

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra prostorových věd



Česká
zemědělská
univerzita
v Praze

**Detekce požáru Českého Švýcarska pomocí
mikrovlnného spektra družice Sentinel-1**

Bakalářská práce

Vypracovala: Andrea Pomazalová

Vedoucí práce: Ing. David Moravec, Ph.D.

Praha 2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Andrea Pomazalová

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Detekce požáru Českého Švýcarska pomocí mikrovlnného spektra družice Sentinel-1

Název anglicky

Fire detection in Bohemian Switzerland using the microwave spectrum of the Sentinel-1 satellite

Cíle práce

Cílem práce je vyhodnotit možnost využití mikrovlnného pásma C družice Sentinel-1 k detekci spáleníště. Následně pak porovnat výsledky mikrovlnné družice s výsledky z družic pracujících v optickém pásmu.

Metodika

V první části studentka provede rešerši současných metod dálkového průzkumu Země k monitorování a hodnocení proběhlých požárů na základě spektrálních indexů. V praktické části následně naváže jejich aplikování na proběhlý požár v národním parku České Švýcarsko. Výsledné hodnoty následně porovná se změnou detekovanou satelitem Sentinel-1 a vyhodnotí schopnost detekovat tuto změnu.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

SAR, požár, spáleníště

Doporučené zdroje informací

- HARRIS, Sarah; VERAVERBEKE, Sander; HOOK, Simon. Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (Southern California) using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. *Remote sensing*, 2011, 3.11: 2403-2419.
- Keeley Jon E. (2009) Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18, 116-126.
- Kudláčková, L., Poděbradská, M., Bláhová, M. et al. Using FlamMap to assess wildfire behavior in Bohemian Switzerland National Park. *Nat Hazards* (2023).
<https://doi.org/10.1007/s11069-023-06361-8>
- RAHMAN, Shahriar, et al. Inter-comparison of fire severity indices from moderate (MODIS) and moderate-to-high spatial resolution (LANDSAT 8 & SENTINEL-2A) satellite sensors. In: IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2018. p. 2873-2876.
- Soverel, Nicholas O., Daniel DB Perrakis, and Nicholas C. Coops. "Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada." *Remote Sensing of Environment* 114.9 (2010): 1896-1909.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. David Moravec, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2024

prof. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 3. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 23. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Detekce požáru Českého Švýcarska pomocí mikrovlnného spektra družice Sentinel-1“ vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 28. března 2024

Andrea Pomazalová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Davidu Moravcovi, Ph.D., za vedení, cenné rady a odborný dohled. Tímto děkuji také Správě národního parku České Švýcarsko, zejména panu Mgr. Oldřichu Holešinskému za poskytnutí dat a v neposlední řadě Mgr. Markétě Zikmundové, Ph.D., za neocenitelnou pomoc při zpracování statistických analýz.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na schopnost radaru v pásmu C na platformě satelitu Sentinel-1 detekovat požár a určit míru závažnosti spálení na území Národního parku České Švýcarsko, kde požár vypukl v létě roku 2022. Byly vybrány dva radarové snímky ve formátu SLC – jeden před požárem a jeden po požáru. Jako referenční data sloužila vrstva přibližné závažnosti spálení, která byla vytvořena kombinací spektrálních indexů NDVI, BAI, NBR a RdNBR, získaných z optických snímků satelitů Landsat 8 a 9. V rámci analýzy byla vytvořena mřížka s buňkami o velikosti 30×30 metrů, do kterých byly vkládány hodnoty zpětného rozptylu, spektrálních indexů a hodnoty přibližného stanovení závažnosti požáru. Ze statistické analýzy bylo zjištěno, že mediány hodnot zpětného rozptylu se signifikantně odlišují, nicméně následné statistické metody nedokázaly prokázat schopnost radaru detekovat požáry. Z toho důvodu nebylo již přistoupeno k hodnocení zpětného rozptylu vůči vrstvě přibližné závažnosti získané ze spektrálních indexů. Spektrální indexy se ukázaly jako vhodnější nástroj pro detekci požáru a určení míry závažnosti spálení ve srovnání se snímky SAR v pásmu C.

Klíčová slova

SAR, požár, spáleniště, Spektrální indexy

Abstract

This bachelor thesis focuses on the ability of the C-band radar on the Sentinel-1 satellite platform to detect a fire and determine the severity of the burn in the Czech Switzerland National Park, where a fire broke out in the summer of 2022. Two radar images in SLC format were selected – one before the fire and one after the fire. A layer of approximate burn severity was used as reference data, which was created by combining the spectral indices NDVI, BAI, NBR and RdNBR obtained from Landsat 8 and 9 optical imagery. Statistical analysis revealed that the median backscatter values were significantly different, however, subsequent statistical methods failed to demonstrate the ability of the radar to detect fires. Therefore, the evaluation of backscatter against the approximate severity layer obtained from the spectral indices was no longer proceeded with. The spectral indices proved to be a more suitable tool for fire detection and determining the severity of the burn compared to C-band SAR imagery.

Key words

SAR, Fire, Burn area, Spectral indices

Obsah

1	Úvod.....	11
1.1	Využití spektrálních indexů.....	11
1.1.1	Index NDVI.....	12
1.1.2	Index BAI.....	13
1.1.3	Index NBR	13
1.1.4	Index RdNBR.....	14
1.2	Využití radaru v dálkovém průzkumu Země.....	14
1.2.1	SAR jako nástroj pro detekci požárů	14
2	Cíle práce	16
3	Úvod do dálkového průzkumu Země	17
4	Radarový dálkový průzkum Země.....	18
4.1	Dělení radarových senzorů – pasivní × aktivní.....	19
4.1.1	Dělení aktivních mikrovlnných senzorů	19
4.2	Polarizace radaru	19
4.3	Zpětný rozptyl	20
4.3.1	Radarová pásma – vlnové délky a frekvence.....	20
4.3.2	Drsnost povrchu	22
4.3.3	Typy rozptylu	22
4.4	Radar na družici Sentinel 1	23
4.5	Obecné využití radaru v DPZ.....	23
5	Optický dálkový průzkum Země.....	25
5.1	Družice Landsat.....	25
5.2	Spektrální indexy – princip	25
5.2.1	Normalizovaný diferenční vegetační index	26
5.2.2	Index BAI.....	27
5.2.3	Index NBR	28
5.2.4	Index RdNBR.....	30
6	Základní informace o studijním území	32
6.1	Národní park České Švýcarsko	32
6.2	Lesy Národního parku České Švýcarsko.....	32
6.2.1	Kulturní lesy.....	32
6.2.2	Přechodné lesy	32

6.2.2.1	Přírodě blízké porosty	33
6.3	Stav území před požárem	33
6.4	Požár a jeho dopady	33
6.4.1	Hodnocení požáru	33
6.4.2	Role vegetačního typu a šíření požáru	34
7	Metodika	35
7.1	Studijní území.....	35
7.1.1	Teplotní podmínky před požárem	35
7.2	Použité datové sady	36
7.2.1	Poskytnutá data	36
7.2.2	Dostupná data.....	36
7.3	Předzpracování dat	37
7.3.1	Předzpracování optických snímků z Landsatu.....	37
7.3.2	Předzpracování snímků SAR	37
7.4	Tvorba přibližné vrstvy závažnosti pomocí spektrálních indexů.....	39
7.4.1	Index NDVI.....	40
7.4.2	Index BAI.....	40
7.4.3	Index NBR	40
7.4.4	Index RdNBR.....	41
7.5	Tvorba vrstvy přibližné závažnosti spálení	41
7.6	Příprava dat pro statistické vyhodnocení.....	41
7.6.1	Tvorba tabulky pro statistickou analýzu	41
7.7	Statistické metody	43
7.7.1	Analýza hlavních komponent.....	43
7.7.2	Logistická regrese	43
7.7.3	Diskriminační analýza.....	43
8	Výsledky	44
8.1	Spektrální indexy.....	44
8.1.1	Index NDVI.....	44
8.1.2	Index BAI.....	44
8.1.3	Index NBR	45
8.1.4	Index RdNBR.....	46
8.2	Stanovení závažnosti	47
8.3	Radar	47

8.4	Statistická analýza zpětného rozptylu	48
9	Diskuse	51
9.1	Zhodnocení spektrálních indexů.....	51
9.1.1	Index NDVI.....	51
9.1.2	Index BAI.....	51
9.1.3	Index NBR	53
9.1.4	Index RdNBR.....	54
9.1.5	Shrnutí.....	56
9.2	Zhodnocení vrstvy závažnosti	57
9.3	Zhodnocení detekce požáru radarem.....	60
10	Závěr	62
	Zdroje.....	63
	Seznam obrázků	73
	Seznam tabulek	76

1 Úvod

Klimatická změna a postupné oteplování planety, se kterými se v posledních desetiletích setkáváme, s sebou přináší i stále citelnější výkyvy počasí. Potýkáme se se stále častějšími projevy, jako jsou například dlouhotrvající sucha, nedostatek vody v krajině, tání ledovců, povodně nebo častější výskyt lesních požárů.

Česká republika zatím vzhledem ke své geografické poloze, místním klimatickým podmínkám a charakteru krajiny nevykazuje takovou pravděpodobnost rozsáhlých a častých lesních požárů jako jiné části světa, například Středomoří, USA, Afrika, Austrálie, Španělsko nebo Sibiř (Krawchuk et al. 2009; Bowman et al. 2013).

Klimatická změna však způsobuje extrémnější povětrnostní podmínky ve střední Evropě (Brázdil et al. 2022 b; Možný et al. 2021; Zahradníček et al. 2022). Počet lesních požárů zde v posledním desetiletí vzrostl (Trnka et al. 2020; Možný et al. 2021).

Ani našemu území se lesní požár nevyhnul. Na konci července 2022 vypukl v České republice dosud největší zaznamenaný lesní požár. Odehrál se v Národním parku České Švýcarsko a spálená plocha činila přibližně 1000 ha (Kudláčková et al. 2023).

Požáry jsou poměrně běžnou disturbancí pro životní prostředí. Za určitých podmínek se však některé z nich mohou změnit v extrémní lesní požáry, které způsobí neúměrné ztráty a škody na životním prostředí, včetně degradace půdy a ztráty biologické rozmanitosti (Tedim et al. 2020).

Detekce narušení zasaženého ekosystému a monitorování opětovného růstu vegetace po požáru jsou zásadní pro účely ekologického výzkumu a managementu. Průzkumy v terénu bývají nákladné, časově neefektivní a často nebezpečné z důvodu ohrožení možným pádem ohořelých stromů a jejich kmenů (Avetisyan et al. 2023).

Vyvstává proto otázka, jak požáry a jizvy po požárech co nejefektivněji mapovat, analyzovat a jak zkoumat jejich dopady na ekosystém. Termín „jizva po požáru“ se používá k popisu fyzických stop, které zůstávají na krajině po požárech. Dálkový průzkum Země nám nabízí efektivnější metody sběru dat. Snímky z družic mohou mít vysoké prostorové i časové rozlišení, vhodné pro mapování změn v čase.

1.1 Využití spektrálních indexů

Existuje celá řada metod v dálkovém průzkumu Země, jak detekovat požáry a spálená území. Během minulých desetiletí bylo provedeno mnoho rozsáhlých studií, které se

zabývaly detekcí požárem zasažených oblastí právě pomocí spektrálních indexů (Quintano et al., 2018; Teodoro & Amaral, 2019).

Spektrální indexy byly rozsáhle testovány v boreálních lesích, mírných jehličnatých, listnatých lesích i středomořských lesích. Využití spektrálních pásem od červené po střední infračervené spektrální pásmo (SWIR) pro odhad závažnosti požáru byla prokázána pro mnoho různých ekosystémů (Tran et al. 2018).

Existují zejména dva druhy spektrálních indexů, které lze k těmto účelům využít. Prvním typem jsou indexy přímo navržené pro detekci spálených ploch. Právě potřeba zmapovat co nejlépe požárem zasažené oblasti dala vzniknout celé řadě nových, tzv. „požárních“ indexů. V těchto indexech se využívá vlastností spektrálního signálu zasažených oblastí v konkrétních pásmech – zejména v pásmech SWIR a NIR. Spektrální signál po požáru vede k rychlému nárůstu v pásmu SWIR a výraznému poklesu v pásmu NIR. Na základě právě tohoto vztahu byly navrženy jedny z nejoblíbenějších požárních indexů, jako je např. index BAI nebo NBR (Liu et al. 2020).

Druhým typem jsou vegetační indexy, jež původně sloužily pro hodnocení vlastností pozorované vegetace (zdravotní stav, úbytek apod.). Vzhledem k faktu, že lesní požáry provázejí změny vegetace (úbytek a rozpad stromů), lze právě i za pomoci vegetačních indexů rozlišit spálené a nespálené oblasti (Liu et al. 2020).

Pro tuto práci byly vybrány čtyři spektrální indexy, široce používané pro detekci požáru a hodnocení závažnosti dopadu na zasažené oblasti. Jedná se o indexy NDVI (Normalizovaný diferenční vegetační index), index BAI (Index spálené plochy), index NBR (Normalizovaný poměr spálení) a jeho modifikovanou variantu RdNBR (Relativní diferencovaný normalizovaný poměr spálení). Následující kapitoly budou pojednávat o využití těchto indexů v rámci hodnocení závažnosti požárů v různých oblastech světa. O podrobnostech použití včetně vzorců všech čtyř výše zmíněných indexů bude pojednáváno v podkapitolách 5.2.1.–5.2.4.

1.1.1 Index NDVI

Index NDVI je široce využíván v celé řadě odborných prací a publikací. Patří mezi nejoblíbenější a často používané indexy k odhadu tříd závažnosti požáru v rámci unitemporálních (snímky po požáru) i bitemporálních snímků (rozdíl snímků před a po požáru) (Veraverbeke et al. 2010; Escuin et al. 2008).

Ukázalo se také, že oproti indexům NBR a NDWI funguje přesněji v otevřených lesích se smíšenou reakcí na požár (Tran et al. 2018). Další studie se opět zaměřila na

srovnání indexu NDVI oproti indexům NBR a BAI. Ukázalo se, že NDVI v kombinaci s NBR se projevil jako nejpřesnější metoda pro rozlišování spáleného území (Kavzoglu et al. 2016).

Celkově se ukazuje, že index NDVI i v porovnání s jinými, mnohem užívanějšími indexy (jako je například už výše zmiňovaný index NBR) je schopný velmi dobře a přesně identifikovat spálené území, jako v případě studie vyhodnocující spektrální indexy ve Středomoří (Veraverbeke et al. 2011).

1.1.2 Index BAI

Index BAI je oproti indexu NDVI méně používaný a méně známý, nicméně jeho užitečnost pro mapování požárů byla prokázána už v mnoha odborných pracích. Například ve studii využívající spektrální indexy pro mapování požárů v Západní Africe byl index BAI vyhodnocen jako nejpřesnější z používaných indexů (Liu et al. 2021). Byl také testován spolu s indexy NDVI, SAVI a GEMI.

Zde poskytl nejvyšší rozlišovací schopnost mezi testovanými indexy a vykázal také vysokou variabilitu uvnitř spálených oblastí, což snížilo průměrné normalizované vzdálenosti s ohledem na jiné indexy (Chuvieco et al. 2002). Při mapování požárů v brazilské Amazonii byl také posuzován spolu s osmi jinými indexy a byl vyhodnocen jako nejvhodnější (Penha et al. 2020). V porovnávání s indexy NBR a NDMI se ukázal jako lepší nástroj pro okamžité hodnocení závažnosti po požáru (Fornacca et al. 2018).

1.1.3 Index NBR

NBR je index původně navržený pro extrakci spálených oblastí a patří mezi hlavní a nejoblíbenější spektrální indexy používané pro hodnocení závažnosti spálení pomocí různých senzorů v několika ekosystémech po celém světě. Dokáže velmi dobře detekovat jizvy po požárech i rok po události (Fornacca et al. 2018). Rozdíl indexu NBR, tzv. dNBR (rozdíl mezi snímkem před a snímkem po požáru) se například ve Španělsku ukázal jako nejvhodnější metoda pro hodnocení závažnosti (Escuin et al. 2008).

V tureckých lesních ekosystémech se spolu s jeho modifikovanou variantou (Rd-NBR) ukázal ve výsledcích jako nejpřesnější index, co se přesnosti klasifikace týče, ve srovnání s mnoha jinými spektrálními indexy (například dSAVI, dNDVI, dNDMI) (Güney et al. 2023). Taktéž ve studii zabývající se požáry v národním parku Chapada Diamantina v Brazílii byl posuzován ve vztahu k posouzení opětovného růstu vegetace

a byl shledán jako užitečný nástroj (Santos et al. 2020). I v mnoha dalších studiích bylo dokázáno, že index NBR (dNBR) výrazně předčil ostatní indexy a ve výsledcích se vždy umísťoval mezi nejlepší (Escuin et al. 2008; Veraverbeke et al. 2010; Nicholas et al. 2010; Harris et al. 2011; Veraverbeke et al. 2011).

1.1.4 Index RdNBR

Index RdNBR nepatří mezi často užívané indexy pro posuzování závažnosti požáru, i přesto byl ale v několika studiích využíván. V Turecku při hodnocení požárů dosáhl nejvyšší přesnosti klasifikace závažnosti požáru, a to na bázi Sentinelu 2 (Güney et al. 2023). Při posuzování závažnosti požáru v Brazilském národním parku byl spolu s klasickým indexem NBR vyhodnocen jako důležitý a užitečný nástroj (Santos et al. 2020). Objevil se také ve vzájemném srovnávání spektrálních indexů pro satelitní senzory MODIS, Landsat 8 a Sentinel 2A. Ze tří indexů testovaných pro různé typy lesů v počátečním a rozšířeném hodnocení si RdNBR vedl nejlépe pro různé typy lesů a v mezisrovnáních. V této studii překonal jak index dNBR, tak například i index RBR (Rahman et al. 2018).

1.2 Využití radaru v dálkovém průzkumu Země

Bohužel pro použití optického senzoru existují velmi výrazná omezení, zahrnující pokrytí oblačností, denní dobu, silný déšť nebo také kouř a opar z probíhajících požárů. Všechny zmiňované jevy výrazně omezují nebo znemožňují použitelnost optických senzorů ve viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra.

Zajímavou alternativou se tak stává využití radaru a radarových snímků SAR, konkrétně na družici Sentinel 1. Systém SAR je tzv. aktivní systém, který má schopnost pronikat skrze oblačnost i kouř a je nezávislý na denní době, takže se výrazně zlepšuje i jeho časové rozlišení. Tento způsob hodnocení požáru je založen na změně ve zpětném rozptylu po odrazu od země zpět k senzoru, kdy nám právě změna ve zpětném rozptylu napovídá o změně povrchu na Zemi.

1.2.1 SAR jako nástroj pro detekci požárů

Využitím snímků SAR ve vztahu k detekci požáru a posuzování závažnosti se zabývalo už mnoho studií, využívajících různé metody i různá pásma.

V Britském vřesovišti Peak District byla zkoumána schopnost radaru v pásmu C detekovat jizvu po požáru. Byla využita metoda analýzy intenzity SAR před a po

požáru a metoda založená na koherenčních párech InSAR. Radar zde úspěšně detekoval jizvu. Celkově bylo zjištěno, že radar je účinným nástrojem pro detekci jizvy na vřesovišti Bleaklow, a ukázal se jako dobrým nástrojem ke sledování perzistence jizvy v rašeliništi až 71 dní po požáru. Kromě toho se ukázalo, že silné srážky mají vliv na detekci jizvy, protože dokáží signál požární jizvy zesílit (Millin-Chalabi et al. 2013).

V Kalifornii bylo využíváno pásmo L pro mapování požárů z roku 2013. Zde byly použity dva plně polarizované snímky. Ve snímcích byly vybrány dvě oblasti – jedna ve spálené oblasti a druhá mimo spálenou oblast. Dále byl vynesena histogram pro každou možnou polarizaci na vybraných oblastech a pro typy odrazů. Výsledek ukázal, že největší potenciál pro detekci jizvy má polarizace HV a VH (Taillade et al. 2019).

Další oblastí, kde byl využíván radarový senzor k detekci požáru, byly Boreální lesy v Kanadě a v Rusku. Pro výzkum byly vybrány data SAR v pásmu C (ERS a Radarsat). Mapování jizev na území Kanady probíhalo bez předchozí znalosti jejich umístění po požárech. Zmapované oblasti byly tedy pouze potencionální jizvy a bylo třeba je ověřit pomocí databáze Canadian Fire Service (CFS). Data byla objednána z období jara a podzimu. Nejlépe hodnocené snímky byly digitalizovány, mozaikovány a georeferencovány. Z těchto snímků se pak prostřednictvím softwaru GIS digitálně tvořily hranice jizvy, které se pak porovnávaly s hranicemi z CFS. Obdobné zpracování proběhlo i pro ruskou oblast. Výsledky studie prokazují, že jizvy po ohni v pásmu C jsou mapovatelné. Bylo prokázáno detekovatelnost jizev po ohni i po třech až sedmi letech (Bourgeau-Chavez et al. 2002).

Detekce požárů pomocí radaru byla vyzkoušena i v kombinaci se spektrálními indexy na území pohoří Margalla v Pákistánu. Snímky pro výpočet spektrálních indexů byly získány ze satelitu Sentinel 2. Byly použity indexy NDVI a NBR. Snímky SAR byly získány ze satelitu Sentinel 1. Pro snímky SAR se pro jednu oblast vypočítalo 34 proměnných. Každá z proměnných obsahovala odlišnou polarizaci a odlišnou hodnotu percentilu. Pomocí Z-skóre bylo zjištěno, že nejlepší proměnná nazvaná $VV_{normDiffVH} p_{95}$ (NSR p_{95}) poskytla nejlepší výsledky, když jako jediná dokázala detekovat správně 50 % požárů (vysvětlení proměnné: jedná se o normalizovaný poměr signálu (NSR) pro 95 percentil pro rozdíl polarizací VV a VH). Jakmile však byly porovnány NSR p_{95} a spektrální indexy (tj. NBR a NDVI), hodnocení přesných odpovědí pro SAR se výrazně zvýšilo, protože SAR odpovídala na NBR 95 % času (Tariq et al. 2021).

