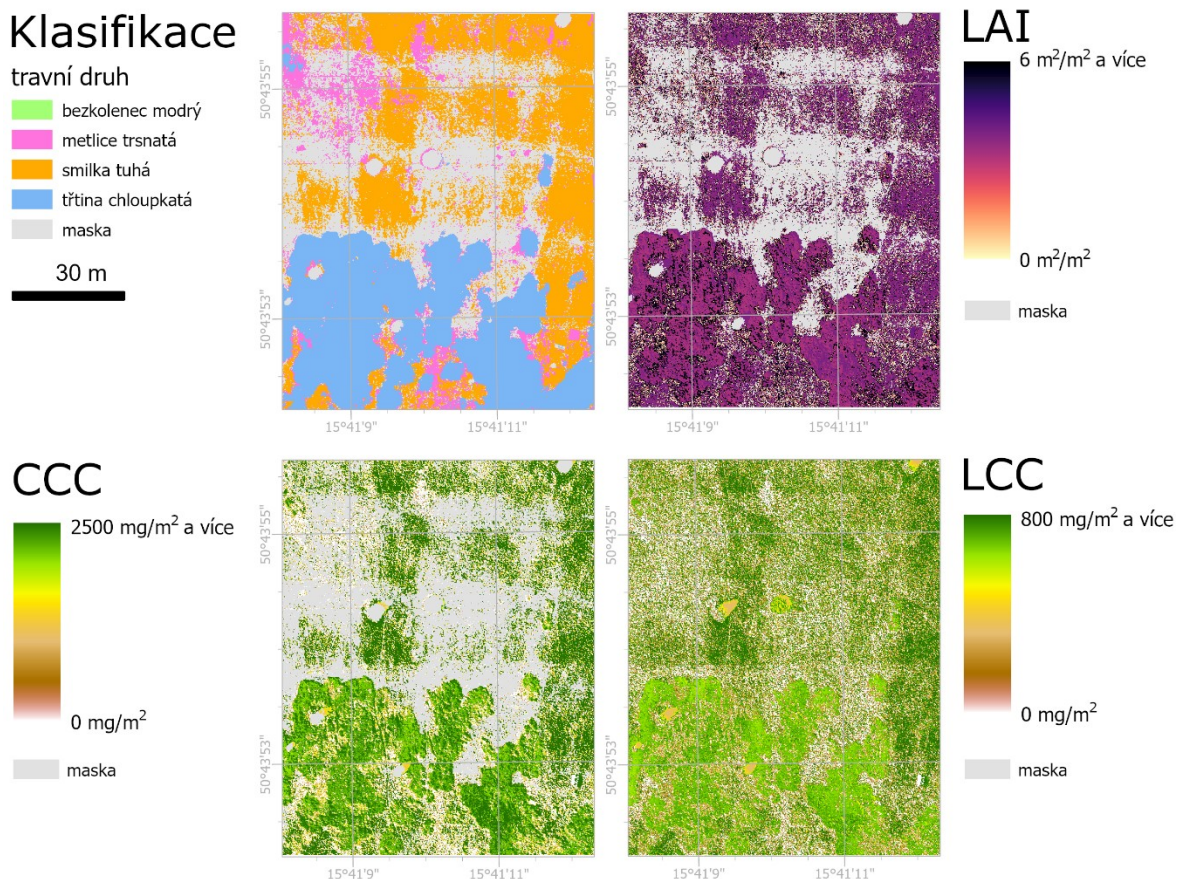
4.3.2 Chlorofylové mapy odvozené z nedestruktivního sběru dat

Na základě vyextrahovaných a převzorkovaných spekter z HSI a naměřených hodnot LCC a LAI nedestruktivními přístupy měření ze všech termínů a druhů byl vytvořen model MSLR pro mapu CCC. Model se skládá z desíti spektrálních pásem.

$$\begin{aligned}
 CCC_2 = & 1205.81 + 215.39 * R_{673} + 477.25 * R_{807} - 439.57 * R_{729} + \\
 & 18.35 * R_{640} + 964.26 * R_{695} + 446.31 * R_{751} - 329.13 * R_{785} + \\
 & 85.88 * R_{931} - 28.71 * R_{995} + 70.95 * R_{953}
 \end{aligned}$$

kde R_λ je odrazivost na příslušné vlnové délce. Koefficient determinace pro tento model je 0,68. RMSE vypočtené nad validačními daty vyšlo 741,6 mg/m² tab. 14. Model byl aplikován na HSI ze srpnové kampaně.

U ZAHRÁDKY



Obr. 24 Mapy odhadující hodnoty CCC, LAI a LCC nad srpnovým snímekem na území U zahrádky s maskou, doplněna o klasifikaci dle Ježka (202x). Autor: vlastní zpracování

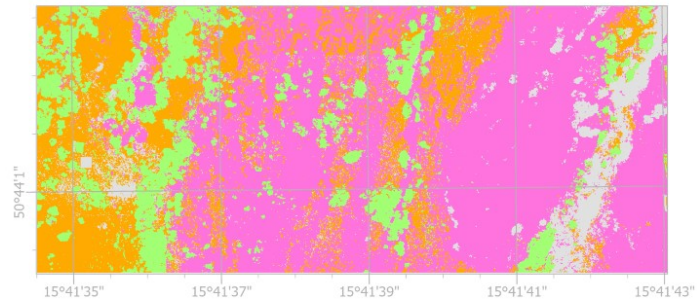
U LUČNÍ BOUDY

Klasifikace

travní druh

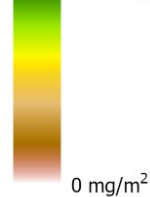
- bezkolnec modrý
- metlice trsnatá
- smilka tuhá
- třtina chloupkatá
- maska

30 m



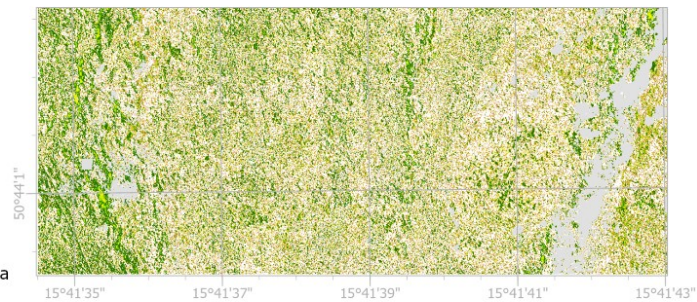
CCC

2500 mg/m² a více



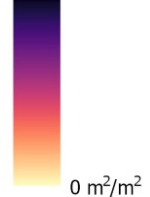
0 mg/m²

maska



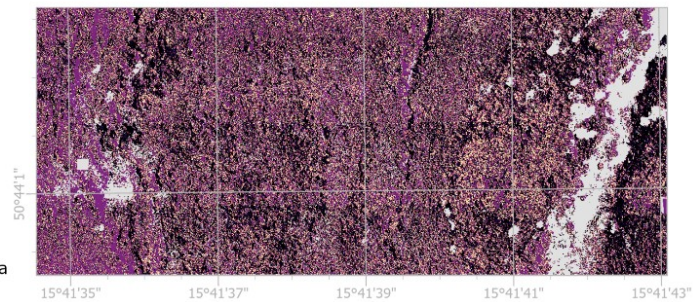
LAI

6 m²/m² a více



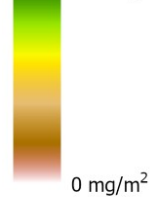
0 m²/m²

maska



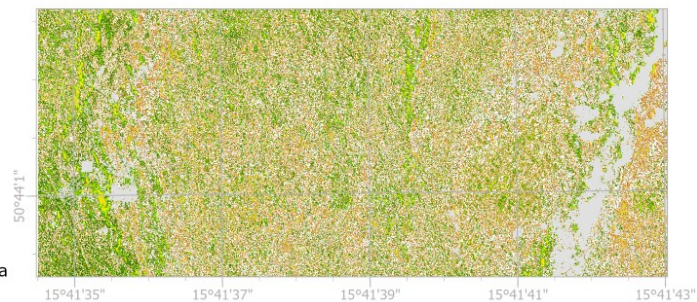
LCC

800 mg/m² a více



0 mg/m²

maska



Obr. 25 Mapy odhadující hodnoty CCC, LAI a LCC nad srpnovým snímkem na území U Luční boudy s maskou, doplněna o klasifikaci dle Ježka (202x). Autor: vlastní zpracování

