

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Karel Prokopec

SLEDOVÁNÍ MÍRY DEFOLIACE LESNÍCH POROSTŮ PROSTŘEDKY DPZ

MONITORING OF DEFOLIATION USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Jan Kolář, CSc.

Praha 2017

Prohlášení

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

V Praze dne 24. 7. 2017

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Janu Kolářovi, CSc. za vedení mé diplomové práce, za věnovaný čas a odborné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Fabiánkovi a Mgr. Kateřině Neudertové Hellebrandové, Ph. D. za konzultace ohledně monitoringu stavu lesa – I. úrovně, tj. zejména o metodice sběru poskytnutých dat defoliace lesních porostů, dále RNDr. Martinu Haisovi, Ph. D. a Ing. Petru Lukešovi, Ph. D. za rady o výzkumu zdravotního stavu lesních porostů prostředky DPZ, doc. RNDr. Josef Ježek, CSc. a Mgr. Markétě Pavlíkové za rady o statistických metodách a Ing. Jiřímu Gureckému za poučené komentáře vybraných částí této práce. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a přátelům za jejich podporu během celého studia, zvláště mé tetě Haně za korektury textu této práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh metodiky pro stanovení míry defoliace ze snímků družic Landsat a Sentinel-2. První část práce je věnována úvodu do problematiky distančního měření pomocí multispektrálních senzorů a základům zkoumání lesních porostů. Na tuto část navazuje kapitola zabývající se možnostmi monitorování defoliace prostředky dálkového průzkumu Země, a s ní úzce spjatým zdravotním stavem lesních porostů. Následuje popis použitých dat (družicových snímků i údajů z pozemního šetření od VÚLHM) a logicky sestavený proces transformace údajů z družicových snímků na hodnoty defoliace. Výsledky práce obsahují rozbor schopnosti samostatných spektrálních pásem a vegetačních indexů predikce defoliace zvláště smrkových (*Picea abies*) a borovicových (*Pinus sylvestris*) porostů. Stanovení míry defoliace je předvedeno na pásmech blízkého infračerveného pásma pomocí lineárního regresního modelu.

Klíčová slova

smrk ztepilý (*Picea abies*), borovice lesní (*Pinus sylvestris*), Landsat, Sentinel-2, defoliace, dálkový průzkum Země

Abstract

The aim of this diploma thesis is a proposal of a methodology used for an assessment of the measure of defoliation based on the multispectral satellite images from missions Landsat and Sentinel-2. The first part of the thesis is dedicated to the introduction of the problematics of remote sensing using multispectral sensors and the basics of research into forest vegetation. Following on this part, there is a chapter considering possibilities of monitoring defoliation using resources of remote sensing, and the closely connected problematics of the health condition of forest vegetation. After that comes a description of the used data (the satellite images and the data of ground investigation by VÚLHM) and logically compounded process of transformation of the data from satellite images on the levels of defoliation. Outcomes of the thesis include analysis of the ability of single spectral bands and vegetation indices to predict defoliation of Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) vegetation. The assessment of the measure of defoliation is demonstrated on single band in near-infrared region with used of linear regression model.

Key words

Norway spruce (*Picea abies*), Scots pine (*Pinus sylvestris*), Landsat, Sentinel-2, defoliation remote sensing

OBSAH

1 Úvod	11
2 Úvod do problematiky	13
2.1 Dálkový průzkum Země	13
2.2 Spektrální projev listu.....	15
2.3 Spektrální projev vegetace	18
3 Metodika monitorování lesních porostů	20
3.1 ICP Forests.....	20
3.2 Vývoj defoliace v Česku	20
3.3 Monitorování stavu lesních porostů prostředky DPZ	22
3.4 Hodnocení zdravotního stavu lesa prostředky DPZ v Česku	24
3.5 Odborné studie defoliace	25
3.6 Transformace spektrálního prostoru	28
3.6.1 Spektrální indexy	29
4 Data a postup	32
4.1 Charakteristika zájmového území	32
4.2 Definice defoliace	33
4.3 Použitá data – pozemní šetření	34
4.4 Použitá data – Sentinel-2.....	39
4.5 Použitá data – Landsat	42
4.6 Předzpracování družicových dat.....	45
4.7 Stanovení spektrálního projevu defoliace	47
5 Výsledky	51
5.1 Vztah údajů z pozemního šetření defoliace a radiometrických hodnot spektrálních pásem satelitních snímků	51
5.2 Reprezentativnost výzkumné plochy pro její okolí.....	56
5.3 Spektrální indexy	57
6 Diskuze	60
7 Závěr	68
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
SEZNAM ZDROJŮ DAT	75
SEZNAM PŘÍLOH.....	76

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

6S	Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
B	Band
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
CA	Coastal/Aerosol
CCMEO	Canada Centre for Mapping and Earth Observation
CDR	Climate Data Record
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
DMR	Digitální model reliéfu
DN	Digital numbers
DPZ	Dálkový průzkum Země
DTED	Digital Terrain Elevation Data
EEA	European Environmental Agency
ENVI	Environment for Visualizing Images
EPSG	European Petroleum Survey Group
EROS	Earth Resources Observation and Science
ESA	European Space Agency
ESPA	EROS Science processing architecture
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EVI	Enhanced Vegetation Index
EWDI	Enhanced Water Difference Index
Fmask	Function of mask
GIS	Geographic information system
GloVis	Global Visualization Viewer
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GPS	Global positioning system

ICP Forests	International Co-operative Program on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests
IČ	Infračervená část spektra
ID	Identification number
LaSRC	Landsat Surface Reflectance Code
LEDAPS	Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System
LiDAR	Light Detection And Ranging
MODIS	Moderate-resolution imaging spectroradiometer
MSI	Moisture Stress Index
MSI	MultiSpectral Imager
MZČR	Ministerstvo zemědělství České republiky
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBRI	Normalized Burn Ratio Index
NDII	Normalized Difference Infrared Index
NDIib6	Normalized Difference Infrared Index (band 6)
NDIib7	Normalized Difference Infrared Index (band7)
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Near Infrared
OLI	Operational Land Imager
PAN	Panchromatic
PCA	Principal Component Analysis
QGIS	Quantum GIS
R	Korelační koeficient
R²	Koeficient determinace
RMSE	Root Mean Square Error
SAGA	System of Automated Geoscientific Analyses
SHP	Shapefile
SNAP	Sentinel Application Platform
SPOT HRVIR	SPOT High-resolution Visible and Infrared

SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
STEP	Science Toolbox Exploitation Platform
SW	Software
SWIR	Short-wave infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
ToA	Top of Atmosphere
ÚHUL	Ústav pro hospodářskou úpravu lesů
USGS	United States Geological Survey
UTM 33N	Universal Transverse Mercator 33 North
VIS	Visible
VÚLHM	Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti
WGS84	World Geodetic System 1984
WMS	Web Map Service
XLSX	Excel Microsoft Office Open XML Format Spreadsheet file
ZM10	Základní Mapa České republiky 1 : 10 000

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulky

Tab. 1	Specifické vzorce spektrálních indexů pro různé senzory.....	31
Tab. 2	Popisné statistické údaje o souboru dat pozemního šetření defoliace smrkových porostů	36
Tab. 3	Popisné statistické údaje o souboru dat pozemního šetření defoliace borovicových porostů	37
Tab. 4	Hodnoty RMSE tj. střední kvadratické chyby pro střed ploch pozemního šetření defoliace	39
Tab. 5	Spektrální a prostorové rozlišení senzoru MSI na družici Sentinel-2.....	41
Tab. 6	Použité scény Sentinel-2 a jejich prostorový rozsah	41
Tab. 7	Spektrální a prostorové rozlišení senzoru OLI a TIRS na družici Landsat 8.....	43
Tab. 8	Spektrální a prostorové rozlišení senzoru ETM+ na družici Landsat7	44
Tab. 9	Použité scény družic Landsat 7 a 8.....	44
Tab. 10	Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru MSI a parametrů terénu	47
Tab. 11	Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace smrkových porostů	52
Tab. 12	Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace borovicových porostů.....	53
Tab. 13	Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem sensorů OLI, resp. ETM+ a údajů z pozemního šetření defoliace smrkových porostů	54
Tab. 14	Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru OLI, resp. ETM+ a údajů z pozemního šetření defoliace borovicových porostů.....	54

Tab. 15	Korelace radiometrických dat (průměr za vybrané pixely) ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace smrkových porostů	56
Tab. 16	Korelace radiometrických dat (průměr za vybrané pixely) ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace borovicových porostů.....	56
Tab. 17	Korelace vegetačních indexů odvozených z dat senzoru MSI na defoliaci smrkových porostů	58
Tab. 18	Korelace vegetačních indexů odvozených z dat senzoru MSI na defoliaci borovicových porostů.....	59

Obrázky

Obr. 1	Schéma procesu získávání informací za pomoci DPZ.....	14
Obr. 2	Spektrální křivka odrazivosti listu	17
Obr. 3	Mapa vybraných ploch pozemního šetření defoliace.....	33
Obr. 4	Vizuální hodnocení defoliace na plochách pozemního šetření.....	35
Obr. 5	Ukázka defoliace smrku ztepilého 20 % (vlevo) a 55 % (vpravo)	35

Grafy

Graf 1	Defoliace jehličnatých porostů mladších 59 let mezi lety 1998 až 2011	21
Graf 2	Defoliace jehličnatých porostů starších 59 let mezi lety 1998 až 2011.....	22
Graf 3	Bodový graf relativních hodnot odrazivosti pásma B8A (senzoru MSI ve scéně z 4. 8. 2016) a údajů o defoliaci z pozemního šetření a zavedený regresní model	55

1 Úvod

Analýza a detekce změn zdravotního stavu vegetace je klíčem k monitorování a hospodaření s přírodními zdroji. Proto je detekce a kvantitativní přístup k hodnocení lesních porostů jedním z hlavních odvětví dálkového průzkumu Země (déle jen DPZ), který je pro monitorování zdravotního stavu lesních porostů vhodný. K určení rozsahu poškození lesních porostů se s úspěchem využívá sledování míry defoliace. Výsledky DPZ slouží k podpoře rozhodování a hospodaření s lesními porosty, což přispívá k dodržování principu trvale udržitelného hospodářství, tj. zajištění produkce kvalitní dřevní hmoty spolu se zachováním ochranných a společenských funkcí lesa.

Na úrovni celosvětového ekosystému je zdravotní stav lesních porostů ohrožován faktory, jakými jsou např. globální změna klimatu, znečištění atmosféry, přírodní katastrofy nebo zvyšující se lidské aktivity. Z těchto důvodů vzniká potřeba monitorovat a kvantitativně měřit změnu zdravotního stavu, jako i defoliace, lesních porostů, která úzce souvisí s jejich poškozením. Zdravotní stav může být definován různými způsoby, vždy záleží na perspektivě, kterou si zvolíme např. ekologickou, biologickou nebo ekonomickou. Vztah mezi příčinou a symptomem snižujícím kvalitu zdravotního stavu je velice komplexní, neboť stejný symptom může být zapříčiněn různými stresovými faktory. Další obtíž spočívá v rychlých změnách charakteru škodlivých faktorů působících na lesní porosty a zpoždění, se kterým na ně lesní ekosystémy reagují.

Moderní metody používané v DPZ k monitorování zdravotního stavu lesních porostů poskytují širokou škálu technik využitelných k pořizování informací o zdravotním stavu na velkém území při zachování přiměřeného prostorového rozlišení. Pro určování zdravotního stavu lesních porostů pomocí DPZ se často využívá spektrálních příznaků typických pro zelenou vegetaci, resp. lesní porosty.

Lesní porosty v Česku

Česko se řadí mezi země s vysokým podílem lesních porostů, které tvoří od počátku druhého tisíciletí více než třetinu plochy státu. Stávají se tak významným krajínotvorným činitelem a přispívají k celkovému charakteru krajiny Česka. Dynamika interakce mezi společností a lesními porosty se v posledních sto letech natolik zintenzivnila, že začalo docházet k závažným

potížím lesních ekosystémů na úrovni zdravotního stavu nebo druhové skladby.

Dlouhá historie lesnictví sahá na českém území až do 14. století a dokládá významnou úlohu lesů ve vztahu společnosti a přírody. Již v 18. století snaha zajistit trvalý a vyrovnaný hospodářský výnos z lesa vedla k zavedení hospodářské úpravy lesů. To ovšem mělo za následek pěstování především smrkových a borových porostů, a to často i na nevhodných stanovištích. Zejména od počátku osmdesátých let 20. století došlo v důsledku hospodářského vývoje ke značné produkci škodlivých látek a jejich vypouštění do ovzduší, což negativně ovlivnilo zdravotní stav lesů. Více o vývoji zdravotního stavu lesních porostů v Česku zjišťovaného pomocí míry defoliace je uvedeno v kapitole 3.2 Vývoj defoliace v Česku. Celková plocha lesních porostů se od druhé poloviny 20. století díky zalesňování neúrodných zemědělských ploch soustavným pomalým tempem zvětšuje.

2 Úvod do problematiky

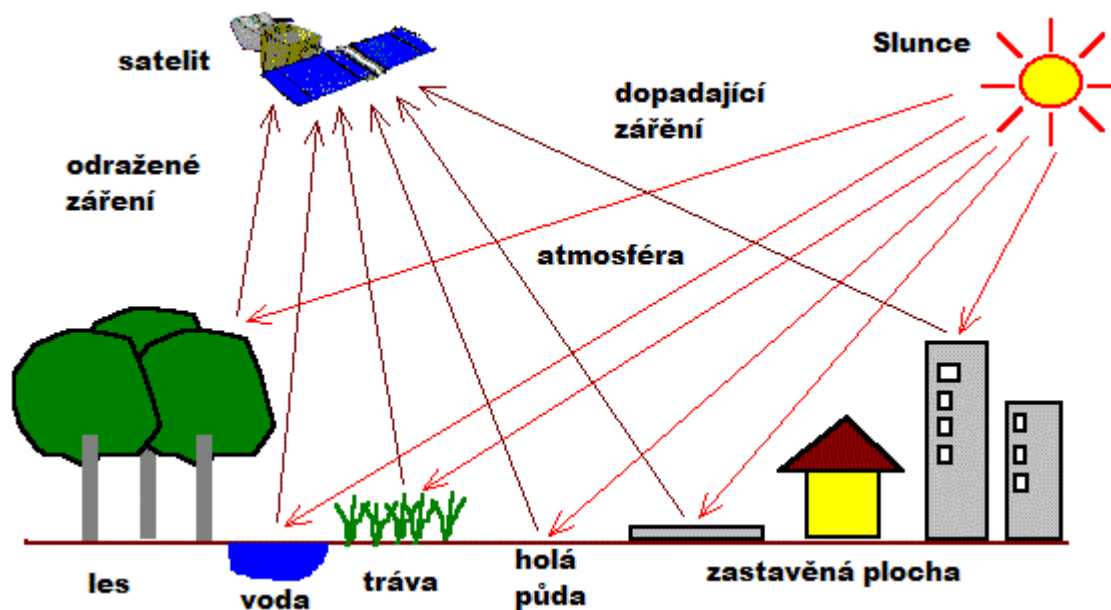
Následující kapitola práce provádí vhléd do principů dálkového průzkumu Země (dále jen DPZ), resp. zejména do segmentu, který byl využit v této práci. DPZ představuje metodu získávání informací o jednotlivých objektech či jevech nacházejících se na zemském povrchu, ale i nad či pod ním, bez přímého kontaktu s těmito objekty či jevy. Pořizování dat zastávají senzory, které zachycují od Země nebo atmosféry (zejména mraků) odražené elektromagnetické záření původem ze Slunce, nebo Zemí emitované elektromagnetické záření. Záření emitované Sluncem se nachází zejména v těchto třech spektrálních oblastech: viditelná část spektra (VIS), blízká infračervená část spektra (NIR) a střední infračervená část (SWIR). Na delších vlnových délkách již postupně začne převládat tepelné záření emitované zemským povrchem nad odraženým zářením od Slunce. V dnešní době se senzory běžně umisťují na pozorovací družice, které obíhají kolem Země a pořizují velké množství dat (Schowengerdt, 2007).

2.1 Dálkový průzkum Země

Zářivá energie emitovaná objektem zájmu nebo od něho odražená je ve formě elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření, se skládá z elektrického a magnetického pole, je charakterizováno vlnovou délkou (značka: $[\lambda]$, základní jednotka: [m]) a frekvencí (značka: [f], základní jednotka: [Hz]), informace se za pomoci elektromagnetické záření šíří rychlostí světla. Zejména pomocí těchto fyzikálních veličin probíhá sběr dat DPZ, tj. měření energie na vlnové délce.

V procesu získávání informací za pomoci DPZ (viz Obrázek 1), pro který je rozhodující interakce mezi dopadajícím zářením a objektem zájmu, jsou zapojeny následující prvky: zdroj elektromagnetického záření, interakce elektromagnetického záření s atmosférou, interakce elektromagnetického záření s objektem zájmu, zaznamenání zářivé energie na senzoru, přijetí a zpracování signálu, interpretace a analýza surových dat (Jensen, 2005).

Obrázek 1: Schéma procesu získávání informací za pomoci DPZ



Zdroj: S. C. Liew, 2001, upraveno

Jelikož Slunce vyzařuje na širokém spektru vlnových délek, je pro DPZ výhodné se zaměřit pouze na takové části spektra, které mají největší intenzitu. Mezi tyto části spektra patří viditelná, infračervená a mikrovlnná část.

Radiace přicházející od Slunce a dopadající na zemský povrch interaguje se zemským povrchem jednou (nebo kombinací) ze tří forem. Elektromagnetická vlna se může od tělesa zemského povrchu odrazit, může být absorbována nebo při nízké absorpci a malých rozměrech tělesa může záření tělesem projít. DPZ zkoumá záření, které je od zemského povrchu odražené, nebo záření zemským povrchem emitované. Pasivní senzory na pozorovacích družicích dokáží toto záření zachytit a změřit, sami žádné záření, které slouží ke zkoumání povrchu Země, neemitují.

Elektromagnetické záření dopadající na detektor odražené od povrchu Země nutně putuje skrze zemskou atmosféru. Částice plynů, ale také kapalin a pevných látek (aerosolů) nacházejících se v atmosféře, interagují s procházejícím zářením, které je díky tomu atmosférou ovlivněno. Při průchodu záření atmosférou nastávají dva mechanismy, kterými je záření ovlivněno. Prvním je rozptyl, při kterém větší částice plynů a aerosolů zapříčiní změnu směru záření. Dalším mechanismem, kterým atmosféra ovlivňuje procházející záření, je absorpce, která na rozdíl od rozptylu nezpůsobuje změnu směru záření, ale změnu vnitřní energie částice. Zatímco absorpce má za následek snížení intenzity dopadajícího záření na senzor, rozptyl se může

projevit snížením i zvýšením intenzity dopadajícího záření. Protože atmosféra může mít díky těmto procesům na intenzitu záření dopadajícího na senzor velký vliv, využívají se v praxi tzv. atmosférická okna. Atmosférická okna jsou součástí spektra o specifické vlnové délce, ve kterých nedochází k značnému ovlivnění záření vlivem absorpce v atmosféře (Jensen, 2005).

Data pořízená senzory na družicích vyžadují následné úpravy souhrnně označované jako předzpracování. Cíle těchto úprav lze podle Schowengerdt (2007) rozdělit do těchto čtyř základních skupin:

- radiometrická kalibrace,
- geometrická korekce,
- odstranění šumu způsobeného senzorem,
- úprava do standardního datového formátu.

Různé techniky používané při předzpracování dat se zaměřují na odstranění nežádoucích charakteristik obrazu způsobených senzorem. S rozvojem odvětví DPZ instituce poskytující data dálkového průzkumu nabízejí svým zákazníkům data na různých úrovních předzpracování a je na uživateli, aby zvolil správnou úroveň pro svoji aplikaci dat. Popis úrovně předzpracování snímků použitých v této práci se nachází v kapitole (4.6 Předzpracování družicových dat).

