

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**Přírodovědecká fakulta**

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

Studijní program: Geografie (navazující magisterské studium)

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Romana MUSILOVÁ

**VYUŽITÍ DAT DPZ PRO HODNOCENÍ AKTUÁLNÍHO  
STAVU A VÝVOJE SMRKOVÝCH POROSTŮ  
V KRKONOŠÍCH**

**REMOTE SENSING FOR EVALUATION OF STATE AND  
DEVELOPMENT OF SPRUCE STANDS CONDITION IN THE  
GIANT MOUNTAINS**

Diplomová práce

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

Praha 2012

### Prohlášení

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

V Bukové dne 27. 8. 2012

.....

podpis

### Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce RNDr. Lucii Kupkové, Ph.D., která mi cennými radami a podněty pomohla při psaní této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Krkonošskému národnímu parku za spolupráci a poskytnutí dat. Díky patří též Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu za poskytnutí dat ZABAGED. Chtěla bych také poděkovat prof. RNDr. Stanislavu Vackovi, DrSc. a Ing. Ondřeji Špulákovi za poskytnutí dat z pozemních šetření defoliace.

V neposlední řadě díky patří mé rodině za podporu a pomoc v celém mém studiu.

## **OBSAH**

<b>PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK.....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>1 POZEMNÍ METODY HODNOCENÍ KONDICE LESA .....</b>	<b>15</b>
1.1 ZMĚNA BARVY .....	15
1.2 DEFOLIACE .....	15
1.3 ICP FORESTS .....	16
1.4 STUDIE A METODIKA PROF. RNDR. STANISLAVA VACKA, DRSc. ....	16
<b>2 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ.....</b>	<b>18</b>
2.1 SPEKTRÁLNÍ PROJEV VEGETACE.....	18
2.2 ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ.....	22
2.2.1 Geometrické korekce.....	22
2.2.2 Radiometrické transformace .....	23
2.2.3 Atmosférické korekce.....	23
<b>3 METODY HODNOCENÍ POMOCÍ DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ .....</b>	<b>24</b>
3.1 KLASIFIKACE LESA Z DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ .....	24
3.2 STUDIE V ZAHRANIČÍ.....	25
3.3 VEGETAČNÍ INDEXY .....	26
3.3.1 Normalizovaný rozdílový vegetační index.....	26
3.3.2 Simple Ratio.....	27
3.3.3 Index listové plochy .....	27
3.3.4 Green Red Vegetation Index.....	28
3.3.5 Red Green Index.....	29
3.3.6 Foliar Moisture Index .....	29
3.3.7 Wide-band Normalized Difference Infrared Index .....	30
3.3.8 Red Edge Inflection Point.....	30

3.4	STUDIE V ČESKÉ REPUBLICE .....	31
<b>4</b>	<b>METODIKA.....</b>	<b>33</b>
4.1	CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....	33
4.1.1	Lesní Krkonoš .....	34
4.2	LESNÍ VEGETAČNÍ STUPNĚ .....	34
4.2.1	Lesní vegetační stupně Krkonoš .....	34
4.3	VÝVOJ ZDRAVOTNÍHO STAVU LESA V KRKONOŠÍCH.....	36
4.4	POUŽITÁ DATA .....	36
4.4.1	SPOT .....	37
4.4.2	QuickBird.....	39
4.4.3	WorldView-2 .....	40
4.4.4	Landsat.....	43
4.4.5	Data z pozemního šetření VÚLHM Opočno .....	45
4.4.6	Určení polohy bodů v terénu.....	46
4.4.7	Základní báze geografických dat .....	48
4.5	POUŽITÝ SOFTWARE.....	48
4.5.1	ENVI 4.7.....	48
4.5.2	Geomatica 10.1 .....	49
4.5.3	ArcGIS 10.....	49
4.5.4	SPSS .....	50
4.6	PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT.....	50
4.6.1	Ortorektifikace .....	50
4.6.2	Atmosférická korekce.....	56
4.7	KLASIFIKACE SMRKOVÝCH POROSTŮ .....	58
4.8	VEGETAČNÍ INDEXY .....	59
4.8.1	Normalizovaný rozdílový vegetační index.....	59
4.8.2	Simple ratio .....	60
4.8.3	Index listové plochy .....	60
4.8.4	Green Red Vegetation Index.....	60
4.8.5	Red Green Index.....	60
4.8.6	Foliar Moisture Index .....	61
4.8.7	Wide-band Normalized Difference Infrared Index .....	61
4.8.8	Red Edge Inflection Point.....	61

4.9	POROVNÁNÍ S POZEMNÍMI DATY .....	62
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>64</b>
5.1	VÝSLEDKY ŘÍZENÉ KLASIFIKACE .....	64
5.2	VÝSLEDKY VEGETAČNÍCH INDEXŮ.....	65
5.2.1	NDVI .....	65
5.2.2	Simple ratio .....	67
5.2.3	Index listové plochy .....	68
5.2.4	Green red vegetation index .....	69
5.2.5	Red green index.....	71
5.2.6	Wide-band Normalized Difference Infrared Index .....	72
5.2.7	Foliar moisture index.....	73
5.3	POSOUZENÍ PODLE SNÍMKŮ .....	75
5.4	VÝVOJ ZDRAVOTNÍHO STAVU PODLE HODNOT NDVI.....	77
5.4.1	Vývoj na snímcích Landsat.....	77
5.4.2	Vývoj na snímcích SPOT .....	80
5.5	POROVNÁNÍ SNÍMKŮ RŮZNÉHO PROSTOROVÉHO ROZLIŠENÍ.....	83
<b>6</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>87</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>92</b>
	<b>SEZNAM ZDROJŮ A INFORMACÍ.....</b>	<b>94</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>99</b>

## **PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK**

<b>CNES</b>	<b>Centre National d'Etudes Spatiales</b>
<b>CORINE</b>	<b>COoRdination of INformation on the Environment</b>
<b>DEM</b>	<b>Digital Elevation Model</b>
<b>DMT</b>	<b>Digitální model terénu</b>
<b>DPZ</b>	<b>Dálkový Průzkum Země</b>
<b>ENVI</b>	<b>ENvironment for Vizualizing Images</b>
<b>ETM+</b>	<b>Enhanced Thematic Mapper Plus</b>
<b>FLAASH</b>	<b>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</b>
<b>FMI</b>	<b>Foliar Moisture Index = listový vlhkostní index</b>
<b>GCP</b>	<b>Ground Control Point</b>
<b>GNSS</b>	<b>Global Navigation Satellite System = globální navigační satelitní systém</b>
<b>GREEN</b>	<b>zelená oblast spektra</b>
<b>GRVI</b>	<b>Green Red Vegetation Index</b>
<b>HRV</b>	<b>High Resolution Visible</b>
<b>HRVIR</b>	<b>High Resolution Visible And Infrared</b>
<b>ICP</b>	<b>International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests</b>
<b>KAGIK</b>	<b>Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie</b>
<b>KRNAP</b>	<b>Krkonošský národní park</b>
<b>LAI</b>	<b>Leaf Area Index = index listové plochy</b>
<b>LV</b>	<b>level = úroveň dat</b>
<b>MODIS</b>	<b>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</b>

<b>MSS</b>	<b>M</b> ultispectral <b>S</b> canner <b>S</b> ystem = multispektrální skenovací systém
<b>NASA</b>	<b>N</b> ational <b>A</b> eronautics and <b>S</b> pace <b>A</b> dministration = Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
<b>NDVI</b>	<b>N</b> ormalized <b>D</b> ifferential <b>V</b> egetation <b>I</b> ndex = normalizovaný rozdílový vegetační index
<b>NIR</b>	<b>N</b> ear <b>I</b> nfrared = blízké infračervené záření
<b>NOAA</b>	<b>N</b> ational <b>O</b> ceanic and <b>A</b> tmospheric <b>A</b> dministration
<b>OR2A</b>	<b>O</b> rtho - <b>R</b> eady <b>S</b> tandard <b>2A</b>
<b>PCA</b>	<b>P</b> rincipal <b>C</b> omponent <b>A</b> nalysis
<b>POAM</b>	<b>P</b> olar <b>O</b> zone <b>A</b> nd <b>A</b> erosol <b>M</b> easurement
<b>QUAC</b>	<b>Q</b> Uick <b>A</b> tmospheric <b>C</b> orrection
<b>R</b>	<b>R</b> eflectance = odrazivost
<b>RBV</b>	<b>R</b> eturn <b>B</b> eam <b>V</b> idicon
<b>RED</b>	červená oblast spektra
<b>REP</b>	<b>R</b> ed <b>E</b> dge <b>P</b> oint = bod červeného okraje
<b>REIP</b>	<b>R</b> ed <b>E</b> dge <b>I</b> nflexion <b>P</b> oint = inflexní bod červeného okraje
<b>RGB</b>	<b>R</b> ed <b>G</b> reen <b>B</b> lue = červená, zelená, modrá (barevná syntéza)
<b>RGI</b>	<b>R</b> ed <b>G</b> reen <b>I</b> ndex
<b>RMS</b>	<b>R</b> oot <b>M</b> ean <b>S</b> quare = efektivní hodnota
<b>ROI</b>	<b>R</b> egion <b>O</b> f <b>I</b> nterest = oblast zájmu
<b>RPC</b>	<b>R</b> ational <b>P</b> olynomial <b>C</b> oefficients = koeficienty racionální polynomické funkce
<b>SR</b>	<b>S</b> imple <b>R</b> atio = jednoduchý poměr
<b>SWIR</b>	<b>S</b> hort <b>W</b> ave <b>I</b> nfrared = krátké infračervené záření
<b>TCT</b>	<b>T</b> asseled <b>C</b> ap <b>T</b> ransformation
<b>TM</b>	<b>T</b> hematic <b>M</b> apper



Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

<b>TVP</b>	trvalá výzkumná plocha
<b>ÚHUL</b>	Ústav pro hospodářskou úpravu lesů
<b>UNESCO</b>	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator = Univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic
<b>VHR</b>	Very High Resolution = velmi vysoké rozlišení
<b>VÚLHM</b>	Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti
<b>WGS 84</b>	World Geodetic System = Světový geodetický systém 1984
<b>wNDII</b>	wide-band Normalized Differential Infrared Index
<b>WMS</b>	Web Map Service
<b>WRS</b>	World Reference System = světový referenční systém
<b>ZABAGED</b>	Základní báze geografických dat

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1:	Spektrální křivka trávy a lesa .....	19
Obr. 2:	Odrazivost listů podle jejich barvy .....	20
Obr. 3:	Křivka odrazivosti u zdravé a poškozené jehlice .....	22
Obr. 4:	Znázornění indexu listové plochy .....	27
Obr. 5:	Znázornění ploch smrkové monokultury a lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku v KRNAP .....	35
Obr. 6:	Snímek z družice QuickBird z 9. 9. 2005 v pravých barvách (R, G, B – 3, 2, 1).....	40
Obr. 7:	Spektrální pásma družice WorldView-2 .....	41
Obr. 8:	Výřez ze snímku z družice WorldView-2 ze dne 24. 9. 2011 (R, G, B – 3, 4, 6), žlutě znázorněno bezlesí .....	43
Obr. 9:	Zobrazení TVP na podkladu ortofota .....	46
Obr. 10:	Popis přístroje GeoExplorer 6000 GeoXH 3.5G .....	47
Obr. 11:	Princip ortorektifikace .....	52
Obr. 12:	Znázornění zvlnění geoidu .....	53
Obr. 13:	Výřez ze snímku SPOT ze dne 30. 7. 2004, před a po ortorektifikaci .....	54
Obr. 14:	Tabulka chyb RMS pro snímek z družice QuickBird ze dne 9. 9. 2005 .....	55
Obr. 15:	Spektrální křivka pro pixel smrkového porostu – před a po korekci QUAC (data po korekci jsou násobena 10 000) .....	58
Obr. 16:	Porovnání polohy TVP 24 na snímku QuickBird z roku 2010 a na aktuálním ortofotu .....	62
Obr. 17:	Rozdíl mezi smrkovými monokulturami a klasifikovanými porosty (SPOT 2004) .....	64

Obr. 18:	Rozdíl mezi LVS s obsahem smrku a klasifikovanými porosty (SPOT 2004) .....	65
Obr. 19:	NDVI v roce 2004 (SPOT) .....	66
Obr. 20:	SR v roce 2004 (SPOT) .....	68
Obr. 21:	LAI v roce 2004 (SPOT) .....	69
Obr. 22:	GRVI v roce 2004 (SPOT) .....	70
Obr. 23:	RGI v roce 2004 (SPOT) .....	72
Obr. 24:	wNDII v roce 2004 (SPOT) .....	73
Obr. 25:	FMI v roce 2004 (SPOT) .....	74
Obr. 26:	NDVI (Landsat 1984) .....	78
Obr. 27:	NDVI (Landsat 1993) .....	79
Obr. 28:	NDVI (Landsat 2011) .....	79
Obr. 29:	NDVI oříznuté podle plochy lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku .....	80
Obr. 30:	NDVI (SPOT 1999) .....	80
Obr. 31:	NDVI (SPOT 2004) .....	81
Obr. 32 :	NDVI (SPOT 2006) .....	82
Obr. 33:	NDVI oříznuté podle plochy lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku .....	82
Obr. 34:	NDVI (SPOT 2007) .....	83
Obr. 35:	Porovnání klasifikovaných porostů ze snímků QuickBird a Landsat (oba 2005) .....	84
Obr. 36:	Porovnání klasifikovaných porostů z QuickBird (2010) a WorldView-2 (2011) .....	86
Tab. 1:	Stanovené třídy defoliace .....	17
Tab. 2:	Charakteristika lesních vegetačních stupňů Krkonoš .....	35

Tab. 3:	Seznam použitých družicových snímků .....	36
Tab. 4:	Spektrální pásma družice SPOT 5 .....	37
Tab. 5:	Spektrální pásma družice QuickBird .....	39
Tab. 6:	Spektrální pásma družice WorldView-2 .....	42
Tab. 7:	Časový sled satelitů Landsat .....	44
Tab. 8:	Spektrální pásma družice Landsat 5 senzoru TM .....	44
Tab. 9:	Seznam TVP na území KRNAP .....	46
Tab. 10:	Srovnání hodnot radiance (DN) a reflektance pixelu vodní plochy (SPOT 2004) .....	57
Tab. 11:	Srovnání hodnot radiance (DN) a reflektance pixelu vodní nádrže Labská (SPOT 2004) .....	58
Tab. 12:	Srovnání hodnot radiance (DN) a reflektance pixelu smrkového porostu (SPOT 2004) .....	58
Tab. 13:	Porovnání vybraných indexů na klasifikovaných plochách smrkových porostů .....	75
Tab. 14:	Porovnání rozsahu pásem RED a NIR .....	84

## ÚVOD

Současný stav lesů v České republice, stejně jako v ostatních sousedních státech, je výsledkem složitého kulturního, hospodářského a politického vývoje. Lesy byly dříve chápány pouze jako prostředek pro získání surovin, velice dlouho byly ovlivňovány neregulovanou těžbou dřeva a pastvou zvířat. Postupem času se vyvinula snaha o trvalost užitků, což vedlo k vytváření technologií zakládání, vývoje a obnovy lesních porostů. Po třech staletích aplikování principů trvalosti se lesy začínají chápat nejenom jako obnovitelný zdroj, ale i jako nástroj tvorby životního prostředí.

Sledování zdravotního stavu lesa je stále aktuální. V zahraničních výzkumech je studium kondice lesa častým tématem, zatímco v České republice mnoho programů neproběhlo. Zkoumány byly v podstatě pouze příhraniční oblasti Krušných hor, Šumavy a Krkonoš, kde byly či v současnosti jsou lesní porosty nejpoškozenější. V zahraničí existuje mnoho studií zdravotního stavu lesa, jedná se často o mnohem rozsáhlejší plochy lesních porostů, např. na území USA či Kanady.

Lesy v Krkonoších byly dlouho postiženy rozsáhlou kalamitní situací. Ačkoliv se dnes zdá, že tento kritický stav ze sedmdesátých a osmdesátých let je v Česku již překonán, některé následky jsou i v současnosti znatelné. Kondici lesa je třeba stále sledovat. Úkol zahrnuje monitoring a porovnání jejich současného stavu s vývojem v minulosti s cílem zamezit rozsáhlým hmyzím kalamitám.

Zdravotní stav lesa se tradičně posuzuje klasickým pozemním šetřením. Vedle toho se začaly používat také metody dálkového průzkumu Země (dále jen DPZ). Výhoda DPZ spočívá v získávání informací z rozsáhlého území k jednomu datu a jednotné vyhodnocování pro celou plochu. Zdravotní stav lesa je zkoumán metodami DPZ zhruba od sedmdesátých let, kdy se provádělo letecké snímkování lesních ploch. I v Česku se v této době používaly infračervené letecké snímky pro monitoring poškození lesa v Krušných horách. V osmdesátých letech začala také aplikace družicových snímků. V této době byla vypuštěna první družice Landsat, která začala poskytovat multispektrální snímky.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

Cílem této práce bude porovnat použítá optická družicová data prostřednictvím zvolených vegetačních indexů s dalšími dostupnými zdroji hodnotící zdravotní stav lesa. V první řadě bude zkoumán význam snímků z družice SPOT, dále budou využity také snímky Landsat, QuickBird, WorldView-2.

## 1 POZEMNÍ METODY HODNOCENÍ KONDICE LESA

Tradičně je kondice lesa zkoumána pozemními metodami. Zdravotní stav lesa je velice široký pojem, všeobecně se za dva základní ukazatele považují změna barvy asimilačních orgánů (listů a jehlic) a defoliace. Jedná se v podstatě o dva základní projevy poškození stromu (Solberg et al., 2007).

### 1.1 Změna barvy

Fázi ztráty listů předchází obvykle změna barvy asimilačního aparátu. Ve valné většině případů se jedná o snižování obsahu chlorofylu a zvyšování obsahu dalších barviv, jedná se o xantofyly (žloutnutí), karotenoidy (červenání) a xantofyly.

Některá poškození nevedou přímo k odlistění postiženého jedince ale ke smíšení obsahu chlorofylu a jiných pigmentů. Příkladem takovýchto poškození jsou například houbové choroby na listech či nedostatek živin (Špulák, 2005).

### 1.2 Defoliace

Defoliace je jedním ze základních pojmů v oblasti problematiky hodnocení zdravotního stavu lesa. Jedná se o relativní ztrátu asimilačního aparátu v koruně jedince v porovnání s představou zdravého jedince, vyskytujícího se ve stejných stanovištních a porostních podmínkách. Míra defoliace se často hodnotí pouze vizuálně, výsledky jsou proto zatíženy chybou vyplývající ze subjektivního vlivu hodnotitele. Mezi další problémy patří nedostatek prostorového pokrytí. Systém vizuálního hodnocení je uplatňován v Evropě a Severní Americe již dvacet let, používá se i v České republice.

Do hodnocení defoliace se nezahrnují ztráty olistění způsobené mechanickými vlivy. Hodnocení by také nemělo být ovlivněno transparentností koruny, přitom je nutné vzít v úvahu typ větvení koruny

([http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta\\_HIO/kapitoly/ICP/ICP%20FOREST.htm](http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta_HIO/kapitoly/ICP/ICP%20FOREST.htm)).

### 1.3 ICP Forests

Česká republika v roce 1986 vstoupila do programu ICP, tj. Mezinárodní kooperativní program sledování a vyhodnocování vlivu znečištění ovzduší na lesy (International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests - ICP Forests). Úkolem programu je na evropské úrovni koordinovat shromažďování srovnatelných údajů o změnách v lesních porostech, souvisejících s aktuálním stavem prostředí (znečištění ovzduší, kyselá depozice aj.) a přispět tak k hodnocení trendů poškození a k lepšímu pochopení vztahů příčin a následků.

V programu ICP Forests je upřednostňováno pozemní zkoumání stavu defoliace, ač nelze říci, zda je tento postup lepší než výstupy metod dálkového průzkumu Země. DPZ má zatím pouze doplňkový význam, je ale považován za velmi perspektivní a snažou je stále jej rozvíjet. Na území KRNAP se nachází tři plochy ICP kruhového tvaru o rozloze 400 m<sup>2</sup> (s poloměrem 11,28 m) (Fabiánek, Stoklasa, 1998).

### 1.4 Studie a metodika prof. RNDr. Stanislava Vacka, DrSc.

Studiem zdravotního stavu a dynamiky lesních ekosystémů se dlouhodobě zabývá prof. RNDr. Stanislav Vacek, DrSc. Spolu s dalšími odborníky byl zapojen do projektu Management biodiverzity v Krkonoších a na Šumavě. Cílem tohoto projektu bylo sledování vývoje zdravotního stavu krkonošských a šumavských lesů, monitoring celé struktury a dynamiky tohoto ekosystému a hlavně určení příčin kalamitního stavu. Výsledek přinesl zjištění, že hlavním činitelem jsou imise ve spojení s působením dalších biotických i abiotických vlivů.

V Krkonoších bylo pro tento účel sledování lesa založeno 32 trvalých výzkumných ploch (TVP). Všechny plochy jsou čtvercové o velikosti 50 x 50 m (pouze plochy číslo 6 a 7 mají rozměry 100 x 50 m, příp. 100 x 100 m). Na těchto plochách je sledována dynamika zdravotního stavu bukových, smrkobukových a smrkových porostů na základě olistění (foliace) a stupňů odlistění (defoliace). Od roku 1980 je kondice lesa hodnocena každoročně zejména podle olistění, přičemž klasifikace olistění smrku vychází z pojetí Tesaře a Temmlové (1971). Některé z původních ploch jsou sledovány i v současné době, jinde byl monitoring zastaven.



Defoliace (doplněk olistění do 100 %) se zvláštním zřetelem na cenotické postavení a morfologický typ koruny byla odhadována s přesností na 10 %. Tímto způsobem bylo vytvořeno pět tříd defoliace (třídy 0 až 4). Kromě průměrů defoliace byly dále vypočteny i směrodatné odchylky defoliace a vývoj počtu odumřelých stromů (totálně defoliované). Každý druh stromu byl hodnocen samostatně, avšak pro souhrnné hodnocení stavu porostu byly vypočítány také celkové průměry olistění všech stromů i stromů úplně defoliovaných. Pro hodnocení byly sledovány znaky charakterizující zdravotní stav koruny (poškození sněhem, mrazem, dřevokaznými houbami a hmyzem) (Vacek et al., 2007).

Vacek použil pro zpracování dat (defoliace jednotlivých stromů hodnocená odhadem v terénu) modelování pomocí maticových lineárních modelů, které se využívají v ekologii. Pro sledování změn poškození lesa byly aplikovány tzv. přechodové matice či Leslieho matice. Model je založen na pravděpodobnosti přechodu stromu vždy mezi dvěma třídami poškození.

Rozbor problémů souvisejících s používáním defoliace pro charakteristiku poškození stromu a lesního porostu byl podán více autory (např. Matějka, 1993), podobná metodika je použita rovněž v projektu ICP Forests.

Tab. 1: Stanovené třídy defoliace

Třída defoliace	Interval defoliace	Stupeň defoliace
0	< 10%	žádný
1	10 - 25%	nepatrný (varovné stadium)
2	25 - 60%	střední
3	60 - 100%	těžké
4	100%	mrtvé stromy

Zdroj: Špulák, 2005.

## 2 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ

Definicí dálkového průzkumu Země existuje celá řada. Dálkový průzkum podle Dobrovolného obecně znamená získávání informací o objektech a jevech na dálku, tzn. bez fyzického kontaktu s těmito jevy a objekty. Využívá se různě složitých přístrojů pro získávání kvalitativní i kvantitativní informace o jevech a věcech na zemském povrchu. Každý jev či objekt charakteristickým způsobem ovlivňuje své okolí (Dobrovolný, 1998). Lillesand a Kiefer definují dálkový průzkum jako „vědu i umění získávat užitečné informace o objektech, plochách či jevech prostřednictvím dat měřených na zařízení, která s těmito zkoumanými objekty, plochami či jevy nejsou v přímém kontaktu.“ (Lillesand a Kiefer, 2000)

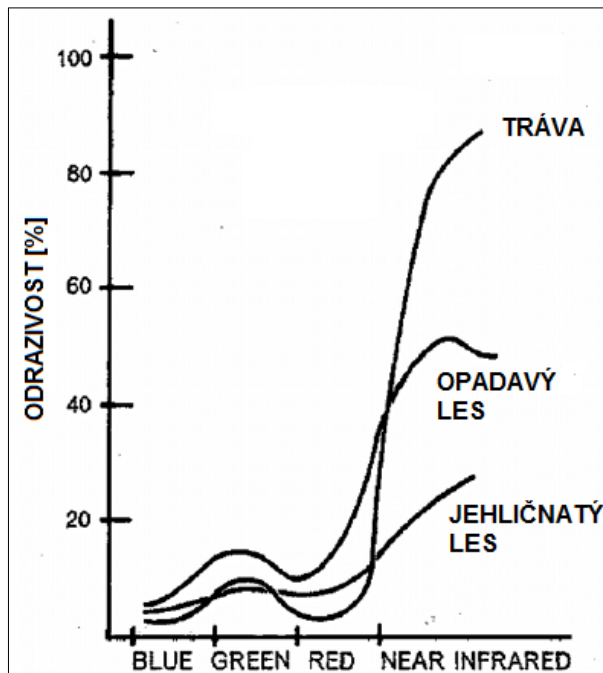
### 2.1 Spektrální projev vegetace

Vegetace se nachází na většině obrazových záznamů zemského povrchu. Její spektrální projev je rozmanitý. V některých oblastech lze ovšem najít poměrně homogenní plochy, jedná se např. o monokultury se zemědělskými plodinami ale také lesní monokultury jehličnatého či listnatého lesa. I přes některé rozdílnosti mezi jednotlivými druhy vegetace lze z hlediska spektrálního chování identifikovat společné rysy. Odrazivost vegetace je ovlivněna řadou faktorů, např. vnější uspořádání vegetačního krytu, vnitřní struktura jednotlivých částí rostlin, obsah vody, vlastnosti půdního substrátu a samozřejmě také zdravotní stav.

Na spektrální křivce odrazivosti listu lze odlišit tři specifické části. Jedná se o:

1. oblast pigmentační absorpce
2. oblast buněčné struktury
3. oblast vodní absorpce.

Obr. 1: Spektrální křivka trávy a lesa



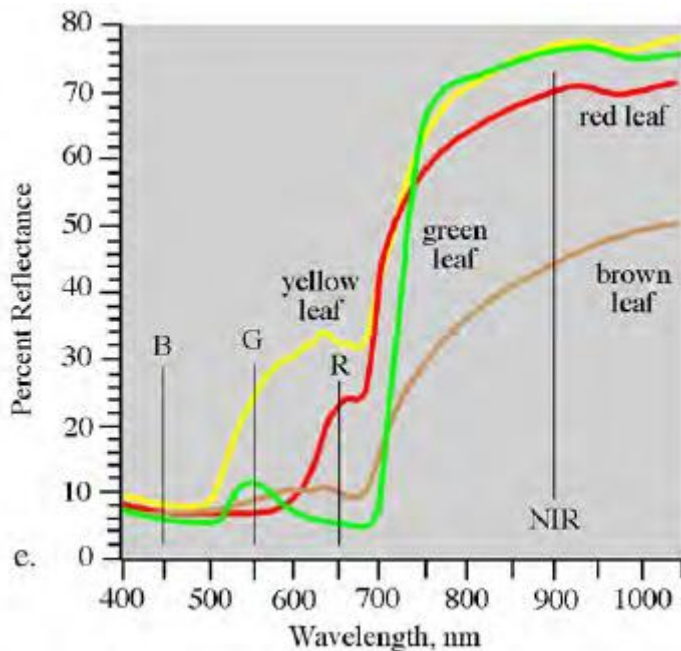
Zdroj: Plant sciences (?), upraveno.

Oblast pigmentační absorpce se nachází na vlnových délkách od 400 do 700 nm. V této části spektrální křivky je její průběh ovlivněn zejména pigmentačními látkami. Nejdůležitější z nich jsou chlorofyl a karoteny. Chlorofyl, který tvoří 65% pigmentu listu, pohlcuje většinu zářivé energie v modrém (450 nm) a červeném (650 nm) světle. Mezi těmito dvěma pásy v zelené části spektra (540 nm) se nachází maximum odrazivosti. Z tohoto důvodu se vegetace jeví jako zelená. Z dalších pigmentačních látek se zde uplatňuje vliv karotenu, xantofylu a také anthokyanů. Karoten a xantofyl jsou žlutá barviva, mají absorpční pásmo pouze v okolí vlnové délky 450 nm. Chlorofyl absorbuje záření na stejné vlnové délce, což způsobuje, že vliv žlutých pigmentů není ve zdravém listu zjevný. Až když začíná rostlina stárnout, dochází k ubývání obsahu chlorofylu a k nárůstu podílu karotenu a xantofylu. Z tohoto důvodu se rostliny na podzim jeví lidskému oku jako žloutnoucí. Červené zbarvení listů má za následek zvyšující se produkce anthokyanu namísto chlorofylu. V oblasti mezi 700 a 800 nm odrazivost rapidně narůstá, tato část nese označení *red edge point* (REP, červený okraj), tj. bod maximální změny odrazu (maximum první derivace odrazivosti spekter listu). REP se nachází na přechodu mezi červenou viditelnou částí spektra a blízkou infračervenou částí spekt-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

ra. Jeho přítomnost je pro vegetaci charakteristická, často se tato specifická vlastnost využívá v různých studiích zabývajících se vegetací.

Obr. 2: Odrazivost listů podle jejich barvy



Zdroj: Plant sciences (?).