Mapa CCC vyjadřuje množství obsahu chlorofylu na jednotku plochy půdy. Mapa znázorňující obsah chlorofylu na úrovni listu je výsledkem downscalingu z obrazu CCC vyděleného obrazem LAI a reprezentuje hodnoty LCC, tedy obsah chlorofylu na jednotku plochy listu. Za tímto účelem je potřeba vytvořit obraz odhadující hodnoty LAI. Model MSLR pro odhad LAI byl vytvořen na základě vyextrahovaných a převzorkovaných

spekter z HSI a naměřených hodnot LCC a LAI nedestruktivními přístupy ze všech termínů a druhů. Model zahrnuje devět pásem.

$$\text{LAI} = 3.83 - 0.33 * R_{583} + 0.092 * R_{931} - 0.03 * R_{729} - 0.055 * R_{995} + 0.598 * R_{718} + 1.45849937 * R_{751} - 0.443 * R_{819} - 1.506 * R_{740} + 0.073 * R_{953}$$

kde R_λ je odrazivost na příslušné vlnové délce. Koeficient determinace pro model MSLR pro LAI je 0,64. RMSE vypočtené nad validačními daty vyšlo 2,01 m²/m². Model byl aplikován taktéž na srpnový snímek.

Chlorofylová mapa odhadující hodnoty LCC vytvořená downscalingem z mapy CCC vydělením obrazem LAI je prezentovaná na obr. 24 a obr. 25 spolu s mapou CCC, LAI a klasifikací. RMSE pro mapu LCC nad validačními daty vyšlo 66,55 mg/m² tab. 14.

| | R ² | RMSE |
|-----|----------------|-------------------------------------|
| CCC | 0,68 | 741,6 mg/m ² |
| LAI | 0,64 | 2,01 m ² /m ² |
| LCC | | 66,55 mg/m ² |

Tab. 14 Hodnocení modelů odvozených z nedestruktivního sběru dat pro tvorbu map..

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá stanovením obsahu chlorofylu z hyperspektrálních dat pořízených spektrometrem ASD FieldSpec 4 Wide-Res na úrovni porostu a obrazových dat snímaných hyperspektrální kamerou Headwall Nano-Hyperspec ve vybraných travinách krkonošské tundry. Řešení této úlohy předchází rozbor naměřených hodnot obsahu chlorofylu na úrovni listu (LCC) a parametru struktury vegetace charakterizovaným indexem listové plochy (LAI), z nichž je určen obsah chlorofylu na úrovni porostu. Oba parametry vegetace byly v terénu stanoveny destruktivní a nedestruktivní metodou.

Korelace mezi hodnotami obsahu chlorofylu na úrovni listu z laboratorního měření a přístrojem CCM-300 byla hodnocena koeficientem determinace, který napříč všemi druhy a termíny dosáhl hodnoty 0,46. Ze spekter pořízených kontaktní sondou spojenou se spektrometrem byly vypočítány vegetační indexy (VI). Korelace mezi LCC a VI byla velmi slabá, a to jak pro hodnoty LCC pořízené nedestruktivní metodou, tak i destruktivní.

Hodnoty LAI získané pomocí dvou odlišných metod měření se stejně jako hodnoty LCC významně lišily ($R^2 = 0,32$). Odlišnost hodnot mezi jednotlivými metodami může být ovlivněna samotnou metodikou sběru dat. Hodnoty pořizované nedestruktivní metodou přístrojem LAI-2200C jsou na rozdíl od destruktivně stanovených hodnot GreenLAI ovlivněné nekromasou a případně květenstvím.

Dále byly v této práci porovnány VI odvozené ze spekter pořízených spektrometrem v terénu s VI odvozenými z příslušných spekter hyperspektrálního obrazu (HSI). Nejlepší výsledky koeficientu determinace byly kolem 0,8 (např. Carter4, NDVI, Vogelmann2), což nasvědčuje, že vybrané indexy odvozené z terénních spekter a z obrazových dat mohou být srovnatelné.

Obsah chlorofylu na úrovni porostu (CCC) byl vypočítán z hodnot LCC a LAI a následně modelován na základě VI odvozených ze spekter na úrovni porostu. Modely byly sestaveny jak pro všechna naměřená data dohromady, tak pro jednotlivé travní druhy a termíny zvlášť. Medián z koeficientů determinace ze všech modelů pro jednotlivé kombinace CCC a VI trénovaných na všech naměřených datech byl 0,27.

Protože modely jednoduché lineární regrese nevykazovaly přesvědčivé výsledky, bylo pro vytvoření chlorofylových map využito mnohonásobné krokové regrese. Pro model odvozený z nedestruktivního sběru dat, který byl využitý pro mapu LCC, bylo dosaženo RMSE 66,55 mg/m².

Seznam použité literatury

ALBRECHTOVÁ, J., KUPKOVÁ, L., CAMPBELL, P. K. E. a kol. (2017): Metody hodnocení fyziologického stavu smrkových porostů: Případová studie sledování vývoje stavu smrkových porostů v Krušných horách v letech 1998-2013. Geographica - Česká geografická společnost, Praha, 401 stran.

BHADRA, S., SAGAN, V., MAIMAITIJIANG, M. (2020): Quantifying Leaf Chlorophyll Concentration of Sorghum from Hyperspectral Data using Derivative Calculus and Machine Learning. Lcc.

BLACKBURN, G. A. (1998): Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. International Journal of Remote Sensing, 4, 19, 657–675.

CASTER, G. A. (1994): Ratios of leaf reflectance in narrow wavebands as indicator of plant stress. International Journal of Remote Sensing, 3, 15, 697–704.

ČERVENÁ, L., KUPKOVÁ, L., POTŮČKOVÁ, M., LYSÁK, J. (2020a): SEASONAL SPECTRAL SEPARABILITY OF SELECTED GRASSES : CASE STUDY FROM THE KRKONOŠE MTS . TUNDRA ECOSYSTEM. XLIII, 371–376.

ČERVENÁ, L., LYSÁK, J., POTŮČKOVÁ, M., KUPKOVÁ, L. (2020b): ZKUŠENOSTI SE ZPRACOVÁNÍM HYPERSEKTRÁLNÍCH DAT POŘÍZENÝCH UAV doi : <https://doi.org/10.31490/9788024843988-4>. GIS Ostrava 2020 - Prostorová data pro Smart City a Smart Region, 6 stran.

CROFT, H., ARABIAN, J., CHEN, J. M., SHANG, J., LIU, J. (2020): Mapping within - field leaf chlorophyll content in agricultural crops for nitrogen management using Landsat - 8 imagery. Precision Agriculture, 4, 21, 856–880.

CROFT, H., CHEN, J. M. (2017): Leaf Pigment Content. Elsevier Inc.

CROFT, H., CHEN, J. M., ZHANG, Y. (2014): International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Temporal disparity in leaf chlorophyll content and leaf area index across a growing season in a temperate deciduous forest. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 33, 312–320.

DARVISHZADEH, R., SKIDMORE, A., SCHLERF, M., ATZBERGER, C., CORSI, F., CHO, M. (2008): LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. 63, 409–426.

