

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geografie

**Satelitní DPZ v regionálním
fyzickogeografickém
výzkumu Rejvízské hornatiny**

magisterská diplomová práce

Mgr. et Bc. Pavel Rušar

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Irena Smolová, Ph.D.

Olomouc 2024

Bibliografický záznam

Autor (osobní číslo): Mgr. et Bc. Pavel Rušar (R200072)

Studijní program: Geografie a regionální rozvoj

Název práce: Satelitní DPZ v regionálním fyzickogeografickém výzkumu Rejvízské hornatiny

Title of thesis: Satellite Remote Sensing in Regional Physical Geography Research of the Rejvíz Highlands

Vedoucí práce: doc. RNDr. Irena Smolová, Ph.D.

Rozsah práce: 53 stran

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá využitím satelitních technologií dálkového průzkumu Země (zejm. Sentinel 2) pro regionální fyzickogeografický výzkum Rejvízské hornatiny. Definuje základní metody DPZ při zkoumání odraženého elektromagnetického záření a specifikuje konkrétní metodologii ve smyslu matematických operací s DN hodnotami získaných snímků, a to pro konkrétní aplikace, které jsou obsahem praktické části práce. Jedná se o obecnou charakteristiku krajiny prostřednictvím syntézy tasseled cap, zachycení změn krajinné pokrývky řízenou i neřízenou klasifikací, kvantifikaci rizikových jevů spjatých se suchem prostřednictvím indexu sucha, vysokofrekvenční filtry doplňující geomorfologické poznatky, syntézu v pravých barvách využitou pro získání informací o meteorologických extrémech a analýzu spektrální křivky odrazivosti pro získání informací o kvalitativních charakteristikách Mechového jezírka. V závěru a diskuzi je zhodnocen potenciál využití satelitních snímků pro jednotlivé oblasti výzkumu, a to formou odpovědí na dílčí výzkumné otázky definované v úvodu.

Klíčová slova: DPZ, Jeseníky, Rejvíz, Rejvízská hornatina, Sentinel 2

Abstract: The thesis deals with the use of satellite remote sensing technologies (especially Sentinel 2) for regional physical geography research of the Rejvíz Highlands. It defines basic methods of remote sensing in examining reflected electromagnetic radiation and specifies the specific methodology in terms of mathematical operations with DN values from acquired images, for specific applications that are the content of the practical part of the work. This includes a general characterization of the landscape through a tasseled cap synthesis, capturing changes in landscape cover using supervised and unsupervised classification, quantification of drought-related risk phenomena through a drought index, high-frequency filters supplementing geomorphological knowledge, true-color synthesis used to obtain information on meteorological extremes, and analysis of the reflectance spectral curve to gain information on the qualitative characteristics of the Moss Lake. In conclusion and discussion, the potential of using satellite images for individual research areas is evaluated in the form of responses to specific research questions defined in the introduction.

Keywords: Remote Sensing, Rejvíz, Jeseníky Mountains, Rejvíz Highlands, Sentinel 2

Děkuji vedoucí práce doc. RNDr. Ireně Smolové, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce. Za konzultace některých problémů spjatých s tematikou v rámci předmětu Dálkový průzkum Země děkuji také RNDr. Jakubu Miřijovskému, Ph.D. Zároveň místopřísežně prohlašuji, že jsem práci vypracoval sám s využitím zdrojů, které jsou řádně citovány.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Mgr. Pavel RUŠAR**
Osobní číslo: **R200072**
Studijní program: **N0532A330021 Geografie a regionální rozvoj**
Téma práce: **Satelitní DPZ v regionálním fyzickogeografickém výzkumu Rejvízké hornatiny**
Zadávající katedra: **Katedra geografie**

Zásady pro vypracování

Záměrem diplomové práce je představit možnosti využití satelitních technologií využívaných v DPZ v rámci regionálních fyzickogeografických výzkumů. Konkrétním cílem práce je představení aplikací satelitní DPZ pro regionální fyzickogeografický výzkum typické hornatiny středoevropského prostoru na příkladu Rejvízké hornatiny.

1. Úvod, cíle, metodika
2. Představení využívané platformy, technologií a dat
3. Software a jeho operace s hodnotami DN
4. Aplikace v biogeografii, meteorologii, klimatologii, geomorfologii, hydrologii
5. Využití v přírodních vědách a humanitních disciplínách
6. Diskuze a závěr
7. Zdroje

Rozsah pracovní zprávy: **20 000 – 24 000 slov**
Rozsah grafických prací: **Podle potřeb zadání**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- FREEMAN, R., KING J. a LAFYATIS G.: Electromagnetic radiation, Oxford 2019.
- GOMEZ, B. a JONES J. P.: Research Methods in Geography. Blackwell 2010.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. a CHIPMAN, J. W.: Remote Sensing and Image Interpretation, sedmá edice, 2015.
- Natural Resources Canada 2016: Fundamentals of Remote Sensing – A Canada Centre for Remote Sensing Remote Sensing Tutorial [online 2022]; Dostupné z: <<https://www.nrcan.gc.ca/node/9309>>.
- PAVELKA, K.: Dálkový průzkum Země. Družicové systémy, Praha 2010.
- SVATOŇOVÁ, H. – LAUERMANN, L.: Dálkový průzkum Země – aktuální zdroj geografických informací, Brno 2010.
- BĚLKA, L. a VOŽENÍLEK, V.: Ortofotomapa. Geovizualizace materiálů dálkového průzkumu Země. Olomouc 2013.
- DEMEK, J., MACKOVČIN, P. (ed.): Hory a nížiny, zeměpisný lexikon ČR, Brno 2006.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Irena Smolová, Ph.D.**
Katedra geografie

Datum zadání diplomové práce: 9. února 2024
Termín odevzdání diplomové práce: 10. dubna 2025

L.S.

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan

doc. Mgr. Pavel Klapka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 9. února 2024

OBSAH

1 ÚVOD	8
1.1 DPZ – satelitní platformy v geografickém výzkumu	8
1.2 Cíle diplomové práce, výzkumné otázky	8
1.3 Vymezení zájmové oblasti – Rejvízská hornatina	9
1.4 Základní fyzickogeografická charakteristika oblasti	11
2 TEORETICKÝ RÁMEC, MISE A DATA	14
2.1 DPZ – elektromagnetické záření, teoretický základ.....	14
2.2 Sentinel 2.....	14
2.3 Senzor MSI.....	15
2.4 Charakteristika využitých snímků	15
2.5 Software, metody zpracování snímků a popis matematických operací.....	19
3 APLIKAČNÍ ČÁST	21
3.1 Charakteristika krajiny – tasseled cap	21
3.2 Zachycení změn krajinné pokrývky – řízená a neřízená klasifikace.....	25
3.3 Problematika sucha – index sucha.....	29
3.4 Vývoj lesního pokryvu – vegetační indexy.....	32
3.5 Geomorfologické charakteristiky – vysokofrekvenční filtry	38
3.6 Meteorologické extrémy – syntéza v pravých barvách	41
3.7 Charakteristiky Mechového jezírka – spektrální křivka odrazivosti	43
4 MOŽNOSTI DALŠÍHO VYUŽITÍ V PŘÍRODNÍCH VĚDÁCH	45
5 MOŽNÉ VYUŽITÍ V HUMANITNÍCH DISCIPLÍNÁCH	46
6 DISKUZE A ZÁVĚR	47
7 SUMMARY	49
8 ZDROJE	50
8.1 Monografie, odborné články, informační syntézy	50
8.2 Internetové zdroje, portály	52

SEZNAM ZKRATEK

DPZ – dálkový průzkum Země

MSI – Multi Spectral Instrument

GNSS – Global Navigation Satellite System (Globální družicový polohový systém)

RaDAR – Radio Detection and Ranging

LiDAR – Light Detection and Ranging

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (normalizovaný diferencovaný vegetační index)

NPR – Národní přírodní rezervace

MŽP – Ministerstvo životního prostředí (České republiky)

ČGS – Česká geologická služba

HEIS VÚV – Hydrologický informační systém Výzkumného ústavu vodohodářského TGM

ESA – Evropská vesmírná agentura

EU – Evropská unie

VNIR – Visible and Near-Infrared (viditelné a blízké infračervené)

NIR – Near Infrared (blízké infračervené)

SWIR – Short-Wave Infrared (krátkovlnné infračervené)

MWIR – Middle-Wave Infrared (střední infračervené)

VARI – Visible Atmospherically Resistant Index (Index viditelné atmosférické odolnosti)

SNAP – Sentinel Application Platform (software)

DN – Digital number (digitální hodnota)

NDMI – Normalized Difference Moisture Index (normalizovaný diferencovaný index vlhkosti)

GLI – Green Leaf Index (index zeleného listoví)

SPOT – Système Pour l'Observation de la Terre (Systém pro sledování Země)

LANDSAT – ze anglických slov "Land" a "Satellite", tj. není zkratkou v pravém smyslu slova

TIROS – Television Infrared Observation Satellite (Televizní infračervený satelit pro observaci)

GOES – Geostationary Operational Environmental Satellite (Geostacionární operační environmentální satelit)

DMT – Digitální model terénu

RVI – Ratio vegetation index (vegetační index)

CED – Compass edge detector (vysokofrekvenční filtr)

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

EM – elektromagnetické/elektromagnetický

SAFE – Standard Archive Format for Europe

1 ÚVOD

1.1 DPZ – satelitní platformy v geografickém výzkumu

Ačkoliv můžeme dnes jen odhadovat, jak budou budoucí historikové vědy popisovat vývoj geografie ve 20. století, z dnešního pohledu se nám jeví jako nesporné, že nejnvýraznějším milníkem této vědecké disciplíny byla možnost nahlédnout na naši planetu z vesmíru. Ačkoliv první takový obraz byl pořízen z nechvalně známé rakety německé výroby V2 už ve čtyřicátých letech 20. století, pro poznání Země se skutečně významnými staly až záběry z let šedesátých, kdy na pilotní sovětské a americké družice (Vostok 1; Explorer 6) navázaly zejména meteorologické družice (TIROS) pozorující planetu také v infračervené části EM spektra [FOWLER 2010]. Skutečný pokrok pro geografické analýzy zemského povrchu přinesla léta sedmdesátá, a to zejména díky sérii misí LANDSAT. Ty umožnily pozorování planety pro různé části EM spektra a jejich využití sahalo od zemědělství a lesnictví přes kartografii, hydrologii, meteorologii až po navigační systémy a specializované obory (archeologie, rybolov aj.) [PAVELKA 2010]. Na satelity LANDSAT navázaly a navazují další systémy, namátkou jde o francouzský systém SPOT sloužící např. k mapování a sledování vývoje zemědělských plodin či přírodních katastrof, americký systém GOES, sledující hlavně klimatické a environmentální tematiky, a evropský systém Sentinel s velmi širokým využitím zejména v oblasti přírodních věd [NRC 2016].

Snímky ze satelitů Sentinel 2 Evropské vesmírné agentury budou využity pro tuto diplomovou práci. Platforma nabízí plný, volný a bezplatný přístup k datům s dostatečným časovým, prostorovým, spektrálním i radiometrickým rozlišením, a to jak pro oblast vědy, výzkumu a vzdělávání, tak dokonce pro komerční užití [S2–DS 2017].

1.2 Cíle diplomové práce, výzkumné otázky

Pro získávání informací o planetě Zemi prostřednictvím jejího dálkového průzkumu pasivními metodami jsou nejdůležitější intervaly EM spektra v ultrafialové, viditelné, infračervené a mikrovlnné části, nicméně pro různé oblasti výzkumu jsou voleny i některé další. Skrze na tyto intervaly citlivé senzory dokáží technologie DPZ mapovat zemský povrch, analyzovat kvalitu vegetace, sledovat změny v krajině, monitorovat stav klimatu i aktuálních meteorologických podmínek a mnohé další. Využití těchto poznatků a technologií pro regionální fyzickogeografický výzkum v oblasti Rejvízské hornatiny a uvedení příkladů aplikací je předmětem této diplomové práce. Předmětem práce naopak není výzkum potenciálu využití globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) a také aktivních metod DPZ (RaDAR, LiDAR).

Cílem práce je zhodnocení konkrétního potenciálu těchto poznatků a technologií pro vytipované oblasti fyzickogeografického zájmu. Tento cíl se z pochopitelných důvodů rozpadá na dílčí cíle, které přibližně odpovídají oborům zájmu fyzické geografie. Hlavní cíl a dílčí cíle lze nahlédnout prostřednictvím výzkumných otázek. Hlavní výzkumná otázka zní, jakým způsobem lze využít satelitní DPZ pro fyzickogeografický výzkum oblasti. Pro naplnění hlavního cíle práce jsou definovány dílčí výzkumné otázky:

- a) Jak lze charakterizovat a prostřednictvím snímků dálkového průzkumu Země či jejich derivátů také zobrazit krajinu se zaměřením na vlhkostní a vegetační poměry? Jak lze v tomto smyslu charakterizovat krajinu vymezené oblasti pro září roku 2023?
- b) Jak se změnilo využití krajiny vymezeného území mezi léty 2006 a 2018 dle CORINE Land Cover? Jak by bylo možné provést detailnější analýzu změn krajinné pokrývky?
- c) Které části zkoumaného území můžeme označit jako rizikové z pohledu nebezpečí sucha v poslední letní sezóně? Která spektrální pásma bude vhodné zahrnout do indexu sucha NDMI?
- d) Jak lze hodnotit vývoj vegetace? Jak se vyvíjela vegetace (se zaměřením na lesní porost) vymezeného území v průběhu kůrovcové kalamity v letech 2016 až 2020? Je pro námi studovanou oblast vhodnější index GLI nebo index NDVI?
- e) K jakým zjištěním stran geomorfologie (potažmo geologie) oblasti mohou přispět filtrační operace s DN hodnotami provedenými na vybraných pásmech? Jaká pásma budou pro filtraci na vybraném vysokofrekvenčním filtru vhodnější? NIRová nebo SWIRová?
- f) Lze si představit využití snímku Sentinelu 2 i pro meteorologické účely? Jak mohou být snímky využity při krizových situacích?
- g) Lze sledovat charakteristiky Velkého mechového jezírka prostřednictvím snímků Sentinel 2? Mohou být vypovídající o fyzickogeografických hodnotách?

Podružným cílem diplomové práce je pak nastínit možná další využití vybraných metod v oblasti zpracování satelitní DPZ pro vymezené území ze strany potenciálních realizátorů, tj. veřejných institucí, soukromých firem či sektoru vědy a vzdělávání. Tato část diplomové práce bude zpracována heuristicky a bez nároku na detailní zmapování situace v oblasti, neboť takové zadání by přesahovalo rámec zamýšleného rozsahu práce.

1.3 Vymezení zájmové oblasti – Rejvízská hornatina

Výběr oblasti Rejvízské hornatiny v předmětu zkoumání pro tuto diplomovou práci byl motivován vícero faktory. Lokalita má specifický fyzickogeografický charakter v rámci oblasti šířeji označované jako Jeseníky, znatelným způsobem se na ní propisovaly důsledky aktuálních klimatických změn, terénní šetření autora provedené v rámci bakalářské práce [RUŠAR 2020, BP] a znalost lokality poskytly cenné informace pro validaci, event. korekci zjištění ze snímků dálkového průzkumu Země, a přestože by bylo možné rozšířit výzkum na větší území (například se zahrnutím Hrubého Jeseníku) zvolení menšího, ale důkladněji prozkoumaného území umožnilo efektivnější využití dostupných dat a snížení rizika chybných interpretací. Také prostorové rozlišení dat bylo shledáno jako vhodné pro potřeby takto geograficky ohraničeného výzkumu, v případě menších území by byla potřeba detailních dat, která nejsou volně dostupná a bezplatná. A v neposlední řadě – Rejvízská hornatina (snad kromě notoricky známých mechových jezírek a okolí obce Rejvíz) často stojí v pozadí zájmu ve srovnání s celkem Hrubého Jeseníku, který se dlouhodobě těší zájmu vědců. Cílem diplomové práce je tedy kromě badatelských cílů definovaných výše také alespoň částečně přispět k poznání opomíjenější oblasti.

Oblast zájmu je tedy definována jako geomorfologický podcelek Rejvízská hornatina jakožto součást celku Zlatohorské vrchoviny dle geomorfologického členění České republiky [DEMEK, MACKOVČIN 2006]. Polohu vymezují obr. č. 1. a 2. Dělení oblasti do menších geomorfologických celků pak zachycuje obr. č. 3.



Obr. č. 1 – poloha zájmového území ve vztahu k okolním geomorfologickým jednotkám stejné úrovně (podcelkům); malé mapě podobně zobrazení znázorňuje polohu Rejvízské hornatiny v rámci Olomouckého a Moravskoslezského kraje; INSPIRE 2023, CENIA 2023



Obr. č. 2 – znázornění zájmového území na podkladové topografické mapě CENIA; CENIA 2023



Obr. č. 3 – rozdělení vymezeného území do menších oblastí (podokrsků, resp. částí) pro snazší prostorovou orientaci při popisu různých problémů zpracovaných níže; INSPIRE 2023

1.4 Základní fyzickogeografická charakteristika oblasti

Plocha Rejvízské hornatiny činí 80,3 km², střední výška dosahuje 669,5 m n. m., nejvyšším vrcholem geomorfologického podcelku je Příčný vrch s výškou 974 m n. m. Z geomorfologického hlediska se do okrsků dělí na západní Zlatochlumský hřbet (49 km²) a východní Heřmanovické hřbety (31,3 km²) [DEMEK, MACKOVČIN 2006, s. 146–147, 377 a 520].

Z geologického pohledu je jesenický blok¹ složený z komplexů usazených, vyvěřelých i přeměněných hornin a jeho vývoj sahá od proterozoika přes paleozoikum až do kvartéru. V prvním výrazném období (proterozoikum) došlo k vytvoření krystalinika, které prošlo kadomskou orogenezí i postupnou metamorfózou a bylo doplněno intruzivními průniky z vulkanických těles. Toto jádro silezika je pokryté keprnickou klenbou budovanou ortorulami, pararulami a svory, a desenskou klenbou budovanou biotitickými rulami, pararulami, migmatity, metagranitoidy ortorulami a vulkanity. Vrstvy druhého období (do kvartéru včetně) jsou metamorfovány méně, dopad variského vrásnění je u nich nevyrovnaný (klesá směrem od keprnické do desenské klenby). Podstatnou část Rejvízské hornatiny tvoří devonská vrstva, tzv. vrbenská skupina. Horninami jsou zde bazální fylity, břidlice, bazické a kyselé

¹ Zjednodušeně pro účely této práce je chápán jako Hrubý Jeseník s přilehlými oblastmi, tedy i Rejvízskou hornatinou.

metamorfity, vápence a samozřejmě amfibolit. K vrbenské skupině se řadí také rejvízská skupina s drakovskými kvarcity, kvarcity s fylitem a křemennými metakonglomeráty.

