UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
Přírodovědecká fakulta
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

MOŽNOSTI HODNOCENÍ KALAMIT LESNÍCH PLOCH POMOCÍ DRUŽICOVÝCH DAT

Bakalářská práce

Josef Chrást

srpen 2010 Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením školitele RNDr. Přemysla Štycha, Ph.D., a že jsem všechny použité materiály řádně ocitoval.

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

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

V Radešínské Svratce dne 24. srpna 2010 …….

Josef Chrást

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Přemyslu Štychovi, Ph.D. za věnovaný čas, pomoc a užitečné rady při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat odbornému asistentovi RNDr. Martinu Haisovi, Ph.D. z Katedry biologie ekosystémů Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity za poskytnutá data a odborné rady v oblasti monitorování kalamity kůrovce v lesních porostech na Šumavě a spolužačce Bc. Veronice Oubrechtové za cenné rady při přípravě družicových dat v SW BEAM.

Možnosti hodnocení kalamit lesních ploch pomocí družicových dat

Abstrakt

V této práci jsou zkoumány možnosti využití dat středního prostorového rozlišení MERIS pro účely monitorování kalamit lesních ploch.

Cíl práce je zaměřen na monitorování kůrovcové nákazy v pohoří Šumava. K tomuto účelu byla využita časová řada snímků MERIS z období 2002 – 2009. Spektrální chování poškozeného jehličnatého porostu bylo analyzováno na základě hodnot vybraných vegetačních indexů (NDVI, LAI, LAI.Cab, fCover, fAPAR a tří nově definovaných indexů) a jejich časového vývoje. Výsledky byly porovnány s hodnotami pro zdravý lesní porost.

Dosažené hodnoty spektrálních indexů prokázaly schopnost dat MERIS monitorovat lesní disturbance regionálního charakteru.

Klíčová slova: kůrovec, vegetační indexy, MERIS

Evaluation of forest calamities using the remote sensing data

Abstract

The objective of this paper is to evaluate possibilities of medium-spatial resolution satellite data assimilation for monitoring of the forest disturbances.

The aim of the study is to monitore the bark beetle outbreak in the Šumava Mountains. For this purpose were used eight MERIS scenes from 2002 to 2009. Spectral response of the damaged spruce stands has been analyzed on the based of the values of selected vegetation indices (NDVI, LAI, LAI.Cab, fCover, fAPAR and three newly defined indices) and their temporal progress. The results were compared with values for healthy forests.

The values of spectral indices have shown the ability of data MERIS to monitor forest disturbances at regionale scale.

Keywords: bark beetle, vegetation indices, MERIS

OBSAH

Přehled použitých zkratek **7**

Seznam obrázků a tabulek **9**

1 Úvod **10**

1.1 Úvodní slovo 10

1.2 Cíle práce 10

2 Úvod do problematiky **12**

2.1 Definice dálkového průzkumu Země 12

2.2 Fyzikální podstata dálkového průzkumu 13

2.3 Radiometrické veličiny 14

2.4 Elektromagnetické spektrum a vznik záření 14

2.5 Zdroje záření v DPZ 15

2.6 Interakce elektromagnetického záření se zemskou atmosférou 15

2.6.1 Rozptyl záření v atmosféře *16*

2.6.2 Absorpce záření v atmosféře *16*

3 Spektrální chování objektů **18**

3.1 Vegetace 19

3.1.1 Spektrální vlastnosti listu *19*

3.1.2 Spektrální odrazivost poškozené vegetace *21*

3.1.3 Faktory ovlivňující odrazivost vegetace *21*

4 Vegetační indexy **23**

4.1 Aplikace vegetačních indexů v lesnictví 24

4.2 Vegetační indexy založené na datech z družic Landsat 24

4.2.1 Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI) *25*

4.2.2 Lineární transformace „Tasseled Cap“ *26*

4.2.3 Indexy DI, NDMI, NDWI a NMDI *29*

4.3 Vegetační indexy nad daty MERIS 29

4.4 Aplikace vegetačních indexů při monitorování kalamity kůrovce 30

5 Data a metodika ... 34

5.1 Data ... 34

5.1.1 MERIS ... 34

5.1.2 Vektorová data ... 36

5.2 Software ... 36

5.2.1 EOLi-SA (Earth Observation Link – Stand Alone) ... 37

5.2.2 BEAM (Basic ENVISAT Toolbox for (A)ATSR and MERIS) ... 37

5.3 Metodika ... 37

5.3.1 Studované území ... 37

5.3.1 Výběr dat ... 39

5.3.2 Příprava dat ... 40

5.3.3 Zpracování dat ... 44

6 Výsledky ... 46

7 Shrnutí a diskuze ... 53

8 Závěr ... 55

Seznam zdrojů informací ... 57

Seznam příloh ... 60

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

AATSR	**A**dvanced **A**long **T**rack **S**canning **R**adiometer
AERONET	**Ae**rosols **Ro**botic **NET**work
AOD	**A**erosol **O**ptical **D**epth
BEAM	**B**asic **E**NVISAT Toolbox for (A)**A**TSR and **M**ERIS
DI	**D**isturbance **I**ndex
DPZ	**D**álkový **p**růzkum **Z**emě
ECMWF	**E**uropean **C**entre for **M**edium-Range **W**eather **F**orecasts
ENVISAT	**E**nvironment **S**attelite
EOLi-SA	**E**arth **O**bservation **Li**nk **S**tand **A**lone
ESA	**E**uropean **S**pace **A**gency
ETM+	**E**nhanced **T**hematic **M**apper Plus
fAPAR	**F**raction of **a**bsorbed **p**hotosynthetically **a**ctive **r**adiation
fCover	**F**raction of green vegetation **cover**age
FR	**F**ull **R**esolution
GETASSE 30	**G**lobal **E**arth **T**opography **A**nd **S**ea **S**urface **E**levation at **30** arc sekond resolution
CHKO	**C**hráněná **k**rajinná **o**blast
IČ	**I**nfra**č**ervené záření
LAI	**L**eaf **A**rea **I**ndex
LAI.Cab	**L**eaf **A**rea **I**ndex of **ca**nopy
MERIS	**Me**dium **R**esolution **I**maging **S**pectrometer
MODIS	**Mod**erate Resolution **I**maging **S**pectroradiometer
MW	**M**ikro**w**ave
NASA	**N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration
NBR	**N**ormalized **B**urn **R**atio
NDMI	**N**ormalized **D**ifference **M**oisture **I**ndex
NDVI	**N**ormalized **D**iference **V**egetation **I**ndex
NDWI	**N**ormalized **D**ifference **W**ater **I**ndex
NMDI	**N**ormalized **M**ulti-**D**rought **I**ndex
NP	**N**ár**o**dní **p**ark
PEAK	**P**olynomial **A**pproximation with **E**xponential Kernel

PVI	**P**erpendikular **v**egetation **i**ndex
RR	**R**educe **R**esolution
RVI	**R**atio **V**egetation **I**ndex
SMAC	**S**implified **M**ethod for **A**tmospheric **C**orrection
SW	**S**oftware
TC	**T**asseled **C**ap
TIN	**T**riangulated **I**rregular **N**etwork
TM	**T**hematic **M**apper
TOA	**T**op **o**f **A**tmosphere
TVI	**T**ransformed **V**egetation **I**ndex
UTC	**C**oordinated **U**niversal **T**ime
UTM	**U**niversal **T**ransverse **M**ercator
V	**V**iditelné záření
VI	**V**egetační **i**ndex
WGS 84	**W**orld **G**eodetic **S**ystém 19**84**
ZABAGED	**Zá**kladní **báze** **ge**ografických **d**at

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 2.1: Schéma elektromagnetické vlny 13
Obr. 2.2: Elektromagnetické spektrum 14
Obr. 2.3 Spektrální propustnost atmosféry 17
Obr. 3.1 Spektrální křivky odrazivosti pro vybrané druhy povrchů 18
Obr. 3.2 Spektrální projev „průměrného listu“ 20
Obr. 3.3 Spektrální křivka odrazivosti zdravé a poškozené vegetace 21
Obr. 4.1 Hodnoty NDVI u zdravé a poškozené vegetace 26
Obr. 4.2 Hodnoty indexů „Brightness“ (TC1) a „Greenness (TC2) 27
Obr. 4.3 Ukázka výsledku TC transformace (index „Greenness“) 28
Obr. 4.1 Bezzásahová oblast 31
Obr. 4.2 Holiny 32
Obr. 5.1 Studované území 38
Obr. 5.2 Proces přípravy zájmového území 39
Obr. 5.3 Nezpracovaný snímek MERIS z roku 2003 v prostředí SW BEAM 40
Obr. 5.4 Spektrální křivky odrazivosti vegetace a vybraná pásma MERIS 42
Obr. 5.5 Spektrální křivka odrazivosti chlorofylu a 43
Obr. 6.1 NDVI index 46
Obr. 6.2 LAI index 47
Obr. 6.4 fCover, fAPAR 48
Obr. 6.5 Index 9/10 49
Obr. 6.6 Index 9/12 50
Obr. 6.7 Index 2/5 50

Tab. 2.1 Radiometrické veličiny 14
Tab. 4.1 Poměrové vegetační indexy 23
Tab. 4.2 Ortogonální vegetační indexy 24
Tab. 5.1 Přehled spektrálních pásem MERIS 35
Tab. 5.2 Úrovně zpracování dat MERIS 35
Tab. 5.3 Snímky MERIS použité v této práci 36

KAPITOLA 1
Úvod

1.1 Úvodní slovo

Hlavní motivací při výběru tématu bakalářské práce byla snaha o prohloubení znalostí v problematice dálkového průzkumu Země. Přece jenom koho by nelákalo podívat se na svět očima doslova z ptačí perspektivy. Zároveň tématika přírodních katastrof je oblast sama o sobě velice interesantní. V poslední době se stále častěji a ve větší míře máme možnost setkávat s různými přírodními živly v podobě povodní, lesních požárů, větrných pohrom, atd. Intenzita a rozsah škod napáchaných na majetku hmotném, ale i duševním je ve stále se rozrůstajícím světě čím dál větší. Náhlé i očekávané přírodní pohromy postihují a ovlivňují ekonomickou, sociální, ale i kulturní sféru lidské činnosti. Metody dálkového průzkumu Země, v našem případě využití družicového snímkování, nám mohou pomoci alespoň částečně pochopit podstatu těchto přírodních procesů. V lidských silách nejspíše nikdy nebude schopnost těmto ničivým silám zabránit. Na základě různých analýz získaných údajů však můžeme alespoň minimalizovat možné ztráty. S vývojem družicových systému se postupně rozšiřovalo i spektrum oblastí, ve kterých mohou být družicová data aplikována. Ať už se jedná o zemědělství, lesnictví, atmosférické aplikace, výzkum oceánů, atd. V případě této práce bude praktická část zaměřena na monitorování kalamity kůrovce v lesních porostech na Šumavě. Dosažené výsledky budou diskutovány především s prací Dr. Martina Haise z Jihočeské univerzity, který se touto problematikou zabývá již delší dobu.

1.2 Cíle práce

Před začátkem práce bylo nutné vytyčit základní cíle a hypotézy s ohledem na charakter vstupních dat a charakter studovaného území. V tomto směru mi velmi pomohla diskuze s Dr. Martinem Haisem. Původně totiž měly být využity i snímky ze senzoru AATSR, avšak tato možnost byla s ohledem na jejich nízké prostorové rozlišení (1 200 × 1 200 m) a velikost zájmového území (cca 25 km^2) zavrhnuta. Za rozhodnutím stál předpoklad, že studované území je pro aplikaci těchto dat příliš malé, a tak by nebylo možné získat relevantní informace. Druhá část diskuze byla zaměřena na použitou metodiku při zpracování snímků senzoru MERIS. Při

výzkumu v této oblasti již byly aplikovány snímky s vysokým prostorovým rozlišením Landsat (Hais. a kol., 2009), avšak nebyly využity snímky středního prostorového rozlišení MERIS. Určitým specifikem těchto snímků je jejich vysoké časové rozlišení 3 dny. Této skutečnosti by bylo možné využít například při sledování vývoje nákazy v průběhu roku. Avšak s odkazem na práci Dr. Haise byla zvolena metoda temporální analýzy série dostupných snímků z let 2002 až 2009, aby bylo možné vytvořit určité srovnání mezi dosaženými výsledky z dat Landsat a dat MERIS. Hlavní cíl práce je zaměřen zhodnocení kalamit lesních ploch pomocí družicových dat se zaměřením na data senzoru MERIS. Jelikož praktická část se bude týkat monitorování kůrovcové kalamity na Šumavě, dalším cílem bude srovnání dosažených výsledků s výsledky práce Dr. Haise.

Práce je postavena na dvou hypotézách. První je obecnější a tvrdí, že data MERIS jsou vhodná při monitorování kalamity kůrovce. K tomuto účelu poslouží srovnání hodnot vybraných spektrálních indexů nad oblastí postiženou kalamitou a nad zdravým lesem. Druhá hypotéza je postavena na výsledcích práce Dr. Haise a tvrdí, že ve sledovaném období 2002 – 2009 již dochází k procesu regenerace napadeného porostu. Pro potvrzení nebo vyvrácení této hypotézy poslouží trajektorie vývoje použitých indexů ve sledovaném období.

Součástí textu bude mimo jiné i teoretická část, která by měla podat obecný úvod do problematiky dálkového průzkumu Země a přiblížit výzkum v oblasti monitorování kalamit lesních ploch.

KAPITOLA 2
Úvod do problematiky

Cílem této části práce je vytvořit obecný úvod do problematiky dálkového průzkumu Země a podat stručný přehled možných literárních zdrojů, které mohou být k tomuto účelu využity. S ohledem na téma bakalářské práce bude v této části zároveň podána rešerše literatury, jenž se zabývá hodnocením kalamit lesních ploch z pohledu družicových dat. Důraz bude kladen na možností využití různých vegetačních indexů v této problematice.

2.1 Definice dálkového průzkumu Země

Metody dálkového průzkumu Země lze přiblížit z několika úhlů pohledu. Lze na ně pohlížet přes tradiční konvenční definice publikované v pracích českých autorů jako např. Čapek (1988), Kolář (1989) nebo Dobrovolný (1998), tak i zahraničních autorů Lillesand, Kiefer (1994), Campbell (1996). Druhou možností jsou nekonvenční definice uvedené například v Dobrovolný (1998). V této práci si vystačíme pouze s tradičními konvenčními definicemi.

V českém prostředí jsou podány definice dálkového průzkumu Země především ve vysokoškolských skriptech a odborných knižních publikacích. Dálkový průzkum Země (dále DPZ) můžeme definovat jako „*získávání informací o zemském povrchu na dálku pomocí snímacích zařízení, umístěných obvykle v letadlech nebo družicích. Zahrnuje jednak samotné snímání, jednak vyhodnocování pořízených záznamů*“ Čapek (1988). Naopak Kolář (1989) alespoň náznakem zmiňuje fyzikální podstatu této metody: „*Dálkový průzkum Země je založen na poznatku, že pro každý fyzikální objekt a jeho stav je charakteristický způsob, jakým ovlivňuje okolní silová pole. Měřením charakteristik polí lze zpětně zjistit údaje o objektu bez toho, abychom se s ním dostali do přímého kontaktu.*“ Určitým charakteristickým a podstatným rysem, jenž se vyskytuje ve většině definic DPZ, je, že se jedná o metodu zkoumání povrchu Země, aniž bychom byli s tímto objektem zájmu v přímém kontaktu. Tento fakt názorně zmiňují Novák, Murdych (1988), kteří pod pojmem DPZ rozumí „*měření nebo získávání informací o prostředí a objektech na dálku pomocí záznamových zařízení, která nejsou v přímém kontaktu se studovanými objekty a jevy. Jde především o zachycování elektromagnetického záření pomocí fotografickými a televizními kamerami, radiometry atd. DPZ má tyto fáze (etapy): pořizování, přenos, zpracování a interpretace snímků.*“

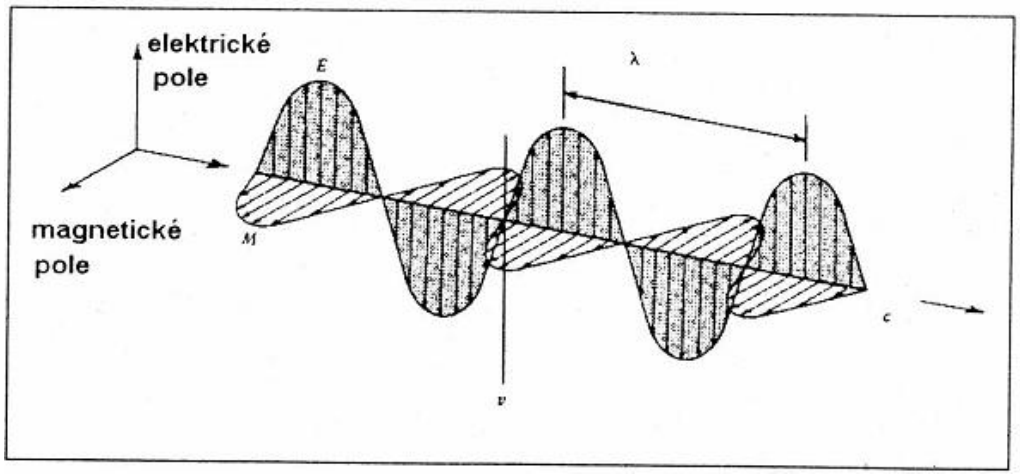
Pro srovnání je vhodné uvést i definice zahraničních autorů. Například Campbell (1996) definuje DPZ jako *„způsob získávání informací o zemském povrchu i vodních plochách s využitím snímků pořízených z ptačí perspektivy, využívá elektromagnetického záření v jednom nebo více intervalech spektra, toto záření je odráženo nebo emitováno ze zemského povrchu.“* Poměrně vyčerpávající definici podává také Sabins (1978), jenž DPZ zmiňuje jako metodu *„shromažďování informací o objektech bez fyzického kontaktu s nimi. Letadla a družice jsou běžnými nosiči, ze kterých se tato měření na dálku provádějí. Termín dálkový průzkum je omezen na metody, které využívají elektromagnetického záření jako prostředku ke zjišťování objektů a měření jejich charakteristik.“* Takovéto podání v sobě zakomponovává jak fyzikální podstatu, tak i zmíněný faktor, že nejsme se zkoumanými objekty a jevy v přímém kontaktu.

2.2 Fyzikální podstata dálkového průzkumu

Z definic DPZ, které byly uvedeny v kapitole 1.1, vyplývá, že fyzikální podstata této metody spočívá na měření elektromagnetického pole objektu, které má charakter elektromagnetického záření. Energie tohoto záření spočívá ve vlnění – šíří se tedy prostorem ve tvaru tzv. elektromagnetické vlny (Dobrovolný, 1998).

Elektromagnetická vlna je tvořena dvěma základními částmi, tzv. elektrickým a magnetickým polem (viz. obr. 2.1). V homogenním izotropním prostředí jsou na sebe tato pole kolmá, ve směru šíření jsou rovnoběžná a šíří se rychlostí světla (c). Elektromagnetickou vlnu můžeme charakterizovat pomocí dvou základních veličin, tzv. vlnové délky (λ) a frekvence (ν). Jak je patrné z obrázku 2.1, vlnová délka je vzdálenost dvou sousedních vrcholů vlny. Frekvence je charakterizována jako počet vrcholů vlny procházejících fixním bodem za jednotku času. Vztah mezi frekvencí a vlnovou délkou tvoří nepřímá úměra $\lambda = c / \nu$ (Dobrovolný, 1998).

Obr. 2.1: Schéma elektromagnetické vlny



Zdroj: Dobrovolný (1998)

2.3 Radiometrické veličiny

Základem pro použití metod DPZ je existence měřitelného elektromagnetického záření, jenž je emitováno nebo odráženo ze zemského povrchu. Fyzikální jev, který tvoří samotný princip metod DPZ, je interakce tohoto elektromagnetického záření se zkoumaným látkovým objektem. Energie výsledného záření, neboli zářivá energie (Q), udává informaci o průběhu interakce. Takto naměřené hodnoty vyjadřujeme pomocí fyzikálních veličin, které nazýváme radiometrické veličiny (viz. tab. 2.1). Na základě vyhodnocení naměřených radiometrických veličin lze zpětně určit hledané charakteristiky zkoumaného objektu.

Tab. 2.1 Radiometrické veličiny

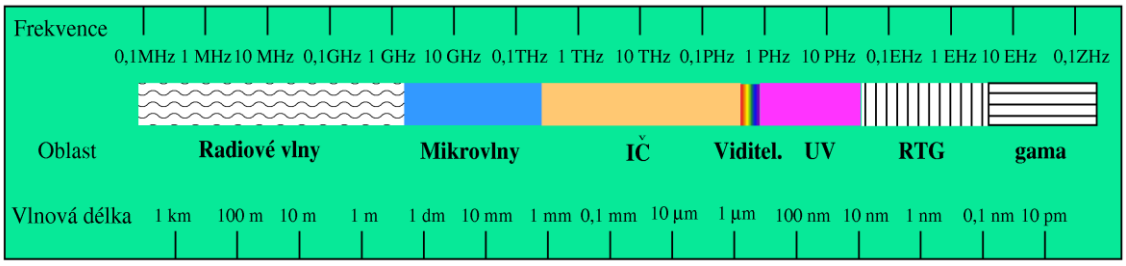
Veličina	Symbol	Fyzikální rozměr
zářivá energie	Q	J
zářivý tok	Φ	W
intenzita vyzařování	M	$W.m^{-2}$
intenzita ozařování	E	$W.m^{-2}$
zářivost	I	$W.sr^{-1}$
zář	L	$W.m^{-2}.sr^{-1}$

Zdroj: Kolář a kol. (2000)

2.4 Elektromagnetické spektrum a vznik záření

Elektromagnetické záření vzniká při zrychleném nebo zpomaleném pohybu nabité částice. V přírodě se toho záření vyskytuje ve spojitém spektru (viz. obr. 2.2), jenž má rozsah téměř dvaceti řádů. Na základě vlnové délky nebo frekvence lze spektrum rozdělit do několika základních druhů elektromagnetického záření. V DPZ se používají především vlnové délky viditelného (V), infračerveného (IČ) a mikrovlnného záření (MW) (Kolář a kol., 2000).