DASH, J., CURRAN, P. J. (2004): The MERIS terrestrial chlorophyll index. International Journal of Remote Sensing, 23, 25, 5403–5413.

DATT, B. (1999): Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus

leaves. *International Journal of Remote Sensing* 20, 14, 2741–2759.

DAUGHTRY, C. S. T., WALTHALL, C. L., KIM, M. S., DE COLSTOUN, E. B., MCMURTREY, J. E. (2000): Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2, 74, 229–239.

DOBROVOLNÝ, P. (1998): Dálkový průzkum Země - Digitální zpracování obrazu. Masarykova univerzita v Brně.

EINZMANN, K., NG, W.-T., IMMITZER, M., BACHMANN, M., PINNELL, N., ATZBERGER, C. (2014): Method Analysis for Collecting and Processing in-situ Hyperspectral Needle Reflectance Data for Monitoring Norway Spruce. October, 423–434.

FEILHAUER, H., ASNER, G. P., MARTIN, R. E. (2015): Remote Sensing of Environment Multi-method ensemble selection of spectral bands related to leaf biochemistry. *Remote Sensing of Environment*, 164, 57–65.

GITELSON, A. A., BUSCHMANN, C., LICHTENTHALER, H. K. (1999): The chlorophyll fluorescence ratio F735/F700 as an accurate measure of the chlorophyll content in plants. *Remote Sensing of Environment*, 3, 69, 296–302.

GITELSON, A. A., CIGANDA, V., ARKEBAUER, T. J. (2005): Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops.

GITELSON, A. A., GRITZ, Y., MERZLYAK, M. N. (2003): Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 3, 160, 271–282.

GITELSON, A., MERZLYAK, M. N. (1994): Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 3, 22, 247–252.

GUYOT, G., BARET, F. (1988): Utilisation de la haute résolution spectrale pour suivre l'état des couverts végétaux. Fourth International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 279–286.

HABOUDANE, D., JOHN, R., MILLER, J. R., TREMBLAY, N., ZARCO-TEJADA, P. J., DEXTRAZE, L. (2002): Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2–3, 81, 416–426.

HEJCMAN, M., ČEŠKOVÁ, M., PAVLŮ, V. (2010): Control of *Molinia caerulea* by cutting management on sub-alpine grassland. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 9, 205, 577–582.

HEJCMAN, M., KLAUDISOVÁ, M., HEJCMANOVÁ, P., PAVLŮ, V., JONES, M.

(2009): Expansion of *Calamagrostis villosa* in sub-alpine *Nardus stricta* grassland: Cessation of cutting management or high nitrogen deposition? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1–3, 129, 91–96.

JEŽEK, V. (202x): Analýza změn v rozšíření ochranně důležitých travních druhů v krkonošské tundře s využitím dálkového průzkumu Země. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Kupková, Lucie.

KATTENBORN, T., SCHIEFER, F., ZARCO-TEJADA, P., SCHMIDTLEIN, S. (2019): Advantages of retrieving pigment content [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] versus concentration [%] from canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, September 2018, 230, 111195.

KENNEDY, B. E., KING, D. J. (2020): Comparison of Empirical and Physical Modelling for Estimation of Biochemical and Biophysical Vegetation Properties : Field Scale Analysis across an Arctic Bioclimatic Gradient. *Remote Sensing*, 3073, 12, 41.

LE MAIRE, G., FRANÇOIS, C., DUFRÊNE, E. (2004): Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1, 89, 1–28.

LI-COR INC. (2014): LAI-2200C Plant Canopy Analyzer. Lincoln, Nebraska 68504, 12 stran.

LIU, J., PATTEY, E. (2010): Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops Agricultural and Forest Meteorology Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 11, 150, 1485–1490.

LIU, S., LI, S., FAN, X. Y., YUAN, G. Di, HU, T., SHI, X. M., HUANG, J. B., PU, X. Y., WU, C. S. (2019): Comparison of two noninvasive methods for measuring the pigment content in foliose macrolichens. *Photosynthesis Research*.

LUKEŠ, P., NEUWIRTHOVÁ, E., LHOTÁKOVÁ, Z., JANOUTOVÁ, R., ALBRECHTOVÁ, J. (2020): Remote Sensing of Environment Upscaling seasonal phenological course of leaf dorsiventral reflectance in radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, April, 246, 111862.

MACCIONI, A., AGATI, G., MAZZINGHI, P. (2001): New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 1–2, 61, 52–61.

MAIN, R., CHO, M. A., MATHIEU, R., O'KENNEDY, M. M., RAMOELO, A., KOCH, S. (2011): An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 6, 66, 751–761.

MESARCH, M. A., WALTER-SHEA, E. A., ASNER, G. P., MIDDLETON, E. M.,

CHAN, S. S. (1999): A Revised Measurement Methodology for Conifer Needles Spectral Optical Properties : Evaluating the Influence of Gaps between Elements. August 1998, 192, 177–192.

MIŠUREC, J., TOMÍČEK, J., LUKEŠ, P., KLEM, K. (2019): Kvantitativní odhad vybraných biofyzikálních parametrů porostů zemědělských plodin na podkladě družicových dat Sentinel - 2 a jeho využití pro tvorbu aplikačních map precizního zemědělství. Certifikovaná metodika. Gisat s.r.o. a Ústav výzkumu globální změny AV ČR v.v.i., 0–39.

OPTI-SCIENCES INC. (2011): CCM-300 – Chlorophyll Content meter for small leaves and difficult samples. Operation manual. Hudson, NH 03051, USA, 23 stran.

PINLOVÁ, G. (2019): Určování obsahu chlorofylu ve vybraných travinách krkonošské tundry. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Červená, Lucie.

PORRA, R. J., THOMPSON, W. A., KRIEDEMANN, P. E. (1989): 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. *Biochimica et Biophysica Acta*, 3, 975, 384–394.

POTŮČKOVÁ, M., ČERVENÁ, L., KUPKOVÁ, L., LHOTÁKOVÁ, Z. (2016a): Statistical comparison of foliage spectral and biochemical measurements on an example of Norway spruce stands in the Ore Mountains , Czech Republic. 1, 15, 69–83.

POTŮČKOVÁ, M., ČERVENÁ, L., KUPKOVÁ, L., LHOTÁKOVÁ, Z., LUKEŠ, P., HANUŠ, J., NOVOTNÝ, J., ALBRECHTOVÁ, J. (2016b): Comparison of Reflectance Measurements Acquired with a Contact Probe and an Integration Sphere : Implications for the Spectral Properties of Vegetation at a Leaf Level.

RONDEAUX, G., STEVEN, M., BARET, F. (1996): Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2, 55, 95–107.

SOUKUPOVÁ, L.; KOCIANOVÁ, M.; JENÍK, J.; SEKYRA, J. (1995): Arctic-alpine tundra in the Krkonoše, the Sudetes. *Opera Corcontica*, 32, 5–88.

ŠTURSA, J., WILD, J. (2014): Kleč a smilka – klíčoví hráči vývoje alpínského bezlesí Krkonoš (Vysoké Sudety , Česká republika) Mountain Pine and Matgrass – key players in the development of the alpine treeless area of the Giant Mts (the High Sudetes , Czech Republic). *Opera Corcontica*, 51, 5–36.

ŠUDOVÁ, M. (2019): Protokol pro sběr biofyzikálních parametrů vegetace v terénu. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Brodský, Lukáš.

TOMCOVÁ, J. (2019): Laboratorní spektroskopie pro vybrané druhy vegetace z krkonošské tundry. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí práce Červená, Lucie.

TUCKER, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 2, 8, 127–150.

USTIN, S. L., GITELSON, A. A., JACQUEMOUD, S., SCHAEPMAN, M., ASNER, G. P., GAMON, J. A., ZARCO-TEJADA, P. (2009): Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, SUPPL. 1, 113, S67–S77.