2 Cíle práce

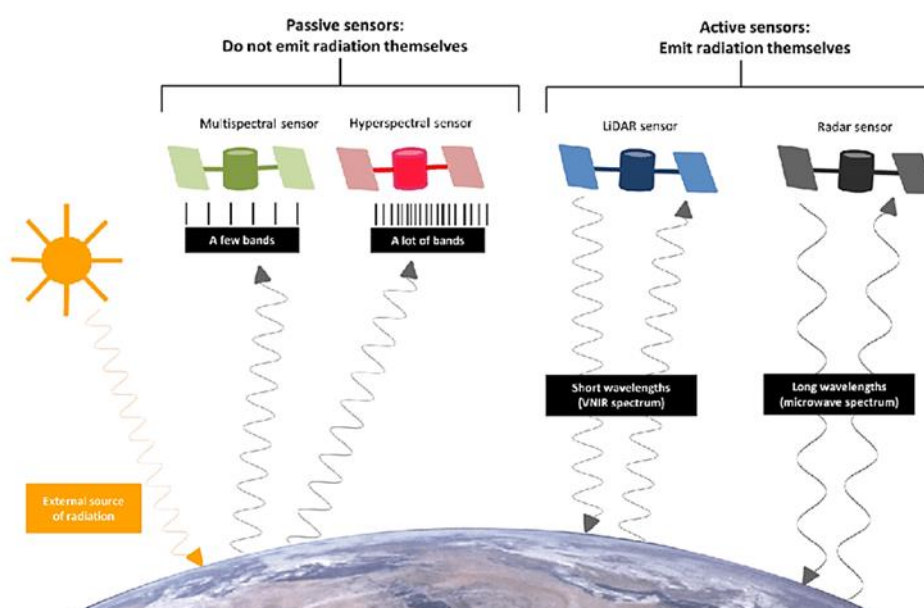
Pro svoji bakalářskou práci jsem si stanovila následující vědecké otázky a cíle, které se tato práce pokusí zodpovědět.

- 1) Dokáže radar z družice Sentinel-1, pásma C, detekovat na území Národního parku České Švýcarsko požár z roku 2022?
- 2) Je možné za pomoci radaru zhodnotit míru závažnosti spálení na daném území?
- 3) Vzájemné porovnání radaru a spektrálních indexů.

3 Úvod do dálkového průzkumu Země

Dálkový průzkum Země je proces shromažďování informací o objektu nebo oblasti na dálku, obvykle pomocí satelitů nebo letadel. V dálkovém průzkumu se nejčastěji setkáváme s využíváním různých senzorů (přístrojů). Tyto senzory lze obecně dělit na pasivní a aktivní (Kropáček et al. 2020).

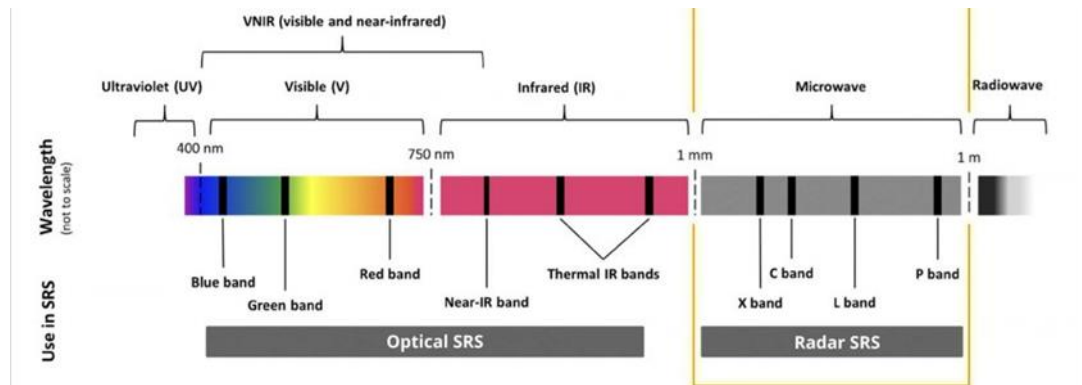
Aktivní senzory vysílají své vlastní záření směrem k cíli a měří odražené nebo zpětně rozptýlené záření, zatímco pasivní senzory detekují přirozenou energii (záření), která je vyzařována nebo odražena sledovaným objektem nebo scénou (GIS Geography ©2024).



Obrázek 1: Senzory v DPZ lze dělit na pasivní a aktivní. Do pasivních systému spadají multispektrální a hyperspektrální senzory (znázorněné v levé části). Tyto senzory pouze přijímají povrchem vyzařovanou energii. Aktivní systémy, do kterých lze zařadit systémy, jako je Radar a LiDAR, vyzařují vlastní energii, která se po odražení od zemského povrchu vrací zpět do senzoru (znázorněno v pravé části) (Pettorelli et al. 2018).

4 Radarový dálkový průzkum Země

Základním důvodem pro využití mikrovln pro dálkový průzkum je jejich odlišnost. Využitím mikrovlnné oblasti elektromagnetického spektra (viz obr. č. 2) získáváme možnosti, které nám mohou sloužit jako doplňující metody dálkového průzkumu používané v jiných spektrálních oblastech. Interakce mikrovln se řídí jinými fyzikálními parametry, než jaké najdeme u jiných forem elektromagnetického záření. (Woodhouse 2006, s. 1)



Obrázek 2: Elektromagnetické spektrum a jeho využití v družicovém dálkovém průzkumu Země (Pettorelli et al. 2018).

Jako příklad si můžeme představit zelený list. Pokud se na zelený list podíváme přes optické spektrální pásmo, dostaneme informace o množství chlorofylu (informace o tom, jak moc je list zelený). Pokud ale na list dopadne mikrovlnné záření o určité vlnové délce, dojde k rozptýlení a do senzoru se vrátí jen pouhá část signálu. Množství rozptýlené mikrovlnné energie je úměrné velikosti listu, tvaru a obsahu vody, nikoli množství chlorofylu jako v případě optického spektrálního pásma (Woodhouse 2006, s. 1).

Vzhledem k tomu, že oblaka ani jiné složky atmosféry (srážky) neruší detekci povrchu a ani zobrazování na vlnových délkách používaných pro radarový dálkový průzkum a také že platforma (družice) nese vlastní primární zdroj energie (aktivní systém), lze radarové snímkování provádět v kteroukoli denní dobu a za jakýchkoli meteorologických podmínek. To platí hlavně tehdy, pokud nejsou obzvláště silné srážky a nepoužívají se velmi krátké vlnové délky; v tomto případě by bylo radarové snímkování výrazně ovlivněno a téměř znemožněno (Richards 2009, s. 21).

Vlnové délky používané při radarovém snímání jsou přibližně o čtyři až pět řádů delší než vlnové délky používané v optickém spektru dálkového průzkumu. To nám

umožňuje při mikrovlnném snímání zjišťovat zcela odlišné vlastnosti typů zemského povrchu (Richards 2009, s. 21).

4.1 Dělení radarových senzorů – pasivní × aktivní

Stejně jako při dělení senzorů v kapitole *Úvod do dálkového průzkumu Země*, lze i mikrovlnné přístroje dělit do dvou tříd – na pasivní, známé jako radiometry, a aktivní, známé jako radarové systémy nebo radary. Oba typy zahrnují antény a přijímače, ale radary na rozdíl od radiometrů obsahují také vysílač (Ulaby et Long 2014, s. 3).

Aktivní snímače (radary) vytvářejí vlastní záření vysláním impulsů mikrovlnného záření a poté pomocí specializovaného systému přijímače měří odražený (rozptýlený) signál ze zájmové oblasti. Tento signál nazýváme termínem zpětný rozptyl (Woodhouse 2006, s. 2).

Tato práce využívá aktivní senzor radarového systému se syntetickou aperturou (SAR), proto se dále práce bude zaměřovat pouze na aktivní radar, nikoli pasivní.

4.1.1 Dělení aktivních mikrovlnných senzorů

Aktivní mikrovlnné senzory lze dále rozdělit do pěti obecných tříd:

- radarové systémy se syntetickou aperturou (SAR)
- letecké radary s bočním pohledem (SLAR)
- rozptyloměry
- výškoměry
- meteorologické radary

Systémy SAR a SLAR jsou určeny k vytváření snímků z pohybujiících se plošin. Tyto systémy fungují tak, že vysílají modulované impulsy mikrovln a ke konstrukci obrazů (snímků) zpětného rozptylu využívají dopplerovské/rozsahové zpracování. Systémy SAR obecně poskytují nejvyšší rozlišení, ale jsou podstatně složitější na zpracování než ostatní senzory (Ulaby et Long 2014, s. 3).

4.2 Polarizace radaru

Polarizace vlny není z hlediska šíření ve volném prostoru striktně důležitá. Nicméně, při dopadu záření na zemský povrch může být odezva různého povrchu při různých orientacích vln rozdílná (Richards 2009, s. 28–29).

Rozlišujeme dva typy polarizace elektrického pole. Jestliže vektor elektrického pole leží v rovině dopadu, pak je nazýván rovnoběžnou polarizací. Zatímco pokud leží v pravém úhlu k rovině dopadu, pak je nazýván kolmou polarizací. Kolmo polarizovaná vlna je vůči zemskému povrchu vodorovná. V dálkovém průzkumu se proto častěji užívá výraz horizontální polarizace. Rovnoběžná polarizace bývá v dálkovém průzkumu označována jako vertikální polarizace (Richards 2009, s. 28–29).

Elektromagnetické vlny jsou vysílány a přijímány pomocí antény. Typ polarizace vypuštěné vlny závisí na vlastnostech vysílací antény a její orientace. Vhodnou orientací antény můžeme vypouštět jak vertikálně polarizované, tak horizontálně polarizované záření, nebo jakoukoli lineární polarizaci mezi nimi (Richards 2009, s. 44).

Existují čtyři různé kombinace polarizace běžně používané senzory SAR: VV, VH, HV a HH (tab. 1). První písmeno označuje polarizaci použitou k přenosu signálu a druhé písmeno označuje polarizaci měřeného návratu.

Polarizační kód	Polarizace vysílaného signálu	Polarizace přijímaného signálu
VV	Vertikální	Vertikální
VH	Vertikální	Horizontální
HV	Horizontální	Vertikální
HH	Horizontální	Horizontální

Tabulka 1: Polarizace SAR (Alaska Satellite Facility ©2024).

4.3 Zpětný rozptyl

SAR je aktivní senzor, který vysílá impulsy a poslouchá ozvěny, tzv. zpětný rozptyl. Zpětný rozptyl je zaznamenán jak ve fázi, tak i v amplitudě. Fáze se používá k určení vzdálenosti od senzoru k cíli, amplituda udává množství vyslaného signálu, který se vrací do senzoru. Měření v amplitudě poskytuje informace o drsnosti povrchu, geometrii, vlhkosti a dielektrické konstantě. Fázová měření nacházejí uplatnění v oboru interferometrie (Alaska Satellite Facility ©2024).

Zpětný rozptyl ovlivňuje několik hlavních faktorů – vlnová délka, drsnost povrchu a typy rozptylu.

4.3.1 Radarová pásma – vlnové délky a frekvence

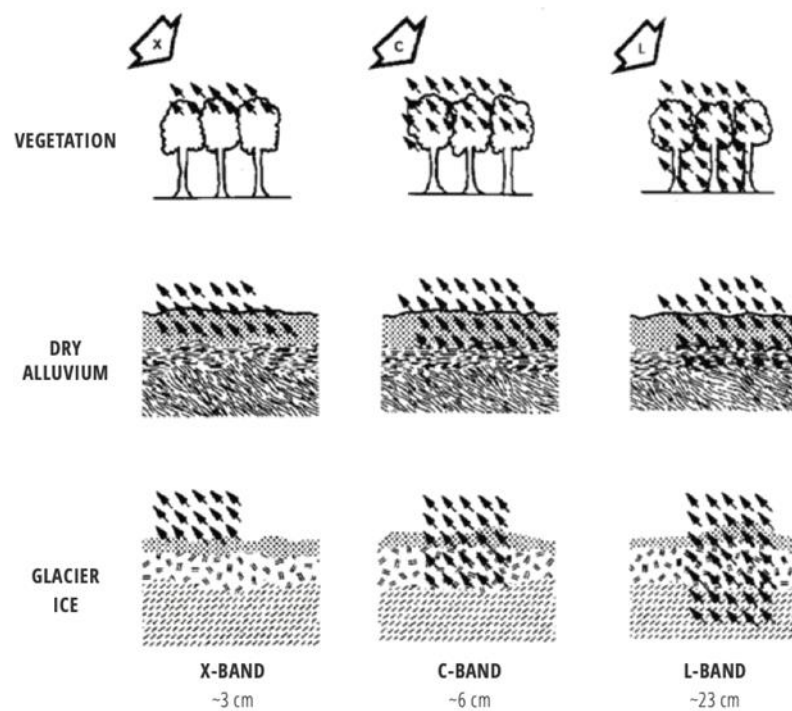
Radarové systémy využívají frekvence od 1 do 90 GHz. Tento rozsah lze seskupit do tzv. pásem, která v dřívějších válečných dobách souvisela s různými zařízeními

potřebnými k jejich generování a detekci. Protože byla definována právě v době války, bylo třeba zvolit z důvodu bezpečnosti a utajení názvy jednotlivých pásem tak, aby na první pohled nebylo jasné, k čemu bylo konkrétní pásmo využíváno. Tento systém pojmenování (obr. č. 3) doposud používáme (Woodhouse 2006, s. 18).

Frequency band	Frequency range (GHz)	Wavelength range (cm)
L band	1–2	15–30
S band	2–4	7.5–15
C band	4–8	3.75–7.5
X band	8–12	2.5–3.75
Ku band	12–18	1.67–2.5
K band	18–27	1.11–1.67
Ka band	27–40	0.75–1.11
V band	40–75	0.4–0.75
W band	75–110	0.27–0.4

Obrázek 3: Radarová pásma a jejich frekvence a vlnová délka (American Meteorological Society ©2022).

Míru pronikání aktivního radaru SAR do hloubky ovlivňuje použitá vlnová délka. Jak je znázorněno na obr. č. 4, pásmo X má nejmenší míru penetrace, rozptyluje se v horní části korunového patra v oblastech s vegetací. Všechny tři pásy jsou schopny proniknou suchým pískem, se silnějšími návraty z pásma C a L. Pásmo L má největší průnik v porostech, v suchých naplaveninách i v průniku skrze led a sníh (Alaska Satellite Facility ©2024).

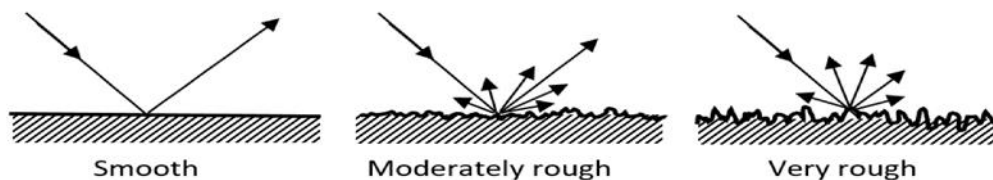


Obrázek 4: Vliv pásma SAR na průnik povrchem. Čím delší je vlnová délka, tím hlouběji proniká většinou typů povrchu (SAR Handbook 2019).

Vlnová délka mikrovlnné energie používané v radarovém dálkovém průzkumu je ve srovnání s energií používanou v optických senzorech velmi dlouhá. To vede k tomu, že vlny dopadající na materiály na zemském povrchu mohou často pronikat takovým způsobem, že může docházet k rozptylu jak zevnitř samotného povrchu, tak z jeho povrchu (Richards 2009, s. 135).

4.3.2 Drsnost povrchu

Síla povrchového rozptylu závisí na drsnosti povrchu a dielektrické konstantě materiálu, od kterého dochází k rozptylu (Richards 2009, s. 136). Čím je povrch hladší, tím více se odráží od snímače, má tudíž nejmenší návratnost, zatímco drsné povrchy poskytují mnohem silnější návrat (viz obr. č. 5) (Alaska Satellite Facility ©2024).



Obrázek 5: Odraz od hladkého, mírně drsného a velmi drsného povrchu (Sabery et al. 2021).

Hladký povrch

Nejjednodušší formou povrchového rozptylu je odraz od hladkého povrchu. Hladké povrchy se na radarových snímcích jeví podstatně tmavší než povrchy drsnější, zejména při středních až velkých úhlech dopadu (Richards 2009, s. 136–137).

Drsný povrch

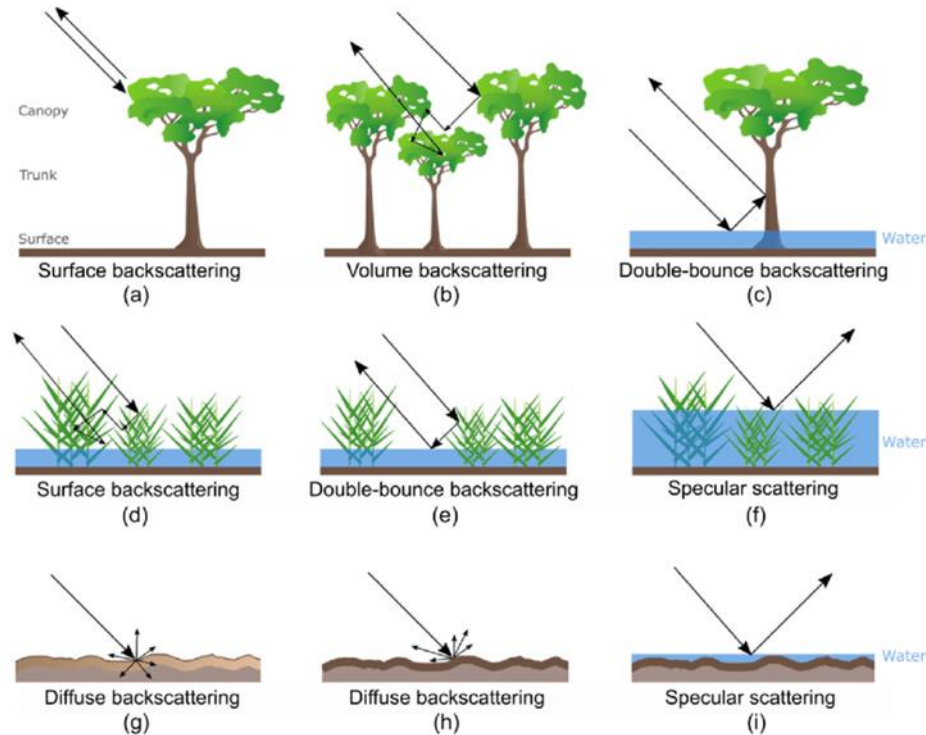
S rostoucí drsností povrchu se zvyšuje zpětný rozptyl. Čím je povrch drsnější, tím světlejší se jeví na radarových snímcích. Je-li povrch pouze mírně drsný, zpětný rozptyl bude menší, zatímco u velmi drsného povrchu bude docházet k významnému rozptylu ve všech směrech, včetně směru zpět k senzoru (Richards 2009, s. 139).

4.3.3 Typy rozptylu

Hlavní typy rozptylu pro různé povrchy za zaplavených a nezaplavených podmínek jsou znázorněny na obrázku č. 6.

Hladké vodní povrchy (obrázek 6i) lze snadno detekovat díky jejich velmi nízkému zpětnému rozptylu, protože fungují jako zrcadlo a vysílaný signál je téměř zcela rozptýlen mimo snímač, což má za následek velmi nízký zpětný rozptyl. K objemovému

rozptylu dochází především v korunách stromů nebo v husté vegetaci (obrázek 6b, d). Povrchový rozptyl lze nalézt na holé půdě (obrázek 6g, h) nebo v korunách stromů (obrázek 6a) v závislosti na velikosti listů, jejich hustotě apod. (Ottinger et Kuenzer 2020).



Obrázek 6: Mechanismy radarového zpětného rozptylu pro lesní, mokřadní a půdní povrchy. (a, b, g, h): Nezaplavený stav; rozptyl signálu v koruně a na zemi. (c–f, i): Ponořený mokřad/ otevřená voda; silný dvojitý odraz signálu mezi kmeny stromů a vodní hladinou. (g–i): Povrch země v mokřem (g), suchém (h) a zaplaveném stavu (i) (Lu et Kwoun 2008; Ottinger et Kuenzer 2020).

4.4 Radar na družici Sentinel 1

Sentinel 1 je zobrazovací radarová mise se syntetickou aperturou (SAR) poskytující nepřetržité snímky za každého počasí v kteroukoli denní dobu. Pracuje v pásmu C s frekvencí 5,405 GHz a podporuje duální polarizaci (HH + HV, VV + VH). Hlavní operační režim se vyznačuje širokým záběrem (250 km) s vysokým radiometrickým i geometrickým rozlišením (obvykle 20 m rozlišení produktu Level-1). Poskytuje snímky ve formátu SLC a GRD. Družice Sentinel-1A byla vypuštěna 3. dubna 2014 a družice Sentinel-1B 25. dubna 2016 (European Space Agency; eoPortal ©2024).

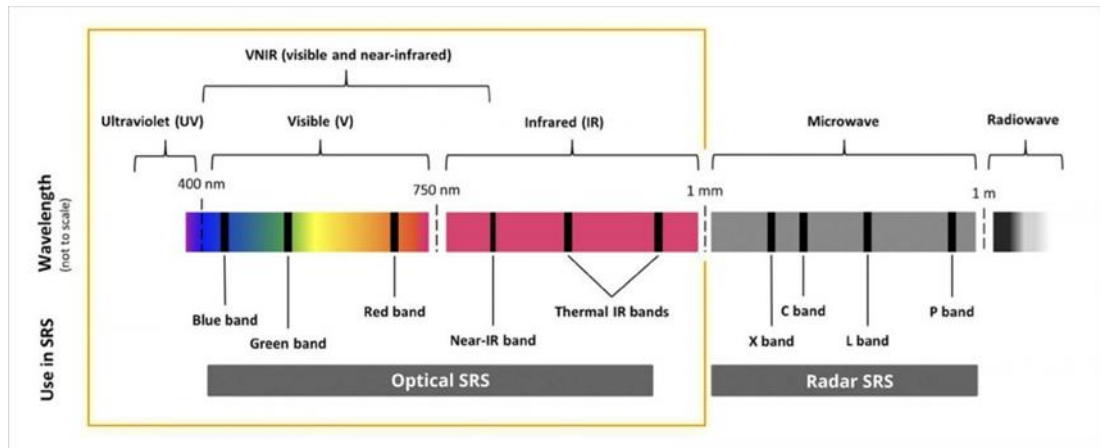
4.5 Obecné využití radaru v DPZ

Radar skýtá širokou škálu využití v dálkovém průzkumu Země za předpokladu výběru vhodné vlnové délky. Jako příklad lze uvést několik různých aplikací. Mapování lesů prostřednictvím radaru umožňuje získávání důležitých dat o lesních plochách, povrchu

půdy nebo výšce stromů, což může být klíčové pro monitorování a ochranu lesních ekosystémů. Dále lze využít radary k identifikaci mokřadů či jiných vodních ploch nebo významných povětrnostních jevů – pohybu srážek, bouří apod. Poskytují cenné informace pro ekosystémový management a prevenci přírodních katastrof. Velmi užitečná je schopnost radaru detekovat různé přírodní katastrofy a monitorování jejich škod, například při zemětřesení, povodních nebo lesních požárech (Batool et al. 2020).