Obr. 2.2: Elektromagnetické spektrum



Zdroj: http://wikimedia.org

Viditelné záření je definováno intervalem vlnových délek od 380 nm do 720 nm. Pouze na tyto vlnové délky je lidské oko citlivé a na základě jeho existence je schopno barevného vjemu okolí. Viditelné záření je tvořeno třemi základními částmi. Oblast modrého viditelného záření je patrná v rozsahu od 380 nm do 500 nm, zelená oblast od 500 nm do 600 nm a červená oblast od 600 nm do 720 nm. Tato část spektra se stala historicky nejvyužívanější oblastí, avšak postupně je stále více nahrazována infračervenou a mikrovlnnou částí spektra. Jeho využitelnost je značně omezena na množství různých aerosolů v atmosféře, neboť těmito je silně rozptylováno a

pohlcováno, především tedy oblačností a mlhou. Jistá výhoda oproti částem spektra o větších vlnových délkách (infračervená a mikrovlnná část) je schopnost především modré části viditelného záření pronikat vodním sloupcem. Lze tedy studovat mnoho fyzikálních a biologických vlastností vodních objektů. Naopak odlišnosti například minerálů, hornin a půd jsou v této části spektra téměř nepostižitelné (Dobrovolný, 1998).

Infračervená část spektra je rozdělena na tři pásma (blízké, střední a daleké IČ) v celkovém rozpětí od 720 nm do 2500 nm. Možnost využít záření o vlnové délce větší než 2 500 nm je však již značně omezená, neboť toto záření je v zemské atmosféře silně pohlcováno. Blízké infračervené záření se chová velmi podobně jako viditelné, avšak již v takové míře nepodléhá atmosférickým vlivům. Využívá se především pro monitorování lesních porostů a zemědělských ploch. Střední infračervené záření obsahuje dvě atmosférická okna okolo hodnot 1,5 μm a 2,2 μm, které lze využít při monitorování druhů vegetace, jejího zdravotního stavu, rozpoznávání ledu a sněhu a odlišení oblačnosti. Atmosférické okno se středem okolo 2,2 μm je vhodné pro monitorování přítomnosti některých minerálů, neboť na této hodnotě mají svůj charakteristický absorpční pás. Daleké neboli tepelné infračervené záření, jak napovídá sám název, se využívá při získávání poznatků o tepelné bilanci objektů (např. zjišťování povrchové teploty oceánů, teplotního znečistění řek a jezer, teplotní bilanci krajiny, lokalizaci lesních požárů,…).

Vlnový rozsah mikrovlnné části spektra je značný, od 0,8 cm do 100 cm, a proto je rozděleno do několika pásem (Ka, K, Ku, X, C, S, L, P). Ze všech uvedených oblastí spektra nejméně závisí na počasí. Je ovlivňováno pouze vydatným deštěm, proto je využíváno především v meteorologických aplikacích při zjišťování rozsahu a intenzity srážek (Dobrovolný, 1998).

2.5 Zdroje záření v DPZ

K měření vyzařovaného nebo odraženého elektromagnetického záření zkoumaného objektu se využívá přístrojů umístěných především na balónech, letadlech, umělých družicích a kosmických lodích.

Dle zdroje měřeného záření lze rozlišit dvě základní metody DPZ. Jedná se o tzv. aktivní a pasivní metodu. Aktivní metoda využívá umělého zdroje záření, který je umístěn na nosiči společně s měřící aparaturou. Takto se využívá především radarů, v menší míře i laserů. Pasivní metodou rozumíme měření přírodního záření, tj. teplotní záření emitované objektem nebo odražené sluneční záření (Kolář, 1989).

2.6 Interakce elektromagnetického záření se zemskou atmosférou

Definice DPZ, které byly uvedeny v kap. 2.1, obsahují mimo jiné informaci, že se jedná o metody získávání informací o objektech, popř. jevech, aniž bychom byli s těmito předměty zájmu v přímém kontaktu. Měřící zařízení používaná v DPZ jsou umístěna na letadlech, balonech, umělých družicích nebo kosmických lodích, které se pohybují buď přímo v zemské atmosféře, anebo nad ní. Elektromagnetický paprsek, který je těmito přístroji vysílán a zpětně

zachycován, musí proto projít nehomogenním prostředím zemské atmosféry. Ta je tvořena hmotou, počínaje atomy, konče velkými přírodními i umělými útvary na zemském povrchu nebo v atmosféře. Každá tato nehomogenita působí změny v elektrofyzikálních i geometrických charakteristikách elektromagnetického záření (Kolář, 1989).

Do jaké míry je elektromagnetické záření zemskou atmosférou ovlivněno, záleží jednak na délce dráhy, kterou toto záření prochází atmosférou, dále na velikosti emitovaného signálu, vlnové délce a v neposlední řadě také na atmosférických podmínkách. Tyto podmínky mají vliv na intenzitu a spektrální složení záření, které je ovlivněno především rozptylem a absorpcí.

Hodnoty radiometrických veličin, které naměříme při DPZ, jsou vždy tvořeny ze dvou aditivních částí. Jedna bude vyjadřovat odrazivost nebo emisivitu zemského povrchu modifikovanou rozptylovými a absorpčními vlastnostmi atmosféry a druhá samotné rozptylové a emisní vlastnosti atmosféry (Kolář a kol., 2000).

2.6.1 Rozptyl záření v atmosféře

Rozptylující částice jsou tvořeny molekulami plynů nebo aerosoly (pevné a kapalné částice v zemské atmosféře). Dle poměru velikosti dané částice k vlnové délce rozlišujeme tři základní typy rozptylu.

Rayleighův (molekulární) rozptyl způsobují částice, které mají mnohem menší rozměr než vlnová délka záření. Tímto způsobem je ovlivněno především viditelné záření a v menší míře infračervené záření. Příkladem Rayleighova rozptylu je například modrá barva oblohy nebo její načervenalé zabarvení při východu a západu Slunce.

Druhým typem rozptylu, je tzv. aerosolový rozptyl, který vzniká v případě, kdy průměry rozptylujících částic jsou větší než vlnová délka. K takovýmto částicích patří například vodní pára nebo prachové částice. Efekt aerosolového rozptylu je nejsilnější v oboru viditelného a infračerveného záření (Kolář a kol., 2000).

Třetí typem rozptylu je tzv. neselektivní rozptyl, tedy takový, který na rozdíl od Rayleighova a aerosolového rozptylu nezávisí na vlnové délce. V tomto případě jsou rozptylující částice tvořeny především velkými částicemi jako například vodními kapičkami. Neselektivní rozptyl způsobuje stejně intenzivní rozptyl všech vlnových délek ve viditelné části spektra (Dobrovolný, 1989). Tomuto typu rozptylu vděčí za svoji bílou barvu jak oblaka, tak například mlha.

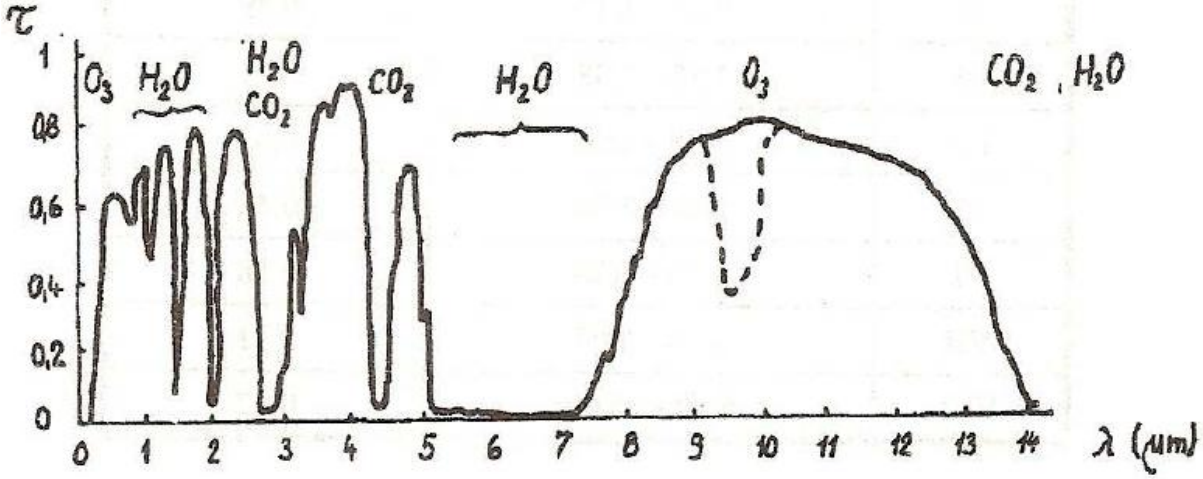
2.6.2 Absorpce záření v atmosféře

Absorpce elektromagnetického záření je v zemské atmosféře uskutečňována výhradně plynnými složkami. Podíl aerosolové absorpce je zanedbatelný. Jak je z obr. 2.3 patrné, propustnost molekul vody, páry, ozonu nebo oxidu uhličitého, je v určitých částech viditelné a infračervené části spektra velmi silná a vytváří charakteristické tzv. absorpční pásy. Tyto pásy prakticky znemožňují zaznamenávat a měřit intenzitu elektromagnetického záření.

Pro DPZ jsou důležité především oblasti mezi hlavními absorpčními pásy. Tyto části elektromagnetického spektra, které jsou absorpcí a rozptylem ovlivňovány jenom minimálně, se nazývají tzv. atmosférická okna. Hlavní atmosférická okna se nacházejí především ve viditelné

části spektra, v intervalech 3-5 μm a 8-14 μm v oblasti tepelného infračerveného záření a také v mikrovlnné oblasti.

Obr. 2.3 Spektrální propustnost atmosféry



Pozn.: *Absorpční vlastnosti částic jsou vyjádřeny pomocí její propustnosti (τ). Při zanedbání rozptylu je možné ji popsat jako doplněk do jedné.*
Zdroj: Kolář a kol. (2000)

KAPITOLA 3

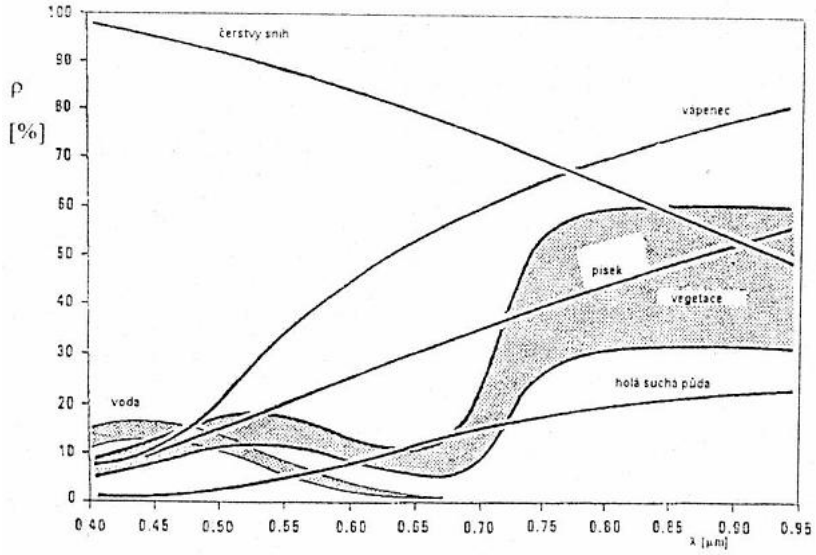
Spektrální chování objektů

Podstata DPZ je založena na existenci elektromagnetického záření, které měříme. Jedná se buď o záření odražené od objektu nebo záření emitované objektem, resp. látkou. Měřící přístroje zaznamenávají intenzitu tohoto záření, která je závislá na elektromagnetických vlastnostech dané látky. Tyto vlastnosti jsou závislé na druhu látky nebo objektu, okamžitém fyzikálním stavu a také na stavu okolí (Kolář a kol. 2000). Na základě znalosti odrazivých vlastností krajinných objektů lze zpětně z naměřených intenzit záření určit, o jakou látku se jedná. To je princip zjišťování informací metodou dálkového průzkumu.

Při určování druhu a stavu měřené látky se využívá kvalitativních a kvantitativních parametrů. Druhové (kvalitativní) parametry určují druh objektu (např. dům, rybník, les,...), stavové (kvantitativní) parametry spíše popisují sledovaný objekt (např. výška, stáří, vlhkost,...).

Každé kombinaci druhových a stavových parametrů popisujících konkrétní objekt lze přiřadit tzv. spektrální charakteristiku. Spektrální charakteristika je založena na vztahu mezi odraženým nebo emitovaným zářením dané látky a vlnovou délkou. Tento vztah je vyjádřen pomocí tzv. spektrální křivky odrazivosti určující spektrální chování objektu (viz. obr. 3.1).

Obr. 3.1 Spektrální křivky odrazivosti pro vybrané druhy povrchů



Zdroj: Dobrovolný (1998)

Spektrální křivky odrazivosti mají pro stejnou třídu objektů (např. vegetace, holá půda,...) vždy typický průběh (Dobrovolný, 1998), jak je patrné z obr. 3.1. Protože žádný objekt v krajině není homogenní, křivka spektrální odrazivosti pro různé elementy krajiny není tvořena pouze tenkou linií, ale spíše pásem (viz. obr. 3.1 – vegetace, voda). Tento pás vymezuje obor hodnot, kterých může odrazivost nabývat v závislosti na změnách fyzikálních vlastností objektu (např. vodního obsahu, teploty objektů, atd.). Dalším faktem je chemické složením objektu, které je heterogenní. Hornina je složena z několika minerálů, les je tvořen jak listnatými, tak jehličnatými stromy. Další změny v průběhu spektrální křivky odrazivosti způsobují i externí vlivy atmosféry, kterou se odražené nebo emitované záření šíří.

Krajinné objekty lze rozdělit do čtyř základních skupin, jenž mají specifické zářivé vlastnosti a jenž lze dobře popsat pomocí charakteristických spektrálních křivek odrazivosti. Do této skupiny patří vegetační povrch, pevný povrch bez vegetace, voda a plynné látky.

3.1 Vegetace

Vegetační povrch tvoří významný celek krajiny, který je zastoupen téměř na všech letadlových i družicových záznamech zemského povrchu. Výjimku tvoří pouze pouštní a polární oblasti. Metodou DPZ jsou zkoumány především homogenní vegetační celky tvořené jedním rostlinným druhem, např. travní společenstva, zemědělské plodiny, jehličnaté a listnaté lesy. V případě stromových porostů jsou zkoumány i jednotlivé stromy.

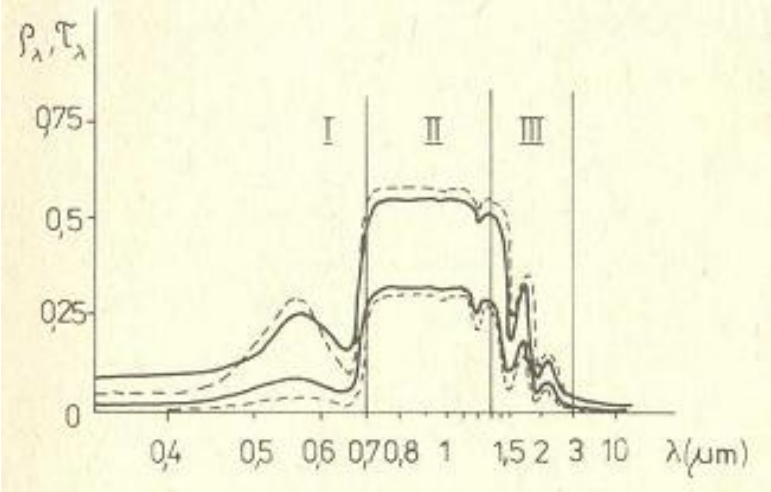
Spektrální chování každého takovéhoto vegetačního celku je utvářeno výslednicí odrazivých a emisních vlastností různých částí rostliny i jejího pozadí. Dominantní vliv na celkový tvar spektrální křivky mají především odrazové vlastnosti listů. Proto znalost spektrálního projevu listů umožňuje odvodit a lépe pochopit spektrální charakteristiky celého porostu (Kolář, 1989).

3.1.1 Spektrální vlastnosti listu

Průběh spektrální křivky odrazivosti se liší v závislosti na rostlinném druhu. Přesto lze vytvořit spektrální projev „průměrného listu“, jenž je typický pro vegetační element krajiny. Na každý list je nutné pohlížet jako na složitý a heterogenní útvar, jehož stavebními částmi jsou zejména buněčné tekutiny, celulózy, tuky, lignin, proteiny, cukry a oleje. Spektrální vlastnosti listu jsou výslednicí příspěvků od těchto prvků (Kolář a kol., 2000).

Průběh křivky spektrální odrazivosti vegetace je zachycen na obr. 3.2. Podle faktorů, které určují velikost spektrální odrazivosti, lze tuto křivku rozdělit na tři hlavní oblasti.

Obr. 3.2 Spektrální projev „průměrného listu“



Pozn.: plná čára – spektrální odrazivost (ρ_λ), čárkovaná čára – spektrální propustnost (τ_λ),

I – oblast pigmentační absorpce, II – oblast vysoké odrazivosti, III – oblast vodní absorpce

Zdroj: Kolář (1989)

Oblast pigmentační absorpce se téměř celá nachází ve viditelné části spektra v pásmu od 0,4 μm do 0,7 μm, oblast vysoké odrazivosti neboli buněčné struktury je tvořena pásmem v rozsahu od 0,7 μm do 1,3 μm a oblast vodní absorpce pásmem v rozsahu od 1,3 μm do 3,0 μm.

Průběh spektrální křivky odrazivosti v oblasti pigmentační absorpce nejvíce ovlivňují pigmentační látky obsažené v listech, především chlorofyl a karoten. Chlorofyl může tvořit až 65% listového pigmentu (Kolář a kol. 2000) a výrazně pohlcuje záření v oblasti modré (0,45 μm) a červené (0,65 μm) části spektra. Celkově je v této oblasti odráženo velmi malé množství záření, které vytváří nápadné maximum pouze v oblasti zelené části spektra (0,54 μm), jenž dává zdravému listu charakteristické zelené zbarvení. Vliv žlutých pigmentačních látek karotenu a xanthofylu se na zbarvení listů projevuje při stárnutí rostliny, neboť dochází k úbytku zeleného pigmentu chlorofylu. Díky tomu listy rostlin dostávají charakteristické žluté zabarvení. Některé rostliny v tomto období na místo chlorofylu produkují pigmentační látku anthokyan, která listy zbarvuje do červena.

Oblast buněčné struktury je charakteristická vysokými hodnotami odraženého záření, jenž jsou podmíněny nízkou pohltivostí buněk a několikanásobným odrazem uvnitř listu vlivem obsahu celulosy. Na rozhraní I. a II. oblasti v pásmu okolo 0,7 μm dochází k prudkému nárůstu odrazivosti, jenž tvoří typický znak pro vegetaci (viz. obr. 3.2). Tento fakt slouží jako indikátor zelené hmoty a na jehož základě jsou konstruovány vegetační indexy. O problematice vegetačních indexů bude pojednáno dále.

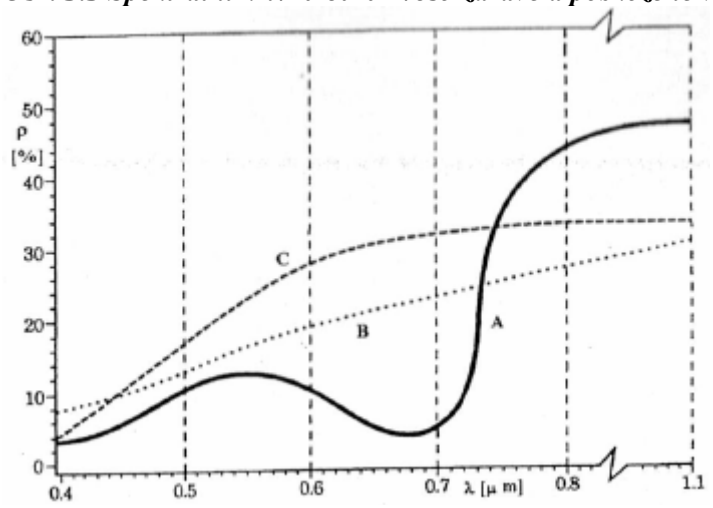
Třetí oblastí tvořící charakteristický průběh křivky spektrální odrazivosti vegetace je oblast vodní absorpce. Spektrální odrazivost v této oblasti je formována výraznými absorpčními pásy vody na vlnových délkách 1,4 μm, 1,9 μm a 2,7 μm. Pás na 2,7 μm je označovaný jako hlavní vibrační absorpční pás vody (Kolář a kol., 2000).