VANAMBURG, L. K., TRLICA, M. J., HOFFER, R. M., WELTZ, M. (2015): Ground based digital imagery for grassland biomass estimation. October.

VERRELST, J., CAMPS-VALLS, G., MUÑOZ-MARÍ, J., PABLO, J., VEROUSTRAETE, F., CLEVERS, J. G. P. W., MORENO, J. (2015): Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties – A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 273–290.

VOGELMAN, J. E., ROCK, B. N., MOSS, D. M. (1993): Red-edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 14, 1563–1575.

WELLBURN, A. R. (1994): The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of Plant Physiology*, 3, 144, 307–313.

WU, C., NIU, Z., TANG, Q., HUANG, W. (2008): Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 8–9, 148, 1230–1241.

ZARCO-TEJADA, P. J., MILLER, J. R. (1999): Land cover mapping at BOREAS using red-edge spectral parameters from CASI imagery. *Journal of Geophysical Research*, 104, 27921–27933.

ZEMEK, F. a kol. (2014): Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.

ZHAO, Y., SUN, Y., LU, X., ZHAO, X., YANG, L., SUN, Z., BAI, Y. (2021): Hyperspectral retrieval of leaf physiological traits and their links to ecosystem productivity in grassland monocultures. *Ecological Indicators*, 122, 107267.

Seznam příloh

| | |
|---|----|
| Příloha 1 Popisná statistika hodnot LCC | 67 |
| Příloha 2 Popisná statistika hodnot LAI..... | 67 |
| Příloha 3 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu v červnu..... | 68 |
| Příloha 4 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu v červenci | 68 |
| Příloha 5 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu v srpnu..... | 69 |
| Příloha 6 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI ze spekter vyextrahovaných z HSI v červnu | 69 |
| Příloha 7 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI ze spekter vyextrahovaných z HSI v červenci | 70 |
| Příloha 8 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI ze spekter vyextrahovaných z HSI v srpnu | 70 |

Digitální přílohy:

| | |
|---------------|---|
| priloha_A.pdf | Chlorofylové mapy odhadující hodnoty CCC odvozené z destruktivního sběru dat ve formátu |
| priloha_B.pdf | Mapy odhadující hodnoty CCC, LAI a LCC nad srpnovým snímkem na území U zahrádky |
| priloha_C.pdf | Mapy odhadující hodnoty CCC, LAI a LCC nad srpnovým snímkem na území U Luční boudy |

| | | laboratorní metoda | | | | | | CCM-300 | | | | | |
|----------|------------|--------------------|-------|--------|-------|-------------|---------------|--------------|-------|--------|-------|-------------|---------------|
| | | počet plošek | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot | počet plošek | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot |
| červen | bezkoleneč | 12 | 199.7 | 280.5 | 336.5 | 40.6 | 136.8 | 12 | 201.8 | 298.7 | 369.8 | 49.0 | 168.0 |
| | metlice | 12 | 381.8 | 489.0 | 644.6 | 82.5 | 262.8 | 12 | 414.2 | 502.9 | 620.2 | 54.7 | 206.1 |
| | smilka | 12 | 346.2 | 509.2 | 693.2 | 113.9 | 347.0 | 12 | 366.6 | 441.1 | 515.6 | 51.0 | 149.0 |
| | třtina | 12 | 182.3 | 256.8 | 321.5 | 41.3 | 139.2 | 12 | 284.2 | 341.0 | 404.7 | 39.7 | 120.5 |
| červenec | bezkoleneč | 12 | 289.0 | 370.5 | 490.8 | 54.2 | 201.9 | 12 | 277.9 | 332.6 | 401.5 | 43.4 | 123.6 |
| | metlice | 12 | 404.4 | 519.9 | 704.3 | 75.5 | 299.8 | 12 | 379.3 | 492.1 | 594.9 | 72.1 | 215.6 |
| | smilka | 12 | 270.8 | 477.7 | 716.3 | 121.3 | 445.5 | 12 | 179.6 | 316.4 | 376.1 | 62.4 | 196.5 |
| | třtina | 12 | 167.2 | 250.9 | 350.0 | 43.8 | 182.8 | 12 | 233.5 | 309.8 | 392.0 | 45.5 | 158.5 |
| srpen | bezkoleneč | 12 | 371.9 | 422.4 | 465.1 | 32.1 | 93.2 | 12 | 284.2 | 317.5 | 354.0 | 22.3 | 69.7 |
| | metlice | 12 | 523.7 | 593.6 | 672.5 | 43.4 | 148.8 | 12 | 404.7 | 464.9 | 522.0 | 33.1 | 117.3 |
| | smilka | 12 | 252.8 | 325.5 | 424.5 | 51.9 | 171.7 | 12 | 287.4 | 363.5 | 515.6 | 65.8 | 228.2 |
| | třtina | 12 | 138.5 | 231.1 | 291.4 | 48.9 | 152.9 | 12 | 141.6 | 246.4 | 334.9 | 57.1 | 193.4 |

Příloha 1 Popisná statistika hodnot LCC

| | | GLAI | | | | | | LAI-2200C | | | | | |
|----------|------------|--------------|------|--------|------|-------------|---------------|-------------|------|--------|------|-------------|---------------|
| | | počet plošek | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot | počet ploch | min | průměr | max | směr. odch. | rozsah hodnot |
| červen | bezkoleneč | 12 | 0.10 | 0.44 | 1.42 | 0.39 | 1.32 | 6 | 0.46 | 1.23 | 2.07 | 0.53 | 1.61 |
| | metlice | 12 | 0.79 | 1.47 | 2.40 | 0.57 | 1.61 | 6 | 1.63 | 2.18 | 3.18 | 0.54 | 1.55 |
| | smilka | 12 | 0.52 | 0.82 | 1.14 | 0.20 | 0.62 | 6 | 1.09 | 1.65 | 2.77 | 0.57 | 1.68 |
| | třtina | 12 | 0.28 | 2.42 | 4.48 | 1.16 | 4.20 | 6 | 1.86 | 2.22 | 3.01 | 0.39 | 1.15 |
| červenec | bezkoleneč | 11 | 1.45 | 4.18 | 8.43 | 1.95 | 6.98 | 6 | 1.72 | 2.75 | 4.11 | 0.89 | 2.39 |
| | metlice | 12 | 2.40 | 3.91 | 7.55 | 1.63 | 5.15 | 6 | 2.06 | 3.33 | 4.90 | 1.01 | 2.84 |
| | smilka | 12 | 0.93 | 2.59 | 5.30 | 1.34 | 4.38 | 6 | 1.28 | 1.92 | 3.19 | 0.66 | 1.91 |
| | třtina | 12 | 1.73 | 3.92 | 9.48 | 2.03 | 7.75 | 6 | 2.34 | 2.83 | 3.10 | 0.34 | 0.76 |
| srpen | bezkoleneč | 12 | 0.70 | 4.52 | 8.84 | 2.90 | 8.15 | 6 | 2.47 | 3.58 | 5.08 | 0.94 | 2.61 |
| | metlice | 12 | 1.61 | 4.07 | 7.78 | 2.38 | 6.17 | 6 | 2.57 | 2.89 | 3.40 | 0.29 | 0.83 |
| | smilka | 12 | 0.68 | 2.09 | 4.68 | 1.20 | 4.00 | 6 | 1.13 | 1.72 | 2.18 | 0.38 | 1.05 |
| | třtina | 12 | 1.33 | 3.66 | 8.92 | 2.16 | 7.59 | 6 | 3.11 | 3.42 | 3.82 | 0.23 | 0.71 |