5 Optický dálkový průzkum Země

Optické snímky dálkového průzkumu Země jsou citlivé na biofyzikální vlastnosti půdního pokryvu a vegetace. Družicové optické systémy získávají informace z elektromagnetického záření odraženého slunečním světlem. Využívají viditelné, blízké infračervené a krátkovlnné infračervené spektrum elektromagnetického záření (The Nature Conservancy ©2024).



Obrázek 7: Elektromagnetické spektrum a jeho využití v družicovém dálkovém průzkumu Země (Pettorelli et al. 2018).

5.1 Družice Landsat

Družice Landsat společnosti NASA a USGS (USA), jejichž snímky v této práci byly využívány, mají střední prostorové rozlišení (30 m na pixel), díky čemuž se výrazně zlepšuje schopnost detekovat oblasti i v jemnějším měřítku. Řady družic Landsat 8 a 9 OLI jsou navíc multispektrální družice, tzn. že dokáží pokrýt několik rozsahů spektrálních vlnových délek – například pásma blízkého infračerveného záření (NIR) a krátkovlnná infračervená pásma (SWIR), které patří mezi nejvyužívanější pásma pro detekci spálených oblastí. Spektrální vlastnosti povrchu bývají intuitivnější a účinnější při identifikaci různých druhů půdního pokryvu a objektů. Proto se multispektrální družice a spektrální indexy staly oblíbenou a často využívanou metodou, právě díky své jednoduchosti a vysoké přesnosti (U.S. Geological Survey).

5.2 Spektrální indexy – princip

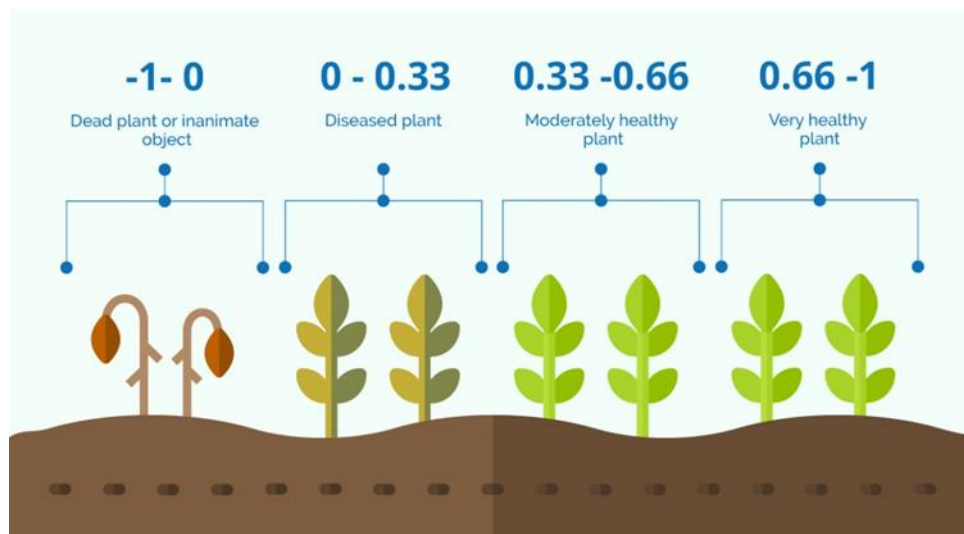
Spektrální index je matematická kombinace dvou nebo více vlnových délek, která zvyšuje informační obsah dat (Rouse et al. 1974). Cílem těchto matematických kombinací je zvýraznění konkrétního jevu nebo složky na základě znalostí spektrálního chování

objektů. Obecně se spektrální indexy využívají ke zvýraznění oblastí pokrytých sněhem/vodou, množství biomasy a zdravotního stavu vegetace, rozlišení tříd krajinného pokryvu, detekce disturbancí různého druhu (požáry, odlesňování apod.). Pro výpočet spektrálních indexů je vhodné použít atmosféricky korigované hodnoty odrazivosti (tzv. Bottom-of-Atmosphere reflectance) (Kropáček et al. 2020).

5.2.1 Normalizovaný diferenční vegetační index

Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI) je široce používaný index pro kvantifikaci a hodnocení zdraví a hustoty vegetace. Jedná se o index, který je snadno interpretovatelný (Geospatial Data International Inc. ©2023).

Pro lidské vnímání barev je rostlina zelená, protože její chlorofylový pigment odráží zelené pásmo a pohlcuje červené pásmo. Díky tomu zdravá rostlina – se spoustou chlorofylu – aktivně absorbuje červené pásmo a odráží blízké infračervené pásmo (NIR). U nezdravé rostliny je tomu přesně naopak. Nezdravá nebo řídká vegetace bude odrážet více viditelného světla a pohlcovat více infračerveného světla (Mezainis et al. 2014–15, s. 14; Auravant ©2024).



Obrázek 8: Hodnoty NDVI v rozmezí -1 až 0 = mrtvé rostliny nebo neživé předměty, rozmezí 0–0,33 = nemocná rostlina, rozmezí 0,33–0,66 = středně zdravá rostlina a rozmezí 0,66–1 = velmi zdravá rostlina (Auravant ©2024).

Index nabývá hodnot od -1 do +1. Hodnoty rozprostírající se mezi -1 a 0 nám indikují místa, kde se vegetace vůbec nevyskytuje (zastavěné plochy / vodní plochy apod.) nebo se jedná o místa, kde se vegetace sice vyskytuje, ale je již uhynulá. Hodnoty mezi 0 a 0,3 nám indikují vegetaci, která je ve velmi špatném zdravotním stavu. Hodnoty od 0,3 do 0,6 nám odhalují vegetaci, která je ve velmi dobrém zdravotním stavu.

Rozmezí hodnot od 0,6 do 1,0 značí zdravou a prosperující vegetaci (FlyPard Analytics GmbH ©2019–2024).

Díky citlivosti indexu NDVI na červené a blízké infračervené záření je možné s jeho pomocí velmi dobře rozlišit i oblasti, jež byly zasaženy požárem. Z tohoto důvodu byl vybrán jako jeden z indexů pro detekci oblastí zasažených požárem. Jeho významný pokles hodnot v těchto oblastech velmi dobře indikuje přítomnost spálených oblastí (Escuin et al. 2008).

Vzorec výpočtu indexu NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Omezení indexu NDVI

NDVI je poměrně citlivý na atmosférické vlivy, a je proto důležité, aby snímek, na který je tento index aplikován, byl nejdříve ošetřen atmosférickou korekcí a byl, pokud možno, bezoblačný. Ukazuje se také, že je poměrně citlivý na účinky pozadí půdy během raných fází růstu vegetace, kdy je plocha zelených listů malá. Může tedy docházet k jistému zkreslení výsledků (NAX Solutions 2022).

5.2.2 Index BAI

Index spálené plochy, anglicky Burn Area Index (BAI), je index, který byl speciálně navržen právě pro detekci spálených oblastí. Stejně jako předchozí index NDVI, využívá červené a infračervené pásmo. Na rozdíl od indexu NDVI ale nemá za úkol hodnotit zdravotní stav vegetace, nýbrž se zaměřuje na zvýraznění signálu dřevěného uhlí na snímcích (Chuvieco et al. 2002). BAI má poměrně vysoký potenciál při rozlišování spálených oblastí od jiných typů krajinného pokryvu právě díky své vyšší citlivosti na dřevěné uhlí (Liu et al. 2021).

Tento index byl původně vyvinut pro středomořské prostředí. Jeho použitelnost v jiných oblastech do značné míry závisí na výdrži dřevěného uhlí po požáru, která se může pohybovat od měsíců (boreální oblasti) až po týdny či dny (tropické oblasti) (Chuvieco et al. 2002).

Vypočítá se ze spektrální vzdálenosti od každého pixelu k referenčnímu spektrálnímu bodu, kde se sbíhají nedávno vypálené oblasti. Jasnější pixely označují oblasti, které byly zasaženy požárem (Chuvieco et al. 1998).

Vzorec výpočtu indexu BAI

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - Red)^2 + (0.06 - NIR)^2}$$

Referenční hodnoty odrazivosti bodu konvergence, nastavené na 0,1 pro červené pásmo a 0,06 pro infračervené pásmo, byly definovány na základě díla „*Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*“ autorů Chuvieco a Pilar.

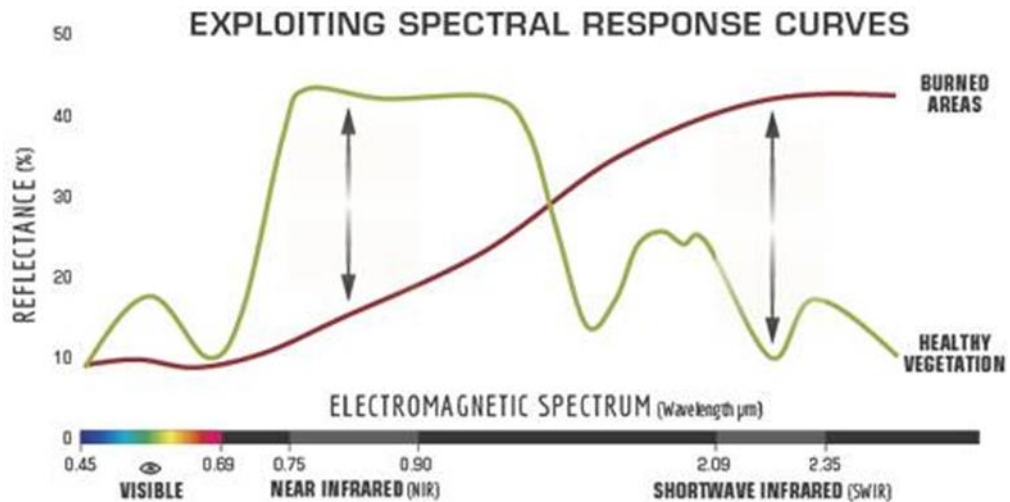
Omezení indexu BAI

Protože byl tento index navržen tak, aby zdůrazňoval signál dřevěného uhlí ve snímcích po požáru, představuje určitou potenciální záměnu s cíli s nízkou reaktancí, jako můžou být vodní plochy, mraky či stíny (Chuvieco et al. 2002).

5.2.3 Index NBR

Normalizovaný poměr spálení, anglicky Normalized Burn Ratio (NBR), je index, který se používá k identifikaci spálených oblastí a stanovení závažnosti požáru na daném území. Je určený ke zvýraznění spálených oblastí ve velkých požárních zónách (větších než 500 akrů) (Key et N. Benson 2005).

Vzorec je podobný vzorci indexu NDVI, avšak s tím rozdílem, že index NBR kombinuje použití vlnových délek blízkého infračerveného záření (pásmo NIR) a krátkovlnného infračerveného záření (pásmo SWIR). Jak je patrné z grafů níže (obr. č. 9), zdravá vegetace vykazuje velmi vysokou odrazivost v pásmu NIR a nízkou odrazivost v části pásma SWIR. Opačná situace nastává v oblastech zasažených požárem. Nedávno spálené plochy vykazují nízkou odrazivost v pásmu NIR a vysokou odrazivost v pásmu SWIR (Keeley 2009).



Obrázek 9: Srovnání spektrální odezvy zdravé vegetace a spálených oblastí (U.S. Forest service).

Výpočet indexu NBR

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

Hodnoty NBR se pohybují mezi -1 a 1. Vysoká hodnota NBR značí zdravou vegetaci, zatímco nízká hodnota znamená holou půdu a nedávno vypálené plochy. Oblasti, které požárem nebyly zasažené, mají obvykle hodnoty blízké 0 (Keeley 2009).

Stanovení závažnosti pomocí ΔNBR

Index NBR je nejúčinnější, když se použije pro výpočet rozdílu mezi snímky získanými bezprostředně před požárem a snímky získanými bezprostředně po požáru.

$$\Delta NBR = \text{Prefire NBR} - \text{Postfire NBR}$$

Vyšší hodnota ΔNBR ukazuje na vážnější poškození, kdežto oblasti se zápornými hodnotami mohou značit opětovný růst vegetace po požáru. Hodnoty ΔNBR se mohou případ od případu lišit. Je-li to tedy možné, měla by být interpretace v konkrétních případech validována také za pomoci terénního hodnocení. Organizace United States Geological Survey (USGS) nicméně navrhla klasifikační tabulku pro interpretaci závažnosti popálenin, která je uvedena níže (©UN-SPIDER).

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10^3)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Moderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Obrázek 10: Stupně závažnosti spálení získané výpočtem ΔNBR podle návrhu USGS.

Omezení indexu NBR

Index je méně účinný, pokud uplynul čas a po požáru začal opětovný růst / regenerace vegetace. Jakmile započne regenerace, jizva po ohni začne odrážet silnější signál v části spektra NIR, protože zdravé rostliny silně odráží pásmo NIR díky vlastnostem chlorofylu. Z tohoto důvodu poměr NBR funguje lépe v oblastech, jako je například USA, kde se očekává, že regenerace rostlin bude pomalejší. V oblastech, jež jsou vlhké a charakteristické rychlým opětovným růstem, může být NBR méně účinný (Earth Lab ©2022).

5.2.4 Index RdNBR

Relativní diferencovaný normalizovaný poměr spálení, anglicky Relative differenced normalized burn ratio (RdNBR), je modifikovaná varianta indexu NBR (Miller et Thode 2002).

Byl navržen tak, aby posuzoval relativní změnu namísto absolutní změny. Toho je dosaženo dodatečným krokem k postupu dNBR, ve kterém se pro výpočet podílu dNBR použije druhá odmocnina absolutní hodnoty NBR před požárem (Miller et Thode 2007).

Bylo zjištěno, že RdNBR přesněji identifikuje vysoce závažné popáleniny v oblastech s heterogenním složením vegetace a dává do souvislosti změnu vyvolanou požárem s množstvím biomasy před požárem. Proto spíše než jako měřítko absolutní změny odráží změnu způsobenou požárem ve vztahu ke stavu před požárem. Je tedy potenciálně vhodnější než dNBR pro srovnání mezi zónami s různými podmínkami prostředí. Navrhovaná rovnice však měla své vlastní problémy, konkrétně to, že druhá odmocnina použitá k výpočtu RdNBR produkuje velká, obtížně interpretovatelná čísla (Miller et Thode 2007).

Vzorec výpočtu RdNBR

$$RdNBR = \frac{Prefire\ NBR - Postfire\ NBR}{\sqrt{ABS(Prefire\ \frac{NBR}{1000})}}$$

Vysvětlení použitého vzorce

„Hodnoty NBR se obecně pohybují v rozmezí 1 až -1, stejně jako u NDVI. Pro transformaci dat do celočíselného formátu škálujeme NBR číslem 1000; proto je třeba ve vzorci RdNBR vydělit NBR před požárem číslem 1000. Převzetí absolutní hodnoty

NBR před požárem ve jmenovateli umožňuje výpočet odmocniny, aniž by se změnilo znaménko původního dNBR. Kladné hodnoty RdNBR zůstávají a představují pokles vegetace stejně jako dNBR, zatímco záporné hodnoty představují zvýšení vegetačního krytu. Funkce absolutní hodnoty ve jmenovateli je nutná, protože odmocnina ze záporného čísla matematicky vede k imaginárnímu číslu. Silně záporné hodnoty NBR by znamenaly větší odrazivost v pásmu 7 než v pásmu 4. Tento případ se vyskytuje pouze nad oblastmi, které nejsou porostlé vegetací.

Jestliže oblast není porostlá vegetací, nemůže dojít k požáru, což by mělo za následek nulovou hodnotu v čitateli. Provozně se záporné hodnoty před požárem vyskytují v důsledku šumu snímače, chybné registrace atd. Záporné hodnoty NBR před požárem, které jsou důsledkem šumu snímače a chybné registrace, se však pohybují v rozmezí dvou směrodatných odchylek od průměrné hodnoty nespáleného pixelu. Absolutní funkce má proto za následek zařazení těchto pixelů do kategorie nespálených pixelů na rozdíl od nedefinované kategorie“ (Miller et Thode 2007).

6 Základní informace o studijním území

6.1 Národní park České Švýcarsko

Národní park České Švýcarsko je nejmladší národní park na našem území. Byl vyhlášen k 1. lednu 2000 na ploše téměř 80 km². Při státní hranici s Německem navazuje na Národní park Saské Švýcarsko, vyhlášený již v roce 1990 na ploše 93 km². Lidské zásahy jsou zde omezeny pouze na činnosti, které napomáhají obnovit v co největší míře přirozenou rovnováhu.

Hlavním předmětem ochrany území je pískovcové skalní město s výskytem vzácných druhů živočichů a rostlin a ostrůvky zachovalých původních lesů. Lesy pokrývají téměř celé území národního parku. Většina původních jedlobukových pralesů však v důsledku vysazování jehličnatých monokultur v minulosti zmizela. Poslední přírodě blízké a přírodovědně cenné porosty se dochovaly v nepřístupných roklích a na vysokých skalách. Pro oblast je typický relativně oceánický charakter klimatu (menší teplotní rozdíly v průběhu ročních období, větší množství srážek). Průměrné roční srážky se pohybují okolo 800 mm (Správa Národního parku České Švýcarsko 2010).

6.2 Lesy Národního parku České Švýcarsko

6.2.1 Kulturní lesy

Jedná se převážně o smrkové monokultury, v menší míře uměle založených borových porostů a porostů exotických dřevin. Tyto lesy jsou druhově chudé. Mají jednoduchou věkovou strukturu, jsou tzv. stejnověké. Dospělé porosty, které zde plošně převažují, začínají ztrácet odolnost proti kalamitním druhům podkorního hmyzu (Správa NP České Švýcarsko 2010).

6.2.2 Přejídné lesy

Na hůře dostupných stanovištích a v odlehlých partiích národního parku došlo v posledních desetiletích k útlumu lesnického hospodaření. Tyto porosty místy prořídly působením biotických a abiotických činitelů a začaly postupně podrústat náletem dřevin, v němž převažuje smrk; postupně však přibývají i další druhy. V porostech se vytváří bohatší věková a druhová struktura (Správa NP České Švýcarsko 2010).

6.2.2.1 Přírodě blízké porosty

Fragmenty přírodě blízkých porostů se dochovaly pouze na špatně dostupných stani-
vištích, kterými jsou výchozy skal, skalní a kamenité svahy, soutěsky, či vrchol Růžák
(Správa NP České Švýcarsko 2010).

6.3 Stav území před požárem

V letech 2018 a 2019 na území vypukla kůrovcová kalamita, kterou se správa Národ-
ního parku nejprve aktivně pokoušela zastavit nebo alespoň zpomalit, avšak tato snaha
byla neúspěšná, a to i přes masivní kácení postižených stromů. Těžební aktivity byly
následně ukončeny, neboť jejich pokračování by v kontextu ochrany přírody národ-
ního parku ztratilo opodstatnění. V důsledku toho zůstalo na území významné množ-
ství spadlých či vykácených stromů, což vytvořilo podmínky pro rychlé a masivní ší-
ření požárů (Zpravodaj Správy NP České Švýcarsko 2022).

6.4 Požár a jeho dopady

Požár za sebou zanechal tisíce ohořelých stromů i žárem poškozených skal. Požárem
zasažené suché smrkové monokultury shořely. Během srpna se na čerstvě uhašených
místech objevil první travnatý porost a kapradiny. Břízy i další dřeviny začaly regene-
rovat z kořenových výmladků. Místa s vysokým podílem listnatých dřevin a rašeliniště
zůstala požárem netknuta. Bučiny zafungovaly jako protipožární pásy (Zpravodaj
Správy NP České Švýcarsko 2023).

6.4.1 Hodnocení požáru

Podle modelových analýz lze konstatovat, že v daných podmínkách nebylo možné jed-
noduše zabránit šíření požáru. Hlavní příčinou rychlého šíření požáru byly mimořádně
příznivé atmosférické podmínky – výrazná vysoká rychlost větru, extrémně nízká vlh-
kost dřevní hmoty, lesní hrabanky, vzduchu a půdy, spolu s vysokými teplotami vzdu-
chu v prvních třech dnech po vypuknutí požáru (Hruška et al. 2022).

Kůrovcová situace před vypuknutím požáru vedla k diskusím, zda smrkové porosty
zasažené kůrovcem a odumřelé v jeho důsledku nepříspěly k rychlému rozšíření po-
žáru. Výsledek simulace, ve které byly plochy souší nahrazeny po kůrovcové kalamitě
holinami, jež by vznikly, kdyby došlo k vyklizení veškeré dřevní hmoty, tuto teorii
vyvrátil. Bylo zjištěno, že hoření by na holinách probíhalo s podstatně vyšší rychlostí

a intenzitou. Požár by se pravděpodobně rozšířil i na větší plochu. Z terénní analýzy typu a způsobu hoření je patrné, že holiny byly překvapivě silně zasaženy požárem, a to i přes jejich „vyčištění“. Oheň dokázal překonat všechny typy lesa. Nicméně i v místech s nejvyšší silou hoření zůstala vždy významná část ekosystému ohněm nezasazena (Hruška et al. 2022).