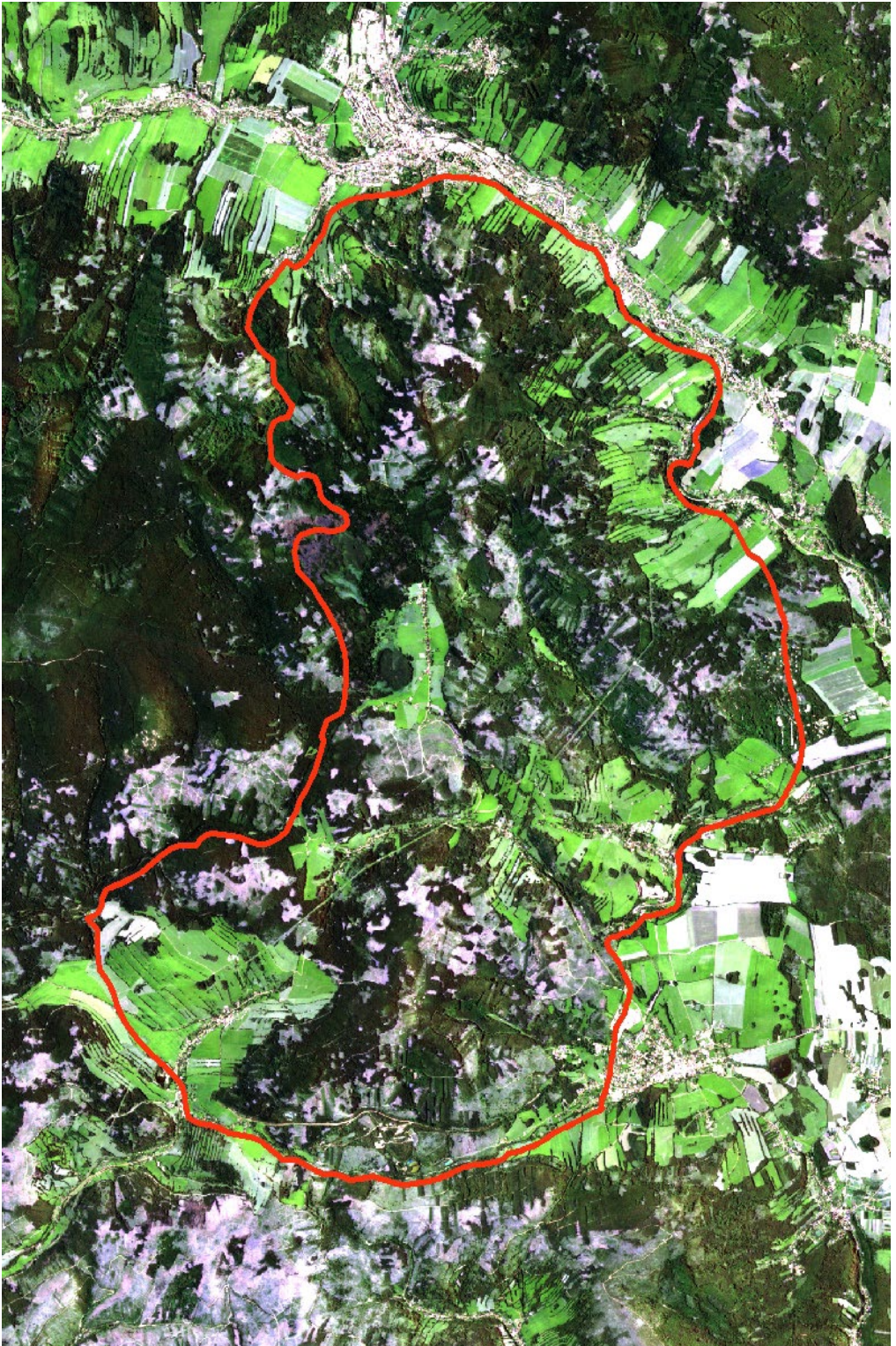
Podstatným geologickým útvarem oblasti je jesenický amfibolitový masiv vrbenské skupiny, složený z metamorfovaných bazických vulkanitů a intruzivních hornin. Po denudačních procesech nejstaršího paleozoika a v dalších obdobích došlo k vysunutí v rámci alpského vrásnění a v kvartéru pak sledujeme finální formování reliéfu erozní činností vody, mrazovým zvětráváním a periglaciálním (a minimálně zčásti i glaciálním) vývojem [CHLUPÁČ 2002, s. 50–51; ŠAFÁŘ a kol. 2003, s. 20–21, Kol. aut. 2004, s. 7.].

V oblasti lze pozorovat různé tvary zemského reliéfu, od rozlehlých horských hřbetů, sedel a rozsoch závislých na morfostrukturách, přes celou škálu strukturně denudačních tvarů (rozličné skalní útvary jako např. defilé, stěny, věže, zdi, převisy, komíny, okna, mísy aj.) až po fluviální tvary erozní i akumulární (údolí s říčkami se skalními prahy v korytech, strže, meandry, břehové nátrže a nejrůznější erozní rýhy, okrouhlíky a fluviální říční terasy). Speciálním druhem tvarů georeliéfu jsou pak ty, které souvisí s mrazem, sněhem, dobou ledovou a přítomností ledovce na vymezeném území (moréna, glaciální kužel, kryoplanační plošina s mrazovými sruby, různá balvanová moře i izolované skály) [RUŠAR 2020, BP].

Z hlediska pedogeografického nacházíme v oblasti převážně kyselé kambizemě, také podzoly a kryptopodzoly, v oblasti mechových jezírek samozřejmě organozemě a výjimkou nejsou i nevyvinuté půdy (litozemě, rankery) [půdní mapy MŽP, půdní mapy ČGS]. Klimatologicky je území rozděleno na chladnou a na srážky bohatou oblast (dle Quitta C7) a severovýchodněji umístěnou mírně teplou a na srážky rovněž bohatou (dle Quitta MW1) [TOLASZ a kol. 2007, s. 230–233]. Vody jsou odváděny řekou Bělou a Černou Opavou skrze Odru, spadající do úmoří Baltského moře. Významnými toky jsou také Olešnice, do níž se vlévá Javorná, Vrchovištní potok a potok Chebží vlévající se do Bělé a Bublavý potok vlévající se do Černé Opavy [HEIS VÚV 2022].

Oblast spadá pod Jesenický bioregion, taxonomicky převažuje smrkobukojedlový a jedlobukový vegetační stupeň, zastoupen je i stupeň bukový, květena je chladnomilná, vegetace boreální s rostlinami vyšších vegetačních stupňů. Z hlediska krajinného pokryvu jsou pro oblast charakteristické jehličnaté a smíšené lesy, ale také lesokřoviny a traviny. Výjimečně pak nacházíme pole, louky a zemědělské areály. Přirozenou vegetací jsou smrčiny a bučiny. Zajímavostí je výskyt blatkových borů v okolí NPR Rejvíz. Ze savců lze jmenovat jelena lesního, srnce obecného, jezevce lesního, kunu lesní i skalní, také veverku obecnou, plcha velkého či prase divoké. Významnými ptačími obyvateli jsou čáp černý, výr velký, jestřáb lesní či krahujec obecný, narazit je možné na rysa ostrovida a s určitou mírou pravděpodobnosti je obyvatelem i vlk obecný [ŠAFÁŘ a kol. 2003, s. 100–105; CULEK a kol. 2013, s. 307–312].

Pohled na vymezené území přibližně tak, jak jej zprostředkovávají lidské oči (syntéza v pravých barvách), představuje obr. č. 4.

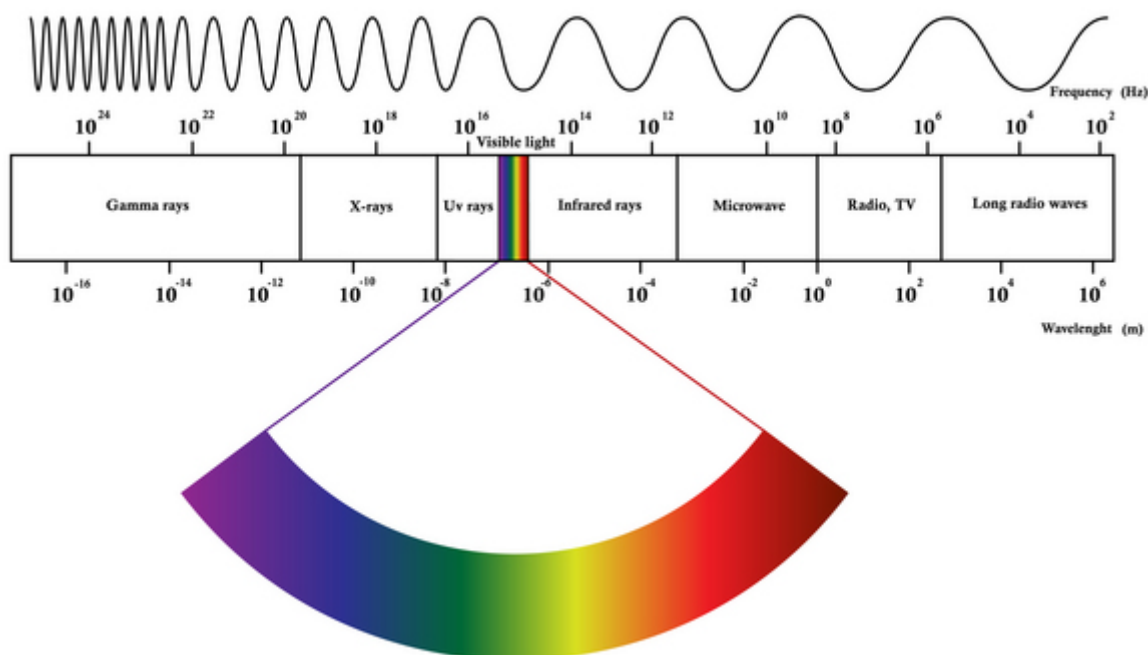


Obr. č. 4 – líniově vyznačená hranice Rejvízské hornatiny na barevné syntéze (RGB) satelitního snímku ze Sentinelu 2 ze dne 9. 9. 2021; histogram v radiometrické úpravě 2 sigma; přestože jsou zobrazení v pravých barvách efektní pro lidské oko, v této práci se s nimi potýkat nebudeme; SENTINEL, INSPIRE 2023

2 TEORETICKÝ RÁMEC, MISE A DATA

2.1 DPZ – elektromagnetické záření, teoretický základ

Satelity a další zařízení určená pro DPZ využívají při získávání informací o objektech na zemském povrchu fyzikálních poznatků spjatých s elektromagnetickým zářením. Přijmeme-li ve fyzice převažující a pro tuto oblast vhodný vlnový popis jevů, můžeme záření definovat jako příčné vlnění elektromagnetického pole. V kontextu DPZ jsou jeho významnými charakteristikami vlnová délka a frekvence. S elektromagnetickým zářením se v přírodě setkáváme v rozsáhlém spektru o několika řádech tak, jak znázorňuje schéma na obr. č. 5. Princip získávání poznatků DPZ spočívá v tom, že různé předměty na zemském povrchu jinak odrážejí, pohlcují nebo vedou určité části spektra EM záření [GOMEZ a JONES 2010, NRC 2016]. Analýza záření odraženého ze zemského povrchu (případně umělého) a diferenciací částí jeho spektra je vlastní fyzikální podstatou a hlavní metodou DPZ [SVATOŇOVÁ, LAUERMAN 2010, s. 8 a 9; k tématu obecně FREEMAN, KING a LAFYATIS 2019; LILLESAND, KIEFER a CHIPMAN 2015]. V tomto smyslu je také hlavní metodou této práce.



Obr. č. 5 – elektromagnetické spektrum s vyznačenou světelnou částí; [physicsbook 2023, dostupné online]

2.2 Sentinel 2

Mise Sentinel 2 je součástí širšího programu Copernicus, který je iniciativou Evropské unie (EU) a Evropské vesmírné agentury (ESA) zaměřenou na monitorování Země. Tento program se skládá z řady satelitů, z nichž každý slouží k různým účelům.

Mise Sentinel 2 se zaměřuje na monitorování povrchu Země, přičemž poskytuje relativně detailní multispektrální snímky cenné pro širokou škálu aplikací, od zemědělství a lesnictví až po monitorování změn životního prostředí a řízení přírodních katastrof. Tento systém se

skládá ze dvou satelitů, Sentinel 2A (obr. č. 6) a Sentinel 2B, které byly vypuštěny v letech 2015, resp. 2017. Dráha obou satelitů je slunečně synchronní, pohybují se ve výšce 786 km nad zemským povrchem a jejich záběr činí 290 km. Každý satelit je vybaven multispektrálním snímačem se schopností detailního pozorování vegetace, půdy, vodních ploch a zástavby, a to s frekvencí přeletů jedenkrát za pět dní pro každou oblast Země [S2–DS 2017].



Obr. č. 6 – grafické znázornění satelitu Sentinel 2A zachycujícího data ze zemského povrchu; [ESA 2023, dostupné online]

2.3 Senzor MSI

Obě družice jsou vybaveny pokročilým multispektrálním snímačem (MSI), který je klíčovým prvkem pro získávání dat. Disponuje dvěma ohniskovými sestavami, které zachycují sluneční záření odražené od zemského povrchu (jedna sestava pro viditelné a blízké infračervené rozsahy /VNIR/, druhá pro krátkovlnné infračervené rozsahy /SWIR/). Spektrální rozsahy tohoto snímače s radiometrickým rozlišením 12 bitů jsou vybrány tak, aby poskytovaly podrobné informace o různých aspektech zemského povrchu. Prostorové rozlišení snímače je 10 metrů pro viditelnou a blízkou infračervenou oblast, 20 metrů pro další infračervená pásma, a 60 metrů pro pásma specifická pro vegetaci. Tato kombinace umožňuje získávat vysokou úroveň detailů pro širokou škálu aplikací, od monitorování zdraví vegetace po identifikaci různých typů povrchů a vodních těles [S2–DS 2017].

MSI disponuje na rozdíl od starších whiskbroom skenerů (LANDSAT, SPOT) jejich modernější verzí pushbroom, jenž pořizuje záznam celého pruhu země najednou, nikoliv v jednotlivých řadách při neustálých pohybech skenovacích prvků [S2–DS 2017; <https://collgs.czechspaceportal.cz/> cit. 2023].

2.4 Charakteristika využitých snímků

Data ze satelitů Sentinel 2 ve formě zachycených snímků lze rozdělit do pěti skupin dle úrovně zpracování. Přehledné zachycení těchto pěti stupňů dat a jejich základní radiometrické a geometrické charakteristiky podává tabulka č. 1.

Tab. č. 1 – Postup zpracování dat od levelu 0 po level 2A; vlastní zpracování na podkladě [S2–DS 2017; Copernicus Sentiwiki 2023]

produkt	stav digitálních dat ve smyslu DN	další, zejm. geometrické, charakteristiky	přístupnost dat
level 0	snímek se surovými daty (raw image data)	nezpracované digitální signály tak, jak je zachytí senzor, dochází k jejich kompresi a přenosu	pro běžné uživatele není přístupný
level 1A	data nejsou radiometricky zkalibrována , ale je provedeno základní zpracování tak, že uložené hodnoty se blíží reálným radiometrickým data nejsou radiometricky zkorigována	data jsou dekomprimována data jsou hrubě registrována (doplněna o základní časové a geometrické informace jako polohu satelitu, přiřazení k zeměpisným souřadnicím dle modelového pohybu)	pro běžné uživatele není přístupný
level 1B	data jsou radiometricky zkalibrována , hodnoty DN jsou standardizovány, jsou konzistentní data nejsou radiometricky zkorigována , resp. jsou, ale pro horní část atmosféry (top of atmosphere)	data jsou registrována , tj. a) geometricky podstatným způsobem zkorigována (zůstává zkreslení nerovností terénu) b) georeferencována , každý pixel odpovídá vymezené poloze na zemi	pro uživatele přístupný
level 1C	data nejsou radiometricky zkorigována , resp. jsou, ale pro horní část atmosféry (top of atmosphere) podobně jako u předchozího levelu	data jsou ortorektifikována , tj. je zapracován vliv terénu na základě digitálních modelů terénu (referenční systém WGS84) data jsou převzorkována (nastavení velikosti pixelů pro 10 m, 20 m, 60 m)	pro uživatele přístupný
level 2A	data jsou radiometricky zkorigována pro bottom of atmosphere, vliv atmosféry (aerosoly, vodní páry) je tak odstraněn a pracujeme s reflektancí povrchu	jsou odstraněny minimální geometrické nepřesnosti, které mohly způsobovat jevy v atmosféře	pro uživatele přístupný

Pro účely práce budou zvolena radiometricky zkorigovaná a zkalibrovaná data zobrazující reflektanci povrchu; ta, která jsou již georeferencována a ortorektifikována (level 2A). V odůvodněných případech (např. syntéza tasseled cap) budou využita georeferencovaná a ortorektifikovaná data s reflektancí horní části atmosféry (level 1C).

Pro jednotlivé aplikace budou využita zejména spektrální pásma s největším prostorovým rozlišením (10x10 m), v určitých případech ale také pásma s rozlišením 20x20 m a 60x60 m na pixel. Přehled jednotlivých pásem satelitu Sentinel 2 dle prostorového rozlišení podává obr. č. 7, prostorové rozlišení společně se dvěma základními spektrálními charakteristikami jednotlivých pásem podává pak tabulka č. 2.

10 metre spatial resolution:

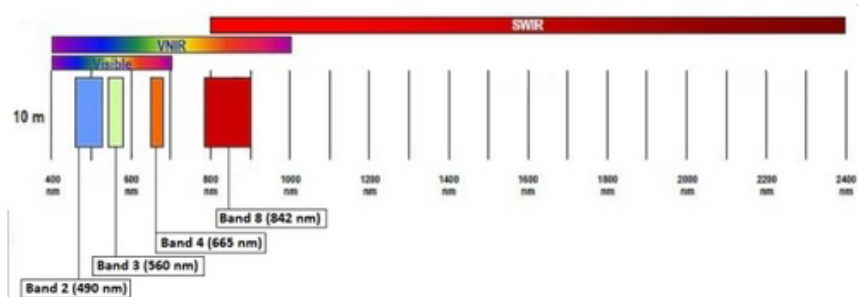


Figure 1: SENTINEL-2 10 m spatial resolution bands: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) and B8 (842 nm)

20 metre spatial resolution:

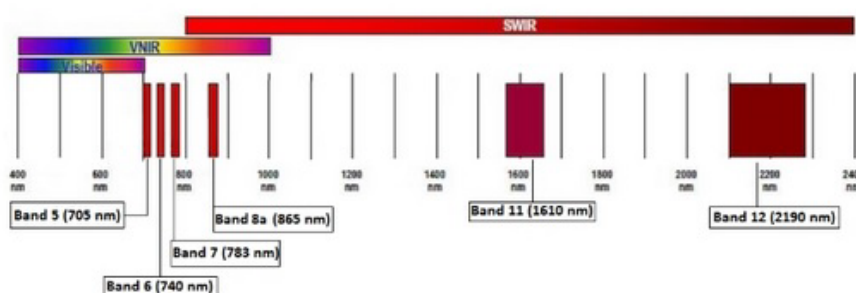


Figure 2: SENTINEL-2 20 m spatial resolution bands: B5 (705 nm), B6 (740 nm), B7 (783 nm), B8a (865 nm), B11 (1610 nm) and B12 (2190 nm)

60 metre spatial resolution:

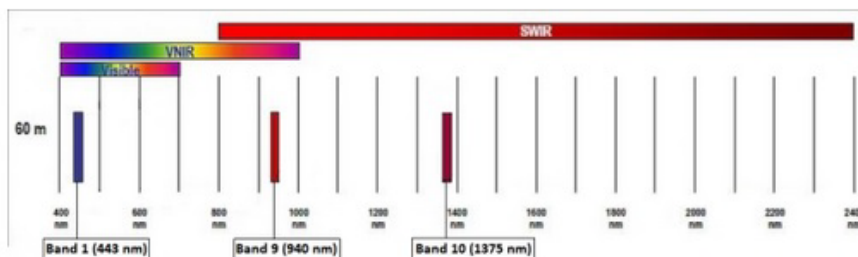


Figure 3: SENTINEL-2 60 m spatial resolution bands: B1 (443 nm), B9 (940 nm) and B10 (1375 nm)

Obr. č. 7 – prostorové rozlišení dat Sentinelu 2 je rozdílné pro jednotlivá spektrální pásma, pro B2, B3 a B4 jsou zaznamenávána data s 10 m rozlišením, pro B5, B6, B7, B8a, B11 a B12 to jsou data s 20 m rozlišením a pro B1, B9 a B10 se jedná o data s rozlišením 60 m na pixel; [Copernicus Sentiwiki 2023].