Příloha 2 Popisná statistika hodnot LAI

| úroveň | CP | | | | | | | | | |
|---------------|-----------|------|------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| spektra | původní | | | | | | | | | |
| termíny | červen | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | bezkoleneč | | metlice | | smilka | | třtina | |
| chlorofyl | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab |
| Carter4 | 0.33 | 0.51 | 0.11 | 0.01 | 0.16 | 0.05 | 0.02 | 0.39 | 0.01 | 0.02 |
| Datt | 0.35 | 0.52 | 0.15 | 0.01 | 0.12 | 0.13 | 0.01 | 0.34 | 0.01 | 0.01 |
| Datt2 | 0.36 | 0.59 | 0.15 | 0.01 | 0.14 | 0.07 | 0.00 | 0.44 | 0.01 | 0.02 |
| DD | 0.31 | 0.47 | 0.12 | 0.01 | 0.13 | 0.01 | 0.01 | 0.39 | 0.04 | 0.00 |
| Gitelson | 0.49 | 0.66 | 0.15 | 0.12 | 0.15 | 0.23 | 0.00 | 0.22 | 0.05 | 0.03 |
| Gitelson2 | 0.17 | 0.13 | 0.17 | 0.00 | 0.25 | 0.04 | 0.01 | 0.09 | 0.10 | 0.00 |
| Maccioni | 0.35 | 0.53 | 0.14 | 0.01 | 0.14 | 0.10 | 0.02 | 0.35 | 0.02 | 0.01 |
| MCARI2 | 0.20 | 0.32 | 0.06 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 0.05 | 0.03 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.08 | 0.16 | 0.03 | 0.01 | 0.11 | 0.01 | 0.00 | 0.32 | 0.04 | 0.07 |
| MCARI/OSAVI | 0.50 | 0.64 | 0.30 | 0.08 | 0.01 | 0.49 | 0.00 | 0.02 | 0.16 | 0.32 |
| MTCI | 0.39 | 0.61 | 0.14 | 0.02 | 0.12 | 0.12 | 0.01 | 0.37 | 0.04 | 0.00 |
| NDVI | 0.06 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.18 | 0.05 | 0.00 | 0.42 | 0.03 | 0.32 |
| NDVI2 | 0.36 | 0.52 | 0.09 | 0.00 | 0.17 | 0.04 | 0.01 | 0.42 | 0.03 | 0.02 |
| OSAVI | 0.09 | 0.12 | 0.08 | 0.02 | 0.16 | 0.05 | 0.00 | 0.44 | 0.01 | 0.26 |
| OSAVI2 | 0.36 | 0.52 | 0.09 | 0.00 | 0.17 | 0.04 | 0.01 | 0.41 | 0.03 | 0.02 |
| PSND | 0.06 | 0.11 | 0.29 | 0.17 | 0.10 | 0.14 | 0.01 | 0.53 | 0.01 | 0.19 |
| PSSR | 0.33 | 0.35 | 0.02 | 0.02 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.02 | 0.07 |
| REP_Li | 0.32 | 0.52 | 0.23 | 0.02 | 0.15 | 0.06 | 0.00 | 0.38 | 0.01 | 0.03 |
| SR6 | 0.37 | 0.58 | 0.11 | 0.01 | 0.14 | 0.07 | 0.01 | 0.42 | 0.03 | 0.01 |
| TCARI | 0.46 | 0.60 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.46 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.08 |
| TCARI/OSAVI | 0.47 | 0.61 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.41 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| Vogelmann | 0.37 | 0.59 | 0.09 | 0.00 | 0.13 | 0.07 | 0.01 | 0.46 | 0.02 | 0.01 |
| Vogelmann2 | 0.35 | 0.59 | 0.20 | 0.02 | 0.10 | 0.06 | 0.01 | 0.35 | 0.00 | 0.03 |

Příloha 3 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu v červnu

| úroveň | CP | | | | | | | | | |
|---------------|-----------|------|------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| spektra | původní | | | | | | | | | |
| termíny | červenec | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | bezkoleneč | | metlice | | smilka | | třtina | |
| chlorofyl | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab |
| Carter4 | 0.18 | 0.49 | 0.04 | 0.29 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.01 | 0.11 | 0.05 |
| Datt | 0.15 | 0.48 | 0.05 | 0.30 | 0.12 | 0.07 | 0.03 | 0.00 | 0.02 | 0.01 |
| Datt2 | 0.20 | 0.47 | 0.05 | 0.27 | 0.10 | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 0.06 | 0.03 |
| DD | 0.16 | 0.47 | 0.03 | 0.30 | 0.08 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 0.15 | 0.06 |
| Gitelson | 0.20 | 0.23 | 0.02 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.09 | 0.11 | 0.25 | 0.33 |
| Gitelson2 | 0.31 | 0.04 | 0.01 | 0.19 | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.10 | 0.09 | 0.07 |
| Maccioni | 0.15 | 0.49 | 0.05 | 0.29 | 0.09 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0.07 | 0.03 |
| MCARI2 | 0.22 | 0.42 | 0.03 | 0.28 | 0.07 | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 0.09 | 0.02 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.18 | 0.38 | 0.03 | 0.29 | 0.07 | 0.09 | 0.00 | 0.03 | 0.07 | 0.01 |
| MCARI/OSAVI | 0.02 | 0.21 | 0.02 | 0.08 | 0.19 | 0.02 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 |
| MTCI | 0.18 | 0.48 | 0.06 | 0.29 | 0.08 | 0.05 | 0.05 | 0.01 | 0.13 | 0.05 |
| NDVI | 0.23 | 0.31 | 0.00 | 0.19 | 0.04 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.09 | 0.06 |
| NDVI2 | 0.21 | 0.47 | 0.03 | 0.26 | 0.09 | 0.04 | 0.07 | 0.02 | 0.14 | 0.07 |
| OSAVI | 0.26 | 0.27 | 0.01 | 0.14 | 0.04 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.13 | 0.07 |
| OSAVI2 | 0.21 | 0.47 | 0.03 | 0.26 | 0.09 | 0.04 | 0.07 | 0.02 | 0.14 | 0.07 |
| PSND | 0.19 | 0.32 | 0.01 | 0.13 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |
| PSSR | 0.35 | 0.24 | 0.07 | 0.06 | 0.01 | 0.00 | 0.05 | 0.03 | 0.12 | 0.04 |
| REP_Li | 0.13 | 0.47 | 0.04 | 0.28 | 0.12 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |
| SR6 | 0.21 | 0.48 | 0.05 | 0.29 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.01 | 0.14 | 0.06 |
| TCARI | 0.06 | 0.10 | 0.03 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 0.03 | 0.18 | 0.01 | 0.00 |
| TCARI/OSAVI | 0.10 | 0.15 | 0.02 | 0.03 | 0.09 | 0.00 | 0.05 | 0.18 | 0.00 | 0.03 |
| Vogelmann | 0.17 | 0.49 | 0.03 | 0.30 | 0.06 | 0.07 | 0.04 | 0.00 | 0.22 | 0.10 |
| Vogelmann2 | 0.12 | 0.46 | 0.04 | 0.32 | 0.04 | 0.05 | 0.02 | 0.00 | 0.17 | 0.10 |