6.4.2 Role vegetačního typu a šíření požáru

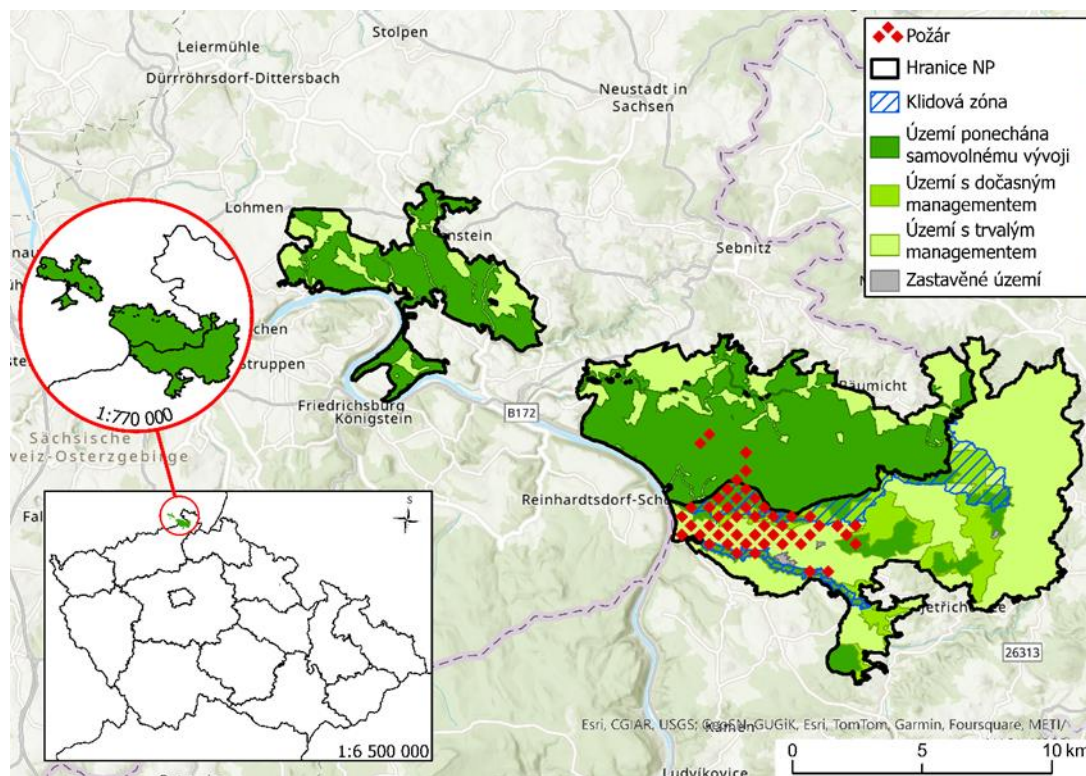
Sílu ohně lze hodnotit na základě míry narušení ekosystému po události, a sice podle stupně a rozsahu shoření dřeva a dalších složek ekosystému. Tato charakteristika bývá označována anglickým pojmem „fire severity“ (Keeley et al. 2009).

Oheň dokázal překonat všechny přítomné vegetační a porostní typy, nejen zralý smrkový les odumřelý po gradaci lýkožrouta smrkového, ale i živý borový les a bukový les, listnaté a jehličnaté mlaziny a vyčištěné holiny. Ve všech porostních a vegetačních typech bylo na některých místech zaznamenáno ožehnutí stromů bez prohoření borky a jen slabé prohoření svrchních organických horizontů. Vyšší stadia síly požáru byla častěji zaznamenána v jehličnatých lesích, zejména v odumřelých smrkových porostech. Požár postihl i holiny a šířil se po korunách stromů, zejména ve svazích. V živých lesích se požár často koncentroval na bázi odumřelých smrků, následně na živé borovice a nejméně často na listnáče. Ležící kmeny a pařezy zafungovaly jako centra hoření a na některých místech způsobily úplné shoření půdních horizontů (Hruška et al. 2022).

7 Metodika

7.1 Studijní území

Pro tuto práci byl vybrán Národní park České Švýcarsko. Podrobnější popis viz kapitola 6.



Obrázek 11: Vlastní vizualizace území a jednotlivých zón Národního parku České Švýcarsko. Data byla poskytnuta Správou NP České Švýcarsko.

7.1.1 Teplotní podmínky před požárem

V České republice bylo léto (červen–srpen) teplotně nadprůměrné. Nejvyšší odchylka byla v červnu, naopak červenec se hodnotil jako teplotně normální. V srpnu panovaly opět nadprůměrné teploty vzduchu. Před vznikem požáru (1.–23. července 2022) bylo celkově 14 dnů, které byly teplotně vyšší, než je normál pro daný den z pohledu maximálních teplot vzduchu. Teploty vzduchu se před a v den vzniku požáru pohybovaly na hranici 25–29 °C (Hruška et al. 2022).

7.2 Použité datové sady

7.2.1 Poskytnutá data

Jako základní referenční data pro stanovení hranice požáru byla použita rastrová data získaná multispektrálním leteckým snímkováním nad zasaženým územím a dvě vektorové vrstvy. První vrstva vyjadřující 100m buffer okolo zájmového území a druhá vrstva značící oblast požářiště. Obě vrstvy jsou ve formátu shapefile. Tato data byla poskytnuta oddělením informatiky a správy GIS, NP České Švýcarsko, na základě e-mailové žádosti.

Vektorová data byla získána z ruční vektorizace nad dostupnými daty z DPZ. Zpracováním se zabývalo oddělení monitoringu NP České Švýcarsko. Snímky byly získány multispektrálním leteckým snímkováním ze dne 2. září 2022 firmou Primis, spol. s r. o., na základě zakázky od Správy Národního parku České Švýcarsko.

Další poskytnuté vektorové vrstvy – Hranice NP v ČR a v Německu – byly taktéž poskytnuty Správou Národního parku České Švýcarsko, a to na základě žádosti. Pro ČR jde o data ve formátu oficiálního zdroje (AOPK ČR) poskytovaná prostřednictvím portálu s územně analytickými podklady a vycházející z centrální správy dat Ústředního seznamu ochrany přírody. Pro německé území data pochází přímo od Správy NLPSS, jedná se o data zonace z r. 2020.

7.2.2 Dostupná data

Snímky SAR

Radarové snímky použité v této práci pochází z webu University of Alaska, konkrétně z platformy Alaska Satellite Facility (ASF): Data search vertex.

Odtud byly stáhnuté dva radarové snímky z dvojího časového období – před a po požáru, ve formátu SLC a ve formátu GRDH. Starší snímek pochází ze dne 5. července 2022, novější snímek je ze dne 3. září 2022.

Optické snímky

Pro stanovení závažnosti požáru byly použité snímky z družice Landsat 8 a Landsat 9, pocházející z webu USGS: Earth Explorer.

Snímky byly pořízené dne 20. července 2022 (Landsat 8) a 29. srpna 2022 (Landsat 9).

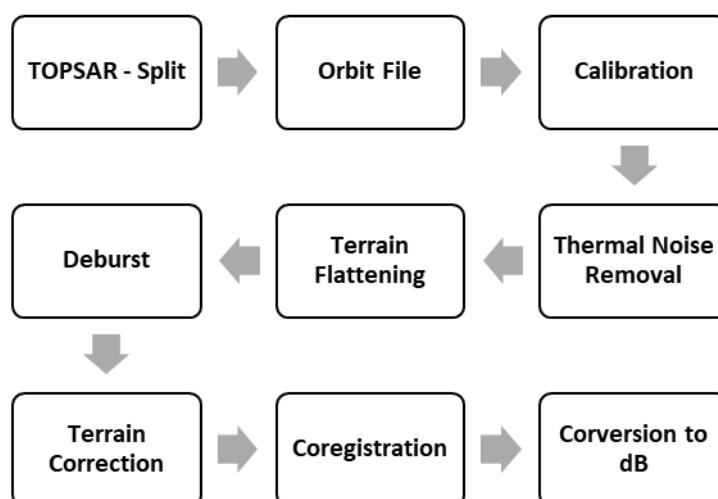
7.3 Předzpracování dat

7.3.1 Předzpracování optických snímků z Landsatu

Pro tuto práci byly vybrány snímky úrovně 2 zpracování dat (tj. bez nutnosti provádění dalších korekcí na snímcích). Oba snímky jsou bezoblačné.

7.3.2 Předzpracování snímků SAR

Radarové snímky byly zpracované podle následujícího postupu (obr. č. 12) v softwaru SNAP od evropské vesmírné agentury ESA. Následující popis jednotlivých funkcí, které zde byly použity, pochází z textů v nápovědě pro software SNAP.



Obrázek 12: Kroky předzpracování snímků SAR.

TOPSAR – Split

Na snímcích ve formátu SLC nelze aplikovat typickou funkci subset, která daný snímek ořízne na vybranou oblast. Proto zde tuto funkci nahrazuje funkce Split, jež slouží k vybrání dílčího řádku snímku, který lze použít jako vstupní produkt do dalších funkcí. Díky této funkci výrazně klesá výpočetní náročnost celého zpracování.

Orbit – File

Oběžné dráhy, jež jsou obsaženy v metadatech každého produktu, jsou často nepřesné. Lze je však upřesnit pomocí přesných souborů orbit, které jsou k dispozici v rádech dní až týdnů po vytvoření produktu. Tato funkce umožňuje stažení přesných informací o poloze a rychlosti satelitu.

Thermal Noise Removal

Slouží k odstranění tepelného šumu, který by mohl zkreslit výsledný zpětný rozptyl a negativně tak ovlivnit výsledky.

Calibration

Cílem kalibrace je získat snímky, u nichž lze hodnoty pixelů přímo vztáhnout k radarovému zpětnému rozptylu scény. Typické zpracování dat SAR, které vytváří snímky 1. úrovně, nezahrnuje radiometrické korekce a přetrvává značné radiometrické zkreslení. Proto je nutné na snímky SAR aplikovat radiometrickou korekci, aby hodnoty pixelů snímků SAR skutečně reprezentovaly radarový zpětný rozptyl odrážejícího se povrchu.

Terrain Flattening

Terénní rozdíly ovlivňují nejen polohu cíle na zemském povrchu, ale také jas radarového návratu, což by mohlo vést k mylným hodnotám zpětného rozptylu. Tato funkce odstraňuje radiometrickou variabilitu spojenou s topografií pomocí algoritmu radiometrické korekce terénu, kdežto radiometrickou variabilitu spojenou s půdním pokryvem ponechává. Korekce probíhá pomocí digitálního modelu reliéfu (DEM).

Deburst

Odstraňuje černé řádky obsažené ve snímcích SLC, které jsou výsledkem způsobu snímání družice a jež vytváří ucelený radarový obraz.

Terrain Correction

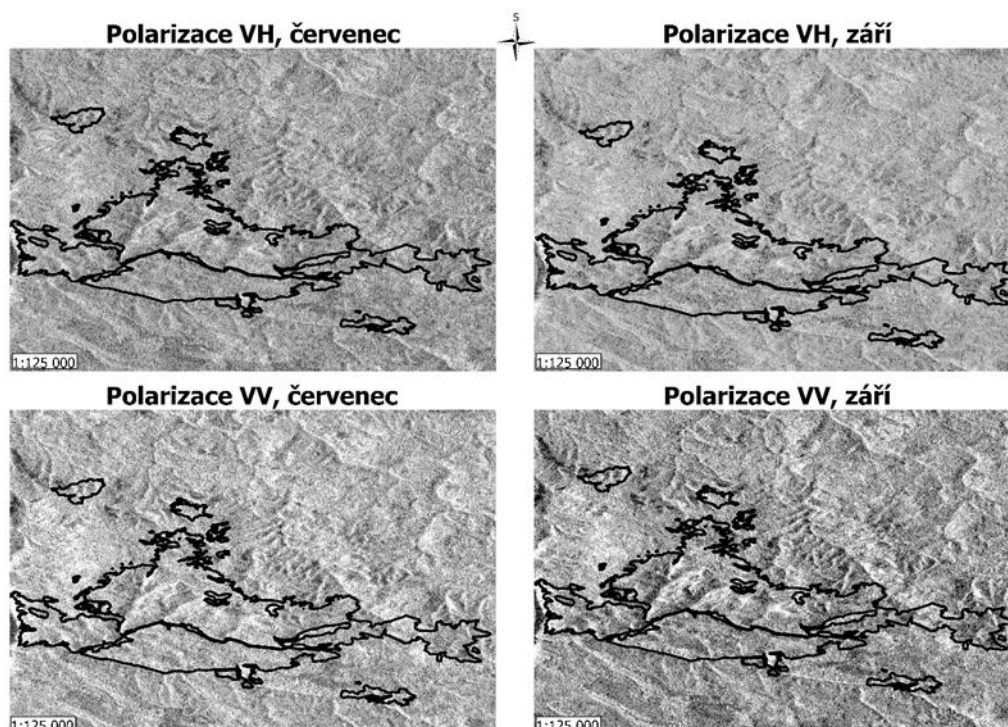
Obrazová data, která nejsou přímo v poloze Nadir senzoru, budou mít určité terénní zkreslení. Účelem této funkce je kompenzovat tato zkreslení tak, aby se geometrická reprezentace snímku co nejvíce blížila skutečnému světu.

Coregistration

Po zpracování snímků bylo nutné kvůli přesnému exportu hodnot zpětného rozptylu oba snímky vzájemně koregistrovat, aby nedocházelo k posunům souřadnic. Teprve poté bylo možné exportovat hodnoty podle bodové vrstvy tak, aby každý bod odpovídal stejným souřadnicím na obou snímcích. Do té doby docházelo k menším nepřesnostem při exportu dat.

Převod na dB

Tato funkce zjednodušuje interpretaci produktů SAR a zlepšuje zobrazení obrazu snížením rozsahu hodnot amplitudy nebo intenzity převodem na hodnotu dB (decibel).



Obrázek 13: Vizualizace jednotlivých polarizací snímků SAR před a po požáru.

7.4 Tvorba přibližné vrstvy závažnosti pomocí spektrálních indexů

Pro zodpovězení vědecké otázky 2. a 3. (zmíněné v kapitole *Cíle práce*) bylo podstatné stanovit závažnost požáru na zasaženém území. Jelikož neexistují data, která by stanovovala závažnost požáru na území NP České Švýcarsko, bylo přistoupeno k metodě stanovení závažnosti podle indexů. Pro zjištění závažnosti požáru byly použité tzv. delty indexů (rozdíly mezi obdobími před požárem a po požáru daného indexu). Pro tuto práci byly vybrány následující indexy.

- Index BAI (Burn Area Index)
- NBR (Normalized Burn Ratio)
- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- RdNBR (Relative differenced Normalized Burn Ratio)

7.4.1 Index NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

$$\Delta NDVI = \text{Postfire NDVI} - \text{Prefire NDVI}$$

Index byl vypočítán v software ArcGIS, a sice podle vzorců uvedených výše.

Hodnoty indexu $\Delta NDVI$ byly rozděleny do pěti kategorií. Byla použita metoda přiřazených zlomů (Jenksova optimalizace), kterou ArcGIS Pro nabízí. Tato metoda je založena na přiřazeném seskupování dat. Identifikuje zlomy tříd, které nejlépe seskupují podobné hodnoty, a maximalizuje rozdíly mezi třídami. Prvky jsou rozděleny do tříd, jejichž hranice jsou nastaveny tam, kde jsou relativně velké rozdíly v hodnotách dat. Kategorie byly následně rozlišeny barvami, podle předpokládané závažnosti spálení (ArcGIS Pro – help).

7.4.2 Index BAI

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - Red)^2 + (0.06 - NIR)^2}$$

$$\Delta BAI = \text{Prefire BAI} - \text{Postfire BAI}$$

Index byl vypočítán v softwaru ArcGIS podle vzorců uvedených výše.

Hodnoty indexu ΔBAI byly opět rozděleny do pěti kategorií. Byla použita metoda přiřazených zlomů (Jenksova optimalizace).

7.4.3 Index NBR

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

$$\Delta NBR = \text{Prefire NBR} - \text{Postfire NBR}$$

Index byl vypočítán v software ArcGIS, podle vzorců uvedených výše.

Tento index byl rozdělen do pěti tříd na základě navržené klasifikační tabulky organizace United States Geological Survey (USGS). Kategorie byly poté rozlišeny barvami s ohledem na předpokládanou závažnost spálení.

7.4.4 Index RdNBR

$$RdNBR = \frac{Prefire\ NBR - Postfire\ NBR}{\sqrt{ABS(Prefire\ \frac{NBR}{1000})}}$$

Stejně jako u předchozích indexů NDVI a BAI, i zde byla použita metoda přirozených zlomů a rozdělení do pěti tříd. U tohoto indexu neexistuje varianta delta jako u předchozích indexů, protože tento index má změnu zakomponovanou přímo ve vzorci.

7.5 Tvorba vrstvy přibližné závažnosti spálení

Pro zodpovězení otázky, zda je schopný radar rozlišit různé stupně závažnosti spálení, bylo nutné vytvořit rastrovou vrstvu interpretující přibližnou závažnost spálení na území NP. Sílu ohně lze hodnotit na základě míry narušení ekosystému po události, a to podle stupně a rozsahu shoření dřeva a dalších složek ekosystému. Tato charakteristika bývá označována, jak již bylo zmíněno výše, pojmem „fire severity“ (Keeley et al. 2009).

Stanovení závažnosti požáru je velmi složitý proces a vyžaduje velké množství zkušeností, vědomostí a rozsáhlý terénní průzkum. Proto bylo v této práci přistoupeno k variantě stanovit přibližnou závažnost požáru pomocí kombinace všech výše uvedených spektrálních indexů.

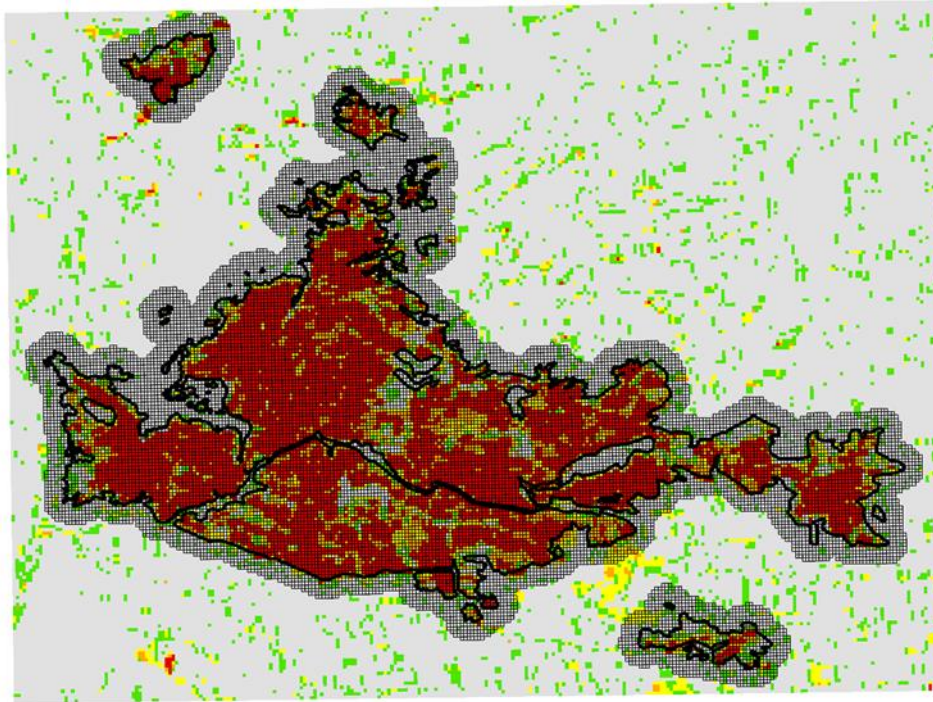
Spektrální indexy (ΔNBR , $\Delta NDVI$, ΔBAI a $RdNBR$) byly za pomoci software ArcGIS Pro nejprve rozděleny do pěti kategorií, jež byly poté reklasifikovány do binárních hodnot (0 = požár zde nebyl zaznamenán, 1 = požár byl zaznamenán) na základě porovnání spektrálních indexů nad dostupnými daty z leteckého snímkování. Následně prostřednictvím funkce „Raster calculator“ v ArcGIS Pro byly všechny vrstvy sečteny. Výsledný rastr tedy nabývá hodnot od 0 (žádný index nedetekoval) do 4 (všechny indexy detekovaly).

7.6 Příprava dat pro statistické vyhodnocení

7.6.1 Tvorba tabulky pro statistickou analýzu

Všechny doposud vytvořené vrstvy (vrstva přibližné závažnosti, spektrální indexy) byly za pomoci funkce Resample v ArcGIS Pro upraveny tak, aby velikost jednotlivých pixelů byla 30×30 m (stejná jako rozlišení Landsat 8 a 9) a aby se jednotlivé vrstvy dokonale překrývaly.

Tato příprava vrstev byla zásadní pro následnou tvorbu mřížky nad výše zmíněnými vrstvami. Díky tomuto předzpracování se dosáhlo toho, že vytvořená mřížka dokonale lemovala hranice všech pixelů. Později byla mřížka upravena tak, aby pokrývala území označené referenční vektorovou hranicí a jeho blízké okolí, díky čemuž se výrazně zmenšilo množství buněk a dosáhlo se menší výpočetní náročnosti (viz obr. č. 14).



Obrázek 14: Upravená mřížka pro snížení náročnosti výpočtu pokrývající zasažené území včetně jeho přilehlého okolí. Velikost jednoho pixelu mřížky je 30 × 30 m.