3.1.2 Spektrální odrazivost poškozené vegetace

Odrazivost vegetace ve viditelné části spektra závisí z převážné části na obsahu chlorofylu v rostlině. Ten je důležitý především z pohledu fotosyntézy rostlin, neboť dokáže pohlcovat velkou část viditelného záření, jehož energie je využívána v tomto procesu. Pokud je rostlina poškozena, obsah chlorofylu se výrazně snižuje. Tento fakt způsobuje snížení absorpce viditelného záření, tedy menší množství energie pro proces fotosyntézy, a rostlina odumírá.

Na obr. 3.2 lze porovnat, jak se tato skutečnost projeví na průběhu spektrální křivky odrazivosti. Obecně lze říci, že ve viditelné části spektra dojde vlivem snížení obsahu chlorofylu ke zvýšení odrazivosti a naopak ke snížení odrazivosti v blízké infračervené oblasti. Rozdíly mezi odrazivostí mezi $R_{bič}$ a $R_č$ jsou již téměř smazány. Křivka má nyní vyrovnanější průběh a rostoucí charakter bez lokálních maxim a minim.

Obr. 3.3 Spektrální křivka odrazivosti zdravé a poškozené vegetace



Pozn.: odrazivost zelené vegetace (A), suché půdy (B) a poškozené vegetace (C)
Zdroj: Dobrovolný (1998)

3.1.3 Faktory ovlivňující odrazivost vegetace

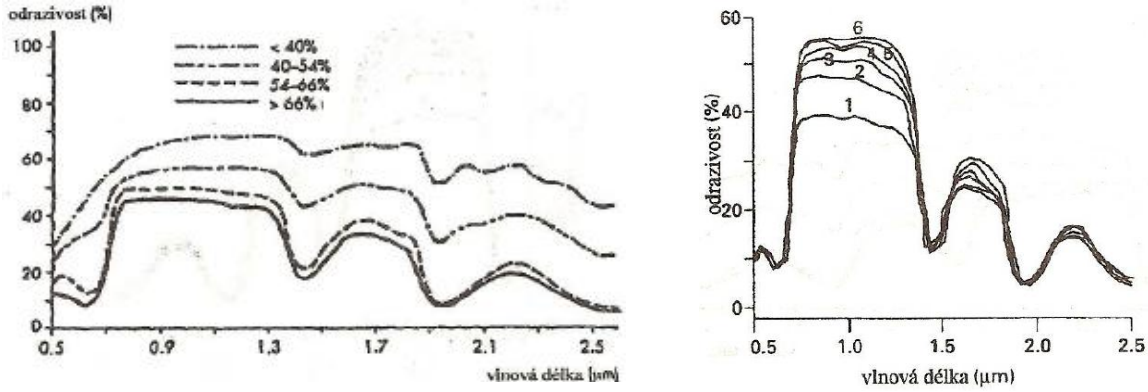
Výrazným faktorem, který ovlivňuje průběh spektrální odrazivosti vegetace, je obsah vody (viz. obr. 3.4). Jelikož oblast výrazné vodní absorpce se nachází v části středního infračerveného záření, budou změny vyvolané obsahem vody nejvýraznější právě v tomto oboru elektromagnetického spektra. V zásadě platí, že s poklesem obsahu vody v listech se jejich spektrální odrazivost zvyšuje (Kolář a kol., 2000).

Obsah vody a chlorofylu v listu rostliny je ovlivňován také složením půdy, zejména obsahem živin a přítomností některých minerálů (Kolář, 1989). Podle Campbella (1996) nedostatek některých minerálů (Fe, Mg) vede ke snížení obsahu chlorofylu a tím ke změně spektrálního chování v oblasti viditelného a infračerveného záření. Maximum v oblasti viditelného záření se přesouvá k červené části spektra a v oboru infračerveného záření dochází k výraznému poklesu odrazivosti. Následkem toho dochází ke žloutnutí listů.

Hodnoty odraženého záření jsou tvořeny příspěvky od různých částí rostliny a jejího okolí. Na výsledný průběh spektrální křivky odrazivosti bude mít proto vliv i vícenásobný odraz

v listoví (viz. obr. 3.4) a rozptyl na různě orientovaných listech v porostu v závislosti na výšce Slunce. Při intenzivním rozptylu záření uvnitř porostu, bude stoupat i celkové albedo porostu, především v oblasti zvýšené odrazivosti.

Obr. 3.4 Vliv obsahu vody a více vrstev vegetačního krytu na odrazivost



Zdroj: Kolář a kol. (2000)

Dalším činitelem ovlivňujícím množství odraženého záření vegetace je odrazivost půdy. Ta je uvažována v případě, pokud porost není příliš hustý. Jeho hustotu lze vyjádřit pomocí tzv. indexu listové plochy LAI (leaf area index), který vyjadřuje kolikrát je plocha listů větší než základna vertikálního sloupce, v němž jsou listy umístěny (Kolář, 1989). Při malých hodnotách LAI (1 až 3) není prokázána závislost mezi odrazivostí a výškou Slunce. Pro nezapojené porosty se odrazivost vegetace s výškou Slunce zvyšuje. V případě hustého porostu (LAI > 5) odrazivost s výškou Slunce klesá.

KAPITOLA 4

Vegetační indexy

Znalost spektrálního chování vegetace je využívána při konstrukci tzv. vegetačních neboli spektrálních indexů. Obecně lze vegetační indexy definovat jako produkty jednoduchých aritmetických operací s dvěma či více pásy multispektrálního obrazu (Dobrovolný, 1998). Metoda multispektrálního snímkování spočívá v pořizování snímků ve více spektrálních pásech v rozsahu od viditelné po mikrovlnnou část spektra. Při konstrukci vegetačních indexů jsou využívány především pásy z červené viditelné části a blízké infračervené oblasti spektra. Hodnoty v odrazivosti mezi těmito dvěma oblastmi totiž vykazují největší rozdíl, který je indikátorem přítomnosti zelené biomasy (viz. obr. 3.1). Systematicky lze vegetační indexy rozdělit do dvou skupin na tzv. poměrové a ortogonální indexy. V této kapitole bude uveden základní přehled nejčastěji používaných indexů bez jejich matematického vyjádření, neboť to se liší v závislosti na vstupních datech. Vybrané indexy budou podrobněji popsány v dalších kapitolách včetně jejich využití s uvedením možných literárních zdrojů.

Poměrové indexy dávají do vztahu jednoduchým nebo normovaným poměrem odrazivost v červené viditelné části spektra a v oblasti blízkého infračerveného záření. Jejich přehled je uveden v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Poměrové vegetační indexy

Název indexu	**Zkratka**
Vegetační index	VI
Jednoduchý poměrový vegetační index	RVI
Normalizovaný diferenční vegetační index	NDVI
Transformovaný vegetační index	TVI
Normalized difference moisture index*	NDMI
Normalized difference water index*	NDWI
Normalized burn ratio*	NBR
Normalized multi-band drought index*	NMDI

*Pozn.: * Indexy, jejichž odborný český překlad nebyl v dostupné literatuře nalezen.*
Zdroj: Dobrovolný (1989), Wang a kol. (2008), Gao (1996)

Ortogonální indexy jsou počítány jako lineární kombinace vybraných pásem multispektráního obrazu. Přehled vybraných ortogonálních indexů je uveden v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Ortogonální vegetační indexy

Název indexu	**Zkratka**
Perpendikular vegetation index*	PVI
"Tasseled Cap" index	TC
Disturbanční index	DI

*Pozn.: * Index, jehož odborný český překlad nebyl v dostupné literatuře nalezen.*
Zdroj: Dobrovolný (1989), Lillesand a Kiefer (1994), Healey a kol. (2005)

4.1 Aplikace vegetačních indexů v lesnictví

Dálkový průzkumu Země představuje důležitý a užitečný nástroj vhodný mimo jiné i pro výzkum v oboru lesnictví. S rozvojem DPZ a s tím související zlepšení prostorového, spektrálního, časového a radiometrického rozlišení dat vzrostl i potenciál pro výzkum lesních ekosystémů. Původní letecké snímkování bylo ve větší míře nahrazeno snímkováním družicovým. Výhodou této metody je schopnost vytvářet datový záznam v pravidelném gridu a provádět opakovaná měření stejného území v intervalu pouhých několika dnů. Zároveň jsou podávány ucelenější a mnohdy přesnější informace o těžko přístupných oblastech, kde je terénní průzkum velice náročný.

Hlavním cíle práce je zhodnotit možnosti využití družicových dat pro účely monitorování disturbancí lesních ploch. Ve vztahu k vegetačním indexům lze lesní disturbanci chápat jako *„jakýkoliv faktor, který způsobuje významnou redukci indexu listové plochy (LAI - leaf area index) po období delší než jeden rok“* (Waring, Running, 1998). Pokles listové plochy způsobuje celá řada faktorů jako např. hmyz, patogenní houby, atmosférické depozice, těžba lesních porostů apod. Vegetační indexy představují velmi účinný a často používaný nástroj při monitorování lesních disturbancí. Nejedná se pouze o snahu lokalizovat problematické oblasti. Z některých senzorů jsou k dispozici již několik desítek let dlouhé časové řady snímků, které je možné využít nejen k lokalizaci disturbance, ale i ke sledování jejího vývoje (Hais a kol., 2009; Kennedey a kol., 2007). Vegetační indexy jsou aplikovány při detekci a vývoji lesních požárů (Wang a kol. 2008), monitorování intenzity těžby lesních porostů (Wilson, Sader, 2002; Jin, Sader, 2005), lokalizaci a sledování vývoje kůrovcové nákazy (Hais a kol. 2009) apod. Velmi podrobný přehled lesních aplikací, ve kterých byla využita družicová data, podává Hais (2008).

4.2 Vegetační indexy založené na datech z družic Landsat

Při monitorování disturbancí lesních ploch jsou nejčastěji využívána data z družic Landsat (Hais a kol. 2009; Healey a kol., 2005; Kennedey a kol., 2007). Jedná se o multispektrální snímky s vysokým prostorovým rozlišením (30×30 m), jenž jsou pořizovány ve spektrálních pásmech viditelného záření, blízkého, středního a tepelného infračerveného záření. Právě díky vysokému prostorovému rozlišení a vhodnému výběru spektrálních pásem se stala data Landsat citlivým

nástrojem pro detekci lesních disturbancí především na regionální úrovni. K tomu lze připočíst i dobrou dostupnost těchto dat.

4.2.1 Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI)

Index NDVI je jedním z historicky nejvíce používaných vegetačních indexů sloužících k mapování vegetačního krytu (Gao, 1996). Jeho uplatnění najdeme především v lesnictví a zemědělství. NDVI má následující matematické vyjádření (Kolář a kol., 2000):

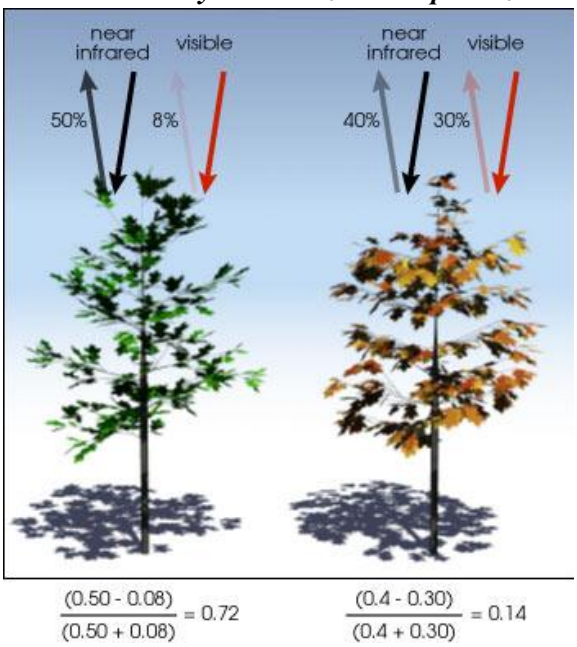
$$NDVI = (R_{bič} - R_č)/(R_{bič} + R_č)$$

kde $R_{bič}$ představuje hodnotu odrazivosti v blízké infračervené oblasti na vlnové délce okolo 0,86 μm a $R_č$ hodnotu odrazivosti v červené viditelné části spektra na vlnové délce okolo 0,66 μm. Odrazivost na vlnové délce 0,66 μm reprezentuje oblast vysoké chlorofylové absorpce. Naopak vysoká odrazivost na 0,86 μm je způsobená rozptylem záření v buněčné struktuře listu (viz. kap. 3.1.1). Proto zdravá vegetace by měla vykazovat vysoké hodnoty NDVI (viz. obr. 4.1).

Obor hodnot NDVI je definován intervalem od -1 do +1. Důležitou mezní hodnotou, která na snímcích vymezuje plochy pokryté pouze vegetací, je hodnota 0,4 a více (Wang a kol., 2008). Hodnoty blízké 1 indikují vysoký obsah listové biomasy, uzavřenost vegetačního krytu nebo listové plochy (Wilson, Sader, 2002). Jedná se tedy o velmi hustou vegetaci, především lesní porosty. Pro názornost jsou uvedeny orientační hodnoty NDVI pro další typy pokryvu zemského povrchu. U vodních ploch se hodnoty indexu pohybují okolo 0, podobně jako u sněhu, ledu a oblak. U holých půd se hodnota NDVI pohybuje okolo 0,2 a u částečně pokrytých půd vegetací v rozmezí 0,2 až 0,4 v závislosti na množství biomasy (Dobrovolný, 1998).

NDVI je využíván především pro potřeby odlišení vegetačního krytu od ostatních ploch. Takto klasifikované snímky poté slouží jako vstupní data pro další analýzy nad vegetačním pokryvem (Gao, 1996; Wang, 2008; Wilson, Sader, 2002). Dále je možné jej využít i jako indikátoru zdravotního stavu vegetace. Pro názornost je uveden příklad na obr. 4.1.

Obr. 4.1 Hodnoty NDVI u zdravé a poškozené vegetace



Pozn.: near infrared – odrazivost blízkého infračerveného záření, visible –odrazivost červeného viditelného záření, vzorec vlevo – NDVI zdravé vegetace, vzorec vpravo – NDVI poškozené vegetace
Zdroj: http://earthobservatory.nasa.gov

Poškozený lesní porost vykazuje nízké hodnoty NDVI typické spíše pro holou půdu, jak je patrné z obr. 4.1. Vlivem poškození dojde ke snížení indexu listové plochy LAI a na výsledné odrazivosti se mnohem více začne podílet odrazivost kůry a podrostu. Ty vykazují vyšší odrazivost ve viditelné části spektra. V infračervené oblasti dojde k vyrušení jejich vlivu, neboť odrazivost kůry je nižší, avšak suchá tráva vykazuje vyšší hodnoty odrazivosti. Proto blízké infračervené záření není samo o sobě příliš vhodné k monitorování zdravotního stavu vegetace (Hais, 2008). Lambert a kol. (1995) považují i samotný index NDVI za nevhodný při monitorování stupně poškození lesních porostů.

4.2.2 Lineární transformace „Tasseled Cap“

Transformace „Tasseled Cap“ byla původně navržena pro multispektrální mechanooptický skener MSS, kterým byly vybaveny první tři družice Landsat a také Landsat 5. Později byla tato transformace upravena i pro hodnoty získané z mutilspektrálního mechanooptického skeneru TM (Thematic Mapper), který byl umístěn na družice Landsat 5 a Landsat 7 (Huang a kol., 2001). Za vytvořením TC indexu stála původně snaha získat užitečný nástroj pro monitorování růstu zemědělských plodin, avšak bylo nalezeno uplatnění i v oboru lesnictví. Především v získávání informací o vlastnostech lesních porostů, jako například o jeho druhovém složení, stáří a struktuře.

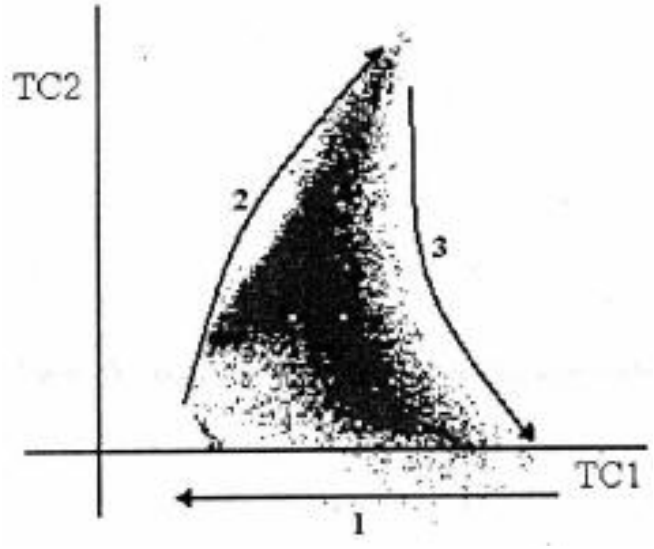
Podstata TC indexu je založena na lineární transformaci původních pásem multispektrálního obrazu do pásem nových. Každé takto vytvořené pásmo zvýrazňuje jinou biofyzikální charakteristiku krajiny. Vztaženo na multispektrální snímky skeneru TM jsou do této transformace zapojena všechna jeho pásma s výjimkou termálního. Výsledkem je vytvoření 6

nových transformovaných pásem. Pro další zpracování jsou nejdůležitější především první dvě (tři) pásma (TC1, TC2 a TC3), která nesou více jak 90% informací z pásem původních (Dobrovolný, 1998). Jedná se především o informace o spektrálním chování vegetačního krytu a půdního substrátu. Koeficienty TC transformace (skener TM) pro tyto tři pásma mají tvar (Lillesand, Kiefer, 1994):

$$TC1 = 0.2043TM1 + 0.4158TM2 + 0.5524TM3 + 0.5741TM4 + 0.3124TM5 + 0.2303TM7$$
$$TC2 = - 0.1603TM1 – 0.2819TM2 – 0.4934TM3 + 0.7940TM4 – 0.002TM5 – 0.1446TM7$$
$$TC3 = 0.0315TM1 + 0.2021TM2 + 0.3102TM3 + 0.1594TM4 – 0.6806TM5 – 0.6109\ TM7$$

Pásmo TC1 je také označováno jako index „Brightness“, který podává informace týkající se odrazivosti půdy. Indexem „Greenness“ je pojmenováno pásmo TC2. Jak samotný název napovídá je konstruován jako ukazatel množství zelené hmoty, neboť nejvíce vychází z rozdílu mezi odrazivostí v červené části spektra a v oblasti blízkého infračerveného záření. Pomocí hodnot těchto dvou indexů zanesených do dvourozměrného grafu (viz. obr. 4.2) lze popsat cyklus vegetační složky krajiny. Poslední pásmo TC3 představuje tzv. index „Wetness“, který je využíván při monitorování vlhkosti půdy a vegetace (Jin, Sader, 2005).

Obr. 4.2 Hodnoty indexů „Brightness“ (TC1) a „Greenness (TC2)

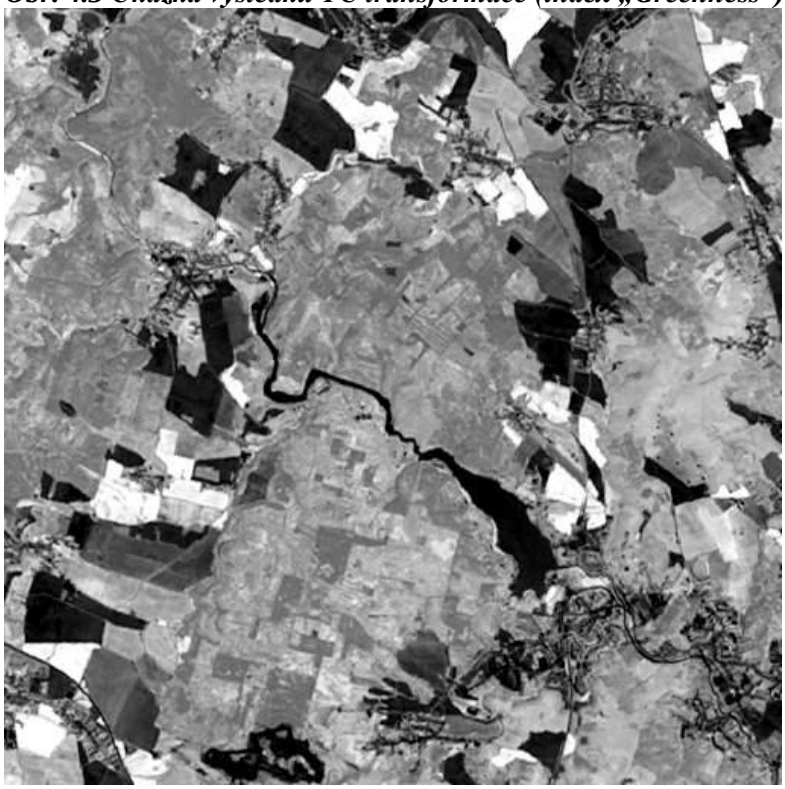


Pozn.: Šipky 1,2,3 znázorňují etapy vegetačního cyklu.
Zdroj: Dobrovolný (1989)

Jak je z obr. 4.2 patrné, na začátku vegetačního období převládá odrazivost holé půdy nad vegetačním krytem (1), proto převažují vysoké hodnoty indexu Brightness. Následný nárůst hodnot indexu Greenness a pokles hodnot indexu Brightness indikují postupný rozvoj vegetace až do stádia zralosti. Poslední fáze cyklu (3) znázorňuje konec vegetačního období, kdy vegetace postupně odumírá a převládá půdní složka, viz klesající hodnoty indexu Greenness na úkor indexu Brightness. Pro zajímavost lze uvést, že právě tomuto grafu vděčí TC index za svůj název, neboť tvarem připomíná čepici Santy Clause („Tasseled Cap“).