Každý přístroj využívaný k DPZ má čtyři základní rozlišovací schopnosti, a to prostorové, spektrální, radiometrické a časové rozlišení. Prostorové rozlišení určuje velikost plochy na zemském povrchu, již odpovídá naměřený údaj. Podle počtu a šířky spektrálních pásem přístroje se stanovuje spektrální rozlišovací schopnost. Podle rozsahu digitálních hodnot, které je senzor schopný rozlišit na určitém spektrálním pásmu měření, se stanovuje radiometrická rozlišovací schopnost. A časové rozlišení se určuje podle doby po sobě jdoucích snímaní stejného území.

2.2 Spektrální projev listu

Každý objekt emituje a odráží elektromagnetické záření. Intenzita odraženého či emitovaného elektromagnetického záření se na spektru vlnových délek mění v závislosti na vlastnostech objektu. Intenzita emitovaného a odraženého záření je závislá na elektromagnetických vlastnostech objektu. Protože má vegetace specifické elektromagnetické vlastnosti, je možné ji pomocí

spektrálních příznaků jednak odlišit od ostatního půdního pokryvu. A díky odlišnému spektrálnímu chování zdravé a poškozené vegetace je možné zjistit její momentální zdravotní stav za podmínky změření odlišného spektrálního projevu senzorem.

Měření metodou DPZ zachycuje zářivou energii přicházející z části zemského povrchu, která je definována použitou technikou měření. Geometrie senzoru nebo úhel pozorování určují polohu a tvar snímané oblasti. Data pořízená z dané části zemského povrchu jsou vždy komplexní. Projevuje se zde zejména vliv listů, dalších částí stromů a dále prostředí, v kterém lesní porosty rostou. Informace o spektrální odrazivosti listů v datech převažuje nad spektrální odrazivostí prostředí (např. půdy).

Spektrální křivka a spektrální příznaky

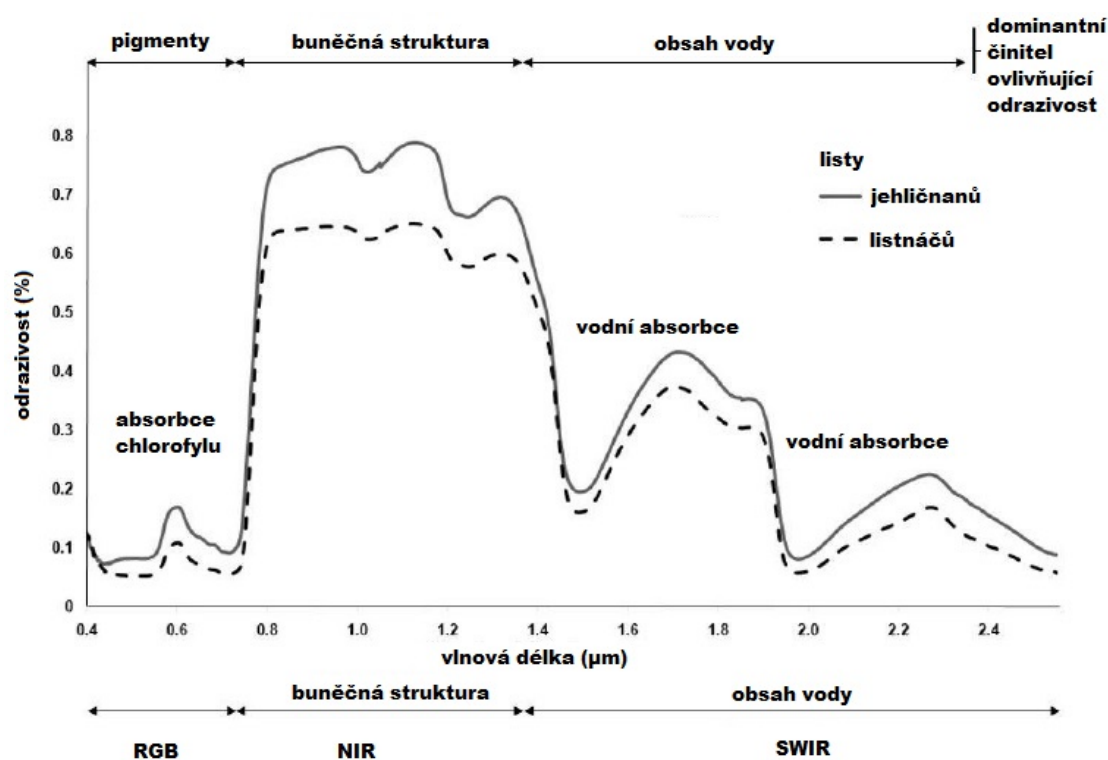
Pro interpretaci dat pořízených metodami DPZ se často využívá tzv. spektrální křivka. Spektrální křivku vytvoříme vynesáním do grafu následujících dvou proměnných: podílu odraženého záření ku dopadajícímu (na osu x) a vlnové délky (na osu y). Spektrální křivka má odlišný charakter průběhu pro různé druhy objektů, pro objekty stejného druhu např. listnaté lesy a jehličnaté se liší již v menší míře viz dále v této kapitole. Tyto odlišnosti v průběhu spektrální křivky se využívají k rozlišení druhů objektů a následně k jejich klasifikaci. Hledání rozdílných vzorů v průběhu spektrální křivky je jednou ze zásadních činností při interpretaci družicových snímků.

Spektrální příznaky jsou vlastnosti objektu, které ho spektrálně odlišují od ostatních objektů. Spektrální příznaky typické pro zdravou i poškozenou vegetaci byly zjištěny a ověřeny experimentálně v laboratorních podmínkách jako i při měření v terénu pomocí přístrojů umístěných v letadlech či na satelitech. Při charakterizování spektrálních vlastností vegetace se nejčastěji využívá odrazových vlastností listu. Tyto vlastnosti jsou určeny vnitřními činiteli, jako je např. morfologie listu, obsah biogenních látek v listu apod.

Na obrázku 2 je pomocí spektrální křivky znázorněno spektrální chování „průměrného“ listu ve viditelné a IČ spektra, které lze rozdělit na tři hlavní části podle hlavních činitelů, kteří ho ovlivňují (s hrubými vlnovými délkami):

- oblast pigmentační absorpce (400 – 700 nm),
- oblast buněčné struktury (700 – 1 300 nm),
- oblast vodní absorpce (1 300 – 3000 nm).

Obrázek 2: Spektrální křivka odrazivosti listu



Zdroj: Weber, 2015, upraveno

A. Oblasti pigmentační absorpce

V oblasti pigmentační absorpce dosahuje odrazivost nízkých hodnot jako důsledek nejintenzivnějšího pohlcování těchto vlnových délek (oblast červené viditelné části spektra) listovými pigmenty – zejména chlorofylem, který tvoří až 65 % listového barviva. Dalšími barvivy obsaženými v listech jsou karotenoidy. Karotenoidy dosahují minima odrazivosti v modré (okolo 450 nm) části spektra. Vliv karotenoidů na spektrální křivku zdravého listu není příliš patrný, neboť zelené barvivo chlorofyl absorbuje záření podobných vlnových délek. Když se kondice listu sníží (např. stárnutím), sníží se i absolutní zastoupení chlorofylu v něm, což má za následek zvýšení relativního množství karotenoidů, ale i dalších rostlinných barviv, jejichž vliv začne být zřejmý. Tento proces můžeme pozorovat každoročně při změně barvy listů během podzimního období. Nárůst obsahu chlorofylu se projevuje prohloubením absorpčního pásu 680 nm, jeho posunem k větším vlnovým délkám a snížením maxima odrazivosti okolo 540 nm.

B. Oblast buněčné struktury

V oblasti kolem 700 nm dochází k výraznému nárůstu odrazivosti. Tato rapidní změna, kdy se odrazivost listu mění o řádově desítky procent, se nazývá „Red Edge“. Žádný jiný typ půdního pokryvu, než je vegetace, se touto

prudkou změnou nevyznačuje. Proto se právě poloha této prudké změny odrazivosti využívá jak pro konstrukci mnoha vegetačních indexů, tak pro odlišení vegetace od ostatního půdního pokryvu. Odrazivost v tomto spektrálním intervalu je formována především morfologickou strukturou a chemickým složením listů. Ačkoli je stavební látkou listů celulóza, která v této části spektra vykazuje nízkou odrazivost, díky několikanásobnému odrazu uvnitř listu je skutečná hodnota odrazivosti v IČ oboru světla vysoká.

C. Oblast vodní absorpce

V oboru spektra mezi 1 300 – 3 000 nm je odrazivost utvářena zejména výraznými absorpčními pásy vody. Absorpční pásy vody se nacházejí na vlnových délkách 1 400, 1 900 a 2 700 nm. Lokální maxima odrazivosti jsou lokalizována na vlnových délkách 1 600 a 2 200 nm. Spektrální křivka horní vrstvy listů může obsahovat další dva vedlejší absorpční pásy vody na vlnových délkách 960 a 1 100 nm. V této části spektra je odrazivost přibližně nepřímo úměrná obsahu vody v listu.

2.3 Spektrální projev vegetace

Praktické měření metodami DPZ z oběžných drah Země se provádí s takovým prostorovým rozlišením, které neumožňuje studium jednotlivých listů. Spektrální vlastnosti lesního porostu jsou odlišné od těch jednotlivých listů. Spektrální projev lesních porostů označuje komplexní percepci dílčích částí vegetace i okolí. Důležitou úlohu hraje několikanásobný odraz na vrstvách listoví a rozptyl na různě orientovaných listech. Několikanásobný odraz je umožněn částečnou propustností vrstvy listoví a zvyšuje celkovou odrazivost lesních porostů zejména ve spektrálním intervalu 750 – 1 400 nm. Významný vliv při analýze lesních porostů měřeními DPZ má hustota porostu. Při její nízké hodnotě se podstatně zvyšuje vliv podrostu nebo půdy ve výsledném spektrálním chování.

Spektrální chování listů se pravidelně mění v závislosti na fenologické fázi a nepravidelně v důsledku působení stresových činitelů na rostlinu. Spektrální projev lesního porostu je určen stejnými vlivy, a navíc vzájemným ovlivněním (např. vícenásobným odrazem) listů a dalších částí rostlin. Všeobecně se zhoršený zdravotní stav vegetace projevuje poklesem odrazivosti v blízké infračervené části spektra a nárůstem v červené části spektra. Nejprve

se změna zdravotního stavu projevuje v infračervené části spektra a až poté ve viditelné části spektra. V oblasti blízkého infračerveného záření působí antagonistické vlivy na odrazivost vegetace, jednak je známo, že zdravá vegetace se vyznačuje vysokou odrazivostí v této části spektra, ovšem pokles vody je spojen s poklesem vitality vegetace a způsobuje pokles odrazivosti. Ve střední infračervené oblasti se vliv poklesu obsahu vody i chlorofylu projevuje stejně, tj. zvýšením odrazivosti.

Změny v hodnotách odrazivosti na jednotlivých vlnových délkách se dějí právě jako důsledek různých stresů, kterým je vegetace vystavena, a proto lze pomocí monitorování velikosti těchto změn hodnotit zdravotní stav vegetace. Spektrální vlastnosti vegetace nejvýznamněji ovlivňuje obsah vody. Snížení obsahu vody v listu způsobuje zvýšení odrazivosti především v infračervené části spektra, protože mění vnitřní strukturu listu i obsah chlorofylu.

3 Metodika monitorování lesních porostů

Tato kapitola přináší rozbor základních výzkumných metod vybraných pro získání informace o defoliaci. Výklad je podepřen odbornými zdroji a poskytuje tak aparát pro následující aplikační část práce. Cílem je nalézt a diskutovat takové metody, které umožňují určení míry defoliace z multispektrálních satelitních snímků Landsat a Sentinel-2.

3.1 ICP Forests

ICP Forests (International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effect in Forests – ICP Forests) Mezinárodní kooperativní program sledování a vyhodnocování vlivu znečištění na lesy byl založen roku 1986 a Česko je členem programu od téhož roku. V současnosti se programu účastní 42 států.

Program si klade za cíl na evropské úrovni koordinovat shromažďování porovnatelných údajů o změnách lesních porostů, které souvisejí s aktuálním stavem. Ze získávaných údajů se dále v rámci programu zpracovávají odborné studie přispívající k prohloubení znalostí o příčinách poškození lesních porostů s důrazem na kritické zatížení a stupeň znečištění ovzduší (ICP Forests, 2011).

V Česku se sběr dat provádí na dvou úrovních (I. a II.) monitoringu. Data ze sledování lesních porostů na I. úrovni monitoringu (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření) byla použita pro verifikaci výsledků získaných zpracováním družicových snímků (viz kapitola 5 Výsledky). Sledování na I. úrovni monitoringu představuje údaje získané pozemním šetřením na trvalých výzkumných plochách (VÚLHM, 2012).

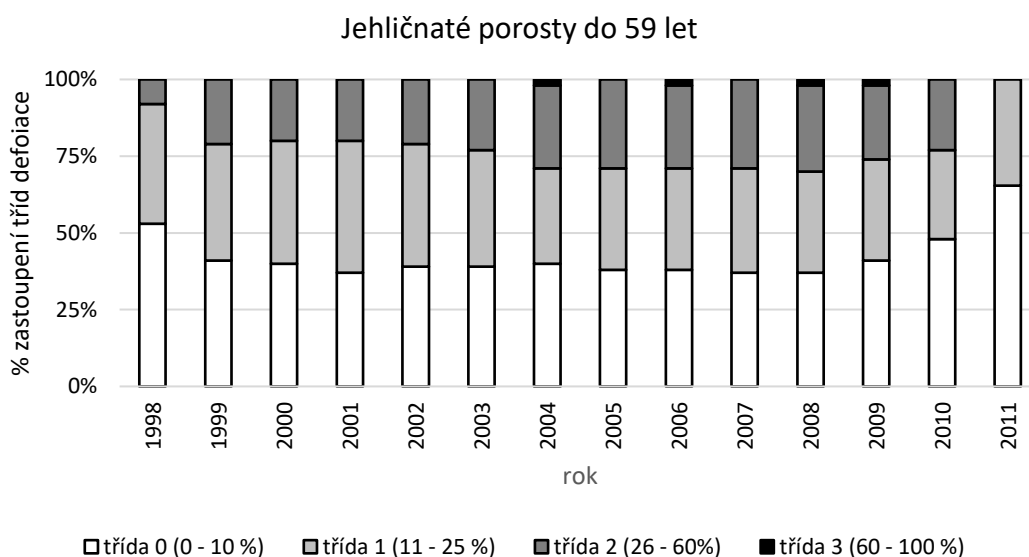
Tuto činnost provádí VÚLHM. V současné době je pravidelné hodnocení I. úrovně prováděno na plochách v celkovém počtu 306 ploch, které jsou rozmístěny rovnoměrně podle lesnatosti po celém území Česka.

3.2 Vývoj defoliace v Česku

Následující kapitola nevychází z vlastní analýzy autora, nýbrž z dlouhodobého sledování monitorovacích ploch I. úrovně prováděném VÚLHM. Studii o vývoji defoliace publikoval VÚLHM (MZČR a VÚLHM, 2004). Defoliace u porostů starších než 59 let (viz Graf 2) ve sledovaném období 1986 – 2011

vykazuje u smrků a borovic odlišnou dynamiku. V průběhu konce osmdesátých let došlo k prudkému nárůstu defoliace, v následujícím období devadesátých let tato dynamika vývoje defoliace výrazně poklesla a po roce 2000 následovaly jen velmi mírné změny. Ve sledovaném období 1986 – 2011 dosáhla průměrná hodnota defoliace smrku a borovice výrazného kulminačního bodu v roce 1992. Následovala stagnace, v roce 1996 průměrná defoliace těchto dřevin opět stoupla a dosáhla maximální hodnoty (smrk 33,9 %, borovice 38,3 %). V dalších letech následoval pokles a počínajíc rokem 1999 defoliace velmi mírně stoupala až do roku 2009. Poslední dva roky vykazují mírný pokles defoliace.

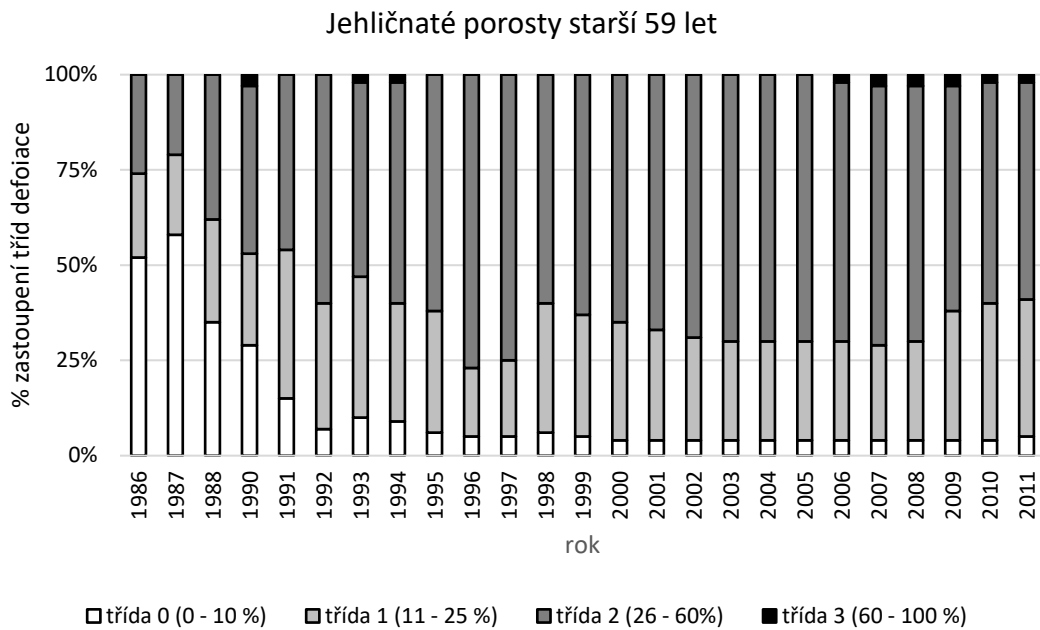
Graf 1: Defoliace jehličnatých porostů mladších 59 let mezi lety 1998 až 2011



Zdroj: VÚLHM, 2012, upraveno

Jak je vidět na Grafu 1 mladší porosty (do 59 let) jehličnatých dřevin dosahují v porovnání se staršími porosty všeobecně nižších hodnot defoliace, tzn. jsou vitálnější. Nejlépe lze tento rozdíl pozorovat u smrku, a naopak nejméně výrazný je u borovice. Borovice má u obou věkových kategorií vyšší procento defoliace než ostatní zástupci skupiny jehličnanů. V období let 1998 až 2008 defoliace u mladších jehličnanů mírně stoupala, od roku 2009 ale začala zřetelně klesat.

Graf 2: Defoliace jehličnatých porostů starších 59 let mezi lety 1998 až 2011



Zdroj: VÚLHM, 2012, upraveno

3.3 Monitorování stavu lesních porostů prostředky DPZ

Monitoring stavu lesních porostů je potřebný a řadí se do něj i stanovování míry defoliace. Podněty pro sledování se odvíjejí od klimatických změn, znečištění ovzduší a také zvyšující se lidské aktivity. Identifikace činitelů, stresových faktorů, způsobujících defoliace není předmětem zájmu této práce. Prostředky DPZ umožňují měření stavu a defoliace lesních porostů na rozsáhlém území s relevantní mírou přesnosti.