Do takto připravené mřížky bylo s pomocí funkce „Zonal Statistics as Table“ importovány hodnoty všech používaných vrstev, včetně hodnot zpětného rozptylu ve formátu dB z radarových snímků Sentinelu 1 (polarizace VV, VH, VV/VH) před požárem a po požáru. Vytvořená tabulka čítá cca 21 tisíc pozorování a byla použita pro následující statistickou analýzu (obr. č. 15)

PageNumber	PageName	Závalnost	dNBR	rdNBR	dNDVI	dBAI	VH_july	VV_july	VV/VH_july	VV_september	VH_september	VV/VH_september	dVH	dVV	dVV/VH
339	B53	1	0,106028	5,791281	-0,10409	-1,80E-09	-18,834569	-12,8161	0,68045624	-8,627996	-17,072766	0,505366031	1,761803	4,188104	-0,175090208
340	B54	1	-0,028221	2,890678	-0,04236	-7,37E-10	-13,50657	-7,277276	0,539228811	-8,608459	-13,851757	0,621470547	-0,255187	-1,331183	0,086241736
341	B55	0	0,084214	3,218611	-0,04372	-6,56E-10	-12,374092	-4,822942	0,389761285	-8,036209	-10,431285	0,770394923	1,942807	-3,212627	0,380633637
342	B56	0	0,044279	2,900868	-0,0521	-7,77E-10	-11,754634	-5,111318	0,434844296	-5,527601	-11,676626	0,473390238	0,078008	-0,416283	0,038535562
343	B59	0	0,06113	3,730101	-0,03489	-6,05E-10	-15,295069	-8,848383	0,578512134	-4,330509	-20,414939	0,21528878	-5,11987	4,522874	-0,36653555
344	B60	0	0,107127	7,780823	-0,03541	-7,05E-10	-17,531542	-8,857101	0,277049275	-6,497833	-16,05874	0,404629068	1,672802	-1,640732	0,127529793
347	B61	0	0,024111	1,123475	-0,02444	-3,85E-10	-15,028945	-9,661286	0,64845256	-11,556073	-12,722586	0,908311644	2,306359	-1,894787	0,265466387
348	B62	0	0,070156	1,437955	-0,05188	-6,32E-10	-15,477579	-10,196538	0,658794118	-12,103733	-16,262525	0,744721446	-0,784946	-1,907195	0,085477329
623	C51	1	0,043325	3,841495	-0,08827	-1,78E-09	-11,15483	-9,429601	0,845337939	-8,178576	-13,246676	0,617254925	-2,091846	1,253025	-0,228083014
624	C52	1	0,08699	5,925141	-0,11617	-1,88E-09	-10,833805	-2,842555	0,316266356	-5,390683	-14,469427	0,372556771	-3,637622	-3,048128	0,156290415
625	C53	1	0,06138	4,035438	-0,08497	-1,53E-09	-13,407535	-8,384691	0,625371554	-9,478071	-15,407349	0,615035786	-1,999814	-1,09138	-0,010335768
626	C54	0	-0,052458	2,401715	-0,05578	-1,11E-09	-11,209997	-9,408456	0,831693943	-9,097773	-13,519463	0,672938933	-2,709466	0,308681	-0,15875501
627	C55	0	0,041231	2,75285	-0,05238	-8,66E-10	-10,201045	-5,1753	0,507330376	-5,438451	-12,323071	0,441322703	-2,122026	-0,263151	-0,066027474
628	C56	0	0,031291	1,840661	-0,04588	-6,30E-10	-11,244233	-8,221602	0,731838888	-9,112393	-12,51892	0,727889706	-1,274687	-0,890791	-0,003294182
629	C57	0	0,008433	0,757448	-0,02788	-6,27E-10	-14,202063	-11,913962	0,838889533	-10,340012	-18,369342	0,562895067	-4,167279	1,577395	-0,275994466
630	C58	0	0,000118	4,934465	-0,01568	-5,20E-10	-23,845818	10,419272	0,436943	-14,067898	-21,221652	0,662903058	2,624186	-3,648626	0,225960057
631	C59	0	0,000118	0,008516	-0,01566	-5,45E-10	-18,004559	-14,842308	0,824363874	-13,615945	-17,564497	0,775196978	0,400602	1,226363	-0,049166895
632	C60	0	0,050983	4,338988	-0,06017	-1,07E-09	-10,389639	-6,928801	0,6362746028	-7,912419	-15,919917	0,497013845	-5,080378	-0,983818	-0,139360796
633	C61	0	0,021536	7,13634	-0,06672	-9,61E-10	-11,348263	-2,762277	0,243409674	-5,836203	-13,81365	0,422495358	-2,465387	-3,073926	0,179085684
634	C62	0	0,089811	4,525778	-0,08275	-9,66E-10	-14,578108	-8,883888	0,609330648	-6,215625	-12,444876	0,499452546	2,133232	2,667263	-0,109878103
635	C63	0	0,078225	4,866198	-0,07262	-1,07E-09	-16,61459	-9,066897	0,545718974	-8,022381	-15,41773	0,52033477	1,19686	1,044516	-0,025384203
636	C64	1	0,15149	1,111014	-0,10126	-1,39E-09	-14,410828	10,367602	0,719431389	-11,744753	-17,134489	0,685445186	-2,723661	-1,377151	-0,033986203
905	D47	0	0,039907	3,159508	-0,03955	-6,06E-10	-13,227072	-7,504725	0,567376136	-5,538941	-15,211796	0,364121436	-1,984724	1,965784	-0,2032547
906	D48	0	0,035957	1,418999	-0,04133	-6,24E-10	-12,510602	-8,979631	0,717761703	-8,012347	-11,882469	0,674299845	0,628133	0,967284	-0,043461859
907	D49	0	0,044949	-0,094052	-0,05137	-7,24E-10	-12,996822	-9,140571	0,703292774	-10,014723	-11,229569	0,891818808	1,767273	-0,874152	-0,188526013

Obrázek 15: Náhled tabulky se všemi hodnotami z každé vrstvy pro každý pixel.

7.7 Statistické metody

Ke statistickému zpracování byly použity vybrané metody vícerozměrné analýzy dat. Stručný popis těchto metod je uveden níže, podrobnější popis lze nalézt např. v publikaci autorů Meloun et al. 2005 – *Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech*.

7.7.1 Analýza hlavních komponent

Tato metoda transformuje původní měřené proměnné do nové ortogonální (pravoúhlé) soustavy souřadnic, ve které jsou nové proměnné již nekorelované. Slouží jednak k získání nekorelovaných proměnných, jednak k případné redukci dimenze. Je založena na spektrálním rozkladu (respektive vlastních vektorech) kovarianční matice původních proměnných.

7.7.2 Logistická regrese

Patří mezi tzv. zobecněné lineární regresní modely. Vysvětlující proměnné jsou opět spojité (nebo kategoriální) veličiny a vysvětlovaná proměnná je binární veličina.

7.7.3 Diskriminační analýza

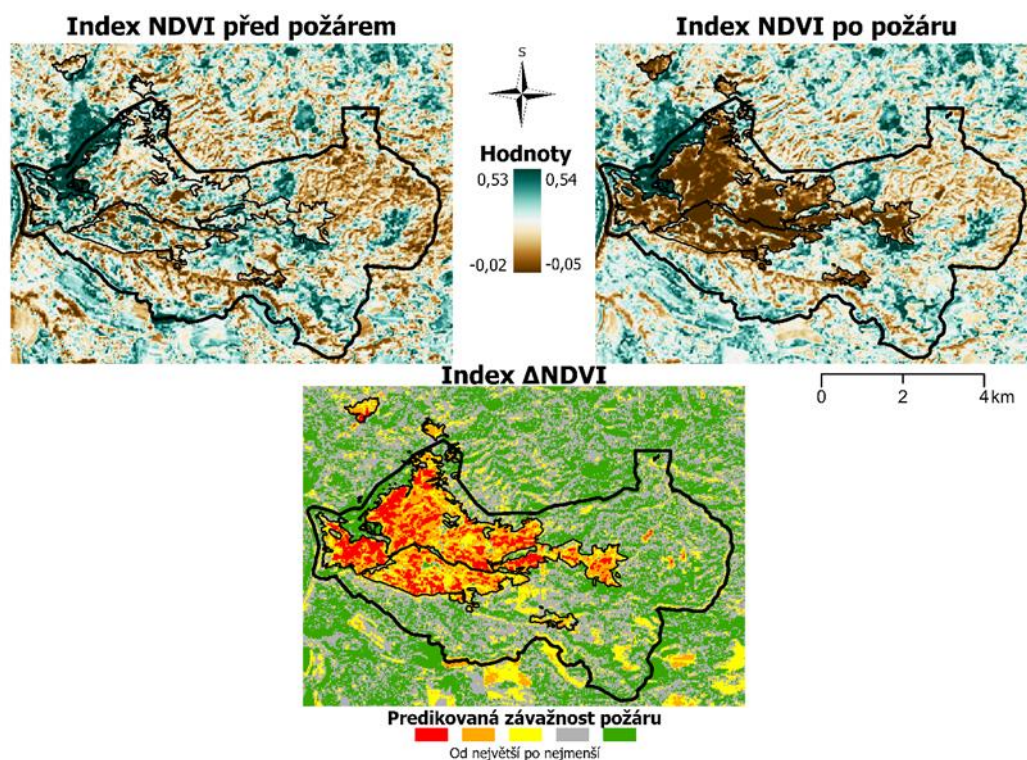
Analýza sloužící ke klasifikaci objektů do kategorií na základě měřených spojitých veličin. Jejím smyslem je se na tzv. trénovací sadě dat naučit najít diskriminační funkci, která svými hodnotami nejlépe odděluje jednotlivé klasifikační třídy. Mezi základní diskriminační funkce patří lineární a kvadratická diskriminační funkce.

8 Výsledky

8.1 Spektrální indexy

8.1.1 Index NDVI

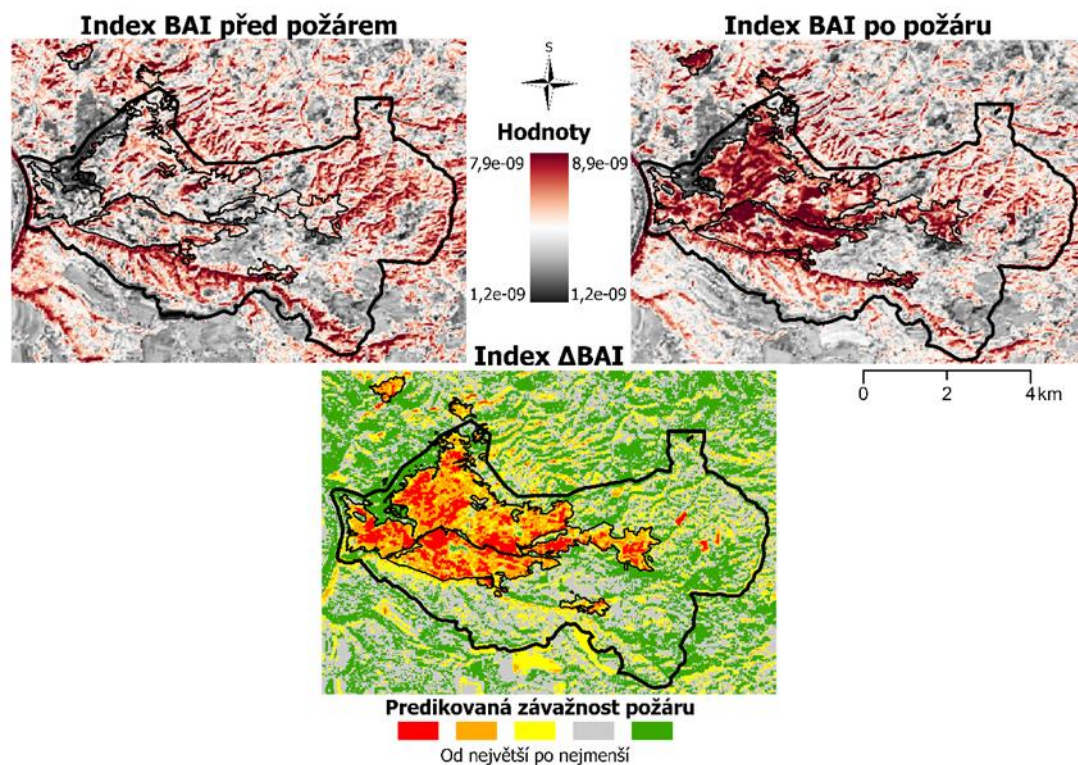
Na níže uvedené vizualizaci indexu NDVI (obr. č. 16) lze identifikovat výrazné poklesy hodnot k nule a do lehce záporných hodnot na mnoho lokalitách. Na snímku po požáru je již velmi zřetelný pokles hodnot NDVI.



Obrázek 16: Vizualizace indexu NDVI před požárem a po požáru a rozdílový snímek dNDVI.

8.1.2 Index BAI

Červené oblasti na níže uvedené vizualizaci indexu BAI na předpožárním snímku signalizují oblasti, kde vegetace vykazuje známky poškození (obr. č. 17). Po požáru je opět zřetelně vidět navýšení hodnot v oblastech postižených ohněm, což naznačuje výrazně poškozenou nebo zničenou vegetaci.

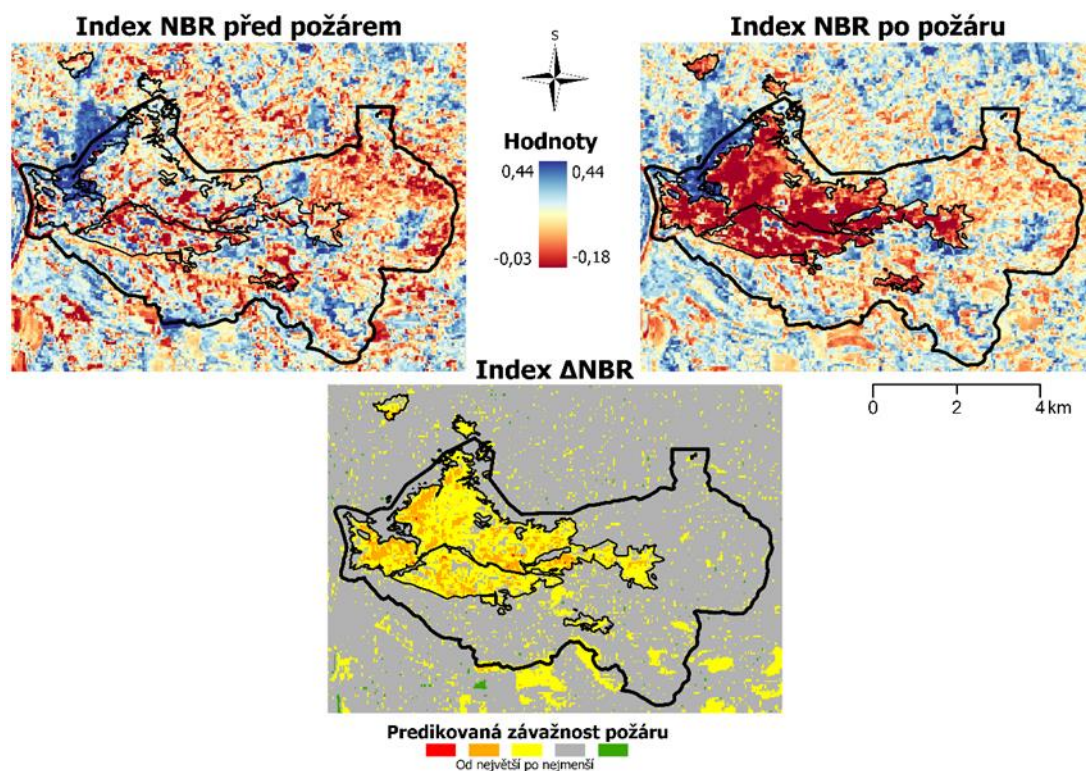


Obrázek 17: Vizualizace indexu BAI před požárem a po požáru a rozdílový snímek Δ BAI.

8.1.3 Index NBR

Vysoké (kladné) hodnoty NBR značí zdravou vegetaci, zatímco nízké hodnoty značí holou půdu nebo nedávno vypálené oblasti (©UN-SPIDER). Na snímku před požárem je zřetelně vidět, že vegetace na některých místech vykazuje známky poškození a špatného zdravotního stavu porostu.

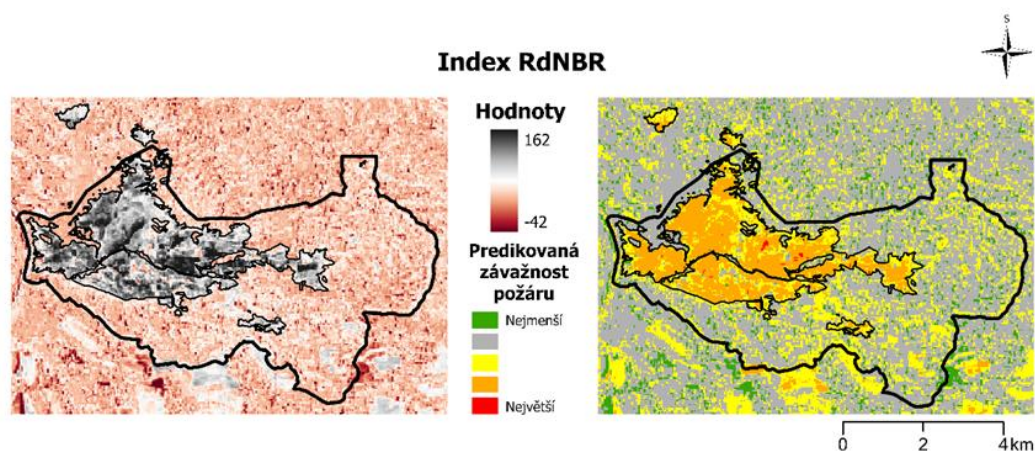
Velmi výrazně se projevují i holiny. Na snímcích po požáru je opět vidět poměrně markantní nárůst zasažených ploch. Rozdílový snímek – index Δ NBR – byl klasifikován na základě referenční tabulky. Podle této klasifikace vychází požár na našem území jako méně závažný (viz obr. 18).



Obrázek 18: Vizualizace indexu NBR před požárem a po požáru a rozdílový snímek dNBR.

8.1.4 Index RdNBR

Tento index je ve své podstatě už sám rozdílovým snímkem, protože má rozdíl indexu NBR implementován ve svém vzorci. Kladné hodnoty RdNBR představují pokles vegetace stejně jako u indexu NBR, kdežto záporné hodnoty představují zvýšení vegetačního krytu. Na obr. č. 19 je patrný enormní nárůst zasažených ploch požárem. Snímek predikované závažnosti se stejně jako předchozí index NBR pohybuje ve středních a mírných hodnotách. V porovnání s indexem NBR má index RdNBR vyšší nárůst pixelů pro oblasti klasifikované jako vysoká závažnost.

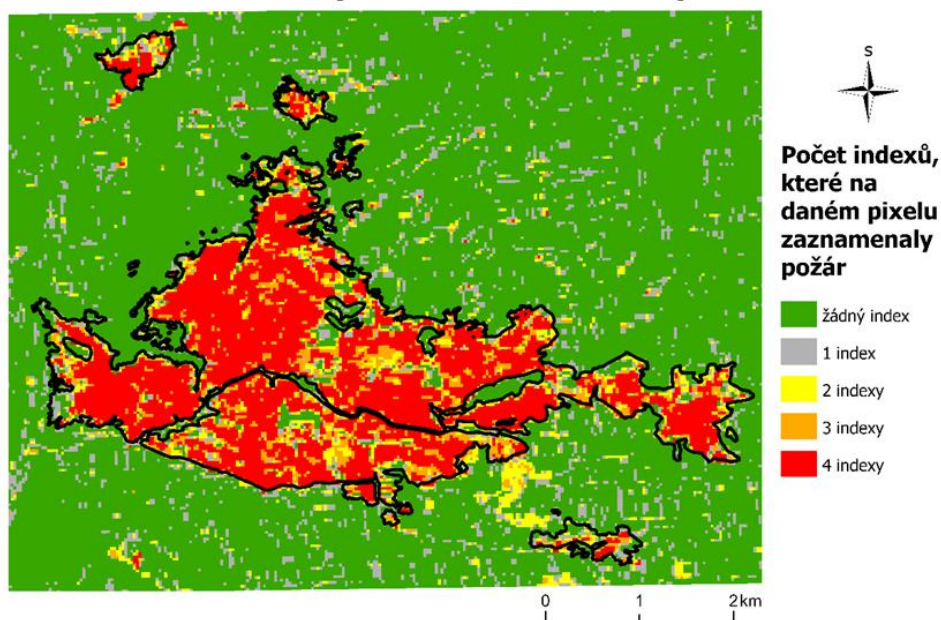


Obrázek 19: Vizualizace indexu RdNBR.

8.2 Stanovení závažnosti

Je-li na daném pixelu požár zaznamenán třemi až čtyřmi spektrálními indexy, je předpokládáno, že na tomto místě byla vysoká až středně vysoká závažnost požáru (na vizualizaci se jedná o červené a oranžové oblasti). Žlutá barva značí, že na daném pixelu zaznamenaly požár jen dva ze čtyř indexů, a je tedy předpokládáno, že požár byl středně až mírně závažný. Šedé pixely značí oblasti, kde požár zaznamenal pouze jeden ze čtyř indexů, a jedná se tudíž spíše o žádnou nebo mírnou závažnost požáru. Zelené pixely značí oblasti, kde požár nezaznamenal žádný z použitých spektrálních indexů, a lze proto předpokládat, že se požár na těchto místech nevyskytl.

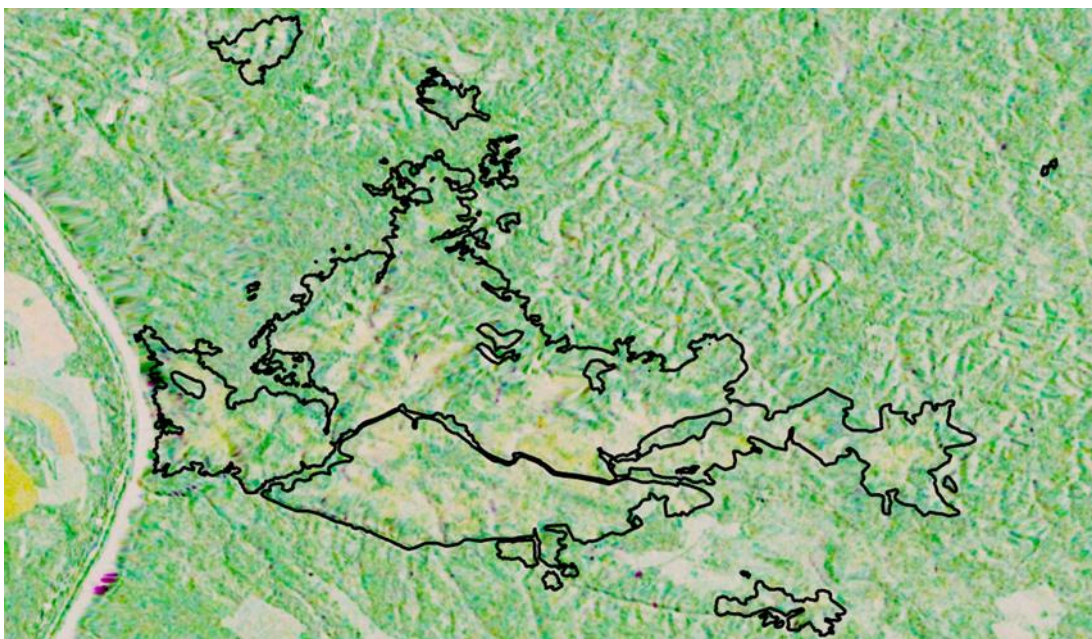
Stanovení přibližné závažnosti požáru



Obrázek 20: Stanovení přibližné závažnosti požáru na základě spektrálních indexů.