Oblast buněčné struktury je charakteristická pro vlnové délky od 700 do 1300 nm. V této části spektra je typický nárůst odrazivosti kolem hodnoty 700 nm. Odrazivost je v tomto intervalu utvářena hlavně uspořádáním buněk částí rostlin nejvíce vystavených dopadajícímu slunečnímu záření, záleží tedy na morfologické struktuře listu. U jednotlivých rostlin je buněčná struktura odlišná a také jejich odrazivost se liší. Toho lze využít jak pro odlišení ploch s vegetací od ostatních typů krajinného pokryvu, tak také jednotlivých druhů rostlin vzájemně. Více vrstev listů či jehlic zapříčiňuje opakovaný odraz záření v infračervené části spektra, maximální je při šesti až osmi vrstvách. Odrazivost v této oblasti se využívá k určení míry hustoty vegetačního krytu, k čemuž je často využíván index listové pokrývnosti (LAI – leaf area index). Na infračervených snímcích lze snadno rozlišit porosty listnatého a jehličnatého lesa, listnatý les se totiž na snímcích jeví světlejší.

Oblast vodní absorpce se nachází mezi 1300 až 3000 nm. V této části spektra je odrazivost určována absorpčními pásmy vody. Středů těchto absorpčních pásem se při-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

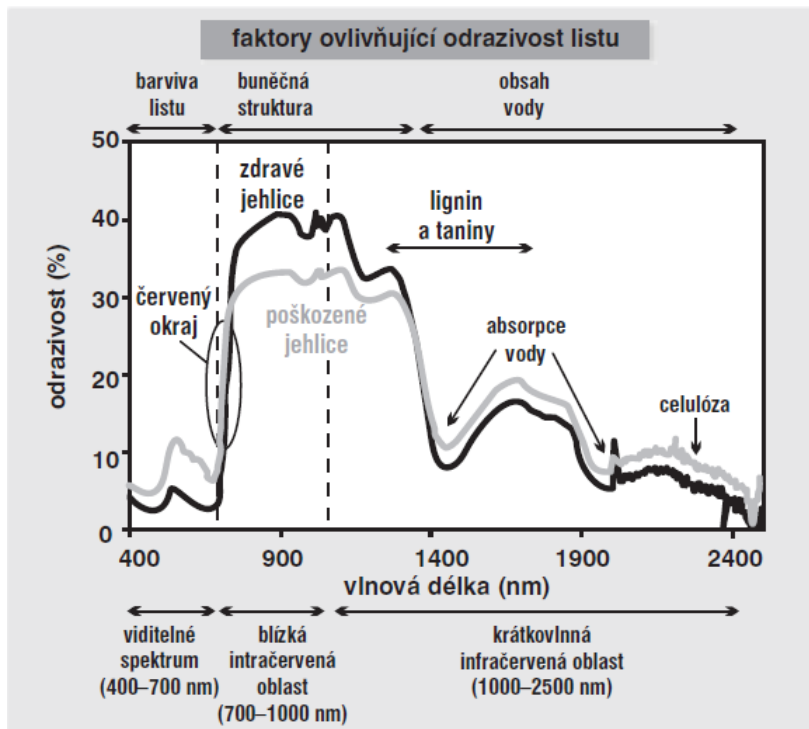
bližně nacházejí na vlnových délkách 1400, 1900 a 2700 nm. Lokální maxima odrazivosti jsou lokalizována na vlnových délkách 1600 a 2200 nm. V této části platí, že vyšší obsah vody snižuje odrazivost rostlin. Změny obsahu vody (např. vodní stres) se nejvíce projeví v uvedených vlnových délkách (Dobrovolný, 1998). Obsah vody a chlorofylu v listu také závisí na složení půdy, např. na obsahu živin a některých minerálů.

Vegetaci lze identifikovat i na snímcích v mikrovlnné oblasti spektra (na radarových snímcích). Odraz mikrovlnného záření od vegetace je však komplikovaný, protože se většinou jedná o několikanásobný odraz v celé vrstvě vegetačního krytu.

Chování spektrálních charakteristik se obecně mění v závislosti na vegetačním cyklu a také v důsledku stresů, kterým je vegetace vystavena. Všeobecně lze říci, že u rostlin ve špatném zdravotním stavu dochází k poklesu odrazivosti v blízké infračervené části a nárůstu v červené části spektra. Nejdříve se změna kondice projeví v infračervené části spektra, proto ji lze na družicových snímcích zachytit dříve než pouhým okem v přírodě, tzn. změnou barvy listů či jehlic.

Velikost odrazivosti je silně závislá na obsahu vody, při vlhkosti listu menší než 55% rostlina začíná ztrácet značnou část chlorofylu. Tento proces vede ke zvýšení odrazivosti v pásmu chlorofylu 660 nm. Dochází také k velkým změnám ve vnitřní struktuře listu, což má vliv na odrazivost v blízké infračervené části spektra. Dále je důležitým faktorem obsah minerálů v půdě. Pro dobrý růst rostliny jsou třeba určité minerály, i když jejich množství je většinou nepatrné. Jestliže je obsah minerálů pro rostlinu nevyhovující, projeví se to v odchýlení odrazivosti od normálu ve viditelné a infračervené části spektra. Nejvíce je na abnormální změny růstu rostliny citlivá oblast blízkého infračerveného záření (750 – 900 nm), kde se nachází právě již zmíněný červený okraj. Rostliny jsou často vystaveny působení kovů, a proto se u nich objevují problémy s nedostatkem železa v těle rostliny. Tento stav se nazývá chloróza a je pro něj typické vytlačení železa jinými kovy s bohatším výskytem v půdě (např. nikl, kobalt, chrom, zinek, mangan). Tento jev způsobuje ztrátu zelené barvy rostlin a vede ke žloutnutí, což je dáno posunem maxima spektrální odrazivosti směrem k delším vlnovým délkám okolo 580 nm. Dále dochází také k snížení odrazivosti v blízké infračervené části spektra. Některé minerály mohou působit také opačně a vyvolat např. tzv. gigantismus rostlin u půd obohacených borem (Kolář, Halounová, Pavelka, 1997).

Obr. 3: Křivka odrazivosti u zdravé a poškozené jehlice



Zdroj: Albrechtová, Rock, 2003.

## 2.2 Zpracování družicových snímků

Mezi první kroky digitálního zpracování dat patří úprava dat, která jsou ovlivněna zkreslením nebo byla znehodnocena při vlastním procesu pořizování dat. Podle Koláře se korekce dělí na dvě základní skupiny, a to na geometrické korekce a radiometrické korekce.

### 2.2.1 Geometrické korekce

Surová data obsahují velké zkreslení, takže je není možné použít jako mapy. Z tohoto důvodu je třeba tato data geometricky korigovat. V případě zkreslení jsou na vině změna výšky, polohy nosiče a jeho rychlosti, zakřivení Země a výškové změny reliéfu. Chyby v geometrii lze rozdělit do dvou kategorií na tzv. předvídatelné (systematické) a nepředvídatelné (náhodné). Systematické chyby jsou řešeny pomocí tzv. georeferenčních korekcí. Zkreslení je předem známo díky charakteristikám čidla v okamžiku měření (místo, výška, rychlost a další charakteristiky letu nosiče). U multispektrálních senzorů dochází k zešikmení plochy obrazového záznamu mírně k západu vlivem rotace

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

Země směrem na východ. Oprava se provádí již v přijímací stanici v podobě mírného posunutí každé další řádky. Snímky s různým stupněm korekcí jsou dále poskytovány uživatelům.

U náhodných chyb je třeba provést přesné opravy za účelem zisku geokódovaných dat. V tomto kroku je cílem odstranit chyby, které nebyly opraveny při korekci systémových chyb. Korekce jsou prováděny pomocí geometrické transformace s použitím vlíčovacích bodů, které lze dobře rozlišit na snímku a zároveň jsou známy jejich souřadnice na mapě.

### **2.2.2 Radiometrické transformace**

Data dálkového průzkum Země je nutno před jejich použitím také radiometricky korigovat. K tomuto účelu se používá mnoho různých principů, rozdílných typů detektorů a různých vlnových délek. Neustále se mění podmínky: poloha nosiče, různí se úhel pohledu, roční období, odlišná je i délka průchodu elektromagnetického záření atmosférou, která má také velice proměnlivý stav. Proto neexistuje absolutní metoda nebo vzorec pro radiometrickou korekci. Obvykle tyto metody zahrnují opravy dané kalibrací přístroje, opravy ze změny ozáření, opravy vyplývající z geometrie letu a opravy ze stavu atmosféry (Kolář, Halounová, Pavelka, 1997).

### **2.2.3 Atmosférické korekce**

Způsob pořizování dat dálkového průzkumu vyžaduje průchod elektromagnetického záření atmosférou. Získané scény tedy obsahují informace o stavu atmosféry a zemského povrchu. Pro kvantitativní analýzu reflektance povrchu je tedy nutné vlivy atmosféry odstranit, což bývá velmi náročný krok při procesu předzpracování dat DPZ. Aby bylo možno vykompenzovat atmosférické efekty, musí být známy jevy jako např. množství vodní páry, distribuce aerosolů, viditelnost apod. Přímé měření těchto jevů bývá málokdy možné, proto byly vyvinuty techniky pro jejich získání na základě chování radiance. Tyto vlastnosti jsou dále použity pro modely převodu atmosférické radiace na odhad skutečné hodnoty reflektance (ENVI Help).

### **3 METODY HODNOCENÍ POMOCÍ DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ**

Družicové snímky obsahují smíšenou informaci o zdravotním stavu lesa. Jedná se o neoddělitelné informace o dvou jeho složkách: množství biomasy v porostu (defoliace) a okamžitý stav této biomasy (vitalita). Lze sledovat množství jehličí či listí v korunách lesního porostu a jejich stav (stupeň prosychání a množství obsažené vody). Zdravotní stav lesa popisuje celkový výsledný stav porostů jako důsledek působení imisí, klimatu, stanovištních podmínek, biotických škůdců, lidské činnosti atd. Nevýhodou je právě nemožnost separovat jednotlivé druhy poškození a určit jejich příčinu. Obecně jsou data dálkového průzkumu limitována stavem počasí, mezi nejčastější faktory patří oblačnost, mlhy a silný smog (Stoklasa, 1995).

Sledování stavu lesa na družicových snímcích se provádí několika metodami. Základním způsobem je využití vlastností a chování lesní plochy v určitých kanálech daného senzoru.

#### **3.1 Klasifikace lesa z družicových snímků**

Zavedeným přístupem automatické klasifikace je klasifikace jednotlivých pixelů do daných tříd podle spektrálního chování. Podle Lillesanda a Kiefera lze klasifikace rozdělit na řízenou a neřízenou. Neřízená klasifikace je založená na agregaci dat do předem stanoveného počtu shluků podle spektrálních vlastností. Poté analytik identifikuje tyto spektrální skupiny jako některé typy krajinného pokryvu. Řízená klasifikace je založena na výběru trénovacích ploch, které slouží jako zástupci pro dané třídy krajinného pokryvu. Z trénovacích ploch je vypočten tzv. interpretační klíč, který popisuje spektrální vlastnosti jednotlivých tříd. Každý pixel je potom numericky porovnáván s každou kategorií a následně je zařazen k té, s níž si je nejvíce podobný (Lillesand, Kiefer, 2000).

Metoda klasifikace zdravotního stavu lesů z družicových snímků má své aplikační podmínky a omezení. Významným faktorem je dostatečná hustota zápoje korun stromů



Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

v porostu (větší než 70 %) a homogenita dřevinné skladby (větší než 80 %). Při nízké hustotě zápoje je pak spektrální charakteristika ovlivněna vlastnostmi podrostu. Klasifikace porostu s větším procentem příměsí jiných dřevin než dřeviny klasifikované bývá obtížná. Každá dřevina má totiž svou vlastní specifickou spektrální charakteristiku a rozsah hodnot. Pro správné vyhodnocení je třeba znát dřevinnou skladbu v dané oblasti. K nesprávnému vyhodnocení může dojít na okrajích či u úzkých pruhů lesa, protože na těchto místech dochází ke smíšení obrazu lesa a okolního terénu (Fabiánek, Stoklasa, 1998).

Aktuální jsou snahy o využití družicových snímků s velmi vysokým prostorovým rozlišením (very high resolution, VHR) jako IKONOS a QuickBird. Vyhodnocení poškození lesa podkorním hmyzem ze snímků VHR bylo hojně testováno, například v Kanadě. White et al. (2005) úspěšně analyzoval data IKONOS metodou neřízené klasifikace ISODATA za účelem detekce stromů napadených druhem *Dendroctonus ponderosa* (česky lýkohub, druh hmyzu způsobující škody na borovici).

### 3.2 Studie v zahraničí

V zahraničí byla zpracována řada studií, které využívají kombinaci různých typů dat, např. družicová data a data z radaru či lidarů. K novým přístupům je možné zařadit využití klasifikací pomocí neuronových sítí (Quackenbush, Yinghai (2007)). Mezi trendy patří také vypracovávání biofyzikálních modelů sledující množství biomasy, vlhkostní stres, obsah chlorofylu apod. (Wang et al., 2010).

V Norsku v Norwegian Forest Research Institute jsou prováděny studie zkoumající možnosti uplatnění metod DPZ pro mapování defoliace. Svein Solberg se zaměřil na defoliaci způsobenou hmyzem a pracoval s daty z družic SPOT a MODIS. Vedle toho také použil data z lidarů (pro určení indexu listové plochy) a hyperspektrální data. Cíl spočíval v modelování vztahu mezi množstvím biomasy a vzorky stromů nasnímané lidarem. Data ze SPOT se ukázala jako přínosná a to zejména pásma SWIR a RED. V těchto zónách bylo na územích postížených defoliací zaznamenáno zvýšení hodnot odrazivosti. Dále byl ještě ve studii použit klasický vegetační index NDVI, jehož snížení indikovalo zhoršení defoliace. V závěru práce bylo ovšem zjištěno, že snížení odrazivosti v pásmu SWIR není tolik ovlivněno přízemní vegetací jako je tomu u hodnot NDVI (Solberg et al., 2007).

### 3.3 Vegetační indexy

Mezi časté metody hodnocení stavu vegetace patří výpočet vegetačních indexů. Tyto indexy představují redukci multispektrálních skenujících měření na jednu hodnotu s cílem popsat různé charakteristiky vegetace (např. hodnoty biomasy, obsahu chlorofylu, výšky rostlin, listové plochy, procento pokryvu vegetací, výnosnosti apod.). Jedná se většinou o poměrně jednoduché operace s dvěma či více spektrálními pásmy. Dochází k maximalizování citlivosti na biofyzikální parametry rostlin tak, aby z výsledku bylo možno hodnotit stav a vegetační podmínky. Výhodou je eliminace vlivu rušivých činitelů (např. atmosféry a půdy). Většina vegetačních indexů je založena na vztahu mezi odrazivostí v červené části spektra (600 – 700 nm) a v blízké infračervené části spektra (700 – 900 nm). Využívá se, pro vegetaci typického jevu, značného nárůstu odrazivosti z absorpčního pásu v červené barvě do oblasti vysoké odrazivosti. Prostřednictvím vegetačních indexů lze postihnout i některé procesy rostlin, příkladem může být obsah vody, fyziologický stres rostlin, poškození rostlin i jejich fenofáze. Za určitých okolností lze vegetační indexy využít pro určování kvantitativních ukazatelů, jako např. množství zelené biomasy obsažené v pixelu. Existuje mnoho algoritmů pro výpočet vegetačních indexů, často jsou funkčně ekvivalentní (Dobrovolný, 1998).

#### 3.3.1 Normalizovaný rozdílový vegetační index

Normalized Difference Vegetation Index (dále NDVI) je asi nejznámější a nejvíce používaný vegetační index. Jedná se o podíl rozdílu a součtu blízkého infračerveného pásma a červeného pásma. NDVI indikuje množství zelené vegetace obsažené v pixelu. Hodnoty NDVI se nacházejí v intervalu (-1,+1), čím je hodnota vyšší, tím je také obsah vegetace větší. 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. V globálním měřítku se také často využívá taktéž jako indikátor změn klimatu. I po provedení atmosférických korekcí u vstupních dat je NDVI citlivé na externí faktory jako je vliv půdy, což je nejvíce patrné v oblastech s řídkou vegetací ([http://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky\\_povrch\\_vegetace.html](http://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html)).

### 3.3.2 Simple Ratio

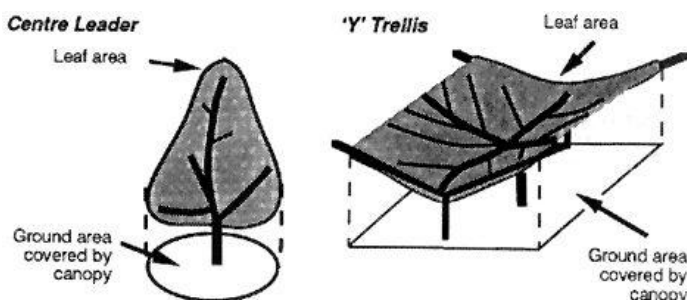
Simple Ratio (SR nebo také RVI simple ratio vegetation index) je jeden z často užívaných vegetačních indexů. Jedná se o jednoduchý poměr pásma v blízké infračervené části spektra a pásma v červené viditelné části spektra. Využívá inverzní vztah mezi absorpcí chlorofylu v červené části spektra a zvýšenou odrazivostí zdravé vegetace v blízké infračervené části spektra (Plant science, Cohen, 1991). Pro tento poměr jsou ideálními vstupy atmosféricky upravené hodnoty, někdy jsou ale používány pouze hodnoty naměřené senzorem. Pro holé půdy dosahuje SR hodnot kolem jedné, se zvětšujícím se podílem vegetace v pixelu roste také hodnota SR. Simple ratio není ohraničeno žádnou maximální možnou hodnotou. Obecně lze říci, že se jeho hodnoty pohybují do třiceti ([http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/veget/class/Chap\\_4/4\\_5.htm](http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/veget/class/Chap_4/4_5.htm)).

### 3.3.3 Index listové plochy

Index listové plochy (Leaf Area Index, LAI) vyjadřuje hustotu zelené hmoty na jednotku plochy. LAI se používá pro přiblížení typických trendů u vegetace, nebyl navržen jako náhrada pozemních měření různých druhů vegetace v různých sezónách (Geomatica Focus User Guide Version 10.1).

V lesnické praxi se pro stanovení indexu listové plochy LAI (projekční LAI) také používají alometrické vztahy mezi tloušťkou kmene (měřeno v 0,3 m nad povrchem půdy) a nesenou listovou plochou (Kulhavý a kol., 2003).

Obr. 4: Znárodnění indexu listové plochy



Zdroj: <http://www.hortnet.co.nz/publications/science/pers4.htm>.

Index listové plochy je také definován jako polovina z celkové listové plochy (včetně horní a dolní části listu) na jednotku plochy. Jedná se o vegetační strukturální

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

parametr, který má zásadní význam pro kvantitativní hodnocení fyzikálních a biologických procesů v zelené hmotě vegetace. Uvádí se také jako klíčový vstup pro modelování uhlíkového cyklu na zemském povrchu. V Kanadě byla v rámci projektu GeoComp-n pro odhad hodnot tohoto indexu provedena řada spektrálních měření s různou mírou úspěšnosti. Výsledkem byl vzorec pro výpočet LAI, který lze aplikovat na snímky Landsat 5 TM a NOAA-11 AVHRR. Vztah pro LAI je založen na výpočtu SR. Jedná se o poměr blízkého infračervené a červeného pásma, která jsou opraveny o atmosférickou korekci a jev BRDF. Tento poměr je dále vynásoben konstantou 1,27, která by měla upravit rozdíl mezi uvedenými senzory. SR je dále použit do vzorců pro výpočet LAI, kde existuje pro každý typ lesa speciální vztah. Výstupem byla celá řada globálních a regionálních map indexu listové plochy (Cihlar et al., 2001).

Podle Dobrovolného je index listové plochy vypočten z odrazivosti v červeném viditelném a blízkém infračerveném oboru spektra. Čím je hodnota indexu větší, tím více plochy v daném území pokrývají listy (Dobrovolný, 1998).

### 3.3.4 Green Red Vegetation Index

V Japonsku byla provedena v roce 2010 studie zabývající se indexem Green Red Vegetation Index (GRVI), který by měl plnit funkci fenologického ukazatele. Tento index byl odvozen na základě mnohaletého sledování spektrální odrazivosti a fenologie na mnoha různých výzkumných plochách. Výsledkem studie bylo stanovení prahové hodnoty  $GRVI = 0$ . Při této hodnotě byla dokázána brzká fáze opadu listů či jehlic, nulová hodnota také odpovídá střední fázi podzimního zbarvení listů. GRVI může detekovat drobné poruchy a je citlivý na rozdílné typy ekosystémů. Index používá odrazivosti v zelené a červené části spektra, což umožňuje odlišit následující tři druhy povrchů:

- vegetace (v zelené je odrazivost vyšší než v červené)
- půda (v zelené je odrazivost nižší než v červené)
- sníh (odrazivosti v červené a zelené se výrazně neodlišují).

GRVI se spočítá podle vzorce:

$$GRVI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$$

GREEN označuje odrazivost ve viditelné zelené části spektra a RED odrazivost ve viditelné červené části spektra. Vzorec GRVI se podobá vzorci pro výpočet NDVI. Místo pásma v blízké infračervené části spektra je zde obsaženo pásmo v zelené viditelné části spektra. Důvodem této obměny je necitlivost NDVI vůči barevným změnám vegetace ze zelené na žlutou či červenou, což je způsobeno právě absencí pásma v zelené viditelné části spektra ve vzorci pro NDVI. Družicová data v této studii byla zastoupena v podobě optických snímků z družice MODIS (Motohka, Nasahara, Oguma, Tsuchida, 2010).

### 3.3.5 Red Green Index

V roce 2006 byly v Kanadě analyzovány snímky z družice QuickBird s cílem detekovat stromy napadené kůrovcem. Postižený jedinec prochází několika fázemi. Charakteristickým znakem je postupný úbytek chlorofylu, strom nejprve žlutne a poté jehličí odumírá a získává rezavou barvu. Stromy mrtvé déle než jeden rok jsou šedivé. Pro detekci skupin zasažených stromů byly použity vegetační indexy. Pomocí Red Green Index (RGI) se podařilo detekovat dřeviny ve fázi tzv. red attack. Jedná se o stromy s odumřelým jehličím rezavé barvy, které jsou už nenávratně poškozeny. Red Green Index představuje jednoduchý poměr červeného a zeleného pásma. Aplikace spočívá ve zvýraznění barevné změny listů od zelené k červené barvě vlivem zvětšujícího se podílu anthokyanu. Tento index se používá pro odhad vývoje olistění a jako indikátor stresu (Coops, Johnson, 2006).

### 3.3.6 Foliar Moisture Index

Foliar Moisture Index (FMI) byl navržen pro sledování vlhkostních poměrů vegetace. Indexů sledujících vlhkost obsaženou v listech je celá řada. Pro tento účel se většinou používá krátkovlnné infračervené pásmo (short wave infrared, SWIR) a také další pásmo. Z poskytnutých snímků lze tento index (stejně jako následující wNDII) vypočítat pouze u snímků z družice SPOT, protože další senzory pásmo SWIR neobsahují. V této práci byl použit index FMI vypočtený podle vztahu:

$$FMI = \frac{NIR}{RED * SWIR}$$

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

NIR značí odrazivost v blízké infračervené oblasti spektra, RED odrazivost v červené viditelné části spektra a SWIR označuje odrazivost v krátkovlnném infračerveném pásmu (Wang et al., 2010).

### 3.3.7 Wide-band Normalized Difference Infrared Index

Index wNDII je zaměřený na postižení vlhkosti u vegetace. Používá se pro odhad množství vody v listu na jednotku plochy (mass of foliar water per unit area, SMC). Vypočte se podle vzorce:

$$wNDII = \frac{2 * NIR - SWIR}{2 * NIR + SWIR}$$

NIR označuje odrazivost v blízké infračervené oblasti spektra, SWIR odrazivost v krátkovlnném infračerveném pásmu (Wang et al., 2010).

### 3.3.8 Red Edge Inflection Point

Oblast REIP lze podle Guyota a Baret odvodit lineární interpolací. Předpokladem je, že červený okraj lze aproximovat rovnou čarou mezi odrazivostí v 780 nm (NIR) a v 670 nm (oblast absorpce chlorofylu).

Senzory pro měření REIP jsou určeny pro sezónní měření odrazivosti rostlin ve spektrálním pásmu. REIP je označován jako indikátor množství chlorofylu. Rostliny, které mají málo chlorofylu, vykazují nižší hodnoty REIP a oblast red edge se posouvá směrem k modré části spektra. Naopak u rostlin s vysokým obsahem chlorofylu dochází k posunu red edge do vyšších hodnot vlnové délky. Mělo by platit, že se obsah chlorofylu zvyšuje během vegetačního cyklu.

Guoyot, Baret, 1988:

$$REIP_{linear} = 700 + 40 * \left[ \frac{((R_{670} - R_{780})/2) - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} \right]$$

R znamená odrazivost a číselná hodnota danou vlnovou délkou.

### 3.4 Studie v České republice

V České republice byl zdravotní stav lesa zkoumán metodami dálkového průzkumu Země zejména v lokalitách postižených rozsáhlými kalamitami, tj. území Šumavy, Krušných hor a Krkonoš. Řada studií byla zaměřena na zkoumání spektrálních vlastností postižených jehlic v laboratorních podmínkách, např. studie Albrechtové a Rocka v Krušných horách z roku 2003. Dále existují studie využívající metod objektivě orientované klasifikace, často z leteckých snímků (studie Hájka a Svobody na Šumavě v roce 2007). Další studii šumavských lesů poškozených kůrovcem provedli Hais a Kučera (2008). Zabývali se vlivem povrchové teploty a vlivem topografie, dále také srovnáním stavu vykáceného mrtvého lesa a lesa, kde se poškozené stromy ponechaly samovolnému vývoji.

Hodnocení defoliace na území České republiky ze snímků Landsat provedl Ing. Milan Stoklasa, CSc. (firma STOKLASA Tech.). Pro kvantifikaci hodnocení zdravotního stavu lesů byly jeho metodikou vytvořeny dvě klasifikační stupnice: Stupeň poškození a mortality jehličnatých porostů a Defoliace a mortalita jehličnatých porostů. První z nich vychází z klasifikace poškození jehličnatých porostů imisemi, zavedené v lesním hospodářství ČR (stupně poškození porostu: O, O/I, I, II, IIIa, IIIb, IV). Tato stupnice je založena na hodnocení úbytku jehličí (listů) a jako pomocný faktor je posuzován jeho stav. Druhá stupnice založená na defoliaci poskytuje jemnější odstupňování a lepší shodu mezi klasifikací ze snímku a kontrolním pozemním šetřením. To je dáno zejména faktem, že informace obsažené v datech kosmického snímku jsou z fyzikálního hlediska bližší hodnocení defoliace než speciální stupnici hodnocení imisního poškození jehličnanů. Defoliační klasifikace hraje významnou roli zejména na mezinárodní úrovni při srovnávání a převodech hodnocení zdravotního stavu lesů z národních stupnic (Stoklasa, 1995). Pro hodnocení defoliace bylo použito pásma v infračervené části spektra. Přesný popis algoritmů, které Stoklasa ve své studii použil pro stanovení uvedených stupnic, nebyl publikován.

Na území Krkonoš jsou studie zabývající se hodnocením defoliace z optických dat DPZ ojedinělé a byly postaveny výhradně na datech z družice Landsat. Metodika Stoklasy není dostupná a její výsledky byly shledány jako nepřesné.

Snímky Landsat TM bylo využito i ve studii Matějky, Vacka a Schwarze (1998), kde byla data z pozemních měření porovnávána s tzv. indexem kondice lesa vypočteným právě na základě kombinací pásem z Landsat (jeho definice není dostupná v literatuře). Jednalo se o časové období let 1984, 1986, 1990, 1992 a 1995. Metodika výpočtu tohoto indexu byla navržena M. Šimou (ORBITEC CONSULTING, České Budějovice). Reálné hodnoty indexu byly přepočteny na celočíselné (1 až 255). Pro dva po sobě následující roky byly vytvořeny přechodové matice, ze kterých vyplývá, jak se změnilo zařazení stromů. Cílem tohoto projektu bylo vytvořit model vývoje kondice lesa. Závěrem bylo stanoveno, že existuje vztah mezi defoliací a indexem kondice lesa počítaným ze satelitních snímků Landsat TM. Tento vztah však není jednoznačný a každý rok se mění. Jednoznačný model vývoje proto nebyl vytvořen.



## 4 METODIKA

### 4.1 Charakteristika zájmového území

Krkonoše jsou významným přírodním regionem nacházející se v severní části České republiky na hranicích s Polskem. V roce 1963 zde byl na ploše 36 300 ha vyhlášen Krkonošský národní park (KRNAP), ke kterému bylo připojeno ochranné pásmo čítající 18 400 ha. O park pečuje Správa Krkonošského národního parku se sídlem ve Vrchlabí, jejíž povinností je též od roku 1994 spravovat lesní ekosystémy. Na polské straně Krkonoš byl národní park založen už v roce 1959, a to sice na ploše 5 560 ha. Krkonoše jsou na obou stranách hranic od roku 1992 zařazeny do sítě biosférických rezervací UNESCO. Krkonošský národní park patří k nejnavštěvovanějším parkům v Evropě. Uvádí se, že ho každoročně navštíví přes osm milionů návštěvníků.

Krkonoše vynikají svojí unikátní geografickou polohou ve středu Evropy. Z tohoto důvodu bylo pohoří často místem, kde se opakovaně setkávala severská a vysokohorská příroda. Důkazem toho je vysoká biodiverzita, která nemá v jiných českých pohořích obdoby. Jako příklad lze jmenovat velké množství glaciálních reliktních alpínských trávníků, subarktická rašeliniště, porosty kleče, společenstva karů a porosty horských smrkových, smíšených a bukových lesů.

Dnešní reliéf Krkonoš je výsledkem dlouhého geologického a geomorfologického vývoje. Krkonoše patří do krkonošsko-jizerského krystalinika, nachází se zde převážně krystalické břidlice a uprostřed nich leží žulový masiv tvořící vrcholové partie. Je zde vyvinuta vertikální stupňovitost od podhorských až po velehorské půdy.