Příloha 4 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu v červenci

| úroveň | CP | | | | | | | | | |
|---------------|-----------|------|------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| spektra | původní | | | | | | | | | |
| termíny | srpen | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | bezkoleneč | | metlice | | smilka | | třtina | |
| chlorofyl | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab | CCM-300 | lab |
| Carter4 | 0.30 | 0.20 | 0.37 | 0.31 | 0.31 | 0.17 | 0.06 | 0.52 | 0.44 | 0.50 |
| Datt | 0.24 | 0.12 | 0.36 | 0.28 | 0.32 | 0.19 | 0.05 | 0.55 | 0.26 | 0.29 |
| Datt2 | 0.20 | 0.11 | 0.39 | 0.32 | 0.29 | 0.13 | 0.06 | 0.54 | 0.23 | 0.24 |
| DD | 0.25 | 0.19 | 0.40 | 0.30 | 0.31 | 0.16 | 0.03 | 0.51 | 0.43 | 0.49 |
| Gitelson | 0.17 | 0.03 | 0.21 | 0.22 | 0.32 | 0.19 | 0.04 | 0.03 | 0.29 | 0.31 |
| Gitelson2 | 0.08 | 0.13 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 0.16 | 0.01 | 0.10 | 0.36 | 0.35 |
| Maccioni | 0.28 | 0.16 | 0.36 | 0.28 | 0.33 | 0.18 | 0.05 | 0.55 | 0.37 | 0.42 |
| MCARI2 | 0.19 | 0.24 | 0.42 | 0.34 | 0.24 | 0.11 | 0.06 | 0.51 | 0.36 | 0.43 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.18 | 0.27 | 0.42 | 0.33 | 0.20 | 0.08 | 0.04 | 0.50 | 0.22 | 0.28 |
| MCARI/OSAVI | 0.10 | 0.01 | 0.16 | 0.10 | 0.38 | 0.27 | 0.03 | 0.30 | 0.23 | 0.27 |
| MTCI | 0.24 | 0.16 | 0.37 | 0.30 | 0.33 | 0.14 | 0.07 | 0.53 | 0.37 | 0.43 |
| NDVI | 0.32 | 0.26 | 0.41 | 0.45 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.53 | 0.48 |
| NDVI2 | 0.30 | 0.23 | 0.37 | 0.32 | 0.29 | 0.18 | 0.09 | 0.45 | 0.47 | 0.54 |
| OSAVI | 0.30 | 0.28 | 0.45 | 0.50 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 0.53 | 0.52 |
| OSAVI2 | 0.30 | 0.23 | 0.37 | 0.32 | 0.29 | 0.18 | 0.09 | 0.45 | 0.47 | 0.54 |
| PSND | 0.10 | 0.01 | 0.51 | 0.54 | 0.01 | 0.00 | 0.07 | 0.16 | 0.25 | 0.18 |
| PSSR | 0.21 | 0.22 | 0.42 | 0.41 | 0.11 | 0.07 | 0.05 | 0.19 | 0.44 | 0.43 |
| REP_Li | 0.26 | 0.13 | 0.31 | 0.25 | 0.29 | 0.19 | 0.02 | 0.59 | 0.35 | 0.41 |
| SR6 | 0.26 | 0.19 | 0.39 | 0.32 | 0.30 | 0.13 | 0.07 | 0.51 | 0.42 | 0.47 |
| TCARI | 0.01 | 0.03 | 0.18 | 0.20 | 0.31 | 0.24 | 0.10 | 0.00 | 0.12 | 0.11 |
| TCARI/OSAVI | 0.04 | 0.01 | 0.24 | 0.26 | 0.30 | 0.23 | 0.10 | 0.00 | 0.19 | 0.18 |
| Vogelmann | 0.27 | 0.18 | 0.42 | 0.31 | 0.32 | 0.12 | 0.03 | 0.49 | 0.37 | 0.40 |
| Vogelmann2 | 0.22 | 0.10 | 0.38 | 0.28 | 0.29 | 0.09 | 0.03 | 0.55 | 0.32 | 0.38 |

Příloha 5 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot LCC s VI ze spekter na úrovni listu v srpnu

| úroveň | dron | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------|------|------|------------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| spektra | převzorkované na 54 pásem | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| termíny | červen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | | | bezkoleneč | | | | metlice | | | | smilka | | | | třtina | | | |
| chlorofyl | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | |
| parametr struktury | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI |
| Carter4 | 0.53 | 0.48 | 0.25 | 0.49 | 0.13 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.05 | 0.08 | 0.14 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.20 | 0.07 | 0.28 | 0.31 | 0.40 |
| Datt | 0.15 | 0.02 | 0.19 | 0.08 | 0.15 | 0.01 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.21 | 0.06 | 0.18 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.04 |
| Datt2 | 0.46 | 0.50 | 0.17 | 0.48 | 0.31 | 0.14 | 0.31 | 0.13 | 0.04 | 0.09 | 0.13 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.19 | 0.31 | 0.09 | 0.32 | 0.29 | 0.41 |
| DD | 0.63 | 0.26 | 0.36 | 0.34 | 0.14 | 0.27 | 0.17 | 0.27 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.06 | 0.03 | 0.07 | 0.22 | 0.30 | 0.31 |
| Gitelson | 0.11 | 0.44 | 0.02 | 0.37 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 0.07 | 0.19 | 0.07 | 0.45 | 0.09 | 0.60 | 0.41 | 0.15 | 0.43 | 0.36 | 0.53 |
| Gitelson2 | 0.24 | 0.04 | 0.25 | 0.00 | 0.04 | 0.20 | 0.04 | 0.17 | 0.34 | 0.05 | 0.31 | 0.09 | 0.73 | 0.06 | 0.75 | 0.30 | 0.26 | 0.54 | 0.41 | 0.59 |
| Maccioni | 0.38 | 0.08 | 0.40 | 0.21 | 0.32 | 0.01 | 0.14 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.01 | 0.12 | 0.02 | 0.14 | 0.09 | 0.20 |
| MCARI2 | 0.54 | 0.28 | 0.27 | 0.33 | 0.19 | 0.25 | 0.20 | 0.24 | 0.00 | 0.06 | 0.09 | 0.01 | 0.09 | 0.02 | 0.00 | 0.12 | 0.11 | 0.29 | 0.37 | 0.38 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.60 | 0.26 | 0.32 | 0.32 | 0.11 | 0.06 | 0.09 | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.48 | 0.01 | 0.20 | 0.00 | 0.06 | 0.14 | 0.31 | 0.22 |
| MCARI/OSAVI | 0.43 | 0.38 | 0.16 | 0.35 | 0.19 | 0.03 | 0.12 | 0.02 | 0.01 | 0.18 | 0.15 | 0.06 | 0.77 | 0.19 | 0.35 | 0.07 | 0.22 | 0.15 | 0.34 | 0.16 |
| MTCI | 0.45 | 0.10 | 0.42 | 0.23 | 0.38 | 0.06 | 0.19 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.02 | 0.14 | 0.02 | 0.14 | 0.15 | 0.22 |
| NDVI | 0.48 | 0.57 | 0.18 | 0.53 | 0.28 | 0.15 | 0.27 | 0.13 | 0.08 | 0.16 | 0.20 | 0.11 | 0.01 | 0.01 | 0.16 | 0.26 | 0.11 | 0.35 | 0.37 | 0.46 |
| NDVI2 | 0.53 | 0.46 | 0.25 | 0.49 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.05 | 0.08 | 0.14 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 0.12 | 0.25 | 0.09 | 0.32 | 0.35 | 0.44 |
| OSAVI | 0.47 | 0.58 | 0.17 | 0.53 | 0.29 | 0.15 | 0.28 | 0.13 | 0.10 | 0.17 | 0.22 | 0.12 | 0.01 | 0.01 | 0.15 | 0.26 | 0.11 | 0.35 | 0.38 | 0.47 |
| OSAVI2 | 0.53 | 0.46 | 0.25 | 0.49 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.05 | 0.08 | 0.14 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.12 | 0.25 | 0.09 | 0.32 | 0.35 | 0.43 |
| PSND | 0.37 | 0.59 | 0.10 | 0.48 | 0.67 | 0.04 | 0.63 | 0.03 | 0.08 | 0.09 | 0.16 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0.20 | 0.27 | 0.08 | 0.31 | 0.31 | 0.41 |
| PSSR | 0.37 | 0.48 | 0.11 | 0.44 | 0.38 | 0.18 | 0.37 | 0.16 | 0.08 | 0.08 | 0.25 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.18 | 0.31 | 0.18 | 0.41 | 0.38 | 0.49 |
| REP_Li | 0.21 | 0.10 | 0.16 | 0.15 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.26 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 |
| SR6 | 0.50 | 0.41 | 0.22 | 0.44 | 0.15 | 0.18 | 0.16 | 0.17 | 0.05 | 0.07 | 0.16 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.14 | 0.28 | 0.11 | 0.34 | 0.35 | 0.45 |
| TCARI | 0.59 | 0.44 | 0.24 | 0.44 | 0.27 | 0.18 | 0.21 | 0.15 | 0.00 | 0.16 | 0.09 | 0.05 | 0.40 | 0.06 | 0.07 | 0.01 | 0.11 | 0.18 | 0.40 | 0.27 |
| TCARI/OSAVI | 0.38 | 0.21 | 0.19 | 0.22 | 0.15 | 0.02 | 0.10 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.84 | 0.22 | 0.44 | 0.13 | 0.02 | 0.16 | 0.03 | 0.18 |
| Vogelmann | 0.50 | 0.42 | 0.24 | 0.45 | 0.19 | 0.19 | 0.21 | 0.19 | 0.06 | 0.06 | 0.18 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.17 | 0.31 | 0.13 | 0.38 | 0.36 | 0.48 |
| Vogelmann2 | 0.55 | 0.39 | 0.27 | 0.43 | 0.14 | 0.23 | 0.17 | 0.22 | 0.00 | 0.04 | 0.09 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | 0.12 | 0.28 | 0.10 | 0.34 | 0.31 | 0.44 |