Počátky využití metod DPZ pro monitorování lesních porostů sahají až do konce 19. století, kdy bylo využito horkovzdušného balónu jako platformy pro pořízení fotografií lesů v okolí Berlína (Ho, 2009). Během druhé světové války, a zvláště po ní, došlo k zvedení leteckého snímkování pro vojenské i civilní účely. Vývoj pokračoval s technologií stereofotogrammetrie použitou v lesnické praxi. Následovaly fotografie v nepravých barvách a využití satelitů jako nosiče senzorů, již s multispektrálním měřením na více pásmech vlnových délek, než je schopné zpracovat lidské oko. Další pokrok představovala aplikace leteckého laserového snímání (LiDAR – Light Detection And Ranging), která z velké části nahradila stereofotogrammetrii. Nejrecentnější vývoj dnes představuje technologie pořizující (a následně zpracovávající) hyperspektrální data. Hyperspektrální data představují nový přístup

k hodnocení různých parametrů lesních porostů. K těmto parametrům zjistitelným pomocí hyperspektrálních dat patří určení obsahu/koncentrace uhlíku, dusíku nebo listových pigmentů. Dále tato technologie pomohla zlepšit chápání biologických procesů jako je fotosyntéza, respirace nebo dekompozice. Dohromady tyto metody DPZ poskytují množství relevantních informací o lesních porostech (Ho, 2009).

Mezi nejčastěji používané senzory pro posouzení stavu lesních porostů se řadí multispektrální se středním až vysokým prostorovým rozlišením, zejména pak tyto: TM, ETM+, OLI a TIRS na družicích mise Landsat, MODIS na družicích Terra a Aqua, ASTER na družici Terra, Spot 4 a 5, IKONOS-2 a Quickbird-2. Každý senzor má svá pro a proti důsledkem různých parametrů. Odlišnosti senzorů se týkají jejich prostorového, časového a spektrálního rozlišení, dostupností dat pro zájmová území i pořizovacími náklady (J. Wang et al., 2010).

Pro monitoring lesních porostů se používá hodnot z několika spektrálních pásem, které se jsou sčítány, odčítány, děleny či násobeny za účelem získání jediné hodnoty, tj. hodnoty indexu. Indexy pak mohou dále sloužit jako vstupy do statistických analýz, jako jsou korelace nebo regrese. Jako příklad může sloužit NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI využívá vysoké odrazivosti zelených rostlin v blízkém infračerveném pásmu a nízké odrazivosti v červeném pásmu. Jeho formulace vychází z podstaty, že zelené rostliny obsahují chlorofyl, který silně absorbuje v červené části spektra, a naopak pletivo mezofylu, které silně odráží v blízké infračervené oblasti spektra. Další vhodné pásmo pro studium stavu lesních porostů se nachází ve střední infračervené oblasti spektra. Tato oblast je výhodná z toho důvodu, že jak při degradaci chlorofylu, tak i při úbytku obsahu vody dochází v této oblasti ke zvýšení odrazivosti. Naproti tomu v blízké infračervené části spektra při degradaci chlorofylu dochází ke snížení odrazivosti, a naopak při úbytku obsahu vody dochází k zvýšení odrazivosti, což může mít za následek změnu zdravotního stavu vegetace při zachování hodnoty odrazivosti v blízkém infračerveném pásmu. Obsah vody a chlorofylu je úzce spjat se zdravotním stavem živé vegetace. Ve středním infračerveném pásmu se úbytek vody i chlorofylu projevuje poklesem odrazivosti a zvýšením obsahu vody i chlorofylu nárůstem odrazivosti. Jelikož vegetace v pásmu SWIR reaguje na změnu těchto

dvou parametrů stejně, je pásmo SWIR vhodné k monitoringu zdravotního stavu vegetace (J. Wang et al., 2010).

Většina studií v oblasti monitorování zdravotního stavu lesních porostů prostředky DPZ se při statistickém vyhodnocování výsledků spoléhá na korelační a regresní metody. Dalšími oblastmi spojenými se zdravotním stavem jsou např. tyto: mapování biomasy, obsah vody v listoví, mapování lesních požárů a následné obnovy lesních porostů, detekce kalamit hmyzích škůdců.

3.4 Hodnocení zdravotního stavu lesa prostředky DPZ v Česku

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů (dále jen ÚHUL) publikuje na svém geoportálu (ÚHUL, 2017a) Mapy zdravotního stavu lesů ČR z družicových snímků. K získání informace o zdravotním stavu lesů používá primárně data mise Landsat a ze spektrálních kanálů se používají oblasti blízké a střední infračervené části spektra.

Z důvodu monitorování zdravotního stavu lesních porostů byly vytvořeny dvě klasifikační stupnice: Stupeň poškození a mortality jehličnatých porostů a dále Defoliace a mortalita jehličnatých porostů. První zmíněná klasifikace vychází z klasifikace poškození jehličnatých porostů imisemi, zavedené v lesním hospodářství České republiky se stupni poškození porostu: O, O/I, I, II, IIIa, IIIb, IVa a IVb. Stupnice je odvozena od výskytu silně poškozených stromů v porostu. Hodnocení jednotlivých stromů je odvozeno od úbytku asimilačního aparátu a jako pomocný činitel je posuzován jeho stav.

Pro druhou stupnici (Defoliace a mortalita jehličnatých porostů) byla navržena desetistupňová stupnice s následujícím dělením: 0 %, 1 – 10 %, 11 – 20 %, 21 – 30 %, 31 – 40 %, 41 – 50 %, 51 – 60 %, 61 – 70 %, 71 – 80 %, 81 – 100 % při čemž je hodnocen úbytek a mortalita asimilačního aparátu v korunách stromů. Tato stupnice poskytuje lepší shodu s pozemním šetřením zejména proto, že informace obsažené v družicových snímcích jsou z fyzikálního hlediska bližší hodnocení defoliace. Metoda použitá pro tvorbu klasifikace má dle ÚHUL (2017b) některá omezení, kde ta nejpodstatnější jsou dostatečná hodnota korunového zápoje porostu, homogenity zastoupení dřeviny a stáří porostu. V místech snímku s výskytem oblačnosti, stínů, smogu, mlhy apod. se klasifikace záměrně neprovádí.

Mapy prezentované geoportálem (ÚHUL, 2017a) zpracovává firma Stoklasa Tech. Mapy poskytují různé informace a zdravotním stavu lesních porostů. Generované mapy, kromě dvou výše zmíněných klasifikací, ilustrují také různé další aspekty lesních porostů jako např. trendy, vývoj a dynamika nebo ohrožení lesů.

3.5 Odborné studie defoliace

Metodika použitá v této práci byla zpracována na základě studia odborné literatury, zejména článků v odborných periodikách popisujících studie s tematikou defoliace lesních porostů. Autor práce přistupuje k literatuře s vědomím jejích silných a slabých stránek, což dokumentuje mimo jiné tato kapitola.

V polovině devadesátých let 20. století se autoři Lambert et al. (1995) zabývali rozlišením šesti kategorií poškození smrku ztepilého (*Picea abies*) v oblasti Krušných hor. Cílem práce bylo najít spektrální charakteristiku pro třídy poškození lesních porostů a pásma či kombinace pásem senzoru TM vhodné pro odlišení tříd poškození. Autoři provedli statistické vyhodnocení vztahů jednotlivých pásem a jejich kombinací senzoru Thematic Mapper (TM) na družici Landsat. Data pozemní pravdy byla získána z map vytvořených na základě fotografií lesních porostů jak ze země tak z letadla Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHUL).

Defoliace zkoumaných smrků byla způsobena zejména znečištěním ovzduší (vysoké koncentrace oxidu siřičitého). Výsledky ukázaly na velmi nízkou míru rozlišitelnosti mezi lehce a středně poškozenými lesními porosty jak pomocí jednotlivých pásem, tak i jejich poměrů ve formě vegetačních indexů. Nicméně vegetační indexy se osvědčily pro odfiltrování vlivu topografie. Celkově nejsilnější vztah mezi odrazivostí a poškozením bylo zaznamenáno u kanálu sedm ve středním infračerveném pásmu. Odlišení agregovaných tří tříd s vysokou přesností zvládly podíly pásem ve viditelném, blízkém infračerveném a středním infračerveném pásmu. Použitá data mise Landsat byla předzpracována na úroveň odrazivosti na horní hranici atmosféry bez ortorektifikace.

Hledáním vztahu mezi defoliací a vegetačními indexy (více v kapitole 4.7 Stanovení spektrálního projevu defoliace) odvozenými z dat družic Landsat

TM a SPOT HRVIR se zabývala už studie autorů Franklin et al. (2008). Tato práce zkoumala 35 ploch o rozměrech 10 x 10 m lokalizovaných v Národním parku prince Alberta (Saskatchewan, Kanada), kde byly zastoupeny pouze jehličnany, a to smrk černý (*Picea mariana*), smrk sivý (*Picea glauca*) a jedle balzámová (*Abies balsamea*). Na těchto plochách se během pozemního šetření zjistila míra defoliace jehličnanů podle kategorií s 5% krokem. Výsledky prezentují nalezený vztah mezi vegetačními indexy MSI, NDMI, EWDI a mírou defoliace a mezi stejnými indexy odvozenými z různých družic (přesněji Landsat TM a SPOT HRVIR).

Tito autoři popsali střední až silnou korelaci mezi pozemním šetřením defoliace a vegetačními indexy odvozenými ze satelitních snímků. Vegetační indexy byly zvoleny takové, které počítají také se střední infračervenou oblastí spektra. Vyšší hodnoty koeficientu korelace vykazovaly vegetační indexy odvozené z dat družice SPOT HRVIR.

Práce autorů K. de Beurs a P. Townsend (2008) poukázala na vyšší hodnoty korelace indexů konstruovaných z pásem blízkého a středního infračerveného spektrálního pásma oproti indexům využívajících pásma viditelného a blízkého infračerveného pásma a pozemního šetření defoliace. Studie byla provedena na území Appláčského pohoří při masivním rozšíření larvy Bekyně velkohlavé (*Lymantria dispar dispar*), jedná se o obávaného listožravého škůdce. Přesněji se jednalo o testování satelitních dat MODIS a z nich odvozených indexů EVI a NDVI (viditelná pásma a blízká infračervená pásma) a dále indexů NDIIb6, NDIIb7 a NDWI (blízké a střední infračervené pásma) oproti pozemnímu šetření defoliace a defoliace šetřené z dat Landsat.

Výsledky práce K. de Beurs a P. Townsend (2008) ukazují stejné chování indexů NDIIb6 a NDIIb7, ale odlišné výsledky pro třetí index se středním infračerveným pásmem NDWI. Autoři tak spekulují na dřívějším nasycení indexu NDWI oproti NDIIb6 a NDIIb7. Dále je upozorněno na potřebu bezoblačných snímků pro zkoumání defoliace.

Recetnější studie autorů Townsend et al. (2012) na listnatých lesních porostech provedená s daty mise Landsat a verifikovaná pozemním šetřením defoliace (pomocí vizuálního hodnocení) se zabývá vytvořením modelu predikce defoliace listnatých lesních porostů v Appláčském pohoří. Autoři vyvinuli přístup pro mapování defoliace způsobené larvou Bekyně velkohlavé (*Lymantria dispar dispar*) za pomoci rozdílů hodnot vegetačních indexů mezi

odlistěnými a neodlistěnými lesními porosty. Jako nejspolehlivější se ukázaly zejména indexy NDII a MSI.

Výsledky v práci Townsend et al. (2012) ukazují indexy založené na odrazivosti v blízkém a středním infračerveném pásmu jako úspěšnější než indexy, které využívají červené a blízké infračervené pásmo, pro predikci defoliace. Nevýhoda konstruovaného modelu spočívá v nutnosti získání časové řady snímků a alespoň jednoho snímku zájmového území bez defoliace – referenční snímek. Validita modelu je podle autorů omezená na charakterem podobné lesní porosty.

Monitorováním vývoje stavu borovicových porostů na východě Španělska se zabývá studie autorů Sangüesa-Barreda et al. (2014). Tyto lesy jsou postiženy kalamitami Bourovčika jižního (*Thaumetopoea pityocampa*). Pozemní šetření defoliace zde probíhá již od sedmdesátých let 20. století a s jejich kombinací se snímky Landsat vznikl tento výzkum. Třídy defoliace z pozemního šetření a hodny vegetačních indexů odvozených z dat Landsat byly porovnány pro určení vzájemného vztahu. Výsledky ukazují výhodnost použití vegetačních indexů sestavených z pásem v blízkém a středním infračerveném spektru jako jsou např. MSI, NDII nebo NBR. Ty se ukázaly jako nejspolehlivější v zachycení ztráty asimilačního aparátu.

Výsledky stanovující kategorii defoliace pomocí vegetačních indexů založených na pásmech NIR a SWIR se při výzkumu Sangüesa-Barreda et al. (2014) osvědčilo zejména v určení období s nejvyšší, ale i nejnižší mírou defoliace v zájmovém území. Tyto vysoké i nízké hodnoty defoliace dobře zachytily všechny tři celkově nejúspěšnější vegetační indexy (MSI, NDII, NBR). Autoři nicméně upozorňují, že tyto výsledky byly podpořeny výběrem jednodruhových lesních porostů a vysokého korunového zápoje.

Další práce autorů Rullán-Silva et al. (2015) se věnuje bukovým (*Fagus sylvatica* L.) lesům na severu Španělska, kde při vhodných okolnostech propukají kalamity brouků nosatců (*Rhynchaenus fagi*) způsobujících degradaci lesních porostů způsobenou defoliací. Deseti vegetačních indexů bylo podrobena statistickému testování vůči pozemním datům o defoliaci ze 17 inventárních ploch v průběhu osmi let. Pro modelování defoliace z dat Landsat se nejlépe osvědčil vegetační index MSI.

Tato práce autorů Rullán-Silva et al. (2015) zaujme tvarem použité křivky v regresní modelu. Regresní křivka se jakoby asymptoticky blíží

k extrémním naměřeným hodnotám defoliace (10 a 80 %), což vede k snížení RMSE pod 5 %. Velká koncentrace naměřených hodnot defoliace ve středních a nízkých hodnotách, zvyšuje podle autorů robustnost modelu a také vede k velmi nízké hodnotě RMSE. Autoři nicméně upozorňují na prostorovou a datovou podmíněnost jejich výsledků.

Nejběžnějším přístupem pro hodnocení defoliace z dat DPZ je tedy použití vegetačních indexů. Autoři Rullán-Silva et al. (2013) provedli rešerši publikované literatury na téma monitorování defoliace způsobené hmyzem prostředky DPZ za roky 2007 až 2012. Výsledky jejich bádání představují ucelený souhrn poznatků o používané metodice při zkoumání defoliace zapříčiněné hmyzem. Poukazují mj. na nutnost tvorby unikátních metod pro zjišťování defoliace zejména v důsledku komplexní povahy defoliace, prostorové závislosti defoliace a odlišných příčin defoliace. Data mise Landsat považují za velmi vhodná pro detekci oblastí zasažených defoliací, jako i výzkumu defoliace samotné. Jako úspěšné dále hodnotí využití multispektrálních satelitních snímků středního prostorového rozlišení (např. Landsat) pro získání hodnoty defoliace jako funkce vegetačních indexů a jejich změny. Ačkoliv NDVI je stále nejpoužívanější vegetační index, indexy založené na blízkém a středním infračerveném pásmu mají (a částečně již potvrdily) potenciál přesnějších výsledků.

3.6 Transformace spektrálního prostoru

Metody transformace spektrálního prostoru jsou v práci použity pro zvýraznění spektrálních příznaků defoliace a dále jako krok při hledání vztahu mezi pozemním šetřením defoliace a družicovými snímky. Transformace spektrálního prostoru rozšiřují příznakový prostor tím, že vytvářejí nová pásma na základě spektrálních informací z pásem původních. V další fázi lze použít z generovaných pásem pouze ta s největší množstvím požadované informace a provést zúžení příznakového prostoru. Nová pásma často umožňují spektrální příznaky lépe vyjádřit než původní data (Dobrovolný, 1998; CCMEQ, 2016).

3.6.1 Spektrální indexy

Při zkoumání defoliace nástroji DPZ se často aplikují spektrální indexy (viz kapitola 3.5 Odborné studie defoliace). Spektrální indexy využívají redukci multispektrálního měření ve více pásmech na jednu hodnotu za účelem zvýšení signálu od vegetace na úkor signálu půdy, podrostu nebo atmosféry. Výhodu přinášejí také kvůli převedení naměřených absolutních hodnot na hodnoty relativní. Transformace na relativní hodnoty spolu nese částečné odstranění vlivu nerovnoměrného oslunění scény vlivem topografie. Spektrální pásma nejčastěji červeného, blízkého a středního infračerveného záření se používají pro jejich výpočet. Tyto pásma nesou informace o lesních porostech z hlediska parametrů spjatých s defoliací, tzn. parametry zahrnující vlhkostní poměry, poškození biomasy nebo fyziologický stres. Zvláště důležitá je oblast okolo vlnové délky 700 nm, kde dochází k rapidnímu nárůstu odrazivosti vegetace (Dobrovolný, 1998; Schowengerdt, 2007; Ho, 2009; CCMEQ, 2016).

Normalized Difference Vegetation Index

Normalized Difference Vegetation Index (dále jen NDVI), v české literatuře někdy označovaný jako „vegetační index“, patří mezi nejznámější a nejvíce používané spektrální indexy. V odborné literatuře jej popsal Tucker (1979). Jedná se o podíl rozdílu a součtu blízkého infračerveného pásma a červeného pásma. Při použití dat Landsat a Sentinel-2 byly použity vzorce dle (V. Henrich et al., 2017a) viz Tabulka 1.

NDVI určuje množství zelené vegetace obsažené v pixelu. Hodnoty NDVI se nacházejí v intervalu (-1 až 1), čím vyšší hodnota, tím vyšší obsah vegetace. NDVI pro určité povrchy ukazují také typické změny v průběhu roku, což bylo využito v celé řadě zemědělských a lesnických aplikací. Mapy NDVI mohou být vhodným nástrojem ke studiu zdravotního stavu vegetace, časových změn a průběhu fenofází, odhadům výnosů zemědělských plodin, odhadům vodního stresu rostlin atd. I po provedení atmosférických korekcí u vstupních dat je NDVI citlivý na externí faktory jako je vliv půdy, popř. podrostu, což je nejvíce patrné zejména v aridních oblastech s řídkou vegetací. Naopak v oblastech s hustou vegetací vykazuje tendenci k nasycení, a tedy ztrátě citlivosti (D. A. Sims a J. A. Gamon, 2002).

Normalized Difference Moisture Index

Normalized Difference Moisture Index (dále jen NDMI), v zahraniční literatuře někdy též označovaný jako Normalized Difference Infrared Index, je spojen se zkoumáním vlhkostních poměrů. Jeho popis publikovali E. R. Hunt, Jr. a B. N. Rock (1989). Využívá se pro monitorování změn obsahu vody ve vegetaci. Jedná se o podíl rozdílu a součtu blízkého infračerveného pásma a středního infračerveného pásma. Při použití dat Landsat a Sentinel-2 byly použity vzorce dle (V. Henrich et al., 2017b) viz Tabulka 1.

Hodnoty NDMI se nacházejí v intervalu (-1 až 1), čím vyšší hodnota, tím vyšší obsah vody sledovaná vegetace pojímá. NDMI se využívá mj. k monitorování sucha a rizika lesních požárů.

Normalized Burn Ratio Index

Normalized Burn Ratio Index (dále jen NBRI) byl vytvořen pro odhad závažnosti požárů zejména v zalesněných oblastech. Pro mapování regenerace vegetace po požárech jej použili M. J. Lopéz García a V. Caselles (2008). Jedná se o podíl rozdílu a součtu blízkého infračerveného pásma a středního infračerveného pásma. Při použití dat Landsat a Sentinel-2 byly použity vzorce dle (V. Henrich et al., 2017c) viz Tabulka 1.