Klima Krkonoš bylo zařazeno podle klimatické rajonizace Quitta do třech jednotek, nejvyšší hřebenová oblast do chladné klimatické jednotky Ch4, středně položená území do Ch6 a níže položená do Ch7. Podnebí je výrazně ovlivňováno také znečištěným ovzduším, kdy se průměrné roční koncentrace  $\text{SO}_2$  pohybují mezi 10 – 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Vacek a kol., 2006).

#### 4.1.1 Lesy Krkonoš

Současná druhová skladba v Krkonoších je ovlivněna více než 600 lety trvajících zásahů do lesních porostů. Posledních přibližně 200 let je snahou stav lesů zlepšit a posílit ekologickou stabilitu. V celém pohoří k nejvíce zastoupeným dřevinám patří smrk ztepilý (78 %), borovice kleč (8 %), buk lesní (4 %), jeřáb ptačí (2 %), bříza bělokorá (2 %), javor klen. Jehličnaté dřeviny zaujímají 89 % a listnaté dřeviny 11 %. Introdukované dřeviny zaujímají necelé 2 % (Vacek a kol., 2006).

#### 4.2 Lesní vegetační stupně

V České republice se vyskytuje devět lesních vegetačních stupňů, které jsou ovlivněny především nadmořskou výškou a stanovištěm. Přirozených lesů se zde nachází dnes již málo. V drtivé většině došlo v minulosti alespoň k částečným zásahům do struktury či druhového složení porostů. Ve většině případů byla zcela pozměněna druhová skladba, takže nyní v Česku převládá jedlobukový lesní vegetační stupeň (30,04 %), nacházející se v nadmořské výšce 600 – 700 m n. m., naopak nejmenší část tvoří klečový lesní vegetační stupeň (nad 1350 m n. m.; 0,29 %). Nejhojnější dřevinou je v Česku buk pokrývající cca 40 % plochy.

##### 4.2.1 Lesní vegetační stupně Krkonoš

Cílem diplomové práce je popsat zdravotní stav lesa v KRNAP pouze u smrkových porostů, proto byl zájem zúžen na LVS 6 až 9 (viz Tab. 2), kde se smrk vyskytuje.

###### 6. Smrkobukový LVS (700 – 900 m n. m.; 11,95 %)

Smrkobukový lesní vegetační stupeň zaujímá lokality klimaticky podmíněné průměrnou roční teplotou 4,5 až 5,5 °C, průměrným ročním úhrnem srážek 900 až 1050 mm a délkou vegetační doby 115 až 130 dní. Hlavní dřeviny tvoří tzv. hercynskou směs. Jedná se o smrk ztepilý (*Picea abies*), buk lesní (*Fagus sylvatica*) a jedli bělokorou (*Abies alba*). V bylinném patře se nacházejí ojediněle tzv. smrkové druhy.

###### 7. Bukosmrkový LVS (900 – 1050 m n. m.; 5,00 %)

Od 900 metrů nadmořské výšky se jedná o nižší horský stupeň, který je charakteristický pro bukosmrkový lesní vegetační stupeň. Zde se už nevyskytuje dub, jsou tu však zbytky původních bučin a smíšených lesů bukojedlových a smrkosedlových. Tyto

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

formace jsou mnohdy nahrazeny kulturními smrčínami. Bukosmrkový LVS zaujímá lokality klimaticky podmíněné průměrnou roční teplotou 4,0 - 4,5 °C, průměrným ročním úhrnem srážek 1050 - 1200 mm a délkou vegetační doby 100 - 115 dní. V hercynské směsi dřevin - smrk ztepilý (*Picea abies*), jedle bělokorá (*Abies alba*), buk lesní (*Fagus sylvatica*) - už buk ustupuje do podúrovně.

#### 8. Smrkový LVS (1050 – 1350 m n. m.; 1,69 %)

Hluboké smrkové lesy jsou typické pro vyšší horský stupeň. Zaujímají lokality klimaticky podmíněné průměrnou roční teplotou 2,5 - 4,0 °C a délkou vegetační doby 60 až 100 dní. Zcela dominuje smrk ztepilý (*Picea abies*)

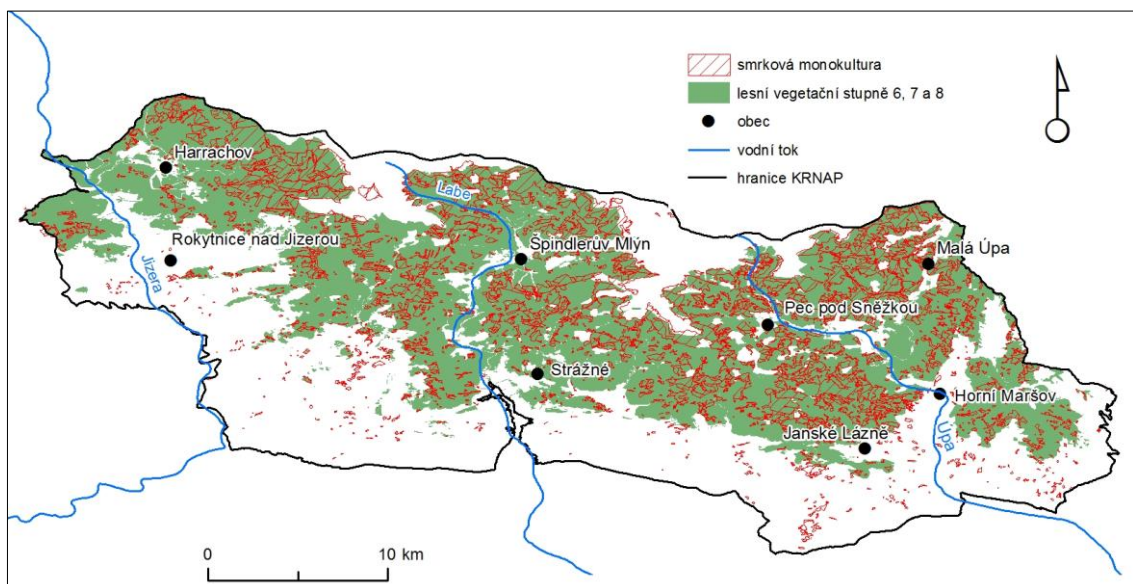
(<http://www.olese.cz:81/olese/lesni-encyklopedie-clanek/lesni-vegetacni-stupne>).

Tab. 2: Charakteristika lesních vegetačních stupňů Krkonoš

Lesní vegetační stupně		Výměra	Zastoupení	Nadmořská výška	Průměrná teplota	Roční srážky	Vegetační doba
		ha	%	m	°C	mm	dny
0	bory	2,25	+	520-600	6,0 – 6,5	700 – 900	140 – 150
4	bukový	86,33	0,2	220-600	6,0 – 6,5	700 – 900	140 – 150
5	jedlobukový	2493,56	6,7	600-700	5,5 – 6,0	700 – 900	130 – 140
6	smrkobukový	13296,78	35,8	700-900	4,5 – 5,5	900 – 1200	115 – 130
7	bukosmrkový	6751,08	18,2	900-1050	4,0 – 4,5	900 – 1200	100 – 115
8	smrkový	9198,01	24,7	1050-1250	2,5 – 4,0	1200 – 1500	60 – 100
9	klečový	5345,49	14,4	1250-1602	< 2,5	>1500	< 60

Zdroj: Vacek a kol., 2006

Obr. 5: Znázornění ploch smrkové monokultury a lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku v KRNAP



Zdroj dat: KRNAP.

### 4.3 Vývoj zdravotního stavu lesa v Krkonoších

O poškození lesů v Krkonoších se začalo mluvit začátkem sedmdesátých let v souvislosti s imisní kalamitou. Rozsáhlá kalamitní poškození a odumírání lesních porostů jsou i mnohem staršího data. Jednalo se například o velmi ničivé větrné kalamity na přelomu osmnáctého a devatenáctého století. Na ně navázalo velké přemnožení kůrovců zapříčiněné neodkorněním dřeva. Největší kůrovcové kalamity byly zaznamenány v letech 1786-1789, 1800-1803 a 1868-1870. Větší pozornost poškození a odumírání dřevin byla věnována až ve dvacátém století, zejména po rozsáhlých kalamitách v sedmdesátých a devadesátých letech. Ty postihly celé pohoří a výrazně ovlivnily strukturu a funkčnosti lesních ekosystémů nad horní hranicí lesa na mnoho let.

Odumírání dospělých a přestárých stromů je však v přirozených podmínkách standardním jevem. U horských lesů, zejména smrkových, probíhá generační obměna na poměrně velkých plochách v intervalech kolem 300 let. Během této doby les prochází stadii obnovy, dorůstání, zralosti, dožívání a rozpadu. V přirozených lesích se tak ve stadiu náletů a nárostů selektují jedinci, kteří budou více odolní vůči podmínkám daného prostředí (Špulák, 2005).

### 4.4 Použitá data

Tab. 3: Seznam použitých družicových snímků (viz příloha 1)

družice	datum pořízení
SPOT	26. 8. 1999
SPOT	30. 7. 2004
SPOT	10. 9. 2006
SPOT	24. 9. 2007
WorldView-2	24. 9. 2011
QuickBird	6. 5. 2003
QuickBird	9. 9. 2005
QuickBird	23. 8. 2010
Landsat	11. 7. 1984
Landsat	1. 5. 1993
Landsat	29. 7. 2005*
Landsat	31. 8. 2011

\* snímek použit pouze pro porovnání možností různého prostorového rozlišení

Zdroj: vlastní výstup.

#### 4.4.1 SPOT

První družice SPOT ve vlastnictví francouzské společnosti Spotimage byla vypuštěna na oběžnou dráhu 22. února 1986. Stejně jako následující družice měla heliosynchronní dráhu s periodou 26 dní. Obsahovala dva totožné skenery HRV (High Resolution Visible), které fungovaly současně. Díky tomu umožňovaly obsáhnout šířku zemského povrchu o 117 km a získat dvojice stereo snímků. Panchromatická i multispektrální data byla pořizována současně, rozlišení barevných dat dosahovalo 20 m a černobílých 10 m, barevná data obsahovala tři pásma.

Tab. 4: Spektrální pásma družice SPOT 5

Značení pásma	Rozsah od [nm]	Rozsah do [nm]	Kódování	Prostorové rozlišení [m]
B1	500	590	GREEN	10
B2	610	680	RED	10
B3	780	890	NIR	10
SWIR	1580	1750	SWIR	20

Zdroj: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/spot>.

V roce 1990 byl vypuštěn SPOT 2, který disponoval stejnou výbavou jako jeho předchůdce. Tato družice se na oběžné dráze pohybuje do současnosti.

SPOT 3 nesl kromě dvojice skeneru HRV také POAM II (Polar Ozone And Aerosol Measurement) i navigační systém DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Na oběžnou dráhu se dostal v roce 1994, ale za dva roky přestal fungovat.

Převratné změny ve vybavení přinesl SPOT 4 vypuštěný na oběžnou dráhu 24. března 1998. Místo skeneru HRV byl použit skener HRVIR (High Resolution Visible and Infrared). Scény SPOT jsou poskytovány ve třech úrovních předzpracování 1A, 1B nebo 2A. Dalším produktem je SPOTView, který je označován jako Level 3 (Ortho). Data této úrovně jsou ortorektifikovány. Mapová projekce je založena na základě GCP (grand control point) a DEM (digital elevation model) z 3D dat právě s cílem eliminovat zkreslení z terénu.

Scény SPOT jsou dodávány ve formátu DIMAP. Jedinou výjimkou jsou snímky úrovně 2A s prostorovým rozlišením 2,5 a 5 m, které jsou poskytovány ve formátu

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

SPOTView. Formát DIMAP byl zaveden pro data družice SPOT 5 v květnu roku 2002 a byl vyvinut centrem CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Tento formát se používá jako veřejný formát pro popis geografických dat. Přestože byl navržen pro obrazová data, lze ho použít i pro zobrazení vektorů. DIMAP se skládá ze dvou částí, jedna je samotný obraz a druhá obsahuje popis obrazu. Metadata jsou uložena v souboru s koncovkou \*.xml (<http://www.astrium-geo.com/en/191-spot-technical-information>).

Data z družice SPOT 4 mají lepší radiometrickou kvalitu danou dokonalejší technologií výroby detektorů a optického systému. Dále byl vylepšen navigační systém DORIS poskytující informace o geometrii dráhy a poloze družice, čehož bylo dosaženo použitím navigačního software DIODE. Tento software umí určit polohu družice v reálném čase s přesností 30 cm, což má vliv např. na přesnost výpočtu DEM ze stereodvojice snímků. Životnost této družice byla naplánována na pět let (předchozí družice na tři roky). SPOT 4 obsahuje nově také skener VEGETATION.

Data poskytnutá pro účely této diplomové práce jsou ve formátu SPOT Level 1B. K dispozici jsou měření ve 3 nebo 4 radiometrických pásmech s rozlišovací schopností 10 či 20 m. Snímky této úrovně jsou radiometricky korigovány, je u nich provedena normalizace citlivosti CCD detektorů vůči radiometrickým změnám. Dále tato úroveň obsahuje také geometrické korekce pro vyrovnání systematických chyb, včetně panoramatické distorze, vlivu rotace a zakřivení Země a také výkyvů orbitální výšky satelitu. Data jsou standardně poskytována v souřadném systému UTM, elipsoidu WGS84.

Automatická polohová přesnost je u SPOT 1 až 4 menší než 350 m a u SPOT 5 menší než 50 m, tyto hodnoty lze zlepšit ortorektifikací. Přesnost určení polohy je hodnocena statisticky na základě velkého počtu scén získaných na celém světě od září 2003. Produkty SPOT úrovně 1B jsou určeny pro uživatele, kteří vyžadují geometricky korigované snímky. Jsou vhodné pro geometrická měření (vzdáleností, úhlů i ploch), pro fotografickou interpretaci a pro řadu tematických studií, ať už se jedná o analýzy vizuální nebo plně automatizované (<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/spot>).

U snímků SPOT byla provedena kontrola geometrické přesnosti srovnáním s polohopisem ZABAGED. U některých charakteristických prvků polohopisu bylo zjištěno,

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

že poloha na snímku SPOT a v ZABAGED nesouhlasí. Z těchto důvodů bylo přikročeno k procesu ortorektifikace.

#### 4.4.2 QuickBird

Tato družice patřící společnosti DigitalGlobe byla vynesena na oběžnou dráhu 18. října 2001 do výšky 450 km. Družice je unikátní svým velmi vysokým prostorovým rozlišením, které činí až 60 cm, a také svými manévrovacími schopnostmi. Může se natáčet v rovině letu i napříč dráhy letu až o úhel 25°, což umožňuje její pohyb v pásu širokém 544 km a také schopnost pořizovat stereoskopické scény ve směru letu. Panchromatická data mají rozlišení od 60 cm (měření v nadiru) do 72 cm ve směru pozorování 25°. Multispektrální snímky disponují rozlišením 2,4 až 2,8 m při velikosti scény cca 16,5 km x 16,5 km.

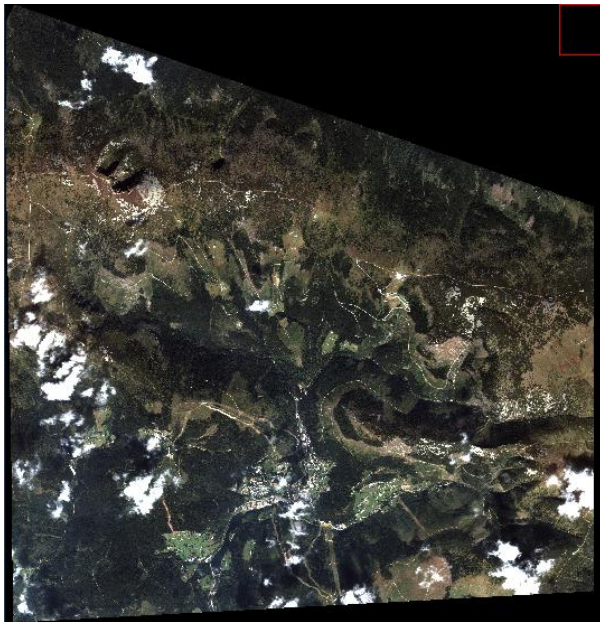
Tab. 5: Spektrální pásma družice QuickBird

Pásmo	Rozsah od [nm]	Rozsah do [nm]	Kódování	Prostorové rozlišení [m]
B1	450	520	BLUE	2,4
B2	520	600	GREEN	2,4
B3	630	690	RED	2,4
SWIR	760	900	NIR	2,4

Zdroj: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/quickbird/satelite/quickbird>

Data z družice QuickBird mají celou řadu využití. Jednou z častých aplikací je detailní mapování až do měřítka 1 : 5 000, 3D modely měst, dále také lesní inventarizace, precizní zemědělství, urbanismus, mapování rozptýlené vegetace, rekultivace, dopravní sítě, řízení přírodních zdrojů, pojišťovnictví a tvorba digitálního modelu terénu (DMT) (Kolář, 2008).

Obr. 6: Snímek z družice QuickBird z 9. 9. 2005 v pravých barvách (R, G, B – 3, 2, 1)



Zdroj: zobrazeno v ENVI.

Poskytnutá data z družice QuickBird byla společně s daty z družice Spot získána v rámci programu Planet Action. V případě QuickBird se jedná o standardní typ dat úrovně LV 2A. Jedná se o produkty vhodné pro uživatele, kteří nevyžadující absolutní přesnost. Snímky této úrovně lze využít pro celou řadu aplikací.

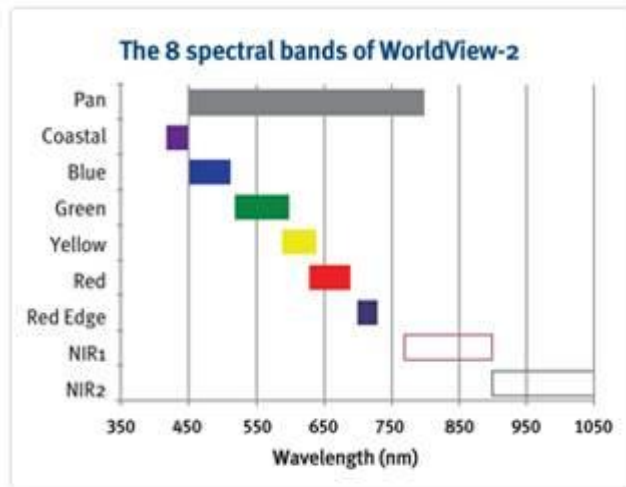
Standardní produkty již obsahují radiometrické i geometrické korekce, korekce senzoru a jsou poskytovány v určité mapové projekci. Data úrovně LV 2A standardního typu nejsou ortorektifikována, je na ně pouze aplikován hrubý DMT za účelem normalizace topografie reliéfu vzhledem k referenčnímu elipsoidu. Stupeň normalizace je relativně malý, není proto považován za ortorektifikovaný (QuickBird Product Guide, 2008). Stejně jako u dat z družice SPOT byla i data z družice QuickBird porovnána s polohopisnými prvky ZABAGED. I snímky QuickBird vyžadují ortorektifikaci.

#### 4.4.3 WorldView-2

WorldView-2 je první komerční družice, která pořizuje multispektrální snímky s velmi vysokým rozlišením v osmi spektrálních kanálech. Díky své flexibilitě je schopna pořídít obrazová data z území téměř 1 mil. km<sup>2</sup> každý den. Obsahuje 4 typická pásma (modré, zelené, červené a blízké infračervené) a také nová 4 pásma výrazně zvyšující informační obsah a možnosti vyhodnocení těchto dat.



Obr. 7: Spektrální pásma družice WorldView-2



Zdroj: <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2.html>

Novinkou jsou speciální pásma pro zjišťování hloubky vody nebo množství absorpce chlorofylu. Speciální red edge pásmo umožňuje provádět kvalitnější a přesnější analýzu vegetace a zdraví rostlin, než je možné dosáhnout pouze pomocí infračerveného pásma. Snímky z WorldView-2 mají navíc další dvě pásma v blízkém infračerveném spektru, která umožňují provádět analýzy atmosférických podmínek, podrobné vegetační analýzy nebo studie biomasy. Novinku představuje také rozšíření viditelné části spektra o tzv. viditelné žluté pásmo s vlnovými délkami 585 – 625 nm, které umožňuje vytvářet barevné kombinace snímků ve skutečně pravých barvách. Lidské oko je na tuto část spektra více citlivé a výsledné snímky tak vypadají pro lidské vnímání Země „lépe“. Díky osmi spektrálním pásmům se rovněž významně zvyšuje přesnost klasifikace (<http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/druzicova-data/druzice-a-skenery/worldview-2/>).

Nově zahrnutá pásma:

- *Pobřežní pásmo (400 - 450 nm)*

Toto pásmo umožňuje identifikaci vegetace, batymetrické studie založené na chlorofylu a penetraci vodou.

- *Žluté pásmo (585 - 625 nm)*

Jedná se o pásmo vhodné pro identifikaci žlutých cílů, zejména u vegetačních aplikací. Využívá se také pro dosažení skutečných barev ve snímku.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

- Červené pásmo (705 - 745 nm)

Červené pásmo pomáhá při analýze zdravotního stavu vegetace (produkce chlorofylu).

- Blízké infračervené 2 pásmo (860 - 1040 nm)

Toto pásmo se překrývá s pásmem NIR 1, ale méně jej ovlivňují atmosférické podmínky. Aplikaci má v analýzách vegetace a studiu produkce biomasy

(<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovychsystemu/worldview/satelite/worldview-2>).

Tab. 6: Spektrální pásma družice WorldView-2

Označení pásma	Rozsah od [μm]	Rozsah do [μm]	Kódování spektrál. pásma	Prostorové rozlišení [m]
1	0,45	0,51	BLUE	1,84
2	0,51	0,58	GREEN	1,84
3	0,63	0,69	RED	1,84
4	0,77	0,895	NIR	1,84
5	0,4	0,45	COASTAL	1,84
6	0,585	0,625	YELLOW	1,84
7	0,705	0,745	RED EDGE	1,84
8	0,86	1,04	NIR	1,84

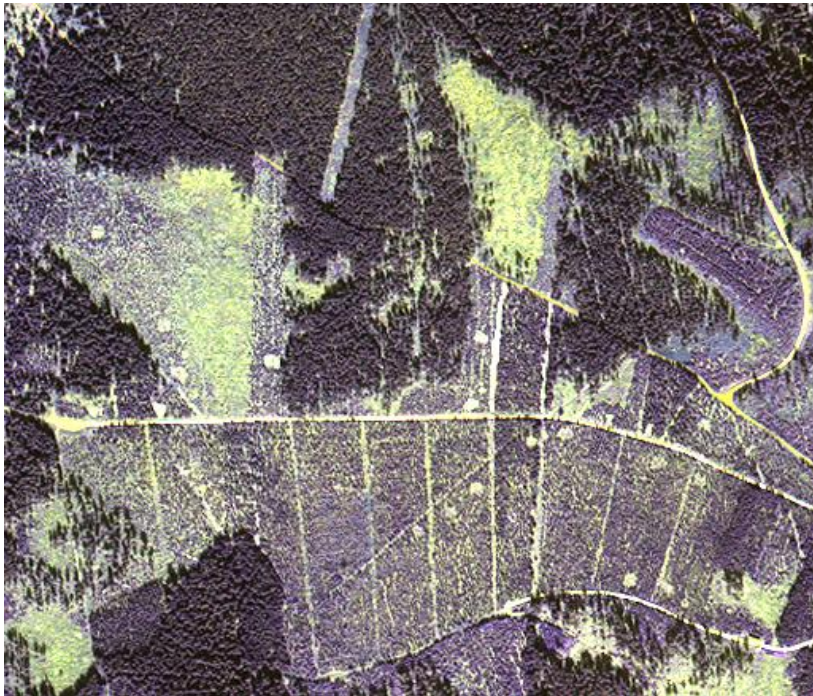
Zdroj:<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovychsystemu/worldview/satelite/worldview-2>.

Stejně jako Quickbird a WorldView-1 jsou i snímky z družice WorldView-2 distribuovány v pěti základních úrovních (Basic 1B, Basic Stereo dvojice, Standard 2A, Ortho-Ready Standard (OR2A) a Orthorectified). Poskytnuté snímky jsou úrovně 2A. Při přípravě tohoto produktu se k transformaci reliéfu na referenční elipsoid používá hrubý DEM. Z tohoto důvodu platí, že i když se u této úrovně provádí terénní korekce, nepovažuje se za ortorektifikovaný. Pro účely ortorektifikace je uváděna jako vhodnější úroveň dat OR2A, kde se neprovádí korekce na topografický reliéf (<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/worldview>).

Pro ortorektifikaci snímků byla použita automatická metoda modelu racionální polynomické funkce dostupná v software ENVI, která patří mezi nejpoužívanější. Pro její provedení je nutné mít k dispozici pouze digitální model terénu a není třeba žádných bodů GCP.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

Obr. 8: Výřez ze snímku z družice WorldView-2 ze dne 24. 9. 2011 (R, G, B – 3, 4, 6), žlutě znázorněno bezlesí



Zdroj: vlastní výstup, zobrazeno v ENVI.

#### 4.4.4 Landsat

Program Landsat provozuje NASA (National Aeronautics and Space Administration) a USGS (United States Geological Survey). Jedná se o skupinu satelitů, jejíž první zástupce Landsat 1 byl vypuštěn na oběžnou dráhu 23. července 1972. Družice obíhá Zemi po heliosynchronní dráze. Nad rovníkem přelétá pod úhlem  $98,2^\circ$ , což zajišťuje pokrytí plochy Země mezi  $81^\circ$  severní šířky a  $81^\circ$  jižní šířky. Družice se po šestnácti dnech vrací nad totožné místo na Zemi a celý cyklus se znovu opakuje.

Program představuje nejdéle fungující systém pro získávání obrazů Země z vesmíru. Snímky jsou využívány v mnoha odvětvích, jako např. v zemědělství, geologii, lesnictví, kartografii, národní bezpečnosti, regionálním plánování nebo pro účely výuky a vzdělávání.

Družice první generace (první tři) nesly senzor RBV (Return Beam Vidicon) a skener MSS (Multispectral Scanner System). Druhá generace byla zahájena startem družice Landsat 4, který obsahoval skener MSS a TM (Thematic Mapper) se sedmi kanály.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

Na nejnovější družici Landsat 7 se nachází vedle mechanického skeneru MSS také skener ETM+, který již dodává data i v podrobnějším panchromatickém módu (Kolář, 2008).

Tab. 7: Časový sled satelitů Landsat

Název	Datum vypuštění	Činnost
Landsat 1	23. 7. 1972	ukončena v roce 1987
Landsat 2	22. 1. 1975	ukončena v roce 1981
Landsat 3	5. 3. 1978	ukončena v roce 1983
Landsat 4	16. 7. 1982	ukončena v roce 1993
Landsat 5	1. 3. 1984	funkční
Landsat 6	5. 10. 1993	havárie při startu
Landsat 7	15. 4. 1999	funkční

Zdroj: Kolář, 2008.

Snímky Landsat jsou složeny ze sedmi spektrálních pásem, šest pásem má rozlišení 30 m (3 z nich jsou pořízena v oblasti viditelného záření, 3 v oblasti blízkého a středního infračerveného záření), tepelné pásmo má rozlišení 120 či 60 m (Landsat 5 či Landsat 7). Landsat 7 disponuje též osmým pásmem, které je panchromatické a má rozlišení 15 m.

Na konci května 2003 se poškodil mechanismus skenovacího zrcátka senzoru ETM+, což ovlivnilo další činnost tohoto přístroje. Na současných scénách chybí asi 25% dat. Z tohoto důvodu se nyní nejvíce používají snímky z družice Landsat 5.

Tab. 8: Spektrální pásma družice Landsat 5 senzoru TM

Pásma	Rozsah od [nm]	Rozsah do [nm]	Kódování	Prostorové rozlišení [m]
1	450	520	BLUE	30
2	520	600	GREEN	30
3	630	690	RED	30
4	760	900	NIR	30
5	1550	1750	SWIR	30
7	2080	2350	SWIR	30
6	1042	1250	TIR	120

Zdroj:<http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/landsat/satelite/landsat-5>.

#### *L5 TM L1T - Terrain corrected single scene*

Snímky Landsat úrovně L1T jsou radiometricky a geometricky korigované prostřednictvím kontrolních bodů GCP. Přesnost korekcí terénu pro oblasti mimo USA je závislá na dostupnosti lokálních GCP bodů a samozřejmě také na kvalitě dostupného lokálního DEM.

Snímky této úrovně jsou po registraci volně ke stažení na stránkách USGS. Pro vyhledávání a volné stažení dat slouží od února 2009 webová stránka <http://glovis.usgs.gov/>. Jsou zde k dispozici data archivní i nově nasnímaná. Jednotlivé scény jsou zkomprimovány pomocí softwaru Gzip (přípona \*.gz nebo \*.tar.gz) a pásma jsou ve formátu GeoTIFF. Snímky mají souřadnicový systém UTM (pro Českou republiku zóna 33 N) s referenčním elipsoidem WGS84. Pro vyhledání snímků slouží globální záznamový systém World Reference System (WRS), který je založen na číslu dráhy (path) a řádce (row). Pro Landsat 1 až 3 existuje systém WRS-1 a pro Landsat 4 až 7 systém WRS-2 [http://edcsns17.cr.usgs.gov/helpdocs/landsat/product\\_descriptions.html](http://edcsns17.cr.usgs.gov/helpdocs/landsat/product_descriptions.html).

Území Krkonoš se v systému WRS-2 nachází na scénách označených dráhou 191 a řadou 25.

#### **4.4.5 Data z pozemního šetření VÚLHM Opočno**

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM) Opočno poskytl data z pozemního šetření zdravotního stavu lesa na trvalých výzkumných plochách (TVP) a na plochách mezinárodního programu ICP Forests (Vacek a kol., 2006). Jedná se o data s roční periodou z let 1999 až 2011. Na území KRNAP se nachází jedenáct TVP a tři plochy ICP Forests, na nichž se vyskytují smrkové porosty, u kterých bylo zaznamenáno olistění. Z toho byla získána hodnota defoliace odečtením hodnoty olistění od sta. U ploch ICP je přímo uvedeno procento defoliace. Hodnoty olistění jsou uvedeny v procentech, ve škále po 5%. Je zde dále značeno, zda došlo k vývratu stromu či k jeho těžbě. Všechny plochy byly přeloženy přes družicové snímky a pro porovnání s výslednými hodnotami vegetačních indexů bylo třeba z každé plochy vypočítat průměrnou hodnotu defoliace.