Význam Sentinelu 2 spočívá v možnosti aplikace získaných dat v různých vědních a praktických oborech. Data z MSI pomáhají vědcům lépe porozumět a monitorovat změny krajiny a životního prostředí, například v oblastech zasažených odlesňováním nebo suchem, na což bude i v této práci kladen důraz. Významná jsou však pro mnoho oborů.

Tab. č. 2 – přehledná základní charakteristika (rozlišení) spektrálních pásem Sentinelu B2 [Copernicus Sentinel 2023]

označení pásma	spektrální rozlišení		prostorové rozlišení (m)	radiometrické rozlišení (b)
	střední vlnová délka (nm)	šířka pásma (nm)		
B1	443	20	60	12
B2	490	65	10	12
B3	560	35	10	12
B4	665	30	10	12
B5	705	15	20	12
B6	740	15	20	12
B7	783	20	20	12
B8	842	115	10	12
B8a	865	20	20	12
B9	945	20	60	12
B10	1380	30	60	12
B11	1610	90	20	12
B12	2190	180	20	12

2.5 Software, metody zpracování snímků a popis matematických operací

Pro účely této diplomové práce bylo využito především programů SNAP a ArcGIS, výjimečně pak programu QGIS.

Program **SNAP** (SeNtinel Application Platform) umožňuje prohlížet, analyzovat a zpracovávat družicová data DPZ, a to zejména pro optické části spektra (VIS, NIR, SWIR, částečně ale také MIR). Lze však provádět analýzu i pro radarové a také tepelné části EM spektra. Jde o společnou softwarovou architekturu pro všechny nástroje misí Sentinel, kromě nich však software podporuje i řadu jiných platform a podporuje různé formáty dat. I z hlediska využití ze strany uživatelů je široce zaměřený, jeho snadno použitelné rozhraní jej činí přístupným i pro uživatele bez detailnějších znalostí GIS a DPZ. SNAP je poskytován bezplatně agenturou ESA [ESA Earth online 2023].

Snímky Sentinelu jsou ukládány a distribuovány ve formátu Sentinel-SAFE, který si SNAP převádí do formátu BEAM-DIMAP pro zpracování a analýzu dat. SNAP obsahuje několik toolboxů; pro účely této práce je relevantní Sentinel 2 Toolbox, speciálně navržený pro zpracování dat mise Sentinel 2. Pomocí různých procesorů toolboxu je možné provádět atmosférické korekce, syntézy snímků, analýzy časových řad, transformaci dat (např. převod odrazivosti na radianci), výpočet různých indexů, rasterizaci, klasifikaci, segmentaci a mnoho dalších operací [ESA Earth online 2023].

ArcGIS (10.2) vyvinutý společností Esri je pokročilý geografický informační systém určený pro správu, analýzu a vizualizaci geografických dat. Nabízí uživatelům širokou škálu nástrojů pro práci s různými typy prostorových dat, včetně vektorových a rastrových formátů, a podporuje vytváření komplexních map a prostorových modelů. V oblasti dálkového průzkumu Země ArcGIS poskytuje nástroje pro efektivní analýzu satelitních a leteckých snímků, podporuje integraci rastrových dat s dalšími geografickými informacemi a umožňuje pokročilou prostorovou analýzu a také modelování pro hodnocení a sledování změn na Zemi [srov. GELETIČ a kol. 2023]. Pro analýzu snímků DPZ pro účely této diplomové práce byl software využit v několika ohledech (zejm. pro prostorové filtrace a práci s vektorovými vrstvami).

QGIS (Firenze) je open source obdobou ArcGISu, jde o otevřený a bezplatný geografický informační systém, který se používá pro analýzu, správu a vizualizaci geografických dat. Je vyvíjen komunitou vývojářů a uživatelů po celém světě, což z něj činí flexibilní a přizpůsobitelnou platformu pro různé aplikace. QGIS podporuje širokou škálu vektorových, rastrových a databázových formátů a umožňuje uživatelům kombinovat a analyzovat jejich různé typy. V DPZ poskytuje QGIS sice rovněž nástroje pro zpracování a analýzu satelitních snímků včetně podpory pro různé typy senzorů a datových produktů, nicméně družicové snímky byly v rámci diplomové práce zpracovávány ve výše zmíněných programech [QGIS 2023].

Zpracování snímků z hlediska pojmenovaných levelů v rámci programu Sentinel podává již tabulka č. 1 výše. V této kapitole je však nutné zaměřit se na metody zpracování snímků provedené ve výše zmíněných softwarech ve smyslu matematických operací na finálních levelech 2A (či výjimečně 1C), a tím navázat na definici základní metody práce zmíněné v kapitole *DPZ – elektromagnetické záření, teoretický základ* spočívající v analytickém zpracování hodnot odraženého EM záření. Operace můžeme hrubě rozlišit pro účely této

práce na **operace pro posílení vypovídacích schopností obrazu (A)** a na **aritmetické operace s DN hodnotami pásem (B)**.

- A) V rámci těchto metod jde zejména o různá zobrazení většinou totožných dat za účelem zvýšení jejich vypovídacích schopností, tj. v důsledku za účelem intuitivnější analýzy a snazší interpretace [srov. NRC 2016, s. 154–157]. Zejména se jedná o upravení jasů, kontrastu a operace s histogramem. Pracovně k těmto postupům můžeme přiřadit i převzorkování obrazu, byť zde dochází k rozdělení či sloučení dat za účelem totožného rozlišení pro více pásem. S hodnotami DN základních pásem se nezachází. S hodnotami DN se však manipuluje v případě filtrací obrazu, ale jelikož je převažující účel povětšinou shodný se zlepšením vypovídacích schopností obrazu, můžeme je ponechat v této skupině.
- B) Tyto metody jsou zaměřeny na využití různých možností při kombinaci spektrálních pásem. Prostřednictvím základních nebo pokročilých matematických operací dochází ke změnám DN hodnot obrazu a jsou vytvářena celá nová zobrazení [srov. NRC 2016, s. 148]. Například se jedná o pravé či nepravé syntézy, analýzu hlavních komponent či užití vzorců v band maths (např. pro vegetační indexy). Pracovně k těmto postupům můžeme přiřadit i klasifikaci obrazu, byť zde jde spíše o rozdělení výsledných DN hodnot do určených tříd dle zásad regionální taxonomie.

Při výpočtu různých **indexů** pro hodnocení krajiny (NDVI, NDMI) dochází k aritmetickým operacím s jednotlivými pásmy, dle určených vzorců se pásma sčítají, odčítají, dělí apod. Výsledný výpočet je pak zobrazen jako nové pásmo v odstínech šedi v rozsahu bitové hloubky. Komplikovanější operací je statistické či aritmetické zpracování různých pásem do **komponent** a následné **syntetizování** nově vzniklých komponent do obrazu (analýza hlavních komponent, tasseled cap). Při **klasifikacích** obrazu dochází ke statistickému zpracování vícero pásem (nejlépe všech dostupných) a k následnému přiřazení pixelů dle DN charakteristik jednotlivých pásem k tzv. klasifikačním třídám. Těmi jsou nejčastěji operátorem určené typy povrchu (les, zástavba...). Při **filtrování** obrazu prochází každý jednotlivý pixel maticí hodnot, které přepočítávají jeho původní DN hodnotu dle okolních pixelů a stanovují novou hodnotu. Dle nastavení matice lze hovořit o vysokofrekvenčních filtrech či nízkofrekvenčních filtrech. Samozřejmostí je pak **prostá syntéza** tří pásem do barevných obrazů (nepravé barvy, pravé barvy).

3 APLIKAČNÍ ČÁST

3.1 Charakteristika krajiny – tasseled cap

Zatímco z hlediska vývoje v čase bylo cílem charakterizovat krajinu v rámci kapitoly o změnách krajinné pokrývky pomocí spektrální klasifikace, v případě této aplikace bylo cílem pouze zaměřit se na náhled oblasti v jednom konkrétním okamžiku. Záměrem bylo v tomto případě konkretizovat vlhkostní a vegetační poměry Rejvízské hornatiny pro 9. září 2023. Datum bylo zvoleno náhodně (rozhodovala kvalita snímku a schopnost autora provést kontrolní prospekci). Zvolenou metodou je výpočet a znázornění indexu tasseled cap, resp. jednotlivých jeho složek, a následná interpretace DN hodnot.

Index transformuje multispektrální data (využita jsou pásma B2, B3, B4, B8, B10, B11 a B12) do souboru tří obrazových pásem. Tato pásma jsou konstruována tak, aby v syntéze nabízela co nejrelevantnější možnost interpretace dat ve smyslu charakteristiky krajiny z pohledu vlhkosti a vegetace. Pásma se jakožto komponenty pro syntetický index označují jako greenness (zelenost), wetness (vlhkost) a brightness (jasnost), přičemž každé z nich zastupuje určitou charakteristiku zemského povrchu [CRIST a KAUTH 1986].

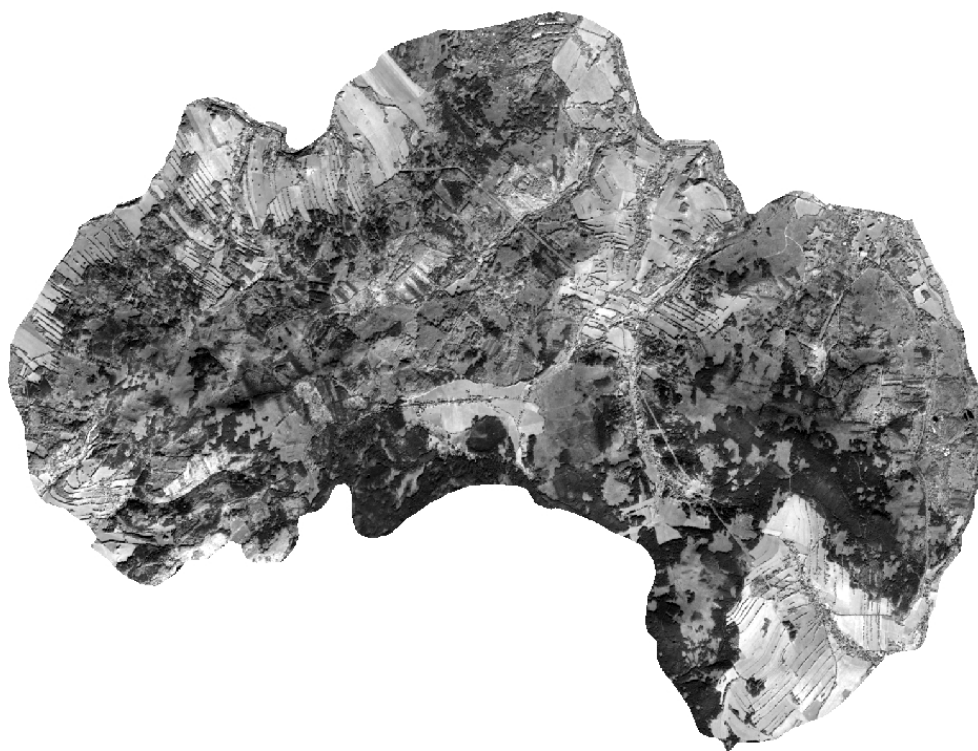
Zatímco složka *greenness* reprezentuje vegetační pokryv s přihlédnutím k jeho zdravotnímu stavu (zdravá vegetace intenzivně absorbuje viditelné světlo a silně odráží blízké infračervené světlo), tak složka *wetness* zachycuje obsah vlhkosti v krajině, což je užitečné nejen pro identifikaci vodních ploch, mokřadů, ale taky vlhkých oblastí obecně. Složka *brightness* reprezentuje intenzitu odraženého světla a poukazuje např. na suché zemědělské plochy, skalnaté plochy a pro naši oblast okrajově také na urbanizované oblasti. Následná syntéza tří složek umožňuje charakterizovat a kvantifikovat různé aspekty krajiny, což je důležité např. pro zemědělství či urbánní plánování, nicméně pro vymezené území lze využitelnost spatřovat také pro lesnictví, ekologická i hydrologická témata.

Tab. č. 3 – obecné vzorce výpočtů složek indexu tasseled cap, kde B = brightness, W = wetness a G = greenness; [Index DataBase 2023]

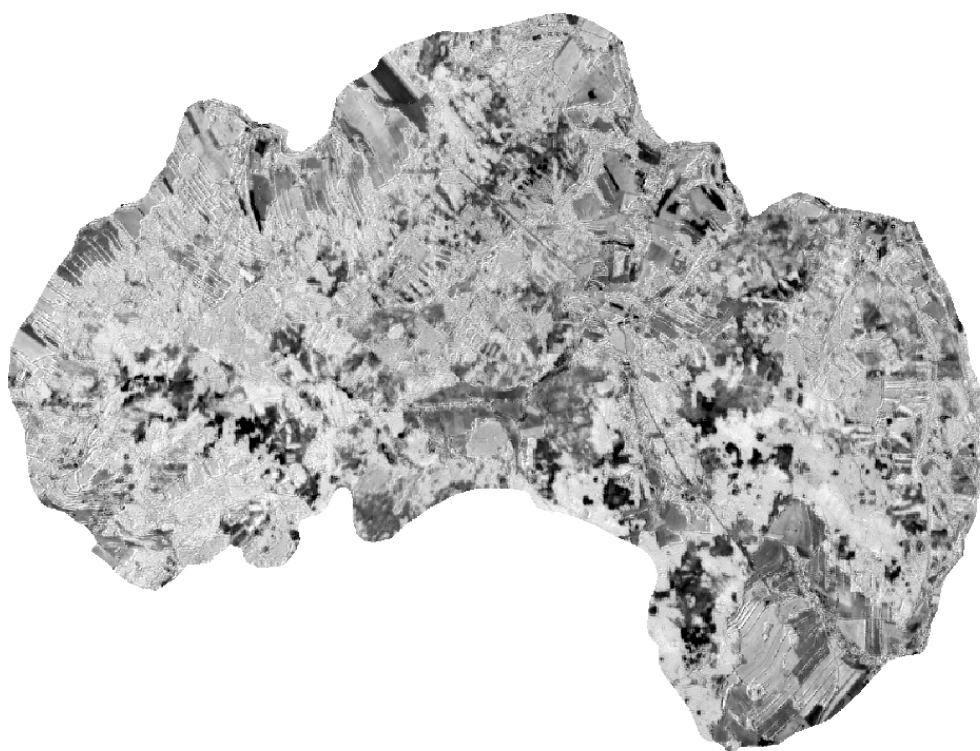
složka	obecný vzorec (hodnoty v závorkách v nanometrech /nm/)
B	$0.3037[450:520]+0.2793[520:600]+0.4743[630:690]+0.5585[760:900]+0.5082[1150:1750]+0.1863[2080:2350]$
W	$0.1509[450:520]+0.1973[520:600]+0.3279[630:690]+0.3406[760:900]-0.7112[1550:1750]-0.4572[2080:2350]$
G	$-0.2848[450:520]-0.2435[520:600]-0.5436[630:690]+0.7243[760:900]+0.0840[1550:1750]-0.1800[2080:2350]$

Tab. č. 4 – konkrétní vzorce výpočtů složek indexu tasseled cap pro senzor MSI, kde B = brightness, W = wetness a G = greenness; [Index DataBase 2023]

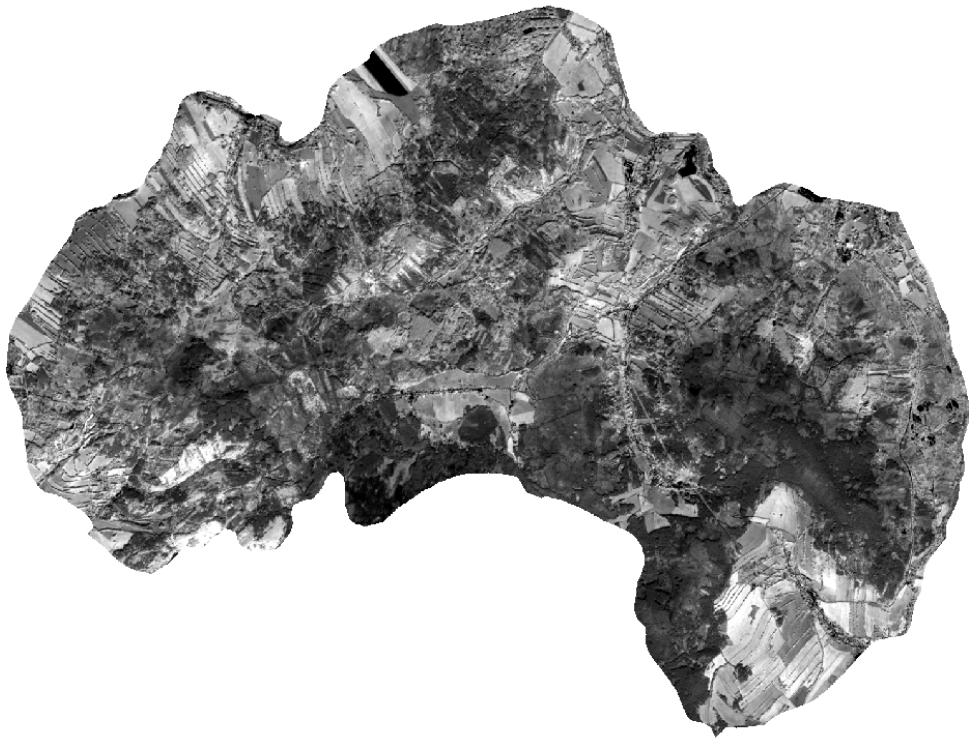
složka	vzorec specifický pro Sentinel 2
B	$0.3037[B2]+0.2793[B3]+0.4743[B4]+0.5585[B8]+0.5082[B10]+0.1863[B12]$
W	$0.1509[B2]+0.1973[B3]+0.3279[B4]+0.3406[B8]-0.7112[B11]-0.4572[B12]$
G	$-0.2848[B2]-0.2435[B3]-0.5436[B4]+0.7243[B8]+0.0840[B11]-0.1800[B12]$