Příloha 6 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI ze spekter vyextrahovaných z HSI v červnu

| úroveň | dron | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------|------|------|------------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| spektra | převzorkované na 54 pásem | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| termíny | červenec | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | | | bezkoleneč | | | | metlice | | | | smilka | | | | třtina | | | |
| chlorofyl | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | |
| parametr struktury | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI |
| Carter4 | 0.22 | 0.09 | 0.28 | 0.14 | 0.27 | 0.22 | 0.30 | 0.28 | 0.10 | 0.02 | 0.15 | 0.00 | 0.45 | 0.07 | 0.08 | 0.19 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.10 |
| Datt | 0.21 | 0.05 | 0.30 | 0.10 | 0.12 | 0.00 | 0.37 | 0.03 | 0.00 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.59 | 0.02 | 0.19 | 0.08 | 0.57 | 0.26 | 0.63 | 0.23 |
| Datt2 | 0.26 | 0.11 | 0.28 | 0.14 | 0.25 | 0.16 | 0.40 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.10 | 0.00 | 0.52 | 0.07 | 0.10 | 0.20 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.21 |
| DD | 0.39 | 0.09 | 0.44 | 0.12 | 0.13 | 0.03 | 0.20 | 0.07 | 0.07 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.14 | 0.04 | 0.00 | 0.10 | 0.01 | 0.19 | 0.01 | 0.17 |
| Gitelson | 0.01 | 0.06 | 0.02 | 0.08 | 0.24 | 0.37 | 0.29 | 0.45 | 0.12 | 0.00 | 0.19 | 0.00 | 0.17 | 0.04 | 0.00 | 0.11 | 0.05 | 0.06 | 0.00 | 0.10 |
| Gitelson2 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.04 | 0.12 | 0.23 | 0.20 | 0.33 | 0.24 | 0.00 | 0.33 | 0.01 | 0.32 | 0.03 | 0.01 | 0.13 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.01 |
| Maccioni | 0.19 | 0.05 | 0.30 | 0.12 | 0.21 | 0.09 | 0.43 | 0.17 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.58 | 0.04 | 0.18 | 0.12 | 0.46 | 0.04 | 0.36 | 0.03 |
| MCARI2 | 0.33 | 0.10 | 0.36 | 0.13 | 0.14 | 0.07 | 0.24 | 0.13 | 0.16 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 0.34 | 0.08 | 0.05 | 0.18 | 0.01 | 0.18 | 0.00 | 0.16 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.36 | 0.09 | 0.39 | 0.11 | 0.10 | 0.02 | 0.20 | 0.07 | 0.20 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 0.24 | 0.06 | 0.04 | 0.13 | 0.00 | 0.21 | 0.00 | 0.20 |
| MCARI/OSAVI | 0.17 | 0.03 | 0.13 | 0.01 | 0.14 | 0.01 | 0.12 | 0.00 | 0.11 | 0.01 | 0.08 | 0.00 | 0.18 | 0.07 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.18 | 0.09 | 0.17 |
| MTCI | 0.19 | 0.06 | 0.27 | 0.12 | 0.23 | 0.09 | 0.45 | 0.17 | 0.03 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.57 | 0.06 | 0.13 | 0.16 | 0.35 | 0.03 | 0.25 | 0.02 |
| NDVI | 0.18 | 0.09 | 0.18 | 0.10 | 0.24 | 0.23 | 0.23 | 0.27 | 0.24 | 0.01 | 0.31 | 0.00 | 0.20 | 0.09 | 0.02 | 0.18 | 0.09 | 0.14 | 0.11 | 0.11 |
| NDVI2 | 0.22 | 0.09 | 0.28 | 0.14 | 0.26 | 0.21 | 0.30 | 0.27 | 0.09 | 0.01 | 0.14 | 0.00 | 0.42 | 0.09 | 0.06 | 0.22 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.08 |
| OSAVI | 0.18 | 0.08 | 0.17 | 0.09 | 0.23 | 0.22 | 0.21 | 0.26 | 0.27 | 0.01 | 0.33 | 0.00 | 0.27 | 0.08 | 0.04 | 0.17 | 0.10 | 0.15 | 0.12 | 0.12 |
| OSAVI2 | 0.22 | 0.09 | 0.28 | 0.14 | 0.26 | 0.21 | 0.30 | 0.27 | 0.10 | 0.01 | 0.14 | 0.00 | 0.42 | 0.09 | 0.06 | 0.22 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.08 |
| PSND | 0.14 | 0.07 | 0.11 | 0.06 | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.24 | 0.18 | 0.00 | 0.32 | 0.02 | 0.30 | 0.09 | 0.06 | 0.19 | 0.17 | 0.26 | 0.14 | 0.22 |
| PSSR | 0.15 | 0.07 | 0.13 | 0.06 | 0.08 | 0.12 | 0.17 | 0.22 | 0.22 | 0.01 | 0.30 | 0.02 | 0.32 | 0.21 | 0.04 | 0.35 | 0.02 | 0.14 | 0.04 | 0.12 |
| REP_Li | 0.43 | 0.13 | 0.48 | 0.17 | 0.38 | 0.21 | 0.71 | 0.31 | 0.09 | 0.09 | 0.04 | 0.03 | 0.16 | 0.03 | 0.08 | 0.06 | 0.28 | 0.26 | 0.37 | 0.26 |
| SR6 | 0.23 | 0.10 | 0.26 | 0.14 | 0.23 | 0.19 | 0.33 | 0.27 | 0.10 | 0.01 | 0.15 | 0.00 | 0.45 | 0.10 | 0.06 | 0.23 | 0.01 | 0.12 | 0.00 | 0.09 |
| TCARI | 0.12 | 0.01 | 0.13 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.23 | 0.03 | 0.10 | 0.00 | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.34 | 0.01 | 0.33 |
| TCARI/OSAVI | 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 0.56 | 0.46 | 0.66 | 0.51 | 0.18 | 0.03 | 0.06 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.40 | 0.00 | 0.41 |
| Vogelmann | 0.22 | 0.10 | 0.28 | 0.15 | 0.24 | 0.21 | 0.33 | 0.29 | 0.06 | 0.01 | 0.11 | 0.00 | 0.27 | 0.07 | 0.00 | 0.18 | 0.06 | 0.08 | 0.02 | 0.05 |
| Vogelmann2 | 0.34 | 0.12 | 0.41 | 0.17 | 0.36 | 0.27 | 0.46 | 0.33 | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.34 | 0.07 | 0.06 | 0.16 | 0.04 | 0.11 | 0.02 | 0.09 |