Tab. 9: Seznam TVP na území KRNAP

Číslo plochy	Název
4	Pod Voseckou boudou
5	Pod Lysou horou
10	Pod Vysokým kolem
11	Na Strmé stráni A
12	Na Strmé stráni B
13	Na Strmé stráni C
20	Pod Liščí horou
21	Modrý důl
22	Obří důl
23	Václavák
24	Střední hora

Zdroj: VÚLHM Opočno.

Obr. 9: Zobrazení TVP na podkladu ortofota



Zdroj: VÚLHM Opočno, geoportal CENIA, upraveno.

#### 4.4.6 Určení polohy bodů v terénu

Body pro účely ortorektifikace družicových snímků byly zaměřeny přístrojem GeoExplorer 6000 GeoXH 3.5G od společnosti Trimble, který byl zapůjčen z Katedry aplikované kartografie a geoinformatiky Univerzity Karlovy v Praze. Skupina přístrojů série 6000 je označena jako řada odolných kapesních počítačů s integrovanou vysokou přesností GNSS (Global Navigation Satellite System, globální navigační satelitní sys-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

tém). GeoExplorer 6000 GeoXH 3.5G je přístroj určený pro sběr dat ve formě GIS, je schopen určit přesnou polohu GNSS pomocí technologie Trimble Floodlight™ i v náročnějších podmínkách (např. pod stromy či v blízkosti budov). Tato technologie je založena na snaze snížit satelitní stín a tím tak umožnit zlepšení přesnosti ve zhoršených podmínkách. Na základě zpracování signálů vysílaných družicemi globálního navigačního družicového systému je možné určovat prostorovou polohu fázového centra antény přijímače těchto signálů

(<http://www.cuzk.cz/Dokument.aspx?PRARESKOD=998&MENUID=0&AKCE=DOC:10-GNSS>).

GeoExplorer 6000 GeoXH 3.5G je díky technologii Floodlight schopen využít polohy satelitů GPS i GLONASS. Výhodou tohoto přístroje je vysoká přesnost určení polohy bez potřeby externího přijímače nebo antény. V reálném čase by horizontální přesnost přístroje měla být pod hranicí jednoho metru, postprocessing dat by měl poskytnout přesnost do 50 cm. Vertikální přesnost by se měla pohybovat pod hranicí dvou metrů. Přesnost měření závisí na souvislé době měření, podle manuálu představují pro typ GeoExplorer 6000 GeoXH 3.5G vhodnou dobu dvě minuty pro dosažení garantované přesnosti měření (<http://www.trimble.com/mappingGIS/geo6-faq.aspx>).

Obr. 10: Popis přístroje GeoExplorer 6000 GeoXH 3.5G



Zdroj: GeoExplorer 6000 manuál.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

GeoExplorer 6000 je kapesní počítač určený pro mobilní sběr dat. Lze jej využít pro celou řadu environmentálních aplikací, např. mapování vod, zemědělství, mapování znečištění, ekologických katastrof, sběr vzorků atd. Je vhodný v odvětvích, kde je důležitý sběr polohových dat přímo v terénu jako prostředek pro podporu rozhodování (<http://www.trimble.com/mappingGIS/geo6.aspx?dtID=applications&>). Přístroj pracuje se software TerraSync, taktéž od společnosti Trimble. Jedná se o software pro sběr dat, který je distributorem dodáván v české lokalizaci.

Pro sběr souřadnic bodů bylo vybráno okolí obcí Špindlerův Mlýn, Horní Maršov a Pec pod Sněžkou. Snahou bylo zaměřit souřadnice bodů, jejichž polohu lze najít také v použitých optických datech a přiřadit jí příslušný pixel. Měření v terénu tedy předcházela příprava v podobě studia zájmové oblasti na ortofotech a na družicových snímcích. Cílem bylo předem vybrat vhodné body pro měření souřadnic zeměpisné šířky, zeměpisné délky a nadmořské výšky. Pro tyto účely byly vybrány prvky v krajině, které jsou na snímcích výrazné, dobře identifikovatelné a v čase stálé. Příkladem takto zvolených lokalit je hráz vodní nádrže Labská nebo budova zámku v Horním Maršově. Celkem byla zaměřena poloha 26 bodů.

#### **4.4.7 Základní báze geografických dat**

Pro kontrolu geometrické přesnosti byla objednána data Základní báze geografických dat (ZABAGED). Poskytovatelem dat je Český úřad zeměměřický a katastrální, který zdarma nabízí studentům vektorová data měřítka 1 : 10 000 a v rozsahu maximálně deseti mapových listů. Pro účely této diplomové práce bylo vybráno deset listů ze ZABAGED polohopisu a výškopisu v okolí Harrachova, Pece pod Sněžkou a Horního Maršova.

### **4.5 Použitý software**

#### **4.5.1 ENVI 4.7**

Software ENVI je určený pro zpracování a analýzu multispektrálních a hyperspektrálních dat. Poskytovatelem tohoto programu je firma Exelis Visual Information Solutions, Inc. Jedná se o moderní software pro různě pokročilé uživatele s uživatelsky přívětivým rozhraním. Umí pracovat s běžně používanými datovými formáty prostorových dat. Výstupy jsou automaticky ukládány ve formátu specifickém pro ENVI. Jedná



Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

se o obecný rastrový datový formát, složený z jednoduchého binárního souboru a z textového ASCII souboru (header) s příponou \*.hdr, který obsahuje informace potřebné pro přečtení souboru. Obsahuje např. definici použité projekce, velikost pixelu, jméno senzoru apod. (ENVI User's Guide).

V této diplomové práci představoval ENVI nejpoužívanější program. Využívalo se ho zejména pro provedení ortorektifikací, atmosférických korekcí a výpočet vegetačních indexů. Snímek byl po provedení ortorektifikace a atmosférické korekce převeden z ENVI formátu do formátu PCIDSK, tak aby bylo možné dále provést řízenou klasifikaci v software Geomatica. Výstupy s vegetačními indexy byly pro účely interpretace v ArcMap exportovány ve formátu TIFF/GeoTIFF.

#### **4.5.2 Geomatica 10.1**

Software Geomatica je poskytován společností PCI Geomatics, v České republice ho distribuuje společností Gisat. Má podobu kompletní, modulově řešené aplikace pro různé typy uživatelů, kteří pracující s geografickými daty. Geomatica je jedním z nejčastějších programů používaných pro práci s družicovými snímky, je založena na filozofii otevřeného software. (<http://www.gisat.cz/content/cz/software/pci-geomatics/geomatica>). Geomatica vytváří výstupy ve formátu PCIDSK (PCI Geomatics Database File Format) s příponou \*.pix. Tento formát byl společností PCI Geomatics vyvinut v roce 1988 jako náhrada formátu UNIDSK, který byl závislý na 16-bitové architektuře (<http://www.file-extensions.org/pix-file-extension-pcidsk-pci-geomatics-database-file>).

V diplomové práci byla Geomatica využita pro řízenou klasifikaci smrkových porostů. Pro výpočet indexu listové plochy byl zvolen implementovaný model LAI.

#### **4.5.3 ArcGIS 10**

Systém ArcGIS patří mezi produkty společnosti ESRI a je tvořen řadou škálovatelných produktů určených pro použití geografických informačních systémů na mnoha úrovních. ArcGIS nabízí desktopové, serverové a vývojářské produkty, v poslední době se objevila také řešení pro mobilní zařízení a specializované nadstavby. ArcGIS for Desktop je dostupný ve třech úrovních, a to sice ArcView, ArcEditor a ArcInfo. Poslední z vyjmenovaných je nejpokročilejší a umožňuje mj. tvorbu nových databází a dat

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

a také obsahuje kompletní sadu nástrojů pro pokročilé analýzy dat. Každý desktopový produkt je tvořen aplikacemi ArcMap a ArcCatalog. Pro analýzu dat GIS je využíván soubor nástrojů obsažený v uživatelském rozhraní ArcToolbox (<http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/software/arcgis/arcgis-for-desktop/>). Pro účely této diplomové práce byla využita roční bezplatná studentská licence ArcInfo, poskytnutá Katedrou aplikované geoinformatiky a kartografie Přf UK.

V aplikaci ArcMap byl vytvořen digitální model terénu z vrstevnic pomocí nástroje Topo To Raster pro účely ortorektifikace optických družicových dat. V největší míře byl však v diplomové práci využit pro vizualizaci výstupů z ENVI 4.7 a následnou tvorbu map. ENVI verze 4.7 totiž neumožňuje vytvářet mapové výstupy či překrývat více snímků přes sebe.

#### **4.5.4 SPSS**

Statistický software SPSS byl použit pro analýzu dat defoliace a testování jejich normality.

### **4.6 Předzpracování dat**

Všechna použitá data již obsahovala radiometrické a geometrické korekce. Přesnost geometrických korekcí byla u snímků kontrolována pomocí polohopisných dat ZABAGED. Pro tento účel byly vybrány prvky v krajině, které jsou v čase trvalé, např. křižovatka komunikací, hráz vodní nádrže apod. U snímků z družic SPOT, Quickbird i WorldView-2 byly zjištěny značné posuny ve srovnání s prvky ZABAGED. U snímků SPOT s prostorovým rozlišením 10 m se většinou jednalo o posuny v rozmezí 100 až 300 m. Snímky Quickbird s prostorovým rozlišením 2,44 m byly posunuty zhruba v řádech desítek metrů, a to 30 až 60 m. Snímky WorldView-2 se od dat ZABAGED lišily nejméně, přesto se jednalo řádově o několik metrů při prostorovém rozlišení senzoru 1,8 m. Z důvodu uvedených nepřesností bylo nutné přikročit k ortorektifikaci snímků.

#### **4.6.1 Ortorektifikace**

Ortorektifikace je proces odstraňující geometrické zkreslení způsobené výškovou členitostí terénu. 3D svět je senzory zobrazen do dvourozměrného prostoru, ortorektifi-

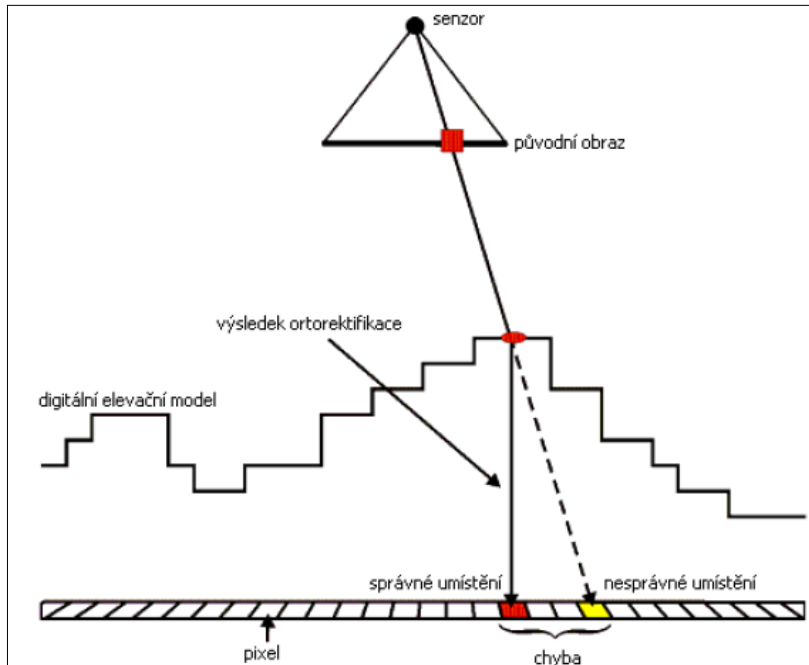
kace opraví mnoho chyb, které jsou touto konverzí způsobeny. Přesnost ortorektifikace závisí na kvalitě a přesnosti podkladů - přesnosti použitého digitálního modelu terénu a vlíčovacích bodů. Důležitá je samozřejmě také kvalita a robustnost algoritmu pro ortorektifikaci. Ortorektifikovaný obraz již může být použit jako zdroj dat importovaný do GIS (<http://glcf.umiacs.umd.edu/library/faq.shtml>). Podle Pavelky je cílem ortorektifikace odstranění chybného umístění pixelů vzniklého v důsledku výškové členitosti terénu. V podstatě se jedná o převod perspektivního promítání na ortogonální projekci, během něhož se zjistí a odstraní radiální posuny pixelů. Geometrické zkreslení způsobené tímto procesem se zvyšuje jednak se směrem od nadiru ke kraji skenovaného pásu a také v závislosti na převýšení a výškové členitosti terénu. Jestliže je snímán rovný terén, není třeba ortorektifikaci provádět, protože k žádnému geometrickému zkreslení vlivem nadmořské výšky nedojde (Pavelka, 2003).

Dalším faktorem je výška letu nosiče. Čím se pohybuje výše, tím je vliv nadmořské výšky reliéfu méně patrný. Ortorektifikace dat je nutná v případě dat vysokého rozlišení pořízených družicemi s nízkou hladinou letu. Při zpracování dat nízkého rozlišení (nebo malého měřítka) naopak ortorektifikace nemá význam. Jedná se např. o snímky pořízené geostacionárními družicemi, které obíhají na dráze ve výšce 35 800 km nebo i o snímky z družic pohybujících se na heliosynchronní polární dráze. Výšková členitost terénu při takové výšce letu ztrácí svůj vliv na topografickou přesnost snímku (Kormrska, 2004).

Pavelka uvádí, že u dat vysokého prostorového rozlišení vzniká při ortorektifikaci jiný problém. Algoritmus bere v úvahu údaje o výšce z digitálního modelu terénu, ale nebere v potaz výšku budov, věží, stromů a dalších vyčnívajících objektů. Ve snímcích se objevuje chyba, kdy střechy budov přesahují svůj půdorys, což je způsobeno perspektivní projekcí budov nacházejících se mimo nadir. Dále bývá problematické proměnné měřítko výše položených ploch. Výše položené objekty mají v obraze větší měřítko (menší měřítkové číslo) a naopak níže položené objekty se vyznačují menším měřítkem. Kromě výškové členitosti a výšky letu senzoru existuje řada dalších faktorů, které zapříčiňují geometrické zkreslení. Jedná se o zkreslení ovlivněná orientací nosiče (pozice, rychlost, směr pohybu), orientací a parametry senzoru (úhel stočení, okamžité zorné pole a časová konstanta, což je doba, za kterou detektor reaguje na záření) a převody referenčních ploch (mezi elipsoidem a geoidem, elipsoidem a rovinnou kartogra-

fickou projekcí). Tyto chyby patří mezi systematické a v algoritmech je s nimi počítáno (Pavelka, 2003).

Obr. 11: Princip ortorektifikace



Zdroj: Komrska, 2004.

V případě Krkonoš byla vzhledem k horskému terénu ortorektifikace potřebná. Provedena byla v software ENVI, její podstatou je racionální polynomičká funkce příp. lze výsledek ještě zpřesnit přidáním bodů GCP.

U snímků z družice WorldView-2 pro uspokojivý výsledek stačilo použít *racionálních polynomičkých funkcí*. Podstatou této metody ortorektifikace je aproximace orbitálního družicového modelu pomocí vícerozměrných polynomičkých funkcí. Koeficienty pro tyto funkce (RPC – Rational Polynomial Coefficients) jsou dodávány společně s družicovými daty. Výsledný model lze poté ještě zpřesnit použitím vlíčovacích bodů. Tento přístup je výhodný pro svou jednoduchost a nízký počet potřebných vlíčovacích bodů (v některých případech žádné body nejsou třeba). Nevýhodou je nižší přesnost modelu v členitém horském terénu a také jistá závislost na metadatech uvedených provozovatelem. Metoda racionálních funkcí byla představena s nástupem moderních družic s prostorovým rozlišením kolem jednoho metru. Lze ji použít i bez uvedených koeficientů, které lze dopočítat. Poté je však pro dobrý výsledek třeba většího počtu

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

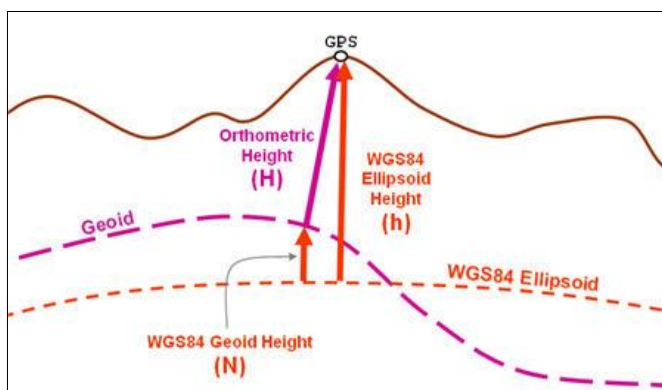
vlíčovacích bodů, přesnost výstupního modelu ovšem bývá zpravidla horší. Pokud jsou dostupné kvalitní podklady v podobě DMT a vlíčovacích bodů, lze dosáhnout polohové chyby řádově v hodnotách rozlišení vstupních dat

(<http://www.gisat.cz/content/cz/sluzby/zpracovani-dat/ortorektifikace>).

Ortorektifikace s RPC koeficienty je v software ENVI 4.7 podporována u družic ALOS/PRISM, CARTOSAT-1, FORMOSAT-2, GeoEye-1, IKONOS, KOMPSAT-2, OrbView-3, QuickBird, RapidEye, WorldView-1 a SPOT Level 1A a 1B. RPC koeficienty jsou u dat z QuickBird a WorldView-2 obsaženy v souboru s koncovkou \*.rpb. U družice SPOT není RPC soubor obsažen, ENVI umí vytvořit model RPC z geometrických parametrů obsažených ve standardních metadatech scény.

Vstupem pro základní ortorektifikaci s RPC v software ENVI je kromě daného snímku také digitální model terénu a hodnota geoid offset. Jedná se o konstantu, která přísluší každé hodnotě DMT jako rozdíl mezi referenčním elipsoidem a geoidem. V případě elipsoidu WGS 84 se tato hodnota uvádí jako zvlnění geoidu. Koeficienty RPC jsou navrženy podle výšky odvozené od geoidu, proto je hodnota geoid offset důležitá pro přesnost ortorektifikace. Jejím stanovením se zabývá mnoho institucí, např. USGS či NOAA (ENVI 4.7 Help). Hodnota geoid offset pro elipsoid WGS 84 pro oblast Krkonoš byla vyhledána na webové stránce National Geospatial-intelligence Agency, dostupné z <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>. Zde je k dispozici kalkulačka pro výpočet geoid offset na základě údajů o zeměpisné šířce a délce. Vypočtená hodnota pro oblast Krkonoš činí 43 m.

Obr. 12: Znárodnění zvlnění geoidu



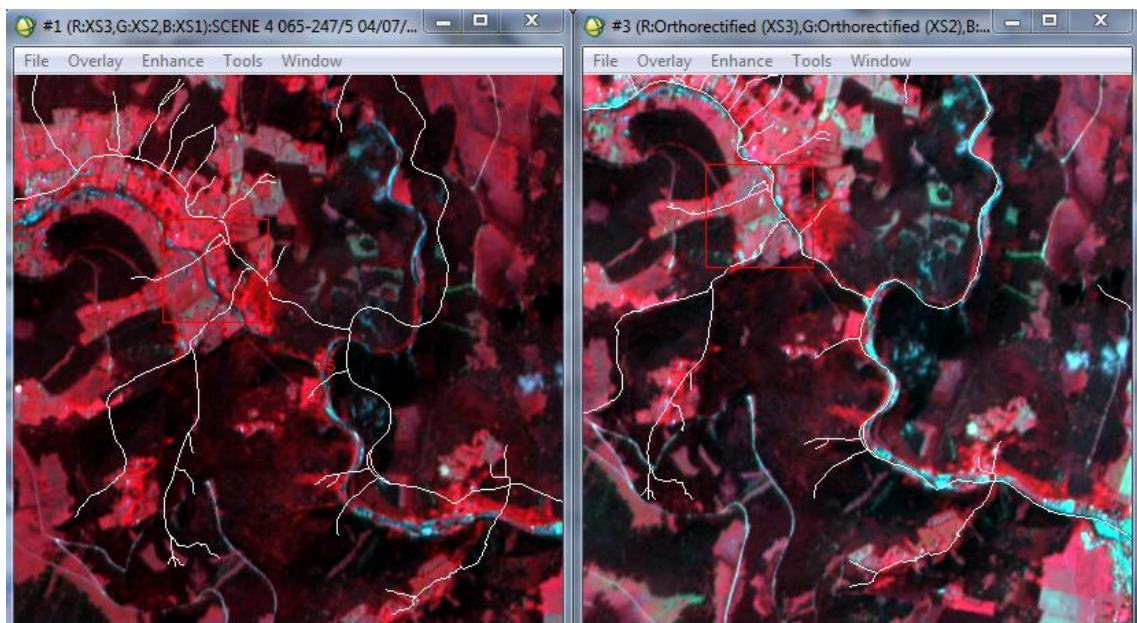
Zdroj: [http://www.geod.nrcan.gc.ca/faq\\_e.php](http://www.geod.nrcan.gc.ca/faq_e.php).

Platí vzorec:  $h = H + N$ ,

kde  $h$  je výška odvozená od elipsoidu,  $H$  je ortometrická výška (vztažená ke geoidu) a  $N$  je označováno jako geoid height či geoid offset (tedy rozdíl mezi hladinami geoidu a elipsoidu v daném bodě).

DMT byl pro účely této diplomové práce vytvořen v software ArcGIS, kde byl použit nástroj Topo To Raster. Tento nástroj interpolace umí DMT vyprodukovat z bodů, linií či polygonů. V případě DMT pro oblast KRNAP byl jako vstup zvolen shapefile vrstevnic s krokem 5 m poskytnutý Správou KRNAP. Pokud je vstupem pro Topo To Raster linie (contour), algoritmus nejdříve vygeneruje celkovou morfologii povrchu založenou na zakřivení linií. Poté jsou tyto linie implementovány jako zdroj informace o elevaci. Linie jsou jako vstup vhodné v případě většího množství dat. U menšího množství jsou výsledky méně věrohodné, problematické pak bývají zejména rohové oblasti (ArcGIS 10 Help).

Obr. 13: Výřez ze snímku SPOT ze dne 30. 7. 2004, před a po ortorektifikaci

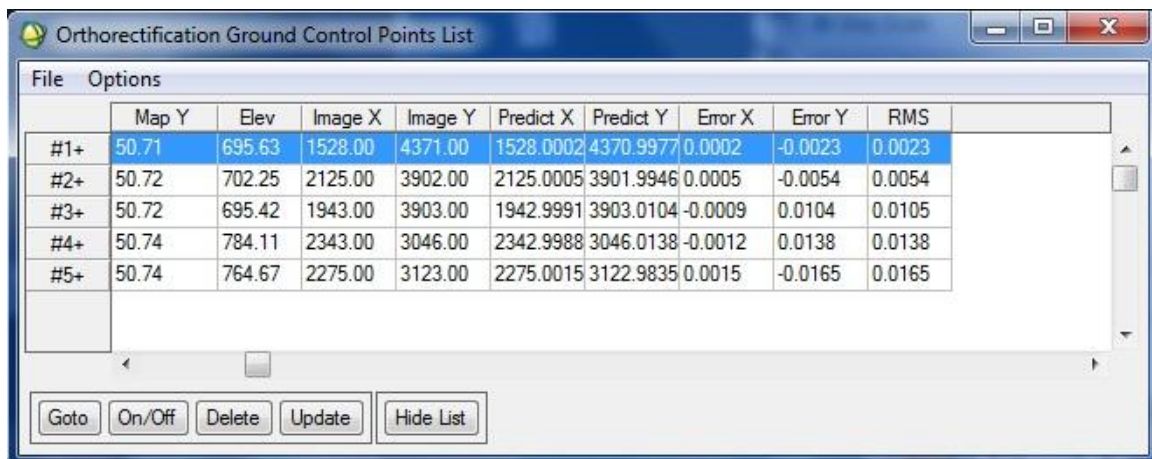


Zdroj: vlastní výstup, zobrazeno v ENVI.

U dalších dat bylo třeba provést ještě zpřesnění ortorektifikace přidáním několika bodů GCP. Většinou bylo přidáno pět až šest bodů, které byly na snímku pokud možno rozmístěny rovnoměrně a co nejdál od sebe. Pro ortorektifikaci snímku v ENVI s využitím GCP je třeba vložit souřadnice pixelu v obraze a k tomu odpovídající správné souřadni-

ce ve zvoleném souřadném systému (zeměpisná šířka, zeměpisná délka a nadmořská výška). Po vložení alespoň pěti bodů ENVI automaticky vypočítá chyby RMS (Root Mean Square, odmocnina průměru čtverců) pro každý GCP. Z těchto chyb je vypočítána celková RMS chyba. Snahou je chybu RMS co nejvíce minimalizovat. V některých případech bylo třeba některé body, které vykazovaly velkou hodnotu této chyby, smazat či se pokusit lépe určit příslušné pixelové souřadnice v obraze.

Obr. 14: Tabulka chyb RMS pro snímek z družice QuickBird ze dne 9. 9. 2005



	Map Y	Elev	Image X	Image Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#1+	50.71	695.63	1528.00	4371.00	1528.0002	4370.9977	0.0002	-0.0023	0.0023
#2+	50.72	702.25	2125.00	3902.00	2125.0005	3901.9946	0.0005	-0.0054	0.0054
#3+	50.72	695.42	1943.00	3903.00	1942.9991	3903.0104	-0.0009	0.0104	0.0105
#4+	50.74	784.11	2343.00	3046.00	2342.9988	3046.0138	-0.0012	0.0138	0.0138
#5+	50.74	764.67	2275.00	3123.00	2275.0015	3122.9835	0.0015	-0.0165	0.0165

Zdroj: vlastní výstup, ENVI.

Dále následují kroky pro výpočet racionální polynomické funkce, tedy vložení DMT a hodnoty Geoid Offset. V nastavení parametrů ortorektifikace lze ještě zadat metody převzorkování obrazu a DMT (Image Resampling a DEM Resampling). Pro účely diplomové práce bylo zvoleno základní nastavení, u obou parametrů byla ponechána metoda bilineární interpolace, která interpolovanou hodnotu vypočítává ze čtyř nejbližších sousedních bodů. Dále lze v nastavení ještě zvolit projekci a velikost pixelu výstupního souboru. Ortorektifikovaný snímek byl poté porovnán s původní scénou, snímky byly přeloženy vektorovými daty ze ZABAGED. Pro základní porovnání posunu, ke kterému došlo po ortorektifikaci, byla použita vrstva vodních toků. U dat z družice SPOT bylo po aplikaci ortorektifikace s body GCP dosaženo zpřesnění z řádově stovek metrů na desítky metrů. U většiny poskytnutých snímků SPOT byl naměřen posun okolo 100 až 300 m. Po ortorektifikaci byl posun zmenšen na dva až tři pixely při prostorovém rozlišení 10 m (mimo snímek z 26. 9. 1999 s rozlišením 20 m). Porovnání s polohopisem ZABAGED bylo možné pouze v omezené ploše snímků

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

vzhledem ke skutečnosti, že Český ústav zeměměřický a katastrální poskytuje pro účely studentských prací maximálně pouze deset listů Základní mapy ČR 1 : 10 000.

Ortorektifikace snímků QuickBird se ukázala jako nejvíce problémová. Polohová přesnost snímků úrovně 2A by se měla pohybovat do 23 m, avšak na území Krkonoš byly nalezeny i větší odchylky (ve srovnání s polohopisem ZABAGED). Po aplikaci ortorektifikace s RPC v ENVI nedošlo k žádnému viditelnému posunu pixelů. Dále bylo přikročeno k ortorektifikaci pomocí GCP bodů. Výsledný snímek ovšem neměl očekávanou přesnost vzhledem k prvkům ZABAGED. Pro porovnání geometrické přesnosti byla v případě snímků QuickBird použita vrstva budov. Vrstva vodních toků se v tomto případě jevila příliš generalizovaně a bylo většinou těžké číselně posoudit rozdíl mezi vodním tokem na snímku a tokem ze ZABAGED. V blízkosti polohy bodů GCP je přesnost vždy větší než ve vzdálenějších místech. Celkově lze konstatovat, že se odchylka zmenšila z řádově desítek pixelů na jednotky pixelů. Výsledek ortorektifikace byl diskutován s poskytovateli dat Digital Globe a Planet Action. Ačkoliv je každý snímek QuickBird dodáván společně s koeficienty racionální polynomické funkce, právě poskytnuté snímky úrovně 2A jsou pro velmi přesné úlohy nejméně vhodné (Volpe, ?).

#### **4.6.2 Atmosférická korekce**

V ENVI je obsažen modul pro atmosférické korekce ve dvou formách. Jedná se o metody QUAC (QUick Atmospheric Correction) a FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Tyto dva nástroje byly vyvinuty Spectral Sciences, Inc., pod záštitou U.S. Air Force Research Laboratory (Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide 2009). V rámci této diplomové práce byla vybrána metoda QUAC. Jedná se o metodu pro atmosférickou korekci a vyhledávání aerosolových optických vlastností pro viditelné až krátkovlnné infračervené délky. QUAC byl vytvořen pro korekce multispektrálních a hyperspektrálních dat. Umí vyhledat optickou hloubku aerosolu (aerosol depth), mlhy či pohlcovačů molekul na základě vlnové délky. Určuje vliv atmosférických jevů přímo z informací obsažených v dané scéně pomocí pozorování spektrálního chování v pixelech.

Tento přístup je založen na empirickém zjištění, že průměrná reflektance skupiny různých materiálů se v podstatě nemění a je tak nezávislá na scéně. QUAC poskytuje uspokojivě přesnou hodnotu reflektance, i když na čidlu není správně provedena radio-



Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

metrická kalibrace či kalibrace vlnové délky nebo pokud není známa intenzita solárního osvětlení (např. kvůli oblačnosti). Určení hloubky aerosolu nevyžaduje na rozdíl od jiných přístupů přítomnost tmavého pixelu. QUAC poskytuje méně přesné výsledky ve srovnání s FLAASH či jinými modely založenými na fyzikálním základě.