8.3 Radar

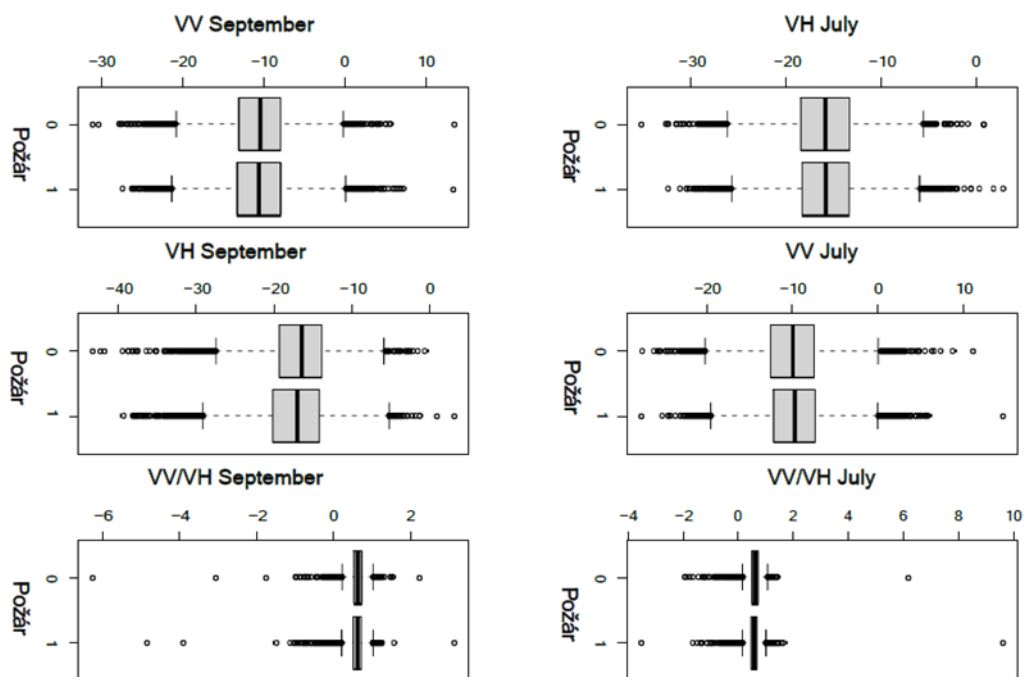
Před samotnou statistickou analýzou hodnot zpětného rozptylu radaru bylo nejprve přistoupeno k vizualizaci radarových snímků do RGB kompozitu. Na tomto kompozitu (viz obr. č. 21) je zjevné, že na území došlo ke změnám – jedná se hlavně o světlé bíložluté oblasti na obrázku uvnitř požářiště. Z této vizualizace lze usuzovat, že radar dokázal zachytit změny na velké části zasaženého území, ke kterým došlo v souvislosti s požárem.



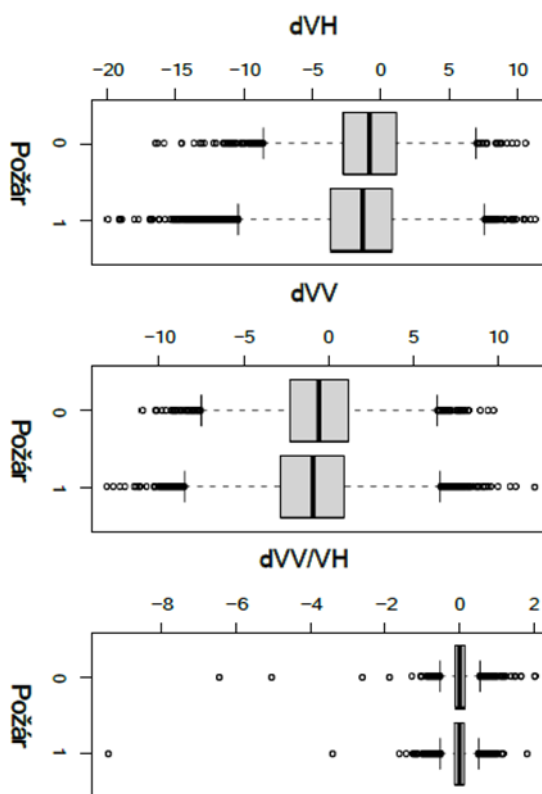
Obrázek 21: Vizualizace RGB kompozitu vytvořeného za pomoci radarových polarizací VH – před a po požáru a polarizací VV – po požáru.

8.4 Statistická analýza zpětného rozptylu

Data z tabulky, konkrétně průměry hodnot zpětného rozptylu byly nejprve vizualizovány v podobě boxplotů (obr. č. 22 a 23). Boxploty nicméně nevykazují žádné známky signifikantní změny. Boxploty pro mediány hodnot zpětného rozptylu vypadají tožně – opět nevykazují žádnou změnu.



Obrázek 22: Sloupec vlevo – boxploty jednotlivých polarizací pro snímky po požáru. Sloupec vpravo – boxploty jednotlivých polarizací pro snímky před požárem. 0 = nebyl požár zaznamenán, 1 = požár byl zaznamenán.



Obrázek 23: Boxploty rozdílů mezi snímky před požárem a po požáru pro jednotlivé polarizace. 0 = nebyl požár zaznamenán, 1 = požár byl zaznamenán.

Přestože výsledky boxplotů neprokázaly, že by se hodnoty zpětného rozptylu lišily v závislosti na přítomnosti požáru, byla data podrobena další analýze, při níž se zkoumalo, zda se zasažené a nezasažené lokality signifikantně liší ve středních hodnotách sledovaných veličin. Z důvodu signifikantní ne-normality výběrů byl použit neparametrický test (neparametrická verze vícerozměrného dvou výběrového t-testu). Výsledky (p-hodnoty) testu shody mediánů pro jednotlivé veličiny lze nalézt v tabulce č. 2. Jak je z p-hodnot patrné, místa zasažená požárem se signifikantně odlišují ve zpětném rozptylu od oblastí, kde požár zaznamenán nebyl.

Veličina	VH_july	VV_july	VV_september	VH_september
p-hodnota	1.653422e-08	2.507461e-03	5.534322e-31	1.308985e-89

Tabulka 2: P-hodnoty neparametrického testu shody mediánu zpětného rozptylu SAR.

Následně byla na data aplikována logistická regrese a diskriminační analýza za účelem klasifikace lokalit podle toho, zda se zde nacházel požár či nikoli. Vysvětlujícími veličinami byly VV_july, VH_july, VV_sept a VH_sept, klasifikovalo se do skupin „lokalita nezasažená požárem“ a „lokalita zasažená požárem“ (jednalo se o oblasti,

kde byla na základě stanovení přibližné závažnosti požárů pomocí spektrálních indexů vyhodnocena přítomnost či nepřítomnost požáru).

Vzhledem k silné korelovanosti jednotlivých měřených veličin byla před klasifikací na data aplikována analýza hlavních komponent.

Navzdory signifikantní odlišnosti středních hodnot v obou skupinách se použitým klasifikačním metodám nepodařilo najít vhodný klasifikátor, který by byl schopen spolehlivě, na základě naměřených veličin, predikovat přítomnost požáru.

Jako míra kvality bylo u logistické regrese použito McFaddenovo R² (McFadden 1974) Čím blíže je číslo jedničky, tím lépe logistický model „fituje“ data. V tomto případě byl tento koeficient pouhých 0,0226.

Druhou metodou použitou pro klasifikaci lokalit byla diskriminační analýza. Zvolena byla kvadratická diskriminační funkce, jako kritérium kvality klasifikace byla zvolena tzv. confusion matrix (matice záměn) a celková přesnost modelu (overall accuracy).

Celková přesnost se pohybovala pouze kolem 52 %, přičemž obě skupiny byly v trénovací množině dostatečně zastoupeny. Samotná klasifikace se pak mýlila v klasifikování obou dvou skupin poměrně často a výrazně (70 % lokalit bez požáru bylo chybně predikováno jako s požárem a 23 % lokalit s požárem bylo chybně klasifikováno jako bez požáru, viz tabulka č. 3).

	Predikce – lokalita bez požáru	Predikce – lokalita s požárem
Skutečnost – lokalita bez požáru	0,293	0,707
Skutečnost – lokalita s požárem	0,231	0,769

Tabulka 3: Přesnost klasifikace diskriminační analýzy pro mediány hodnot zpětného rozptylu SAR.

Statisticky nebylo potvrzeno, že by radar správně reagoval na oblasti, kde požár byl detekován, a na oblasti, kde požár nebyl detekován, tudíž nelze statistickou analýzou dokázat, že radar dokáže detekovat požár. Z těchto výsledků vyplývá i neschopnost detekce míry závažnosti spálení.

9 Diskuse

9.1 Zhodnocení spektrálních indexů

9.1.1 Index NDVI

Pokles hodnot k nule a do lehce záporných hodnot na mnoha lokalitách může mít přímou souvislost s faktem, že požárem zasažené území bylo už před vypuknutím požáru v poměrně nezdravém stavu. Je zde patrná přímá souvislost s kůrovcovou kalamitou, dlouhotrvajícím suchem a vysokými teplotami, kterým bylo území NP vystaveno už dlouhou dobu před vypuknutím požáru.

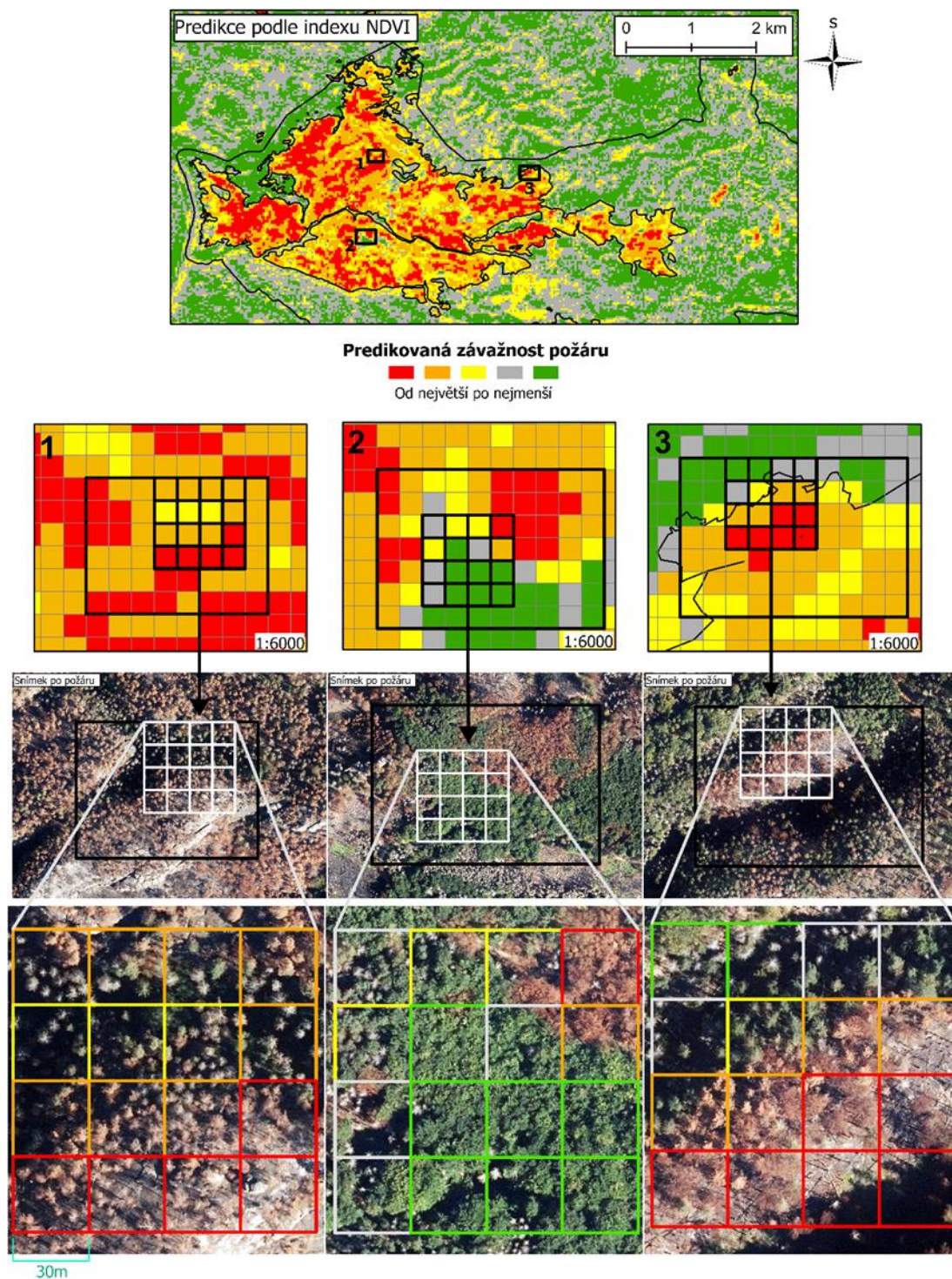
Při srovnání hodnot indexu dNDVI na leteckých snímcích (viz obr. č. 24) je evidentní vysoká citlivost indexu na vegetaci. Všechny tři vytipované oblasti jasně ukazují, že přítomnost zelené vegetace v pixelech výrazně snižuje predikovanou závažnost. Zároveň je patrné, že index NDVI projevuje obtíže při posuzování závažnosti na místech s výrazně suchými porosty. Tato místa jsou bez ohledu na přítomnost požáru interpretována jako oblasti se střední až vysokou závažností.

9.1.2 Index BAI

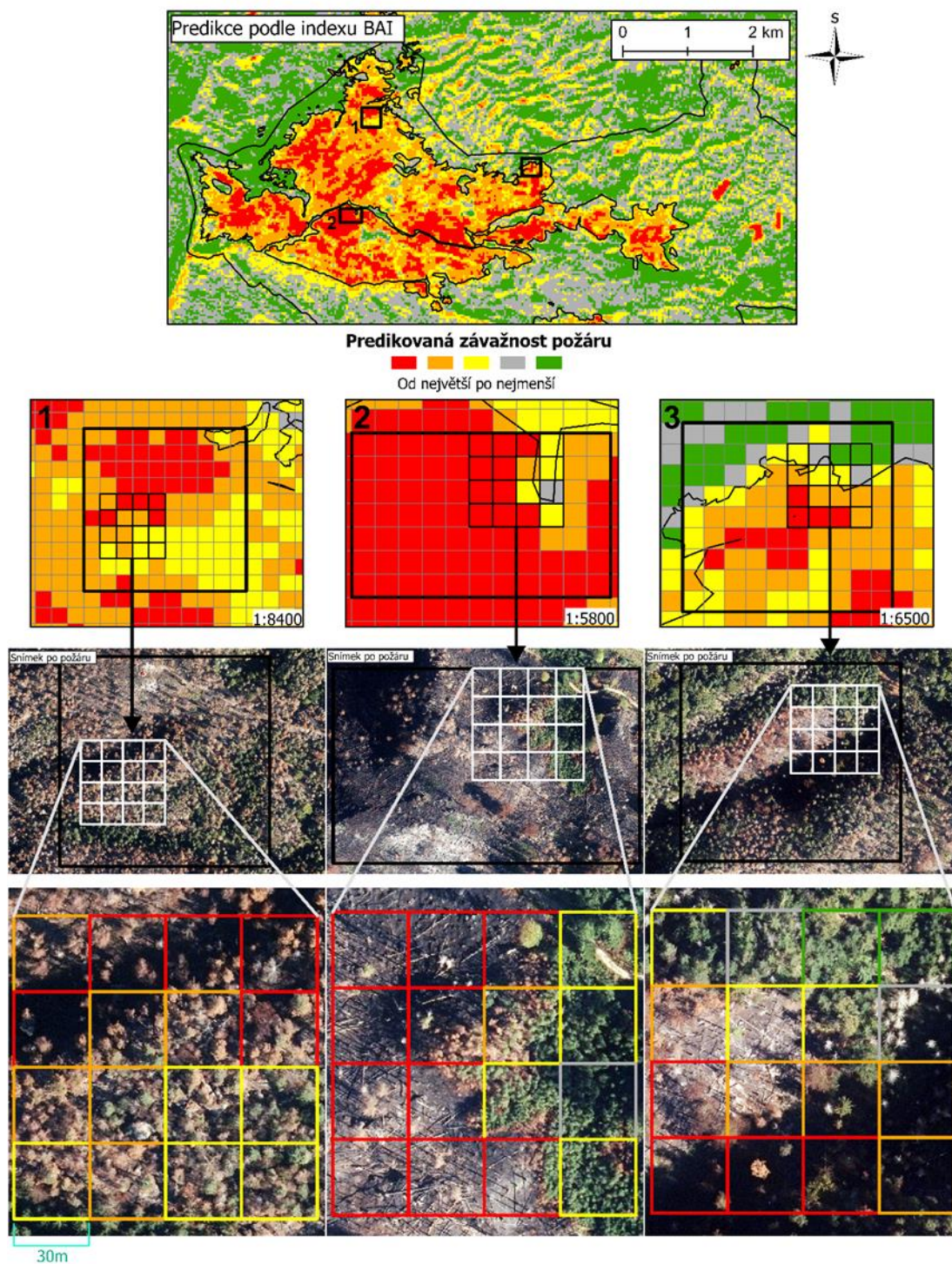
Index BAI, podobně jako index NDVI, využívá blízké infračervené a červené oblasti optického spektra. Z toho důvodu lze očekávat, že bude stejně jako NDVI vykazovat vysokou citlivost k vegetaci a jejímu zdravotnímu stavu. Je zde předpokládáno, že červené oblasti na předpožárním snímku (viz obr. č. 17) mohou signalizovat místa, kde byla vegetace výrazně ovlivněna kůrovcovou kalamitou, dlouhotrvajícím obdobím sucha a vysokými teplotami.

Při srovnání hodnot indexu dBAI na leteckých snímcích (viz obr. č. 25) lze zaznamenat, že – na rozdíl od indexu NDVI, který využívá stejné spektrum – projevuje BAI nižší citlivost na zelenou vegetaci. Konkrétně je patrné, že přítomnost zelené vegetace spolu s vizuálně suchou vegetací v některých pixelech nemá tak markantní dopad na predikovanou závažnost, jak je tomu u indexu NDVI (viz druhá vytipovaná oblast v obr. č. 25). V této souvislosti lze tedy konstatovat, že index BAI je méně citlivý. Taktéž lze uvést, že projevuje menší citlivost i na oblasti, kde se vyskytují pouze suché stromy, jak ilustruje první vytipovaná oblast. Zde je predikovaná závažnost poměrně náhodná a index není schopen adekvátně reagovat na suchou vegetaci. V druhé části byly holiny relativně přesně detekovány, avšak ve třetí oblasti není detekce holin tak

jednoznačná, jako byla v předchozím případě. Index BAI se tedy neprojevuje příliš jednoznačně ani v těchto oblastech.



Obrázek 24: Vizualizace indexu dNDVI u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.



Obrázek 25: Vizualizace indexu dBAI u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.

9.1.3 Index NBR

Vysoké (kladné) hodnoty NBR značí zdravou vegetaci, zatímco nízké hodnoty značí holou půdu nebo nedávno vypálené oblasti (©UN-SPIDER).

Při analýze indexu NBR na základě leteckých snímků (viz obr. č. 26) lze konstatovat, že problém s detekcí pro oblasti se suchou vegetací přetrvává. Problémy se však výrazně projevují také v oblastech holin a vypálených ploch.

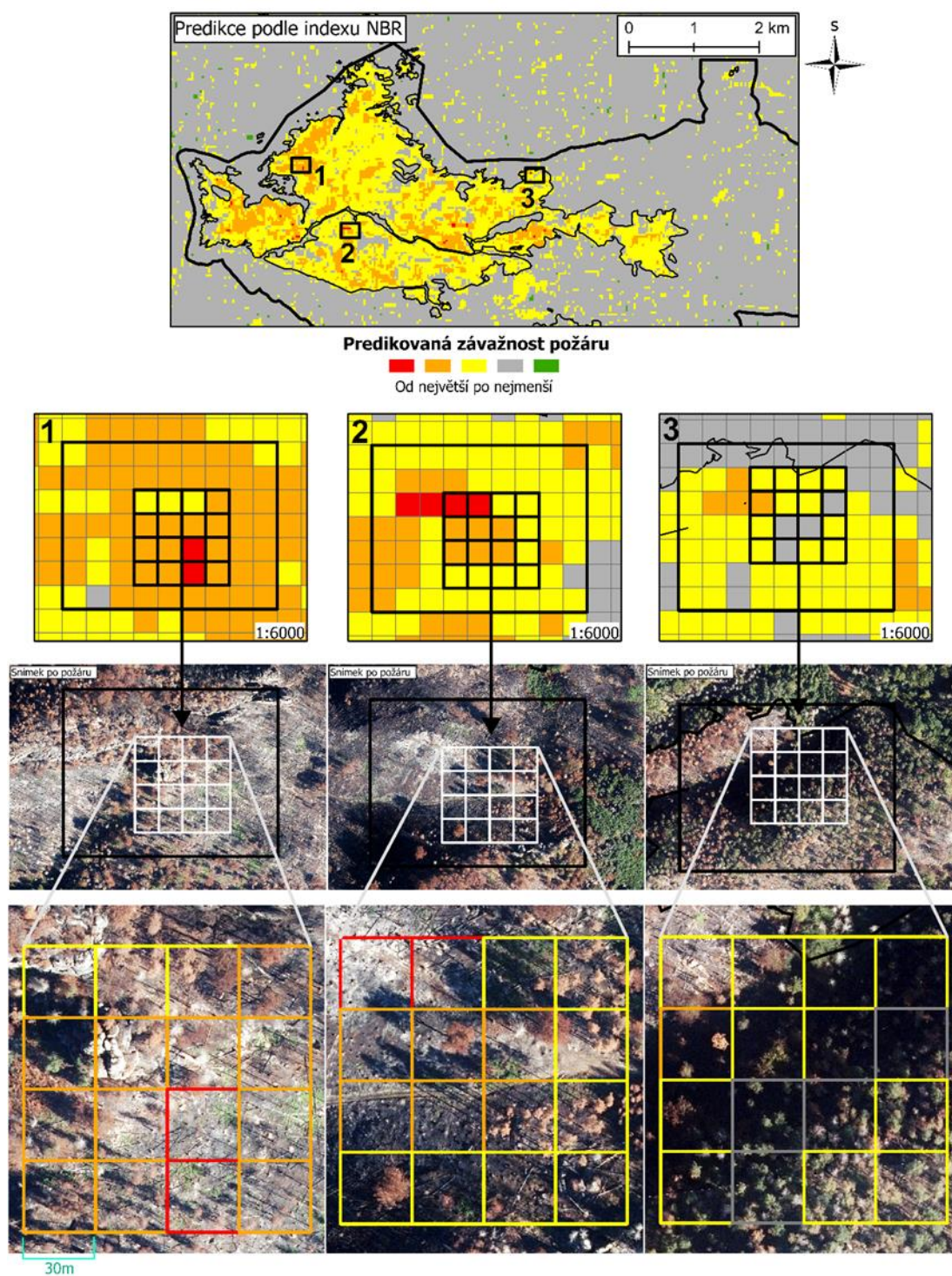
V první podoblasti jsou na snímcích pozorovatelné subtilní projevy zelené vegetace, nicméně i přes tyto projevy jsou příslušné pixely klasifikovány jako středně až silně závažné. V třetí podoblasti je patrné, že index přiřazuje stejnou hodnotu pro evidentně vypálený pixel a pixel s přetrvávající vegetací. V případě holin ve druhé podoblasti je pozorovatelné, že přítomnost popela na pixelech zvyšuje predikovanou závažnost. Ve třetí podoblasti bylo relativně možné odlišit pás zachovalého lesa od pásu lesa suššího.