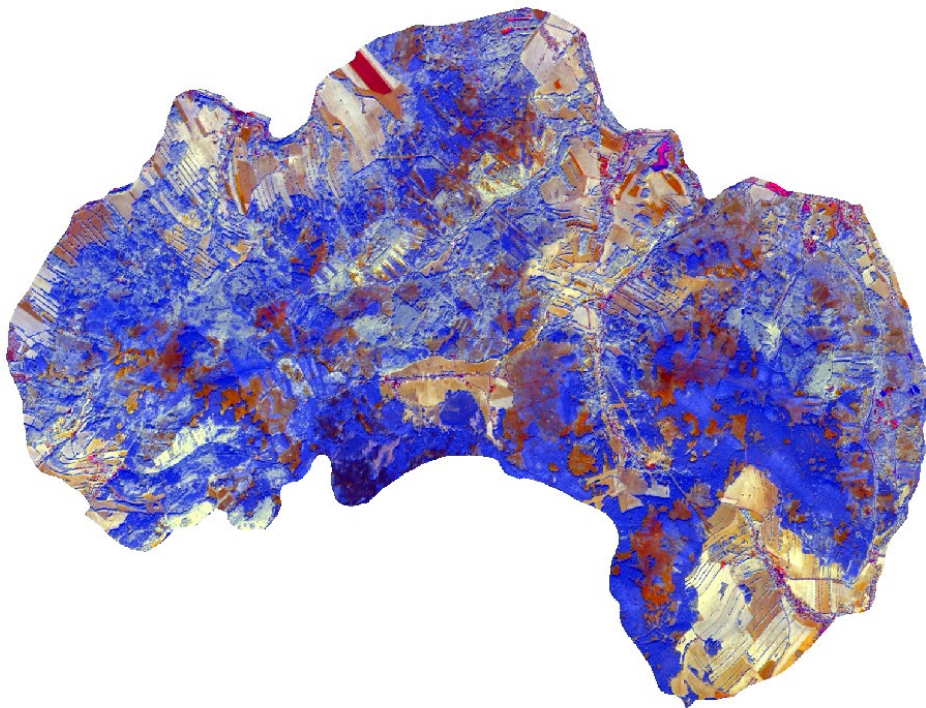
Obr. č. 8 – zobrazení DN hodnot složky **brightness**; pro výpočet hodnot byla kromě dat zpracovaných na úrovni 1C (bottom of atmosphere) zapojena také data zpracovaná na úrovni 2A (top of atmosphere – pásmo č. 10)



Obr. č. 9 – zobrazení DN hodnot složky **wetness**



Obr. č. 10 – zobrazení DN hodnot složky **greenness**



Obr. č. 11 – syntetické zobrazení **tasseled cap**, když brightness = červený kanál, wetness = modrý kanál a greenness = zelený kanál

INTERPRETACE

Výsledné zobrazení s převažující modrou barvou rozbíjí původní odhad, podle kterého mělo dojít k silnějšímu zbarvení do zelena díky silné složce *greenness*. Výsledek se zdá však po úvaze správný a je v souladu se třemi předchozími zobrazeními, ze kterých vyplývá, že modrá složka (*wetness*) má zdaleka nejsilnější ekvivalent odrazivosti. Je třeba si uvědomit, že tato složka nereprezentuje pouze vodní plochy, ale také vysokou vlhkost půdy a podloží, které jsou spjaty s lesními ekosystémy. Odraz infračerveného světla zdravé vegetace rovněž přímo ovlivňuje nárůst složky *wetness*. Charakteristickým pro toto zobrazení (a jistou formou validace) je také tmavě modré zobrazení prostoru v okolí mechových jezírek a vrchovištního potoka, který byl prospekci ověřen jako velmi vlhký, místy podmáčený. Oblast lze tedy hodnotit jako vlhkou, na zdravou vegetaci bohatou. Menší množství ploch s převažující složkou *brightness* svědčí o postupném narovnávání poškození způsobených kůrovcovou kalamitou, resp. následnou těžbou. Je však třeba upozornit na to, že pro vypovídající analýzu by bylo nutné realizovat multitemporální analýzu, pro zvolený den mohly být výsledné hodnoty částečně ovlivněny meteorologickými podmínkami.

MOŽNOSTI DALŠÍCH VÝZKUMŮ

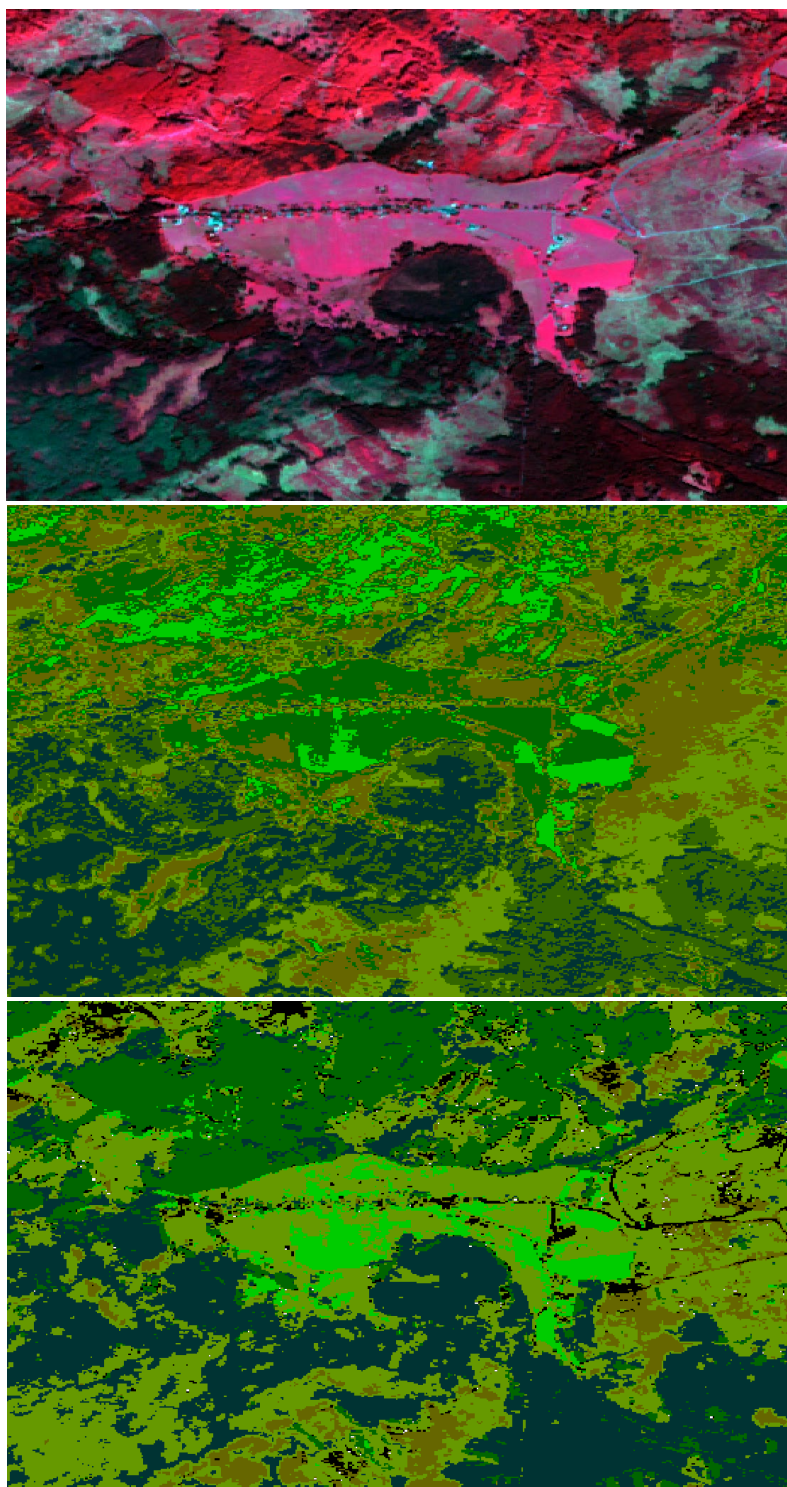
Index tasseled cap nabízí vhodný nástroj pro výzkum vlhkostních a vegetačních charakteristik oblasti, pozorování jeho vývoje pro jednotlivé měsíce v několika po sobě jdoucích letech (např. multitemporální analýza 2013 až 2023) by mohlo vést k detailnímu chápání dopadu klimatické změny a s ní související šíření dřevokazného hmyzu na vymezenou oblast. Taková studie by při rozlišovacích schopnostech Sentinelu 2 mohla přispět i k novým výzkumným zjištěním týkajícím se např. toho, jaké geomorfologické, hydrologické, biogeografické, pedogeografické a další podmínky zrychlovaly či zpomalovaly postup kůrovce na jednotlivých místech. Nutná by však pro tento výzkum byla i detailnější znalost místa. Autorovi není známo žádné dosavadní využití syntézy tasseled cap pro charakteristiku této oblasti, přitom se podstatou své metody přímo nabízí.

3.2 Zachycení změn krajinné pokrývky – řízená a neřízená klasifikace

Klasifikace krajinné pokrývky je klíčovým nástrojem v dálkovém průzkumu Země a environmentálních vědách, sloužícím k identifikaci a kategorizaci různých typů povrchů Země získaných pomocí satelitních snímků. Tento proces je zásadní pro porozumění a monitorování změn v krajině, což je nezbytné pro účinné plánování využití půdy, ochranu životního prostředí a studium klimatických změn. Zatímco neřízená klasifikace spoléhá na algoritmy, které automaticky seskupí pixely do shluků z hlediska spektrálního chování, tak řízená klasifikace využívá operátorem vytvořené trénovací plochy pro definované třídy krajinné pokrývky. [NRC 2016, s. 161–163]. Pro účely sledování změn krajinné pokrývky (a pro většinu jakýchkoliv jiných aplikací) je přesnější řízená klasifikace. Neřízená klasifikace poskytuje pouze nepřesná a vágní data (viz obr. č. 12 uprostřed).

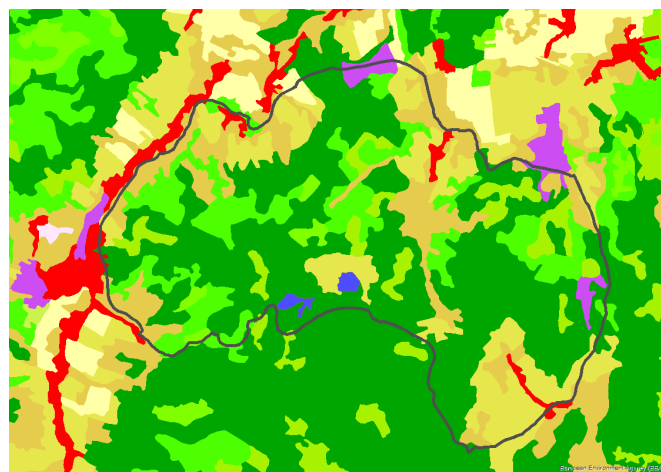
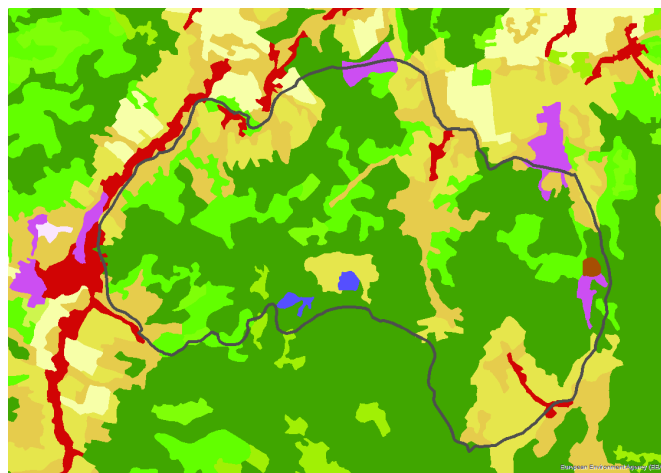
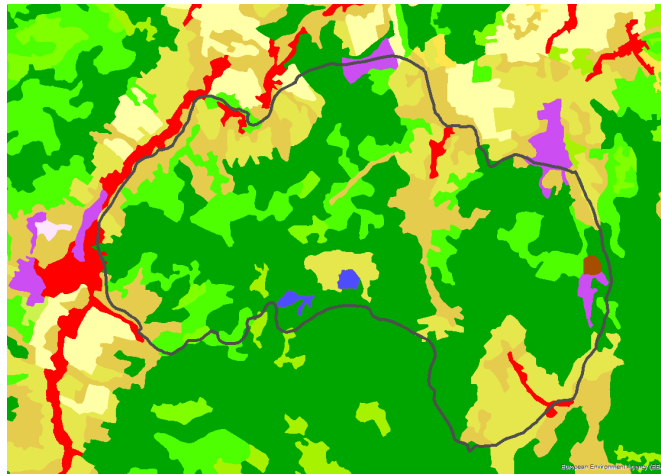
Řízená klasifikace provedená taxonomickou metodou *maximum likelihood* rozděluje hodnoty DN do šesti klasifikačních tříd přináší obstojný obraz pro charakteristiku oblasti vymezenou jako bezprostřední okolí horské obce Rejvíz. Multitemporální analýza by mohla významným způsobem přispět k poznání vývoje oblasti, užitečné by bylo porovnání více algoritmů rozčleňujících datový soubor (např. *maximum likelihood* a *random forest*). Na obr. č. 12 můžeme porovnat výsledky řízené a neřízené klasifikace a základem pro porovnání může být syntéza v nepravých barvách. I přesto, že se výsledný obraz jeví jako obstojný, je potřeba přiznat, že klasifikace je jedním z těžších a na zkušenosti operátora náročnějších aplikací. Provedená klasifikace, i přesto, že k ní bylo přistoupeno pečlivě, nese nedokonalosti.

Významným programem v oblasti klasifikace zemského povrchu je zejména CORINE (Coordination of Information on the Environment), který využíval v minulosti zejména snímků satelitů LANDSAT a SPOT [FERANEC 2010, s. 168]. Program **CORINE Land Cover** je zaměřený na shromažďování informací o stavu a změnách v krajinné pokrývce. Projekt byl zahájen v roce 1985 Evropskou unií a od té doby poskytuje cenná data pro environmentální plánování a politiku. V podstatě jde o rozdělení krajinné pokrývky do různých tříd (celkem vymezeno pro všechny státy 44 tříd) a pak jejich sledování v čase (šestiletý interval), pro což CORINE využívá kombinaci řízených a neřízených klasifikačních technik. Data jsou využívána pro analýzu trendů využití půdy, studium biodiverzity, monitorování dopadů klimatických změn, např. odlesňování, analýzu urbanizace a další, přičemž informace jsou kromě vědeckých účelů využívány také pro krajinný management [srov. FERANEC 2010, s. 179].



Obr. č. 12 – nahoře snímek obce Rejvíz a okolí ze dne 9. 9. 2023; syntéza v nepravých barvách, uprostřed neřízená klasifikace pro šest clusterů, dole řízená klasifikace, k níž patří legenda; barvy pro neřízenou klasifikaci přiřazeny pravděpodobnostním odhadem, z pochopitelných důvodů neodpovídají řízené klasifikaci

hustá vegetace, lesy zdravé	
hustá vegetace, lesy nezdravé	
jiná vegetace, zdravá	
jiná vegetace, nezdravá	
přda a uschlá vegetace	
zástavba, cesty	



Obr. č. 13 – klasifikace území CORINE Land Cover; nahore pro rok 2006, uprostřed pro rok 2012, dole pro rok 2018, černou linií vyznačeny hranice Rejvízské hornatiny; CORINE Land Cover 2018 databáze České republiky

- CORINE LAND COVER – DRUHY POKRYVU ZEMĚ**
- 112: Městská nesouvislá zástavba
 - 121: Průmyslové a obchodní zóny
 - 132: Sklárky
 - 211: Nezavlažovaná orná půda
 - 231: Louky
 - 243: Plevelně zemědělská území s částí přirozené vegetace
 - 311: Lesy listnaté
 - 312: Lesy jehličnaté
 - 313: Lesy smíšené
 - 324: Přechodová stádía lesa a křovin
 - 412: Rašeliniště

INTERPRETACE A MOŽNOSTI DALŠÍCH VÝZKUMŮ

Na první pohled můžeme z obr. č. 13 vyčíst, že k podstatným změnám co do složení krajiny dle v CORINE vymezených klasifikačních tříd nedochází, se znalostí poměrů však víme, že na konci období (2018 a dříve) docházelo k podstatným změnám na lesních porostech kvůli kůrovcové kalamitě. Změny, i když byly pro oblast zásadní, nebyly z prostorového hlediska zásadní pro výsledné zobrazení, což v podstatě potvrzuje fakt, že pro námi vymezenou oblast nejsou data CORINE dostatečná. Určitých změn v kategoriích lesních porostů (smíšené, jehličnaté, listnaté) jakož i zániku skládky si všimnout můžeme, ke studiu problematiky dopadů klimatické změny na místní úrovni bude však nutné použít vlastní klasifikaci či např. výše zmíněné syntézy tasseled cap. Neznamená to však, že nám data CORINE nemohou dát rámcovou představu o charakteristice krajiny.

Klasifikace krajinné pokrývky, zejm. ta řízená, event. řízená v kombinaci s neřízenou, je důležitá pro získávání kontinuálních dat o krajině a pro snadnost jejich interpretace; skrze její pravidelné realizování a vyhodnocování dochází také ke zdokonalování klasifikačních algoritmů tak, aby byla do budoucna zajištěna vysoká přesnost a relevance dat pro různé přírodní, zejména environmentální aplikace. Důležitou se jeví syntéza klasifikačních metod, kdy dochází ke kombinacím využití spektrálních charakteristik, tvarů, struktur či velikostí objektů [FERANEC 2010, s. 166–167], a to při kombinaci řízené i neřízené klasifikace. Logickým interpretačním rámcem je pak multitemporální analýza změn na výsledných třídách doplněná o přízemní vizuální pozorování.

Z hlediska porovnání s předchozí kapitolou se nabízí dílčí výsledné tvrzení, že zatímco z hlediska přírodovědného, např. fyzikogeografického, je pro charakteristiku krajiny vhodnější syntéza tasseled cap, tak pro krajinný management může být důležitější řízená a kombinovaná klasifikace. V obou případech by se však mělo jednat o data získaná ze snímků Sentinel (event. analogických), protože data CORINE se neukazují jako podstatný vývoj reflektující a zobrazující.