QUAC provádí rychlé a v zásadě přesné atmosférické korekce, jestliže jsou splněny následující podmínky:

- scéna obsahuje minimálně 10 různých materiálů,
- k dispozici musí být dostatečně tmavé pixely, aby bylo možné dobře odhadnout základní spektrum.

QUAC podporuje následující senzory: AISA, ASAS, AVIRIS, CAP, ARCHER, COMPASS, HYCAS, HYDICE, HyMap, Hyperion, IKONOS, Landsat TM, LASH, MASTER, MODIS, MTI, QuickBird, RGB a další typy snímačů. QUAC vytváří obraz získaných povrchových odrazivostí, zmenšen na dvou bytové integery. Hodnoty reflektance jsou násobeny 10 000 (reflexní měřítko).

Po provedení QUAC prošly snímky kontrolou reflektance u náhodně vybraných pixelů. Pozornost byla věnována pixelům vodních ploch a těm, které jsou tvořeny smrkovými porosty. Pro zhodnocení správnosti atmosférické korekce byly sledovány spektrální křivky. Pixely vodních ploch byly pro kontrolu správnosti korekce vybrány pro jednoduchý průběh spektrální křivky vody. U smrkových porostů se věnovala pozornost, aby se křivka svým průběhem blížila spektrální křivce jehličnatého lesa uváděného v literatuře (např. Lillesand a Kiefer, 2000).

Tab. 10: Srovnání hodnot radiance (DN) a reflektance pixelu vodní plochy (SPOT 2004)

vlnová délka [nm]	radiance - DN	reflektance * 10 000	reflektance [%]
550	54	1065	10,65
655	39	817	8,17
830	11	520	5,20
1635	21	384	3,84

Zdroj: vlastní výstup.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

Tab. 11: Srovnání hodnot radiance (DN) a reflektance pixelu vodní nádrže Labská (SPOT 2004)

vlnová délka [nm]	radiance - DN	reflektance * 10 000	reflektance [%]
550	35	185	18,5
655	22	86	8,60
830	7	312	3,12
1635	14	216	2,16

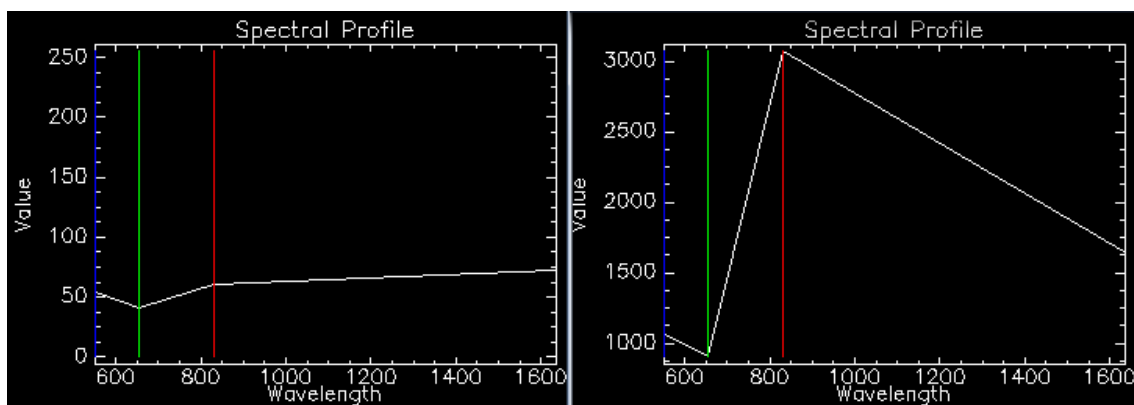
Zdroj: vlastní výstup.

Tab. 12: Srovnání hodnot radiance (DN) a reflektance pixelu smrkového porostu (SPOT 2004)

vlnová délka [nm]	radiance - DN	reflektance * 10 000	reflektance [%]
550	54	1065	10,65
655	41	904	9,04
830	60	3069	30,69
1635	74	1654	16,54

Zdroj: vlastní výstup.

Obr. 15: Spektrální křivka pro pixel smrkového porostu – před a po korekci QUAC (data po korekci jsou násobena 10 000)



Zdroj: vlastní výstup.

#### 4.7 Klasifikace smrkových porostů

Automatická klasifikace obrazových dat DPZ nabízí řadu metod a přístupů digitálního vyhodnocení snímků. Obecně se jedná o metody klasifikace tzv. „per-pixel“ či objektivě orientovaný přístup. Pro klasifikaci smrkových porostů na družicových sním-

cích byla vybrána metoda řízené klasifikace v software Geomatica. Byl zvolen klasifikační algoritmus maximální věrohodnosti (Maximum Likelihood).

Každý snímek (každý typ dat v každém roce) byl klasifikován zvlášť. Pro každý se tedy vytvořila maska smrkového lesa. Cílem bylo ze snímku klasifikovat pouze smrkový porost, proto byla v programu Geomatica zvolena metoda řízené klasifikace Maximum Likelihood with NULL class. Vznikla tak maska, kde neklasifikované pixely mají nulovou hodnotu (No Data). Vybrat pixely pro trénovací plochy bylo obtížné, protože u pixelů s obsahem vegetace lze špatně odlišit, o jaký druh se jedná. Trénovací plochy byly upraveny i podle dalších zdrojů, např. CORINE Landcover či rozsahu smrkových porostů poskytnutý KRNAP. Přesnost klasifikace smrkových porostů byla poté hodnocena v software Geomatica pomocí nástroje Accuracy Assessment. Pro účely diplomové práce bylo pro toto zhodnocení zvoleno vygenerování padesáti náhodně vybraných pixelů. Pro kontrolu dosažených výsledků byl použit shapefile lesních vegetačních typů s obsahem smrku (LVS 6, 7 a 8 z lesního hospodářského plánu) a také shapefile výhradně smrkového porostu (obě vrstvy poskytl KRNAP).

## 4.8 Vegetační indexy

Pro účely této diplomové práce byly využity níže uvedené indexy. Výsledné indexy byly zaneseny do map, dále byly pro každý z nich vytvořeny relativní třídy. Poté bylo provedeno porovnání jejich výsledků a nakonec vyhodnocena jejich využitelnost.

### 4.8.1 Normalizovaný rozdílový vegetační index

Index NDVI se vypočítá podle vzorce:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

kde NIR je odrazivost v blízké infračervené části spektra a RED značí odrazivost v červené viditelné části spektra. Hodnota NDVI byla určena pomocí nástroje pro jeho výpočet v ENVI.

#### 4.8.2 Simple ratio

Index simple ratio se vypočte podle vzorce:

$$SR = \frac{NIR}{RED},$$

kde NIR značí odrazivost v blízké infračervené části spektra a RED je odrazivost v červené viditelné části spektra. Tento poměr pásem byl vypočítán v software ENVI pomocí nástroje Band Ratios.

#### 4.8.3 Index listové plochy

Pro účely této diplomové práce byl pro výpočet tohoto indexu využit algoritmus funkce LAI: Calculate Leaf Area Index Model, který je definovaný v programu Geomatica v knihovně algoritmů (Algorithm Librarian). Jako vstup jsou požadována atmosféricky korigovaná pásma z červené a blízké infračervené části spektra. Snímek z družice WorldView-2 obsahuje dvě pásma v blízké infračervené části, jedná se o pásma 4 a 8. Pro výpočet LAI bylo vybráno pásmo 4. Tento kanál má rozsah vlnové délky od 770 do 895 nm, takže zde je postižena oblast červeného okraje.

#### 4.8.4 Green Red Vegetation Index

GRVI se spočítá podle vzorce:

$$GRVI = \frac{GREEN-RED}{GREEN+RED},$$

kde GREEN označuje odrazivost ve viditelné zelené části spektra a RED odrazivost ve viditelné červené části spektra (Motohka, Nasahara, Oguma, Tsuchida, 2010). Hodnoty GRVI byly vypočteny pomocí nástroje Band Math v ENVI, který umožňuje matematické operace s pásmy.

#### 4.8.5 Red Green Index

Index RGI se spočítá jako

$$RGI = \frac{RED}{GREEN},$$

kde RED značí odrazivost v červené viditelné části spektra a GREEN v zelené viditelné části spektra (Coops, Johnson, 2006). Tento poměr pásem byl vypočítán v software ENVI pomocí nástroje Band Ratios.

#### 4.8.6 Foliar Moisture Index

Index FMI vypočtený podle vztahu:

$$FMI = \frac{NIR}{RED-SWIR},$$

kde NIR značí odrazivost v blízké infračervené oblasti spektra, RED odrazivost v červené viditelné části spektra a SWIR označuje odrazivost v krátkovlnném infračerveném pásmu (Wang et al., 2010). Hodnoty FMI byly stejně jako hodnoty GRVI určeny pomocí nástroje Band Math v ENVI.

#### 4.8.7 Wide-band Normalized Difference Infrared Index

Index wNDII je zaměřený na postižení vlhkosti u vegetace. Vypočte se podle vzorce:

$$wNDII = \frac{2 * NIR - SWIR}{2 * NIR + SWIR},$$

kde NIR značí odrazivost v blízké infračervené oblasti spektra, RED odrazivost v červené viditelné části spektra a SWIR označuje odrazivost v krátkovlnném infračerveném pásmu (Wang et al., 2010). Hodnoty wNDII byly stejně jako hodnoty FMI vypočítány pomocí nástroje Band Math v ENVI.

#### 4.8.8 Red Edge Inflection Point

Pomocí polohy REIP lze odhadnout množství chlorofylu v listech. Spočítá se pomocí vzorce (Guoyot a Baret, 1988):

$$REIP_{linear} = 700 + 40 * \left[ \frac{((R_{670} - R_{780})/2) - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} \right],$$

kde R znamená odrazivost a číselná hodnota danou vlnovou délkou.

#### 4.9 Porovnání s pozemními daty

Hodnoty vegetačních indexů byly porovnány s daty poskytnutými VÚLHM Opočno. Nejdříve bylo nutné zjistit průměrné hodnoty indexů v pixelech, které byly překryty polygony výzkumných ploch. V případě indexů vypočtených ze snímků SPOT byly průměry spočteny ručně, protože jedna výzkumná plocha zabírá pouze malou plochu, přibližně o pěti pixelech. U vegetačních indexů spočítaných ze snímků QuickBird s rozlišením 2,44 m už výzkumné plochy zabírají desítky pixelů. Pro výpočet průměru hodnot indexu bylo proto využito nástroje pro definování oblasti zájmu ROI (Region of Interest). Oblast ROI byla vytyčena v místě, kde by se TVP měla nacházet. V případě QuickBird, kde nebylo dosaženo dobré polohové přesnosti při ortorektifikaci, byla poloha TVP upravena podle ortofota dostupného přes službu ArcGIS Server na geportal.gov.cz. V místě TVP byla v ENVI vytvořena oblast ROI, která posloužila pro výpočet průměru z obsažených pixelů.

Obr. 16: Porovnání polohy TVP 24 na snímku QuickBird z roku 2010 a na aktuálním ortofotu



Zdroj: vlastní výstup, zobrazeno v ENVI a ArcMap.

Po vypočtení hodnot uvedených vegetačních indexů představoval cíl jejich porovnání s hodnotami defoliace na výzkumných plochách. Aby toto porovnání bylo možné, bylo třeba spočítat průměry defoliace i hodnot indexů na TVP a na plochách ICP Forests. Do průměru nebyly zahrnuty stromy, kde byl zaznamenán vývrat či těžba. Pro porovnání těchto průměrů bylo cílem použít Pearsonův koeficient korelace  $r$ , který měří lineární závislost mezi dvěma veličinami. Nabývá hodnot od -1 do 1 (značí zápor-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

ný či kladný lineární vztah), hodnota 0 znamená neexistenci lineárního vztahu. Aplikace tohoto koeficientu je podmíněna normalitou vstupních dat

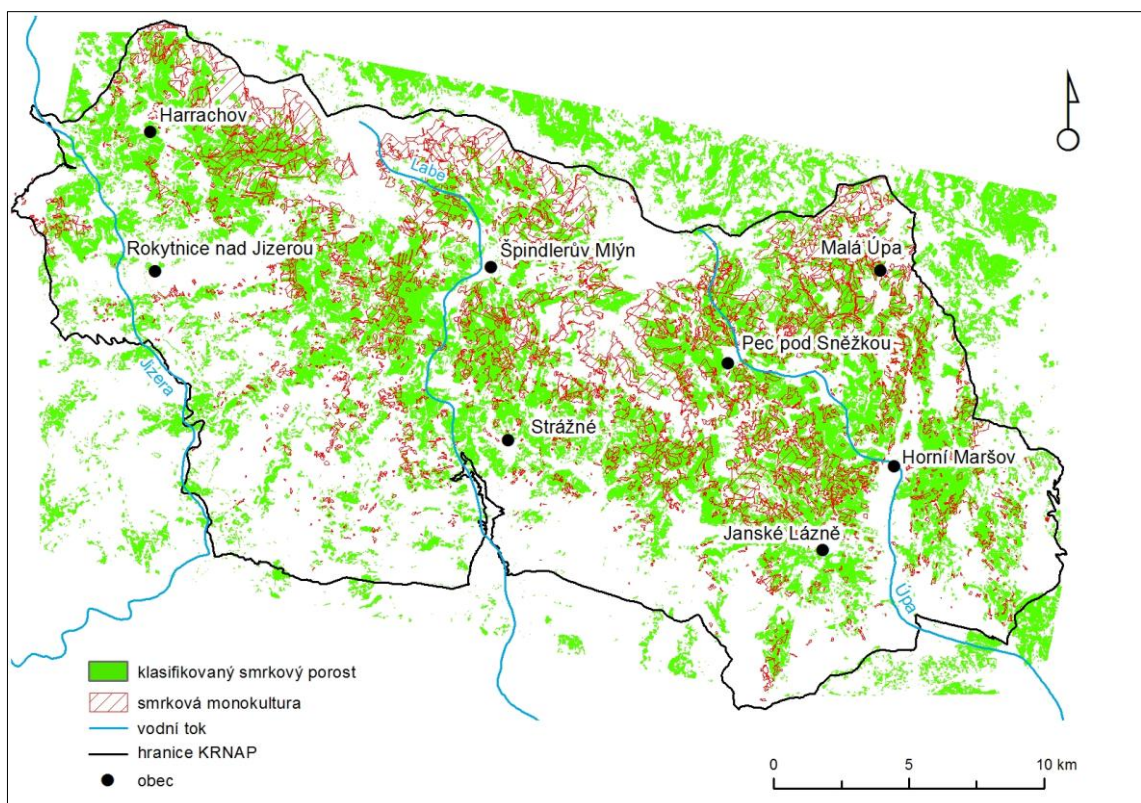
(<http://office.microsoft.com/cs-cz/excel-help/nastroje-statisticke-analyzy-HP005203873.aspx>).

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Výsledky řízené klasifikace

Celková přesnost klasifikace snímků dosáhla hodnoty Overall Accuracy mezi 60 – 70 %. Kappa index vycházel spíše nižší, ve většině případů kolem 40 %. Klasifikace smrkového porostu zvolenou metodou se ukázala jako značně obtížná. Pixely s různým typem vegetace lze od sebe často špatně odlišit. Snahou bylo získat konzistentní výsledek pro všechny hodnocené snímky. Řízenou klasifikací se nepodařilo vyklasifikovat čistě smrkové porosty. Rozsah výsledných vytvořených masek se spíše blíží lokalizaci lesních vegetačních stupňů, kde je smrk zastoupen buď v monokultuře či ve směsi s jinými druhy stromů.

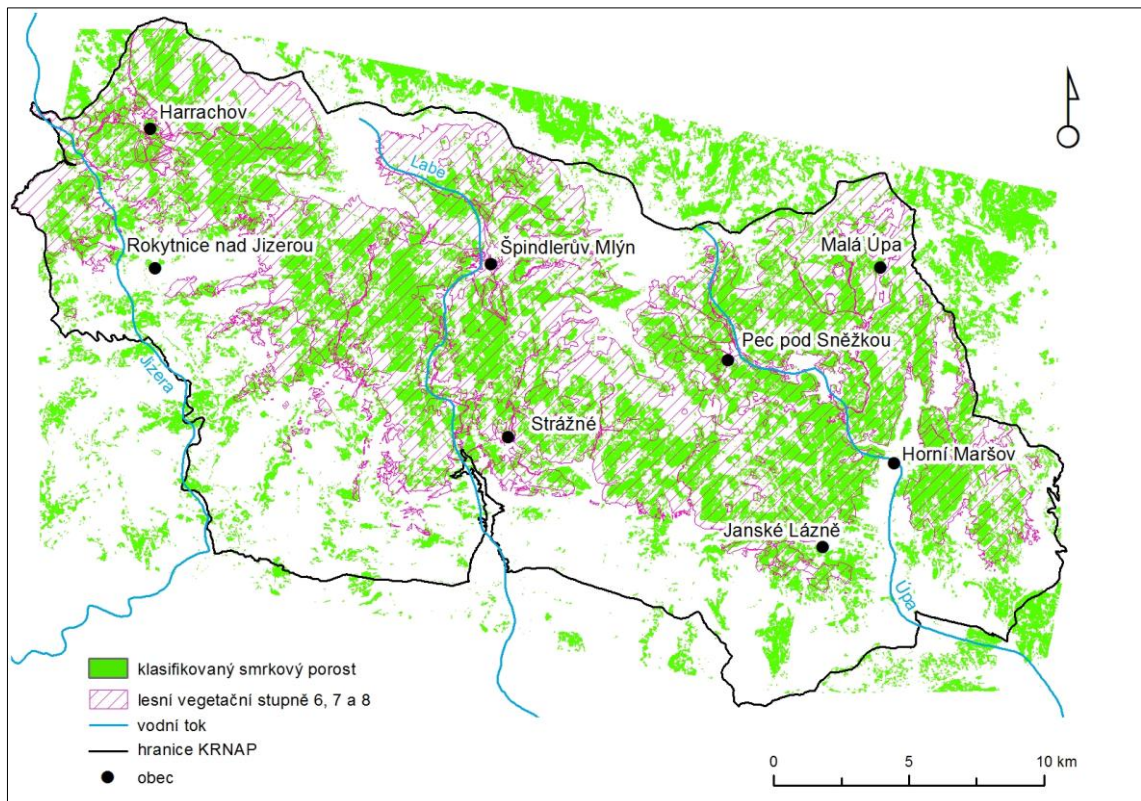
Obr. 17: Rozdíl mezi smrkovými monokulturami a klasifikovanými porosty (SPOT 2004)



Zdroj: vlastní výstup, KRNAP, upraveno.



Obr. 18: Rozdíl mezi LVS s obsahem smrku a klasifikovanými porosty (SPOT 2004)



Zdroj: vlastní výstup, KRNAP, upraveno.

## 5.2 Výsledky vegetačních indexů

### 5.2.1 NDVI

Normalizovaný rozdílový vegetační index je založen na podílu rozdílu a součtu odrazivosti v blízké infračervené a červené části spektra. Hodnoty NDVI se pohybují v intervalu od -1 do 1. S rostoucí hodnotou by se měla kondice vegetace zlepšovat a současně by se měla zvyšovat její hustota.

Hodnoty NDVI byly rozděleny do čtyř intervalů (zdravý porost 0,71 - 1, mírně až středně poškozený porost 0,51 - 0,7, silně poškozený porost 0,31 - 0,5 a velmi silně poškozený porost - pod 0,3. U velmi nízkých hodnot NDVI je kromě špatné kondice možné, že tyto pixely ve skutečnosti nebyly jako les správně klasifikovány.

#### *Landsat*

Index NDVI v roce 1984 dosahuje na téměř celém sledovaném území hodnoty mezi 0,31 a 0,5, což indikuje velice špatnou kondici klasifikovaných smrkových porostů.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

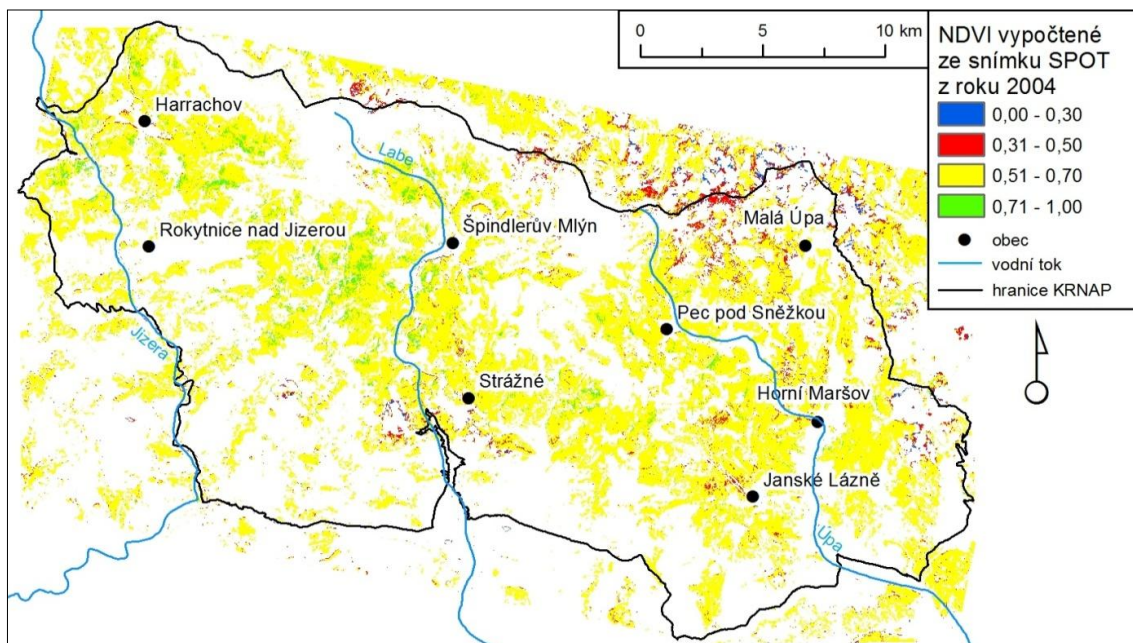
tů. V roce 1993 jsou vypočtené hodnoty vyšší, většina z nich se pohybuje v intervalu 0,51 a 0,7, pouze nejvíce postižené oblasti mají NDVI nižší. Rok 2011 by měl podle četných hodnot NDVI nad 0,71 ukazovat velmi dobrý zdravotní stav porostů.

### SPOT

První snímek z družice SPOT pochází z roku 1999. NDVI zde nabylo nejčastěji hodnot mezi 0,31 až 0,5. To odkazuje na podobně nízké hodnoty NDVI ze snímku Landsat z roku 1984. Jen několik oblastí vykazovalo lepší stav. Dva následující snímky ukazují zlepšující se trend. V roce 2004 se většina hodnot pohybuje v intervalu mezi 0,51 a 0,7 (viz obr. 19), zatímco v roce 2006 větší část hodnot přesahuje 0,71. V roce 2007 je NDVI opět velmi nízké. Vyskytují se zde rozsáhlé shluky pixelů s NDVI mezi 0,31 a 0,5 a dokonce i s hodnotami nižšími.

U každého z hodnocených indexů byla zařazena pro ilustraci mapa ukazující rozložení relativních tříd v zájmovém území. Pro tento účel byl vybrán snímek z družice SPOT z roku 2004.

Obr. 19: NDVI v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

Při porovnání rozložení tříd NDVI a tříd podle Stoklasy lze říci, že nejvíce se shodují snímky Landsat z let 1993 a 2011 a snímky SPOT z let 2004 a 2006. Problema-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

tické porovnání se vyskytlo zejména v roce 1984 (Landsat) a 1999 (SPOT). V obou letech jsou hodnoty NDVI na celém klasifikovaném území velice nízké, a jsou proto označeny jako porosty se silným poškozením. V roce 1999 jsou hodnoty NDVI více diferenciované, oproti Stoklasově mapě je zde patrný posun tříd o jednu úroveň směrem k horšímu zdravotnímu stavu.

### 5.2.2 Simple ratio

Vegetační index simple ratio je postaven na jednoduchém podílu pásem v blízké infračervené a červené části spektra. Vypočítané hodnoty SR se pohybují od 0 do 8,5 (rozdělení tříd viz obr. 20) Opět by měla platit přímá úměrnost, kdy se zvyšující se hodnotou tohoto indexu se zlepšuje kondice smrkových porostů.

#### *Landsat*

V roce 1984 SR ukazuje hodnoty menší než 2,6. Tyto celoplošně velice nízké hodnoty indikují silné poškození smrkových porostů. V rastru SR z roku 1993 lze spatřit velkou diverzifikaci hodnot indexu od velice nízkých v nejpostiženějších částech po vysoké v oblastech s dobrou kondicí. SR v roce 2011 vykazuje hodnoty podobné roku 1984 z intervalu 0 až 2,6, což ukazuje horší kondici porostů.

#### *SPOT*

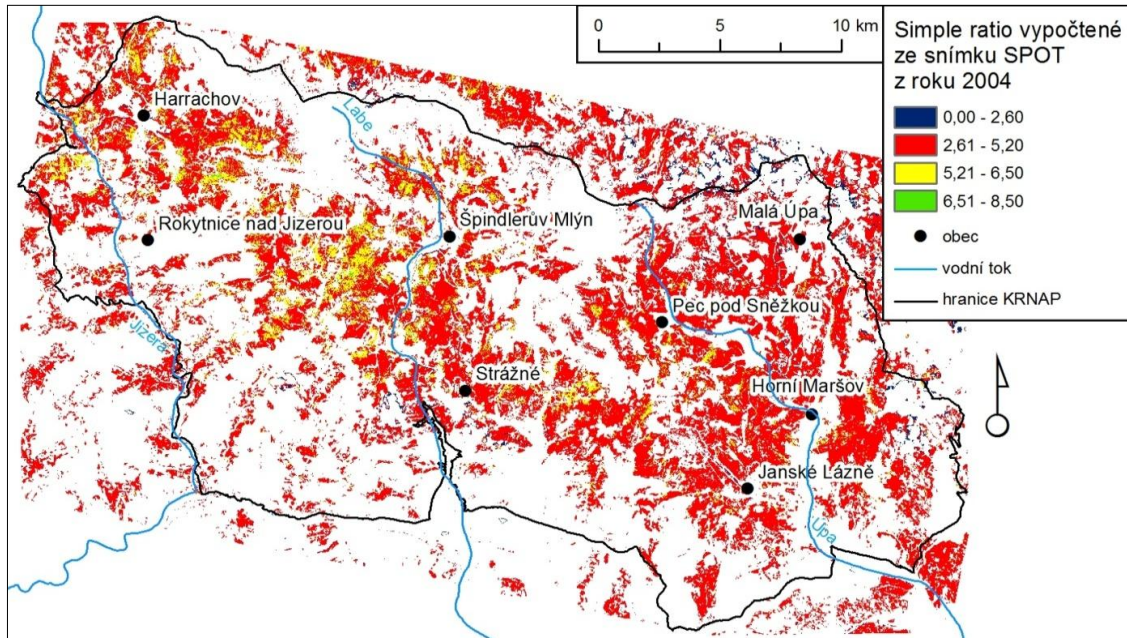
V roce 1999 jsou hodnoty indexu velice nízké, pouze málo ploch vykazuje hodnotu SR vyšší než 2,6. Tento stav by se dal přirovnat k SR v roce 1984 (Landsat). Dále byla hodnocena situace v roce 2004. Je charakterizována poměrně nízkými hodnotami, lze však vidět zvýšení hodnot oproti minulému sledovanému časovému období. SR z roku 2006 opět ukazuje výrazné zlepšení kondice smrkových porostů. Velká část plochy přesáhla hodnotu 6, zdravotní stav vypadá na jednotlivých částech KRNAP rozdílně. Simple ratio z roku 2007 dosahuje hodnot od 0 do 2,6. To ukazuje spíše horší kondici porostů (viz příloha 9).

Největší shoda se Stoklasovou mapou byla u tohoto vegetačního indexu prokázána v roce 2006, kdy byl SR vypočten na základě snímku SPOT. V tomto roce stanované čtyři třídy dobře odpovídají třídám v mapě defoliace a mortality jehličnatých porostů. Dále byla kondice lesa podobným způsobem ohodnocena také ze snímku Landsat v roce

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

1993 (jako na mapě defoliace a mortality jehličnatých porostů v roce 1994). Podle výsledků SR by ovšem mělo být více ploch označených jako silně poškozené.

Obr. 20: SR v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

### 5.2.3 Index listové plochy

Tento vegetační index odráží podíl listové plochy na jeden pixel. Vypočítané hodnoty na klasifikované ploše smrkových porostů se pohybují v intervalu od 27 do 6957 (rozdělení tříd viz obr. 21).