Hodnoty NBRI se nacházejí v intervalu (-1 až 1), čím vyšší hodnota, tím vyšší vitalita vegetace. Rozdílnost vůči indexu NDMI spočívá v použití odlišného kanálu ve středním infračerveném pásmu. NBRI se využívá kvůli citlivosti na změny vegetace a k monitorování obnovení lesních porostů po disturbancích.

Moisture Stress Index

Moisture Stress Index (dále jen MSI) slouží k zachycení zvyšujícího se obsahu vody ve vegetaci. K zachycení spektrální signatury stresu rostlin jej použili B. N. Rock et al. (1986). Jedná se o jednoduchý podíl středního infračerveného pásma a blízkého infračerveného pásma. Při použití dat Landsat a Sentinel-2 byly použity vzorce dle (V. Henrich et al., 2017d) viz Tabulka 1.

V důsledku zvyšování obsahu vody ve vegetaci se zvyšuje absorpce dopadajícího záření ve střední infračervené oblasti, přičemž odrazivost v blízkém infračervené oblasti spektra zůstává téměř nezměněna. MSI proto reaguje na zvyšující se obsah vody poklesem hodnot. MSI se využívá pro monitorování obsahu vody nebo fyziologického stresu vegetace.

Tabulka 1: *Specifické vzorce spektrálních indexů pro různé senzory*

Vegetační index	Zkratka	Vzorec dle senzoru		
		ETM+	TM	MSI
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$\frac{(B4 - B3)}{(B4 + B3)}$	$\frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)}$	$\frac{(B08 - B04)}{(B08 + B04)}$
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$\frac{(B4 - B5)}{(B4 + B5)}$	$\frac{(B5 - B6)}{(B5 + B6)}$	$\frac{(B08A - B11)}{(B08A + B11)}$
Normalized Burn Ratio Index	NBRI	$\frac{(B4 - B7)}{(B4 + B7)}$	$\frac{(B5 - B7)}{(B5 + B7)}$	$\frac{(B08A - B12)}{(B08A + B12)}$
Moisture Stress Index	MSI	$\frac{B5}{B4}$	$\frac{B6}{B5}$	$\frac{B11}{B08A}$

Zdroj: V. Henrich, 2017a; 2017b; 2017c; 2017d

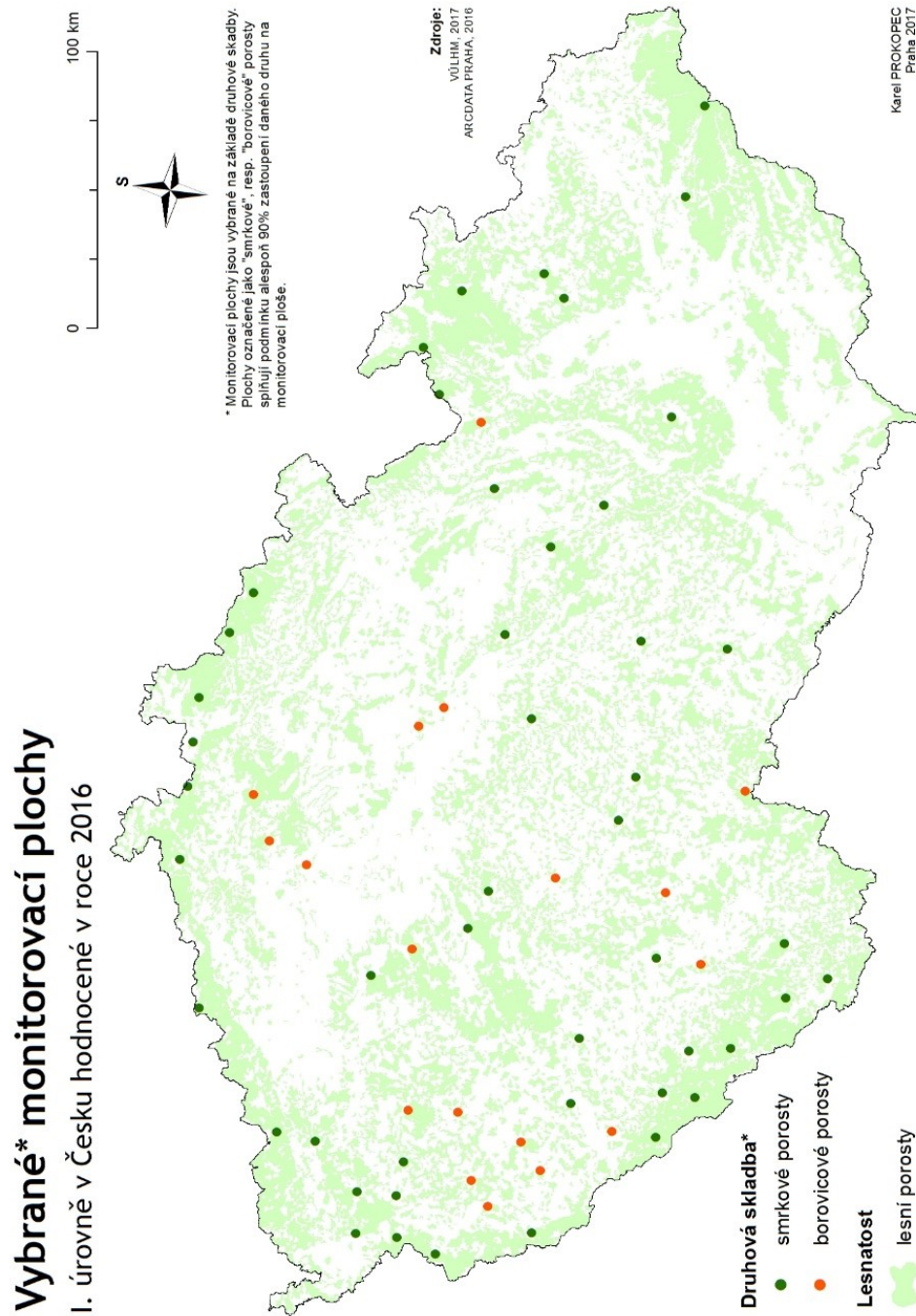
4 Data a postup

V předchozí kapitole jsou uvedeny metody vhodné pro stanovení míry defoliace z multispektrálních družicových snímků. V této kapitole dochází ke spojení vybraných metod a údajů z multispektrálních družicových snímků. V první části je popsáno zájmové území, následuje popis použité definice defoliace a deskripce použitých dat. V závěrečné části této kapitoly je uveden pracovní postup použitý pro získání výsledků (viz kapitola 5 Výsledky).

4.1 Charakteristika zájmového území

Zájmová oblast se nachází ve střední Evropě na území Česka. Po celém Česku jsou rozmístěny monitorovací plochy, kde probíhá pozemní šetření (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření). Pro účely monitorování lesních porostů, v rámci zapojení do mezinárodního programu ICP Forests (viz kapitola 3.1 ICP Forests), byla zřízena systematická základní síť 16 x 16 km a dále síť 8 x 8 km. V těchto sítích vznikaly zejména v osmdesátých letech 20. století výzkumné monitorovací plochy. K roku 2016 se jedná o celkový počet 306 ploch. Obrázek 5 zobrazuje plochy využívané v této práci (kritéria výběru ploch viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření). Tyto plochy jsou rozmístěny rovnoměrně podle lesnatosti po celém území Česka. Monitorovací plochy jsou umístěny v lesních porostech tak, aby dobře charakterizovaly dané stanovištní a porostní podmínky. V nadmořských výškách mezi 150 až 1100 m n. m. se hodnotí na monitorovacích plochách každým rokem 28 druhů lesních dřevin v různých věkových třídách. Na každé ploše se jednou ročně během července až října zjišťuje stav defoliace pro cca 11 tisíc stromů (MZČR a VÚLHM, 2004; VÚLHM, 2012).

Obrázek 3: Mapa vybraných ploch pozemního šetření defoliace



Zdroj: VÚLHM, 2016; ARCDATA PRAHA, 2016; vlastní

4.2 Definice defoliace

Defoliace, zde chápána jako relativní parametr, je definována jako ztráta asimilačních listů v koruně stromu v porovnání se zdravým stromem, rostoucím ve stejných porostních a stanovištních podmínkách. V hodnotě parametru nejsou obsaženy ztráty asimilačního aparátu vyvolané

mechanickými vlivy. Mechanické vlivy odlišuje odborník VÚLHM při pozemním šetření.

Míra defoliace je ovlivněna především nepříznivými vlivy vnějšího prostředí působícími na ekosystémy lesních porostů – zejména znečištěním ovzduší. Defoliace významně ovlivňuje celkovou kondici a zdravotní stav lesních porostů a často používá jako ukazatel zdravotního stavu lesa. V tomto případě se vyjadřuje v procentech jako poměr určující ztrátu olistění. Toto kritérium je v Česku sledováno v rámci mezinárodního programu ICP Forests (viz podkapitola 3.1 ICP Forests).

Za účelem určení spektrálního projevu defoliace a porovnání výsledků se přikročilo k rozdělení průměrných hodnot defoliace na výzkumných plochách podle stupnice Defoliace a mortalita jehličnatých porostů (ÚHUL, 2017b) (viz kapitola 3.4 Hodnocení zdravotního stavu lesa prostředky DPZ v Česku). Statistické vyhodnocení tak probíhalo jednak pro původní data (průměr defoliace na výzkumné ploše) a kategoriální rozdělení (převzatá stupnice dle ÚHUL).

4.3 Použitá data - pozemní šetření

Použitá data o defoliaci vznikla při pozemním šetření provedeném VÚLHM (monitoring stavu lesa – I. úroveň) a byla autorovi práce předána na základě Protokolu o předání dat. Předaná data obsahují informaci o průměrné defoliaci stromů na monitorovací ploše, počtu stromů na monitorovací ploše a jejich druhu. Poslední součástí předaných dat jsou souřadnice ploch (tj. stromu ve středu plochy) v souřadnicovém systému S-JTSK, tj. EPSG 2065 (Butler, 2017a), tyto souřadnice vzhledem k nepřiměřené polohové odchylce nebyly použity (více dále v této kapitole).

Trvalé výzkumné plochy, na kterých VÚLHM Útvar ekologie lesa v rámci projektu ICP Forests (viz kapitola 3.1 ICP Forests) provádí v současné době pravidelné šetření míry defoliace, mají formu středového stromu o souřadnicích zjištěných přenosnou GPS jednotkou (více dále v této kapitole) a pomyslného kruhu okolo něj s poloměrem 18 m. Na každé trvalé výzkumné ploše se vždy nachází alespoň 25 stromů. Ročně se hodnotí tisíce stromů se zastoupením 28 druhů lesních dřevin v různých věkových třídách. Hodnocení

provádí odborný zaměstnanec VÚLHM (v současné době Ing. Petr Fabiánek¹) vizuálně při pozemním šetření (viz Obr. 4) na daných plochách, kdy pro každý strom na ploše stanoví míru defoliace v procentech v násobcích pěti (ukázka defoliace smrku viz Obr. 5) (VÚLHM, 2012).

Obrázek 4: Vizuální hodnocení defoliace na plochách pozemního šetření



Zdroj: VÚLHM, 2015

Obrázek 5: Ukázka defoliace smrku ztepilého 20 % (vlevo) a 55 % (vpravo)



Zdroj: VÚLHM, 2015

¹ <http://www.vulhm.cz/lide&id=33>

Doplňkové parametry o výzkumných plochách

Pro účely této práce musely být vybrány plochy na základě parametrů, které zajišťují relevanci použití metod DPZ pro stanovení defoliace z multispektrálních satelitních snímků. Selektce se týkala použití údajů z ploch s alespoň 90% zastoupením smrku ztepilého (*Picea abies*) nebo borovice lesní (*Pinus sylvestris*) tj. 46, resp. 18 ploch. Další popisná statistika viz Tabulky 2 a 3. Zohlednění druhové skladby ve výběru ploch je nutné z důvodu odlišného spektrálního chování napříč různými druhy dřevin.

Tabulka 2: Popisné statistické údaje o souboru dat pozemního šetření defoliace smrkových porostů

pozemní šetření defoliace v roce 2015		pozemní šetření defoliace v roce 2016	
výběr 46 ploch smrkových porostů		výběr 46 ploch smrkových porostů	
průměr	27 %	Průměr	28 %
medián	31 %	Medián	32 %
minimum	2 %	Minimum	3 %
maximum	47 %	Maximum	47 %
směrodatná odchylka	12	směrodatná odchylka	12
počet stromů na ploše	počet ploch	počet stromů na ploše	počet ploch
25 až 51	29	25 až 51	29
51 až 75	15	51 až 75	16
76 až 100	2	76 až 100	1

Zdroj: VÚLHM, 2016, upraveno

Dalším podstatným činitelem je zápoj porostu, se kterým se doplňuje charakter podrostu. Informace o zápoji ani o podrostu bohužel nejsou na pracovišti VÚLHM ve Strnadlech dostupné, resp. existují cca 10 let stará data popisující zápoj porostu, ale takto staré údaje již nejsou relevantní. Vliv podrostu je částečně eliminován samotnou definicí monitorovací plochy, a to protože se na ní vždy nachází alespoň 25 stromů a často i více než dvakrát tolik viz Tabulky 2 a 3. Posledním doplňkovým parametrem, který byl použit pro výběr ploch je homogenita.

Tabulka 3: Popisné statistické údaje o souboru dat pozemního šetření defoliace borovicových porostů

pozemní šetření defoliace v roce 2015		pozemní šetření defoliace v roce 2016	
výběr 18 ploch borovicových porostů		výběr 18 ploch borovicových porostů	
průměr	42 %	Průměr	43 %
medián	44 %	Medián	45 %
minimum	28 %	Minimum	28 %
maximum	52 %	Maximum	54 %
směrodatná odchylka	6	směrodatná odchylka	7
počet stromů na ploše	počet ploch	počet stromů na ploše	počet ploch
25 až 51	8	25 až 51	8
51 až 75	7	51 až 75	6
76 až 100	3	76 až 100	4

Zdroj: VÚLHM, 2016, upraveno

Porostní homogenita

Podle P. Fabiánka (2017) je porostní homogenita obecně definována pro účely DPZ jako: „shodnost vlastností jednotlivých proků souboru, který je všude, ve všech směrech stejný. Je to takový soubor proků, ve kterém nelze opticky rozlišit jednotlivé proky, mezi kterými není patrné rozhraní.“ Fabiánek (2017) míru porostní homogenity popisuje jako relativní a dále pokračuje, že se jedná o podobnou věkovou a druhovou skladbu a hmotovou strukturu.

Z hlediska dynamiky je porostní homogenita časově poměrně stálá v horizontu jednotek let. Porostní homogenita plochy má stupnici o třech kategoriích. Kategorie uvádí relativní míru homogenity od vysoké (kategorie 1) po nízkou (kategorie 3). Pro účely této práce byly vybrány plochy s vysokou mírou homogenity, tj. kategorie 1.

Hodnocení porostní homogenity probíhá pro každou monitorovací plochu (homogenita plochy) a taktéž pro její okolí (homogenita porostu). Homogenita porostu se vztahuje k okolí výzkumné plochy, které ale není jasně prostorově definováno vzhledem k monitorovací ploše. Pro hodnocení homogenity porostu je vybráno takové okolí, které přilehá k monitorovací ploše a je svou velikostí prostorově významné. Neexistuje však údaj o jeho přesné velikosti či tvaru. Vysoká míra porostní homogenity znamená, že v okolí

plochy se vyskytuje porost homogenní vzhledem k monitorovací ploše, ovšem k jeho lokalizaci údaj o porostní homogenitě sám nestačí.

Zpřesnění souřadnic ploch

Výše zmíněná nedostatečná polohová přesnost souřadnic dosahovala v extrémních případech i více než stometrovou odchylku. Velikost odchylky byla konzultována s odborníkem navštěvujícím plochy a její hodnota byla potvrzena. Proto vznikla potřeba zpřesnění polohové informace o monitorovací ploše. Na doporučení Ing. Fabiánka byly použity dodatečné podklady pro zpřesnění polohové informace. Dodatečné podklady mají formu černobílých kopií (ukázka v příloze č. 1) porostní mapy v měřítku 1 : 10 000 na listu ve formátu A4. Kopie porostních map pocházejí stejně jako údaje o defoliaci z Útvaru ekologie lesa při VÚLHM ve Strnadlech. Na černobílých kopiích se vždy nachází kříž v podobě dvou ve většině případů na sebe kolmých čar několik centimetrů dlouhých. Zákres kříže byl proveden odborným pracovníkem VÚLHM na základě údajů měřených na místě optickým dálkoměrem.

Černobílé kopie porostní mapy byly naskenovány a pomocí vlíčovacích bodů proběhlo georeferencování. Georeferencování probíhalo se Základní mapou České republiky 1 : 10 000 (ČÚZK, 2017a) ve formě webové mapové služby (WMS). WMS-ZM10-P (ČÚZK, 2017b) poskytuje ČÚZK jako veřejně dostupnou prohlížečskou službu nad daty Základní mapy České republiky 1 : 10 000. Vlícování probíhalo pomocí minimálně šesti vlíčovacích bodů rozmístěných po celém listu A4 s důrazem na oblast s monitorovací plochou. Vybrané vlíčovací body lze jasně identifikovat jak na ZM10 tak též na skenovaném podkladu. Pro georeferencování byl zvolen souřadnicový systém WGS 84 / UTM 33N (Butler, 2017b), aby nebylo nutné provádět transformaci souřadnic získaných bodů do souřadnicového systému satelitních snímků. RMSE při georeferencování pro všechny naskenované podklady nepřesáhla 10 m viz Tabulka 4. S přihlédnutím k odchylce vyplývající z ručního zákresu do kopie porostní mapy se tak podařilo dosáhnout přesnosti takřka o řád vyšší než obdržené souřadnice ploch. K zobrazení a následnému georeferencování mapových podkladů sloužila aplikace ArcMap 10.4.1 (ESRI, 2016).

Tabulka 4: Hodnoty RMSE tj. střední kvadratické chyby pro střed ploch pozemního šetření defoliace z datové sady pozemního šetření defoliace

ID*	RMSE [m]	ID*	RMSE [m]	ID*	RMSE [m]	ID*	RMSE [m]
0323	19	1828	64	A100	14	H100	259
0325	35	2009	75	B070	11	H160	14
0327	12	2021	14	B150	31	I030	11
0623	9	2038	8	B160	185	I180	11
0721	30	2105	8	D100	6	J040	21
0908	9	2211	31	E040	14	K120	1
1144	2	2214	142	F020	23	K160	18
1242	36	2326	26	F030	6	K210	13
1327	10	2410	23	F080	60	K260	111
1417	21	2518	18	F230	71	K280	110
1428	16	2521	37	G030	9	M060	17
1441	24	2610	17	G040	11	M070	13
1504	249	2612	37	G050	14	M160	15
1648	19	2718	17	G190	9	N070	15
1710	157	2826	20	H020	26	O101	19
1747	37	3117	31	H090	6	P090	14
1807	12						

(*ID: identifikační číslo plochy)

Zdroj: vlastní

4.4 Použitá data – Sentinel-2

Sentinel-2 tvoří součást programu GMES (Global Monitoring for Environment and Security), který je zaštiťován Evropskou komisí, ESA (European Space Agency) a EEA (European Environmental Agency), a představuje komponentu DPZ zajišťující mimo jiné kontinuitu na mise SPOT a Landsat. První družice (Sentinel-2A) byla umístěna v první polovině roku 2015 a v roce 2017 by mělo následovat vynesení na oběžnou dráhu druhé družice (Sentinel-2B). Pořizovaná data mají sloužit zejména k těmto aplikacím: monitorování a změny

využití půdy a půdního krytu, mapování vegetace a jejích parametrů, mapování rizik a katastrof.