„Tasseles Cap“ index se stal široce rozšířeným nástrojem pro monitorování disturbancí lesních ploch. Tomu nasvědčuje velké množství vědeckých prací, jenž využívají tento index. Například Healey a kol. (2005) vytvořili různé kombinace indexů Brightness, Greenness a Wetness za účelem monitorování změn lesních ploch následkem těžby. Mimo jiné definovali zcela nový DI index (Disturbance index), vycházející právě z těchto tří indexů. Detekováním intenzity těžby lesních porostů pomocí indexu Wetness se ve své práci zabývají také Jin, Sader (2004). Autoři zároveň vytváří srovnání mezi tímto indexem a indexem NDMI (Normalized diference moisture index) ve schopnosti monitorovat lesní disturbance. Index Wetness byl mimo jiné využit i k monitorování disturbancí způsobených hmyzem (Wulder a kol., 2006). Zbylé dva komponenty TC transformace, indexy Brightness a Greenness, byly použity například Kuzerou a kol. (2005) k vyhodnocení následků odlesnění. Hais a kol. (2009) aplikovali indexy TC transformace (Brightness, Greenness a Wetness) a index DI na lesní plochy zasažené dvěma různými typy disturbance (plochy napadené kůrovcem a uměle vytvořené holiny zabraňující jeho dalšímu šíření).

Obr. 4.3 Ukázka výsledku TC transformace (index „Greenness“)



Pozn.: Světlé plochy značí vysoké hodnoty indexu „Greenness“, tedy oblasti s rozvinutým vegetačním krytem.

Zdroj: http://www.sci.muni.cz

4.2.3 Indexy DI, NDMI, NDWI a NMDI

Disturbanční index (DI) je tvořen jednoduchou lineární kombinací hlavních tří komponent TC transformace (Healey a kol., 2005):

$$DI = B - (G + W)$$

kde B představuje hodnotu indexu Brightness, G indexu Greenness a W indexu Wetness. Index DI byl původně vytvořen pro účely odlišení vykácených lesních ploch od ploch zdravých porostů. Healey a kol. (2005) vycházeli z předpokladu, že vykácené lesní plochy vykazují vysoké hodnoty Brightness a naopak nízké hodnoty Greenness a Wetness, neboť na vymýcených plochách převládá půdní složka nad vegetační, která zároveň váže méně vlhkosti. Index DI byl mimo jiné aplikován i při sledování kůrovcové kalamity na Šumavě (Hais a kol., 2009).

Normalized diference moisture index (NDMI) je hojně využívaným indexem založeným na datech především senzoru Landsat TM (Jin, Sader, 2005):

$$NDMI = (TM4 - TM5)/(TM4 + TM5)$$

kde TM4 představuje odrazivost 4. spektrálního pásma (0,76 – 0,9 μm) a TM5 reprezentuje odrazivost v 5. spektrálním pásmu (1,55 – 1,75 μm). Princip je založen na rozdílném spektrálním projevu lesních porostů v blízkém a středním infračerveném záření. Ve srovnání s indexem NDVI je mnohem citlivější na obsah vody ve vegetačním krytu a na změny obsahu zelené biomasy (Hardisky a kol., 1983). Jin, Sader (2005) zároveň poukazují na vysokou korelaci NDMI a indexu Wetness, neboť oba vycházejí především z rozdílu odrazivosti v blízkém a středním infračerveném záření. V lesních aplikacích byl použit při detekci holých sečí (Jin, Sader, 2005), ale i při monitorování kůrovcové nákazy (Hais. a kol., 2009).

Normalized difference water index (NDWI) a normalized multi-band drought index (NMDI) byly vytvořeny pro použití nad daty spektrometru MODIS. Oba indexy vycházejí ze spektrálních pásem, která jsou citlivá na změny obsahu vody, a proto byly původně vytvořeny pro účely monitorování změn vodních poměrů v půdě a vegetaci. Svoje uplatnění našli i v lesních aplikacích, především v oblasti detekce lesních požárů (Wang a kol., 2008). Podrobnější popis, včetně matematického vyjádření, lze nalézt např. v Gao (1996) nebo Wang a kol. (2008).

4.3 Vegetační indexy nad daty MERIS

Většina vegetačních indexů je konstruována na základě odrazivosti v blízkém a středním infračerveném záření. Naproti tomu spektrální rozlišení senzoru MERIS sahá pouze do oblastí viditelného a blízkého infračerveného záření. Nejspíše díky této skutečnosti nejsou data MERIS tak hojně využívána při jejich konstrukci. Jelikož je praktická část zaměřena na zpracování snímků MERIS, budou v této kapitole popsány vybrané indexy, které jsou pro tato data definována.

Index NDVI byl již blíže popsán v kap. 4.2.1. Pro použití nad tady MERIS byl jeho vzorec částečně modifikován (BEAM Help):

$$NDVI = [(IR_f*near_IR)-(RED_f*RED)]/[(IR_f*near_IR)+(RED_f*RED)]$$

Kde near_IR představuje hodnotu radiance naměřenou 10. pásmem (753,75µm) a RED hodnotu radiance naměřenou 6. pásmem (620 µm). Koeficienty IR_ f a RED_f mají hodnotu 2, resp. 1.

LAI (leaf area index) je definován jako polovina celkové plochy listů (s obsahem chlorofylu větším než 15 µm/cm^2) na plošnou jednotku povrchu půdy v listnatých porostech a jako plocha jehlic promítnutá na jednotku půdy pro jehličnaté porosty (Malíková, 2010). Obor hodnot indexu LAI se pohybuje v intervalu mezi 0 a 6 m^2/m^2. Vyšší hodnoty ukazují na uzavřenější a hustší vegetační kryt, především jehličnaté lesy. Střední hodnoty vykazují porosty listnatých stromů a nejnižší hodnoty odpovídají zemědělským plodinám.

LAI.Cab (LAI of canopy) je modifikací indexu LAI, který je rozšířen o hodnoty obsahu listového chlorofylu. LAI.Cab index dostaneme vynásobením listového indexu (LAI) obsahem listového chlorofylu (C_{ab}) a může nabývat hodnot od 0 do 300 /m^2.

fCover (Fraction of green vegetation coverage) je vhodným nástrojem pro narazení klasických vegetačních indexů při monitorování vegetačního krytu, neboť nezávisí na listových a půdních optických vlastnostech a na úhlu dopadajícího záření jako v případě indexu fAPAR. Stejně jako LAI index je citlivý při monitorování vegetace, která vykazuje obsah chlorofylu větší než 15 µm/cm^2. fCover může nabývat hodnot od 0 do 1, kde nízké hodnoty jsou typické pro holou půdu, naopak hodnoty blízké 1 značí hustý vegetační kryt.

fAPAR (Fraction of absorbed photosynthetically active radiation) udává podíl fotosynteticky aktivního záření (0,4 – 0,7 µm) pohlceného vegetací. Je ovlivňován strukturou povrchu a úhlem dopadu slunečního záření. Nabývá hodnot od 0 do 1, kde 1 prezentuje vysokou absorpci vodních ploch (Malíková, 2010).

4.4 Aplikace vegetačních indexů při monitorování kalamity kůrovce

Pro účely práce posloužila jako cenný zdroj informací disertační práce Dr. Martina Haise z Jihočeské univerzity. Ten se problematikou sledování kůrovcové kalamity zabývá již delší dobu a výsledky jeho výzkumu jsou shrnuty v podobě 6 odborných článků jako součást disertační práce. Pro účely sledování kalamity kůrovce pomocí vegetačních indexů byl stěžejní článek Haise a kol. (2009), který se týká srovnání časového vývoje dvou typů lesních disturbancí na základě dat Landsat TM/ETM+ a dat terénního průzkumu.

Studovaná oblast se nachází v centrální části NP Šumava a blíže je popsána v kap. 5.3.1. Kůrovcová nákaza měla původ ve větrem polámaném porostu v NP Bavorský les. Část postižené hmoty byla ponechána bez lidského zásahu, a tak došlo k dalšímu rozšíření kůrovce. Ve studovaném území byla zaznamenána největší akcelerace nákazy v letech 1995 – 1996. Aby se předešlo dalšímu šíření byly aplikovány dva přístupy ochrany. Část území byla ponechána bez lidského zásahu a porosty nacházející se v její nárazníkové zóně (tzv. „buffer zone“) byly vykáceny, aby se zabránilo dalšímu šíření nákazy. A právě na tyto dva typy disturbance (oblast

napadená kůrovcem a ochranná zóna vykácená člověkem) byly aplikovány vegetační indexy za účelem identifikovat rozdíly v jejich spektrální odrazivosti a zjištění jejich časového vývoje. Zároveň bylo předpokládáno, že započne proces regenerace porostu, který bude možné z dostupné více než 20 let dlouhé časové řady snímků Landsat postihnout. Jedním z cílů práce Haise a kol. bylo mimo jiné srovnat citlivost vybraných indexů pro účely monitorování lesní disturbancí s ohledem na proces regenerace a dále popsat a srovnat dynamiku výše zmíněných disturbancí.

Pro analýzu vstupních snímků posloužily indexy NDMI, Brightness, Greenness, Wetness, DI (viz kap. 4). Modifikací DI byl vytvořen nový index DI´ (Hais a kol.,2009):

$$DI' = Wetness - Brightness^{¨}$$

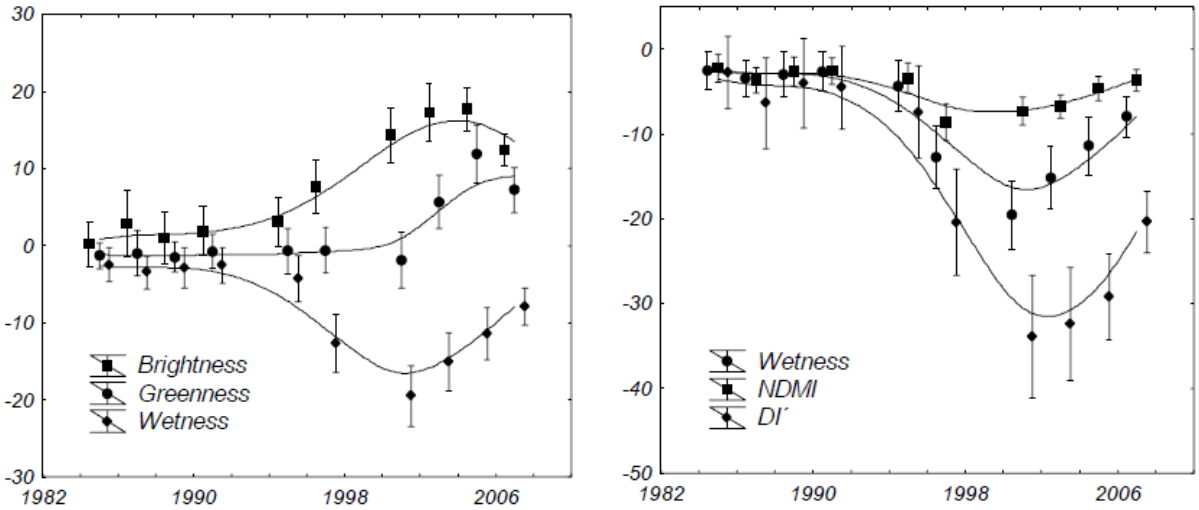
Získané hodnoty všech indexů byly normalizovány podle vztahu:

$$I_r = (I - I_\mu)/I_\sigma$$

kde I_r představuje normalizované hodnoty vybraných indexů, I_μ průměrné hodnoty indexů u zdravého lesa a I_σ směrodatnou odchylku těchto indexů. Normalizace byla provedena pro každý rok. Tento proces byl proveden za účelem odstranění vlivu fenologických fází a rozdílů různého osvětlení v době pořízení snímků.

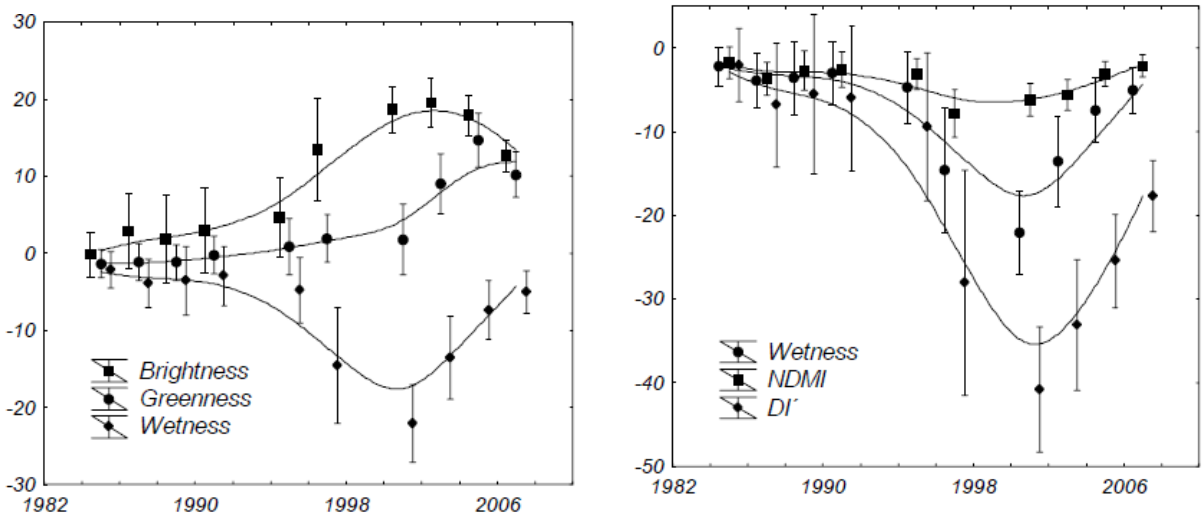
Při analýze byla použita metoda spektrální časové trajektorie zobrazující vývoj normalizovaných hodnot vybraných indexů v čase pro bezzásahovou oblast (viz. obr. 4.1) a pro ochranné vykácené pásmo, tzv. holiny (viz. obr. 4.2).

Obr. 4.1 Bezzásahová oblast



Pozn.: Na ose x jsou vyneseny roky, na ose y normalizované hodnoty daných indexů.
Zdroj: Hais a kol. (2009)

Obr. 4.2 Holiny



Pozn.: Na ose x jsou vyneseny roky, na ose y normalizované hodnoty daných indexů.

Zdroj: Hais a kol. (2009)

Na základě těchto trajektorií byl časový vývoj obou lesních disturbancí rozdělen na tři periody: 1) období stabilního stavu bez výraznějších rozdílů hodnot indexů (1985 – 1996), 2) zvýšení intenzity lesní disturbance projevující se v gradaci změn mezi hodnotami indexů (1996 – 2004), 3) období začínající regenerace porostu s vracejícími se hodnotami indexů do původního stavu (2004 – 2007).

Statistickým srovnáním hodnot naměřených během disturbance a hodnot naměřených před disturbancí byla zjištěna citlivost jednotlivých indexů pro monitorování lesních disturbancí. Z tohoto srovnání vyšly nejlépe indexy Brightness, Wetness a index DI´, který je kombinací prvních dvou. Nově navržený index DI´ nejcitlivěji zachytil změny v průběhu disturbance díky tomu, že není založen na hodnotách indexu Greenness jako např. index DI. Předem bylo očekáváno, že vlivem poničení porostu a úbytku zelené biomasy dojde ze snížení hodnot Greenness. Na místo toho hodnoty vykazovaly rostoucí charakter (viz. obr. 4.1 a 4.2). V případě holin byla tato skutečnost ovlivněna rychlou regenerací bylinného patra po vykácení a zároveň vysázením nových stromů. V případě bezzásahové zóny šlo o přirozenou regeneraci bylinného patra a růst mladých stromků. Nejnižší citlivost vykazoval index NDMI, neboť nízké hodnoty odrazivosti kůry a půdy byly kompenzovány vyšší odrazivostí bylinného patra v blízké infračervené oblasti. NDMI index by byl vhodný pouze v případě, kdy by bylo bylinné patro zcela poničeno. Indexy Wetness a NDMI by měly vykazovat podobné hodnoty (Jin, Sader, 2005), avšak v tomto případě vyšel ze srovnání lépe index Wetness, neboť více závisí na hodnotách odrazivosti ve středním infračerveném záření. Proto není tolik ovlivňován odrazivostí bylinného patra jako v případě indexu NDMI.

Při srovnání vývojové dynamiky mezi bezzásahovou zónou a holinami pomocí křivek vegetačních indexů vykazovala bezzásahová zóna postupnější a plynulejší nárůst hodnot bez výrazných rozdílů. Hlavním důvodem byl pomalejší proces odlesnění napadené oblasti, který byl doprovázen růstem bylinného patra. Naopak v případě holin došlo k náhlému odstranění lesní hmoty, která se projevila spíše skokovitými změnami v naměřených hodnotách.

Obecně lze závěry práce Haise a kol. shrnout do několika bodů. Pro monitorování obou typů disturbancí vykazoval největší citlivost index DI´. Indexy Greenness a DI by byly vhodné pouze v případě, kdy by byl podrost vegetace částečně nebo zcela zničen. Stejně tak NDMI index se neukázal jako vhodný nástroj pro monitorování těchto typů lesních disturbancí. Dále oblast bezzásahové zóny vykazovala pomalejší vývoj s menšími odchylkami od původních hodnot než oblast holin.

KAPITOLA 5

Data a metodika

5.1 Data

Při monitorování disturbancí lesních porostů na regionální úrovni jsou nejčastěji využívána data vysokého prostorového rozlišení. Účelem této práce je však zkoumat možnosti využití dat středního prostorového rozlišení MERIS v této problematice. Specifikem použitých dat je jejich vysoké časové rozlišení, jenž umožnilo vybrat ve sledovaném období vhodné bezoblačné snímky. Vstupní data lze rozdělit na dvě části. První skupinu tvoří družicové snímky ze senzoru MERIS z období 2002 – 2009. Druhá část dat je reprezentována vektorovými vrstvami, které byly využity jako masky při zpracování snímků a tvorbě vizuálních výstupů.

5.1.1 MERIS

MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) je pasivní obrazový multispektrální radiometr, který byl na oběžnou dráhu vynesen 1.3.2002 družicí ENVISAT. Jeho vývoj a provoz zajišťuje Evropská kosmická kancelář (ESA – European Space Agency). MERIS patří mezi tzv. push-broom skenery, neboli stírací skenery, které zajišťují návaznost pixelů v řádcích i sloupcích. Princip získávání dat je založen na měření odraženého slunečního záření od zemského povrchu a mraků. Měření je prováděno v 15 programovatelných spektrálních pásmech (viz. tab. 5.1) z viditelné a infračervené části spektra. Základní prostorové rozlišení je 300 m. Specifikem je vysoké časové rozlišení, kdy interval mezi dvojím nasnímáním stejného místa na Zemi je pouhé 3 dny.

Tab. 5.1 Přehled spektrálních pásem MERIS

Pásmo	Střed pásma (nm)	Šíře pásma (nm)	Aplikace
1	412,5	10	žluté substance a detritální pihmenty
2	442,5	10	maximum absorpce chlorofylu
3	490	10	chlorofyl a jiné pigmenty
4	510	10	suspendované sedimenty, červené řasy
5	560	10	minimum absorpce chlorofylu
6	620	10	suspendované sedimenty
7	665	10	absorpce chlorofylu a fluorescence
8	681,25	7,5	maximum fluorescence chlorofylu
9	708,75	10	fluorescence, atmosférické korekce
10	753,75	7,5	vegetace, oblačnost
11	760,625	3,75	absorpční pás kyslíku
12	778,75	15	atmosférické korekce
13	865	20	atmosférické korekce
14	885	10	vegetace, vodní vláha
15	900	10	vodní vláha, půda

Zdroj: vlastní výstup

Snímací zařízení je tvořeno 5 kamerami, jejichž celkový zorný úhel je 68,5° s odchylkou +1°/-0,1°. Na zemském povrchu se jedná o území v šíři 1 150 km. Snímání je omezeno na část dne, kdy zenitový úhel Slunce je vždy větší než 80°. V noci nelze měření provádět díky neexistenci odraženého viditelného a infračerveného záření. Celkový spektrální rozsah senzoru MERIS se pohybuje v intervalu vlnových délek od 390 nm do 1040 nm. Lze totiž programovat střed a šíři defaultně nastavených pásem.

Data ze senzoru jsou dostupná ve dvou prostorových rozlišeních. Základní prostorové rozlišení je 300 m (FR - Full Resolution). Na základě zprůměrování hodnot 16 pixelů ve FR rozlišení je poté vypočítána nová hodnota pixelu pro redukované prostorové rozlišení (RR - Reduced Resolution) s velikostí pixelu 1 200 m (MERIS Produkt Handbook, 2006). Zpracování dat probíhá ve čtyřech úrovních, L0, L1, L2 a L3 (viz. tab. 5.2).

Tab. 5.2 Úrovně zpracování dat MERIS

Úroveň	Popis dat
L0	Nezpracovaná surová data. Nejsou k dispozici koncovým uživatelům.
L1	Snímky převzorkované do gridové mřížky dle dráhy družice s kalibrovanými hodnotami záření na horní hranici atmosféry.
L2	Hodnoty záření opraveny o atmosferické korekce. Geofyzikální a biofyzikální charakteristiky zemského povrchu.
L3	Kombinace více MERIS produktů i externích dat. Geofyzikální měření během časoví periody.