#### *Landsat*

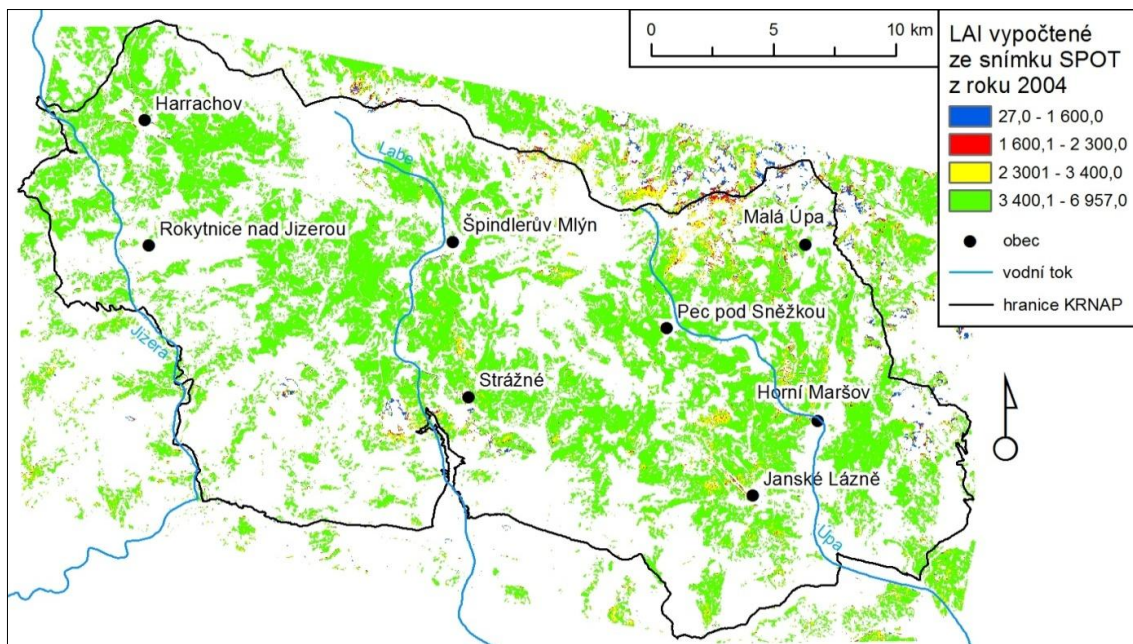
LAI v roce 1984 vykazuje velice nízké hodnoty, což potvrzuje špatný zdravotní stav porostů. V roce 1993 je zaznamenán obrovský nárůst hodnot oproti předchozímu sledovanému období. Většina klasifikované plochy disponuje hodnotami LAI nad 3400. Pouze menší plochy v problémových oblastech mají nižší hodnoty pod 1000. Rok 2011 disponuje velice vysokými hodnotami LAI na celé klasifikované ploše. Zdravotní stav smrkových porostů dle tohoto vypadá jako velmi dobrý.

### SPOT

Období roku 1999 jeví známky horší situace, většina ploch je pokryta nízkými hodnotami indexu listové plochy v rozmezí 1000 až 3000. V letech 2004 (viz. obr 21) a 2006 je index na klasifikovaných porostech velice vysoký, většina ploch byla zařazena do intervalu s nejvyššími hodnotami. Hodnoty LAI v roce 2007 ukazují opětovné snížení kondice.

U většiny snímků se podle rozdělení tříd LAI jeví zdravotní stav lepší než podle Stoklasy, plochy jsou mnohem méně diferenciované. Pouze u snímků SPOT z let 1999 a 2007 se zdravotní stav lesa na rozdíl od mapy defoliace a mortality jehličnatých porostů jeví horší. Podle čtyř zvolených intervalů se na žádném ze snímků nepodařilo rozlišit porosty se středním poškozením. Tyto plochy byly zahrnuty do třídy s nejvyššími hodnotami LAI, na většině snímku tak vznikly kompaktní zelené plochy.

Obr. 21: LAI v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

#### 5.2.4 Green red vegetation index

Index GRVI má kolem hodnoty nula indikovat fázi opadu listů a jehlic. Proto byl u tohoto indexu sledován výskyt pixelů s těmito hodnotami a následně porovnán s tří-

dami defoliace podle Stoklasy. Na většině klasifikované lesní plochy jsou hodnoty blízké nule velice nesouvislé a spíše rovnoměrně rozložené.

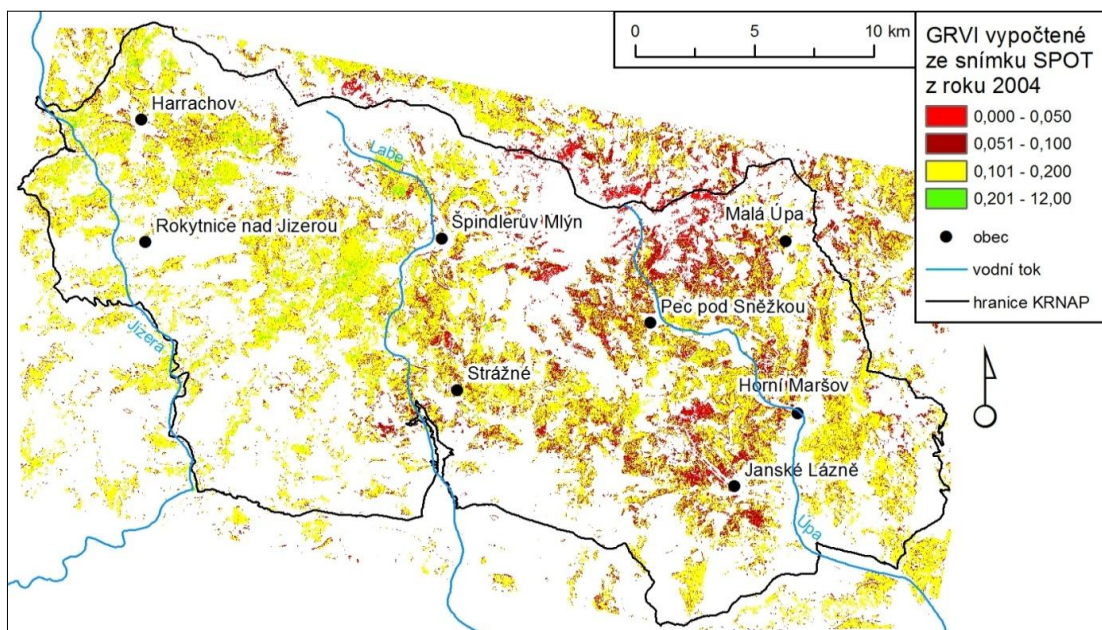
### *Landsat*

Z GRVI z roku 1984 je patrné, že téměř všechny klasifikované plochy dosáhly pouze na dva nejnižší intervaly v rozmezí od 0 do 0,1. Tento stav ukazuje na velice špatnou kondici smrkových porostů projevující se opadem jehlic. V následujícím sledované období roku 1993 lze vidět zlepšení stavu, pixely s hodnotou nula nevytvářejí souvislé plochy. V roce 2011 jsou hodnoty kolem nuly rozmístěny rovnoměrně. Vedle nich se na klasifikovaných plochách vyskytují také pixely s nejvyššími hodnotami přes 0,2.

### *SPOT*

Situace v roce 1999 vypadá kladně, téměř žádné plochy neobsahují pixely s nulovými hodnotami GRVI. Rastr hodnot indexu z roku 2004 ukazuje vyšší koncentraci pixelů kolem nuly ve východní polovině KRNAP (viz obr. 22). Snímky z let 2006 a 2007 vykazují podobné hodnoty indexu, nulových hodnot není mnoho a jsou pravidelně rozmístěny po celé klasifikované ploše.

Obr. 22: GRVI v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

Hodnotám kolem nuly nelze jednoznačně přiřadit některý z intervalů definovaných Stoklasou. U žádného z vybraných časových období nebyla nalezena větší shoda mezi stanovenými třídami GRVI a defoliace.

### 5.2.5 Red green index

Tento index, jak už je z názvu patrné, je vyjádřen jako poměr červené a zelené části spektra. Hodnoty RGI se na klasifikovaných plochách pohybují od 0 do 6,5 (rozdělení tříd viz obr. 23). Pro index RGI platí, že čím jsou jeho hodnoty vyšší, tím je zdravotní stav porostu horší. Projevem zhoršení kondice je úbytek podílu chlorofylu v zelených částí srostlin.

#### *Landsat*

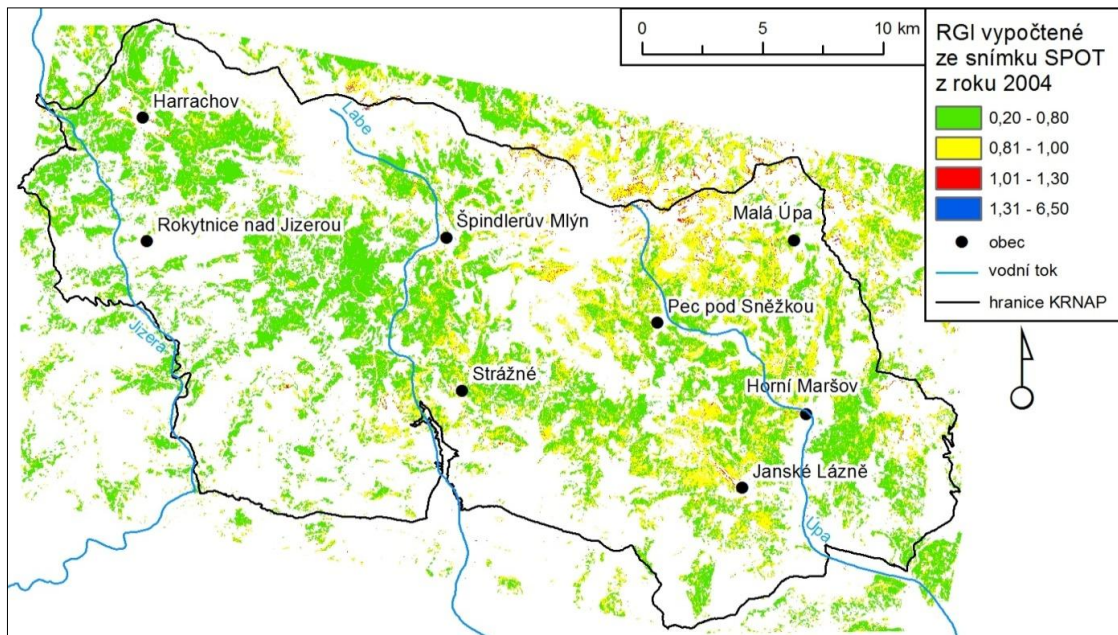
V roce 1984 byly hodnoty RGI na klasifikovaných plochách větší než jedna. Znamená to nejhorší stav ze všech sledovaných období. V roce 1993 ukazuje RGI zlepšení kondice smrkových porostů, jeho hodnoty jsou více diferenciované. Přesto i zde se ještě v hojné míře vyskytují hodnoty RGI nad 1. V roce 2011 se situace jeví kladně, objevují se pouze menší shluky vyšších hodnot indikující lokální zhoršení stavu.

#### *SPOT*

Red green index z roku 1999 dosahuje nižších hodnot, což by mělo znamenat zlepšení zdravotního stavu porostů. Většina ploch vykazuje RGI pod 0,8. Podobná situace je popsána také v roce 2004 (viz obr. 23). Zde se opět vyskytují spíše nižší hodnoty, opět se objevil značný rozdíl mezi západní a východní (horší stav) polovinou KRNAP. Hodnoty RGI z roku 2006 ukazují zvýšení hodnot v problémových částech národního parku. Lze rozlišit nárůst hodnot směrem ke státní hranici. V roce 2007 byly zaznamenány spíše nižší hodnoty (žádné nepřesáhly 1), což ukazuje na příznivý zdravotní stav.

Nejlépe ze všech období se Stoklasovou mapou defoliace a mortality jehličnatých porostů souhlasí RGI z roku 1993 a 2011, na obou těchto rastrech je však výsledek značně zrnitý.

Obr. 23: RGI v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

### 5.2.6 Wide-band Normalized Difference Infrared Index

Index wNDII je založen na odrazivosti v blízké a krátkovlnné infračervené části spektra. Vztah pro výpočet wNDII by měl zachytit vlhkostní poměry v zelených částech rostlin. Jeho hodnoty se na klasifikovaném území pohybují od 0 do 0,85 (rozdělení tříd viz obr. 24).

#### *Landsat*

Index wNDII z roku 1984 ukazuje velice nízké hodnoty, většina ploch spadá do intervalu 0,15 až 0,45. V roce 1993 lze rozpoznat zlepšení vlhkostních poměrů, hodnoty na klasifikovaných smrkových plochách se převážně pohybují od 0,45 do 0,6. Vlhkostní poměry v roce 2011 opět ukazují dobrý stav, velká část klasifikované plochy smrkových porostů ukazuje wNDII nad 0,6.

#### *SPOT*

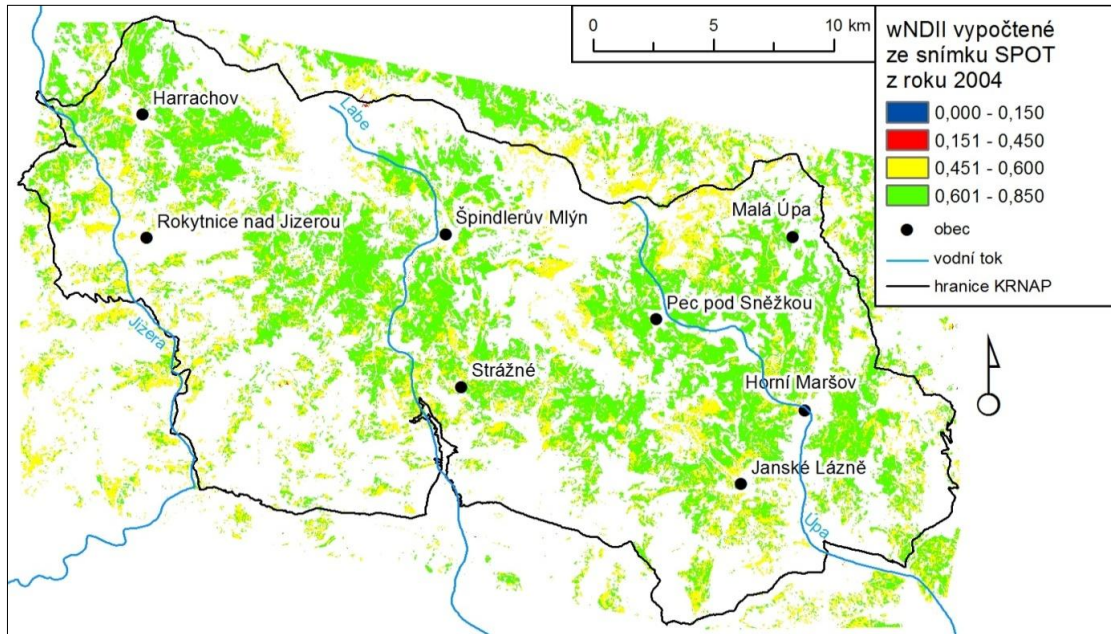
Podle hodnot nad 0,6 v roce 1999 lze vlhkostní poměry považovat za poměrně vysoké. Pouze v několika malých lokalitách v blízkosti státní hranice se hodnoty pohybovaly mezi 0,15 a 0,45. Zlepšení stavu je vidět u wNDII z let 2004 (viz obr. 24) i 2006,



Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

kde zmíněné lokality s nejnižší vlhkostí zůstaly zachovány. Index wNDII z roku 2007 ukazuje mírný pokles hodnot, většina hodnot náleží do intervalu 0,45 až 0,6.

Obr. 24: wNDII v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

Výsledky tohoto vlhkostního vegetačního indexu (viz přílohy 2 až 8) jsou dobře porovnatelné s mapami Stoklasy. Zvolené relativní třídy vyjadřující podíl vody v jehlicích pro klasifikované smrkové porosty se ve většině zvolených časových období shodují s třídami ve Stoklasových mapách. Největší shody zaznamenaly výsledky wNDII dosažené v letech 1999, 2007 (SPOT) a 2011 (Landsat). Zejména u prvních dvou jmenovaných roků je shoda s třídami poškození podle procenta defoliace vynikající, na většině ploch se shoduje rozmístění zdravých, středně i silně poškozených porostů.

### 5.2.7 Foliar moisture index

Pro výpočet vegetačního vlhkostního indexu FMI se používají pásma v červené, blízké a krátkovlnné infračervené části spektra. Hodnoty FMI se na klasifikovaných plochách pohybovaly v intervalu od 0 do 0,03 (rozdělení tříd viz obr. 25). Se zvyšující se hodnotou by měl růst obsah vody v asimilačních orgánech rostlin.

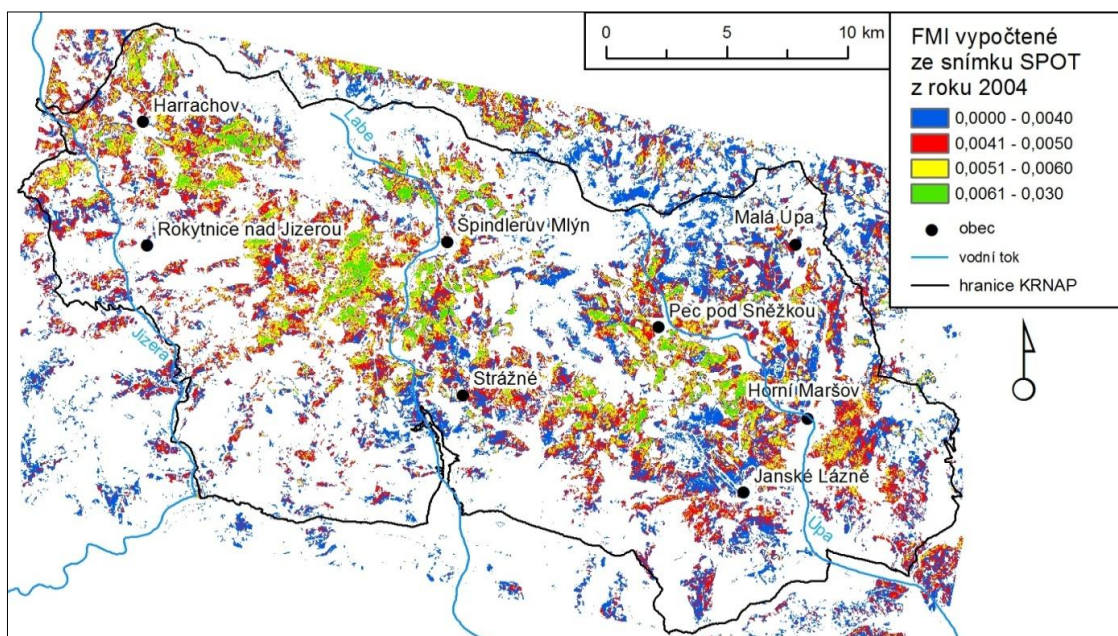
### *Landsat*

Index FMI z roku 1984 ukazuje velice nízké hodnoty, většina plochy byla zařazena do nejhoršího intervalu 0 až 0,004. Další snímek z roku 1993 ukazuje zlepšení vlhkostních poměrů smrkových porostů, hodnoty indexu jsou však velmi diferenciované. Nejnížší hodnoty se udržely na nejvíce problémových, převážně vysoko položených, lokalitách (viz. přílohy 12 a 13). V roce 2011 se situace jeví značně diverzifikovaně, vyskytují se zde plochy ze všech intervalů FMI.

### *SPOT*

V roce 1999 převládají na celém klasifikovaném území velice nízké hodnoty. Vlhkostní poměry v roce 2004 se zdají v porovnání s uvedenými roky nejlepší (viz obr. 25). Sice se zde opět vyskytují nízké hodnoty, a to zejména v postižených oblastech, ale objevují se zde i plochy s nevyššími hodnotami. FMI z roku 2006 ukazuje navýšení vlhkosti smrkových porostů. SPOT z následujícího roku má hodnoty indexu opět velice nízké, velká část ploch je zařazena do intervalu s nejnižšími hodnotami.

Obr. 25: FMI v roce 2004 (SPOT)



Zdroj: vlastní výstup.

Druhý vegetační vlhkostní index dosáhl v porovnání s wNDII podstatně horší shody se Stoklasovými mapami. U všech sledovaných období stanovené intervaly pro třídy FMI ukazují spíše horší situaci, než tomu tak je podle hodnot defoliace.

### 5.3 Posouzení podle snímků

Dále byly výsledky vegetačních indexů posouzeny pro každý snímek zvlášť. Vizualní hodnocení shod a rozdílů bylo doplněno o výpočty průměrů a směrodatných odchylek indexů pro popsání vývoje kondice smrkových porostů v jednotlivých letech (viz tab. 13).

Tab. 13: Porovnání vybraných indexů na klasifikovaných plochách smrkových porostů

index	Landsat							
	1984		1993		2011			
	r	$\sigma$	r	$\sigma$	r	$\sigma$		
NDVI	0,4172	0,0309	0,6787	0,0835	0,7316	0,0658		
SR	0,8794	0,0682	5,5815	1,5231	0,1568	0,0466		
LAI	175,52	332,36	6450,24	1325,22	6870,77	543,54		
GRVI	0,1038	0,0188	0,0791	0,1033	0,1123	0,1311		
RGI	1,2325	0,0467	0,8707	0,1821	0,8216	0,2068		
wNDII	0,3249	0,0265	0,5132	0,0432	0,5975	0,0504		
FMI	0,0005	0,0001	0,0052	0,0018	0,0072	0,0036		
index	SPOT							
	1999		2004		2006		2007	
	r	$\sigma$	r	$\sigma$	r	$\sigma$	r	$\sigma$
NDVI	0,4020	0,0675	0,6037	0,0705	0,7160	0,0767	0,2940	0,0951
SR	2,3839	0,3575	4,1823	0,8000	6,3863	1,5334	1,8736	0,4025
LAI	1748,66	704,90	5922,22	1611,49	6110,64	1562,01	958,49	523,01
GRVI	0,1263	0,0235	0,1152	0,0464	0,1628	0,1327	0,1156	0,0208
RGI	0,7765	0,0383	0,7967	0,0779	0,9198	0,1819	0,7935	0,0357
wNDII	0,5459	0,0444	0,6176	0,0413	0,6284	0,0714	0,5475	0,0633
FMI	0,0023	0,0003	0,0043	0,0011	0,0127	0,0043	0,0021	0,0004

r - průměr,  $\sigma$  - směrodatná odchylka

Zdroj: vlastní výstup.

V roce 1984 byla u všech indexů zjištěná identická situace. Ve všech případech se jejich hodnoty klasifikovaly pouze do jedné z tříd. Většinou se jednalo o celkově nejnižší dosažené hodnoty, u indexu RGI nejvýše dosažené (převaha odrazivosti v červené části spektra nad zelenou). Index GRVI se na všech klasifikovaných plochách pohybo-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

val okolo nuly. Z nízkých průměrů indexů a vysokého průměru RGI lze pozorovat velice nepříznivou kondici smrkových porostů v tomto roce.

V roce 1993 se zdravotní stav podle hodnot indexů NDVI, SR a LAI jeví obdobně. Druhou podobnostní skupinu tvoří indexy RGI a GRVI založené na změně barvy. Index wNDII se rozložením tříd na klasifikované ploše vymyká. U FMI je patrná souvislost s vegetačním indexem NDVI. Všechny indexy kromě GRVI a RGI mají vyšší průměrné hodnoty než v roce 1984 a ukazují tak zlepšení situace. Index RGI vykázal nižší průměr, což v jeho případě znamená taktéž příznivější stav.

Rok 1999 naznačuje podobnost NDVI, wNDII a také SR, u LAI lze vidět větší diferenciaci tříd. Dále si zhruba odpovídají dvojice indexů RGI a GRVI. FMI je svými hodnotami ve srovnání s ostatními unikátní. Průměrné hodnoty vybraných vegetačních indexů vykazují spíše nižší hodnoty, např. u NDVI a LAI, takže zdravotní stav nelze označit jako dobrý.

V roce 2004 byla zaznamenána podobná shoda jako v roce 1999. Přibližně si odpovídají vegetační indexy NDVI, wNDII a SR. Méně diferenciované je LAI. Je zajímavé, že jediné indexy GRVI a RGI postihly rozdílnost v kondici porostů mezi západní a východní polovinou. FMI jeví v tomto roce z použitých indexů největší diferenciaci hodnot, na většině ploch se jeho rozložení tříd také podobá prvním třem uvedeným indexům. Průměry hodnot vegetačních indexů jsou vyšší než v předchozím sledovaném období, což indikuje zlepšení kondice porostů. Pouze vyšší průměr indexu RGI se výsledkům ostatních indexů vymyká.

Snímek SPOT z roku 2006 uvádí identickou shodu indexů NDVI a wNDII, je zřejmá také podobnost se SR. Rozložení tříd indexu listové plochy se jeví oproti předchozím více generalizovaně. Vegetační indexy GRVI a RGI si neodpovídají. V tomto roce se průměrné hodnoty indexů vzhledem k roku 2004 mírně zvýšily. Tento jev ukazuje na příznivý vývoj zdravotního stavu. Stejně jako u o dva roky staršího snímku, je výjimkou vyšší průměr RGI, který by měl znamenat zhoršení.

Další snímek z družice SPOT z roku 2007 popisuje podobné rozmístění tříd LAI a SR. Indexy určené k detekci barvených změn GRVI a RGI mají v tomto roce srovnatelné výsledky. Vegetační indexy NDVI a wNDII nelze k žádnému jinému indexu připo-

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

dobnit. V tomto roce byl identifikován nepříznivý vývoj, průměrné hodnoty vegetačních indexů ukazují na nejhorší stav ze všech snímků SPOT. Velice nízké průměry zaznamenaly např. indexy NDVI a LAI.

Vegetační indexy vypočtené ze snímku Landsat z roku 2011 nevykazují příliš společných rysů. Pouze rozmístění tříd indexů GRVI a RGI vychází podobně. Hodnoty LAI a SR jsou v absolutním rozporu, LAI je na celé ploše vysoké, zatímco SR nízké. Indexy NDVI a wNDII u tohoto snímku nelze přirovnat k žádnému použitému indexu. Průměrné hodnoty použitých vegetačních indexů indikují velmi dobrý zdravotní stav. Všechny indexy kromě RGI, který funguje obráceným způsobem, vykazují vysoké hodnoty. Výjimku představuje velice nízká hodnota SR, která je s ostatními výsledky v rozporu. Celkově se dají však smrkové porosty v tomto roce klasifikovat jako v dobré kondici.

Průměrné hodnoty jednotlivých indexů u každého snímku byly použity pro zhodnocení jejich vhodnosti pro monitoring kondice smrkových porostů. U většiny snímků byly nalezeny společné rysy, díky kterým lze v daném roce stanovit zdravotní stav. Stejně trendy vykazaly indexy NDVI, SR, LAI a wNDII. GRVI a RGI, postihující barevné změny jehlic, prokázaly pouze u některých snímků podobný stav. Vlhkostní index FMI posloužil spíše jen pro dokreslení situace.

## **5.4 Vývoj zdravotního stavu podle hodnot NDVI**

Pro zhodnocení vývoje kondice smrkových porostů byl vybrán index NDVI. Společně s vlhkostním vegetačním indexem wNDII dosáhly jeho třídy hodnot nejlepší shody se Stoklasovými mapami. U některých snímků se nepodařilo jako smrkový porost vyklasifikovat nejhůře postižené části. Při hodnocení vývoje zdravotního stavu k tomuto bylo přihlédnuto a zmíněné problematické oblasti byly vyhodnoceny z rastrů NDVI oříznutých vrstvou lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku.

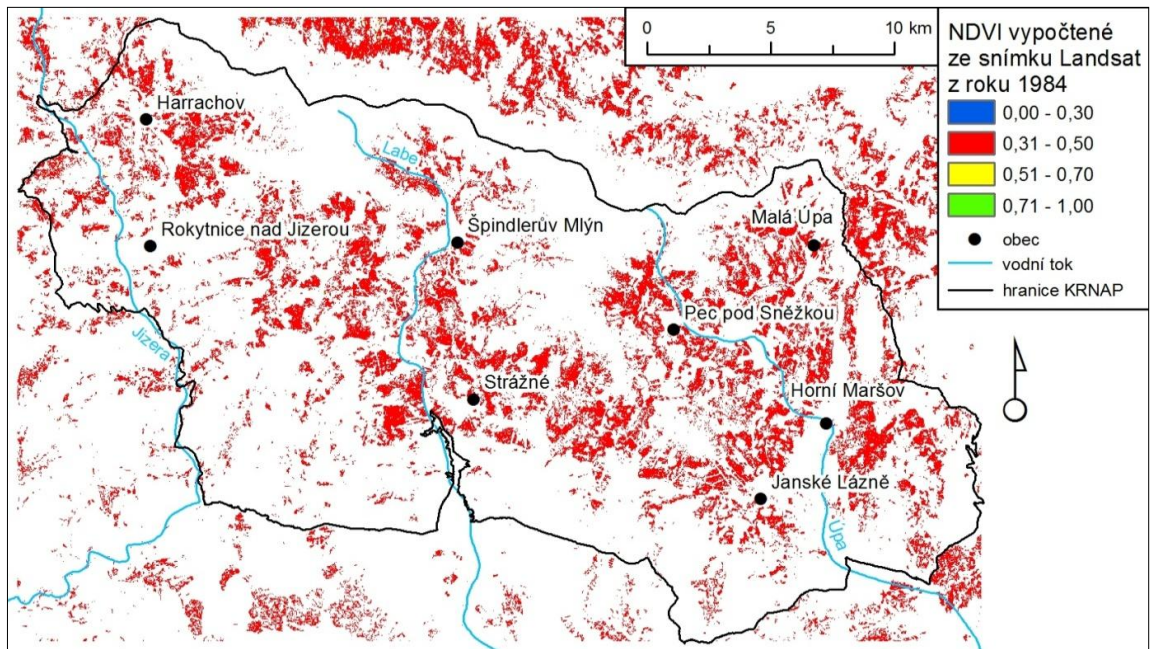
### **5.4.1 Vývoj na snímcích Landsat**

Rok 1984 byl charakteristický velmi špatným zdravotním stavem lesů na celém území státu, což je uváděno i v literatuře, např. Monitoring stavu lesa v České republice 1984-2003. Jednalo se o kalamitní období. To se odráží ve velmi nízkých hodnotách NDVI na území Krkonošského národního parku. U téměř všech klasifikovaných lesních

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

ploch se hodnota tohoto indexu pohybovala v intervalu 0,3 až 0,5. V tomto roce se pomocí klasifikace nepodařilo podchytit nejvíce postižené smrkové plochy.