3.3 Problematika sucha – index sucha

V posledních letech se Rejvízská hornatina potýká s významnými výzvami souvisejícími s klimatickými změnami. Mezi výrazné problémy patří rostoucí výskyt a intenzita suchých období. Sucha mají značný dopad na vodní zdroje a ekosystémy, na lesní hospodářství, zemědělství a celkovou biodiverzitu oblasti. V důsledku klimatických změn se zvyšuje potřeba detailnějšího monitoringu a porozumění hydrologickým procesům v této unikátní horské krajině [RUŠAR, ABRAHÁMEK 2021]. Technologie DPZ pro sledování a analýzu vlhkosti půdy nabízí cenný nástroj pro posuzování stavu sucha a jeho vlivu na přírodní systém hornatiny.

Zvolenou metodou pro hodnocení sucha je výpočet a zobrazení jednoho z užívaných indexů sucha (Normalized Difference Moisture Index; zkratka NDMI), a to dle obecného níže uvedeného vzorce. Index se používá k odhadu vlhkosti především u vegetace a půdy, proto je důležitý zejména pro monitorování lesních ekosystémů – právě takových, jaké jsou v naší zájmové oblasti, mimoto však i zemědělských oblastí.

Index je počítán z kombinace odrazivosti ve spektrálních pásmech blízké infračervené (NIR) a krátkovlnné infračervené (SWIR) oblasti. Vyšší hodnoty NDMI obecně indikují vyšší vlhkost půdy, zatímco nižší hodnoty naznačují suché podmínky [HUNT a kol. 2009].

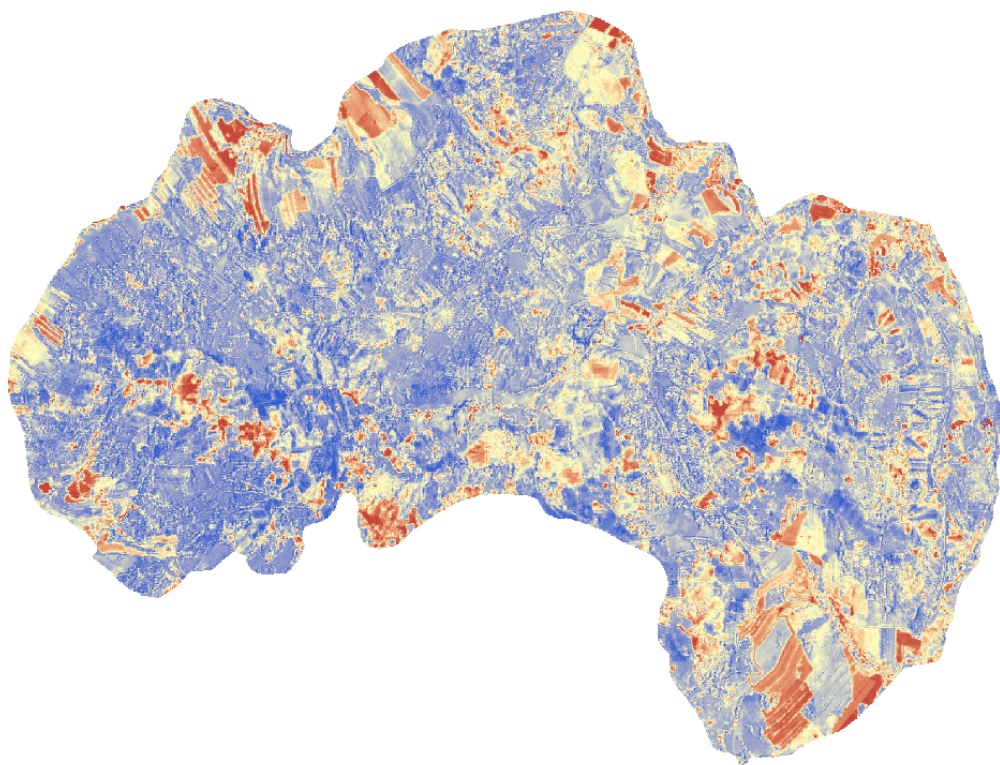
$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

V této kapitole diplomové práce není zacíleno na multitemporální analýzu, která by jistě byla významná a relevantní, nicméně které je dán prostor u klasifikace CORINE, nýbrž na porovnání využití dvou pásmech z hodnot SWIR. V rámci specifického vzorce pro data Sentinelu 2 bylo dosazeno pásmo B8 za NIR a odděleně pak pásma B11 (viz obr. č. 14) a B12 (viz obr. č. 15) za SWIR. Pro komponentu SWIR bylo využito obou pásmech z toho důvodu, že každé z nich má svá specifika.

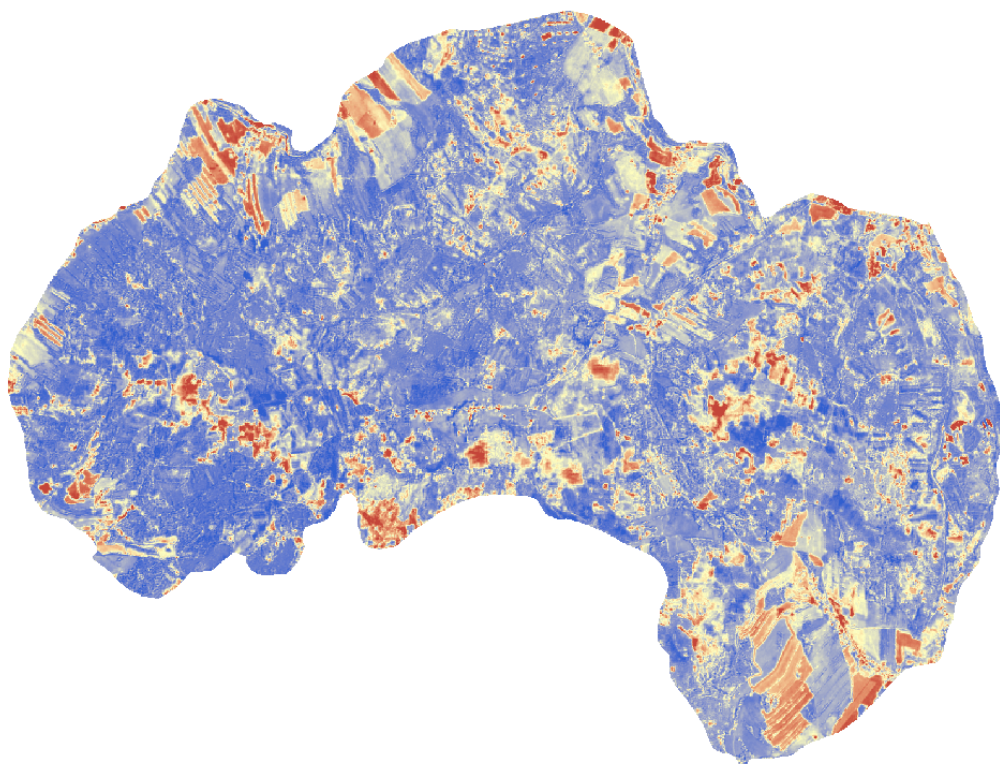
- **Pásmo B11** (střed v 1610 nm) – Je citlivé na obsah vlhkosti ve vegetaci a půdě, je vhodné pro sledování střední až vysoké vlhkosti a také je efektivní pro detekci změn ve vlhkosti půdy.
- **Pásmo B12** (střed v 2190 nm) – Má vyšší citlivost na vodu a tedy i její zřejmou absenci, je obzvláště užitečné pro identifikaci oblastí s velmi nízkou vlhkostí, případně pro zjišťování jemnějších variací ve vlhkosti.

Vzhledem k tomu, že byly zkoumány zejména suché oblasti (hlavním zájmem je monitoring suchých oblastí a nikoliv vlhkých), bylo hypotézou, že vhodnější se bude jevit výsledek s využitím pásma B12, než B11. Výsledek byl ověřen terénní prospekci.² Zkoumaným dnem je 11. červenec 2023, kdy bylo možno pozorovat povrch bez oblačnosti.

² Jako specifická formule pro NDMI je v literatuře uváděna ta s pásmem B11 [Index DataBase 2023], hodnoty SWIR však obsahuje i B12, jde tak v podstatě o experimentální výpočet této diplomové práce.



Obr. č. 14 – grafické znázornění indexu NDMI s využitím pásma SWIR B11; 11. července 2023



Obr. č. 15 – grafické znázornění indexu NDMI s využitím pásma SWIR B12; 11. července 2023

INTERPRETACE

Hned z kraje je nutné upozornit, že grafické znázornění je pouze orientační a za oběma obrázky nestojí srovnatelné hodnoty výsledného indexu (neboť je využito jiných pásem pro SWIR, a proto není zařazena ani legenda), je patrné, že výsledky obou výpočtů jsou téměř totožné a prakticky bez rizika zaměnitelné. Původní odhad, že bude vhodnější pásmo B12, se tak neukazuje jako opodstatněný. Zjištěním je, že pro hodnocení sucha v oblasti Rejvízské hornatiny lze v rámci výpočtu NDMI využít ze strany IDB doporučené pásmo B11 a prakticky se stejnými výsledky také rovněž SWIRové pásmo B12.

Index nám hnědou barvou přibližuje rizikové oblasti z hlediska extrémního sucha, náhodnou prospekci (provedenou však až 21. července 2023) bylo v podstatě potvrzeno určení rizikových míst, avšak s jednou výjimkou. Touto výjimkou je oblast Mechovojezerní kotliny, ve které dochází k pozoruhodnému jevu. I přesto, že a) s oběma pásmy bylo provedeno několik kontrolních výpočtů, b) byly zkontrolovány vstupní data a c) bylo ověřeno zadání správných vzorců, se jeví výsledné zobrazení jako bias. Jako extrémně suchá se totiž jeví oblast jižně od jezírka a také jeho spodní část, což lze považovat za nepravděpodobné. Vzhledem k nemožnosti vstoupit do této oblasti v daném období nemohlo dojít k terénní prospekci na tomto konkrétním místě, avšak i kdybychom přijali verzi, že stromy jižně od jezírka mohly být silně postiženy suchem, jako nepravděpodobné se jeví zjištění, že i sama součást mechového jezírka by byla extrémně suchá. Vyloučit to nicméně nelze a data v podstatě hovoří exaktním jazykem. Jako možné řešení však lze navrhnout to, že bias souvisí se speciálními spektrálními charakteristikami vody Mechového jezírka zanesené mnoha organickými i anorganickými příměsami a index tak neumí rašelinné plochy správně vyhodnotit. Dokladem pro to, že se jedná o bias a nikoliv o relevantní hodnotu indexu může být téhožroční (byť zářijové) zaznamenání syntézy tasseled cap (viz obr. č. 11), které znázorňuje oblast Mechovojezerní kotliny jako území s nejsilnější složkou wetness.

MOŽNOSTI DALŠÍCH VÝZKUMŮ

Jednoznačnou příležitostí pro studium sucha by byla dlouhodobá multitemporální analýza s využitím NIRového a jednoho ze dvou SWIRových pásem. Užitečná by jistě rovněž byla komparace s tasseled cap a řízenou či kombinovanou klasifikací.

3.4 Vývoj lesního pokryvu – vegetační indexy

Lesy v Rejvízské hornatině (jakož i v širším okolí) se v posledních letech potýkaly s výrazným problémem šíření dřevokazného hmyzu (kůrovce) a s realitou následné těžby. Dle dostupných dat [ÚHÚL 2023] docházelo k největším ztrátám v letech 2017 a 2018 s pokračováním v roce 2019. Odhaduje se, že téměř třetina referenčního území byla poškozena [srov. kůrovcová mapa 2023]. V kapitole je charakterizován vývoj vegetace ve vymezené oblasti v období 2016 až 2020, přičemž pro názornost vývoje jsou analyzovány roky 2016, 2018 a 2020.

Metody pro hodnocení vývoje vegetace a nepřímo tak i postupu kůrovcové nákazy a následné těžby jsou zvoleny dvě. Tou první je obecný, a přesto výstižný a často používaný index odrážející fotosyntetickou aktivitu vegetace – normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI); druhou pak specifický, a zejména pro lesní areály vhodný index zelených listů (GLI), v němž se pod “listy” rozumí také jehlice jehličnanů. Užitečnost GLI pro studium vegetace v porovnání s obdobnými indexy řeší ENG a kol. [2019]. Indexy se liší zejména z hlediska využití/nevyužití pásma NIR, a jsou tak v jistém smyslu komplementární.

Tab. č. 5 – stručná charakteristika zvolených indexů [ENG a kol. 2019]

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Green Leaf Index (GLI)
<ul style="list-style-type: none"> - spektrální index využívající červenou (RED) a blízkou infračervenou (NIR) část EM spektra - hodnoty nabývají od -1 do +1 - vhodný k posouzení hustoty a zdraví vegetace, jeho vysoké hodnoty indikují hustou a zdravou vegetaci, nízké naopak slabou, řídkou, suchou či nezdravou vegetaci nebo její úplnou absenci - široce používaný pro mnoho aplikací v souvislosti se studiem vegetace 	<ul style="list-style-type: none"> - spektrální index kombinující zelenou (GREEN), červenou (RED) a modrou (BLUE) část EM spektra - hodnoty nabývají od -1 do +1 - vhodný pro studium fotosyntetické aktivity ekosystémů, odhaduje zdraví zelených listů (a jehlic) včetně detekce stresu způsobeného suchem, chorobami a škůdci - méně používaný, specifický pro zalesněné areály

Vzorce:

$$GLI = (2 \times GREEN - RED - BLUE) / (2 \times GREEN + RED + BLUE)$$

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

NDVI může být ovlivněn zejména meteorologickými podmínkami (předchozí deště) a pro námi zvolené téma se tak jeví jako vhodnější (specifičtější) index GLI. Jeho hodnoty nicméně mohou být korigovány či lépe interpretovány v porovnání s hodnotami NDVI. Pro charakteristiku vývoje stavu lesů v Rejvízské hornatině v letech 2016 až 2020 tak budou využity jak obě výpočtové metody samostatně, tak také následná komparace.

Pro analýzu vývoje byla zvolena data z měsíce září pro jednotlivé roky. Vegetace je zde v této době stále zelená a aktivní, což umožňuje měření hustoty a zdraví. Letní sezónní vrcholy růstu, které pro jednotlivé druhy vegetace mohou být disproporční, již minuly, ale vegetace není ještě podstatně ovlivněna podzimními změnami. To pomáhá zajistit konzistenci dat.

Nedostatkem je výběr snímků z různých dnů v jednotlivých letech, celkové rozpětí mezi dny činí 17 dní, pro zvolený záměr lze však tento fakt pominout, a to ze třech důvodů. Byly vybrány nejvhodnější snímky prakticky s téměř nulovou oblačností (1), což výrazně zpřesní výpočty indexů; cyklus vývoje dřevin je podstatněji ovlivněn aktuálními klimatologickými a meteorologickými podmínkami (2); a vedle tak zásadních faktorů na změnu krajiny jako je úhyn stromů a následná těžba jde o zanedbatelný vliv (3).

Zdraví lesů lze samozřejmě hodnotit i jinými metodami, často se používá klasifikace za použití analýzy hlavních komponent, kdy dochází k inventarizaci lesního porostu a k zachycení vývoje v čase. Klasifikují se nejčastěji rody dřevin, neboť druhy mají velmi podobné spektrální chování. Výsledkem bývá charakteristika dřevinového složení porostů na určitém území. Ještě jednodušší metodou je porovnání syntéz v nepravých barvách – poškození asimilačního aparátu stromů způsobuje pokles chlorofylu, aktivita chlorofylu se zračí především na červené části EM spektra, v blízké infračervené části se zase díky struktuře buněk listů zvyšuje odrazivost s tím, jak jsou listy zdravější a v téže oblasti EM spektra zase platí, že obsah vody v listech způsobuje silné pohlcování záření. Různých těchto faktů samozřejmě také využívají námi dvě zvolené metody.

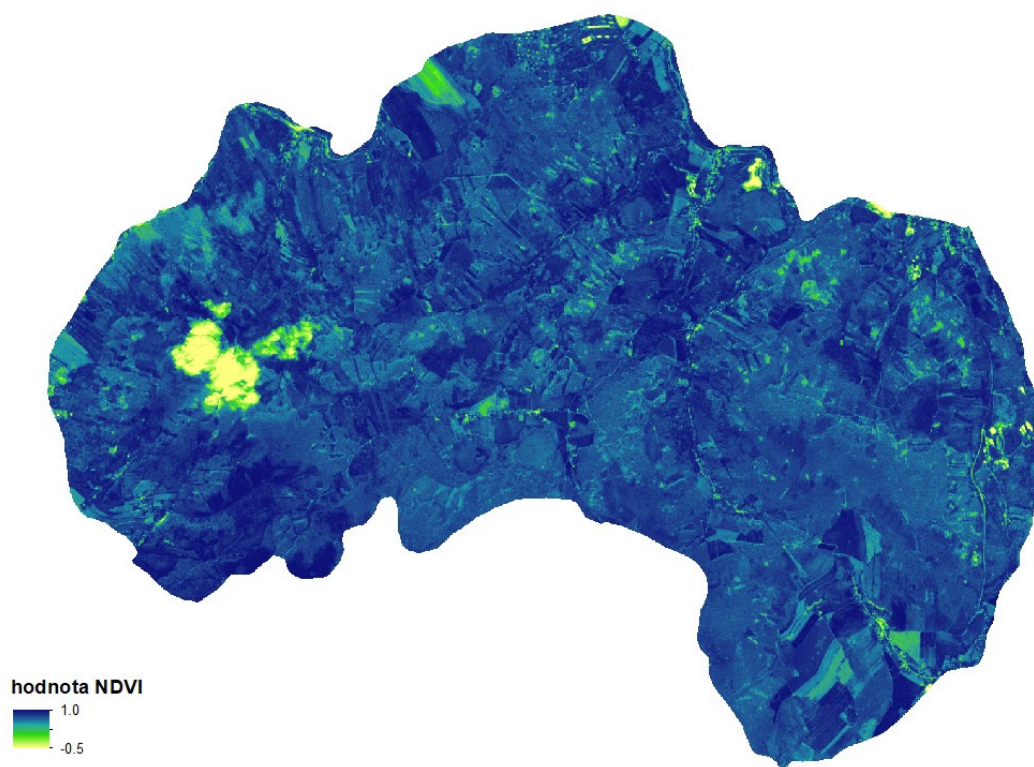
Za zmínku stojí sledování vývoje zdravotního stavu lesa s RGB kompozicí při využití dat ze dvou období pro jeden snímek. Pokud bychom porovnávali např. roky 2018 a 2020, tak do RGB přichází jako první kanál střední infračervený roku 2022, jako druhý kanál střední infračervený roku 2018 a jako třetí kanál zelená část viditelného záření roku 2018). Odstíny červené barvy pak indikují změny (např. z důvodu těžby, kůrovce aj.) a rezavočervenou (cihlovou) jsou označeny areály lesa, ve kterých došlo k výraznému zhoršení zdravotního stavu a až téměř k odumření stromů [FERANEC 2010, s. 154–155].

V neposlední řadě lze zdravotní stav lesů hodnotit i metodou obrazových diferencí (rozdíl hodnot jasu mezi dvěma obdobími) Podobně jako v předchozím případě zvolíme RGB kompozici – spektrozónální snímek o a) NIR, b) MWIR a c) RED. Barvy zdravé vegetace tady budou různě (tmavě zelené budou jehličnany, sytě oranžové listnaté stromy), pokud se však vlamuje do oranžové zelená, znamená to napadení a poškození právě stromů listnatých. Naopak oranžová pak jejich uzdravování či v případě sytě oranžové i zdraví [FERANEC 2010, s. 156].