Zdroj: Malíková (2010)

Primárně byl senzor MERIS určen k monitorování barvy oceánů a pobřežních oblastí. Z těchto údajů je možné druhotně získávat informace o koncentraci chlorofylového pigmentu a uložených sedimentů v oceánech nebo informace o koncentraci atmosférických aerosolů nad

vodními plochami. Krom toho je výzkum zaměřen na pochopení cyklu uhlíku uvnitř oceánů (i jeho globálního charakteru), teplotního režimu jeho svrchních vrstev, jeho celkové dynamiky, ale i na pochopení globálních klimatických změn. Získané poznatky jsou aplikovány i v oblasti rybolovu a managementu pobřežních oblastí. Díky široké škále spektrálních pásem je využitelnost dat MERIS zřejmá i v oblasti týkající se atmosférických aplikací. Jako je především detekce mraků a zjišťování jejich typu, ale i stanovení atmosférických aerosolů. V pozemních aplikacích se uplatnil výzkum dynamiky vývoje vegetace pomocí vegetačních indexů. Avšak prozatím nebyla tato data vysokého časového rozlišení aplikována v oblasti detekce kalamit lesních ploch.

S ohledem na účel této práce byla vybrána data v plném prostorovém rozlišení v úrovni zpracování L1. Jedná se o časovou řadu snímků z období 2002 – 2009. Pro každý rok byl vybrán vždy jeden snímek z období červenec – srpen (viz. tab. 5.3).

Tab. 5.3 Snímky MERIS použité v této práci

datum pořízení snímku	čas pořízení (UTC)	číslo orbitu
19.8.2002	9:30:23.67	2452
10.8.2003	9:41:53.12	7548
19.8.2004	9:56:03.95	12916
29.8.2005	10:10:12.57	18284
20.7.2006	09:56:04.40	22936
6.8.2007	09:50:19.97	28404
7.8.2008	09:15:50.83	33657
20.8.2009	09:36:00.31	39068

Zdroj: vlastní výstup

5.1.2 Vektorová data

Druhou skupinu vstupních dat tvořily vektorové data. Nejdůležitější z těchto dat byla vektorová vrstva kůrovcem napadené oblasti zaslaná Dr. Martinem Haisem z Jihočeské univerzity, který se výzkumem v této oblasti již zabýval. Tato vrstva vznikla vektorizací leteckých snímků z roku 2002. Při další analýze a vytváření vizuálních výstupů posloužily vektorové vrstvy NP a CHKO Šumava, vektorová vrstva hranic České republiky a další vrstvy vzniklé vektorizací na podkladu vektorových vrstev a ortofotomap z webového portálu Veřejné správy České republiky (dostupné z: http://geoportal.cenia.cz). Pro srovnání geomorfologických poměrů obou částí studovaného území byla využita data ZABAGED.

5.2 Software

Hlavními použitými programy v této práci byly aplikace EOLi-SA 7.0.3, SW BEAM 4.7.1, SW ArcGIS 9.3 a Microsoft Office Excel 2003. Aplikace EOLi-SA byla využita při výběru vhodných dat. Než bylo možné využít data k potřebným analýzám, bylo nejprve nutné provést radiometrické a geometrické korekce. K tomuto účelu posloužil SW BEAM, v němž byly zároveň vypočítány požadované indexy. Vizualizace zjištěných hodnot indexů byla provedena

v SW ArcGIS. Výstupy v podobě tabulek a grafů byly vytvořeny v Microsoft Office Excel 2003. V této kapitole budou podrobněji popsány pouze volně stažitelné SW EOLi-SA a BEAM. Možnosti využití SW ArcGIS v této problematice by jistě mohly být náplní samostatné práce.

5.2.1 EOLi-SA (Earth Observation Link – Stand Alone)

Aplikace EOLi-SA je nástroj, jenž umožňuje nahlížení do velkého množství databází družicových dat. EOLi-SA byla vytvořena ESA a lze díky ní prohlížet náhledy snímků Země pořízených různými družicemi. Pro příklad lze jmenovat např. družice ENVISAT, Landsat, SPOT, NOAA, Nimbus, Terra/Aqua, atd.

V této práci byla využita nejnovější dostupná verze EOLi-SA 7.0.3, jenž je k dispozici freeware a je ji možné stáhnout z webových stránek ESA (dostupné z: http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html).

Při vyhledávání snímků stačilo pouze zadat požadovanou družici a senzor (v našem případě ENVISAT MERIS), vybrat časový horizont (období červenec – srpen pro roky 2002 až 2009) a zájmové území (Česká republika). Pomocí vygenerovaných náhledů byly vybrány snímky s nejmenší oblačností.

5.2.2 BEAM (Basic ENVISAT Toolbox for (A)ATSR and MERIS)

SW BEAM byl původně vytvořen jako nástroj pro prohlížení a především zpracování družicových dat ze senzorů AATSR a MERIS družice ENVISAT. Za jeho vznikem stojí společnost Brockmann Consult ve spolupráci s ESA.

Jedná se o volně dostupný SW, který lze stáhnout z webových stránek společnosti Brockmann Consult (dostupné z: http://www.brockmann-consult.de/beam/). Při práci byla použita poslední verze 4.7.1, která již umožňuje zpracovávat snímky i z jiných družit než ENVISAT, např. MODIS, AVHRR, atd. Dále byly využity formáty typu GeoTIF a *.shp.

V SW BEAM 4.7.1 byly provedeny radiometrické a geometrické korekce nad vstupními daty a následné výpočty požadovaných vegetačních indexů. K tomu slouží speciální nástroje (např. NDVI Processor, Vegetation Procesor, atd.), které jsou buď již součástí SW, anebo je nutné je stáhnout v podobě tzv. plug-ins ze stránek společnosti Brockmann Consult (dostupné z: http://www.brockmann-consult.de/beam-wiki/display/BEAM/Plug-ins).

5.3 Metodika

Použité metodické postupy byly zvoleny s ohledem na charakter vstupních dat a téma práce. Obecně lze zvolenou metodiku rozdělit na tři části. V první části bude popsán postup při výběru dat. Druhá část bude věnována přípravě dat a poslední část se bude týkat jejich zpracování. Součástí této kapitoly je i stručný fyzickogeografický popis studovaného území.

5.3.1 Studované území

Studované území lze rozdělit na dvě části (viz. obr. 5.1). První je tvořena lesním porostem napadeným kůrovcovou kalamitou, druhou část tvoří reprezentativní vzorek zdravého lesního

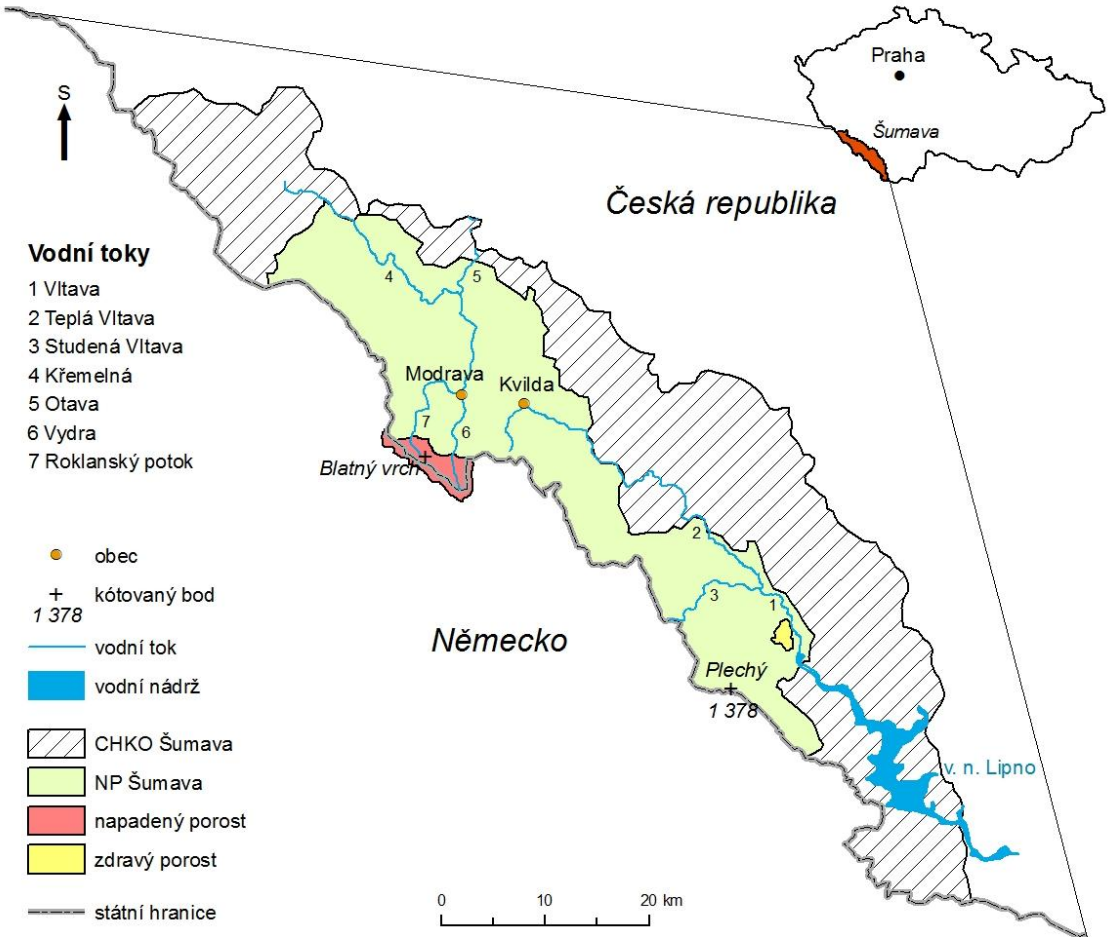
porostu. Obě části se nacházejí na území NP Šumava a každá z nich je tvořena jehličnatým porostem.

Oblast napadená kůrovcem se nachází v centrální části pohoří Šumava na hranicích s Německem (viz. obr. 5.1). Větší část spadá pod správu NP Šumava, menší část se nachází v Německu v NP Bavorský les. Rozloha je necelých 24 km^2. Průměrná nadmořská výška se pohybuje okolo 1 230 m n.m (Hais a kol., 2009). Nejvyšší vrchol Blatný vrch dosahuje nadmořské výšky 1 367 m. V této oblasti pramení dvě říčky, Vydra a Roklanský potok.

Kůrovcová nákaza postihla v roce 1983 a 1984 nejprve jehličnaté lesy na území NP Bavorský les, kde kůrovec napadl porosty poničené větrnou vichřicí. Část byla ponechána bez lidského zásahu, a proto došlo k rozšíření nákazy i na území NP Šumava. Jako prevence před dalším rozšířením byly aplikovány dva přístupy. Jedna část území byla ponechána bez lidského zásahu a druhá část byla vykácena, aby vytvořila ochrannou zónu před dalším šířením kalamity (Hais a kol., 2009). V této práci byla zkoumána bezzásahová zóna.

Druhou část studovaného území tvoří reprezentativní vzorek jehličnatého lesa nepoškozeného přírodní kalamitou (viz. obr. 5.1). Nachází se na pravém břehu řeky Vltavy nad severozápadní částí vodní nádrže Lipno a severovýchodně od nejvyššího vrcholu Šumavy Plechý (1 378 m n. m.). Plocha území je necelé 4 km^2. Průměrná nadmořská výška se pohybuje okolo 880 m n.m.

Obr. 5.1 Studované území



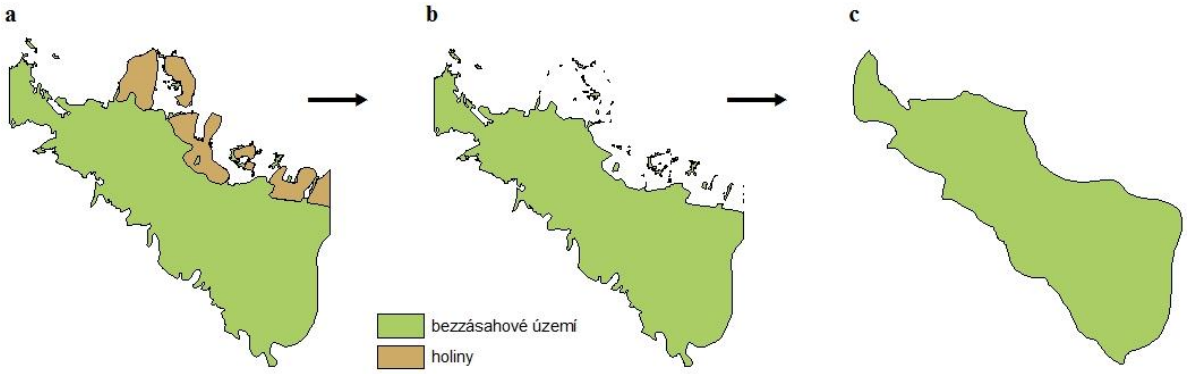
Zdroj: vlastní výstup

5.3.1 Výběr dat

Jako vstupní data byly použity snímky ze senzoru MERIS družice ENVISAT. K výběru konkrétních snímků posloužila aplikace EOLi-SA (kap. 5.2.1). Při volbě bylo nutné zohlednit několik kritérií. V prvé řadě se jednalo o časové kritérium. Jelikož kůrovec je nejaktivnější v teplém letním období (Hais, 2008), byly pro každý rok 2002 až 2009 vybírány snímky z měsíců července nebo srpna. Dále bylo nutné na každém snímku lokalizovat zájmovou oblast. Nejprve byly dle náhledu vyhledány obrysy České republiky a poté lokalizována oblast Šumavy. Rozhodujícím kritériem při konečné volbě byla existence oblačnosti, jenž je limitujícím faktorem při monitorování zemského povrchu pomocí dálkového průzkumu. Tímto postupem se podařilo pro každý rok vybrat odpovídající snímek (viz. tab. 5.3). Data byla poté objednána vedoucím práce Dr. Přemyslem Štychem přes webové stránky ESA (dostupné z: http://eopi.esa.int). Po počátečním zpoždění a následné emailové urgenci byla data po několika týdnech obdržena.

Praktická část práce byla zaměřena na hodnocení kalamity kůrovce v oblasti Šumavy. Proto bylo nutné vytyčit zájmovou oblast v lesních porostech, kde došlo k nákaze. V této části práci mi velmi pomohl shapefile postiženého území, který mi zaslal Dr. Martin Hais z Jihočeské univerzity (viz. obr. 5.2).

Obr. 5.2 Proces přípravy zájmového území



Pozn: a) shapefile zaslaný Dr. Haisem, b) odstranění holin, c) území po generalizaci
Zdroj: vlastní výstup

Jmenovaný shapefile vznikl vektorizací leteckých snímků z roku 2002 (Hais a kol., 2009) a byl tvořen dvěma polygony. První vytyčoval oblast zasaženou kůrovcem ponechanou bez lidského zásahu. Druhý polygon reprezentoval tzv. holiny, tedy ochranné pásy uměle vykácené za účelem zabránění dalšímu šíření nákazy. Pro práci bylo vybráno pouze bezzásahové území, neboť na rozdíl od holin tvořilo samostatný a dostatečně velký polygon (viz. obr. 5.2). Před dalším použitím bylo nutné s ohledem na prostorové rozlišení dat MERIS hranice polygonu částečně zgeneralizovat. K tomuto účelu byl v prostředí ArcMap SW ArcGIS využit soubor nástrojů „Data Management Tools“, jenž umožňuje provádět prostorové operace nad vektorovými a rasterovými daty (např. generalizaci, topologii, definovat souřadný systém apod.). V tomto případě byl využit nástroj „Smooth Polygon“ a zvolen algoritmus „PEAK“ (Polynomial Approximation with Exponential Kernel), který dle zadaného parametru

zgeneralizuje hranici vybraného polygonu (ArcGIS Help). Hraniční linie výsledného polygonu je tvořena více vrcholy a má plynulejší průběh.

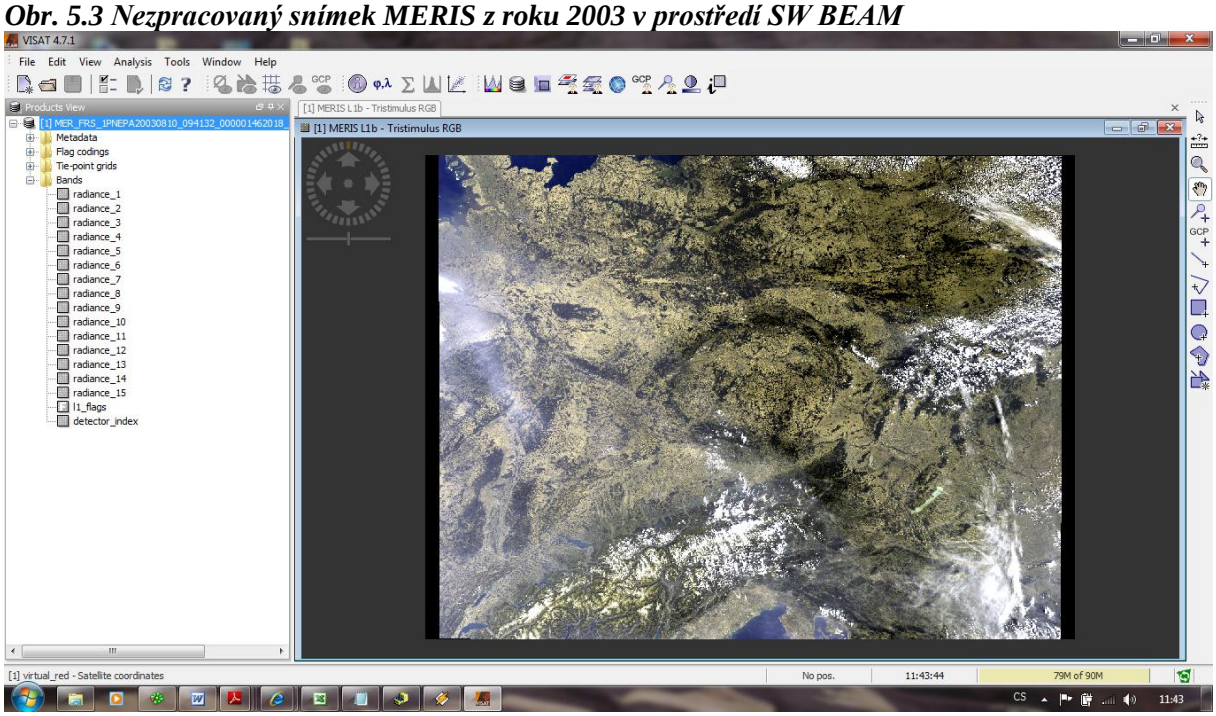
Aby bylo možné vytvořit srovnání naměřených hodnot pro poškozený a zdravý lesní porost, byl na základě vektorizace ortofota z webového portálu Veřejné správy České republiky vytvořen polygon reprezentující vzorek zdravého jehličnatého lesa. Tento krok byl proveden v prostředí ArcMap SW ArcGIS s využitím nástroje „Editor“. Při vytváření polygonu bylo přihlíženo na celistvost vektorizovaného území a uzavřenost vegetačního krytu. Zda se jedná o souvislý jehličnatý porost, bylo zjištěno na podkladu tématické vrstvy lesních ploch ČR. Proces vektorizace je zobrazen v příloze 1.

Zároveň pro lepší ilustraci geomorfologických podmínek byl nad oběma zájmovými územími vytvořen TIN z dostupných dat ZABAGED. Data pro studované území byla vybrána na základě polohy v příslušném políčku desítkového kladu listů.

5.3.2 Příprava dat

Hlavní část prací týkající se přípravy družicových dat byla provedena v SW BEAM. Úroveň zpracování objednaných dat byla L1 (viz. tab. 5.2). Proto bylo nutné nad snímky provést radiometrické a geometrické korekce, aby mohla být provedena temporální analýza. Bez těchto úprav nelze porovnávat získané hodnoty z různých časových horizontů. Pro zjednodušení a především zrychlení práce byly snímky nejprve oříznuty, neboť zpracovávat snímky celé střední Evropy by bylo zbytečné. Je nutné vzít v potaz, že zájmové území má rozlohu ne o mnoho větší než 20 km^2. Pro ukázku je na obr. 5.3 zobrazen nezpracovaný snímek MERIS z roku 2003 v prostředí SW BEAM. Z vybraných snímků byla nakonec využita časová řada 2003 – 2009. Snímek 2002 byl vynechán, neboť obsahoval nečitelné údaje (viz. příloha 2).

Obr. 5.3 Nezpracovaný snímek MERIS z roku 2003 v prostředí SW BEAM



Zdroj: vlastní výstup

Radiometrické korekce

Při pořizování družicových snímků je nutné počítat s celou řadou vlivů, které degradují výslednou kvalitu datového záznamu. Nepřesnosti v naměřených hodnotách mohou mít původ v technické nedokonalosti snímacího zařízení či v algoritmech (tzv. systémové korekce) (Dobrovolný, 1998). Další ovlivnění výsledného záznamu způsobuje hmotné prostředí atmosféry, změny ozáření objektu dané různou polohou Slunce v průběhu dne a v neposlední řadě také změny v geometrii letu družice.

V SW BEAM byly tyto nepřesnosti odstraněny použitím tzv. SMILE a SMAC korekce.

a) SMILE korekce

K odstranění tzv. „smile efektu“ slouží v SW BEAM nástroj zvaný „SMILE Correction Processor“. Tento nástroj odstraňuje nepřesnosti měření vzniklé zkreslením radiometrických hodnot uvnitř jednotlivých kamer. Podstata spočívá v tom, že každá z 5 kamer senzoru MERIS je vybavena CCD detektorem. Pokud nedojde k pravidelné kalibraci těchto detektorů, hodnoty naměřené každým z nich se mohou měnit v rozsahu 1 nm. Pro lidské oko jsou tyto rozdíly nepostřehnutelné, avšak mohou ovlivnit výslednou kvalitu datového záznamu (BEAM Help). Vstupními daty k této korekci byla obdržená data na úrovni L1.

b) SMAC (Simplified Metod for Atmospheric Correction) korekce

Nejdůležitějším kritériem při výběru dat byla míra oblačnosti nad zájmovým územím. Z orientačních náhledů v aplikaci EOLi-SA nebylo možné pouhým okem vybrat snímky s dokonalými atmosférickými podmínkami. Proto k odstranění atmosférických vlivů byl použit nástroj „SMAC Procesor“ SW BEAM. Teoretický základ týkající se ovlivnění elektromagnetického záření při průchodu atmosférou byl uveden v kap. 2.6.