Satelity mise Sentinel-2 se budou pohybovat po heliosynchronní dráze 786 km nad povrchem Země a systematicky provádět sběr dat mezi 56° jižní šířky a 84° severní šířky zejména v oblastech pevniny (ESA, 2017a). Senzor MSI (MultiSpectral Instrument) nesený družicemi Sentinel-2 snímá ve 13 spektrálních pásmech viz Tab. 5. Senzor má různé prostorové rozlišení pro spektrální pásma, a to 10, 20 a 60 m. Časové rozlišení tedy perioda, se kterou senzor skenuje stejné místo na povrchu Země při stejných podmínkách, bude pro dvě družice na oběžné dráze 5 dní.

Úroveň Level – 1C představuje dlaždice o velikosti 100 x 100 km v souřadnicovém systému WGS 84 / UTM 33N (Butler, 2017b). Šíře pásu, který je zabírán skenerem, je u MSI je 290 km. Snímek má velikost 290 x 276 km (Baillarin et al., 2012). Zpracování zahrnuje radiometrickou kalibraci, ortorektifikaci a prostorovou korekci se subpixelovou přesností. Výsledná data představují hodnoty odrazivosti [ρ] na horní hranici atmosféry (ToA – „Top of Atmosphere“) násobená konstantním koeficientem 10 000 pro zachování dynamického rozpětí údajů. V rámci předzpracování snímků se na základě pásem NIR a SWIR vytváří maska „neprůhledné oblačnosti“ (opaque_clouds) a cirrovité oblačnosti (cirrus_clouds) (ESA, 2015a) (více kapitola 4.6 Předzpracování dat).

Pro přístup k datům mise Sentinel-2 se využívá rozhraní Sentinels Scientific Data Hub (ESA, 2017a). Data se systematicky zpracovávají na různých úrovních, ale pro koncové uživatele je přístupná pouze úroveň Level-1C.

Pro potřeby této práce autor vytvořil archiv snímků (viz Příloha č. 2), které splňovaly tři základní podmínky. Za prvé se jedná o snímky pokrývající zájmové území. Z výše uvedených údajů o rozměrech snímků Sentinel-2 je pro získání informací z celého zájmového území potřeba nejméně dvou snímků. Za druhé byly vybrány takové snímky, na kterých se vyskytovalo relativně málo oblačnosti, aby se eliminovalo překrytí částí snímku s monitorovacími plochami oblačností.

Tabulka 5: Spektrální a prostorové rozlišení senzoru MSI na družici Sentinel-2

MSI (MultiSpectral Instrument)		
Pásmo	Rozsah [nm]	Prostorové rozlišení [m]
Band 01	433 – 453	60
Band 02	458 – 523	10
Band 03	543 – 578	10
Band 04	650 – 680	10
Band 05	698 – 713	20
Band 06	733 – 748	20
Band 07	773 – 793	20
Band 08	785 – 900	10
Band 8A	855 – 875	20
Band 09	935 – 955	60
Band 10	1 360 – 1 390	60
Band 11	1 565 – 1 655	20
Band 12	2 100 – 2 280	20

Zdroj: ESA, 2015a

Tabulka 6: Použité scény Sentinel-2 a jejich prostorový rozsah

scény z družice Sentinel-2	
datum	přibližný prostorový rozsah
03.08.2015	západ Česka
30.08.2015	východ Česka
27.08.2016	západ Česka
04.08.2016	východ Česka

Zdroj: ESA, 2015b; 2016; vlastní

Prakticky to znamená, že kromě tří výjimek podíl oblačnosti na scénách nepřekračuje hodnotu 10 %. Poslední podmínka zohledňuje datum pořízení dat pozemního šetření, a proto data pořízení vybraných scén pocházejí z intervalu od 1. června do 30. září. Použité scény jsou uvedené v Tabulce 6, další informace o vybraných scénách viz Příloha č. 2.

4.5 Použitá data – Landsat

Projekt Landsat provozovaný společně NASA (National Aeronautics and Space Administration) a USGS (United States Geological Survey) představuje nejdelší kontinuální misi pořizující snímky Země za pomoci série satelitů. V roce 1972 byl vypuštěn první satelit Landsat 1 a zatím poslední Landsat 8 byl vypuštěn v roce 2013. V současnosti pořizují nové snímky satelity Landsat 7 a 8. Data mise Landsat jsou využívána v mnoha oborech např. v geologii, lesním managementu, bezpečnosti, zemědělství, ekologii atd.

Družice Landsat obíhají Zemi 705 km nad povrchem po heliosynchronní dráze a skenují povrch Země mezi 81° severní šířky a 81° jižní šířky díky inklinaci 98,2 °. Velikost pořizovaných scén je 170 x 185 km. Družice Landsat nesou multispektrální senzory se středním prostorovým rozlišením viz Tabulka 7. Časové rozlišení tedy perioda, se kterou senzor skenuje stejné místo na povrchu Země, je 16 dní. (USGS, 1999; 2016a). Spektrální rozlišení senzorů ETM+ (Landsat 7) OLI a TIRS (Landsat 8) je znázorněno v Tabulce 7.

Landsat „Higher Level Science Data Products“

Data mise Landsat tzv. „Higher Level Science Data Products“ vycházejí z dat první úrovně (Level-1 Stanandard Data Products), která jsou dále zpracovaná. Vzniká tak nová datová sada (Higher Level Science Data Products), která obsahuje mimo jiné údaje odrazivosti na povrchu Země tzv. „Surface Reflectance“ a masku oblačnosti tzv. „Cloud Mask“ (USGS, 2016b; 2017a).

V dnešní době data prořízená družicemi Landsat 7 a 8 poskytuje USGS (přes portál ESPA) ve verzi zpracované algoritmy LEDAPS (Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System) pro Landsat 7 a LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code) pro Landsat 8. Tyto produkty poskytují data zpracovaná na základě výše uvedených algoritmů a představují tak standardizované zpracování dat první úrovně (Level – 1 Stanandard Data Products) (USGS, 2016b; 2017a) (více viz kapitola 4.6 Předzpracování dat). Výsledné produkty „Surface Reflectance“ a „Cloud Mask“ tedy odrazivost na povrchu Země a maska oblačnosti, byly použity v rámci této práce. Masku oblačnosti je tvořena podle algoritmu Fmask vyvinutém na Boston University a implementovaném v USGS EROS Center. Celkově tyto způsoby zpracování dat mise Landsat prokázaly vysokou míru spolehlivosti a přesnosti (viz

následují odstavec). Možnost pořízení takových dat je pro tuto práci velmi užitečná a splňuje všechny požadavky kladené na zpracování dat za účelem získání hodnot odrazivosti na povrchu Země.

Tabulka 7: Spektrální a prostorové rozlišení senzorů OLI a TIRS na družici Landsat 8

OLI (Operational Land Imager)			
Pásmo	Rozsah [nm]	Název pásma	Prostorové rozlišení [m]
Band 1	430 — 450	CA	30
Band 2	450 — 510	BLUE	30
Band 3	530 — 590	GREEN	30
Band 4	640 — 670	RED	30
Band 5	850 — 880	NIR	30
Band 6	1 570 — 1 650	SWIR	30
Band 7	2 110 — 2 290	SWIR	30
Band 8	500 — 580	PAN	15
Band 9	1 360 — 1 380	Cirrus	30
TIRS (Thermal Infrared Sensor)			
Band 11	10 600 — 11 190	Thermal 1	100
Band 12	11 500 — 12 510	Thermal 2	100

Zdroj: USGS, 2016a

Studie M. Claverie et. al (2015) potvrdila konzistenci a vzájemnou porovnatelnost hodnot odrazivosti na povrchu Země produkovaných na základě algoritmu LEDAPS v globálním měřítku. Porovnání probíhalo nad snímky Landsat 5 a 7 pořízených ve stejný den a na shodných územích rozmístěných všude po celé Zemi.

Další studie autorů z Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) F. Vuolo et. al (2015) představila srovnání výsledků manuální atmosférické korekce snímků Landsat a snímků zpracovaných algoritmem LEDAPS. Studie potvrdila spolehlivost automatické atmosférické korekce (algoritmem LEDAPS). Hodnoty spektrálních pásem (po manuální atmosférické korekci a algoritmu LEDAPS) na snímcích území východního Rakouska si velmi dobře odpovídaly, jako korespondovaly odpovídající hodnoty sérií NDVI.

Tabulka 8: Spektrální a prostorové rozlišení senzoru ETM+ na družici Landsat 7

ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)			
Pásma	Rozsah [nm]	Název pásma	Prostorové rozlišení [m]
Band 1	450 — 520	BLUE	30
Band 2	520 — 600	GREEN	30
Band 3	630 — 690	RED	30
Band 4	770 — 900	NIR	30
Band 5	1 550 — 1 750	SWIR	30
Band 6	10 400 — 12 500	Thermal	60
Band 7	2 080 — 2 350	SWIR	30
Band 8	520 — 900	PAN	15

Zdroj: USGS, 1999

Pro přístup k datům mise Landsat autor zvolil webové rozhraní GloVis (USGS, 2016c), ve kterém byla zjištěny identifikační čísla snímků splňujících zadané podmínky (viz následující odstavec). Vlastní stažení zvolených snímků v úrovni zpracování Higher Level Science Data Products proběhlo skrze zadání požadavku na portálu ESPA (USGS, 2017b). V žádosti byl také specifikovaný požadovaný souřadnicový systém WGS 84 / UTM (Butler, 2017b).

Tabulka 9: Použité scény družic Landsat 7 a 8

datum	ID scén pro rok 2016	datum	ID scén pro rok 2015	datum	ID scén pro rok 2014
15.09.2016	LE71890252016259NSG00	06.06.2015	LC81920262015157LGN00	07.07.2104	LC81900252014188LGN00
04.08.2016	LC81910252016217LGN00	06.06.2015	LC81920252015157LGN00	16.07.2014	LC81890262014197LGN00
07.09.2016	LC81890262016251LGN00	17.07.2015	LC81910262015198LGN00	08.08.2014	LC81900262014220LGN00
12.09.2016	LC81920252016256LGN00	26.07.2015	LC81900262015207LGN00	07.09.2014	LC81920252014250LGN00
12.09.2016	LC81920262016256LGN00	03.08.2015	LE71900252015215NSG00	07.09.2014	LC81920262014250LGN00
04.08.2016	LC81910262016217LGN00	04.08.2015	LC81890262015216LGN00	16.09.2014	LC81910252014259LGN00
14.09.2016	LC81900252016258LGN00	20.08.2015	LC81890252015232LGN00	09.08.2014	LE71890252014221SG100
30.09.2016	LC81900262016274LGN00	19.09.2015	LC81910252015262LGN00	16.09.2014	LC81910262014259LGN00

Zdroj: USGS, 2014; 2015; 2016d

Také pro snímky Landsat byl vytvořen archiv (viz Příloha č. 3) analogicky k tomu pro snímky Sentinel-2 (viz kapitola 4.4 Použitá data – Sentinel-2). Rozdílnost obou databází spočívá v odlišných rozměrech snímků

a zvolené meze pro podíl oblačnosti na scéně. Důsledkem menších rozměrů snímků Landsat je pro pokrytí zájmového území potřeba použít minimálně 8 scén. Z hlediska relativního podílu oblačnosti ve snímku byla stanovena maximální hodnota 10 % (s výjimkou roku 2014 s mezí 20 % z důvodu nedostatečného množství snímků s nižším podílem oblačnosti).

4.6 Předzpracování družicových dat

Při pořizování multispektrálních snímků zemského povrchu působí na výsledný záznam řada vlivů, z nichž některé mohou snižovat kvalitu obrazového záznamu. Předzpracování se zaměřuje zejména na systematické, tj. opakovatelné chyby, které se pokouší modelovat a následně odstranit. Cílem předzpracování je tedy úprava zaznamenaných údajů ve smyslu geometrických a radiometrických vlastností (Dobrovolný, 1998).

Radiometrické korekce

Jako důsledek působení negativních vlivů neodpovídá skutečná radiometrická charakteristika objektu hodnotám naměřených senzorem. Radiometrické korekce představují korekce vlivu parametrů snímacího senzoru, vlivu pozice Země a Slunce a vliv atmosféry na radiometrickou informaci ve snímku.

Sentinel-2

Použitá data úrovně Level-1C již obsahují následující stupně radiometrických korekcí: odstranění chybných dat a pravidelného šumu v datech; radiometrickou kalibraci, tj. převedení DN hodnot na fyzikální veličinu spektrální záře $[L]$; dále výpočet odrazivosti $[\rho]$ z hodnot spektrální záře, tj. zohlednění geometrických podmínek měření; atmosférická korekce není na snímcích Sentinel-2 provedena, a proto se jednotlivé snímky vyhodnocují zvlášť (ESA, 2015a).

Landsat

Použitá data mise Landsat Surface Reflectance Higher – Level Data Products jsou zpracovaná data Level-1 Standard Data Products, na straně poskytovatele, těmito kroky. Prvním krokem je radiometrická kalibrace, která ústí v hodnoty záře. Hodnoty záře jsou dále převedeny na odrazivost na horní hranici atmosféry ze známé polohy Slunce a senzoru a hodnot intenzit dopadajícího a odraženého záření. V dalších krocích se data korigují pomocí

informací o stavu atmosféry (obsahu vodní páry, ozonu a aerosolů) pomocí radiačního přenosového modelu 6S (pro senzory TM a ETM+) nebo vlastního radiačního přenosového modelu (pro senzor OLI). Těmito hlavními kroky vznikají data odrazivosti na zemském povrchu (USGS, 2016b; 2017a).

Korekce radiometrických hodnot na terén

Z důvodu nestejných podmínek, při distančním měření na výzkumných plochách, způsobených topografickou polohou plochy v terénu, byla provedena analýza terénu z hlediska ovlivnění radiometrických hodnot. Rozdílné podmínky při měření jsou způsobeny jednak sklonitostí terénu v místě výzkumné plochy a dále také orientací. Sklon svahu, na kterém může výzkumná plocha ležet, mění úhel dopadajícího slunečního záření na terén oproti horizontální ploše. Rovněž orientace způsobuje změnu úhlu dopadajícího slunečního záření na terén oproti horizontálnímu terénu (podle toho, zda je svah ukloněný ke Slunci apod.). Proto se poloha výzkumných ploch testovala z hlediska sklonitosti a orientace. Ke zjištění těchto parametrů lokální topografie byl použit DMR z datové sady ArcČR 500 (ARCDATA PRAHA, 2016). Výpočet sklonitosti a orientace probíhal v aplikaci ArcMap 10.4.1 (ESRI, 2016) pomocí funkce Slope (ESRI, 2017a), resp. Aspect (ESRI, 2017b). Nalezené hodnoty korelace radiometrických hodnot a parametrů terénu ukazuje Tabulka 10. K výpočtu korelačních koeficientů sloužil SW Microsoft Office aplikaci Excel 2016 doplněk Analytické nástroje (Microsoft, 2017). Mezi radiometrickými hodnotami pásem scén Sentinel-2 a topografií se neukázala potřeba korekce družicových dat na některý z parametrů terénu.

Geometrické korekce

Činitele způsobující chyby a nepřesnosti v geometrických vlastnostech obrazu můžeme podle příčin dělit do tří kategorií:

- parametry dráhy satelitu (např. kolísání výšky nebo změna orientace),
- vlastnosti senzoru (nepřesnosti měření při snímání obrazu),
- geometrie zemského povrchu (zakřivení zemského povrchu a lokální topografické efekty, rotace Země).

Tabulka 10: Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru MSI a parametrů terénu

parametr terénu	sklonitost	orientace	nadmořská výška
korelační koeficient	0,06	0,19	−0,08

Zdroj: vlastní

Sentinel-2

Použitá data úrovně Level-1C představují ortorektifikovaný snímek s opravenými výše uvedenými geometrickými nepřesnostmi kromě lokálních topografických efektů (ESA, 2015a) v souřadnicovém systému WGS 84 / UTM 33N (Butler, 2017b).

Při zpracování byl použitý digitální výškový model DTED1 – class. Ortorektifikace dosahuje subpixelové přesnosti (90 % pixelů s chybou polohové přesnosti do 0,25 pixelu) (Baillarin et al., 2012).

Landsat

Použitá data mise Landsat úrovně Surface Reflectance Higher – Level Data Products představují ortorektifikovaný snímek s opravenými výše uvedenými geometrickými nepřesnostmi kromě lokálních topografických efektů (USGS, 1999, 2016a) v souřadnicovém systému WGS 84 / UTM 33N (Butler, 2017b). Do výsledného produktu jsou též začleněny údaje z digitálního elevačního modelu DTED a polohová odchylka dosahuje subpixelové přesnosti přesněji 12 m pravděpodobné kruhové chyby (s hladinou spolehlivosti 90 %) (USGS, 1999, 2016a).

4.7 Stanovení spektrálního projevu defoliace

Následující kapitola popisuje metody a techniky použité pro zjištění spektrálního projevu defoliace. Nejprve bylo přistoupeno k prozkoumání vztahu defoliace z pozemního šetření a radiometrických hodnot jednotlivých pásem multispektrálních snímků senzorů na satelitech Landsat, tj. ETM+ a OLI a také Sentinel-2 tj. MSI. Dále se testovaly spektrální indexy (více kapitola 3.6.1 Spektrální indexy) zvolené na základě rešerše literatury (viz kapitola 3.5 Odborné studie defoliace).

Vztah údajů z pozemního šetření defoliace a radiometrických hodnot spektrálních pásem satelitních snímků

Posouzení vztahu mezi údaji pozemního šetření defoliace a radiometrickými hodnotami jednotlivých pásem satelitních snímků bylo provedeno v následujících fázích.

Vztah údajů z pozemního šetření defoliace a radiometrických hodnot spektrálních pásem satelitních snímků Landsat

Postup při hledání vztahu radiometrických hodnot v pásmech scén Landsat a údajů z pozemního šetření defoliace probíhalo analogicky jako mezi snímky radiometrickými hodnotami pásem Sentinel-2 a údajů z pozemního šetření defoliace s několika rozdíly.

Jelikož snímky Landsat tvoří delší časovou řadu než mise Sentinel-2, byly použity snímky z let 2016 až 2014. Pro získání radiometrických hodnot ze všech ploch bylo nutné v každém roce vybrat 8 relativně bezoblačných snímků z období sběru pozemních dat viz Tabulka 9.

Analýza obsahovala plochy vybrané podle stejných kritérií jako pro analýzu snímků Sentinel-2. Pouze odstranění pixelů ovlivněných oblačností probíhalo v aplikaci ArcMap 10.4.1 (ESRI, 2016) s vrstvou vytvořenou algoritmem Fmask.

Při odečítání radiometrických hodnot ze scén Landsat byla použita pásma 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 pro senzor ETM+ a pásma 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 pro senzor OLI. K vypočtení korelačních koeficientů bylo přistoupeno z dat za všechny plochy v daném roce, neboť data Landsat obsahují atmosférické korekce.

Vztah údajů z pozemního šetření defoliace a radiometrických hodnot spektrálních pásem satelitních snímků Sentinel-2

Hledání vztahu radiometrických hodnot v pásmech satelitních snímků Sentinel-2 s údaji z pozemního šetření defoliace probíhalo s dvěma scénami z roku 2015 a dvěma z roku 2016, viz Tabulka 6. Dvě scény je nejmenší možný počet pro získání údajů ze senzoru MSI pro všechny výzkumné plochy, na kterých probíhalo pozemní šetření defoliace.

Z databáze dat pozemního šetření defoliace byly vybrány všechny plochy, na kterých se uskutečnilo v letech 2015 a 2016 šetření defoliace, a zároveň splňovaly následující podmínky: podíl smrků (*Picea abies*), anebo borovic (*Pinus sylvestris*) alespoň 90 %, homogenita plochy stupeň 1. Z tohoto souboru ploch byly následně podle masky oblačnosti odstraněny ty pod oblačností nebo v jejím stínu. Identifikace ploch ovlivněných oblačností

probíhala v platformě ESA STEP (ESA, 2017b) aplikace SNAP Toolbox (ESA, 2017c).