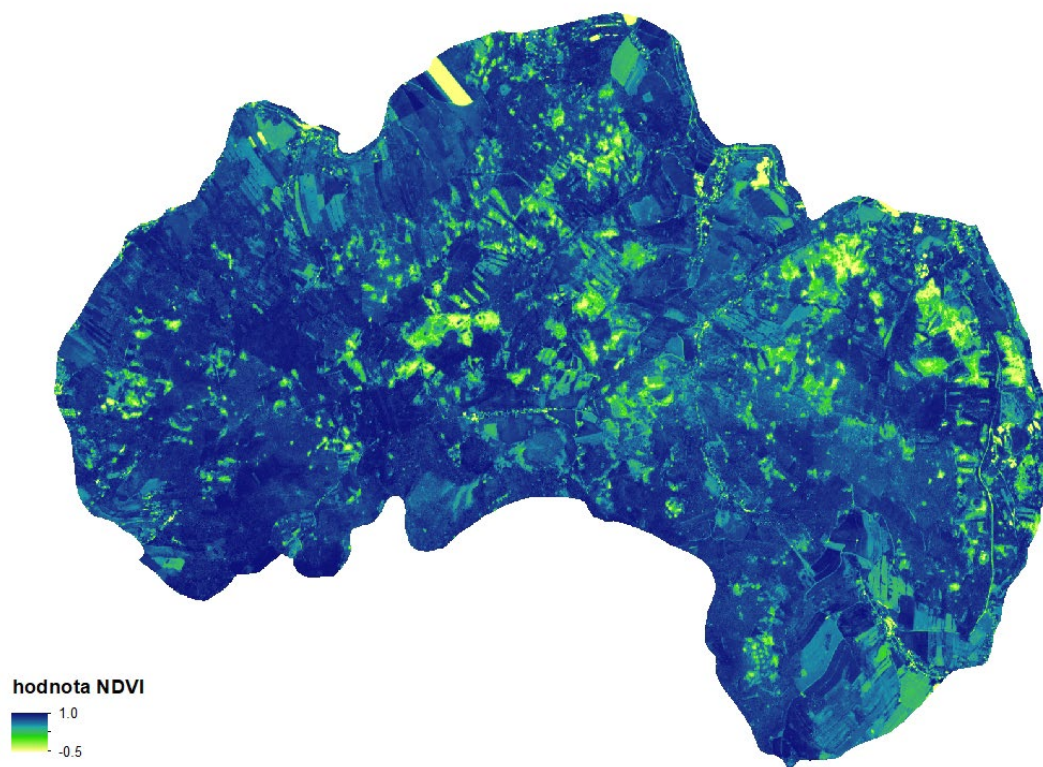
Pro úplnost dodejme dvě poznámky [FERANEC 2010, s. 158–166].

- a) Často je zapojován digitální model terénu, a to zejména proto, že samotná spektrální data jsou negativně ovlivněna topografií, orientací svahů apod. Také vlhkost mají spíše terénní deprese, proto se tam může jevit vegetace zdravější. DMT se přidává do dat jako vrstva pro klasifikaci.
- b) Kromě analýzy pixelů se mohou také používat analýzy objektů, a to dle informací o struktuře, texture a tvaru.

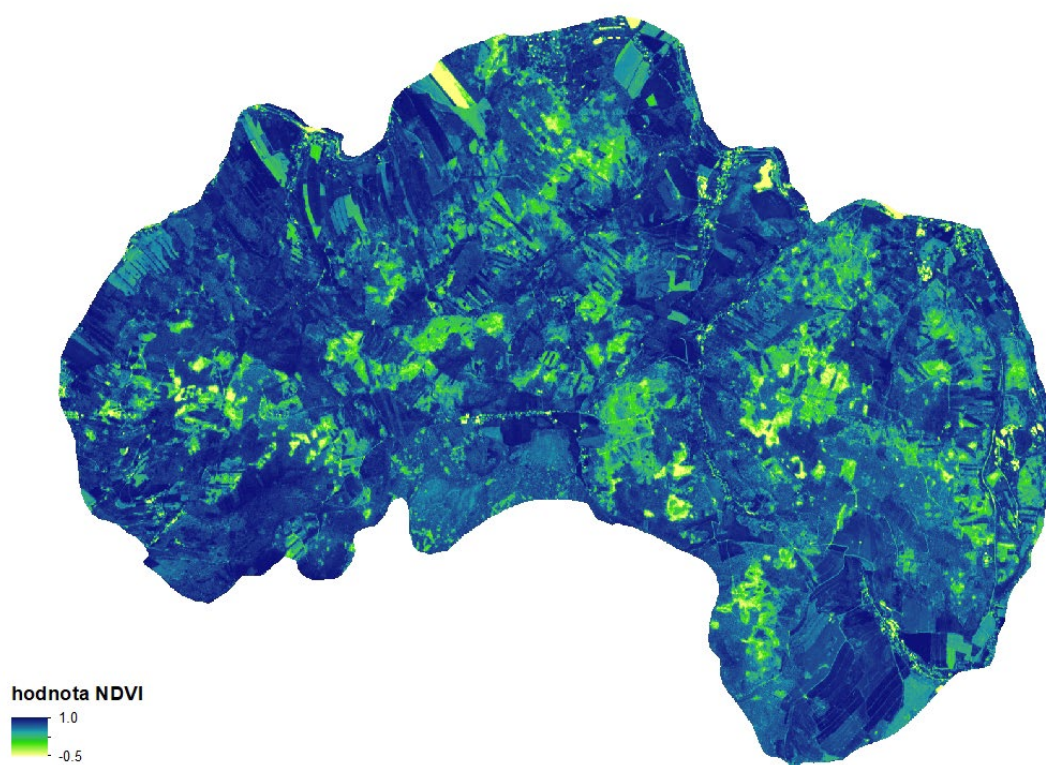
Vraťme se však ke zvoleným metodám, tj. výpočtům a zobrazením indexů NDVI a GLI.



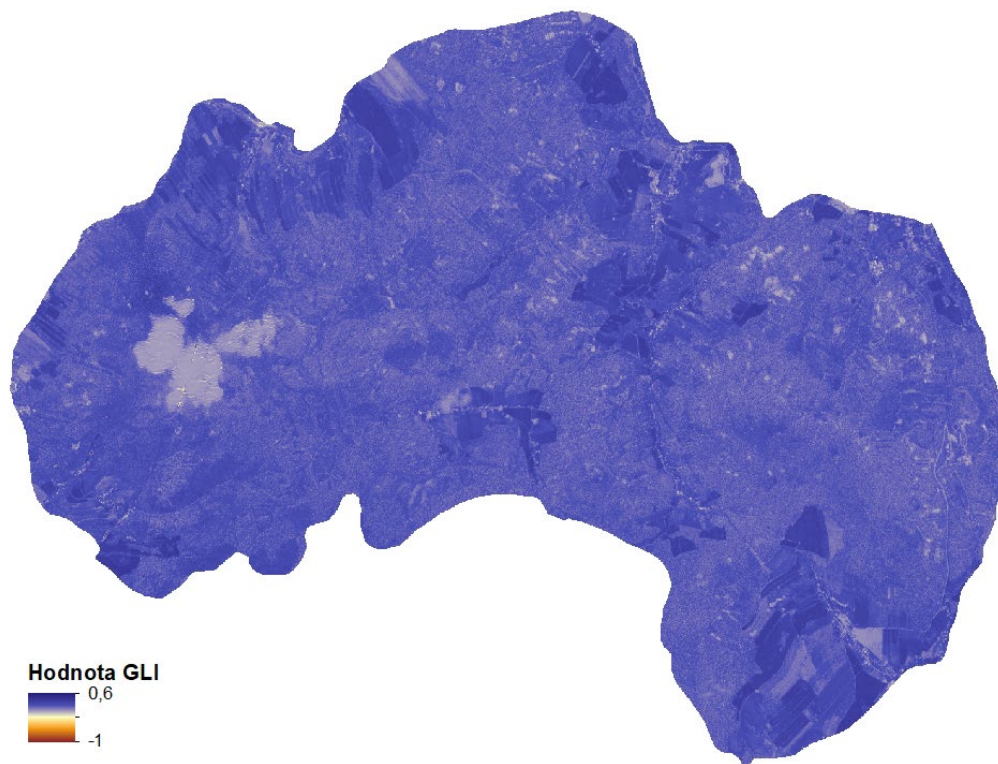
Obr. č. 16 – NDVI Rejvízské hornatiny z 13. září 2016; snímek narušila pouze zbloudilá kupovitá oblačnost v západní části



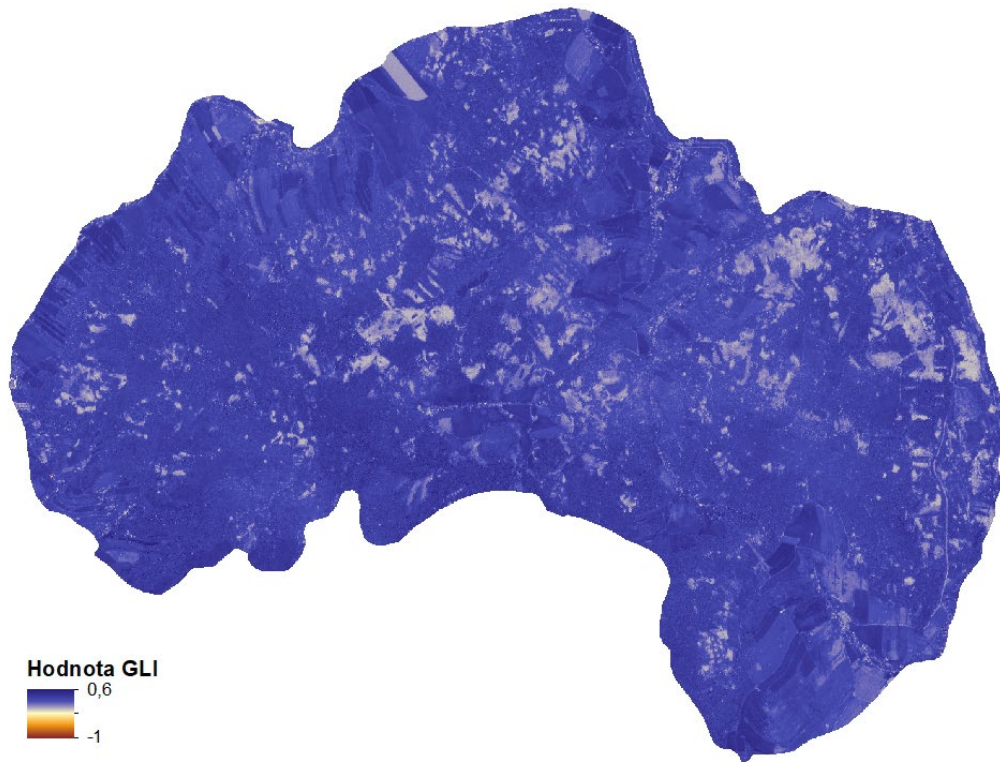
Obr. č. 17 – NDVI Rejvízské hornatiny z 30. září 2018



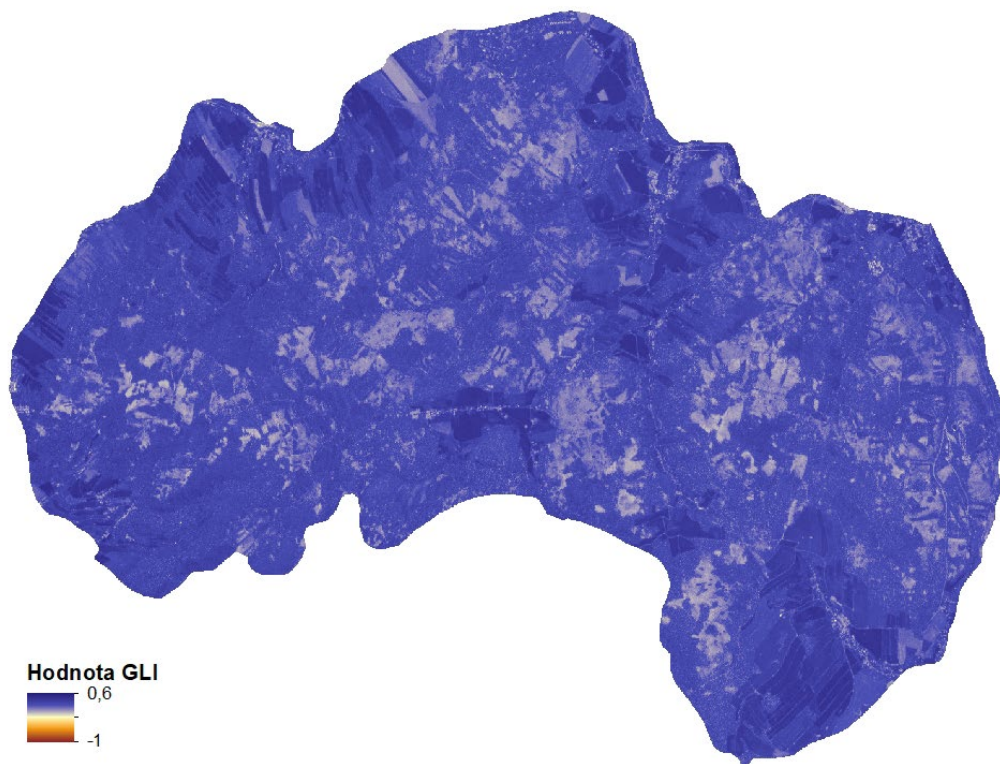
Obr. č. 18 – NDVI Rejvízské hornatiny z 22. září 2020



Obr. č. 19 – GLI Rejvízské hornatiny z 13. září 2016, snímek narušila pouze zbloudilá kupovitá oblačnost v západní části



Obr. č. 20 – GLI Rejvízské hornatiny z 30. září 2018



Obr. č. 21 – GLI Rejvízské hornatiny z 22. září 2020

INTERPRETACE

Z hlediska zaznamenaných a skrze index přepočtených DN hodnot lze v letech 2016, 2018 a 2020 jednoznačně pozorovat proměnu podstatné části krajiny. Zelené plochy přecházející až ve žlutá pásma (NDVI) znamenají rozsáhlá poškození lesních ekosystémů, pro rok 2018 zejména v centrální části Běloskalského hřbetu, ale v roce 2020 také v Hornickoskalském hřbetu a v západní části Běloskalského hřbetu; následky kalamity jsou však patrné prakticky po celé ploše hornatiny. Zatímco však index NDVI zaznamenává rostoucí poškození, potvrzuje tento trend druhý z indexů (GLI) jen částečně. Plošně sice hodnoty i tohoto indexu evidentně narůstají, nicméně index soustředěný na zelenou část EM spektra zároveň naznačuje, že dochází z hlediska DN hodnot k jistému hojení krajiny. Zasažených ploch je více, ale hodnoty indexu se u zasažených oblastí z roku 2018 pro rok 2020 snižují. To velmi dobře koreluje s pozemními pozorováními aktivit náletových dřevin a obecnou obnovou vegetace v prostoru. Satelitní data prokazují, že odhady o poškození téměř třetiny referenčního území nejsou přehnané, nicméně rovněž díky druhému z indexů naznačují, že dochází k rychlé obnově vegetace, byť nelze bez dalších spektrálních specifikací určit její skladbu. Obecně lze shrnout, že pro hodnocení vývoje kůrovcové kalamity se komparace obou metod kladoucích důraz na jiná spektrální pásma jeví jako smysluplná a užitečná.

MOŽNOSTI DALŠÍCH VÝZKUMŮ

Smysluplným by bylo průměrování dat ze všech relevantních snímků z vybraných měsíců, čímž by byly odstraněny možné sezónní klimatické výkyvy a meteorologické dopady; multitemporální analýza by rovněž měla zahrnout alespoň desetileté období, bylo by tak možné lépe nahlédnout dlouhodobé trendy a sezónní dynamiku v souvislosti s klimatickým a hydrologickým vývojem. Kromě dvou v této práci využitých indexů by bylo pro další diferenciaci zapojit další indexy, které by opět měly využívat různé části EM spektra (např. RVI vs. VARI). Datová syntéza by mohla vést k vytipování oblastí pro detailnější výzkum. Při plánu jakéhokoliv seriózního výzkumu by samozřejmě muselo být přihlédnuto k poznatkům dalších vědeckých disciplín (ekologie, hydrologie, lesnictví, klimatologie, entomologie aj.).

3.5 Geomorfologické charakteristiky – vysokofrekvenční filtry

Přes původní skepsi ze strany geologické a geomorfologické obce byl postupem času akceptován fakt, že snímky DPZ mohou výrazným způsobem pomoci v interpretaci jevů spjatých s oběma disciplínami. Satelitní DPZ umožňuje identifikovat různé druhy hornin a minerálů a mapovat geologické formace i procesy včetně jejich projevů (kosmotektonické mapy). Díky schopnosti zaznamenávat data z velkých ploch nabízí technologie přehled zejména o rozsáhlých jevech jako jsou tektonické zlomy, projevy sopečné činnosti i větší důsledky erozní činnosti. V minulosti docházelo k významným pokusům komparovat známé geologické struktury s těmi, které byly patrné ze snímků DPZ. I pro menší oblasti má DPZ svůj smysl, avšak bývá využíváno spíše nepřímých interpretačních znaků (půda, vegetace); pro naši oblast půjde např. jen stěží využít přímého odrazu horninového substrátu. Satelitní snímky Sentinelu 2 však mohou být z hlediska prostorového rozlišení dostatečné např. pro inventarizaci významnějších tvarů reliéfu, charakteristiku říční sítě či pátrání po stopách ledovcové činnosti. Multitemporální analýza v oblasti geomorfologie zase nabízí výstižný pohled na vývoj antropogenních tvarů reliéfu [NRC 2010, s. 196–202; FERANEC 2010, s. 180–181].

I přesto, že v posledních letech je pro obor geomorfologie značnou prioritou využívání poznatků DPZ v oblasti laserových technologií (LiDAR), se tato práce tomuto zaměření nevěnuje. Podobně tomu bude se systémy GNSS, které se využívají pro vyhodnocování geodynamických pohybů (geodézie) a pozornost nezaměříme ani ke stereoskopickým snímkům a digitálním modelům reliéfu vzniklých na základě družicového snímkování. Dle uvedeného zaměření práce zůstaneme u využití snímků senzoru MSI ze Sentinelu 2, resp. u matematických operací se zaznamenanými DN hodnotami, konkrétně u filtračních operací.