Jako vstupní data byly zvoleny výstupy z korekce SMILE a bylo nutné zadat několik parametrů. Nejprve se jednalo o zjištění hodnoty atmosférických aerosolů AOD (Aerosol Optical Depth) pro příslušný den a oblast. Dále bylo nutné nastavit typ oblasti, v našem případě kontinentální, a definovat masku výpočtu. Ostatní parametry si SW doplnil sám z dat ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasting), která jsou součástí dat MERIS. Konkrétně se jedná o hodnoty tlaku vzduchu na zemském povrchu, obsahu ozonu a koncentraci vodních par v ovzduší (BEAM Help).

Při zjišťování hodnot atmosférických aerosolů AOD byl využit webový portál GIOVANNI (dostupné z: http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni). Jedná se o databázi vytvořenou na základě měření senzoru MODIS. Na interaktivní mapě světa byla přibližně vybrána oblast Šumavy a nastaveno datum a rok. Poté aplikace podle interních dat a modelů automaticky dopočetla požadované hodnoty. Druhou možností jak získat údaje o AOD je využít webový portál AERONET (dostupné z: http://aeronet.gsfc.nasa.gov/). Ten byl vytvořen NASA a jedná se o síť pozemních stanic měřících atmosférické aerosoly. Nevýhodou tohoto portálu je, že nejsou k dispozici data pro každý den a zároveň se na území České republiky nenachází ani jedna měřící stanice. Údaje z nejbližších stanic v Německu mohou výrazně snižovat kvalitu provedení korekce.

Výsledkem SMAC korekce je převedení naměřených hodnot radiance na hodnoty odrazivosti povrchu opravené o atmosférické vlivy. Úroveň výstupních dat je L2.

Výpočet vegetačních indexů

Pro analýzu snímků bylo zvoleno několik vegetačních indexů dostupných v SW BEAM a zároveň byly vytvořeny tři vlastní indexy. K výpočtů indexů byly využity nástroje „NDVI Procesor“ a „Vegetation Processor“. Vlastní indexy byly vytvořeny s pomocí nástroje „Create Band by Band Maths“, který umožňuje provádět různé aritmetické operace s jednotlivými spektrálními pásmy.

a) NDVI, LAI, LAIxCab, fCover a fAPAR

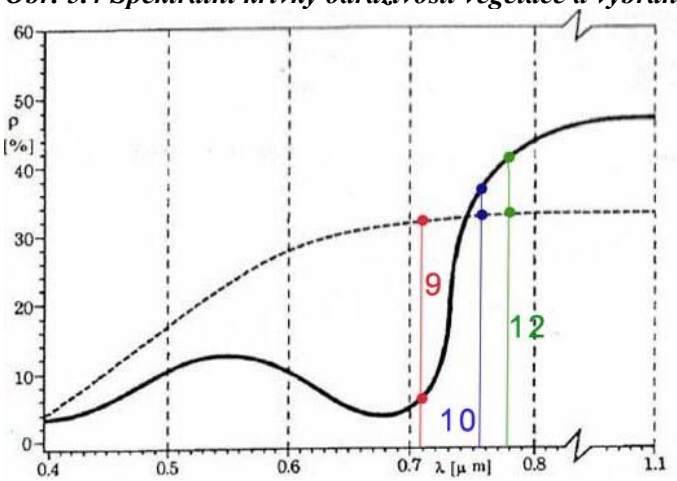
Základní charakteristiky NDVI indexu byly uvedeny v kap. 4.2.1. Jako vstupní data byly použity snímky na úrovni zpracování L1 (výstupy ze SMILE korekce). Pro využití nad daty MERIS je základní vzorec pro výpočet NDVI částečně modifikován (viz. kap. 4.3). „NDVI Processor“ využívá hodnoty ze 6. a 10. spektrálního pásma.

Výstupem „Vegetation Procesoru“ jsou indexy LAI, LAI.Cab, fCover a fAPAR. Tento nástroj využívá jako vstupní data nezpracovaná data na úrovni L1, bez SMILE korekce. Pro výpočet je využito 11 spektrálních pásem MERIS (bez 1.,2.,11. a 15. pásma) plus doplňková data MERIS 1P (Malíková, 2010).

b) Vlastní vegetační indexy

Vysoká spektrální rozlišovací schopnost senzoru MERIS (15 spektrálních pásem) umožňuje na základě teoretických znalostí spektrálního chování vegetace vytvářet množství nových vegetačních indexů. Fakt, na jehož základě jsou konstruovány vegetační indexy, je nárůst odrazivosti mezi oblastní červené viditelné části spektra a oblastí blízkého infračerveného záření. Při vytváření vlastních indexů jsem v případě prvních dvou vycházel z grafu spektrální křivky odrazivosti zdravé a poškozené vegetace (viz. obr. 5.4).

Obr. 5.4 Spektrální křivky odrazivosti vegetace a vybraná pásma MERIS

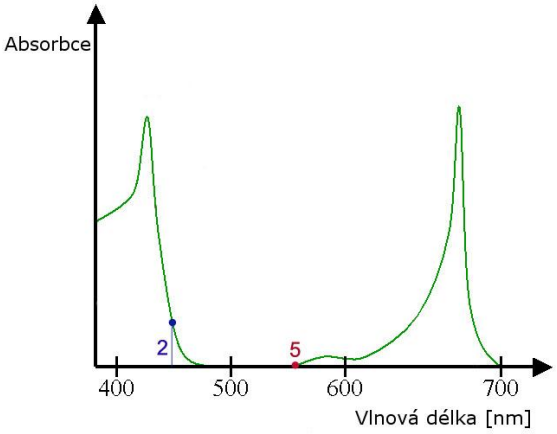


Pozn.: plná čára – zdravá vegetace, čárkovaná čára – poškozená vegetace; Barevně a číselně je odlišeno 9.,10. a 12. spektrální pásmo senzoru MERIS.
Zdroj: vlastní výstup

Do grafu byly barevně znázorněna použitá spektrální pásma (9.,10. a 12. pásmo) a vyznačeny průsečíky s křivkou odrazivosti pro zdravou a poškozenou vegetaci. Výběr těchto tří pásem byl podřízen předpokladu, že rozdíly odrazivosti v nich naměřené by měly vykazovat velké rozdíly pro zdravou vegetaci a malé rozdíly pro vegetaci poškozenou. První dva indexy byly tedy vytvořeny jednoduchým podílem odrazivosti z pásma 9 a 10 (Index 9/10), resp. 9 a 12 (Index 9/12).

Při tvorbě třetího indexu posloužil graf spektrální odrazivosti chlorofylu a (viz. obr. 5.5), který je nejvíce zastoupeným vegetačním pigmentem. Index 2/5 je tvořen podílem 2. a 5. spektrálního pásma senzoru MERIS. Tyto dvě pásma reprezentují oblast maximální (2.pásmo) a minimální (5. pásmo) absorpce chlorofylu. Předpokladem pro vznik tohoto indexu byla myšlenka, že u poškozené vegetace dojde k úbytku koncentrace chlorofylu, a proto rozdíly v odrazivosti v těchto dvou pásmech budou menší jak u vegetace zdravé.

Obr. 5.5 Spektrální křivka odrazivosti chlorofylu a



Pozn.: Číselně je odlišeno 2. a 5. spektrální pásmo senzoru MERIS.
Zdroj: vlastní výstup

Geometrické korekce

Konečnou fázi přípravy dat tvořily geometrické korekce. Účelem těchto korekcí je odstranit zkreslení originálních dat, aby obraz získal požadovaný souřadnicový systém a kartografické zobrazení (Dobrovolný, 1998). Ke zdrojům zkreslení patří např. změny výšky, polohy nosiče a jeho rychlosti, potom také zakřivení Země a výškové změny reliéfu (Kolář a kol., 2000). Vzhledem k tomu, že geometrické korekce způsobují drobné změny v původně naměřených hodnotách, byly provedeny až po korekcích radiometrických. Pro potřeby této práce byla zvolena metoda ortorektifikace a byla provedena v SW BEAM.

Ortorektifikace

Ortorektifikace je proces, který opravuje i nepřesnosti vznikající v důsledky relativní změny polohy objektů vyvolané jejich různou nadmořskou výškou (Dobrovolný, 1998). Proto je zapotřebí digitálního modelu území, díky němuž lze dosáhnout mnohem lepších výsledků než při použití metody projekce, která digitální model území nevyužívá. V SW BEAM není nutné ručně zadávat souřadnice vlícovacích bodů, neboť jsou algoritmem automaticky použity vlastní vlícovací body „Tie points“, které jsou součástí produktu MERIS 1P. Jako digitální model

terénu je použit GETASSE30 (Global Earth Topography And Sea Surface Elevation at 30 arc sekond resolution), který vznikl kombinací čtyř různých modelů a je umístěn na elipsoid WGS84 (dostupné z: http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/software). Metodou ortorektifikace byla všechna data transformována do zobrazení UTM a souřadnicového systému WGS 84. Automaticky s ortorektifikací proběhl proces převzorkování na pixel o velikosti 300 × 300 m. Pro převzorkování byla zvolena metoda nejbližšího souseda, protože na rozdíl od metody bilineární interpolace a kubické konvoluce nemění původní naměřené radiometrické hodnoty uvnitř pixelů. Zároveň bylo nutné při ortorektifikaci používat pro každý snímek stejnou referenční mřížku, aby byla zajištěna návaznost pixel na pixel mezi snímky. Orientační kontrola přesnosti byla provedena importováním vektorových vrstev vodní nádrže Lipno a hranic České republiky, které na snímku odpovídali svému umístění.

5.3.3 Zpracování dat

Po provedení radiometrických a geometrických korekcí bylo možné přistoupit ke zpracování upravených dat. V této části práce bylo využito především prostředí ArcMap a ArcScene SW ArcGIS, které umožnilo statisticky a vizuálně zpracovat získané hodnoty daných indexů v zájmovém území. Analytická část práce byla zaměřena na otázky týkající se možností lokalizace kůrovcové nákazy s využitím dat MERIS a dále sledování jejího vývoje v čase pomocí zvolených indexů.

Statistické výstupy

Nejprve bylo nutné ze SW BEAM vyexportovat upravené snímky ve formátu *.tif, aby mohly být dále zpracovány v prostředí ArcMap. Výhodou formátu *.tif je, že zachovává snímky v souřadnicovém systému. Před vytvořením spektrální trajektorie jednotlivých indexů ve sledovaném období 2003 – 2009 bylo nejprve nutné pro každý rok vypočítat průměrnou hodnotu každého indexu ve sledovaném území, tedy v oblasti postižené kůrovcovou nákazou a v oblasti reprezentující vzorek zdravého lesa. Za tímto účelem byla využita extenze „Spatial Analyst Tools“, která tvoří soubor nástrojů sloužících k analýzám nad rastrovými daty (např. překrývání snímků, reklasifikaci, interpolaci nebo generalizaci naměřených hodnot apod.). Mimo jiné lze využít nástroj „Zonal Statistics“, který počítá základní statistické ukazatele (např. směrodatná odchylka, průměr, rozpětí apod.) nad vstupními daty. Zároveň byla nastavena maska území, nad kterým byl výpočet proveden. Z výsledných statistických ukazatelů byl vybrán průměr. Pro každý rok byly vybrány průměrné hodnoty všech zvolených indexů v narušeném a zdravém porostu a vyexportovány do SW Microsoft Office Excel, ve kterém byly vytvořeny spektrální trajektorie v podobě grafů.

Vizuální výstupy

Včetně temporální analýzy byla nad oblastí postihnutou kůrovcovou kalamitou zkoumána vnitřní heterogenita tohoto území. Ta byla postavena na barevné klasifikaci hodnot indexu LAI. Pro každý rok byl raster oříznut vektorovou vrstvou kůrovcové nákazy a provedena klasifikace s využitím nástroje „Symbology“. Celkem bylo vytvořeno pět tříd hodnot (0-1, 1-2, 2-3, 3-4 a 4-

5), které byly barevně odlišeny. Výsledkem byl schématický obrázek s klasifikovanými rastery postiženého území pro každý rok sledovaného období.

Pro přiblížení geomorfologických podmínek byl na základě vybraných částí ZABAGEu vytvořen TIN (Triangulated Irregular Network) obou zájmových území (viz. příloha 3). K tomu posloužila v prostředí ArcMap extenze „3D Analyst“ umožňující vizualizaci zemského povrchu v 3D a provádění základních analýz nad těmito povrchy (např. osvětlení povrchu, výpočet převýšení, interpolace vrstevnic apod.). Vstupní data byla tvořena databází obsahující vrstevnice studovaného území a na základě jejich nadmořských výšek byl vytvořen TIN. TIN lze chápat jako povrch, který je tvořen trojúhelníky, jenž vznikly procesem triangulace. Podrobnější informace o TIN podává např. Štych a kol. (2008). Na základě TIN byl pro obě území vytvořen raster osvícení povrchu, kde parametry azimutu a zenitového úhlu Slunce byly zadány na základě hodnot, které jsou součástí doplňkových dat MERIS. Protože byl tento raster vytvořen pouze pro ilustrativní účely, byly tyto hodnoty vypočítány jako průměr snímku s nejvyšší a nejnižší hodnotou azimutu, resp. zenitového úhlu Slunce pro studované území. V prostředí ArcScene byly tyto rastery vizualizovány na povrch TIN a pro lepší názornost 3× převýšeny. Jelikož kůrovcem postižená oblast spadá částečně i do Německa, bylo možné z dostupných dat ZABAGED takto vizualizovat pouze část na české straně (viz. příloha 3).

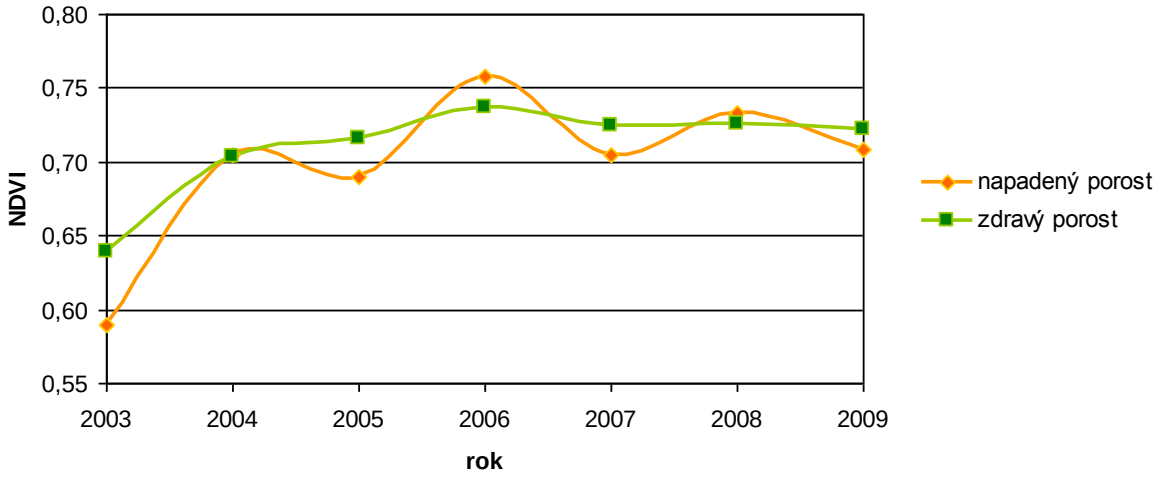
KAPITOLA 6

Výsledky

Hlavní část výsledků je prezentována ve formě grafů. Ty zobrazují časový vývoj zvolených indexů nad lesním porostem napadeným kůrovcem a nad zdravým lesními porostem ve sledovaném období 2003 – 2009. Každá hodnota reprezentuje průměrnou hodnotu příslušného indexu v daném roce a vzorovém území. Druhou část výsledků tvoří soubor mapek vytvořených pro možnost srovnání prostorové heterogenity uvnitř vzorového území napadeného kůrovcem. Jedná se o barevnou klasifikaci rasteru hodnot LAI indexu pro každý rok z časového horizontu 2003 – 2009.

Jednou z možností, jak mapovat vegetační kryt, je využití indexu NDVI (viz. kap. 4.2.1). V této práci byl aplikován na data ze senzoru MERIS a bylo otázkou, do jaké míry je schopen odlišit poškozenou a zdravou vegetaci. Obecně čím vyšší hodnoty NDVI jsou vykazovány, tím by se mělo jednat o hustější a uzavřenější vegetační kryt. Z obr. 6.1 je patrné, že se hodnoty NDVI pohybují přibližně v rozmezí od 0,6 do 0,8, a to jak pro zdravý, tak i pro napadený porost. Jedná se tedy správně o hustou vegetaci, konkrétně jehličnatý porost, avšak nejsou zde patrné výrazné rozdíly mezi napadeným a zdravým lesem. Lze usuzovat, že použití indexu NDVI nad daty MERIS pro rozlišení zdravé a poškozené vegetace, popř. postihnutí nějakého časového vývoje, není vhodné.

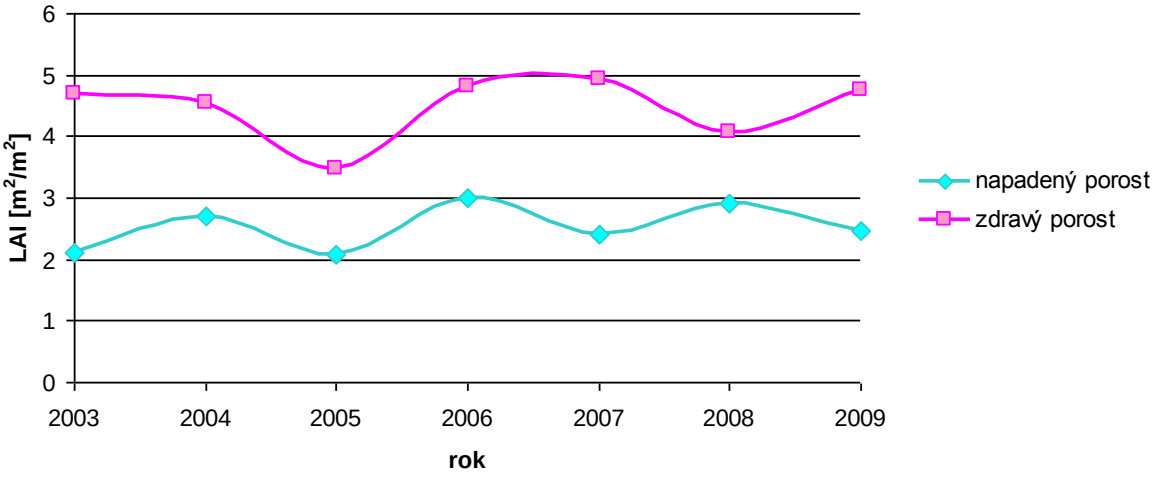
Obr. 6.1 NDVI index



Zdroj: vlastní výstup

V další analýze byly nad zkoumanými plochami vypočítány indexy LAI a LAI.Cab. Index listové plochy LAI, v našem případě definován jako průmět plochy jehlic na jednotku půdy v m^2/m^2, obecně vykazuje nejvyšší hodnoty pro zdravé jehličnaté lesy. Jak je z obr. 6.2 patrné, zjištěné hodnoty pro zdravý porost by tomuto předpokladu odpovídaly, neboť se ve sledovaném období pohybovaly v intervalu 4 – 5 m^2/m^2. Naopak oblast postižená kůrovcovou kalamitou vykazovala o 1 až 2 m^2/m^2 nižší hodnoty. Rozdíl v naměřených hodnotách je zřejmý a v porovnání s indexem NDVI ukazuje LAI index lepší schopnost rozlišit zdravou a poškozenou vegetaci. Ovšem opět nelze vysledovat žádný konkrétní časový trend ve vývoji napadené oblasti.