Pomocí souboru SHP s body reprezentujícími výzkumnou plochu byly v těchto místech odečteny radiometrické hodnoty ze scény Sentinel-2 pro jednotlivá pásma (pásma 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11, 12). Tento proces probíhal v prostředí QGIS Desktop 2.18.0 Las Palmas (QGIS, 2017) prostřednictvím algoritmu od externího poskytovatele algoritmů SAGA GIS (SAGA GIS, 2017) přesněji algoritmu Add raster values to features. Výsledkem tohoto procesu je tabulka ve formátu XLSX s odečtenými radiometrickými hodnotami pásem přiřazenými k příslušné ploše. Proces probíhal tak, že každé ploše byla přiřazena právě jedna hodnota pixelu ze satelitního snímku.

Poslední krok představovaly statistické metody korelace a regrese. Korelace slouží k hodnocení síly (těsnosti) závislosti dvou spojitých veličin. Regrese hledá závislost spojitě veličiny na jedné či několika proměnných a způsob (tvaru) závislosti těchto veličin. Posledním statistickým prostředkem je lineární regrese, kde hledáme matematické vyjádření vysvětlované, tj. závislé proměnné (míra defoliace) pomocí vysvětlující, tj. závislé proměnné (radiometrické hodnoty pásem multispektrálního měření nebo hodnoty spektrálních indexů) (Zvára, 2003). Vyhodnocení probíhalo na každém snímku zvlášť kvůli povaze satelitních dat (jedná se o data bez atmosférické korekce). Výpočet korelace a sestavení regresní přímky probíhal v SW Microsoft Office v aplikaci Excel 2016 pomocí doplňku Analytické nástroje (Microsoft, 2017).

Reprezentativnost výzkumné plochy pro její okolí

Další testování probíhalo v bezprostředním okolí plochy pro posouzení reprezentativnosti plochy i pro okolní porost. Vybrané plochy měly parametry homogenita plochy a homogenita porostu (viz kapitola XX) oba s hodnotou 1. Z parametrů výzkumné plochy (kruh o poloměru 18 m) je zřejmé, že i některé okolní pixely (sousedící s pixelem, kde se nachází souřadnice středu výzkumné plochy) nesou informaci z výzkumné plochy. Zejména u pásem senzoru MSI (2, 3, 4, 8) s prostorovým rozlišením 10 m.

Hodnota 1 parametru homogenita porostu ovšem nezakládá žádnou informaci o tvaru, velikosti ani směru, kde se homogenní porost vůči výzkumné ploše nachází. Výběr okolních pixelů (3 až 6) probíhal manuálně s vizualizací středů výzkumných ploch na podkladu ortofotosnímku z WMS ČÚZK (ČÚZK, 2017c) ve shodném souřadnicovém systému. Pixely musely být

z výše uvedených důvodů vybrány subjektivně, a to tak aby nebyly ovlivněny např. změnou druhové skladby, snížením korunového zápoje, přítomností antropogenního objektu (komunikace apod.) nebo změnou krajinného pokryvu. Kritéria použitá pro výběr pixelů byla tón barvy lesního porostu a ortofotosnímku a jeho textura.

Spektrální indexy

Podle kapitoly 5.1 proběhlo posouzení míry spolehlivosti stanovení defoliace pomocí spektrálních indexů odvozených ze snímků Sentinel-2. Vybrané plochy pro testování spektrálních indexů splňovaly stejná kritéria jako plochy použité pro testování závislosti mezi pozemním šetřením defoliace a radiometrickými hodnotami pásem Sentinel-2 (viz výše Vztah údajů z pozemního šetření defoliace a radiometrických hodnot spektrálních pásem satelitních snímků Sentinel-2). Spektrální indexy byly vypočteny z dvou scén ze roku 2015 a dvou z roku 2016 viz Tabulka 6. Korelační koeficienty závislosti pozemního šetření a hodnot spektrálních indexů odvozených ze satelitních snímků korespondují s hodnotami korelačních koeficientů závislosti mezi pozemním šetřením a hodnotami pro pásma z blízké infračervené oblasti satelitních snímků.

K výpočtu spektrálních indexů z dat Landsat nebylo přistoupeno z důvodu nenalezení dostatečně silného vztahu s žádným spektrálním pásem v datové sadě Landsat CDR.

Výpočet hodnot spektrálních indexů podle vzorců (viz kapitola 3.6.1 Spektrální indexy) sloužilo prostředí QGIS Desktop 2.18.0 Las Palmas (QGIS, 2017) modul Raster Calculator. Dále pomocí algoritmu od externího poskytovatele algoritmů SAGA GIS (SAGA GIS, 2017) Add raster values to features proběhlo vytvoření tabulky ve formátu XLSX s odečtenými hodnotami spektrálních indexů přiřazenými k příslušné ploše. Výpočet korelace a sestavení regresní přímky probíhal v SW Microsoft Office v aplikaci Excel 2016 pomocí doplňku Analytické nástroje (Microsoft, 2017).

5 Výsledky

V rámci této diplomové práce byly využity dvě datové sady multispektrálních satelitních snímků misí Sentinel-2 a Landsat. Družicové snímky pokrývají celé území Česka. Zkoumání směřovalo v nalezení charakteristického spektrálního projevu defoliace u smrku (*Picea abies*) a borovice (*Pinus sylvestris*). A pomocí zjištěného spektrálního projevu stanovit míru defoliace smrkových, resp. borovicových porostů prostřednictvím radiometrických údajů. Verifikace schopnosti radiometrických dat ze spektrálních pásem družicových snímků určit míru defoliace probíhala pomocí dat pozemního šetření defoliace I. úrovně monitoringu prováděného VÚLHM a statistických metod korelace a regrese.

Postup technického a metodického zpracování satelitních snímků a následného testování s daty pozemního šetření defoliace je popsán v kapitole 4.7.

5.1 Vztah údajů z pozemního šetření defoliace a radiometrických hodnot spektrálních pásem satelitních snímků

Míru korelace mezi radiometrickými hodnotami v pásmech satelitních snímků družice Sentinel-2 a údaji z pozemního šetření defoliace ukazují Tabulky 11 a 12 zvlášť pro smrkové, resp. borovicové porosty. Každá tabulka obsahuje čtyři sady hodnot korelačních koeficientů. Každá sada odpovídá jedné scéně Sentinel-2. Výpočet korelace mezi radiometrickými daty a údaji z ploch pozemního šetření defoliace probíhal na každé scéně Sentinel-2 bez atmosférické korekce samostatně. Seznam použitých ploch pozemního šetření defoliace je uveden v Příloze č. 4.

Výše uvedená tabulka 11 ukazuje, že hodnoty korelačních koeficientů se pohybují mezi $-0,79$ až $0,10$. Kromě pásem v blízké infračervené oblasti spektra dosahují korelační koeficienty hodnot slabé korelace mezi radiometrickými hodnotami v pásmech scén Sentinel-2 a pozemním šetřením defoliace na plochách se smrkovým porostem. Pásma senzoru MSI B06, B07, B08, B8A stejně tak jako jejich součty B+ a B++ mají silnou korelaci radiometrických hodnot a pozemního šetření defoliace pro plochy se smrkovým porostem, a to na všech čtyřech použitých scénách.

Tabulka 11: Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace smrkových porostů

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 25; datum pořízení snímku 03.08.2015

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	0,10	0,01	0,14	-0,16	-0,65	-0,67	-0,67	-0,68	-0,26	-0,08	-0,61	-0,65

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 27; datum pořízení snímku 30.08.2015

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	-0,04	-0,28	-0,08	-0,46	-0,71	-0,74	-0,75	-0,74	-0,38	-0,31	-0,71	-0,74

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 18; datum pořízení snímku 04.08.2016

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	-0,24	-0,35	-0,24	-0,45	-0,75	-0,79	-0,79	-0,79	-0,39	-0,24	-0,75	-0,78

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 34; datum pořízení snímku 27.08.2016

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	-0,12	-0,27	-0,14	-0,35	-0,57	-0,61	-0,70	-0,63	-0,18	-0,11	-0,58	-0,63

*součet pásem B05 až B07; ** součet pásem B05 až B8A

Zdroj: vlastní

Tabulka 12 pro borovicové porosty prezentuje hodnoty korelačních koeficientů mezi radiometrickými hodnotami v pásmech scén Sentinel-2 a pozemním šetřením defoliace na plochách s borovicovým porostem. Koeficienty dosahují hodnot od -0,36 do 0,69. Radiometrické hodnoty z pásem B03 a B04 prokázali nejvyšší korelaci s údaji z pozemního šetření defoliace borovicových porostů. Ale pouze u jedné scény (30. 8. 2015) se jedná o silnou závislost.

Analogická analýza, jako pro data ze scén Sentinel-2, proběhla s daty mise Landsat. Výstupy z této analýzy ilustrují dvě tabulky 13 a 14, první pro smrkové a druhá pro borovicové porosty. Seznam použitých ploch pozemního šetření defoliace je uveden v Příloze č. 5.

Tabulka 12: Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace borovicových porostů

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 15; datum pořízení snímku 03.08.2015

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	0,56	0,60	0,69	0,52	0,06	-0,08	-0,13	-0,02	0,33	0,31	0,09	0,00

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 10; datum pořízení snímku 30.08.2015

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	0,53	0,49	0,58	0,46	0,15	0,04	0,01	0,06	0,36	0,37	0,14	0,08

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 7; datum pořízení snímku 04.08.2016

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	0,36	0,44	0,55	0,31	-0,26	-0,36	-0,12	-0,36	0,27	0,36	-0,28	-0,26

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 17; datum pořízení snímku 27.08.2016

spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12	*B+	**B++
korelační koeficient	0,35	0,45	0,50	0,44	-0,20	-0,28	-0,28	-0,27	0,32	0,33	-0,18	-0,23

*součet pásem B05 až B07; ** součet pásem B05 až B8A

Zdroj: vlastní

Hodnoty korelačních koeficientů vztahu radiometrických hodnot v pásmech scén Landsat a pozemním šetřením defoliace na plochách smrkovým porostem prezentuje tabulka 13. V této tabulce pozorujeme hodnoty korelace mezi -0,59 a 0,03. Naměřené hodnoty z žádného pásma nemají silnou korelaci s údaji z pozemního šetření defoliace. Ve všech třech zkoumaných letech dosahuje korelace údajů z pozemního šetření defoliace a hodnoty měřené v pásmu B5 (z blízké infračervené oblasti) nejvyššího korelačního koeficientu ve srovnání s korelačními koeficienty pro ostatní spektrální pásma.

Tabulka 14 ukazuje vztah radiometrických hodnot pásem scén Landsat a pozemním šetřením defoliace na plochách borovicovým porostem. Hodnoty korelačních koeficientů dosahují hodnot od -0,52 do 0,47. Žádné radiometrické hodnoty spektrálních pásem Landsat nevykazují ani poměrně konzistentní hodnoty korelačních koeficientů k údajům z pozemního šetření defoliace borovicových porostů. Pouze na scénách z roku 2016 se korelace radiometrických hodnot pásma B5 (blízká infračervená oblast spektra) a pozemního šetření defoliace blíží hodnotám korelačních koeficientů pro silnou závislost ($R = -0,52$).

Tabulka 13: Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzorů OLI, resp. ETM+ a údajů z pozemního šetření defoliace smrkových porostů

2014						
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07
korelační koeficient	-0,09	-0,14	-0,09	-0,51	-0,29	-0,13
2015						
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07
korelační koeficient	-0,16	-0,22	-0,13	-0,53	-0,04	0,02
2016						
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07
korelační koeficient	0,03	-0,04	0,05	-0,59	-0,17	-0,07

Zdroj: vlastní

Tabulka 14: Korelace radiometrických dat ze spektrálních pásem senzoru OLI, resp. ETM+ a údajů z pozemního šetření defoliace borovicových porostů

2014						
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07
korelační koeficient	-0,01	0,05	0,04	0,12	0,07	0,05
2015						
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07
korelační koeficient	0,12	0,30	0,47	-0,30	0,10	0,18
2016						
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07
korelační koeficient	-0,52	-0,05	0,25	-0,52	-0,21	0,04

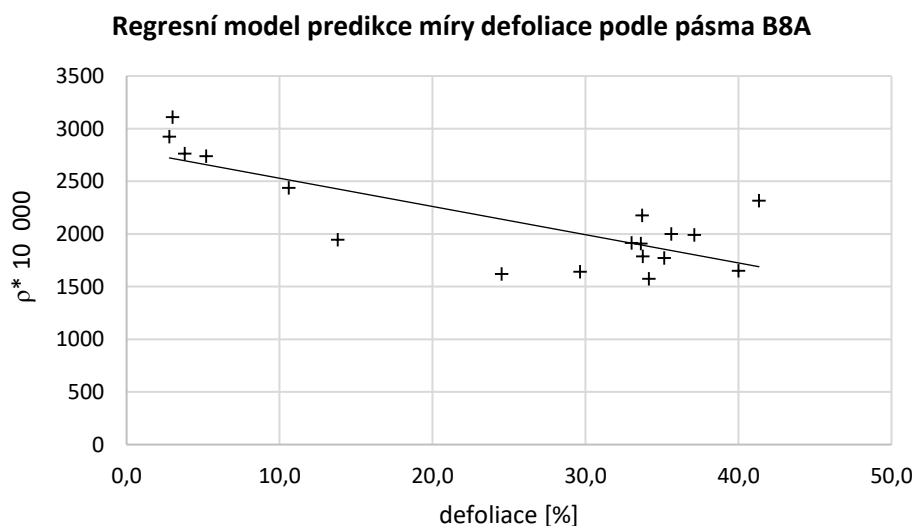
Zdroj: vlastní

Pro stanovení míry defoliace smrkových porostů prostřednictvím multispektrálních snímků se po provedené korelační analýze jako nejvhodnější ukázala pásma senzoru MSI B8 a B8A, u kterých kolísá korelační koeficient mezi hodnotami -0,79 až -0,61. U radiometrických hodnot naměřených senzorem OLI, resp. ETM+ na podobném spektrálním rozsahu vlnových délek byl pozorován během tří let konzistentní, ale poněkud slabší vztah (korelační koeficient mezi -0,59 až -0,51) k pozemnímu šetření defoliace smrkových porostů. Analogickým postupem pro stanovení míry defoliace borovicových porostů nebylo žádné pásmo z multispektrálních dat vyhodnoceno jako potenciálně vhodné.

Záporné hodnoty korelačních koeficientů mezi radiometrickými hodnotami pásem blízké infračervené oblasti a pozemního šetření defoliace smrkových porostů odpovídají teorii (viz 2.1 Spektrální projev listu) tedy, že s rostoucí mírou defoliace klesají hodnoty měřené odražené zářivé energie. Protože v této oblasti spektra dosahuje odrazivost listů vysokých relativních hodnot ztráta olistění znamená pokles v naměřených hodnotách zářivé energie.

Podle Tabulky 11 radiometrické hodnoty pásma 8A scén Sentinel-2 vykazují nejsilnější závislost na pozemním šetření defoliace smrkových porostů. Na grafu č. 3 můžeme vidět bodový graf znázorňující závislost radiometrických hodnot pásma 8A dat Sentinel-2 (z blízké infračervené oblasti) na pozemním šetření defoliace smrkových porostů a zavedený regresní model. Zvolený lineární regresní model popisuje tvar závislosti radiometrických hodnot pásma 8A na pozemním šetření defoliace. Na grafu vidíme očekávaný průběh, tj. vysoké hodnoty záře pro porosty s nízkou defoliací a klesání hodnot záře s rostoucími údaji z pozemního šetření defoliace. Porosty s mírnou hodnotou defoliace z pozemního šetření mezi 30 až 40 % tvoří obtížně rozlišitelný shluk. Významnou část variability, proto vytvářejí plochy s hodnotou z pozemního šetření defoliace okolo 10 %.

Graf 3: Bodový graf relativních hodnot odrazivosti pásma B8A (senzoru MSI ve scéně z 4. 8. 2016) a údajů o defoliaci z pozemního šetření a zavedený regresní model [$y = 26,812x + 2797,4$; $R^2 = 0,62$; $R = -0,79$]



Zdroj: vlastní

5.2 Reprezentativnost výzkumné plochy pro její okolí

Následující testování mělo za cíl hodnotit vztah pozemního šetření defoliace na monitorovací ploše a v jejím bezprostředním okolí. Dalším účelem bylo posoudit významnost doplňkového parametru o monitorovací ploše homogenita porostu (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření). Použity byly dvě scény senzoru MSI ze dne 3. 8. 2015, resp. 30. 8. 2015 a monitorovací plochy pozemního šetření defoliace, viz Příloha č. 6. Hodnoty korelačních koeficientů vztahu pozemního šetření defoliace a průměru radiometrických hodnot ze tří až šesti pixelů (výběr viz kapitola 4.7 Stanovení spektrálního projevu defoliace) překrývajících plochu a její okolí prezentují Tabulky 14 a 15

Tabulka 15: Korelace radiometrických dat (průměr za vybrané pixely) ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace smrkových porostů

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 24; datum pořízení snímku 03.08.2015										
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12
korelační koeficient	-0,21	-0,25	-0,03	-0,18	-0,52	-0,55	-0,57	-0,52	0,03	0,33

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 22; datum pořízení snímku 30.08.2015										
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12
korelační koeficient	-0,02	-0,20	-0,08	-0,43	-0,67	-0,69	-0,68	-0,68	-0,24	-0,10

Zdroj: vlastní

Tabulka 16: Korelace radiometrických dat (průměr za vybrané pixely) ze spektrálních pásem senzoru MSI a údajů z pozemního šetření defoliace borovicových porostů

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 9; datum pořízení snímku 03.08.2015										
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12
korelační koeficient	0,57	0,64	0,59	0,61	0,70	0,66	0,65	0,70	0,60	0,40

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 8; datum pořízení snímku 30.08.2015										
spektrální pásmo	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B8A	B11	B12
korelační koeficient	0,49	0,49	0,68	0,60	0,09	-0,02	0,02	0,01	0,52	0,53

Zdroj: vlastní

Výše uvedená tabulka 14 ukazuje, že hodnoty korelačních koeficientů se pohybují mezi -0,69 až 0,33. Pásma senzoru MSI B06, B07, B08, B8A mají střední korelaci průměru radiometrických hodnot z vybraných pixelů a pozemního šetření defoliace pro plochy se smrkovým porostem, a to na obou použitých

scénách. Korelační koeficienty pro radiometrické hodnoty průměru z vybraných pixelů a pozemním šetřením defoliace dosahují na snímku z 3.8.2015 kladných hodnot v pásmech B11 a B12, což je v rozporu se záporným (na základě literatury očekávaným) vztahem na stejné scéně na stejných monitorovacích plochách bez použití průměrné radiometrické hodnoty z vybraných pixelů viz Příloha č. 7.

Tabulka 15 ukazuje, že korelační koeficienty průměru radiometrických hodnot z vybraných pixelů a pozemního šetření defoliace ploch se borovicovým porostem nabývají hodnot mezi $-0,02$ až $0,70$. Na scéně z 3. 8. 2015, resp. 30. 8. 2015 se nacházelo 10, resp. 8 ploch, kde probíhalo pozemní šetření defoliace, a plochy zároveň splňovaly kritéria procentního zastoupení borovic a homogenity porostu. Tento malý vzorek dat významně ovlivnil hodnoty korelačních koeficientů. Nicméně střední sílu korelace mezi radiometrickými hodnotami pásem viditelné oblasti spektra a pozemním šetřením defoliace (viz Příloha č. 7) potvrdilo i testování průměru radiometrických hodnot z vybraných pixelů pásem viditelné oblasti spektra.