Nicméně, pro účely detekce požáru není tato odlišnost zcela informativní, a to i vzhledem ke skutečnosti, že na většině území převažoval suchý smrkový les. Lze tedy prohlásit, že index není příliš schopný, stejně jako předchozí dva indexy, spolehlivě odlišit suchý les od spáleniště, což je při detekci požáru na tomto území poměrně výrazným omezením.

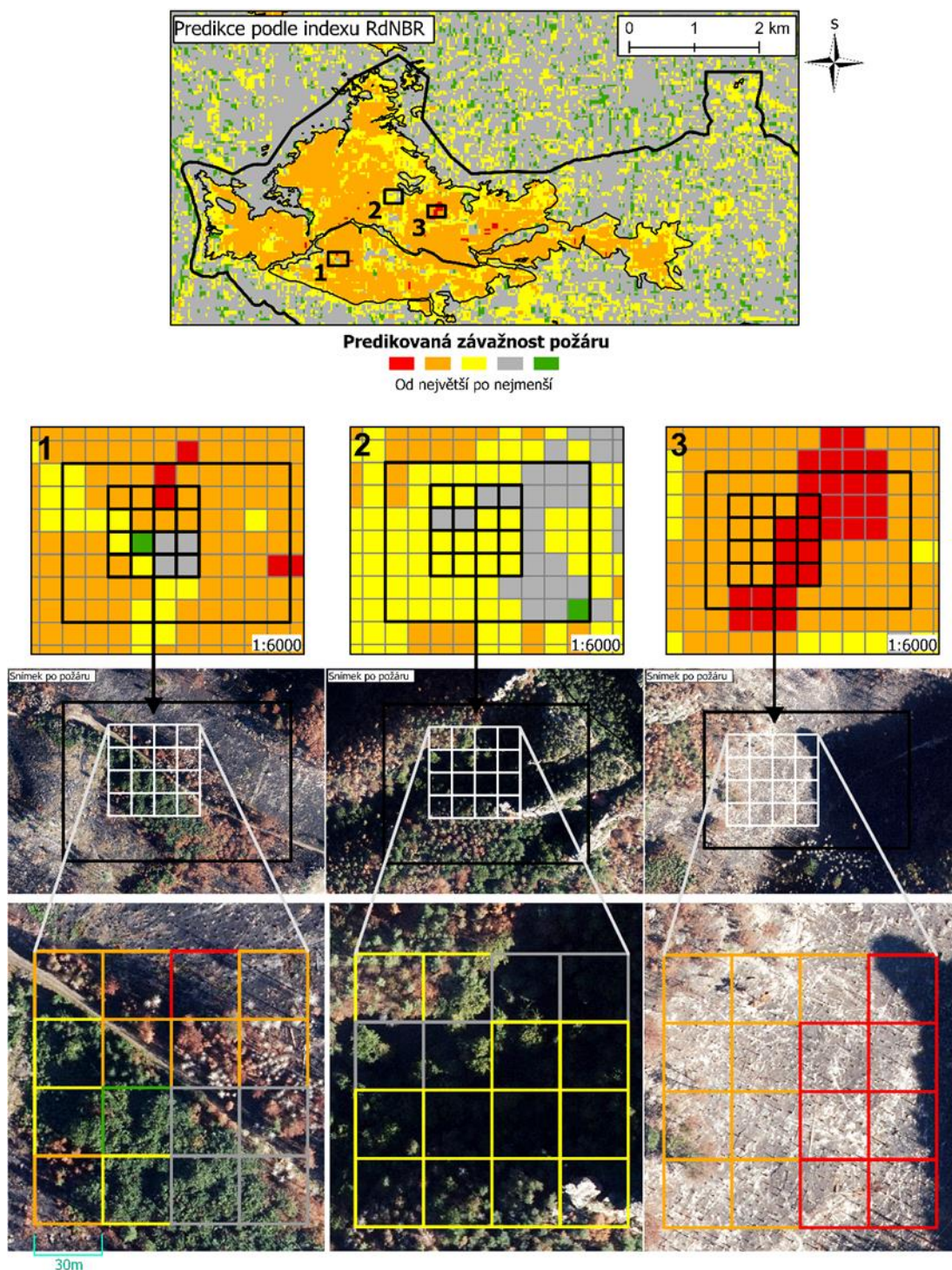
9.1.4 Index RdNBR

Při srovnání s leteckými snímky (viz obr. č. 27) se jeví detekce různých závažností poměrně chaotickou. Již v první podoblasti je patrné, že i přes zjevně zdravý a zelený les na pixelu index ne vždy správně zařadí daný pixel do odpovídající kategorie. Tato nedokonalost je pozorovatelná i v případě druhé podoblasti, kde je opět zdravý les interpretován velmi nepřesně.

Zvláště zajímavá je detekce pixelů na holině ve třetí podoblasti, kde index přiřadil pixely do kategorií středně a silně závažné, což je správné, nicméně není zde patrný důvod, proč je téže holina interpretována dvěma způsoby. Celkově lze konstatovat, že index vykazuje výrazně proměnlivé výsledky při predikci závažnosti ve srovnání s třemi předchozími indexy.



Obrázek 26: Vizualizace indexu dNBR u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.



Obrázek 27: Vizualizace indexu RdNBR u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.

9.1.5 Shrnutí

Všechny použité indexy v této práci se potýkaly se stejným problémovým faktorem. Tímto faktorem byl stav zasaženého území před vypuknutím požáru, konkrétně kůrovcová kalamita, která vedla k velkému úhynu a poškození smrkových lesů, které se

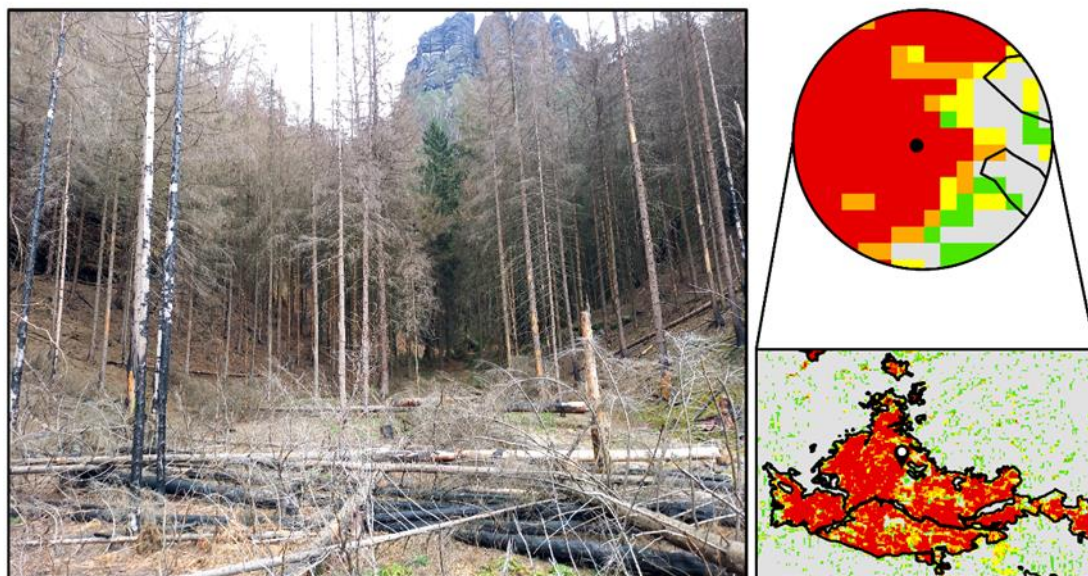
vyskytovaly na většině území. V souvislosti s tím vzniklo mnoho holin a zůstalo zde mnoho suchých a odumřelých stromů, jež povětšinou nebyly odstraňovány kvůli povaze Národního parku. V dosavadních studiích, které zkoumaly využití těchto indexů v souvislosti s hodnocením závažnosti spálení, nebyl tento faktor přítomen. Suché stromy způsobovaly, že byly indexy mylně vyhodnocovány jako střední nebo vyšší závažnost spálení. Tento problém se týkal jak vegetačních indexů, tak i požárních indexů. Nicméně vegetační indexy využívající pásma NIR a Red byly postihovány více.

Dalším problémovým faktorem bylo samotné rozlišení družice Landsat 8 a 9. Pixely o velikosti 30×30 m často způsobovaly mylné a chaotické hodnocení závažnosti v pixelech, které obsahovaly například jak zelené stromy, tak i očividně spálenou holinu. Pro tuto práci byly uvažovány ještě snímky ze Sentinelu-2 s lepším prostorovým rozlišením, které by mohly přinést lepší a přesnější výsledky spektrálních indexů. Avšak pro toto území nebyly dostupné, a proto bylo nakonec přistoupeno ke snímkům z družice Landsat 8 a 9.

Indexy dNDVI a dBAI nejsou tak často využívány, jako je index dNBR. dNBR je v literatuře známý a má i svou vlastní klasifikační tabulku. To bohužel neplatí pro indexy dNDVI a dBAI, které žádnou oficiální klasifikaci nemají a v této práci byly klasifikovány do pěti tříd pomocí metody přirozených zlomů. Tato metoda je pro povahu těchto dat vhodná, nicméně i to může přinést jisté zkreslení a nelze zaručit, že pixely, které byly vyhodnoceny jako „silná závažnost“, byly opravdu silně zasažené. Proto by bylo vhodné tyto dva indexy zhodnotit pomocí terénního průzkumu stejně, jako tomu bylo v případě indexu dNBR.

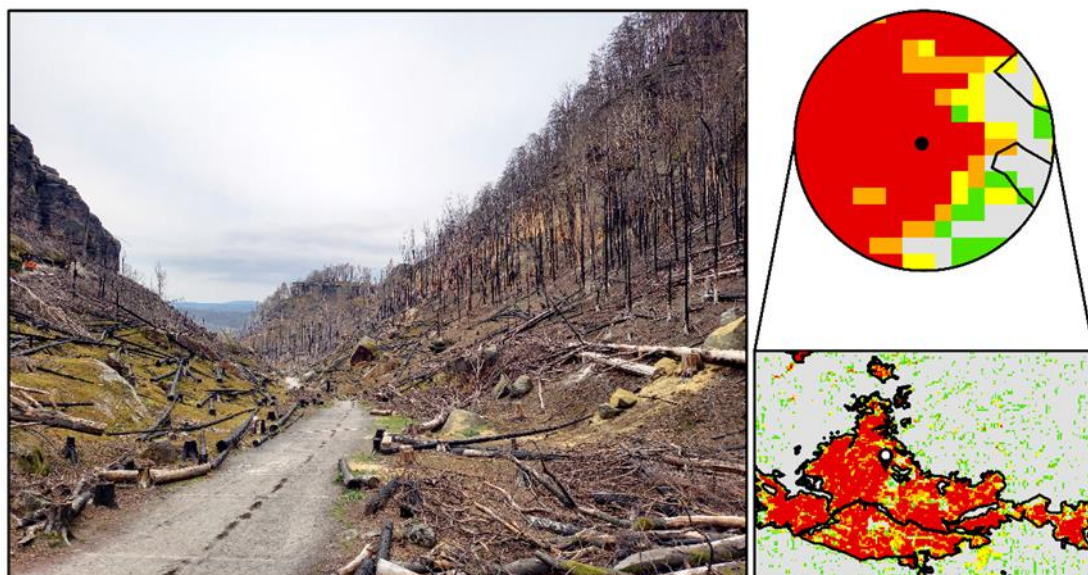
9.2 Zhodnocení vrstvy závažnosti

Vrstva přibližné závažnosti požárů byla sestavena pomocí čtyř indexů, které se často k těmto účelům využívají. Jelikož jsem ale neměla k dispozici referenční data ani měření, která by stanovovala závažnost požáru/spálení na tomto území, rozhodla jsem se zhodnotit vrstvu alespoň na základě osobní pochůzky. Vybrala jsem si místa snadno dostupná z cest.



Obrázek 28: Vlastní fotografie (Lat. 50.886335°, Long. 14.278553°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.

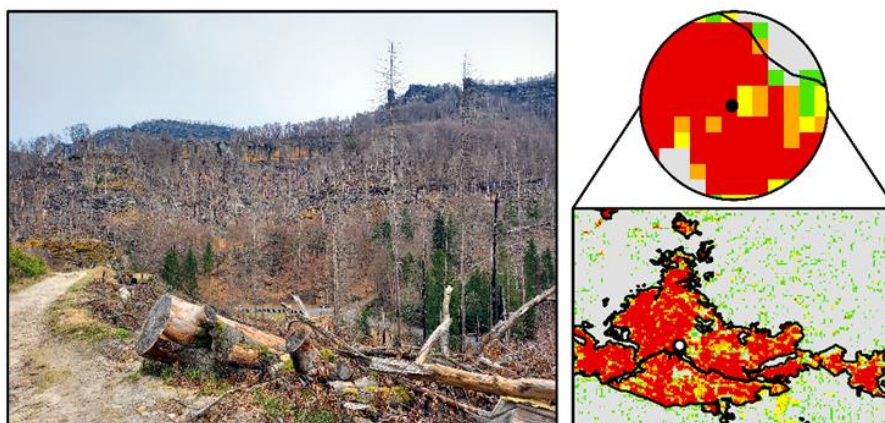
Jak je na první fotografii zřejmé (obr. č. 28), byla pořízena ze silně zasažené oblasti. Všude kolem bylo mnoho padlých a zčernalých kmenů stromů. Fotografie je situovaná směrem k části, která byla podle indexů vyhodnocena jako méně závažná (zelené, žluté a šedé barvy). Tento fakt je z fotografie dobře patrný, protože ve středu fotografie je možné si povšimnout očividně živého jehličnaté porostu, který směrem ke skále nabývá, a nejsou na něm patrné známky ohoření.



Obrázek 29: Vlastní fotografie (Lat. 50.886268°, Long. 14.278377°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.

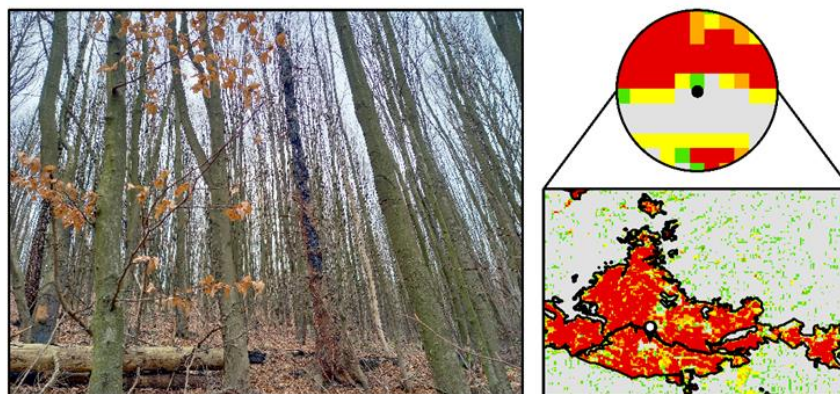
Další fotografie (obr. č. 29) pochází z téměř totožného místa, avšak je situovaná na opačnou stranu. Z této fotografie je vcelku dobře patrné, že levá strana je méně závažně

zasažena na rozdíl od strany pravé. Na levé straně si lze povšimnout mechů. Bylo zde vidět i mnoho náletových dřevin a nízkých rostlin. Na pravé straně je situace ještě horší. Náletových dřevin zde není mnoho, nevyskytuje se v tu takové míře ani mechový porost. Tyto pozorované jevy vcelku dobře odpovídají vrstvě závažnosti, která je zobrazena podrobně v pravé části.



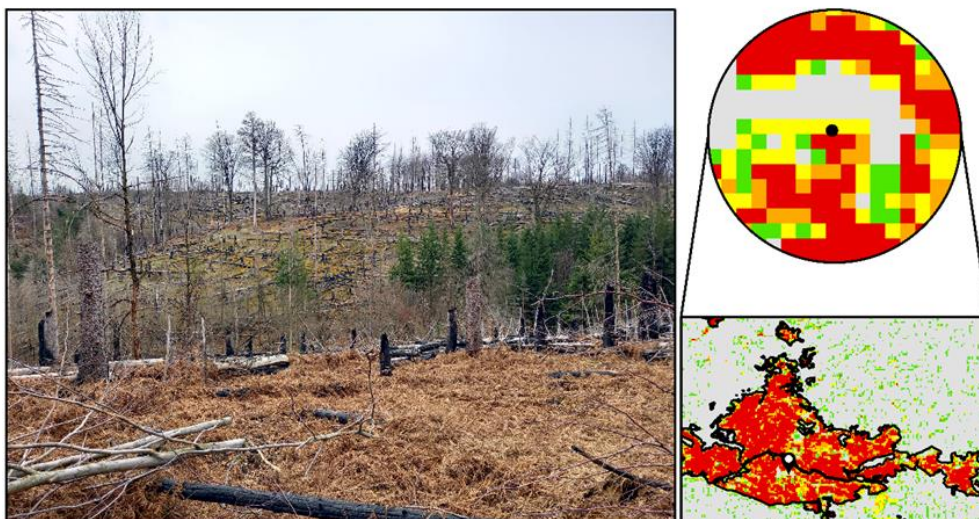
Obrázek 30: Vlastní fotografie (Lat. 50.878429°, Long. 14.275298°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.

Třetí fotografie (obr. č. 30) je situovaná směrem k pixelům, které byly vyhodnoceny jako mírně závažné až požárem nedotčené (zelené a šedé barvy). Je to dobře patrné z fotografie, na níž si lze povšimnout zelených nedotčených jehličnanů.



Obrázek 31: Vlastní fotografie (Lat. 50.873046°, Long. 14.307289°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.

Čtvrtá pořízená fotografie ukazuje poměrně zajímavý jev (obr. č. 31). Uprostřed očividně nedotčeného listnatého porostu je možno vidět pár požárem zasažených jehličnatých stromů. Listnatý porost až na pár výjimek nebyl ani ožehnutý. Opět se zde ukazuje, že vrstva závažnosti tuto oblast označila správně.



Obrázek 32: *Vlastní fotografie (Lat. 50.875892°, Long. 14.277357°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.*

Poslední fotografie ukazuje území, kde je možno spatřit hned několik různých závažností. V pravé části fotografie je vidět opět nedotčený jehličnatý porost. Při porovnání fotografie byl za mými zády téměř nedotčený listnatý porost, jenž je částečně vidět na předchozí fotografii. Tento fakt je z vrstvy závažnosti poměrně dobře patrný; jedná se o šedou část, tedy o část, která byla minimálně či vůbec požárem postihnuta. Směrem do údolí je červená část, jež opět dobře odpovídá realitě. V levé části zelený pixel velmi dobře odpovídá zelenému jehličnatému porostu přítomnému v pravé části fotografie.

Z těchto příkladů uvedených na fotografiích je zřejmé, že ač indexy vykazovaly různé výsledky, které byly často mylné – zejména na suchých porostech, tak i přesto výsledná vrstva závažnosti poměrně dobře fungovala. Navzdory tomu, že tato práce neměla k dispozici oficiální referenční data, je takto vytvořená vrstva poměrně adekvátní náhradou.

9.3 Zhodnocení detekce požáru radarem

Vizualizace radaru projevovала jisté změny v zasaženém území, nicméně tyto změny byly v porovnání s celým zasaženým územím poměrně minimální a nepodařilo se je statisticky potvrdit, ačkoli ve vizualizaci vidět jsou. Vzhledem k této skutečnosti bylo vyhodnoceno další provádění statistických analýz jako nepřínosné. Pásmo C, které bylo v této práci zkoumáno, bylo pro toto území jediné dostupné – nedá se tedy s jistotou potvrdit, že by použití jiného pásma pomohlo k přesnější detekci.

Nicméně, předpokládám a domnívám se, že by bylo vhodné zvolit pro toto území delší vlnovou délku radarového pásma, konkrétně pásmo L, které bylo využíváno v Kalifornii a pro které bylo potvrzené, že dokáže spolehlivě detekovat jizvu po požáru (Taillade et al. 2019).

10 Závěr

Tato práce nedokázala prokázat, že by radar v pásmu C platformy Sentinel 1 byl schopen detekovat požár z roku 2022 na statistické úrovni, na území NP České Švýcarsko. Taktéž bylo zjištěno, že radar nedokáže zhodnotit míru závažnosti spálení na daném území. Spektrální indexy použité v této práci dokázaly uspokojivě zhodnotit míru závažnosti spálení. Lze říci, že pro tyto účely zůstávají spektrální indexy, i přes svoje omezené použití (oblačnost apod.) a problémy se správnou detekcí určitých míst (např. suché porosty), stále nejspolehlivější metodou, jak zhodnotit závažnost spálení na určitém území.