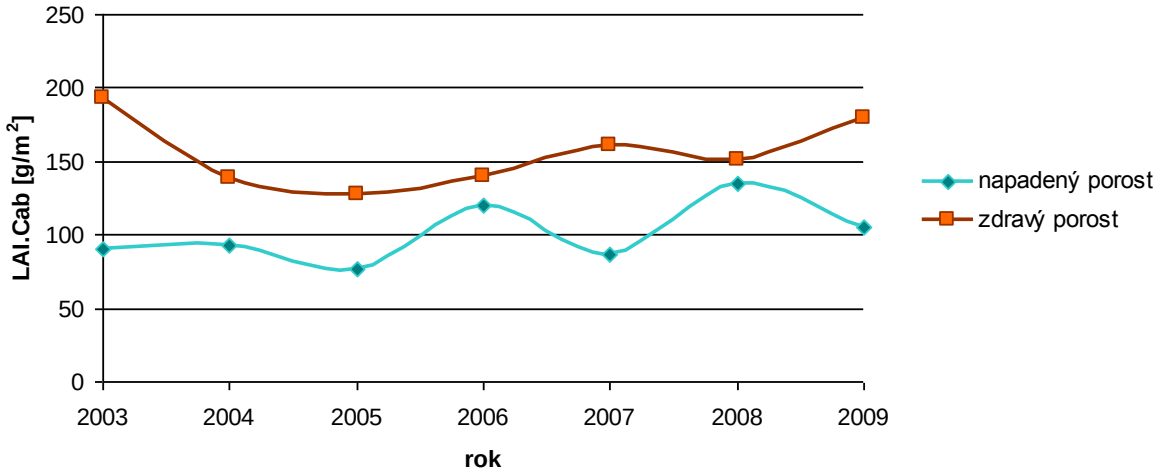
Obr. 6.2 LAI index



Zdroj: vlastní výstup

Index LAI.Cab je pouze rozšířením indexu listové plochy (LAI) o hodnoty obsahu listového chlorofylu (C_{ab}). Zdravý a hustý vegetační kryt vykazuje hodnoty LAI.Cab vyšší než poškozená vegetace, neboť v té díky absenci listové biomasy je vázáno malé množství chlorofylového pigmentu. Tento předpoklad lze při pohledu na obr. 6.3 potvrdit, neboť kůrovcem napadený porost vykazuje nižší hodnoty než vzorek zdravého les. Přesto rozdíly ne ve všech letech jsou tak výrazné (viz. rok 2006 a 2008). Zároveň je zde zaznamenán nepatrný nárůst hodnot u napadeného porostu mezi roky 2003 a 2009, ovšem trend není nijak výrazný. Citlivost při detekci poškozeného a zdravého porostu je o něco menší než u indexu LAI.

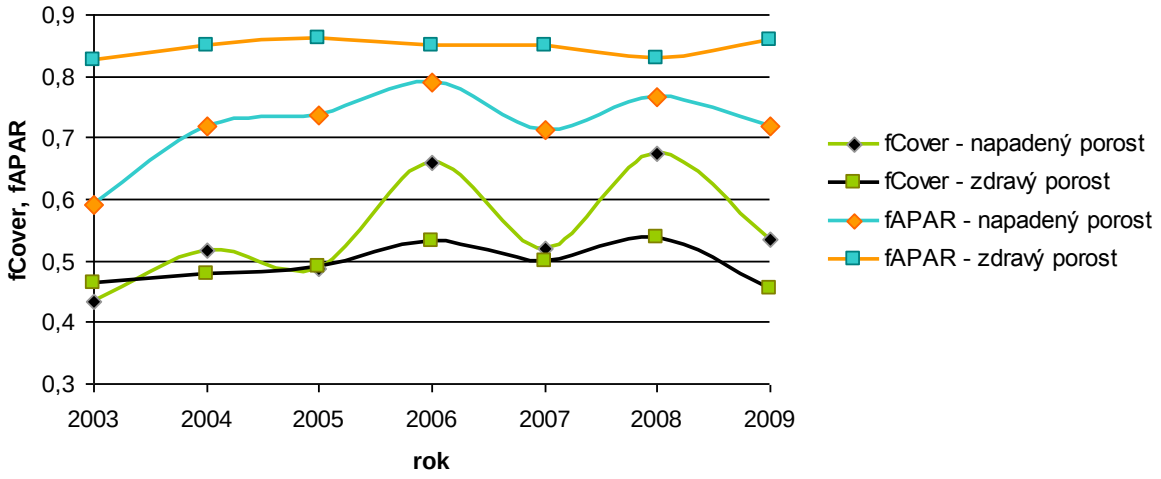
Obr. 6.3 LAI.Cab index



Zdroj: vlastní výstup

Jinou možností jak nahlížet pomocí spektrálních indexů na zdravotní stav vegetace, je využít absorpce fotosynteticky aktivního záření vegetací. Z tohoto principu vychází index fAPAR. Na průběhu křivky vývoje indexu (viz. obr. 6.4) je rozdíl mezi napadeným a zdravým porostem patrný, i když nijak výrazný. Předem byly očekávány vyšší hodnoty u zdravého porostu, neboť obsahuje více pigmentu chlorofylu, a tak dokáže více vázat fotosysntetizující záření. Stejně jako pomocí LAI.Cab lze odlišit zdravý a napadený porost, i když ne tak výrazně jako v případě indexu listové plochy LAI.

Obr. 6.4 fCover, fAPAR



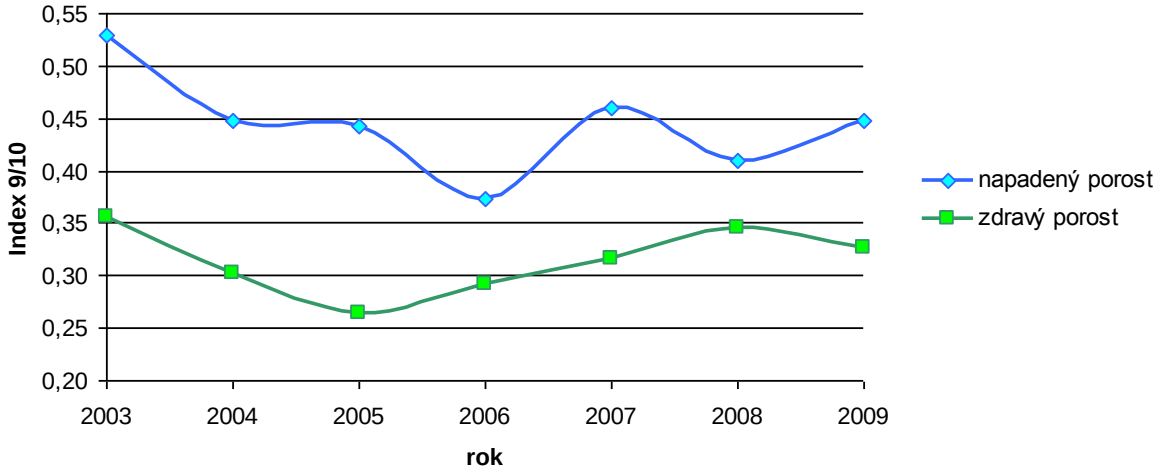
Zdroj: vlastní výstup

Jelikož index fCover má stejný obor hodnot jako index fAPAR, byl pro srovnání vynesen do stejného grafu. Lze pomocí něj měřit zbytky vegetačního krytu v zájmovém území. Jelikož nezávisí na listových a půdních optických poměrech a úhlu dopadajícího záření, je poměrně citlivým nástrojem pro měření zelené vegetace. Avšak z obr. 6.4 je patrné, že pro účely monitorování zdravotního stavu lesních porostů není příliš vhodný. S výjimkou let 2006 a 2008 totiž nejsou zřejmé rozdíly mezi kůrovcem napadenou oblastí a zdravým lesním porostem.

Z tohoto pohledu se zdá být index fAPAR citlivějším nástrojem pro aplikace nad lesními porosty, neboť pro zdravý porost vykazuje hodnoty téměř o 0,3 – 0,4 vyšší než index fCover.

Ze spektrálních pásem MERIS byly jednoduchým podílem vytvořeny i tři vlastní spektrální indexy. První dva vycházely z principu, že u zdravé vegetace je rozdíl odrazivosti v červeném světle a blízkém infračerveném záření výrazný na rozdíl od poškozeného porostu. Index 9/10 vznikl podílem 9. a 10. spektrálního pásma senzoru MERIS. Vyšší hodnoty indexu znamenají podobnější si hodnoty odrazivosti vstupních pásem a tedy poškozenou vegetaci, v našem případě jehličnatý porost. U porostu napadeného kůrovcem dosahovaly hodnoty indexu hodnot okolo 0,4 až 0,45, u porostu zdravého hodnot 0,3 až 0,35. Z průběhu spektrální křivky odrazivosti zdravé a poškozené vegetace bychom u napadeného porostu očekávaly vyšší hodnoty blížící se k 1 a naopak nižší hodnoty u vegetace zdravé, spíše hodnoty kolem 0. Jedná se však vždy o nějaký ideální případ, který v reálném prostředí nalezneme pouze těžko. Proto předpoklad stojící za vznikem Indexu 9/10 lze pokládat za správný, což potvrdily naměřené hodnoty. Rozdíly mezi zdravým a poškozeným lesem jsou patrné.

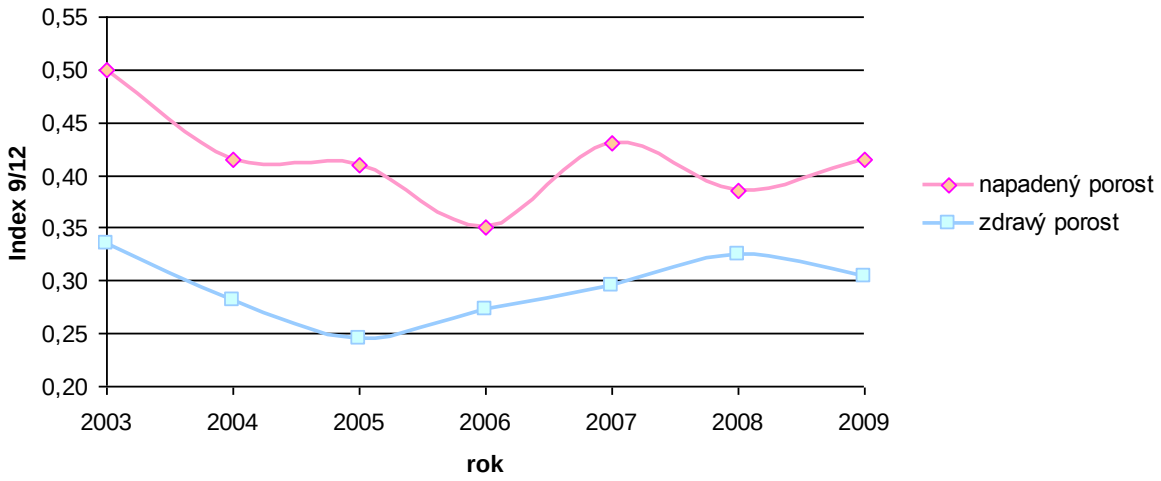
Obr. 6.5 Index 9/10



Zdroj: vlastní výstup

Velice podobně je konstruován i Index 9/12, kde bylo pouze 10. pásmo nahrazeno 12. Průběh zaznamenané křivky i samotné naměřené hodnoty jsou velmi podobné těm Indexu 9/10, jak ukazuje obr. 6.6. Index 9/10 a Index 9/12 mají obdobnou vypovídací hodnotu, neboť hodnoty odrazivosti v 10. a 12. pásmu senzoru MERIS nejsou již příliš rozdílné. Pomocí obou dvou lze dobře lokalizovat oblast zdravého a poškozeného lesního porostu.

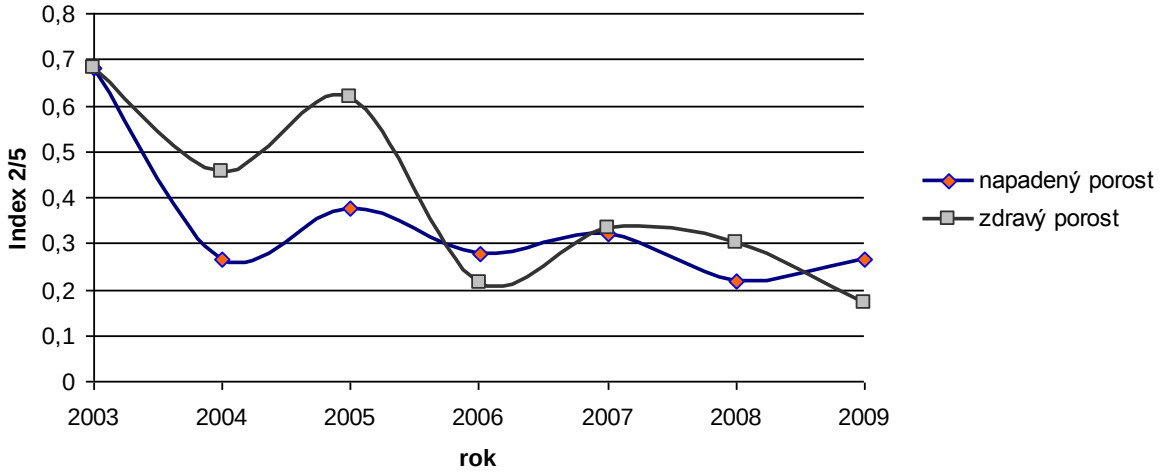
Obr. 6.6 Index 9/12



Zdroj: vlastní výstup

Index 2/5 byl konstruován na předpokladu, že jehličnatý porost napadený kůrovcem bude obsahovat menší množství chlorofylu a. Díku tomu hodnoty Indexu 2/5 budou větší pro poškozený porost a menší pro porost zdravý. Na základě srovnání na obr. 6.7 lze tento předpoklad považovat za mylný, neboť nelze postihnout žádné výrazné změny mezi hodnotami indexu nad zdravým a poškozeným lesním porostem.

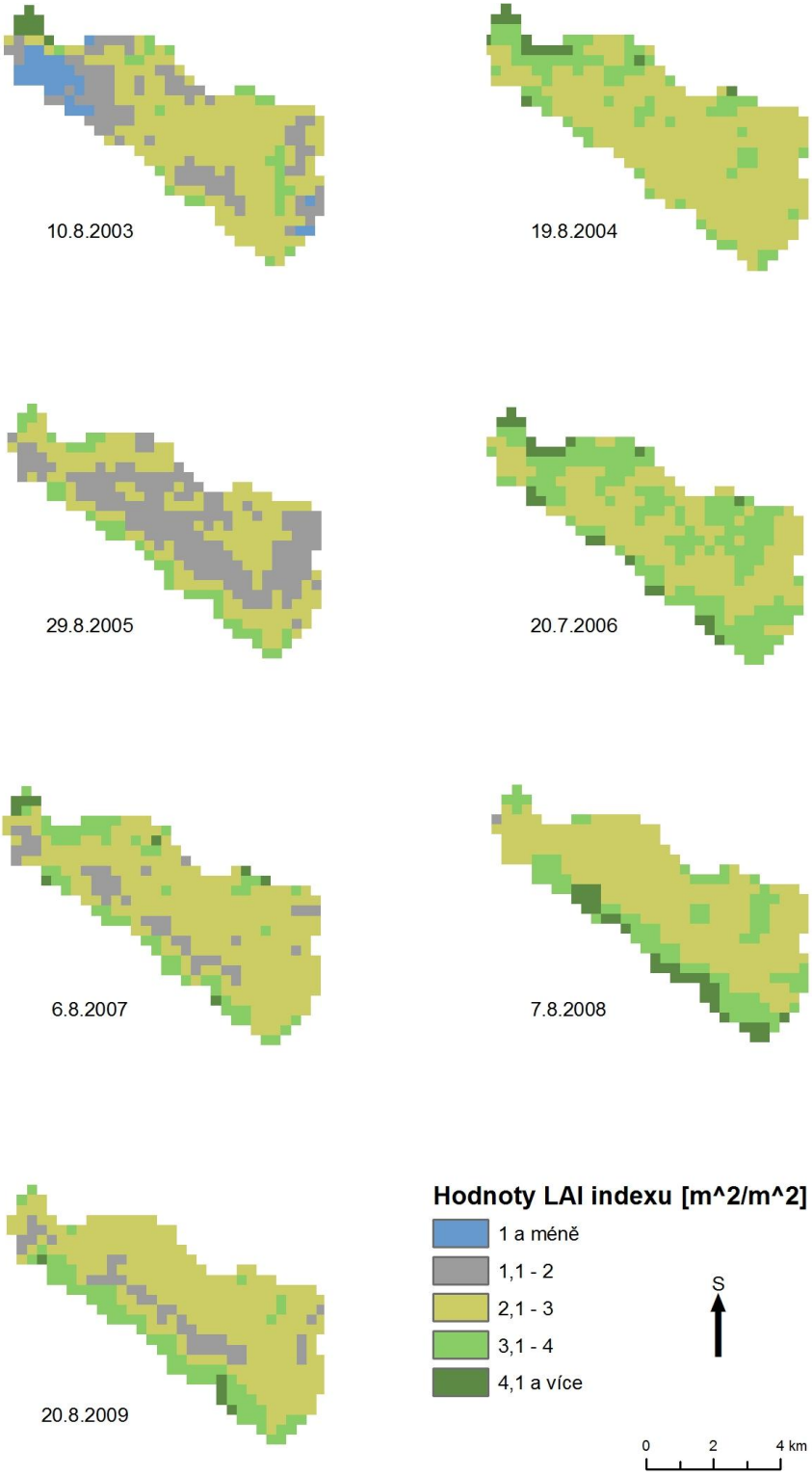
Obr. 6.7 Index 2/5



Zdroj: vlastní výstup

Vnitřní heterogenita území postiženého kalamitou kůrovce byla zkoumána na základě prostorového rozložení hodnot indexu LAI. Tento index byl zvolen záměrně, neboť ze všech použitých indexů vykazoval nejlepší schopnost v rozlišení kůrovcové nákazy (viz. obr. 6.2).

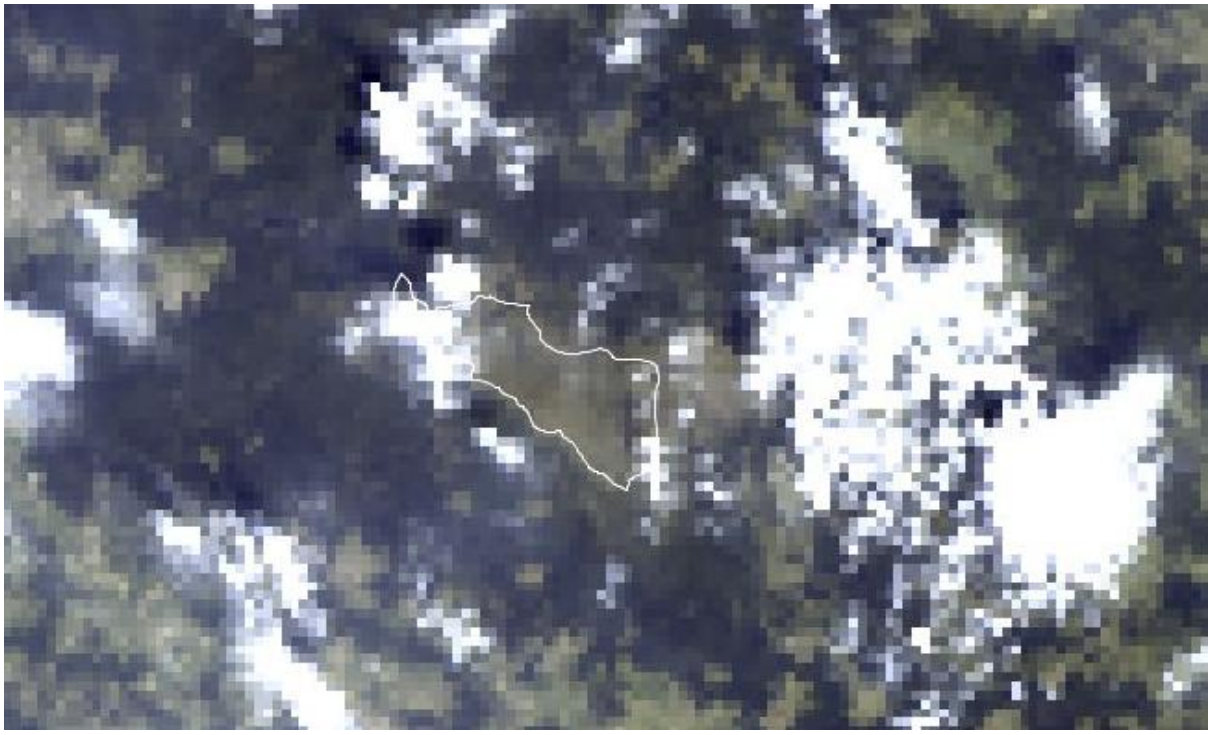
Obr. 6.8 Vnitřní heterogenita napadeného porostu dle indexu LAI



Zdroj: vlastní výstup

Na první mapce z 10.8.2003 je škála hodnot nejpestřejší. Přítomnost hodnot nižších než 1 (modrý odstín) je nutné přičíst přítomnosti větší oblačnosti v době pořízení snímku (viz. obr. 6.9). Na ostatních snímcích již nad zájmovým územím oblačnost patrná nebyla, což se projevilo i ve vyšších hodnotách indexu LAI na mapkách pro zbylé roky. Obecně z předložených mapek není zřejmá nějaká pravidelnost ve vnitřní heterogenitě kůrovcem postiženého území. Hodnoty se pro každou část území drží v přibližně stejném rozsahu. Pouze je patrné kolísání hodnot mezi jednotlivými roky (viz. obr. 6.2), které však na žádný vývojový trend kůrovcové nákazy neukazuje. Při zběžném pohledu na obr. 6.8 je patrné, že nejčastěji je zastoupen interval hodnot 2 – 3. Hodnoty LAI pro zdravý les se pohybovaly v intervalu 4 – 5. Index LAI posloužil jako vhodný nástroj pro lokalizaci kalamity, avšak dynamika vývoje nákazy jím zachycena nebyla.