Použití průměrných radiometrických hodnot z vybraných pixelů pro analýzu korelace s pozemním šetřením defoliace nepřineslo zvýšení hodnot korelačních koeficient mezi radiometrickými hodnotami jednotlivých pásem a pozemním šetřením defoliace na plochách se smrkovým ani borovicovým porostem. Tabulky 11 a 12 představují korelační koeficienty mezi radiometrickými daty ze spektrálních pásem a údaji z pozemního šetření defoliace smrkových, resp. borovicových porostů na dané scéně. Oproti tomu tabulky v Příloze č. 7 ukazují korelační koeficienty mezi radiometrickými daty ze spektrálních pásem (vybraný jeden pixel) a údaji z pozemního šetření defoliace smrkových, resp. borovicových porostů na stejných plochách, pro které byly s okolními pixely průměrované radiometrické hodnoty, a probíhalo na nich testování reprezentativnosti výzkumné plochy pro její okolí.

5.3 Spektrální indexy

Vybrané spektrální indexy NDVI, NDMI, NBRI, MSI (více podkapitola 3.6.1 Spektrální indexy) byly vypočteny pro dva snímky Sentinel-2 z roku 2015 a dva snímky z roku 2016 (viz tabulka 6 umístění: 4.4 Použitá data – Sentinel-2). Tabulka 17 a 18 zobrazuje korelační koeficienty pro vztah spektrálních indexů

a pozemním šetřením defoliace smrkových, resp. borovicových porostů. Seznam použitých ploch pozemního šetření defoliace je uveden v Příloze č. 4.

Hodnoty korelačních koeficientů NDMI a NBRI mají středně silnou negativní korelaci na pozemním šetření defoliace smrkových porostů ($R = -0,43$ až $R = -0,58$). Index MSI má podobnou absolutní hodnotu korelačního koeficientu, ale korelační koeficient má opačné znaménko z důvodu rozdílné konstrukce vzorce pro jeho výpočet. Nejsilnější korelaci na pozemním šetření defoliace smrkových porostů vykazuje vegetační index NDVI ($R = -0,71$).

Tabulka 17: Korelace vegetačních indexů odvozených z dat senzoru MSI na defoliaci smrkových porostů

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 25; datum pořízení snímku 03.08.2015				
spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,70	-0,49	-0,55	0,48

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 27; datum pořízení snímku 30.08.2015				
spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,71	-0,58	-0,48	0,57

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 18; datum pořízení snímku 04.08.2015				
spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,71	-0,43	-0,43	0,41

počet smrkových ploch pozemního šetření ve scéně: 34; datum pořízení snímku 27.08.2015				
spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,71	-0,50	-0,42	0,45

Zdroj: vlastní

V případě pozemního šetření defoliace borovicových porostů hodnoty korelačních koeficientů pro všechny spektrální indexy značně kolísají. Nízký počet provedených pozemních šetření na borovicových porostech na jednotlivých scénách znesnadňuje interpretaci rozkolísaných hodnot.

Tabulka 18: Korelace vegetačních indexů odvozených z dat senzoru MSI na defoliaci borovicových porostů

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 15; datum pořízení snímku 03.08.2015

spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,57	-0,40	-0,32	0,38

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 10; datum pořízení snímku 30.08.2015

spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,28	-0,22	-0,18	0,20

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 7; datum pořízení snímku 04.08.2015

spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,45	-0,45	-0,45	0,45

počet borovicových ploch pozemního šetření ve scéně: 17; datum pořízení snímku 27.08.2015

spektrální index	NDVI	NDMI	NBRI	MSI
korelační koeficient	-0,57	-0,59	-0,49	0,58

Zdroj: vlastní

S výjimkou vegetačního indexu NDVI byly u ostatních spektrálních indexů zjištěny hodnoty korelace s pozemním šetření defoliace jak smrkových, tak i borovicových porostů nižší, než hodnoty korelace radiometrických hodnot pásem senzoru MSI a pozemním šetření defoliace.

6 Diskuze

Získané výsledky demonstrují možnost, jak stanovit míru defoliace pomocí multispektrálních družicových dat. První část diskuze se zabývá vlivy ovlivňujícími určování defoliace ze satelitních snímků a nedostatky představeného přístupu. Druhá část diskuze přináší srovnání dosažených výsledků a postupů s ostatními autory zkoumajícím obdobnou tematiku. A třetí část zmiňuje možné další směry k využití dat o defoliaci z pozemního šetření VÚLHM a také možnosti dalšího výzkumu na poli určování defoliace distančními metodami.

Vlivy ovlivňující stanovení defoliace z družicových multispektrálních snímků

Jako první skutečnost při získávání informace o defoliaci ze satelitních snímků Landsat a Sentinel-2 se projevil vliv použitých dat DPZ, Landsat, či Sentinel-2. Nižší sílu závislosti radiometrických hodnot oblasti blízkého infračerveného pásma u snímků senzoru OLI (band 5) a ETM+ (band 4) oproti pásmu senzoru MSI (band 8A) mohla způsobit skutečnost, že korelační koeficienty pro data Sentinel-2 byly vypočteny z radiometrických hodnot jedné scény, zatímco pro data Landsat bylo použito scén osm. Radiometrické hodnoty z více scén Landsat mohly být použity v jedné datové sadě, díky provedené atmosférické korekci, pro scény Sentinel-2 nebyla atmosférická korekce provedena, a proto byly vyhodnocovány každá samostatně. Dalším činitelem, který způsobil odlišné výsledky korelačních koeficientů pro senzory OLI a ETM+, resp. MSI, mohl být odlišný rozsah vlnových délek porovnávaných kanálů (Tabulky 5 a 7) zejména pak band 4 senzoru ETM+, avšak scény z tohoto senzoru byly použity vždy jen jedna z osmi v daném roce. I další vlivy zde sehrály svoji roli, hlavně pak nižší prostorové rozlišení senzorů OLI a ETM+. Pro prakticky stejnou spektrální oblast vychází pro radiometrické hodnoty v pátém spektrálním kanálu ve snímku ze senzorů OLI a ETM+ (odrazivost na povrchu Země) slabá závislost na údajích z pozemního šetření defoliace na rozdíl od radiometrických hodnot v kanálu 8A ve snímku ze senzoru MSI (odrazivost na horní hranici atmosféry) se silou závislostí na údajích z pozemního šetření defoliace. Vliv atmosférické korekce na výsledky nemohl být na těchto datových sadách spolehlivě určen. Relevantnější hodnocení vlivu atmosférické korekce by představovalo srovnání scén

pořízených stejným senzorem s atmosférickou korekcí a bez ní. Autor práce k tomuto porovnání nepřistoupil, neboť důkladné prozkoumání tohoto tématu nebylo cílem práce.

Hodnoty spektrálních indexů, odvozené ze snímků Sentinel-2, pro borovicové indexy velmi kolísají (viz Tabulka 17) v důsledku změn hodnot samostatných pásem. Kvůli konstrukci indexů (jedná se o poměrové indexy) se mohou při porovnání různých scén projevit poměrně malé změny v absolutních hodnotách jednotlivých pásem jako poměrně velké změny v relativní hodnotě poměrového indexu. Smrkové porosty mají menší kolísání hodnoty vegetačních indexů. Pro hodnoty z pozemního šetření defoliace borovicových porostů se oproti smrkovým porostům nepodařilo nalézt obdobně silnou korelaci k radiometrickým hodnotám jednotlivých pásem ani k hodnotám spektrálních indexů. V tabulkách 10, 11, 16 a 17 je vidět rozdíl v síle korelace hodnot spektrálních indexů, resp. radiometrických hodnot samostatných pásem na údajích o pozemním šetření defoliace. Konstrukce vegetačních indexů obsahuje vždy jedno pásmo z blízké infračervené oblasti, a právě radiometrické hodnoty z těchto pásem mají silnou korelaci na údajích o pozemním šetření defoliace. Druhé použité pásmo ve vegetačních indexech již nemá silnou závislost na defoliaci a vnáší tak šum do výsledné hodnoty indexu. Indexy tak vykazují nižší sílu korelace než samostatná pásma.

Pro potenciální zlepšení modelu pro predikci defoliace smrkových porostů práce uvádí v Tabulkách 10 a 11 součet radiometrických hodnot vybraných pásem senzoru MSI. Pásma jsou vybrána z oblasti Red Edge a blízkého infračerveného pásma. Ale tento součet radiometrických hodnot pásem nepřinesl vyšší závislost radiometrických hodnot jednotlivých pásem na pozemní šetření defoliace než radiometrické hodnoty z každého pásma samostatně. Je tak možné, že rozdíly v multispektrálních pásmech pro různé kategorie defoliace existují pouze v infračervené oblasti pro smrkové porosty a červené (popř. viditelné) oblasti pro porosty borovicové. Pásma senzoru MSI band 08 a 8A charakterizují defoliaci smrkových porostů lépe než ostatní pásma nebo jejich kombinace a to samé lze tvrdit o červeném pásmu pro borovicové porosty.

Zásadním bodem této práce bylo nalezení monitorovací plochy na družicových snímcích a následné ztotožnění s pixelem reprezentujícím plochu v následujících výpočtech a analýzách. Obě datové sady satelitních snímků

(Landsat i Sentinel-2) dosahují subpixelové přesnosti (viz kapitola 4.6 Předzpracování družicových dat), a proto není pro potenciální zpřesnění velký prostor. Autor práce se zaměřil na zpřesnění polohového určení monitorovacích ploch, tedy datové sady VÚLHM (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření) nesoucí údaje o pozemním šetření defoliace. V tomto procesu bylo dosaženo polohové odchylky menší než 10 m (viz Tabulka 4). Z výše uvedených údajů o polohové přesnosti je zřejmé, že se zcela nepodařilo eliminovat možnost chybného ztotožnění monitorovací plochy s pixelem. Nejvyšší riziko chybného určení pixelu překrývajícího plochu, na které proběhlo pozemní šetření defoliace, je u scén Sentinel-2 přesněji pásem s prostorovým rozlišením 10 m. Nicméně dosažená úroveň přesnosti dává vhodné předpoklady pro úspěch v navazujících částech práce. Další možnost zpřesnění souřadnic monitorovací plochy představuje provedení pozemní kampaně a přesné zaměření monitorovacích ploch v terénu vhodným přístrojovým vybavením. Autor práce tuto možnost nevyužil z důvodu neúměrné časové náročnosti pozemní kampaně (pro 64 ploch rozmístěných po celém území Česka) v porovnání s možnostmi zpřesnění polohy metodami uvedenými v kapitole 4.3 Použitá data – pozemní šetření.

S výběrem jednoho pixelu pro reprezentaci monitorovací plochy také souvisí rozdílné geometrické uspořádání pixelu (čtverec) a plochy pozemního šetření defoliace (kruh). Tento nesoulad nutně zavádí do analýzy chybu. Pixel nedokonale překrývající monitorovací plochu vždy obsahuje údaje z měření i na stromech, na kterých nebylo provedeno pozemní šetření, a zároveň neposkytuje radiometrické měření ze všech stromů z pozemního šetření (poloměr monitorovací plochy 18 m, prostorové rozlišení senzoru OLI 30 m a MSI 10 m, resp. 20 m). Tento nedostatek se autor pokusil eliminovat průměrováním s okolními pixely (viz kapitoly 4.7 a 5.2), nicméně k zpřesnění modelu to nevedlo.

Použitá data pozemního šetření defoliace (viz kapitola 4.3 Použitá data – podzemní šetření) vznikají metodou subjektivního optického stanovení hodnoty defoliace a nesou s sebou zkreslení s tím spojená. Rizika vyplývající z jednostranného určení defoliace jsou do velké míry odstraněna dlouholetými zkušenostmi a znalostmi Ing. Fabiánka, který provádí pozemní šetření na celém území Česka kontinuálně již mnoho let a je tak zajištěna spolehlivost relativního srovnání údajů o defoliaci. Ing. Fabiánek aktivně koordinuje činnost

VÚLHM v rámci mezinárodních vědeckých programů. Díky tomu je zaručena vzájemná porovnatelnost defoliace na jednotlivých plochách a též v průběhu let. Při konzultacích s autorem práce Ing. Fabiánek prokázal jedinečnou znalost monitorovacích ploch z mnoha aspektů (druhovú skladba, podrost, zdravotní stav apod.). Z těchto důvodů autor práce považuje údaje z pozemního šetření defoliace za dostatečně přesné jak v absolutním, tak zejména relativním srovnání.

Pozemní data použitá ve formě průměru defoliace za jednotlivé stromy s sebou nesou určitou míru generalizace. Zjednodušující údaj o průměrné defoliaci za každou plochu, kde probíhalo pozemní šetření defoliace, byl použit kvůli návaznosti na prostorové rozlišení satelitních snímků. Přesto že se v kapitole 4.3 Použitá data – pozemní šetření v části Porostní homogenita vysvětluje homogenita okolí vůči monitorovací ploše, i samotná plocha obsahuje určitou variabilitu defoliace. Tato vnitřní variabilita v defoliaci jednotlivých stromů na ploše není v práci řešena, je tudíž přijata hypotéza o nízké hodnotě této variability, která je podepřena výběrem ploch o homogenitě plochy hodnotou 1 (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření v části Porostní homogenita). Dalším možným východiskem by bylo použít místo průměru např. mediánovou hodnotu. Výrazně sofistikovanějším postupem může být sestavení nelineárního regresního modelu se smíšenými efekty (defoliace jednotlivých stromů). Tato metoda by představovala rozšíření stávajícího výzkumu defoliace prostředky DPZ viz dále v této kapitole.

V kapitole 4.7 Stanovení spektrálního projevu defoliace v části Reprezentativnost výzkumné plochy pro její okolí je popsán subjektivní výběr okolních pixelů. Použitá metoda výběru z ortofotosnímku v sobě zahrnuje nedostatky. Popsaným výběrem se do volby dostaly i pixely, které nenesou žádnou informaci o monitorovací ploše. I to bylo na jednu stranu cílem, tedy testovat reprezentativnost plochy pro okolí, nicméně subjektivní volba s uvedenými kritérii (viz kapitola 4.7. Stanovení spektrálního projevu defoliace) nutně vedla autora k takovému výběru, který bude poměrně reprezentativní. Pro odlišný postup, jak posoudit vztah plochy a jejího okolí by bylo vhodné definovat automatický postup, který by zahrnoval uvedená kritéria, a objektivně prováděl výběr okolních pixelů.

V rámci hledání vztahu mezi radiometrickými hodnotami pásem v satelitních snímcích a pozemním šetřením defoliace předvedl autor také

analýzu reprezentativnosti výzkumné plochy pro její okolí pro účely DPZ (viz kapitoly 4.7 a 5.2). Na tomto místě je nutné poznamenat limity provedeného srovnávání. Při hledání vztahu mezi radiometrickými hodnotami pixelů i v okolí výzkumné plochy a pozemním šetřením defoliace na ploše byla použita pouze podmnožina ploch, na kterých probíhala analýza souvztažnosti mezi hodnotami z pozemního šetření defoliace a radiometrickými hodnotami z jednoho pixelu, který výzkumnou plochu nejvíce překrývá. Výběr pouze určitých ploch byl ovšem nutný, vzhledem k parametru porostní homogenity (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření). Tento parametr vymezuje plochy, na kterých je tato analýza smysluplná. Snížení počtu ploch na družicových snímcích má také za následek pokles robustnosti korelační analýzy.

V průběhu práce vyvstaly určité aspekty negativně ovlivňující výsledky prezentované v páté kapitole. Z důvodu nenalezení silného vztahu mezi pozemním šetřením defoliace a radiometrickými hodnotami v atmosféricky korigovaných snímcích Landsat, byla největší část práce předvedena pouze se scénami Sentinel-2 bez atmosférické korekce. Pro scény bez atmosférické korekce je ovšem relevantní sledování vztahu radiometrických hodnot jednotlivých pásem a pozemním šetřením defoliace pouze na každé scéně samostatně. To s sebou nese nutnost hledání vztahu pro každou scénu zvlášť, a tedy nevyužití celé datové sady z pozemního šetření. Jedna scéna senzoru MSI pokrývá o málo více než polovinu Česka, spolu s vyloučením ploch, které se nacházeli při pořizování snímku pod oblačností nebo v jejím stínu, to znamená snížení počtu ploch z 46 pro smrky, resp. 18 pro borovice na téměř polovinu. Výsledky z takto redukováného počtu ploch je obtížnější interpretovat a nelze z nich vyvodit stejně kvalitní závěry jako z podstatně obsáhlejších datových sad.

Do naměřených radiometrických údajů vstupují informace od všech objektů, od kterých se směrem k senzoru odrazí sluneční radiace. U ploch s nedostatečným korunovým zápojem hraje velkou roli podrost. Pokud na podrost dopadají sluneční paprsky následně odražené směrem k senzoru na družici a je podrostu poměrně velké množství, ovlivní jeho spektrální charakteristika významně naměřenou radiometrickou hodnotu. Typicky se může jednat o případ, kdy vitální zelený podrost např. mladé stromy, ostružiní apod. se nachází pod prořídlym starým smrkovým porostem a podílí se tak na

radiometrické informaci měřené senzorem na družici. Zkreslení poté spočívá ve smíchání vlivu vitálního podrostu a poškozeného smrkového porostu, což vede k chybné interpretaci radiometrických dat. Obecně může nastat případ, a není žádnou zvláštností, kdy se na monitorovací ploše nachází podrost mladých stromů. Mladé stromy, dokud nedosáhnou stádia zajištěné kultury, nejsou předmětem pozemního šetření defoliace, podle metodiky použitých dat pozemního šetření. V takové situaci podrost může významně zkreslit výsledek stanovený DPZ. Popis podrostu na jednotlivých plochách neměl autor práce k dispozici, a proto použil pro odstranění tohoto vlivu pouze další parametry o monitorovací ploše viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření.

Hodnoty odrazivosti ve snímcích Sentinel-2 pro porosty defoliované mezi 25 a 40 % vykazují malou variabilitu, a to ve všech pásmech. Pouze pásma střední infračervené oblasti, ze senzoru MSI band 11 a 12, obsahují trend v odrazivosti pro plochy se smrkovými porosty. Odrazivost v těchto dvou pásmech ovšem s rostoucí defoliací roste, což neodpovídá teorii. Tento tvar vztahu pro pásma band 11 a 12 může vysvětlovat nižší sílu vztahu pro indexy, ve kterých jsou použité, oproti studiím uvedených v kapitole 3.5 Odborné studie defoliace.

Pro lepší pochopení projevu defoliace v multispektrálním snímku se autor pokusil charakterizovat jednotlivé kategorie defoliace (kapitola 5 Výsledky) spektrálně. Podle Lukeše (2017) (výstupy práce zatím nepublikovány) se ukazují multispektrální družicové snímky jako nedostatečné pro rozlišení nízkých hodnot defoliace do cca 20 %. V této práci se výsledky pro podpoření či vyvrácení nepodařilo vytvořit, neboť na žádné scéně Sentinel-2 není dostatečný počet ploch pro kategorie defoliace, aby mohlo být testování relevantní.

Rozdílný tvar koruny (korunová projekce) jednotlivých stromů mohl negativně ovlivnit výsledky prezentované v kapitole 5. Jelikož korunová projekce jednotlivých stromů je variabilní a závisí na mnoha faktorech např. stanoviště, provinience, způsob pěstování apod. mění se i geometrické podmínky sběru dat DPZ. Vliv různého prostorového uspořádání korun stromů nebyl v práci zohledněn. Když autor práce použil hypotézu o dostatečném korunovém zápoji, tak zároveň vyhodnotil uvedený vliv jako zanedbatelný.