Za účelem minimalizace ovlivnění vegetací je zvolen snímek ze 6. listopadu 2022, který vzhledem k nízkému procentu oblačnosti nabízí pohled na celou vymezenou oblast. Po úvaze je zvoleno apriorní zobrazení v NIRovém (B8) a SWIRovém (B11) pásmu za účelem co nejlepšího odlišení vegetačních od nevegetačních povrchů a za účelem potenciálního zvýraznění geologických rysů krajiny. Z důvodu potřeby zvýraznit strukturální rozdíly v datech, hranice a ostré přechody, linie či erozní rýhy a malé struktury na jedné straně, a kvůli snaze zobrazit kontrast mezi potenciálně zachyceným horninovým materiálem na straně druhé, je zvoleno vysokofrekvenční filtrování. Jako počet iterací vybraného filtru je zvolena jediná, a to z důvodu snížení rizika výskytu šumu. Za účelem získání obrazu s potenciálem odhalení i jemnějších struktur a detailních rysů reliéfu je zvolen filtr Compass edge detector.

Compass edge detector (CED) je vysokofrekvenční filtr a jedna z důležitých metod detekce hran v oblasti zpracování obrazu. Metoda používá sadu masek orientovaných v různých směrech jako cípy kompasu. CED je navržen tak, aby identifikoval hranice nebo okraje objektů v obraze tím, že zjistí změny intenzity odrazivosti mezi sousedními pixely [UE 2024]. To činí v několika krocích.

1. Sada orientovaných masek:

CED používá několik masek odpovídajících různému směru (0° , 45° , 90° , 135° ad.), přičemž každá maska reaguje na hranice a zvýrazňuje hrany orientované v jejím směru.

2. Aplikace masek na obraz:

Maska je aplikována na obraz s výpočtem gradientu intenzity v příslušném směru. Obraz tak prochází filtrováním postupně pro všechny masky v sadě, čímž je získán přehled o orientaci hran v obraze.

3. Vyhodnocení gradientu:

Pro každý pixel v obraze je vyhodnocen gradient získaný z masek, přičemž platí, že pixel je považován za součást hrany, pokud gradient přesahuje tzv. prahový limit. Směr hrany je pak určen maskou s nejvyšším gradientem.

4. Výsledný obraz hran:

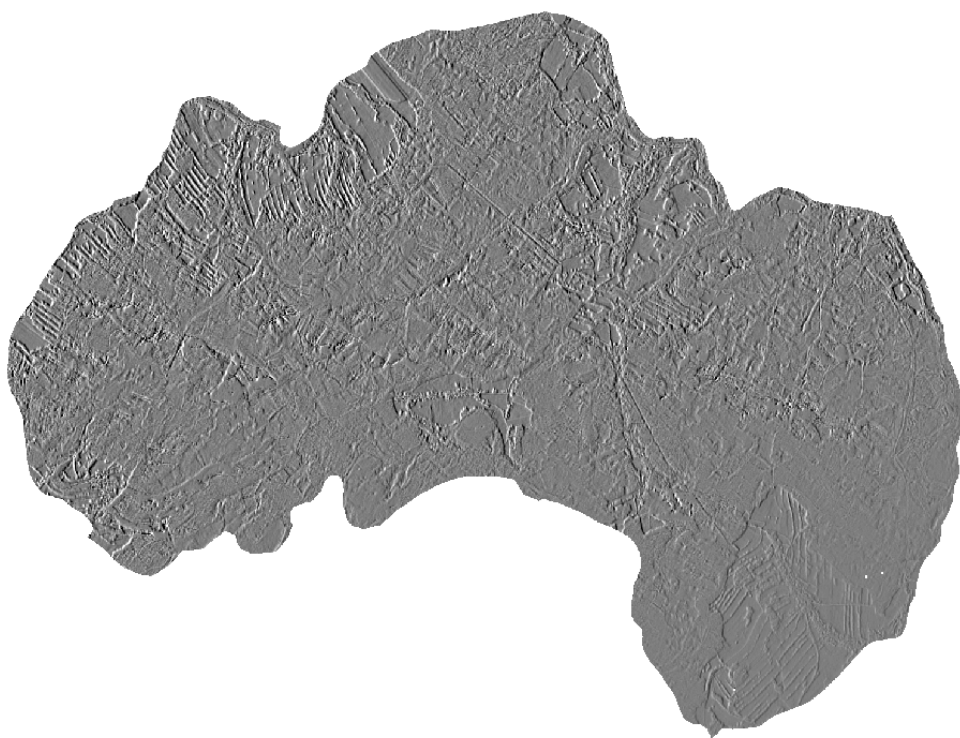
Výsledkem je obraz, kde jsou hranice objektů zvýrazněny, přičemž informace o směru těchto hran může být použita pro další analýzu nebo vizualizaci.

Compass edge detector je užitečný pro aplikace, kde je důležité rozpoznat orientaci a charakter hran, v dálkovém průzkumu Země je vedle dalších filtrů a v komparaci s nimi uplatnitelný pro identifikaci různých geologických nebo geomorfologických struktur. Jeho aplikaci na vstupní vrstvy zachycují obr. č. 22 a 23.

INTERPRETACE A MOŽNOSTI DALŠÍCH VÝZKUMŮ

Filtr zachytil nejrůznější hrany a zdůraznil linie. Zejména patrná jsou ohraničení polí a luk v nižších nadmořských výškách, zřetelně lze odlišit hranice určitých lesních areálů a jako výrazná pozorovatelná linie je patrné i vysekané pásmo v bezprostřední blízkosti vedení vysokého napětí napříč Rejvízskou hornatinou. Jako vhodnější pro inventarizaci či analýzu geomorfologických tvarů se jeví v našem konkrétním případě pásmo B8. Filtrace na něm provedená se zdá být detailnější, odhalující i jemnější rysy a struktury. Nezdá se, že by filtrace provedena na pásmu B11 disponovala zřejmými výhodami.

Geomorfologická charakteristika Rejvízské hornatiny byla předmětem bakalářské práce autora [RUŠAR 2020, BP]. Práce byla zaměřena na základní popis fyzickogeografických (zejm. klimatických, hydrologických a pedologických) charakteristik jakož i na popis geologických struktur ovlivňujících reliéf, jejím hlavním cílem však byla inventarizace tvarů reliéfu. Základní metodou byla kromě rešeršního šetření také terénní prospekce. K inventarizaci tvarů reliéfu se však využití metod dálkového průzkumu Země rovněž nabízí a v tomto smyslu může být chápána práce magisterská jako dílčím způsobem navazující. Ne snad v záměru odhalit konkrétní geomorfologické tvary, ale v představení skupiny metod, jakými lze celou problematiku rovněž nahlížet. Zatímco využití moderních 3D metod (LiDAR) se ve světle nových poznatků jeví jako zcela zásadní, využití frekvenčních filtrů by mohlo sloužit jako doplňující zdroj informací, např. pro podpůrnou identifikaci údolních linií či i tektonických zlomů.



Obr. č. 22 – filter CED s jednou iterací aplikovaný na pásmo B8 snímku Sentinel 2 ze dne 6. listopadu 2022

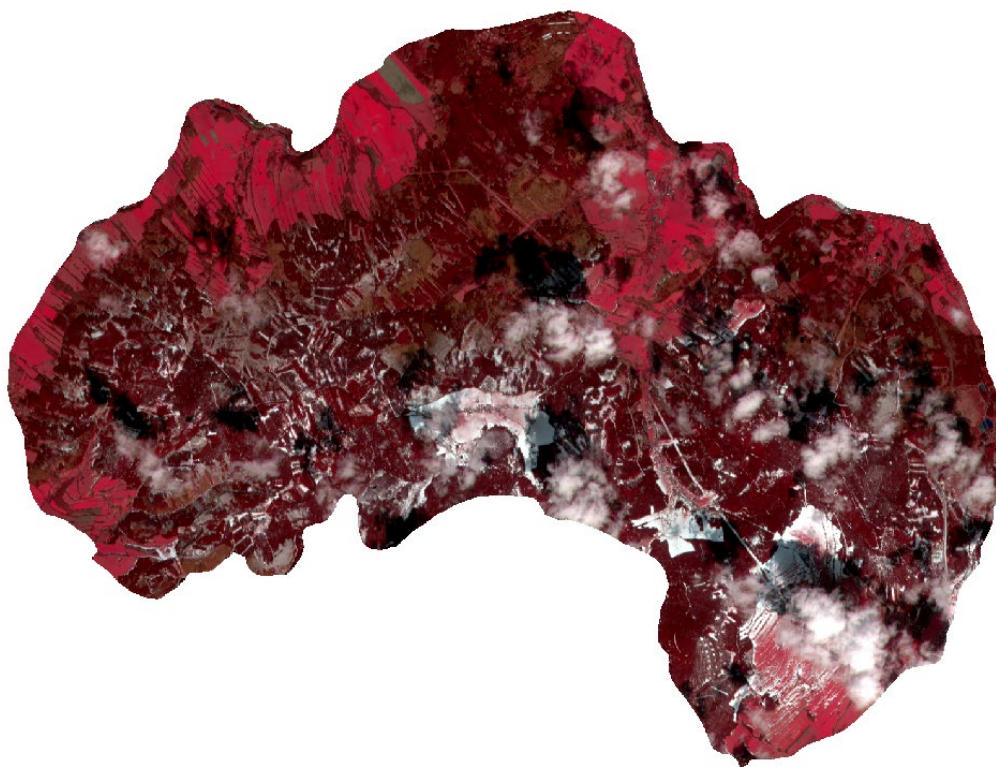


Obr. č. 23 – filter CED s jednou iterací aplikovaný na pásmo B11 snímku Sentinel 2 ze dne 6. listopadu 2022

3.6 Meteorologické extrémny – syntéza v pravých barvách

Na rozdíl od jiných badatelů využívajících snímky DPZ se meteorologové zajímají primárně nikoliv o zemský povrch, ale o atmosféru. Jevy v atmosféře se však rychle mění, a proto pro jejich zkoumání nejsou vhodné družice s polární dráhou s nízkým časovým rozlišením, ale geostacionární, zejména pak ty, které jsou schopny dodávat potenciálním zpracovatelům snímky každých několik minut. Přesto lze zmínit okrajové a doplňkové využití satelitů Sentinel 2 i pro oblast meteorologie, konkrétně pro pokrytí povrchu sněhovou pokrývkou.

Ve druhé polovině měsíce dubna 2017 díky utvoření severovýchodní cyklonální situace zasáhly oblast vpády studeného vzduchu se silným sněžením a následným vytvořením sněhové pokrývky [ČHMÚ 2020]. Tato sněhová pokrývka, kterou by bylo možno označit za extrémně pozdní, se vyskytovala krátkodobě i v oblastech s nízkou nadmořskou výškou v okolí hornatiny (např. Jesenická kotlina či vzdálenější Vidnavské nížina), kde měla výrazné dopady na zemědělství a úrodu. V oblasti Rejvízské hornatiny jakožto oblasti povětšinou hornaté dopady nebyly tak zásadní, nicméně tlakový gradient zde způsobil sněhové jazyky a závěje patrné např. na silnici z Jeseníku na Rejvíz, čímž došlo k výrazné komplikaci situace na silnicích. Po oteplení a ústupu oblačnosti bylo možné lokalizovat přetrvávající sněhovou pokrývku i na snímcích družice Sentinel 2; kdy obr. č. 24 zachycuje zbytky zasněžených oblastí dne 1. května 2017 [RUŠAR, ABRAHÁMEK 2021, s. 59–60].



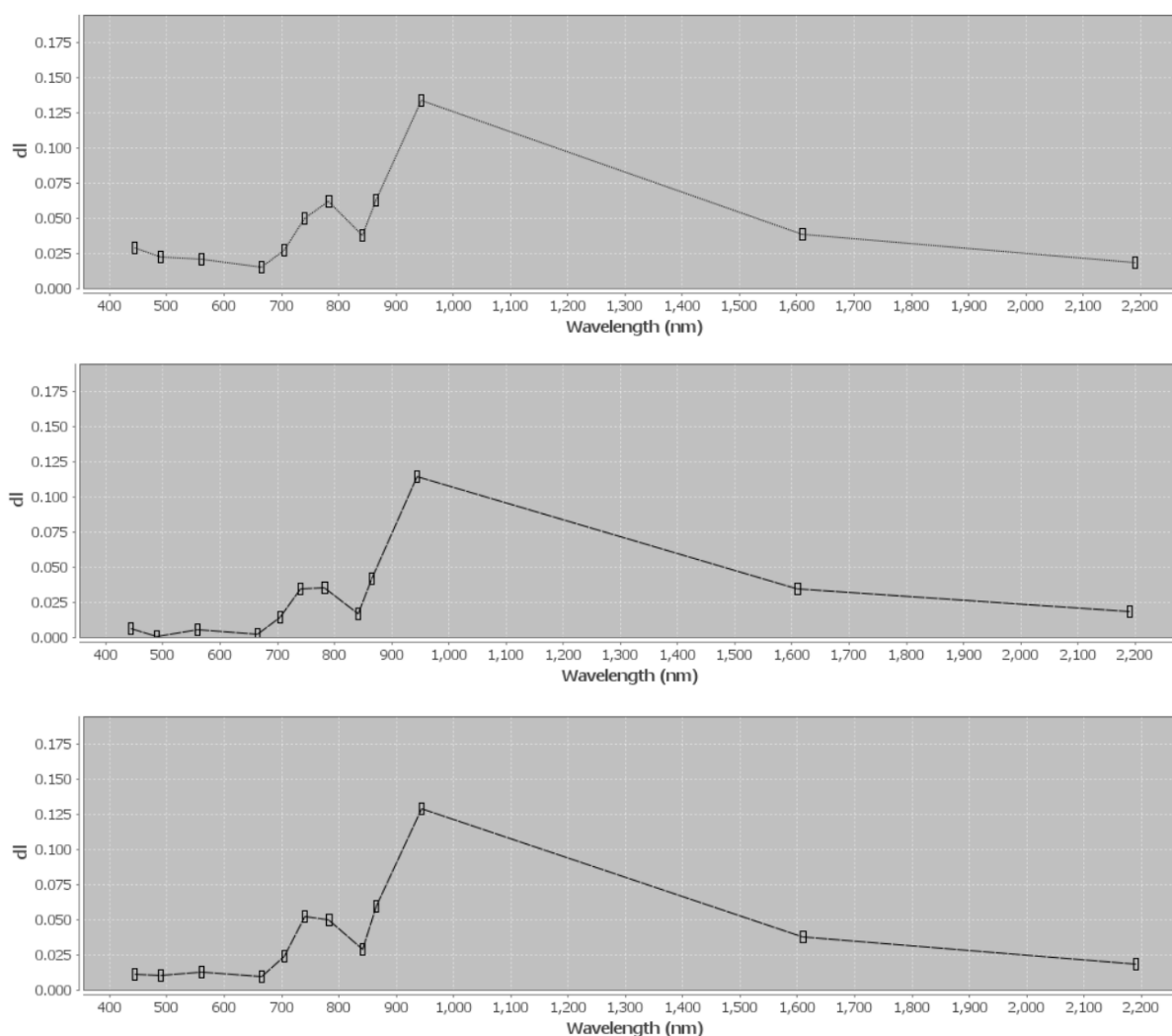
Obr. č. 24 – snímek Sentinel 2 pro území Rejvízské hornatiny dne 1. května 2017; syntéza v nepravých barvách

Poprvé dohlédl Sentinel 2 na povrch Rejvízské hornatiny až po ústupu oblačnosti dne 1. května 2017. Na obr. č. 24 jsou stále patrné zasněžené oblasti, zejména lze zmínit rejvízskou náhorní plošinu v bezprostředním okolí obce Rejvíz v jihovýchodní oblasti Běloskalského hřbetu a části Mechovojezerní kotliny, kde se pravděpodobně stále vyskytovaly dobré podmínky pro běžkařský sport. Snímek poukazuje na to, že eventuální nebezpečí již nejpozději pár dní před snímkem pominulo.

Využití polárních satelitů v meteorologii si lze však představit i jinak. Tyto družice pracují na nižších oběžných drahách než družice geostacionární, což umožňuje získávat detailnější a přesnější data o atmosféře, a to včetně teploty, vlhkosti, tlaku a složení atmosféry. Polární meteorologické satelity jsou často vybaveny speciálními senzory, které mohou měřit různé atmosférické proměnné, jako jsou profily teploty a vlhkosti, koncentrace ozonu a dalších plynů, které mohou být důležité pro předpovídání počasí a pro pochopení klimatických změn. Proto lze konstatovat, že polární satelity doplňují ty geostacionární, a toto doplňování je klíčové pro moderní meteorologii i pro modelování klimatických změn [FERANEC, s. 46–47, 86–87].

3.7 Charakteristiky Mechového jezírka – spektrální křivka odrazivosti

Dostí spekulativním a možná neobvyklým může být využití satelitního DPZ pro zjištění informací týkajících se velkého mechového jezírka na Rejvízu. V tomto konkrétním případě se nebudeme zabývat zobrazením vybraných kanálů, syntézou ani výpočtem indexů, ale zaměříme se na spektrální křivku konkrétního pixelu a porovnáním hodnot v několika letech. Pokud při rozlišení satelitu Sentinel 2 vyřadíme z výběru všechny tzv. “mixely”, je volba zkoumaného pixelu poměrně jasná, neboť při rozměrech mechového jezírka je v podstatě jasné, že pixel s prostorovým rozlišením 10x10 metrů může být bez zapojení okolní vegetace či pobřeží v podstatě pouze jeden. Při interpretaci se zaměříme na hodnoty, jichž dosahuje spektrální křivka odrazivosti zaznamenaná na obr. č. 25 pro jednotlivá pásma.



Obr. č. 25 – spektrální křivka odrazivosti pro středový pixel velkého mechového jezírka na třech snímcích; nahoře z 13. září 2016, uprostřed z 30. září 2018 a dole z 22. září 2020; rámečky označují jednotlivá pásma, zobrazeno v programu SNAP

Na první pohled jsou křivky téměř identické, nacházíme v nich však rozdíly, které se vizuálně jeví zanedbatelné, přesto v rámci spektrálních hodnot mohou být významné. Ve viditelných částech spektra pozorujeme variabilitu mezi hodnotou blízkou se na jedné straně k 0 a na druhé straně až k 3 % odrazivosti. Svědčí nám to o tom, že v roce 2018 byla voda pravděpodobně nejčistší a světlo pronikalo hlouběji pod vodní hladinu. Naopak v roce 2016 bylo jezírko nejvíce

zanesené, např. se mohlo jednat o výskyt vodních řas či suspendovaných částic organického materiálu.

Zaměříme-li se na pásmo B8, tedy na blízké infračervené záření, které je silně odráženo vegetací, může nám vysoká odrazivost značit přítomnost a dobrou kondici rašeliništní vegetace, např. mechů. Nižší odrazivost přibližuje spektrální charakteristiku vody mechového jezírka běžným vodním plochám, což by svědčilo o méně zdravé přítomné vegetaci. Oproti těmto plochám má však samozřejmě mechové jezírko odrazivost zdaleka vyšší. Nejvýše vystupuje pásmo B8 až k odrazivosti v míře 13 % (rok 2016) a nejméně klesá k přibližně 11,5 % (rok 2018). Může nám to tak podporovat údaj z viditelného záření, že v roce 2016 byla vegetace v jezírku v dobré formě. Zkoumat lze odděleně i v kombinaci pro různé aplikace i jiná pásma.