V případě budoucích studií je vhodné zvážit využití jiného radarového pásma, konkrétně pásma L, pro zkoumání podobných území. V rámci spektrální analýzy je důležité pečlivě zhodnotit reakce spektrálních indexů na suché porosty, které mohou být chybně interpretovány jako požárem postižené oblasti. Pro dosažení spolehlivých výsledků je nezbytné provést validaci těchto indexů na konkrétních lokalitách, které byly podrobeny terénnímu průzkumu a v nichž byla posouzena míra poškození způsobeného požárem. Tato validace umožní případné úpravy a prahování indexů a zajištění přesnějšího hodnocení postižených území. Taktéž by bylo vhodné využít snímky z družic poskytující větší prostorové rozlišení, než je tomu u snímků z Landsat 8 a 9.

Zdroje

Odborné publikace

AVETISYAN, Daniela, Nataliya STANKOVA a Zlatomir DIMITROV. Assessment of Spectral Vegetation Indices Performance for Post-Fire Monitoring of Different Forest Environments. *Fire* [online]. 2023, 6(8), 1–3 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2571-6255. Dostupné z: doi:10.3390/fire6080290.

BATOOL, Sidra, Fabrizio FREZZA, Fabio MANGINI a Patrizio SIMEONI. Introduction to Radar Scattering Application in Remote Sensing and Diagnostics: Review. *Atmosphere* [online]. 2020, 11(5), 1–17 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos11050517

BOURGEAU-CHAVEZ, L. L., E. S. KASISCHKE, S. BRUNZELL, J. P. MUDD a M. TUKMAN. Mapping fire scars in global boreal forests using imaging radar data. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2010, 2010-11-25, 23(20), 4211-4234 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431160110109589.

Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Ser le Geográfica* [online]. 1998, 1998(7), 109–128 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1136-5277. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/39387025_Cartografia_de_grandes_incendios_forestales_en_la_Peninsula_Iberica_a_partir_de_imagenes_NOAA-AVHRR

ESCUIN, S., R. NAVARRO a P. FERNÁNDEZ. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2007, 2007-12-21, 29(4), 1053-1073 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431160701281072.

FORNACCA, Davide, Guopeng REN a Wen XIAO. Evaluating the Best Spectral Indices for the Detection of Burn Scars at Several Post-Fire Dates in a Mountainous

Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing* [online]. 2018, 10(8), 1–3 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10081196.

GÜNEY, Coşkun Okan, Ahmet MERT a Serkan GÜLSOY. Assessing fire severity in Turkey's forest ecosystems using spectral indices from satellite images. *Journal of Forestry Research* [online]. 2023, 34(6), 1747-1761 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1007-662X. Dostupné z: doi:10.1007/s11676-023-01620-7.

HARRIS, Sarah, Sander VERAVERBEKE a Simon HOOK. Evaluating Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Chaparral Ecosystems (Southern California) Using MODIS/ASTER (MASTER) Airborne Simulator Data. *Remote Sensing* [online]. 2011, 3(11), 2403-2419 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs3112403.

HRUŠKA, Jakub, Jan Balek BALEK, Jana BERANOVÁ a Monika BLÁHOVÁ. Jaké faktory ovlivnily vznik a šíření požáru v NP České Švýcarsko? [PDF]. 2022. Dostupné také z: <https://ziva.avcr.cz/2023-5/factory-vzniku-a-sireni-pozaru-v-ceskem-svycarsku-v-roce-2022.html>

CHUVIECO, E., M. P. MARTÍN a A. PALACIOS. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2010, 2010-11-25, 23(23), 5103-5110 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431160210153129.

KAVZOGLU, Taskin, Merve Yildiz ERDEMIR a Hasan TONBUL. Evaluating performances of spectral indices for burned area mapping using object-based image analysis. *Proceedings of Spatial Accuracy* [online]. 2016, 162-168 [cit. 2024-03-15]. ISSN 978-2-9105-4510-5. Dostupné z: https://www.academia.edu/40859690/Evaluating_performances_of_spectral_indices_for_burned_area_mapping_using_object_based_image_analysis

KEELEY, Jon E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* [online]. 2009, 18(1), 116–216 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1049-8001. Dostupné z: doi:10.1071/WF07049

KEY, C.H. a N.C. BENSON. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System [online]. 2005, 2006, 1–51 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/241687027_Landscape_Assessment_Ground_measure_of_severity_the_Composite_Burn_Index_and_Remote_sensing_of_severity_the_Normalized_Burn_Ratio/citations

KROPÁČEK, Jan, David MORAVEC a Jan KOMÁREK. Dálkový průzkum – I: skriptum [PDF]. Praha, 2020.

KUDLÁČKOVÁ, Lucie, Markéta PODĚBRADSKÁ, Monika BLÁHOVÁ, et al. Using FlamMap to assess wildfire behavior in Bohemian Switzerland National Park. Natural Hazards [online]. 2023, 1–2 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0921-030X. Dostupné z: [doi:10.1007/s11069-023-06361-8](https://doi.org/10.1007/s11069-023-06361-8).

LIU, Jinxiu, Eduardo Eiji MAEDA, Du WANG a Janne HEISKANEN. Sensitivity of Spectral Indices on Burned Area Detection using Landsat Time Series in Savannas of Southern Burkina Faso. Remote Sensing [online]. 2021, 13(13), 1-12 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: [doi:10.3390/rs13132492](https://doi.org/10.3390/rs13132492)

LIU, Sicong, Yongjie ZHENG, Michele DALPONTE a Xiaohua TONG. A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data. European Journal of Remote Sensing [online]. 2020, 2020-01-01, 53(1), 104-112 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2279-7254. Dostupné z: [doi:10.1080/22797254.2020.1738900](https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1738900)

LU, Zhong a Oh-ig KWOUN. Radarsat-1 and ERS InSAR Analysis Over Southeastern Coastal Louisiana: Implications for Mapping Water-Level Changes Beneath Swamp Forests. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 2008, 46(8), 2167-2184 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0196-2892. Dostupné z: [doi:10.1109/TGRS.2008.917271](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917271).

MCFADDEN, D. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. Academic Press [online]. Berkeley, California, 1974, 1974(1), 104–142 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://eml.berkeley.edu/reprints/mcfadden/zarembka.pdf>

MILLER, Jay D. a Andrea E. THODE. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* [online]. 2007, 109(1), 66-80 [cit. 2024-03-15]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2006.12.006

MILLIN-CHALABI, Gail, Julia MCMORROW a Clive AGNEW. Detecting a moorland wildfire scar in the Peak District, UK, using synthetic aperture radar from ERS-2 and Envisat ASAR. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2013, 2013-11-19, 35(1), 54-69 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2013.860658.

MELOUN, Milan, Jiří MILITKÝ a Martin HILL. Počítačová analýza vícerozměrných dat v příkladech [online]. 1. ACADEMIA, 2005 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://meloun.upce.cz/docs/books/titul-vicerozmer.pdf>

OTTINGER, Marco a Claudia KUENZER. Spaceborne L-Band Synthetic Aperture Radar Data for Geoscientific Analyses in Coastal Land Applications: A Review. *Remote Sensing* [online]. 2020, 12(14), 1-36 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12142228.

Péče o lesy v Národním parku České Švýcarsko [online]. Krásná Lípa: Správa Národního parku České Švýcarsko, 2010 [cit. 2024-03-15]. ISBN 978-80-904404-6-3.

PENHA, Thales Vaz, Thales Sehn KÖRTING, Leila Maria Garcia FONSECA, Celso Henrique Leite SILVA JÚNIOR, Mikhaela Aloísia Jessie Santos PLETSCHE, Liana Oighenstein ANDERSON a Fabiano MORELLI. Burned Area Detection in the Brazilian Amazon using Spectral Indices and GEOBIA. *Revista Brasileira de Cartografia* [online]. 2020, 2020-06-30, 72(2), 253-269 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1808-0936. Dostupné z: doi:10.14393/rbcv72n2-48726.

PETTORELLI, Nathalie, Henrike Schulte to BUEHNE, Aurelie SHAPIRO a Paul GLOVER-KAPFER. Conservation Technology Series Issue 4: SATELLITE REMOTE SENSING FOR CONSERVATION. *Satellite Remote Sensing for Conservation* [online]. 2018, 2018(4), 1–125 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.25962.41926.

RAHMAN, Shahriar, Hsing-Chung CHANG, Warwick HEHIR, Christina MAGILLI a Kerrie TOMKINS. Inter-Comparison of Fire Severity Indices from Moderate (Modis) and Moderate-To-High Spatial Resolution (Landsat 8 & Sentinel-2A) Satellite Sensors. In: *IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [online]. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, s. 2873-2876 [cit. 2024-03-15]. ISBN 978-1-5386-7150-4. ISSN 2153-7003. Dostupné z: doi:10.1109/IGARSS.2018.8518449.

RICHARDS, John A. *Remote Sensing with Imaging Radar* [online]. 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009 [cit. 2024-03-15]. Signals and Communication Technology. ISBN 978-3-642-02019-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-02020-9.

SABERY, Shahrzad Minooe, Aleksandr BYSTROV, Miguel NAVARRO-CÍA, Peter GARDNER a Marina GASHINOVA. Study of Low Terahertz Radar Signal Backscattering for Surface Identification. *Sensors* [online]. 2021, 21(9), 1-17 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21092954.

SANTOS, Sarah Moura B. dos, António BENTO-GONÇALVES, Washington FRANCA-ROCHA a Gustavo BAPTISTA. Assessment of Burned Forest Area Severity and Postfire Regrowth in Chapada Diamantina National Park (Bahia, Brazil) Using dNBR and RdNBR Spectral Indices. *Geosciences* [online]. 2020, 10(3), 1-19 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2076-3263. Dostupné z: doi:10.3390/geosciences10030106.

SOVEREL, Nicholas O., Daniel D.B. PERRAKIS a Nicholas C. COOPS. Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2010, 114(9), 1896-1909 [cit. 2024-03-15]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2010.03.013.

TAILLADE, Thibault, Laetitia THIRION-LEFEVRE a Regis GUINVARC'H. L-band Polarimetric Change Detection on Sar Images: Fire Burn Scars in California. In: IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [online]. Yokohama, Japan: IEEE, 2019, s. 9956-9959 [cit. 2024-03-15]. ISBN 978-1-5386-9154-0. ISSN 2153-7003. Dostupné z: doi:10.1109/IGARSS.2019.8900081.

TARIQ, Aqil, Hong SHU, Alexandre S. GAGNON, Qingting LI, Faisal MUMTAZ, Artan HYSA, Muhammad Amir SIDDIQUE a Iqra MUNIR. Assessing Burned Areas in Wildfires and Prescribed Fires with Spectral Indices and SAR Images in the Margalla Hills of Pakistan. *Forests* [online]. 2021, 12(10), 1-16 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f12101371.

TEDIM, Fantina, Vittorio LEONE, Michael COUGHLAN, Christophe BOUILLON, Gavriil XANTHOPOULOS, Dominic ROYÉ, Fernando J.M. CORREIA a Carmen FERREIRA. Extreme wildfire events. In: *Extreme Wildfire Events and Disasters* [online]. 2019. Elsevier, 2020, s. 3-29 [cit. 2024-03-15]. ISBN 9780128157213. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-815721-3.00001-1.

TRAN, Bang, Mihai TANASE, Lauren BENNETT a Cristina APONTE. Evaluation of Spectral Indices for Assessing Fire Severity in Australian Temperate Forests. *Remote Sensing* [online]. 2018, 10(11), 1–3 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10111680.

ULABY, Fawwaz T., David LONG, William J. BLACKWELL, et al. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing* [online]. Univ. of Michigan Press, 2014 [cit. 2024-03-15]. ISBN 978-0-472-11935-6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/299103021_Microwave_Radar_and_Radiometric_Remote_Sensing.

VERAVERBEKE, Sander, Stefaan LHERMITTE, Willem W. VERSTRAETEN a R. GOOSSENS. Evaluation of pre/post-fire differenced spectral indices for assessing burn severity in a Mediterranean environment with Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2011, 2011-06-28, 32(12), 3521-3537 [cit. 2024-03-15]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431161003752430.

VERAVERBEKE, Sander, Willem W. VERSTRAETEN, Stefaan LHERMITTE a Rudi GOOSSENS. Evaluating Landsat Thematic Mapper spectral indices for estimating burn severity of the 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *International Journal of Wildland Fire* [online]. 2010, 19(5), 558–569 [cit. 2024-03-15]. ISSN 1049-8001. Dostupné z: doi:10.1071/WF09069.

WOODHOUSE, Iain H. *Introduction to Microwave Remote Sensing* [online]. 1. CRC Press, 2017 [cit. 2024-03-15]. ISBN 9781315272573. Dostupné z: doi:10.1201/9781315272573.

Internetové zdroje

Copernicus: Sentinel-1. EoPortal [online]. © 2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-1#references>.

Introduction to SAR. Alaska Satellite Facility [online]. ©2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/.

Lesson 4. Work with the Difference Normalized Burn Index – Using Spectral Remote Sensing to Understand the Impacts of Fire on the Landscape. Earth Lab [online]. © 2022 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics/multispectral-remote-sensing-modis/normalized-burn-index-dNBR/>

MEZAINIS, Valids, Janina JARUZELSKL a Md Waji ULLAH. *Advanced Remote Sensing and GIS* [PDF]. 2014-15. Dostupné také z: https://bforest.portal.gov.bd/sites/default/files/files/bforest.portal.gov.bd/page/bb40dcf3_5140_49c8_9b54_9b43993607ac/Advanced%20Remote%20Sensing%20And%20GIS.compressed.pdf

NDVI from First Principles. Streambatch [online]. © 2023 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.streambatch.io/knowledge/ndvi-from-first-principles>

Normalized Burn Ratio (NBR). United Nations [online]. © UN-SPIDER [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Make Farmer Life Easier. GeoPard Agriculture [online]. © 2019-2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://geopard.tech/blog/what-is-ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>

NDVI (normalized difference vegetation index). NAX solutions [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://naxsolutions.com/en/agriculture-precision-dictionary/ndvi-pros-cons/>

Normalized difference vegetation index (NDVI). Up42 [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://docs.up42.com/help/spectral-indexes/ndvi>

Optical and Radar Remote Sensing. The Nature Conservancy [online]. © 2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://reefresilience.org/management-strategies/remote-sensing-and-mapping/introduction-to-remote-sensing/optical-and-radar-remote-sensing/>.

Radar frequency band. Glossary of Meteorology [online]. 2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Radar_frequency_band.

Sentinel-1 SAR – Overview. Sentinel Online [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/overview>.

Spectral Indices in Remote Sensing: Meaning and Applications (An example). Spatialnode [online]. © 2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.spatialnode.net/articles/spectral-indices-in-remote-sensing-meaning-and-applications-an-examplea06ac2>

Vegetation indices and their interpretation: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE, and NDWI. Auravant [online]. © 2024 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z:

<https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>

Zdroje použitých obrázků

Hodnoty NDVI. In: Auravant [online]. ©2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/ndwi/>

LU, Zhong a Oh-ig KWOUN. Radarsat-1 and ERS InSAR Analysis Over Southeastern Coastal Louisiana: Implications for Mapping Water-Level Changes Beneath Swamp Forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2008, **46**(8), 2167-2184 [cit. 2024-03-24]. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2008.917271

OTTINGER, Marco a Claudia KUENZER. Spaceborne L-Band Synthetic Aperture Radar Data for Geoscientific Analyses in Coastal Land Applications: A Review. *Remote Sensing* [online]. 2020, 12(14), 1-36 [cit. 2024-03-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12142228.

PETTORELLI, Nathalie, Henrike Schulte to BUEHNE, Aurelie SHAPIRO a Paul GLOVER-KAPFER. Conservation Technology Series Issue 4: SATELLITE REMOTE SENSING FOR CONSERVATION. *Satellite Remote Sensing for Conservation* [online]. 2018, 2018(4), 1–125 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.25962.41926.

Radarová pásma a jejich frekvence a vlnová délka. In: *Glossary of Meteorology* [online]. 2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Radar_frequency_band

SABERY, Shahrzad Minooe, Aleksandr BYSTROV, Miguel NAVARRO-CÍA, Peter GARDNER a Marina GASHINOVA. Study of Low Terahertz Radar Signal Backscattering for Surface Identification. *Sensors* [online]. 2021, **21**(9) [cit. 2024-03-24]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21092954

Srovnání spektrální odezvy zdravé vegetace a spálených oblastí. In: U.S. Forest Service [online]. ©2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

Stupně závažnosti spálení pro index dNBR. In: USGS [online]. ©2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

Vliv pásma SAR na průnik povrchem. In: Alaska Satellite Facility [online]. ©2024 [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/

Seznam obrázků

Obrázek 1: <i>Senzory v DPZ lze dělit na pasivní a aktivní. Do pasivních systému spadají multispektrální a hyperspektrální senzory (znázorněné v levé části). Tyto senzory pouze přijímají povrchem vyzařovanou energii. Aktivní systémy, do kterých lze zařadit systémy , jako je Radar a LiDAR, vyzařují vlastní energii, která se po odražení od zemského povrchu vrací zpět do senzoru (znázorněno v pravé části) (Pettorelli et al. 2018).</i>	17
Obrázek 2: <i>Elektromagnetické spektrum a jeho využití v družicovém dálkovém průzkumu Země (Pettorelli et al. 2018).</i>	18
Obrázek 3: <i>Radarová pásma a jejich frekvence a vlnová délka (American Meteorological Society ©2022).</i>	21
Obrázek 4: <i>Vliv pásma SAR na průnik povrchem. Čím delší je vlnová délka, tím hlouběji proniká většinou typů povrchu (SAR Handbook 2019).</i>	21
Obrázek 5: <i>Odraz od hladkého, mírně drsného a velmi drsného povrchu (Sabery et al. 2021).</i>	22
Obrázek 6: <i>Mechanismy radarového zpětného rozptylu pro lesní, mokřadní a půdní povrchy. (a, b, g, h): Nezaplavený stav; rozptyl signálu v koruně a na zemi. (c–f, i): Ponořený mokřad/ otevřená voda; silný dvojitý odraz signálu mezi kmeny stromů a vodní hladinou. (g–i): Povrch země v mokřém (g), suchém (h) a zaplaveném stavu (i) (Lu et Kwoun 2008; Ottinger et Kuenzer 2020).</i>	23
Obrázek 7: <i>Elektromagnetické spektrum a jeho využití v družicovém dálkovém průzkumu Země (Pettorelli et al. 2018).</i>	25
Obrázek 8: <i>Hodnoty NDVI v rozmezí -1 až 0 = mrtvé rostliny nebo neživé předměty, rozmezí 0–0,33 = nemocná rostlina, rozmezí 0,33–0,66 = středně zdravá rostlina a rozmezí 0,66–1 = velmi zdravá rostlina (Auravant ©2024).</i>	26
Obrázek 9: <i>Srovnání spektrální odezvy zdravé vegetace a spálených oblastí (U.S. Forest service).</i>	29
Obrázek 10: <i>Stupně závažnosti spálení získané výpočtem dNBR podle návrhu USGS.</i>	29

Obrázek 11: <i>Vlastní vizualizace území a jednotlivých zón Národního parku České Švýcarsko. Data byla poskytnuta Správou NP České Švýcarsko.</i>	35
Obrázek 12: <i>Kroky předzpracování snímků SAR.</i>	37
Obrázek 13: <i>Vizualizace jednotlivých polarizací snímků SAR před a po požáru.</i>	39
Obrázek 14: <i>Upravená mřížka pro snížení náročnosti výpočtu pokrývající zasažené území včetně jeho přilehlého okolí. Velikost jednoho pixelu mřížky je 30×30 m.</i> ...	42
Obrázek 15: <i>Náhled tabulky se všemi hodnotami z každé vrstvy pro každý pixel.</i>	42
Obrázek 16: <i>Vizualizace indexu NDVI před požárem a po požáru a rozdílový snímek dNDVI.</i>	44
Obrázek 17: <i>Vizualizace indexu BAI před požárem a po požáru a rozdílový snímek dBAI.</i>	45
Obrázek 18: <i>Vizualizace indexu NBR před požárem a po požáru a rozdílový snímek dNBR.</i>	46
Obrázek 19: <i>Vizualizace indexu RdNBR.</i>	46
Obrázek 20: <i>Stanovení přibližné závažnosti požáru na základě spektrálních indexů.</i>	47
Obrázek 21: <i>Vizualizace RGB kompozitu vytvořeného za pomoci radarových polarizací VH – před a po požáru a polarizací VV – po požáru.</i>	48
Obrázek 22: <i>Sloupec vlevo – boxploty jednotlivých polarizací pro snímky po požáru. Sloupec vpravo – boxploty jednotlivých polarizací pro snímky před požárem. 0 = nebyl požár zaznamenán, 1 = požár byl zaznamenán.</i>	48
Obrázek 23: <i>Boxploty rozdílů mezi snímky před požárem a po požáru pro jednotlivé polarizace. 0 = nebyl požár zaznamenán, 1 = požár byl zaznamenán.</i>	49
Obrázek 24: <i>Vizualizace indexu dNDVI u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.</i>	52
Obrázek 25: <i>Vizualizace indexu dBAI u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.</i>	53
Obrázek 26: <i>Vizualizace indexu dNBR u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.</i>	55

Obrázek 27: <i>Vizualizace indexu RdNBR u vytipovaných oblastí nad leteckými snímky.</i>	56
Obrázek 28: <i>Vlastní fotografie (Lat. 50.886335°, Long. 14.278553°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.</i>	58
Obrázek 29: <i>Vlastní fotografie (Lat. 50.886268°, Long. 14.278377°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.</i>	58
Obrázek 30: <i>Vlastní fotografie (Lat. 50.878429°, Long. 14.275298°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.</i>	59
Obrázek 31: <i>Vlastní fotografie (Lat. 50.873046°, Long. 14.307289°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.</i>	59
Obrázek 32: <i>Vlastní fotografie (Lat. 50.875892°, Long. 14.277357°, pořízena dne: 12. března 2024). Souřadnice jsou pouze orientační a jsou zatíženy určitou polohovou chybou.</i>	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: <i>Polarizace SAR (Alaska Satellite Facility ©2024)</i>	20
Tabulka 2: <i>P-hodnoty neparametrického testu shody mediánu zpětného rozptylu SAR</i>	49
Tabulka 3: <i>Přesnost klasifikace diskriminační analýzy pro mediány hodnot zpětného rozptylu SAR</i>	50