Příloha 7 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI ze spekter vyextrahovaných z HSI v červenci

| úroveň | dron | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------|------|------|------------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|------|
| spektra | převzorkované na 54 pásem | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| termíny | srpen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| druh | dohromady | | | | bezkoleneč | | | | metlice | | | | smilka | | | | třtina | | | |
| chlorofyl | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | | CCM-300 | | lab | |
| parametr struktury | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI | LAI | GLAI |
| Carter4 | 0.16 | 0.06 | 0.30 | 0.12 | 0.76 | 0.04 | 0.76 | 0.05 | 0.39 | 0.28 | 0.30 | 0.23 | 0.31 | 0.22 | 0.02 | 0.21 | 0.32 | 0.04 | 0.49 | 0.04 |
| Datt | 0.14 | 0.09 | 0.27 | 0.15 | 0.65 | 0.03 | 0.66 | 0.04 | 0.08 | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.35 | 0.01 | 0.41 | 0.08 | 0.02 | 0.15 | 0.06 | 0.16 |
| Datt2 | 0.14 | 0.05 | 0.26 | 0.11 | 0.75 | 0.00 | 0.80 | 0.01 | 0.22 | 0.14 | 0.25 | 0.13 | 0.42 | 0.06 | 0.12 | 0.04 | 0.22 | 0.02 | 0.35 | 0.02 |
| DD | 0.05 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.01 | 0.15 | 0.11 | 0.18 | 0.20 | 0.46 | 0.15 | 0.42 | 0.02 | 0.44 | 0.08 | 0.18 | 0.03 | 0.30 | 0.03 | 0.29 |
| Gitelson | 0.08 | 0.10 | 0.15 | 0.15 | 0.50 | 0.16 | 0.31 | 0.20 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.09 | 0.02 | 0.01 | 0.22 | 0.41 | 0.37 | 0.40 |
| Gitelson2 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 0.09 | 0.70 | 0.08 | 0.54 | 0.11 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.16 | 0.02 | 0.07 | 0.17 | 0.01 | 0.39 | 0.11 | 0.51 | 0.10 |
| Maccioni | 0.12 | 0.08 | 0.26 | 0.14 | 0.68 | 0.06 | 0.65 | 0.08 | 0.25 | 0.27 | 0.20 | 0.24 | 0.39 | 0.00 | 0.38 | 0.02 | 0.05 | 0.15 | 0.13 | 0.16 |
| MCARI2 | 0.09 | 0.00 | 0.19 | 0.02 | 0.21 | 0.08 | 0.43 | 0.09 | 0.21 | 0.43 | 0.18 | 0.40 | 0.04 | 0.55 | 0.03 | 0.31 | 0.11 | 0.18 | 0.13 | 0.17 |
| MCARI2/OSAVI2 | 0.05 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.08 | 0.12 | 0.24 | 0.13 | 0.19 | 0.42 | 0.16 | 0.39 | 0.00 | 0.46 | 0.03 | 0.21 | 0.00 | 0.45 | 0.00 | 0.43 |
| MCARI/OSAVI | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.11 | 0.00 | 0.13 | 0.05 | 0.14 | 0.04 | 0.13 | 0.08 | 0.25 | 0.01 | 0.14 | 0.02 | 0.38 | 0.01 | 0.38 |
| MTCI | 0.09 | 0.07 | 0.22 | 0.13 | 0.67 | 0.09 | 0.62 | 0.11 | 0.31 | 0.25 | 0.28 | 0.22 | 0.44 | 0.02 | 0.31 | 0.00 | 0.09 | 0.16 | 0.18 | 0.16 |
| NDVI | 0.17 | 0.03 | 0.28 | 0.08 | 0.77 | 0.00 | 0.89 | 0.00 | 0.38 | 0.24 | 0.30 | 0.18 | 0.19 | 0.32 | 0.03 | 0.46 | 0.33 | 0.01 | 0.47 | 0.01 |
| NDVI2 | 0.15 | 0.05 | 0.30 | 0.12 | 0.73 | 0.05 | 0.74 | 0.06 | 0.39 | 0.26 | 0.32 | 0.21 | 0.30 | 0.24 | 0.00 | 0.26 | 0.31 | 0.03 | 0.46 | 0.03 |
| OSAVI | 0.18 | 0.03 | 0.28 | 0.08 | 0.73 | 0.00 | 0.84 | 0.00 | 0.37 | 0.24 | 0.27 | 0.18 | 0.18 | 0.30 | 0.04 | 0.44 | 0.34 | 0.00 | 0.47 | 0.00 |
| OSAVI2 | 0.15 | 0.05 | 0.30 | 0.12 | 0.73 | 0.04 | 0.75 | 0.05 | 0.40 | 0.27 | 0.32 | 0.22 | 0.30 | 0.25 | 0.00 | 0.27 | 0.31 | 0.02 | 0.46 | 0.02 |
| PSND | 0.13 | 0.00 | 0.21 | 0.03 | 0.81 | 0.09 | 0.92 | 0.07 | 0.13 | 0.28 | 0.04 | 0.20 | 0.09 | 0.34 | 0.09 | 0.55 | 0.35 | 0.04 | 0.38 | 0.04 |
| PSSR | 0.09 | 0.01 | 0.18 | 0.05 | 0.87 | 0.01 | 0.92 | 0.00 | 0.19 | 0.13 | 0.21 | 0.12 | 0.29 | 0.26 | 0.00 | 0.36 | 0.27 | 0.03 | 0.31 | 0.04 |
| REP_Li | 0.22 | 0.08 | 0.35 | 0.13 | 0.44 | 0.01 | 0.48 | 0.01 | 0.00 | 0.28 | 0.00 | 0.28 | 0.29 | 0.01 | 0.57 | 0.13 | 0.01 | 0.11 | 0.05 | 0.13 |
| SR6 | 0.12 | 0.05 | 0.25 | 0.11 | 0.74 | 0.05 | 0.72 | 0.06 | 0.34 | 0.21 | 0.33 | 0.18 | 0.31 | 0.24 | 0.01 | 0.26 | 0.28 | 0.01 | 0.40 | 0.01 |
| TCARI | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.08 | 0.05 | 0.10 | 0.11 | 0.16 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | 0.27 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.25 | 0.01 | 0.24 |
| TCARI/OSAVI | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.17 | 0.08 | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.09 | 0.07 | 0.09 | 0.09 | 0.16 | 0.00 | 0.04 | 0.20 | 0.21 | 0.29 | 0.21 |
| Vogelmann | 0.13 | 0.06 | 0.27 | 0.13 | 0.75 | 0.05 | 0.73 | 0.07 | 0.32 | 0.22 | 0.28 | 0.18 | 0.38 | 0.14 | 0.04 | 0.14 | 0.33 | 0.03 | 0.45 | 0.03 |
| Vogelmann2 | 0.17 | 0.06 | 0.34 | 0.13 | 0.70 | 0.02 | 0.70 | 0.03 | 0.27 | 0.39 | 0.18 | 0.33 | 0.38 | 0.01 | 0.26 | 0.00 | 0.20 | 0.01 | 0.31 | 0.01 |

Příloha 8 Souhrnná tabulka koeficientů determinace lineární regrese z hodnot CCC s VI ze spekter vyextrahovaných z HSI v srpnu