Uvedená interpretace je heuristická a pouze demonstrativní. Bylo by nutné zkoumat i jiné faktory jako jsou úhel dopadajícího záření, sezónní variabilita, stav atmosféry v době snímání, povrchové podmínky vody a hlavně stav bioty v bezprostředním okolí a její fenologický cyklus. Rovněž vzhledem ke specifčnosti vody rašeliništního jezírka by bylo vhodné zkoumat změny chemického složení vody. Pro analýzu by bylo ideální kombinovat tato pozorování s terénními daty ohledně antropogenní činnosti nebo dalšími informacemi o stavu vody a okolního prostředí, klíčová by např. mohla být výška hladiny; informace z DPZ pro tyto účely mohou být pouze doplňkové.

4 MOŽNOSTI DALŠÍHO VYUŽITÍ V PŘÍRODNÍCH VĚDÁCH

Obor dálkového průzkumu Země je velmi široký a s rozvíjejícími se technologiemi přesahuje nové a nové hranice. Samozřejmým je využití snímků DPZ pro vzdělávání v zeměpisu, pro tvorbu ortofotomap, snímky z aktuálních přeletů se využívají pro vyhodnocování havárií a přírodních katastrof (záplavy, požáry aj.) a jsou podkladem pro opatření krizového managementu. Z hlediska čím dál častějšího využívání dotací pro zemědělce, byť v oblasti Rejvízské hornatiny jde o marginální část území, je třeba upozornit na inventarizaci polnohospodářských plodin, sledování jejich zdraví, poškození a také kontrolu čerpání evropských dotací pomocí satelitních snímků.

Z hlediska zemědělství lze rovněž počítat s připravenými algoritmy, kdy systém vypočítává a interpretuje vegetační indexy jako indikátory vývoje vegetace s cílem vytváření předpovědi ohledně budoucí úrody [NRC 2016; 177–186]. Kriticky je však třeba přistoupit k očekávané relevanci výsledků, neboť existuje velká variabilita podmínek – vegetace je ovlivněna mnoha faktory včetně počasí, půdních charakteristik, hydrologických výkyvů (povodně, silné srážky), lidské činnosti apod. [FERANEC 2010, s. 126]. Odhad úrody je vždy velmi potenciální, a to i pokud se k algoritmům z DPZ přidají biofyzikální výpočty.

Satelity DPZ mohou sledovat také termální data, zejm. teplotu zemského povrchu. Zatímco meteorologická data jsou jen statistickým zobecněním z jednotlivých stanic extrapolací a také jsou měřena ve výšce dvou metrů, tak data ze satelitů měří hodnoty zemského povrchu. Za pomoci kombinace NDVI a teploty lze rovněž odhadnout vlhkost. Užití DPZ v hydrologii je pak samostatnou kapitolou, kdy v této práci byla kvůli absenci větších vodních ploch nastíněna jen netypická aplikace na příkladu Velkého mechového jezírka. Pozdní sněhová pokrývka byla zařazena do kapitoly o meteorologických extrémech, byť právě sledování sněhové pokrývky obecně je vedle mapování mokřadů, zkoumání povodní a zavodňování území hlavní oblastí využití DPZ v hydrologii [srov. NRC 2010, s. 203].

Zmiňme také ještě sledování sušiny, tj. biomasy vyjma vody, protože voda je značně variabilní, a tím i odhadování uhlíkové zásoby v lesích. Informace mohou být zásadní pro plánování těžby či obnovu lesů. Pomocí různých matematických operací s vybranými pásmy lze např. odhadovat množství sušiny v kořenech, v listech apod. Součástí modelu jsou však různé další vstupy, např. klimatologické, pedologické, biologické a další.

Vzhledem k rychle se rozvíjejícím technologiím lze pravděpodobně očekávat velké rozšíření možností aplikace DPZ pro další obory přírodovědného výzkumu, přičemž stále více se bude pracovat se snímky či jejich deriváty za účelem tvorby různých digitálních modelů terénu.

5 MOŽNÉ VYUŽITÍ V HUMANITNÍCH DISCIPLÍNÁCH

I přesto, že práce je zaměřena na využití technologií v pasivní DPZ pro přírodovědnou oblast, bude v této kapitole rámcově zmíněno využití snímků i pro oblast humanitních disciplín.

Pomezí oblastí mezi přírodovědným a humanitněvědním přístupem může být např. rekonstrukce historického využití půdy a změny v krajině provedené v důsledku lidské činnosti a lze si také představit monitorování antropogenních změn v souvislosti s rozsáhlým turistickým využitím oblasti, event. výstavbou. Koneckonců otázka, jak turismus ovlivňuje krajinu a přírodní zdroje v hornatině, bude každým dnem aktuálnější a dopad takové činnosti se může mimo jiné projevit i v její geomorfologické charakteristice. Doplňkovým materiálem mohou být snímky DPZ také pro etnoekologické studie zkoumající vztah mezi komunitou žijící v oblasti Rejvízské hornatiny (tj. zejména v částech obcí Jeseník, Česká Ves, Písečná, Zlaté Hory a Rejvíz) a jejím bezprostředním přírodním prostředím a přírodními zdroji.

Využití snímků zachycujících exaktním způsobem fyzickogeografickou realitu může být vzhledem ke svým vizuálním charakteristikám zaměřeno i umělecky, a to za účelem vyprávění příběhů o krajině, její minulosti i současnosti. Využití DPZ k zaznamenání a studiu tradičního využití půdy a jeho vlivu na krajinu, včetně zachování lidových tradic (např. do dnešních dnů zachované ruční kosení luk na Chebzí) je rovněž důležitým aspektem.

Čím dál častěji se také metody DPZ využívají pro dokumentaci kulturní krajiny a archeologický výzkum. V podstatě žádné jiné metody nepracují v tak rozsáhlém prostorovém měřítku, a tudíž neodhalují takové množství nových lokalit a různých typů objektů. Využívá se však zejména leteckých a dronových technologií, v poslední době zejména na laserovém principu (LiDAR) [Kuna 2004]. Příkladem využití technologií DPZ z poslední doby i pro námi vymezenou oblast je např. průzkum lokalit z druhé světové války ve Slezsku [JUCHELKA 2023].

6 DISKUZE A ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce bylo využití satelitních technologií DPZ pro fyzickogeografický výzkum oblasti vymezené jako geomorfologický celek Rejvízská hornatina. Cílem pak zhodnocení potenciálu těchto technologií pro konkrétní témata přibližně odpovídající fyzickogeografickým zájmům, a to především skrze sedm navržených a realizovaných aplikací. Tomuto cíli odpovídala konstrukce dílčích výzkumných otázek, které jsou, společně se zjištěními a odpověďmi, vloženy níže (**tučně**).

- a) Jak lze charakterizovat a prostřednictvím snímků dálkového průzkumu Země či jejich derivátů také zobrazit krajinu se zaměřením na vlhkostní a vegetační poměry? Jak lze v tomto smyslu charakterizovat krajinu vymezené oblasti pro září roku 2023?

Charakteristiku oblasti se zaměřením na vlhkostní a vegetační poměry lze podat prostřednictvím jednotlivých komponent tasseled cap, a zejména pak prostřednictvím syntézy komponent. Zobrazení pro září roku 2023 představuje obr. č. 11. Vlhkostní a vegetační poměry lze také charakterizovat prostřednictvím indexů sucha, např. NDMI, event. vegetačních indexů.

- b) Jak se změnilo využití krajiny vymezeného území mezi lety 2006 a 2018 dle CORINE Land Cover? Jak by bylo možné provést detailnější analýzu změn krajinné pokrývky?

Změny využití krajiny zachycené prostřednictvím CORINE Land Cover nejsou pro sledovanou oblast dostatečně detailní, jak představuje obr. č. 13. Pro relevantní data o vymezené oblasti by bylo nutné připravit řízenou klasifikaci při multitemporální analýze, např. s podobnými vlastnostmi jako ad hoc provedená klasifikace na obr. č. 12 dole.

- c) Které části zkoumaného území můžeme označit jako rizikové z pohledu nebezpečí sucha v poslední letní sezóně? Která pásma bude vhodné použít do indexu sucha NDMI?

Rizikové oblasti jsou znázorněny na obr. č. 14 a 15, problematickým se jeví sucho v okolí Mechového jezírka. V indexu sucha (NDMI) je kromě NIRového pásma možné použít kteréhokoliv ze dvou SWIRových pásem, tedy B11 i B12, a to s přibližně stejnými výsledky.

- d) Jak lze hodnotit vývoj vegetace? Jak se vyvíjela vegetace (se zaměřením na lesní porost) vymezeného území v průběhu kůrovcové kalamity v letech 2016 až 2020? Je pro námi studovanou oblast vhodnější index GLI nebo index NDVI?

Obr. 16 až 21 znázorňují vývoj vegetace pomocí dvou zvolených vegetačních indexů. Na obou typech snímků jsou zřetelná poškození související s postupem kůrovcové kalamity a následnou těžbou. Aktivitu náletových křovin a ozdravné procesy krajiny lépe zachycuje index GLI.

- e) K jakým zjištěním stran geomorfologie (potažmo geologie) oblasti mohou přispět filtrační operace s DN hodnotami provedenými na vybraných pásmech? Jaká pásma

budou pro filtraci na vybraném vysokofrekvenčním filtru vhodnější? NIRová nebo SWIRová?

Z hlediska zvolené aplikace a metody se zdá být vhodnější pásmo NIR, výsledné obrazy se dají použít jako doplňkový materiál při studiu geomorfologie oblasti, nicméně obecná vypovídací schopnost filtrování pro účely geomorfologického výzkumu krajiny je zcela zanedbatelná v porovnání s moderními laserovými a dalšími metodami směřujícími k digitálním 3D modelům terénu.

- f) Lze si představit využití snímku Sentinelu 2 i pro meteorologické účely? Jak mohou být využity při krizových situacích?

Obecně lze hovořit o tom, že polární satelity mají pro meteorologii podružnou, ale přesto důležitou funkci, a v rámci moderní meteorologie doplňují data geostacionárních družic. Při krizových situacích si lze např. představit zachycení rozsahu pozdní sněhové pokrývky na jaře či naopak brzké sněhové pokrývky na podzim, přičemž tato data mohou napomáhat k řešení krizových situací či k předcházení možným rizikům např. v oblasti vzniku potenciálních lavin či v dopravních situacích.

- g) Lze sledovat charakteristiky Mechového jezírka prostřednictvím snímků Sentinel 2? Mohou být vypovídací o fyzickogeografických hodnotách?

Data z družic, konkrétně hodnoty DN pro jednotlivé pixely, mohou být pro různá pásma o mnohém vypovídací tak, jak například ukazuje kapitola Aplikace G, nicméně vždy bude nutná komparace s výsledky jiných fyzickogeografických přístupů. Bez fyzickogeografického a biologického kontextu jsou data sama o sobě pro jakákoliv zjištění neadekvátní.

Odpověď na hlavní výzkumnou otázku, tj. jakým způsobem lze využít satelitní DPZ pro fyzickogeografický výzkum lokality, se tak nabízí právě skrze odpovědi na otázky dílčí. Doplněna je pak výčtem možných dalších aplikací, ať už se jedná o tvorbu map, využití v zemědělství (např. inventarizace polnohospodářských plodin či sledování jejich zdraví, odhady úrody ad.), hydrologii či např. obecně ve vzdělávání v oblasti zeměpisu. Formou exkurzu jsou pak zmíněna také některá využití v humanitních disciplínách.

7 SUMMARY

The submitted master's thesis deals with the use of satellite technologies (especially Sentinel 2 and MSI sensor) for the physical geography research of the Rejvíz Highlands. The main method of the study is data analysis resulting from the knowledge of the theory of electromagnetic radiation spreading in space, specifically, radiation reflected from the Earth's surface as recorded by the satellites. Specific methods then depend on the considered applications for various spheres of physical geography research, but generally involve mathematical operations with DN values of pixels in remote sensing images.

The goal of the thesis was to evaluate the possibilities of specific uses of satellite imaging potential for the area, based on applications conducted for various areas of physical geography interest. Sub-research questions addressed the characteristics of the area with a focus on moisture and vegetation conditions, potential for both supervised and unsupervised image classifications, drought risks, ecological bio calamities, geomorphological conditions, meteorological extremes, and hydrological characteristics. The sub-methods included tasseled cap synthesis, supervised classification using the maximum likelihood method, calculation of drought indices, calculation of vegetation indices, application of high-frequency filters, synthesis in false colors, and analysis of the reflectance spectral curve.

In the application part, the use of the mentioned methods was presented, the methods were interpreted, and the individual applications also provided an answer to the main research question, i.e., how satellite remote sensing can be used for regional physical geography research of the area. Further possibilities for the use of this technology were also outlined for both natural sciences and humanities disciplines.

8 ZDROJE

8.1 Monografie, odborné články, informační syntézy

BECKEL, L. (ed.): The European Space Agency School Atlas Geography from Space, Salzburg 2010.

BĚLKA, L. a VOŽENÍLEK, V.: Ortofotomapa. Geovizualizace materiálů dálkového průzkumu Země. Olomouc 2013.

CRIST, E. P. a KAUTH, R. J.: The Tasseled Cap De-Mystified. In. Photogrammetric engineering and remote sensing 52 (1), s. 81–86, 1986.

CULEK, M. a kol.: Biogeografické regiony České republiky, Brno 2013.

DEMEK, J., MACKOVČIN, P. (ed.): Hory a nížiny, zeměpisný lexikon ČR, Brno 2006.

Education → Inspiring the future, ESA 2013.

ENG a kol. 2019 = ENG, L. S., ISMAIL, R., HASHIM, W. a BAHARUM, A.: The use of VARI, GLI, and VIGREEN formulas in detecting vegetation in aerial images. In. International Journal of Technology 10 (7), s. 1385–1394, 2019.

FERANEC, J. a kol.: Slovensko očami satelitov, Bratislava 2010.

FOWLER, J. R. M.: The first space photographs and the origins of satellite archaeology, In. AARG news 41, s. 25–38, 2010.

FREEMAN, R., KING J. a LAFYATIS G.: Electromagnetic radiation, Oxford 2019.

GELETIČ, J. a kol.: Úvod do ArcGIS 10. Olomouc 2013.

GOMEZ, B. a JONES J. P.: Research Methods in Geography. Blackwell 2010.

HUNT E. D. a kol.: The development and evaluation of a soil moisture index. In. International journal of climatology 29, s. 747–759, 2009.

CHLUPÁČ, I. a kol.: Geologická minulost České republiky, Praha 2002.

JUCHELKA, J. (ed): Jak se hledají druhoválečné hroby – aneb archeologický průzkum a mapování lokalit 2. světové války v českém Slezsku. Opava 2023.

Kol. autorů: Vysvětlivky k základní geologické mapě České republiky 1 : 25 000, list 14-242
Bělá pod Pradědem, Praha 2004.

Kol. autorů: Vysvětlivky k základní geologické mapě České republiky 1 : 25 000, list 14-224
Jeseník, Praha 2004.

KUNA, M. a kol.: Nedestruktivní archeologie. Teorie, metody a cíle. Praha 2004.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. a CHIPMAN, J. W.: Remote Sensing and Image
Interpretation, sedmá edice, 2015.

NRC 2016 = Natural Resources Canada 2016: Fundamentals of Remote Sensing – A
Canada Centre for Remote Sensing Remote Sensing Tutorial [online]; [cit. 2023]. Dostupné
z: <<https://www.nrcan.gc.ca/node/9309>>.

PAVELKA, K.: Dálkový průzkum Země. Družicové systémy, Praha 2010.

PROCHÁZKA, T.: Mapování změn vegetace ve vrcholových partiích Keprnické hornatiny,
nevydaná bakalářská práce, Olomouc 2020.

RUŠAR P. a ABRAHÁMEK A.: Extrémní jevy na Jesenicku pohledem meteorologa 1978–
2018, In. Meteorologické zprávy, 2, ročník 2021, s. 56–64.

RUŠAR, P.: Analýza geomorfologických poměrů Rejvízské hornatiny a její využití pro
vzdělávání v rámci moderních metod výuky fyzické geografie se zaměřením na vzdělávání
nadáních a podporu talentu, nevydaná bakalářská práce, Olomouc 2020.

S2–DS 2017 = ŽUBRIETOVSKÝ, L., ŠVÁBOVÁ, L. a ŠVÁB, O.: Sentinel 2 – DATOVÉ
SPECIFIKACE [online]; Praha 2017 [cit. 2023]. Dostupné z:
<<https://collgs.czechspaceportal.cz>>.

SVATOŇOVÁ, H. – LAUERMANN, L.: Dálkový průzkum Země – aktuální zdroj
geografických informací, Brno 2010.

ŠAFÁŘ, J. a kol: Chráněná území ČR, svazek VI., Praha 2003.

TOLASZ, R. a kol.: Atlas podnebí Česka, Praha–Olomouc 2007.

8.2 Internetové zdroje, portály

Copernicus: Copernicus Data Space Ecosystem [online]. 2023 [cit. 2023-12].

Dostupné z: <https://dataspace.copernicus.eu>

Copernicus: Sentiwiki [online], 2023 [cit. 2023-12].

Dostupné z: <https://sentiwiki.copernicus.eu>

Česká geologická služba: Půdní mapy [online]. 2023 [cit. 2013-09].

Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/pudy/>

Český hydrometeorologický ústav: Typizace povětrnostních situací pro území České republiky [online]. 2023 [cit. 2023-09]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocaci/typizace-povetrnostnich-situaci>

Český úřad zeměměřický a katastrální: Geoportál [online]. 2019 [cit. 2023-09].

Dostupné z: <https://geoportal.cuzk.cz/>

Česká informační agentura životního prostředí: WMS služba [online]. 2023 [cit. 2013-12].

Dostupné z: <https://www.cenia.cz/>

Evropská vesmírná agentura: Earth online [online]. 2023 [cit. 2023-12].

Dostupné z: <https://earth.esa.int>

Georgia Tech Student Wiki for Introductory Physics: Physicsbook [online]. 2023 [cit. 2023-09].

Dostupné z: <https://www.physicsbook.gatech.edu>

Index DataBase: A database for remote sensing indices [online]. 2023 [cit. z 2023-12].

Dostupné z: <https://www.indexdatabase.de/>

INSPIRE: Národní geoportál [online]. 2023 [cit. 2023-12].

Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/>

Ministerstvo životního prostředí ČR: Půdní mapy [online]. 2023 [cit. 2023-09].

Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/pudni_mapy

QGIS: A Free and Open Source Geographic Information System [online]. 2023 [cit. 2023-12]

Dostupné z: <https://qgis.org/en/site/>

Ústav pro hospodářskou úpravu lesa: Geoportál ÚHÚL [online]. 2023 [cit. 2023-9].

Dostupné z: <https://geoportal.uhul.cz/mapy>

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka: Digitální báze vodohospodářských dat;
hydroekologický informační systém [online]. 2023 [cit. 2013-09].

Dostupné z: <https://www.dibavod.cz/>; <https://heis.vuv.cz>

UE: The University of Edinburgh; Compass edge detector [online]. 2024.

Dostupné z: <https://homepages.inf.ed.ac.uk>