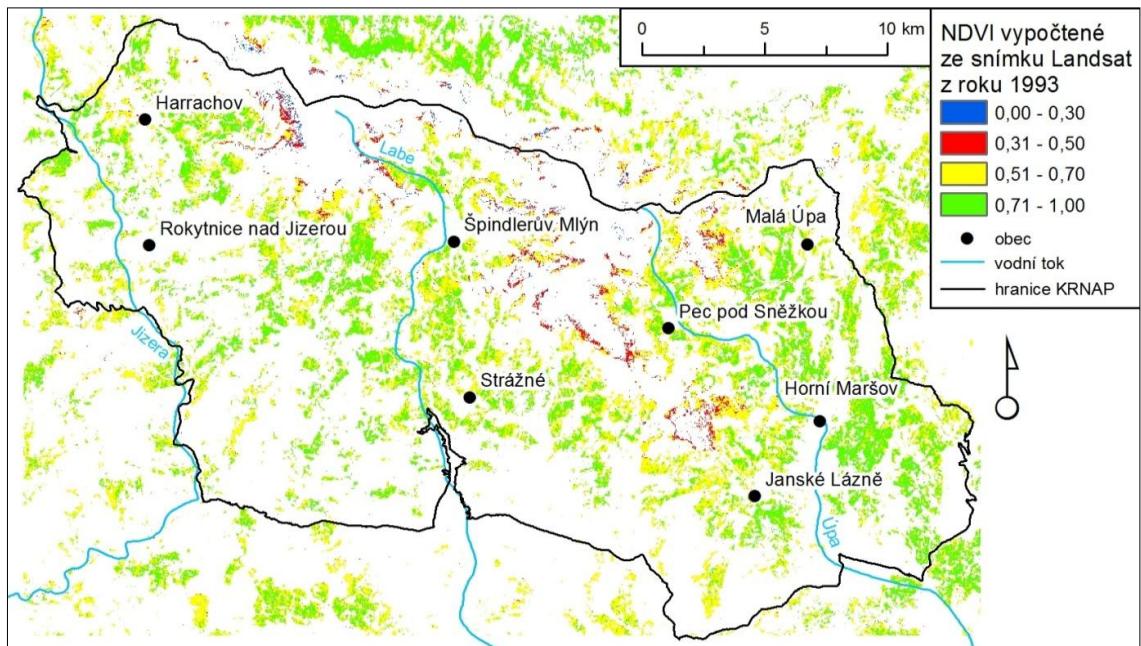
Obr. 26: NDVI (Landsat 1984)



Zdroj: vlastní výstup.

V roce 1993 lze oproti předchozímu snímku podle NDVI sledovat velké zlepšení situace. Většina ploch přesáhla hodnotu 0,51 a v mnoha částech také 0,71. Byla vyklasifikována i nejpoštipenější vrcholová část KRNAP, NDVI zde má velice nízké hodnoty, nižší než 0,3 a dále od 0,31 po 0,5. Tyto plochy jeví známky vysokého stupně poškození. Smrkové porosty se špatným zdravotním stavem se nacházejí ve vrcholové části KRNAP u hranic s Polskem. Nízké hodnoty NDVI se vyskytují také v části východně od Harrachova – oblast kolem Plešivce, Kamence a Jakšína a okolí Pramenů Labe. Dále bylo velice poškozeno území u Špindlerova Mlýna. Směrem na východ se jedná o oblast Kozích hřbetů a Pramenů Úpy, jihovýchodně to jsou např. Lahrovy boudy. Velmi nízké hodnoty byly zaznamenány mezi obcemi Pec pod Sněžkou a Janské Lázně, jedná se o oblast okolo vrcholů Světlá a Černá hora.

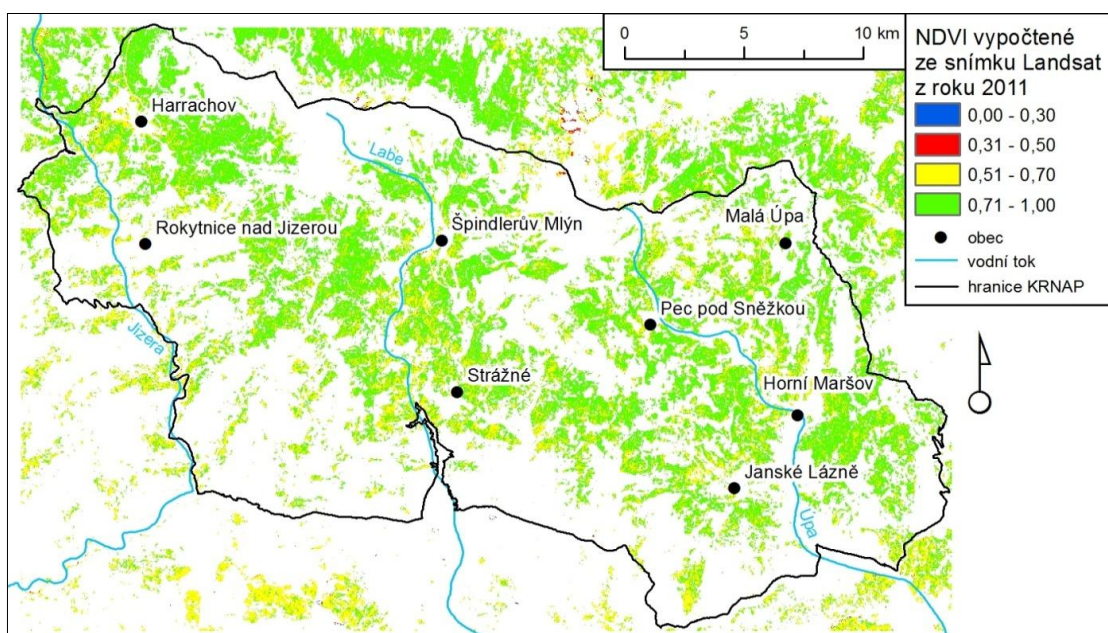
Obr. 27: NDVI (Landsat 1993)



Zdroj: vlastní výstup.

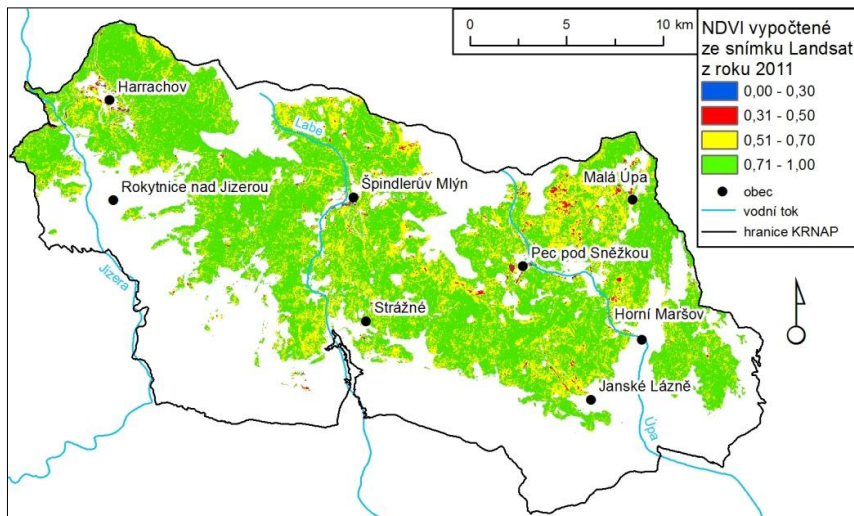
U smrkových porostů v roce 2011 lze podle hodnot NDVI klasifikovat velmi dobrý zdravotní stav. Naprostá většina hodnot se vyšplhala nad 0,7. Pouze malé plochy byly zařazeny do třídy se silným poškozením. Tyto nejmenší hodnoty NDVI byly zaznamenány mezi obcemi Pec pod Sněžkou a Malá Úpa.

Obr. 28: NDVI (Landsat 2011)



Zdroj: vlastní výstup.

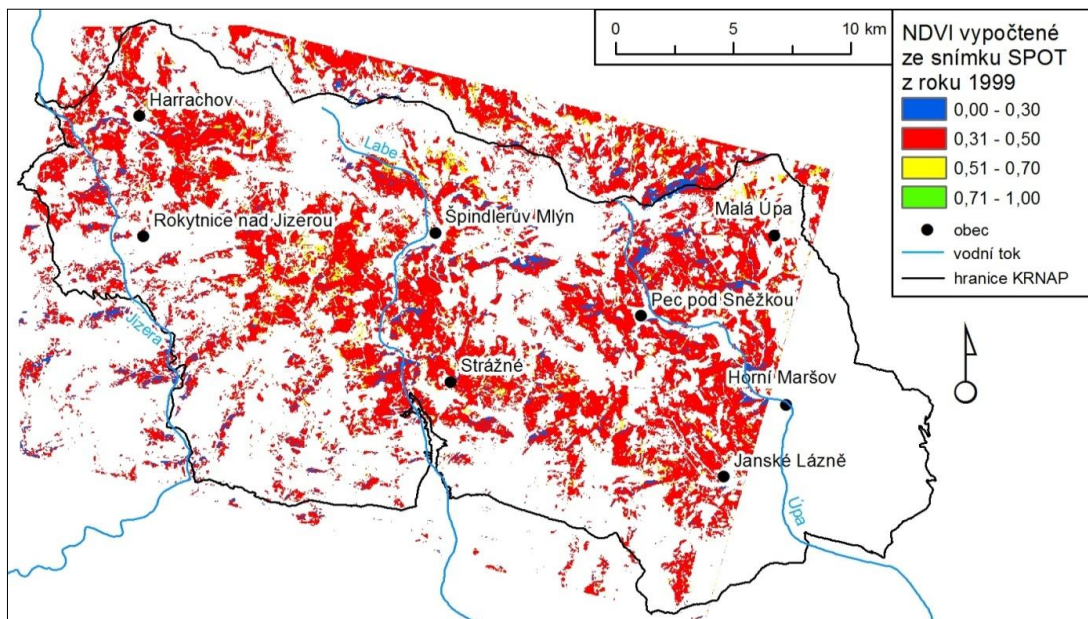
Obr. 29: NDVI oříznuté podle plochy lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku



Zdroj: vlastní výstup.

#### 5.4.2 Vývoj na snímcích SPOT

Obr. 30: NDVI (SPOT 1999)



Zdroj: vlastní výstup.

V roce 1999 se vyskytují nižší hodnoty NDVI. Na většině klasifikovaných smrkových ploch index NDVI nepřekročil 0,5. V některých menších lokalitách se vyskytují také hodnoty menší než 0,3. Jedná se např. o území na východ od Špindlerova Mlýna. Nejvíce postižené oblasti z předchozího sledovaného období (1993, Landsat) i v tomto

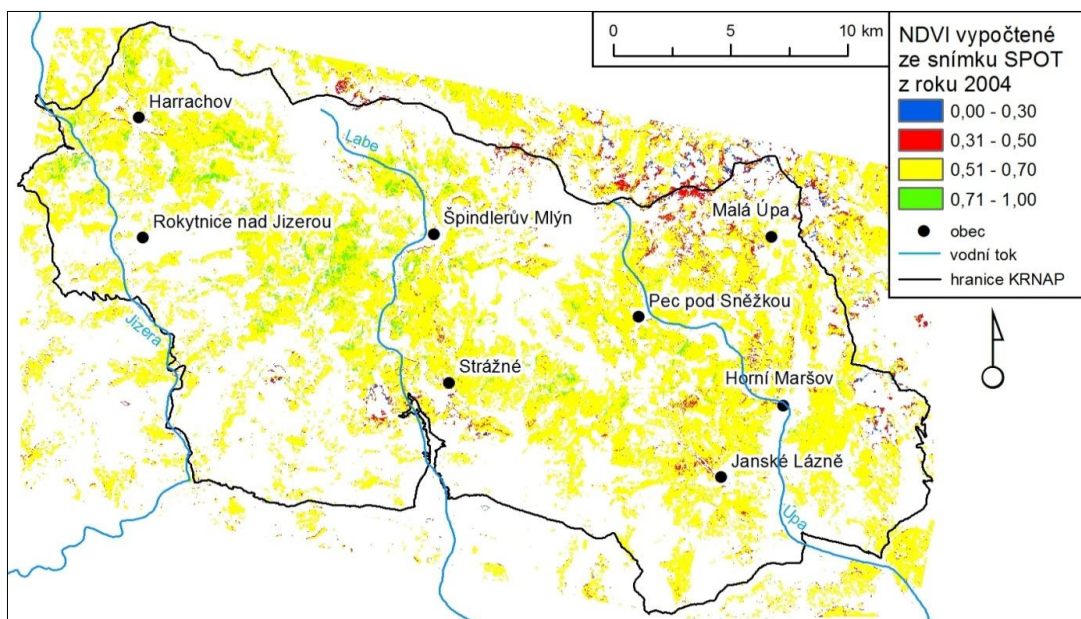


Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

roce jeví známky silného poškození. U žádné klasifikovaných z ploch index nedosáhl hodnoty 0,71.

Rok 2004 vykazuje vyšší index NDVI, jedná se o hodnoty přesahující 0,51 i 0,71. Většina ploch smrkových porostů je tak zařazena do třídy středního poškození. Silné až velmi silné poškození se objevuje v oblasti kolem Špindlerova Mlýna a Malé Úpy. Nej- silněji poškozené plochy s nejnižšími hodnotami NDVI jsou v podstatě identické jako u NDVI odvozeného ze snímku Landsat v roce 1999.

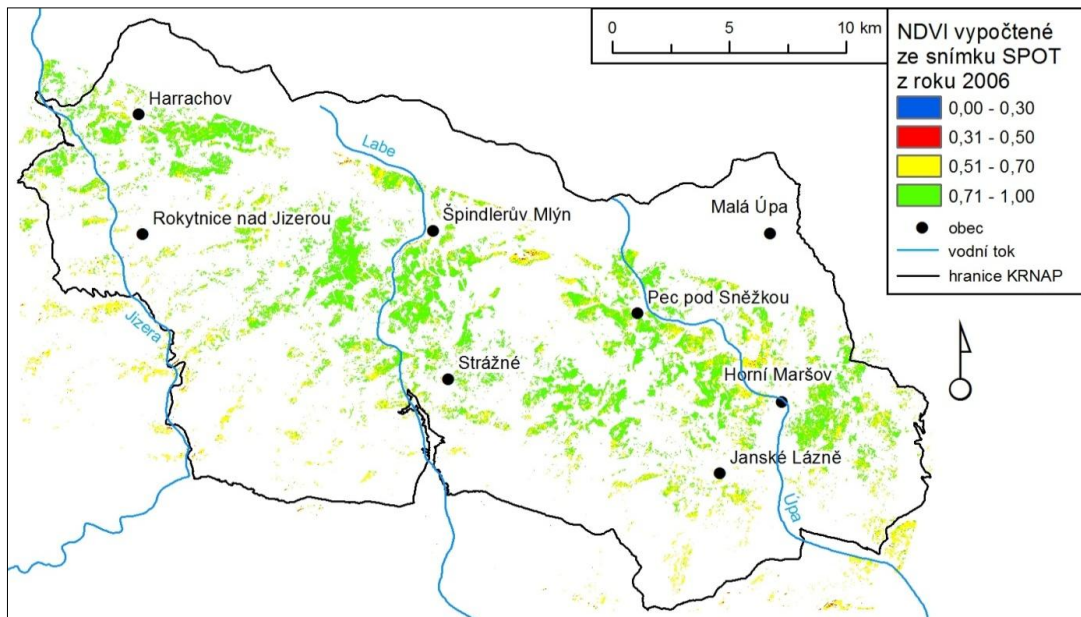
Obr. 31: NDVI (SPOT 2004)



Zdroj: vlastní výstup.

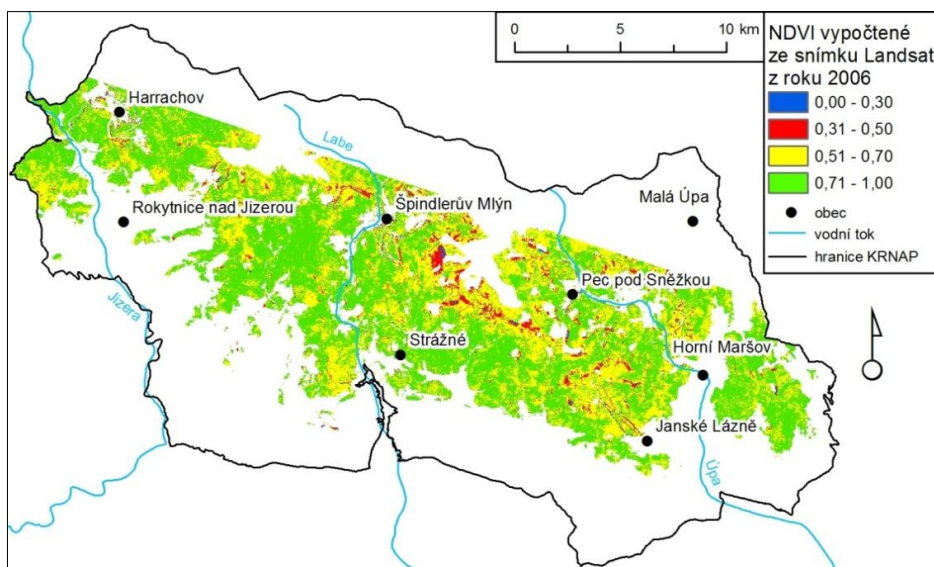
Snímek SPOT z roku 2006 nepostihuje celé území KRNP, vrcholová část při hranicích s Polskem se na tomto snímku nenachází. Hodnoty NDVI jsou vyšší než v roce 2004, většina jich přesáhla hranici 0,71. Plocha snímku ukazuje pouze jednu kritickou oblast, a to sice území jihovýchodně od Špindlerova Mlýna. Plochy označené jako silně poškozené se zde oproti roku 2004 zvětšily.

Obr. 32 : NDVI (SPOT 2006)



Zdroj: vlastní výstup.

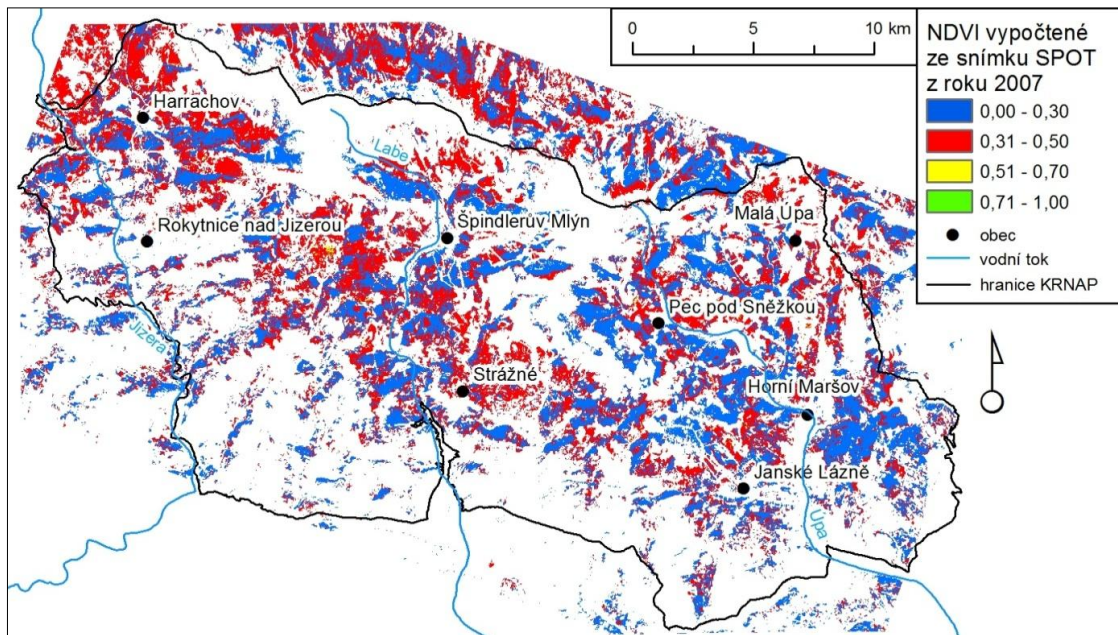
Obr. 33: NDVI oříznuté podle plochy lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku



Zdroj: vlastní výstup.

NDVI v roce 2007 opět ukazuje obrat k horšímu vývoji stavu smrkových porostů. V tomto roce jsou patrné velké homogenní plochy s nízkými hodnotami rozmístěné po celém klasifikovaném území. Tento výsledek odkazuje na celkově špatný zdravotní stav u všech porostů. Byly zaznamenány hodnoty v nejnižších dvou intervalech. Žádné větší plochy s NDVI nad 0,71 se v KRNAP nevyskytly.

Obr. 34: NDVI (SPOT 2007)



Zdroj: vlastní výstup.

#### Shrnutí vývoje kondice smrkových porostů podle NDVI vypočteného ze snímků SPOT

Na snímku z roku 1999 byl podle NDVI zdravotní stav zhodnocen jako špatný. V roce 2004 se situace zlepšila. Tento vývoj lze spatřit i na Stoklasových mapách defoliace a mortality jehličnatých porostů z příslušných let. Mezi roky 2004 a 2006 lze sledovat nárůst hodnot. Tento vývoj nebyl prostřednictvím Stoklasových map potvrzen, dle jeho tříd defoliace se nejvíce postižené oblasti zvětšily a u ostatních ploch zůstala situace stejná. NDVI vypočtené z let 2006 a 2007 ukazuje opětovné zhoršení stavu, což potvrzují také Stoklasovy mapy.

### 5.5 Porovnání snímků různého prostorového rozlišení

U snímků rozdílného prostorového rozlišení (Landsat, Spot, WorldView-2 a QuickBird) byl porovnáván rozsah vyklasifikovaných smrkových porostů, jejich struktura/spojitost/rozdrobenost a prostorová shoda. Hodnoty indexu NDVI byly porovnávány pouze orientačně (srovnání relativního rozsahu málo/hodně poškozeného lesa), protože spektrální pásma vstupující do výpočtu NDVI jsou v případech použitých dat mírně odlišná (viz tab. 14). Pro jejich srovnání byla opět využita relativní legenda, přesto nelze očekávat, že si budou vypočtené hodnoty odpovídat.

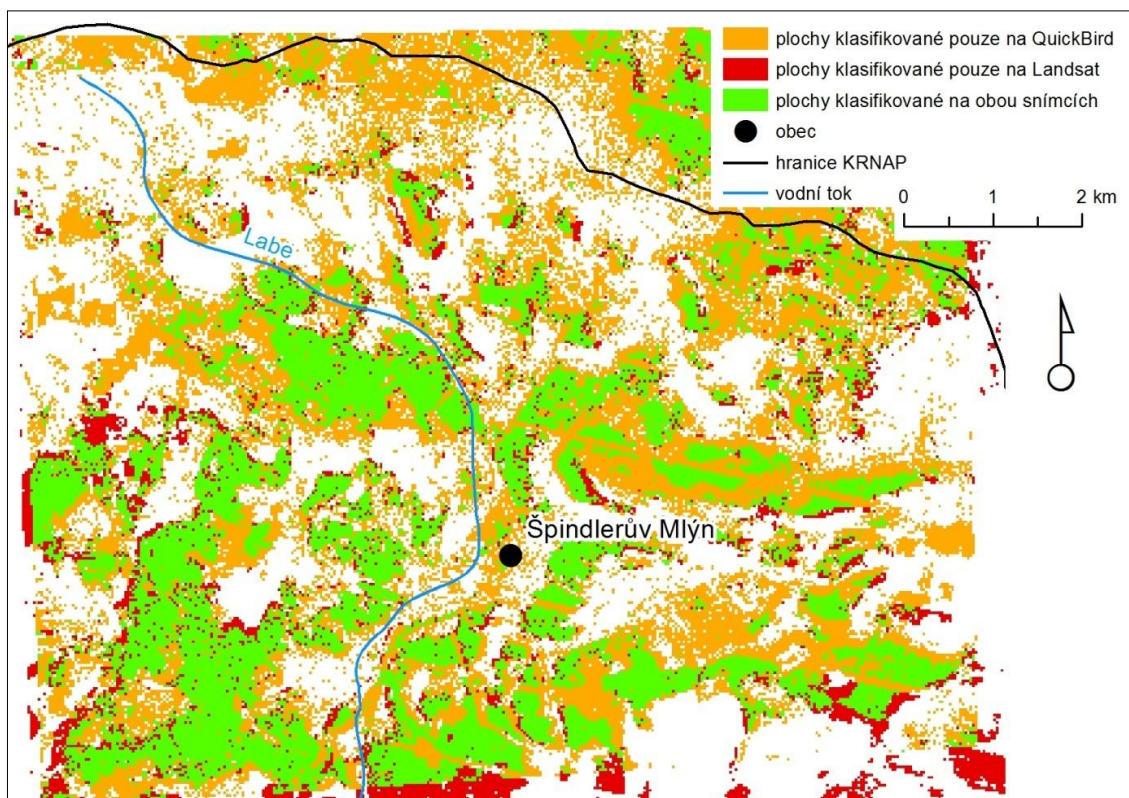
Tab. 14: Porovnání rozsahu pásem RED a NIR

senzor	rozsah pásma RED [nm]	rozsah pásma NIR [nm]
Landsat	630 - 690	760 - 900
SPOT	610 - 680	780 - 890
QuickBird	630 - 690	760 - 900
WorldView-2	630 - 690	860 - 1040

Zdroj: Gisat.

Aby bylo možné data porovnávat, bylo nutné vybrat snímky ze stejného či následujícího roku. Byla zvolena dvě časová období, a to 2004 – 2005 a 2010 – 2011. V prvním případě byly porovnávány snímky SPOT z roku 2004, Landsat a QuickBird z roku 2005. Nejprve byly u jednotlivých snímků přes sebe překryty klasifikované masky smrkových porostů.

Obr. 35: Porovnání klasifikovaných porostů ze snímků QuickBird a Landsat (oba 2005)



Zdroj: vlastní výstup.

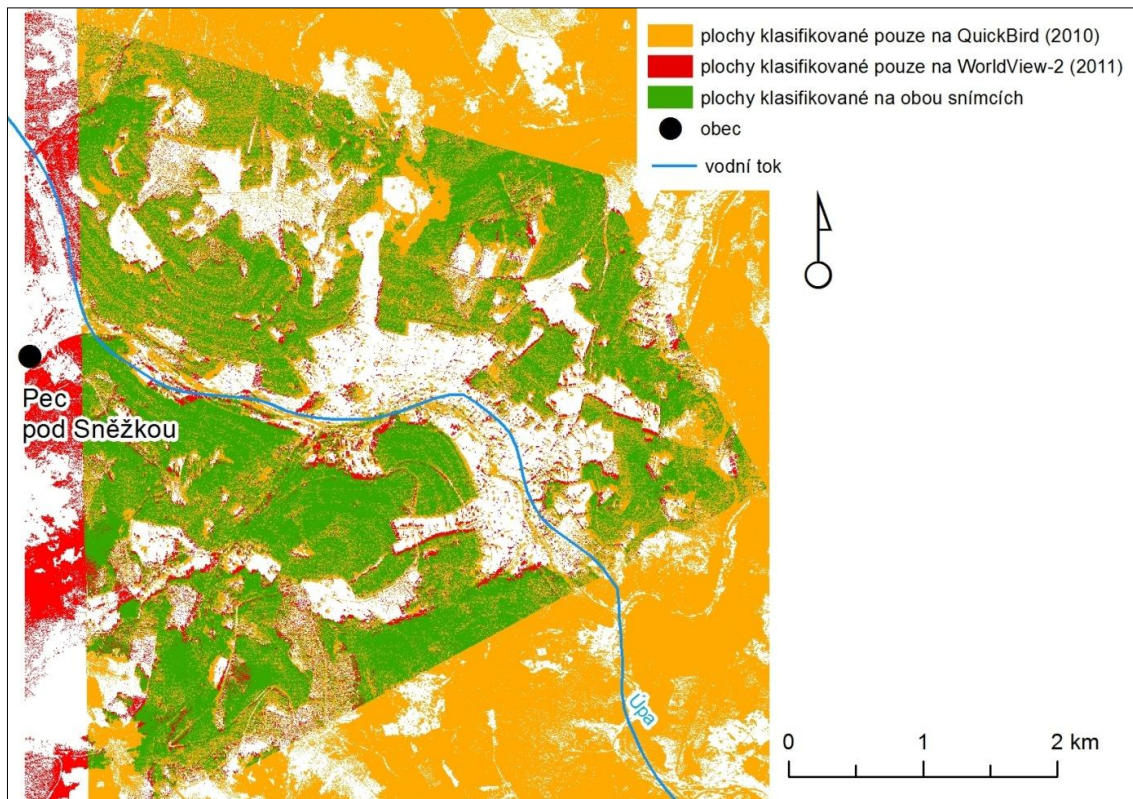
Klasifikací snímků Landsat i SPOT se nepodařilo postihnout nejvíce postižená území ve vrcholových oblastech. Co se týče rozsahu klasifikované plochy i její struktury, jsou snímky Landsat a SPOT téměř identické. Jedná se o plochu přibližně 24 km<sup>2</sup>.

Klasifikované porosty jsou spojitě a zabírají celkově menší území než u QuickBird. Zde se rozprostírají na dvakrát větším území (48 km<sup>2</sup>). Postihují i výše položené lesní plochy při státní hranici. Struktura klasifikovaných porostů je hodně rozdrobená. Klasifikované plochy se převážně shodují se smrkovými porosty určenými na snímcích Landsat a SPOT, jen v některých částech se nacházejí navíc také menší rozdrobené shluky pixelů.

Snímky QuickBird mají přibližně pětikrát lepší prostorové rozlišení, proto jsou pixely menší a detailněji popisují diferenciaci kondice porostů na dané lokalitě. NDVI vypočtené z Landsat naopak tvoří kompaktnější plochy stejných kategorií legendy. Nízké hodnoty NDVI ze snímku Landsat souhlasí s taktéž nízkými hodnotami tohoto indexu z QuickBird. Podle něho jsou však tyto postižené plochy daleko více rozsáhlé.