Obr. 6.9 Výřez snímku MERIS z roku 2003



Pozn: bílá čára - hranice kůrovcové kalamity

Snímek vznikl barevnou kompozicí pásem MERIS:

*red: log(1.0 + 0.35 * radiance_2 + 0.60 * radiance_5 + radiance_6 + 0.13 * radiance_7)*

*green: log(1.0 + 0.21 * radiance_3 + 0.50 * radiance_4 + radiance_5 + 0.38 * radiance_6)*

*blue: log(1.0 + 0.21 * radiance_1 + 1.75 * radiance_2 + 0.47 * radiance_3 + 0.16 * radiance_4)*

Zdroj: vlastní výstup

KAPITOLA 7

Shrnutí a diskuze

Výsledky práce lze shrnout do několika bodů:

- Data MERIS ukázala schopnost rozlišit rozdíly mezi zdravým a poškozeným lesním porostem.
- Indexy založené na měření změn listové plochy vykazovaly větší citlivost než indexy založené na měření změn obsahu pigmentu chlorofylu.
- Hodnoty NDVI potvrdili, že tento index není příliš vhodný pro monitorování zdravotního stavu vegetace.
- Nejcitlivějším indexem schopným zachytit rozdíl mezi zdravým a poškozeným porostem se ukázal index LAI. Patrné rozdíly prokazály i indexy LAI.Cab a fAPAR.
- Naopak index fCover ukázal malou citlivost nad daty MERIS.
- Nově zkonstruované indexy Index 9/10 a Index 9/12 prokázaly schopnost monitorovat rozdíly mezi zdravým a poškozeným porostem.
- Naopak předpoklad pro vznik indexu Index 2/5 se ukázal mylný.
- Z časových křivek indexů nebyl zachycen žádný vývojový trend disturbance, ani předpokládaný proces regenerace.
- Na základě barevné klasifikace hodnot LAI indexu uvnitř kalamitní oblasti nebyly postihnuty žádné pravidelnosti ve vnitřní heterogenitě.

Hlavní hypotéza byla postavena na předpokladu, zda je možné pomocí dat středního prostorového rozlišení MERIS monitorovat lesní distrubanci regionální úrovně. Vzhledem k velikosti pixelu 300 m a velikosti napadené oblasti (cca 25 km^2) bylo otázkou, do jaké míry je možné zachytit kůrovcovou nákazu, popřípadě prokázat nějaký vývojový trend. Dosažené hodnoty použitých indexů ukázaly, že snímky MERIS jsou schopné rozlišit rozdíly mezi zdravým a kůrovcem napadeným porostem (viz. obr. 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 a 6.6). Přesto je nutné dodat, že se nejednalo o výrazné rozdíly. Tuto hypotézu lze na základě získaných hodnot potvrdit.

Zobrazené časové křivky však neukázaly na žádný vývojový trend, přestože jejich průběh byl značně rozkolísaný mezi jednotlivými roky. Ve srovnání s Hais a kol. (2009), kteří od roku 2002 předpokládaly proces regenerace, nebyl tento trend ze získaných křivek patrný. Je otázkou,

do jaké míry sehrála svoji úlohu krátká časová řada, neboť Hais a kol. (2009) měli k dispozici téměř 20 let dlouho časovou řadu snímků. Proto druhou hypotézu nelze ze získaných výsledků potvrdit. Rozkolísané hodnoty indexů mezi jednotlivými roky, je možné připsat různým podmínkám v době pořízení snímků. Protože nebyla provedena normalizace dosažených hodnot (Hais a kol., 2009), lze usuzovat, že se na těchto výkyvech mohly podílet jednak různá intenzita osvícení povrchu, odlišná výška Slunce, dále různé vlhkostní poměry porostu a půdy, atmosférické podmínky apod. Pro ilustraci jsou v příloze 3 na modelu terénu zobrazeny průměrné podmínky osvícení pro obě části studovaného území. Při prvním pohledu je patrné větší plošné osvícení u oblasti zdravého lesa díky jednoduššímu reliéfu a východní orientaci svahů. Na území kůrovcové kalamity je zobrazeno více stinných míst především v údolích říček Vydry a Roklanského potoka. Proto i nižší dosažené hodnoty odrazivosti v oblasti kůrovcové kalamity jsou způsobeny nejenom samotnou nákazou, ale i menším příjmem sluneční svitu v částech tohoto území.

Dále se potvrdil předpoklad, že index NDVI není citlivý při monitorování zdravotního stavu vegetace (Lambert a kol., 1995). Jak uvadí Gao (1996), při použití NDVI indexu v oblastech, které vykazují index listové plochy LAI větší než 3, dochází k znehodnocení získaných údajů. Kůrovcem napadené území vykazovalo hodnoty LAI mezi 2,5 a 3 a vzorová oblast zdravého lesa hodnoty větší než 4. Lze tedy usuzovat, že citlivost NDVI mohla být ovlivněna i touto skutečností. Zároveň Hais a kol. (2009) uvádí, že v postižené oblasti došlo k regeneraci bylinného patry a výsadbě nových stromků, které mohou kompenzovat sníženou odrazivost v blízké infračervené oblasti. Díky tomu se rozdíly mezi zdravým a napadeným porostem kompenzují (viz. obr. 6.1).

S výjimkou indexu fCover prokázaly pro data MERIS definované indexy LAI, LAI.Cab a fAPAR schopnost rozlišit zdravotní stav vegetace. Zároveň se potvrdily jako správné předpoklady, které stály za vznikem vlastních indexů Index 9/10 a Index 9/12. Jednak rozdíl v odrazivosti mezi červeným viditelným světlem a blízkým infračerveným zářením je indikátorem zelené biomasy (Kolář a kol., 2000) a zároveň je citlivý i při monitorování zdravotního stavu vegetace. Naopak Index 2/5 postavený na změnách obsahu chlorofylu a neprokázal rozdíly mezi zdravým a poškozeným porostem. Obecně lze tvrdit, že indexy založené na měření změn listové plochy vykazují větší citlivost při detekci zdravotního stavu vegetace než indexy založené na měření změn obsahu pigmentu chlorofylu.

KAPITOLA 8

Závěr

Cílem práce bylo zhodnotit možnosti využití dat středního prostorového rozlišení MERIS při monitorování kalamit lesních ploch se zaměřením na kalamitu kůrovce na Šumavě. Jako hlavní zdroj dat posloužila časová řada snímků MERIS pro období 2002 – 2009. Pro vizuální výstupy byly využity četné vektorové vrstvy a data ZAGAGED. Kromě již známého prostředí SW ArcGIS byly při práci nově použity aplikace EOLi-SA a SW BEAM. Pomocí aplikace EOLi-SA byly vybrány vyhovující družicové snímky, které byly následně radiometricky a geometricky opraveny v prostředí SW BEAM. Ten mimo jiné posloužil i jako užitečný nástroj pro výpočet zvolených definovaných a vlastních indexů.

Potvrzení či vyvrácení hypotéz bylo provedeno na základě temporální analýzy hodnot vybraných indexů ve studovaném území v období 2003 – 2009. Grafické výstupy z této analýzy umožnily potvrdit první obecnou hypotézu, že data MERIS je možné využít při monitorování kalamit lesních ploch se zaměřením na kůrovcovou nákazu. Rozdíly mezi naměřenými hodnotami pro zdravý jehličnatý porost a oblast napadenou kůrovcem umožnily zároveň porovnat citlivost zvolených indexů při detekci této disturbance nad daty MERIS. Nejlepších výsledků dosáhly nově definované indexy Index 9/10 a Index 9/12 společně s indexem LAI. Naopak velmi neprůkazné výsledky vykazovaly index Index 2/5 a také velmi často používaný index NDVI. Obecně bylo možné konstatovat, že indexy založené na měření změn listové plochy ukázaly větší citlivost než indexy měřící změny obsahu pigmentu chlorofylu. Druhá hypotéza, na které byla postavena tato práce, nemohla být z průběhu spektrálních trajektorií jednotlivých indexů prokázána. Její základ tvořilo tvrzení, že již dochází k procesu regenerace napadeného porostu, avšak tento trend nebyl z vytvořených grafů patrný.

Je otázkou do jaké míry byly získané hodnoty ovlivněny podmínkami při pořizování snímků, ať už se jednalo o intenzitu osvícení povrchu, výšku Slunce nad obzorem, charakter reliéfu apod. Vliv těchto podmínek byl zřejmý z rozkolísaného průběhu získaných křivek, a proto další výzkum by mohl být zaměřen tímto směrem. Především do jaké míry ovlivňují tyto faktory výsledné hodnoty indexů se zaměřením na nově vytvořené indexy. Velmi užitečným nástrojem by v tomto ohledu mohly být rasterové analýzy využívající jako vstupní data např. rastery osvícení reliéfu, raster převýšení apod. v kombinaci s rastery hodnot zvolených indexů. Určitým

přiblížením této problematiky byl vytvořený TIN s rasterem osvícení, který ilustroval podmínky ozáření povrchu v době pořízení „průměrného“ snímku z období 2003 – 2009.

Zpracování této práce mi umožnilo prohloubit si znalosti v oblasti DPZ a zároveň získat nové zkušenosti při zpracovávání družicových snímků, jak v oblasti radiometrických tak geometrických úprav. Díky tomu jsem si mohl osvojit základní znalosti při používání volně dostupného SW Beam a aplikace EOLi-SA.

Součástí práce je teoretický úvod do problematiky dálkového průzkumu Země se zaměřením na spektrální chování vegetace. Velký prostor je také věnován využití vegetačních indexů v oblasti monitorování kalamit lesních ploch, a proto může tato práce být cenným zdrojem informací v této problematice. Zároveň metodická část může tvořit alespoň základní návod pro začátečníky, kteří se rozhodnou zpracovávat družicové snímky v SW BEAM, popř. využívat aplikaci EOLi-SA.

SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ

CAMPBELL, J.B. 1996. *Introduction to Remote Sensing*. Tailor & Francis, London, 622 p.

ČAPEK, R. 1988. *Dálkový průzkum Země*. Ministerstvo školství ČSR, Praha, 244 s.

DOBROVOLNÝ, P. 1998: *Dálkový průzkum Země, digitální zpracování obrazu*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, katedra geografie. 161 s.

ESA 2006. *MERIS Product Handbook*. Envisat MERIS Product Handbook, 1.1. European

Space Agency, Paris.

GAO, B. C. 1996. NDWI – A normalised difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 58, p. 257 – 256.

HAIS, M. … [et al.] 2009. Comparison of two types of forest disturbance using multitemporal Landsat TM/ETM+ imagery and field vegetation data. *Remote Sensing of Environment*. 113, p. 835 – 845.

HAIS, M. 2008. *Vývoj a spektrální projevy odlesnění centrální Šumavy hodnocené prostřednictvím DPZ a GIS*. Praha, 2008. 140 s. Disertační práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy na katedře fyzické geografie a geoekologie. Školitel disertační práce RNDr. Jakub Langhammer, Ph. D.

HARDISKY, M. A., KLEMANS, V., SMART, R. M. 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of Spartina alterniflora canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 49, p.77-83.

HEALEY, S. P. … [et al.] 2005. Comparison of tasseled cap-based Landsat datastructures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment. 97*, p. 301-310.

HUANG, C. … [et al.] 2002. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. 23, p. 1741 – 1748.

JIN, S., SADER, S. A. 2005. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*. 94, p. 364-372.

KENNEDY, R. E., COHEN, W. B., SCHROEDER, T. A. 2007. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sensing of Environment*. 110, p. 370-386.

KOLÁŘ, J. 1989. *Dálkový průzkum Země*. SNTL, Praha, 170 s.

KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. 2000. *Dálkový průzkum Země*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 164 s.

KUZERA, K., ROGAN, J., EASTMAN, J. R. 2005. Monitoring vegetation regeneration and deforestation using change vector analysis: Mt. St. Helens study area. ASPRS Annual Conference, Baltimore, Maryland.

LAMBERT, N. J. … [et al.] 1995. Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce forest stands in the Czech Republic using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 16, p. 1261-1287.

LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 750 p.

MALÍKOVÁ, L. 2010. *Využití družicových dat vysokého časového rozlišení k určení spektrálních vlastností vegetace.* Praha, 2010. 71 s. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí diplomové práce RNDr. Přemysl Štych, Ph. D.

NOVÁK, V., MURDYCH, Z. 1988. *Kartografie a topografie*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 318.

SABINS, F.F. Jr. 1986. *Remote Sensing – Principles and Interpretation*. 2nd ed., W.H. Freeman, New York.

ŠTYCH, P. … [et al.] 2008. *Vybrané funkce geoinformačních systémů*. Česká kosmická kancelář, Praha, 179 s.

WANG, L., QU, J.J., HAO, X. 2008. Forest fire detection usány normalized multi-band drought index (NMDI) with satelite measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148, p. 1767 – 1776.

WARING, R.H., RUNNING, S.W. 1998. *Forest ecosystems: Concept and management*. Academic press, San Diego, CA.

WILSON, E. H., SADER, S. A. 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. 80, p. 385-396.

WULDER, M. A. … [et al.] 2006. Estimating the probability of mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*. 101, p. 150-166.

Internetové zdroje

ESA. BEAM. http://www.brockmann-consult.de/beam/

ESA Eathnet. ENVISAT. http://envisat.esa.int

GIOVANNI Portal. http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni

Portál Veřejné správy České republiky. http://geoportal.cenia.cz

Wikipedia. http://www.wikipedia.org/

Gisat. http://www.gisat.cz/

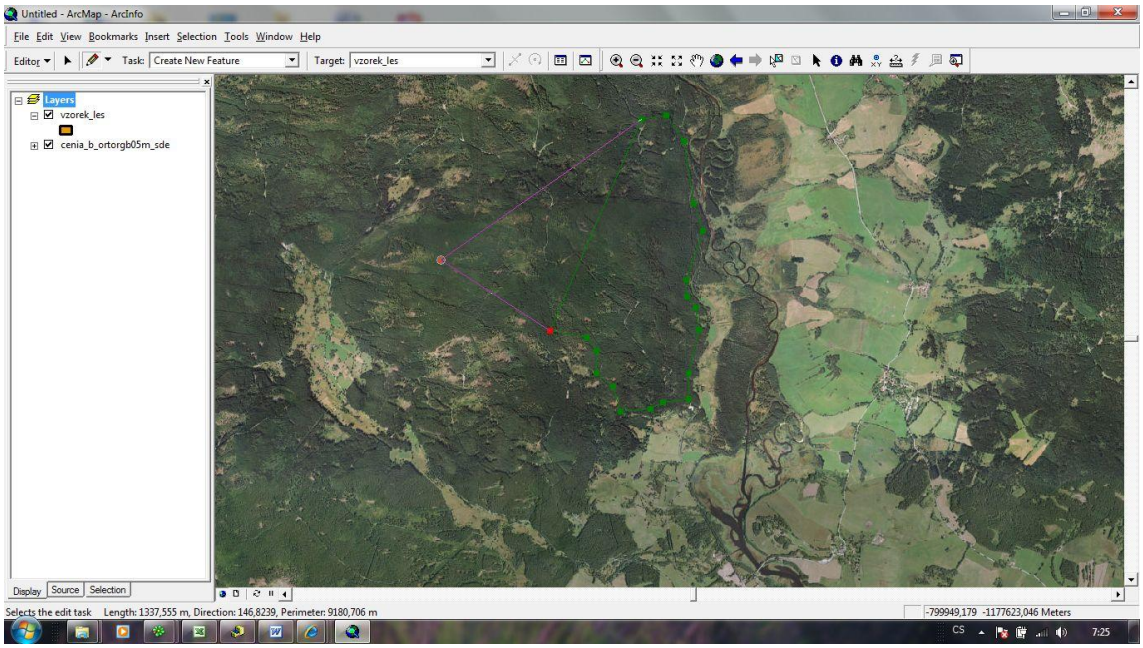
ČÚZK. http://www.cuzk.cz/

PřF Masarykovy univerzity. http://www.sci.muni.cz

SEZNAM PŘÍLOH

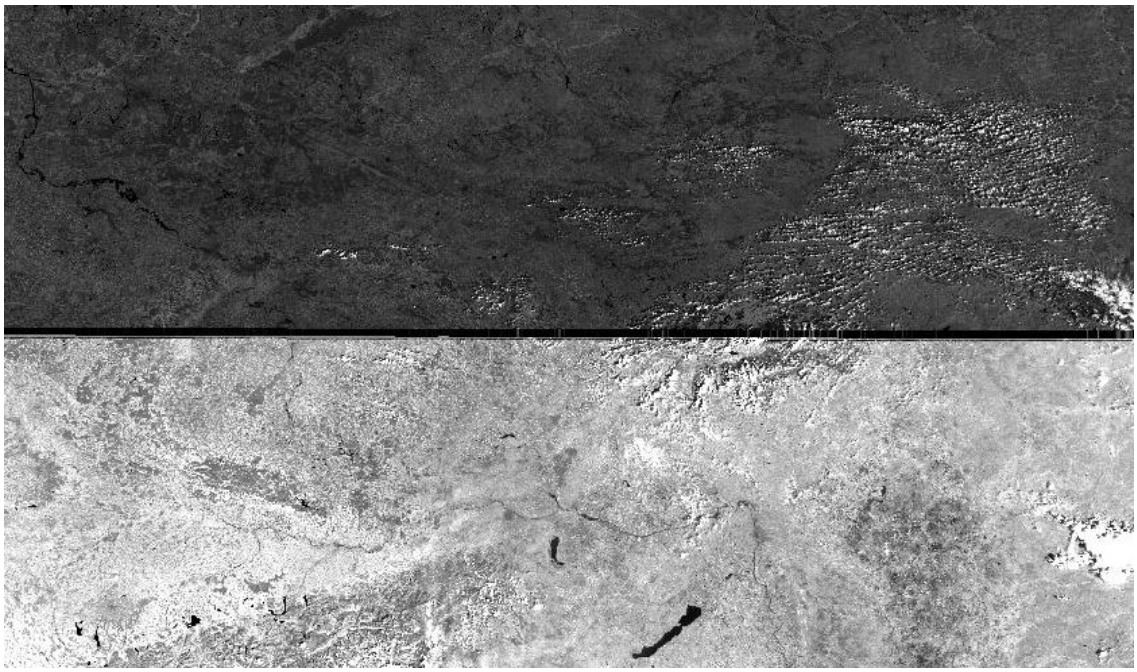
Příloha 1 Vektorizace „zdravého“ lesa v prostředí ArcMap
Příloha 2 Výřez poškozeného snímku MERIS z roku 2002
Příloha 3 Osvícení povrchu studovaného území
Příloha 4 CD s elektronickou verzí práce

Příloha 1. Vektorizace „zdravého“ lesa v prostředí ArcMap



Zdroj: vlastní výstup

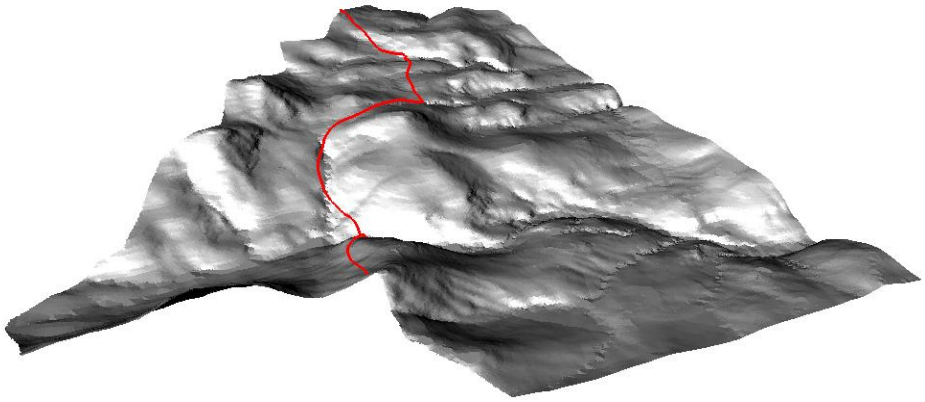
Příloha 2. Výřez poškozeného snímku MERIS z roku 2002



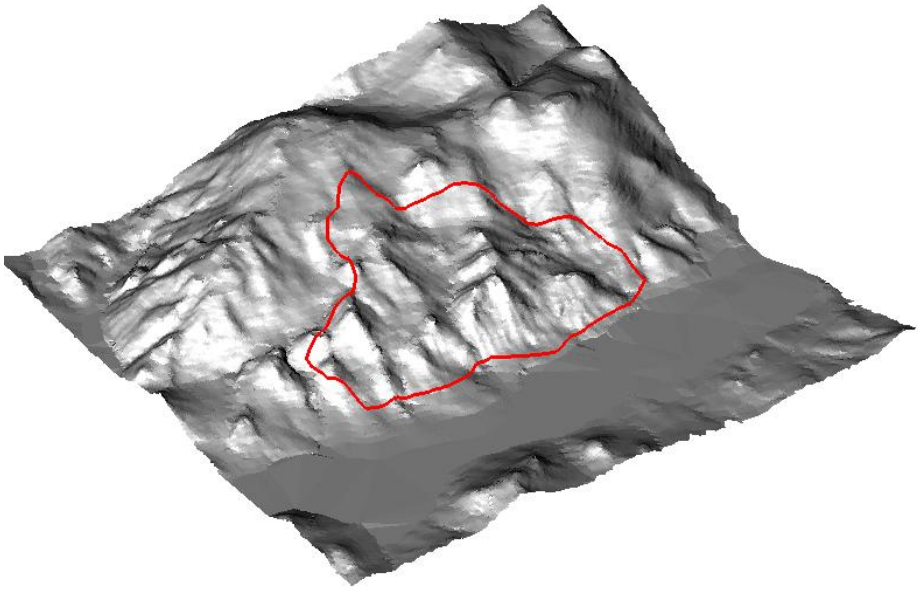
Zdroj: vlastní výstup

Příloha 3. Osvícení povrchu studovaného území

a) oblast napadená kůrovcovou kalamitou



b) oblast zdravého lesního porostu



Pozn.: *Bílé odstíny značí dobře osvětlená místa, černé odstíny místa s nízkou hodnotou osvětlení.*
Zdroj: vlastní výstup