Další činitel potenciálně komplikující stanovení defoliace pomocí družicových snímků je způsoben samotnou podstatou DPZ a projevem defoliace. Zatímco prostředky DPZ měří zářivou energii odraženou především od svrchní obálky horní hranice korun stromů, defoliace se projevuje v celé výšce olistěné části stromu (viz Obrázek 7). Pokud se defoliace projeví ve svrchní obálce ve stejné míře jako ve zbylé části koruny, nepředstavuje tento vliv zásadní problém pro určování defoliace prostředky DPZ. S touto hypotézou autor v práci pracoval. V literatuře autoři Barry et al. (2008) při laboratorním měření (přenosným spektrometrem) zjistili, že spektrální charakteristika defoliace stromů se zásadně liší, pokud je stromu manuálně odlistěna horní, resp. spodní část koruny. Data z pozemního šetření defoliace ovšem žádný ani podobný údaj (o defoliaci v částech koruny) neobsahují. Proto nebylo toto téma v práci řešeno. Autoři práce Barry et al. (2008) zjistili, že pokud je defoliována spodní část kmene není možné tuto změnu spolehlivě indetifikovat. Avšak pokus probíhal s mladými stromy druhu *Eucalyptus globulus*, který má olistěné větve od spodu kmene, což je rozdíl oproti dospělým smrkům a borovicím, na kterých se uskutečnilo šetření defoliace využitě v této diplomové práci.

Srovnání dosažených výsledků s ostatními odbornými studii

Studie autorů Lambert et al. (1995) (více v kapitole 3.5 Odborné studie defoliace) z území Krušných hor za použití dat senzoru TM úrovně odrazivosti na horní hranici atmosféry přinesla mnohé výsledky obdobné jako tato práce. Především obě práce vyhodnotily radiometrické hodnoty v jednotlivých pásmech satelitních snímků jako vhodnější pro určování defoliace oproti vegetačním indexům. To může ukazovat na projev defoliace více v absolutních hodnotách než relativních, které používají vegetační indexy. Lambert et al. (1995) zaznamenal také negativní závislost radiometrických hodnot z blízké infračervené oblasti na podzemím šetření poškození lesních porostů. Tato práce zaznamenala pokles odrazivosti s rostoucí defoliací do minima při defoliaci okolo 20 %. Od této hodnoty defoliace odrazivost pásem viditelného spektra roste do podobných hodnot jako pro defoliaci 0 až 15 %. Naproti tomu Lambert et al. (1995) pozoroval analogický průběh s jedním minimem ve středu hodnot defoliace ovšem na širší škále poškození lesních porostů. Obě práce používaly rozdílnou metodiku při pozemním šetření lesních porostů.

V práci autorů Rullán–Silva et al. (2015) (více v kapitole 3.5 Odborné studie defoliace) s daty senzoru TM s atmosférickou korekcí byly aplikovány vegetační indexy pro vytvoření regresního modelu pro predikci míry defoliace. Nelineární regresní model dosáhl nejvyšších koeficientů spolehlivosti (Nagelkerkeho R^2) 0,632 pro index MSI, resp. 0,517 pro index NDVI. Naproti tomu lineární regresní model aplikovaný na hodnoty odrazivosti na horní hranici atmosféry v této diplomové práci dosáhl nejvyššího koeficientu spolehlivosti (R^2) 0,538 pro radiometrické hodnoty v pásmu B08 senzoru MSI. Autoři Rullán–Silva et al. (2015) našli silný vztah mezi vegetačními indexy z dat s atmosférickou korekcí a pozemním měřením defoliace. Oproti tomu výsledky této diplomové práce nezjistily obdobně silnou závislost. Rozdíl mohl být způsoben použitím scén s atmosférickou korekcí v práci Rullán–Silva et al. (2015), resp. scén bez atmosférické korekce v této diplomové práci. Další rozdíl spočívá v odlišných datech DPZ, tj. Landsat 5 vs. Sentinel-2.

Další výzkum

Tato práce používala v Česku unikátní data o defoliaci vytvářená VÚLHM. Aplikované metodické postupy nevyčerpávají veškerý potenciál údajů poskytnutých VÚLHM. Protože při sbírání dat se hodnotí každý strom zvlášť, je možné pracovat na podrobnější úrovni (auto pracoval s průměry defoliace za výzkumnou plochu) za předpokladu použití odpovídajících dat DPZ. K tomuto cíli se nabízí použití dat s vyšším prostorovým rozlišením. Prostorové rozlišení by v ideálním případě mělo korespondovat s velikostí korun, aby bylo možné pracovat na úrovni jednotlivých stromů.

I při použití dat středního prostorového rozlišení (jako je Landsat či Sentinel-2) se nabízí možnost, jak sestavit model predikce defoliace na základě údajů za samostatné stromy. Práce by se mohla opřít o predikční model autorů Rullán–Silva et al. (2015) a následně ho upravit a obohatit ho o další náhodný efekt (defoliace za jednotlivé stromy). Tento přístup by mohl vyústit v model poskytující přechod od úrovně jednotlivých korun k měřítku ekosystémovému, tj. prostorové rozlišení družic Landsat a od roku 2015 též Sentinel-2. Nastíněný postup se při konzultaci s Mgr. Markétou Pavlíkovou (vědecká pracovníce Katedry pravděpodobnosti a matematické statistiky, Matematicko–fyzikální fakulty, Univerzity Karlovy) ukázal pro autora práce jako velmi náročný.

7 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývala metodami pro stanovení míry defoliace z dat DPZ přesněji pomocí multispektrálních družicových snímků. V práci byly využity satelitních snímky z družic Landsat a Sentinel-2. Spolu s daty z distančního měření z družic byly do práce zapojeny data z pozemního šetření defoliace I. úrovně monitoringu stavu lesa prováděného VÚLHM.

V první fázi proběhlo zpracování údajů z pozemního šetření (viz kapitola 4.3 Použitá data – pozemní šetření). Tato činnost představovala zpřesnění polohové informace o plochách I. úrovně monitoringu a výběr ploch vhodných pro účely DPZ podle doplňkových parametrů. Druhá fáze spočívala v nalezení spektrálního projevu defoliace v multispektrálních snímcích a výběru metody zpracování satelitních snímků vhodné pro stanovení míry defoliace (viz kapitola 4.7 Stanovení spektrálního projevu defoliace).

Hlavní cíl práce, stanovení defoliace pomocí dat DPZ, se podařilo splnit. Metodika stanovení defoliace pomocí dat DPZ je popsána v kapitole 4.8 Stanovení spektrálního projevu defoliace a její výsledky prezentovány v kapitole 5 Výsledky. Radiometrické hodnoty naměřené senzorem MSI na družici Sentinel-2 v úrovni zpracování relativní odrazivosti na horní hranici atmosféry prokázaly největší schopnost určování míry defoliace jehličnatých porostů. Spektrální pásma B8A, resp. B04 senzoru MSI pro smrkové (*Picea abies*), resp. borovicové (*Pinus sylvestris*) porosty dokázala nejspolehlivěji stanovit míru defoliace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- BAILLARIN, S. J., et al, *SENTINEL-2 LEVEL 1 PRODUCTS AND IMAGE PROCESSING PERFORMANCES* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B1/197/2012/>
- BARRY, K. M., C. STONE a C. L. MOHAMMED, 2008. Crown-scale evaluation of spectral indices for defoliated and discoloured eucalypts. *International Journal of Remote Sensing* [online]. **29**(1), 47–69. [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1080/01431160701281056. ISSN 0143–1161. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160701281056>
- BUTLER, Howard, et al, 2017a. Epsg projection 2065 – s-jtsk (ferro) / krovak. *Spatial Reference* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://spatialreference.org/ref/epsg/2065/>
- BUTLER, Howard, et al, 2017b. Epsg projection 32633 – wgs 84 / utm zone 33n. *Spatial Reference* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://spatialreference.org/ref/epsg/wgs-84-utm-zone-33n/>
- CCMEO, 2016. *Fundamentals of Remote Sensing Tutorial* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- CLAVERIE, Martin et al., 2015. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment* [online]. **169**, 390–403. [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.030. ISSN 00344257. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425715301188>
- ČÚZK, 2017a. *Prohlížeč služba WMS – ZM 10* [online]. Praha. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSservice.aspx
- ČÚZK, 2017b. Základní mapa České republiky 1:10 000. *Geoportál ČÚZK* [online]. Praha [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(g1yrypek0bxq4xydckkmudu\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=mapy10&text=dsady_mapy10&menu=223](http://geoportal.cuzk.cz/(S(g1yrypek0bxq4xydckkmudu))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=mapy10&text=dsady_mapy10&menu=223)
- ČÚZK, 2017c. *Prohlížeč služba WMS – Ortofoto* [online]. Praha [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx
- DE BEURS, Kirsten. a Philip. TOWNSEND, 2008. Estimating the effect of gypsy moth defoliation using MODIS. *Remote Sensing of Environment* [online]. **112**(10), 3983–3990 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.008. ISSN 00344257. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425708002320>
- DOBROVOLNÝ, Petr, 1998. *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu*. Brno: Masarykova univerzita. ISBN 80–210–1812–7.

- ESA, 2015a. *Sentinel-2 User Handbook*. 64 s. [cit. 2016–10–01]. Dostupné také z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides>
- ESA, 2017a. Geographical Coverage. *Sentinel Online* [online]. Rome [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/satellite-description/geographical-coverage>
- ESA, 2017a. *Copernicus Open Access Hub* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <https://scihub.copernicus.eu/>
- ESA, 2017b. *STEP: Scientific Toolbox Exploitation Platform* [online]. Frascati: ESA [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://step.esa.int/main/>
- ESA, 2017c. *SNAP: Sentinel Application Platform* [online]. Frascati: ESA [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>
- ESRI, 2016. *ArcGIS DESKTOP ArcMap 10.4* [online]. Redlands: ESRI [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://support.esri.com/Products/Desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-4>
- ESRI, 2017a. Slope function. *ArcGIS Desktop* [online]. Redlands [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/manage-data/raster-and-images/slope-function.htm>
- ESRI, 2017b. Aspect function. *ArcGIS Desktop* [online]. Redlands [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.4/manage-data/raster-and-images/aspect-function.htm>
- FABIÁNEK, Petr, (2017) Konzultace – diplomová práce [email]. 22. dubna 2017. [cit 2017–06–27]
- FRANKLIN, S. E. et al., 2008. Relationship between Landsat TM and SPOT vegetation indices and cumulative spruce budworm defoliation. *International Journal of Remote Sensing* [online]. **29**(4), 1215–1220 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1080/01431160701730136. ISSN 0143–1161. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160701730136>
- LOPÉS GARCÍA, M.J. a V. CASELLES, 2008. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International* [online]. **6**(1), 31–37 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1080/10106049109354290. ISSN 1010–6049. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049109354290>
- HENRICH, Verena, et al., 2017a. Normalized Difference NIR/Red Normalized Difference Vegetation Index, Calibrated NDVI – CDVI. *Index DataBase: A database for remote sensing indices* [online]. Bonn [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=58 ndmi>
- HENRICH, Verena, et al., 2017b. Normalized Difference 820/1600 Normalized Difference Moisture Index. *Index DataBase: A database for remote sensing indices* [online]. Bonn [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=56>

- HENRICH, Verena, et al., 2017c. Normalized Difference NIR/SWIR Normalized Burn Ratio. *Index DataBase: A database for remote sensing indices* [online]. Bonn [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=53>
- HENRICH, Verena, et al., 2017d. Simple Ratio 1600/820 Moisture Stress Index. *Index DataBase: A database for remote sensing indices* [online]. Bonn [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=48>
- HO, Pei–Gee Peter, ed., 2009 *Geoscience and remote sensing* [online]. Vienna: INTECH, s. 29–52 [cit. 2016–10–01]. ISBN 9789533070032. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/geoscience-and-remote-sensing/remote-sensing-of-forest-health>
- HUNT, Jr., R.E a B. N. ROCK, 1989. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* [online]. **30**(1), 43–54 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90046-1. ISSN 00344257. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425789900461>
- ICP FORESTS, 2011. *ICP Forests: Interational Co-operative Programme o Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests* [online]. Eberswalde: Thünen Institute of Forest Ecosystems [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://icp-forests.net/>
- JENSEN, John R., 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall. ISBN 01-314-5361-0.
- LAMBERT, N. J. et al., 1995. Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce stands in the Czech Republic using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* [online]. **16**(7), 1261–1287 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1080/01431169508954476. ISSN 0143-1161. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169508954476>
- LIEW, S. C., 2001. *PRINCIPLES OF REMOTE SENSING* [online]. Singapore [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/rsmain.htm>
- LUKEŠ, Petr, (2017) Vývoj nové metodiky hodnocení zdravotního stavu lesů z dat DPZ [email]. 1. března 2017. [cit 2017–06–27]
- MICROSOFT, 2017. Analýza komplexních dat pomocí doplňku Analytické nástroje. *Podpora Microsoft Office* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <https://support.office.com/cs-CZ/article/Anal%C3%BDza-komplexn%C3%ADch-dat-pomoc%C3%AD-dopl%C5%88ku-Analytick%C3%A9-n%C3%A1stroje-6c67ccf0-f4a9-487c-8dec-bdb5a2cefab6>
- MZČR a VÚLHM, 2004. *Monitoring stavu lesa v České republice 1984–2003: Forest Condition Monitoring in the Czech Republic 1984–2003*. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky. ISBN 80-864-6123-8.
- QGIS: *A Free and Open Source Geographic Information System* [online], 2017. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://qgis.org/en/site/>

- ROCK, B. N. et al., 1986. Remote Detection of Forest Damage. *BioScience* [online]. **36**(7), 439–445 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.2307/1310339. ISSN 00063568. Dostupné z: <https://academic.oup.com/bioscience/article-lookup/doi/10.2307/1310339>
- RULLÁN-SILVA, Cristóbal et al., 2015. Remote monitoring of defoliation by the beech leaf-mining weevil *Rhynchaenus fagi* in northern Spain. *Forest Ecology and Management* [online]. **347**, 200–208 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.03.005. ISSN 03781127. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112715001164>
- RULLÁN-SILVA, Cristóbal et al., 2013. *Remote Monitoring of Forest Insect Defoliation – A Review*– [online]. [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.5424/fs/2013223–04417. ISBN 10.5424/fs/2013223–04417. Dostupné z: <http://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/4417>
- SAGA GIS: *System for Automated Geoscientific Analyses* [online], 2017. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>
- SANGÜESA-BARREDA, Gabriel et al., 2014. Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth. *Forest Ecology and Management* [online]. **320**, 171–181 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.03.008. ISSN 03781127. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112714001534>
- SCHOWENGERDT, Robert A., 2007. *Remote sensing, models, and methods for image processing* [online]. 3rd ed. Burlington, MA: Academic Press, s. 183–228 [cit. 2016–10–01]. ISBN 978–0–12–369407–2.
- SIMS, Daniel A a John A GAMON, 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* [online]. **81**(2–3), 337–354 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/S0034–4257(02)00010–X. ISSN 00344257. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442570200010X>
- TOWNSEND, Philip et al., 2012. A general Landsat model to predict canopy defoliation in broadleaf deciduous forests. *Remote Sensing of Environment* [online]. **119**, 255–265 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.023. ISSN 00344257. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425712000119>
- TUCKER, Compton J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* [online]. **8**(2), 127–150 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/0034–4257(79)90013–0. ISSN 00344257. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425779900130>
- ÚHUL, 2017a. Katalog mapových informací: Zdravotní stav lesů. *ÚHUL: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů* [online]. Brandýs nad Labem [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.uhul.cz/mapy-a-data/katalog-mapovych-informaci>

- ÚHUL, 2017b. Mapy zdravotního stavu lesů z družicových snímků. *ÚHUL: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů* [online]. Brandýs nad Labem [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: http://geoportal.uhul.cz/mapy/html/MapyZsl_Info.html
- USGS, 1999. *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. 186 s. [cit. 2016–10–01]. Dostupné také z: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf
- USGS, 2016a. *LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK*. 2. vydání. Sioux Falls, 106 s. [cit. 2016–10–01]. Dostupné také z: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- USGS, 2016b. *PRODUCT GUIDE: LANDSAT 4–7 CLIMATE DATA RECORD (CDR) SURFACE REFLECTANCE*. 7. vydání. [cit. 2016–10–01]. Dostupné také z: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf
- USGS, 2016c. *GloVis* [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://glovis.usgs.gov/index.shtml>
- USGS, 2017a. *Product guide: Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product*. 4. vydání. [cit. 2016–10–01]. Dostupné také z: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf
- USGS, 2017b. *ESPA module for cloud masking*. GitHub [online]. [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <https://github.com/USGS-EROS/espa-cloud-masking>
- VÚLHM, 2012. *Monitoring stavu lesa – I. úroveň*. VÚLHM. VÚLHM: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. [online]. Strnady [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: http://www.vulhm.cz/msl_uroven1
- VÚLHM, 2015. *Stav korun*. VÚLHM. VÚLHM: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. [online]. Strnady [cit. 2016–10–01]. Dostupné z: <http://www.vulhm.cz/fotogalerie&gid=39>
- VUOLO, Francesco et al., 2015. Comparison of the Landsat Surface Reflectance Climate Data Record (CDR) and manually atmospherically corrected data in a semi-arid European study area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 42, 1–10 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.1016/j.jag.2015.05.003. ISSN 03032434. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243415001129>
- WANG, Junming et al., 2010. Review of Satellite Remote Sensing Use in Forest Health Studies. *The Open Geography Journal* [online]. 3(1), 28–42 [cit. 2016–10–01]. DOI: 10.2174/1874923201003010028. ISSN 18749232. Dostupné z: <http://benthamopen.com/ABSTRACT/TOGEOGJ-3-28>
- WEBER, Ronald P., ed., 2015. *Old-Growth Forests and Coniferous Forests: Ecology, Habitat and Conservation* [online]. Nova Science Publishers, s. 67–123 [cit. 2016–10–01]. ISBN 978–1–63482–385–2. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/283503310_Geospatial_Technologies_to_Support_Coniferous_Forests_Research_and_Conservation_efforts_in_Mexico

ZVÁRA, Karel, 2003. Biostatistika. 2. vyd. Praha: Karolinum. Učební texty Univerzity Karlovy v Praze. ISBN 80-246-0739-5.

SEZNAM ZDROJŮ DAT

ARCDATA PRAHA, 2016. *ArcČR 500: Digitální geografická databáze 1 : 500 000*. Verze 3.3. Praha. [cit. 2016–10–01]. Dostupné také z:

<https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500>

ESA, 2015b. Sentinel-2: Satellite images. [cit. 2016–10–01] Dostupné také z:

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>

ESA, 2016. Sentinel-2: Satellite images. [cit. 2016–10–01] Dostupné také z:

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>

USGS, 2014. Landsat 7 a 8: Satellite images. [cit. 2016–10–01] Dostupné také z:

<https://landsat.usgs.gov/landsat-data-access>

USGS, 2015. Landsat 7 a 8: Satellite images. [cit. 2016–10–01] Dostupné také z:

<https://landsat.usgs.gov/landsat-data-access>

USGS, 2016d. Landsat 7 a 8: Satellite images. [cit. 2016–10–01] Dostupné také z:

<https://landsat.usgs.gov/landsat-data-access>

VÚLHM, 2016. Monitoring stavu lesa – I. úroveň: Pozemní šetření defoliace.

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 Sken černobílé kopie porostní mapy
- Příloha č. 2 Archiv scén Sentinel-2
- Příloha č. 3 Archiv scén Landsat
- Příloha č. 4 Seznam ploch použitých spolu se scénami Sentinel-2
- Příloha č. 5 Seznam ploch použitých spolu se scénami Landsat
- Příloha č. 6 Seznam ploch použitých spolu se scénami Sentinel-2 (průměr pixelů)
- Příloha č. 7 Výsledky korelace radiometrických hodnot a údajů z pozemního šetření defoliace