Ve druhém případě byly porovnávány snímky z družic QuickBird z roku 2010, Landsat a WorldView-2 z roku 2011 pokrývající východní část KRNAP. Snímky z WorldView-2 a QuickBird mají menší rozměry, než je tomu v případě Landsat. První dva jmenované snímky se překrývají pouze malou plochou, jedná se odhadem o území o rozloze 20 km<sup>2</sup>. V této oblasti byly porovnány vytvořené masky klasifikovaného smrkového porostu. Jejich rozložení je na snímku z družic WorldView-2 a QuickBird srovnatelné. Díky většímu prostorovému rozlišení se jeví vyklasifikované pixely smrkového lesa u obou snímků jako rozdrobené. Klasifikované porosty na snímku Landsat mají oproti těm z QuickBird a WorldView-2 více spojitou strukturu. Rozsahem klasifikovaných porostů si nejvíce odpovídají snímky Landsat a WorldView-2 (přibližně 9 km<sup>2</sup>). Smrkové porosty zabírají největší území na snímku QuickBird (13 km<sup>2</sup>). Plochy smrkového lesa klasifikované na snímku Landsat (kde je překryv s ostatními snímky), byly na ostatních dvou snímcích také klasifikovány jako smrkový porost.

Obr. 36: Porovnání klasifikovaných porostů z QuickBird (2010) a WorldView-2 (2011)



Zdroj: vlastní výstup.

NDVI vypočtené ze snímku Landsat z roku 2011 dosahuje poměrně vysokých hodnot ve východní části KRNAP. Nižší hodnoty z Landsat přibližně odpovídají nízkým hodnotám tohoto indexu ze snímku QuickBird. Podle něho jsou tyto poškozené plochy rozlehlejší. NDVI vypočtené z WorldView-2 má relativně velice nízké hodnoty, které by měly naznačovat zhoršený zdravotní stav. Oproti tomu NDVI odvozené ze snímku Landsat v témže roce ukazuje relativně vysoké hodnoty. Vinou tohoto rozporu byl výpočet uvedeného indexu aplikován také na ortorektifikovaný snímek bez atmosférické korekce QUAC. Tento výsledek uvádí podobnou situaci jako NDVI z Landsat.

## 6 DISKUZE

Pro popis zdravotního stavu lesa z družicových snímků byla zvolena metoda hodnocení prostřednictvím vegetačních indexů. Snahou bylo vybrat různé vegetační indexy, obecně známé i použité v novějších studiích. Za nejznámější lze považovat normalizovaný rozdílový vegetační index (NDVI), index listové plochy (LAI) či simple ratio (SR). Tyto indexy vycházejí z pásem v blízkém infračerveném a červeném oblasti spektra a měly by tak dobře charakterizovat obsah chlorofylu ve vegetaci. Vlhkostní poměry byly popsány pomocí dvou vegetačních indexů, a to Foliar Moisture Index (FMI) a wide-band Normalized Difference Infrared Index (wNDII). Byly použity také indexy, které měly postihnout barevné změny asimilačních orgánů rostlin. Jednalo se o Red Green Index (RGI) a Green Red Vegetation Index (GRVI). Dále byl také vyzkoušen Red Edge Inflection Point (REIP), který pro své specifické nároky na odrazivost v úzkých intervalech vlnových délek bývá spíše využíván pro hyperspektrální data.

Jmenované vegetační indexy byly aplikovány na družicové snímky SPOT, Landsat, QuickBird a WorldView-2. Bohužel snímky z družice QuickBird se nepodařilo zcela přesně ortorektifikovat. Diskuze s poskytovatelem dat přinesla informaci, že typ dat Standard není vhodný pro tento typ úlohy. Aby bylo možné tyto snímky využít, byly výstupy z klasifikace a vegetačních indexů georeferencovány v programu ArcMap. V některých částech KRNAP se nachází pouze porosty smrkové monokultury, jinde je smrk naopak smíšen s dalšími druhy jehličnatých i listnatých stromů. Největší problém však představovala klasifikace značně poškozených částí lesa. U některých snímků tyto plochy vůbec nebyly klasifikovány jako smrkový porost, proto byla poté pro vyhodnocení jejich stavu prostřednictvím vegetačních indexů použita také maska lesních vegetačních stupňů s obsahem smrku (poskytnuta KRNAP, zdroj: lesní hospodářský plán). Zde se nabízí otázka, zda je lepší pro vymezení ploch se smrkovým porostem využít určitou vrstvu z pozemního průzkumu (např. lesnická data) či zvolit zpracování vlastní klasifikace. Pro účely této práce byl získán shapefile lesních vegetačních stupňů a také shapefile smrkových porostů (poskytnuto KRNAP). Obě tyto vrstvy pocházejí pouze z jednoho časového období. Pro použití těchto shapefilů jako masek by bylo vhodnější

mít je k dispozici pro každý sledovaný rok vždy v aktualizované podobě. Z toho důvodu byla volena metoda klasifikace smrkových porostů na snímcích z jednotlivých let.

Jeden z hlavních cílů práce spočíval ve srovnání všech sedmi použitých vegetačních indexů. Komparace takového počtu indexů je ojedinělá, ve většině studií jsou srovnávány spíše výsledky dvou až tří. Nejčastěji je volen jeden z nejvíce používaných, např. NDVI nebo LAI, a jeden nověji zkoumaný index, např. NDVI a GRVI ve studii Motohky a kol. z roku 2010. Publikovány také bývají odborné články, kde existují výčty zavedených vegetačních indexů, např. Wang et al. 2010. V těchto textech jsou většinou shrnuty spíše obecné informace bez jakéhokoliv porovnávání uvedených indexů.

Podobné hodnocení zdravotního stavu smrkových porostů u většiny snímků poskytly indexy NDVI, SR a wNDII. Byla tak potvrzena paralela mezi hodnocením zdravotního stavu vegetace indexy NDVI a simple ratio uváděná v literatuře (Plant sciences, Cohen, 1991). Index listové plochy většinou poskytl méně diferenciované výsledky. Vegetační indexy GRVI a RGI, které by měly postihnout barevné změny jehlic od zelené k červené, u mnoha snímků ukázaly srovnatelné rozložení ploch s kritickými hodnotami (vysoké RGI, GRVI kolem nuly). U GRVI byly sledovány zejména plochy jehličnatých a listnatých porostů s hodnotami kolem nuly, které by podle japonské studie (Motohka et al., 2010) měly indikovat fázi opadu listů a jehlic. Ve studii byla pro výpočet indexu použita data z družice MODIS a také hodnoty odrazivostí naměřené v terénu v denním intervalu. Snímky SPOT a Landsat použité v této diplomové práci mají vyšší prostorové rozlišení nežli snímky z družice MODIS. Tím, že byla nalezena shoda s rozložením hodnot indexu GRVI kolem nuly a vysokých hodnot indexu RGI, byla možnost stanovené hypotézy potvrzena (viz přílohy 10 a 11).

RGI vypočtený ze snímků QuickBird byl testován v Kanadě na porostech borovice kleče napadené kůrovcem za účelem rozlišení korun zdravých a poškozených stromů ve fázi tzv. red attack. Společně s indexem NDVI byla i u RGI prokázána schopnost tyto koruny od sebe odlišit (Coops, Johnson, 2006). V této diplomové práci bylo RGI aplikováno na časovou řadu snímků SPOT a Landsat. Výsledky u většiny snímků představovaly spíše rozdrobené pixely s kritickými vysokými hodnotami.



Studie Wang a kol. využila snímky z družic Landsat a SPOT pro predikci vlhkosti vegetace pomocí metod regrese. Pro srovnání jednotlivých vlhkostních indexů byly vypočteny korelační koeficienty mezi těmito indexy a komponentami metody Principal Component Analysis (PCA) a Tasseled Cap Transformation (TCT). Závěrem bylo konstatováno, že nejlepších výsledků pro sledování vlhkostního stresu dosáhly TCT a index wNDII (Wang et al. 2010). Pro účely zhodnocení vlhkostních poměrů byly v této práci zvoleny indexy Foliar Moisture Index a právě wide-band Normalized Difference Infrared Index. Výsledky FMI se u většiny snímků výrazně odlišovaly od ostatních použitých indexů. Očekávaná shoda s wNDII nebyla ovšem potvrzena. Druhý jmenovaný vlhkostní index vykázal ve většině případů výsledky odpovídající NDVI.

Výsledky vegetačních indexů byly porovnány na základě jejich průměrných hodnot a směrodatných odchylek na jednotlivých snímcích (viz tab. 13). Vývoj zdravotního stavu lesa v Krkonoších je proměnlivý. Číselně vyjádřené hodnoty vegetačních indexů mohou být ovlivněny celou řadou faktorů. Náhlé změny mezi dvěma následujícími roky mohou znamenat buď velký rozdíl v kondici porostů, nebo svědčit o tom, že daný index není pro pozorování tohoto jevu vhodný. Pokud je daný trend rozeznán u více vegetačních indexů, lze ho prohlásit za platný. U většiny snímků byly nalezeny průměry indexů se společnými rysy, díky kterým lze postihnout zdravotní stav v daném roce. Pro tento účel se ukázaly vhodné indexy NDVI, SR, LAI, wNDII. Indexy GRVI a RGI postihující barevné změny jehlic vykázaly pouze u některých snímků společný trend (viz přílohy 10 a 11). Hodnoty vlhkostního indexu FMI se jeví vhodné spíše pro dokreslení situace. V některých letech platí, že špatný stav lesa je doprovázen také nízkým průměrem tohoto indexu, ale neukázalo se to pravidlem.

Dále bylo cílem práce vypočtené hodnoty vegetačních indexů vztáhnout k dalším dostupným datům týkajících se zdravotního stavu smrkových porostů v Krkonoších. Data tohoto typu jsou v KRNAP ojedinělá. Souvislá časová řada vývoje kondice lesa z družicových snímků Landsat existuje pouze od Ing. Milana Stoklasy. Mapové výstupy (viz přílohy 17 až 20) jsou zveřejněny na webových stránkách ÚHUL (<http://geoportal2.uhul.cz/index.php>). Metodika jeho práce ovšem nebyla zveřejněna a sám autor ji pro účely této diplomové práce odmítl sdělit. Kvůli tomu se přikročilo k vyhledání dalších možných zdrojů pro porovnání výsledků vegetačních indexů. Z VÚLHM Opočno byla získána unikátní data defoliace zjištěná formou pozemního

šetření na trvale výzkumných plochách a plochách ICP Forests. Bohužel tento soubor nemohl být použit pro účely hledání závislosti s vegetačními indexy, protože data o defoliaci neměla normální rozdělení. Z tohoto důvodu se přikročilo k porovnání vegetačních indexů vypočtených ze snímků SPOT a Landsat s jediným existujícím zdrojem, a to s mapami defoliace a mortality jehličnatých porostů od firmy Stoklasa Tech. (ÚHUL). Tato mapa obsahuje legendu o deseti třídách podle procenta defoliace. Aby bylo možné vybrané vegetační indexy alespoň orientačně porovnat s těmito třídami, bylo třeba vytvořit u každého z nich relativní legendu. Největší shoda se očekávala u vegetačních indexů, které mají přímý vztah k obsahu chlorofylu. Tento předpoklad se potvrdil zejména u vegetačních indexů NDVI a LAI. Indexy založené na sledování změny barvy jehlic se s třídami Stoklasy příliš neshodovaly. Z vlhkostních vegetačních indexů dobrých výsledků dosáhl wNDII, který je ovšem vázán na krátkovlnné infračervené pásmo, které z použitých družicových dat obsahují pouze snímky Landsat a SPOT. Dále byl také pro aktuální snímek z družice Landsat využit upravený vztah pro výpočet REIP. I přesto, že pro výpočet byla využita mírně odlišná spektrální pásma, je výsledné rozložení hodnot do tříd v dobré shodě se Stoklasovou mapou ze stejného roku (viz příloha 16). Zde je ovšem nutné podotknout, že u výstupů Stoklasa, vzhledem k tomu, že není přesně známa metodika jejich zpracování, nelze říci, do jaké míry jsou přesné a odpovídající realitě. Na druhou stranu jde o běžně používaná data v lesnické praxi, proto byly k porovnání výstupů této práce použity.

Porovnání vegetačních indexů s mapami defoliace a mortality jehličnatých porostů nebylo vzhledem k absenci informací o metodice jednoduché. Není zveřejněn vzorec, podle kterého bylo určeno procento defoliace v pixelu, ani metoda pro stanovení tříd defoliace. Stejně tak není jasné, jak byla vymezena sledovaná plocha jehličnatého lesa. Pro její vymezení mohla být použita pouze data z Landsat nebo jiná externí data z pozemních šetření či lesnické hospodářské plány. Pro porovnání byla použita data z Landsat a SPOT. Skutečnost, že Stoklasa pracoval pouze se snímky Landsat, může hrát významnou roli při porovnávání hodnot vegetačních indexů vypočtených ze SPOT, které mají zhruba dvakrát vyšší prostorové rozlišení. U map defoliace a mortality není uvedeno přesné datum pořízení snímku, pouze daný rok. I tento fakt může hrát význam v rozdílech mezi výsledky vegetačních indexů z družice Landsat a třídami defoliace. Nejdůležitější složku indikující zdravotní stav vegetace představuje chlorofyl. Jeho obsah se v průběhu jednoho vegetačního období mění (měl by postupně růst). Rozdílné

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

budou pravděpodobně i použité korekce snímků, především se jedná o použitou metodu atmosférické korekce v této diplomové práci. Metoda QUAC a software ENVI v počátcích Stoklasova výzkumu neexistovaly.

Pro srovnání možností dat různého prostorového rozlišení byly vybrány dva časové úseky a vegetační index NDVI, který ukázal v předchozích analýzách dobré výsledky. V obou časových intervalech se podle předpokladu ukázaly značné rozdíly v dosažených hodnotách na stejném území. I když byl použit stejný vegetační index pro všechny snímky, pro jejich výpočet se nepracovalo s pásmy o shodném rozsahu vlnové délky. Tyto odlišnosti mezi jednotlivými senzory pro pásma NIR a RED činí většinou 20 nm, u WorldView-2 je tomu více (viz tab. 14). Proto nebyly srovnávány konkrétní hodnoty indexů. Bylo zjišťováno, zda se přibližně shodují místa nejméně a nejvíce poškozeného lesa. Snímky z QuickBird s vyšším prostorovým rozlišením obsahují více klasifikovaných smrkových ploch a také diverzifikovanější hodnoty NDVI ve srovnání se snímky SPOT a Landsat (viz příloha 14). NDVI vypočtené z WorldView-2 vykazuje kompaktní nízké hodnoty na rozdíl od poměrně diferencovaných vysokých hodnot tohoto indexu z Landsat. Tento rozdílný výsledek lze obtížně zdůvodnit, hodnoty odrazivosti mohly být výrazně ovlivněny atmosférickou korekcí, která není přímo určená pro senzor WorldView-2. NDVI bylo proto vypočteno také pro ortorektifikovaný snímek bez korekce QUAC. Bez této úpravy výsledek odpovídá indexu odvozenému z Landsat (viz příloha 15).

Výpočtem obsahu klasifikovaných ploch bylo zhodnoceno, že se přibližně shodují u dvojice snímků Landsat z roku 2005 a SPOT z roku 2004 a také u Landsat a WorldView-2 z roku 2011. Největší rozsah mají klasifikované smrkové porosty na snímcích QuickBird. V roce 2005 se jedná dokonce o dvojnásobek oproti snímkům z Landsat a SPOT.

Jedním z dílčích cílů této diplomové práce bylo posoudit možnost využitých dat pro sledování vývoje horní hranice lesa. Ukázalo se, že data z Landsat a SPOT nejsou pro tento účel zcela relevantní. V blízkosti horní hranice lesa často leží hodně poškozené porosty, jejichž klasifikace se jeví jako problematická. Pro tento účel by byla vhodnější data s vysokým prostorovým rozlišením, která však nebyla k dispozici v časové řadě, či letecké snímky, které jsou pořizovány již zhruba od třicátých let dvacátého století.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá problematikou využití družicových dat pro monitoring zdravotního stavu smrkových porostů v oblasti Krkonošského národního parku. Využita byla především časová řada snímků z družice SPOT, která byla doplněna snímky z družice Landsat.

Nejprve byla u všech použitých družicových snímků provedena korekce. Náročnou část představovala ortorektifikace snímků SPOT a QuickBird. Pro uspokojivé výsledky ortorektifikace v případě SPOT bylo nutné v Krkonošském národním parku zaměřit body s přesnými souřadnicemi polohy i nadmořské výšky. U snímků z družice QuickBird ortorektifikace bohužel nebyla úspěšná z důvodu nevhodnosti poskytnuté úrovně dat pro tyto účely. Další krok spočíval v provedení atmosférické korekce, k čemuž byla vybrána automatická metoda Quick Atmospheric Correction (QUAC) v software ENVI. Takto upravené snímky byly využity pro vlastní cíle této diplomové práce. Na všech družicových snímcích byly vyklasifikovány smrkové porosty a vytvořena smrková maska, která následně sloužila jako podklad pro analýzu.

Hlavním cílem práce bylo využít data DPZ pro hodnocení kondice smrkových porostů v Krkonošském národním parku, a to na základě analýzy vybraných vegetačních indexů dostupných v literatuře. Dílčím cílem bylo porovnání těchto indexů, hodnocení jejich použitelnosti a porovnání výstupů indexů s jinými existujícími daty zdravotního stavu lesa v KRNAP. Nepodařilo se využít data z pozemních šetření defoliace poskytnutá VÚLHM, proto byly použity Stoklasovy mapy využívané pro hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v ÚHUL. Zvolené vegetační indexy různou měrou korespondují s těmito mapami, ani jeden z indexů nedosahuje dokonalé shody s mapami defoliace a mortality jehličnatých porostů ve všech sledovaných letech. Nejvíce se s těmito mapami shodují indexy NDVI a wNDII. Vegetační index NDVI byl následně vybrán pro popis vývoje zdravotního stavu v časové řadě a také pro porovnání dat různého prostorového rozlišení.

Hlavní cíle práce se podařilo splnit. Byl popsán vývoj zdravotního stavu lesa v KRNAP s využitím dat DPZ a také porovnány výsledky získané na základě výpočtu různých vegetačních indexů i různých typů družicových dat. Podařilo se porovnat výsledky vybraných vegetačních indexů s dalším zdrojem. Ve shodě s předchozími studii bylo prokázáno, že vegetační indexy mohou být pro orientační popis zdravotního stavu smrkových porostů úspěšně využívány. Nepodařilo se ale využít pozemní data o defoliaci pro hodnocení přesnosti výsledků dosažených s využitím dat DPZ. Do budoucna by tedy bylo vhodné výstupy tohoto typu porovnat s použitelnými daty terénního výzkumu zaměřeného na hodnocení fyziologického stavu porostů, ať již pomocí určení míry defoliace nebo například stanovením obsahu některých pigmentů, např. chlorofylu.

## SEZNAM ZDROJŮ A INFORMACÍ

### Literatura

ALBRECHTOVÁ J., ROCK B. N. (2003): *Dálkový průzkum krušnohorských lesů*. Vesmír, č. 82. Dostupné z: <<http://www.vesmir.cz/clanek/dalkovy-pruzkum-krusnohorskych-lesu>> [cit. 2011-10-04].

COOPS N. C., JOHNSON M. (2006): *Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation*. University of British Columbia. 14 s. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706001283>> [cit. 2011-09-01].

ENVI 4.7 Help. Exelis Visual Information Solutions.

FABIÁNEK P., STOKLASA M. (1998): *Dálkový průzkum Země a pozemní šetření zdravotního stavu lesů v ČR*. Lesnická práce, č. 10. Dostupné z: <<http://www.mzp.cz/ris/aisrisinfocopy.nsf/4d735ff9c7e64b58c12569e7001a2d9c/7ae482340f536f2b802568350071d517?OpenDocument>> [cit. 2011-07-15].

HAIŠ M., KUČERA T. (2008): *Surface temperature change of spruce forest as a result of bark beetle attack: remote sensing and GIS approach*. *European Journal of forest research*, č. 127 s. 327-336. Dostupné z: <<http://www.springerlink.com/content/h0g1wt848244712p/>> [cit. 2011-09-03].

HÁJEK F., SVOBODA M. (2007): *Vyhodnocení odumírání horského smrkového lesa na Trojmezí (NP Šumava) metodou automatizované klasifikace leteckých snímků*. Dostupné z: <[http://www.npsumava.cz/storage/vyzkum/SGpdf/SG13\\_1\\_HajekSvoboda.pdf](http://www.npsumava.cz/storage/vyzkum/SGpdf/SG13_1_HajekSvoboda.pdf)> [cit. 2011-08-21].

KOLÁŘ, J. (2008): *Principy fungování a využívání pozorovacích satelitů*. Studie. Czech Space Office, Praha, 62 s.

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (1997): *Dálkový průzkum Země*. Skriptta. ČVUT v Praze, 164 s.

KOMRSKA, V. (2004): *Problematika ortorektifikace družicových dat*. Ročníková práce. Katedra aplikované kartografie a geoinformatiky, Přírodovědecká fakulta UK v Praze. 42 s. Dostupné z: <<http://www.kgi.wz.cz/dpz.htm>> [cit. 2012-05-12].

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. (2004): *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York, 750 s.

MATĚJKA, K. (1993): *Monitoring stavu lesů České republiky. Metodický komentář, seznam ploch a některé dosavadní výsledky*. Praha, VÚLHM Jíloviště-Strnady, 68 s.

MATĚJKA, K., VACEK, S., SCHWARZ, O.: *Modelování vývoje zdravotního stavu smrkových porostů Krkonoš s použitím satelitních snímků*. Lesnictví, 44, 1998, č. 8, s. 333 - 343. Dostupné z: <<http://www.infodatasys.cz/public/Lesnictvi1998.pdf>> [cit. 2012-03-21].

MOTOHKA T., NASAHARA K. N., OGUMA H., TSUCHIDA S. (2010): *Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology*. Remote Sensing, č.2, s. 2369-2387. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/2/10/2369/pdf>> [cit. 2012-04-10].

PAVELKA, K. (2003): *Fotogrammetrie 10*. ČVUT Praha. 194 stran.

Plant sciences. Chapter 17(?): *Geological applications of remote sensing*. Department of geology, University of Puerto Rico at Mayaguez. Dostupné z: <<http://www.coursehero.com/sitemap/schools/2081-UPR-Mayagez/courses/712480-GEOL4048/>> [cit. dne 2012-05-22].

QUACKENBUSH L. J., YINGHAI K. (2007): *Investigating new advances in forest species classification. Faculty of Environmental Resources and Forest Engineering, State University of New York College of Environmental Science and Forestry*. Dostupné z: <<http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/tampa2007/0058.pdf>> [cit. 2011-09-14].

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

SOLBERG et al. (2007): *Testing remote sensing techniques for monitoring large scale insect defoliation*. Norwegian forest and landscape institute, Norway. Dostupné z: <[http://www.skogoglandskap.no/publikasjon/testing\\_remote\\_sensing\\_techniques\\_for\\_monitoring\\_large\\_scale\\_insect\\_defoliation/content3\\_view](http://www.skogoglandskap.no/publikasjon/testing_remote_sensing_techniques_for_monitoring_large_scale_insect_defoliation/content3_view)> [cit. 2011-08-01].

STOKLASA M. (1995): *Informační systém zdravotního stavu lesů z kosmických snímků LANDSAT-TM*. - In: GIS ve státní správě, Sborník konference, Chrudim.

ŠPULÁK O. (2005): *Poškození lesů v Krkonoších*. Časopis Krkonoše – Jizerské hory.

Dostupné z:

<[http://krkonose.krnep.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=7377&Itemid=3](http://krkonose.krnep.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=7377&Itemid=3)> [cit. 2011-07-22].

TESAŘ, V., TEMMLOVÁ, B. (1971): *Olistění stromů jako kritérium pro hodnocení stavu porostů v imisním území*. Lesnictví, č. 17, s. 1017 – 1032.

VACEK, S. a kol. (2007): *Zdravotní stav a dynamika lesních ekosystémů Krkonoš pod stresem vyvolaným znečištěním ovzduší*. Folia Forestalia. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce, s. r. o., č. 6, 216 s.

VACEK a kol. (2006): *Lesy a ekosystémy nad horní hranicí lesa v národních parcích Krkonoš*. Praha, Lesnická práce, 112 s. Dostupné z:

<[http://www.infodatasys.cz/biodivkrsu/p2006/1\\_01\\_FoIForBoh02.pdf](http://www.infodatasys.cz/biodivkrsu/p2006/1_01_FoIForBoh02.pdf)> [cit. 2012-06-01].

VOLPE, F. (?): *Orthorectification QuickBird Basic and Standard Orthorectified data*.

Eurimage, Řím. 4 s. Dostupné z: <[http://www.ipi.uni-](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/150-volpe.pdf)

[hannover.de/fileadmin/institut/pdf/150-volpe.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/150-volpe.pdf)> [cit. 2012-06-06].

WANG J., SAMMIS T., GUSTCHICK V. (2010): *Review of Satellite Remote Sensing Use in Forest Health Studies*. New Mexico State University. 15 s. Dostupné z:

<[http://gconsortium.com/review\\_RS\\_forests\\_proof.pdf](http://gconsortium.com/review_RS_forests_proof.pdf)> [cit. 2011-08-11].



Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

WULDER M. A., DYMOND C. C., WHITE J. C., LECKIE D. G., CARROL A. L. (2006): *Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities*. Forest Ecology and Management, 221s. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112705005736>> [cit. 2011-10-15].

## Internet

ARCDATA Praha, WorldView-2. Dostupné z: <<http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/geograficka-data/druzicova-data/druzice-a-skenery/worldview-2>> [cit. 2011-11-02].

ArcGIS 10 Help. Dostupné z: <[help.arcgis.com](http://help.arcgis.com)> [cit. 2012-06-16].

Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide 2009. Dostupné z: <[http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash\\_Module.pdf](http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf)> [cit. 2012-04-22].

Český úřad zeměměřický a katastrální. Dostupné z: <<http://www.cuzk.cz>> [cit. 2012-07-15].

ENVI User's Guide. Dostupný z: <[http://geol.hu/data/online\\_help/](http://geol.hu/data/online_help/)> [cit. 2012-07-05].

File-Extensions. Dostupné z: <<http://www.file-extensions.org/>> [cit. 2012-07-28].

Gisat, s. r. o. Dostupné z: <<http://www.gisat.cz>> [cit. 2011-11-01].

Global Land Cover Facility. Dostupné z: <<http://glcf.umiacs.umd.edu>> [cit. 2012-07-20].

HortNet. Dostupné z: <<http://www.hortnet.co.nz>> [cit. 2011-07-25].

Letová měření, dálkový průzkum Země. Dostupné z: <[http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta\\_HIO/kapitoly/Metody/Dalkovehodnoc.htm](http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta_HIO/kapitoly/Metody/Dalkovehodnoc.htm)> [cit. 2011-08-01].

Microsoft Office Excel Help. Dostupné z: <<http://office.microsoft.com/cs-cz/excel-help/>> [cit. 2012-07-20].

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

O lese. Dostupné z: < <http://www.olese.cz/> > [cit. 2012-06-20].

Preprocessing levels and location accuracy - SPOT Scene products (2011). Astrium.  
Dostupné z: <<http://www.astrium-geo.com/en/195-preprocessing-levels-and-location-accuracy>> [cit. dne 2012-03-07].

QuickBird Imagery - Product Guide (2008). DigitalGlobe, Longmont, Colorado, 78 s.  
Dostupné z: <<http://www.scribd.com/doc/64878911/QuickBird-Product-Guide-05>> [cit. dne 2012-03-01]. Dostupné z:  
<[http://gers.uprm.edu/geol4048/pdfs/12\\_plant\\_sciences.pdf](http://gers.uprm.edu/geol4048/pdfs/12_plant_sciences.pdf)> [cit. 2012-07-11].

Satellite Imaging Corporation. Dostupné z: < <http://www.satimagingcorp.com> > [cit. 2012-05-12].

Studying Earth's Environment from Space. Nasa GSFC. Dostupné z:  
<<http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/>>. [cit. 2012-08-01].

Trimble. Dostupné z: <[www.trimble.com](http://www.trimble.com)> [cit. 2012-07-21].

United States Geological Survey. Dostupné z: < [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov) > [cit. 2012-04-11].

Výuka krajinné ekologie a DPZ. Dostupné z:  
<[http://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky\\_povrch\\_vegetace.html](http://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html)> [cit. 2011-07-01].

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1:</b>	Poloha použitých druživých scén .....	I
<b>Příloha 2:</b>	wNDII z Landsat (1984) .....	II
<b>Příloha 3:</b>	wNDII z Landsat (1993) .....	II
<b>Příloha 4:</b>	wNDII ze SPOT (1999) .....	III
<b>Příloha 5:</b>	wNDII ze SPOT (2004) .....	III
<b>Příloha 6:</b>	wNDII ze SPOT (2006) .....	IV
<b>Příloha 7:</b>	wNDII ze SPOT (2007) .....	IV
<b>Příloha 8:</b>	wNDII z Landsat (2011) .....	V
<b>Příloha 9:</b>	Vývoj SR v letech 2004, 2006 a 2007 .....	VI
<b>Příloha 10:</b>	Porovnání RGI a GRVI ze SPOT (2004) .....	VII
<b>Příloha 11:</b>	Porovnání RGI a GRVI ze SPOT (2007) .....	VIII
<b>Příloha 12:</b>	FMI z Landsat (1984) .....	IX
<b>Příloha 13:</b>	FMI z Landsat (1993) .....	IX
<b>Příloha 14:</b>	Porovnání NDVI z QuickBird (2005) a SPOT (2004) .....	X
<b>Příloha 15:</b>	Porovnání NDVI z WorldView-2 a Landsat (oba 2011) .....	XI
<b>Příloha 16:</b>	REIP z Landsat (2011) a Stoklasova mapa defoliace a mortality jehličnatých porostů (2011) .....	XII
<b>Příloha 17:</b>	Defoliace a mortalita jehličnatých porostů v letech 1984 a 1994 dle Stoklasy .....	XIII

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších

**Příloha 18:** Defoliace a mortalita jehličnatých porostů v letech 1999 a 2004 dle Stoklasy .....XIV

**Příloha 19:** Defoliace a mortalita jehličnatých porostů v letech 2006 a 2007 dle Stoklasy .....XV

**Příloha 20:** Defoliace a mortalita jehličnatých porostů v roce 2011 dle Stoklasy .XVI

Bc. Romana Musilová: Využití dat DPZ pro hodnocení aktuálního stavu a vývoje smrkových porostů v Krkonoších