

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

**MONITORING ŠÍŘENÍ LÝKOŽROUTA V NPR REJVÍZ Z DAT
LANDSAT 8**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Bakalant: Barbora Maletínská

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Barbora Maletínská

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Monitoring šíření lýkožrouta v NPR Rejvíz z dat Landsat 8

Název anglicky

Monitoring of the bark beetle spreading around NPR Rejvíz using Landsat 8 data

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je monitoring šíření lýkožrouta pomocí multispektrálních dat z družice Landsat 8 v NPR Rejvíz. Cílem je pomocí statistických metod porovnat tři vybrané spektrální indexy zobrazující šíření lýkožrouta v čistém smrkovém porostu a rozeznat, který z nich je pro tento výzkum nejvhodnější.

Metodika

Rámcová metodika práce bude složena z těchto kroků:

- (a) Zpracování a příprava vhodných podkladových dat, jako druhová skladba a hranice NPR Rejvíz;
- (b) Výběr a zpracování vhodných družicových snímků z družice Landsat 8;
- (c) Vlastní časoprostorová analýza zahrnující tvorbu následujících spektrálních indexů: Moisture Stress Index (MSI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI);
- (d) Porovnání jednotlivých spektrálních indexů pomocí statistických metod a výběr nejvhodnějšího pro monitoring šíření lýkožrouta.

Doporučený rozsah práce

cca 30 normovaných stran

Klíčová slova

lýkožrout; dálkový průzkum Země; multispektrální data; NDVI; MSI; NDMI

Doporučené zdroje informací

- Abdullah, H.; Darvishzadeh, R.; Skidmore, A.K.; Heurich, M. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus*, L.) Infestation. *Remote Sens.* 2019, 11, 398. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/4/398>
- Bright, B.C., Hudak, A.T., Kennedy, R.E., Meddens, A.J.H., 2014. Landsat time series and lidar as predictors of live and dead basal area across five bark beetle-affected forests. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 7, 3440–3452. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2346955>
- Gdulová, K.; Marešová, J.; Barták, V.; Szostak, M.; Červenka, J.; Moudrý, V. Use of TanDEM-X and SRTM-C Data for Detection of Deforestation Caused by Bark Beetle in Central European Mountains. *Remote Sens.* 2021, 13, 3042. <https://doi.org/10.3390/rs13153042>
- Hais, M., Wild, J., Berec, L., Brůna, J., Kennedy, R., Braaten, J., Brož, Z., 2016. Landsat imagery spectral trajectories-important variables for spatially predicting the risks of bark beetle disturbance. *Remote Sens.* 8. <https://doi.org/10.3390/rs8080687>
- Havašová, M., Bucha, T., Ferenčík, J., Jakuš, R., 2015. Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Ann. For. Res.* 58, 295–310. <https://doi.org/10.15287/afr.2015.388>
- KLOUČEK, T. – KOMÁREK, J. – LAGNER, O. – FOGL, M. – GDULOVÁ, K. *Detekce napadení lesních porostů pomocí bezpilotních leteckých prostředků : certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2019. ISBN 978-80-213-2932-4.
- Latifi H, Schumann B, Kautz M, Dech S. Spatial characterization of bark beetle infestations by a multivariate synergy of SPOT and Landsat imagery. *Environ Monit Assess.* <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24037227/>
- Meddens, A.J.H., Hicke, J.A., Vierling, L.A., Hudak, A.T., 2013. Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 132, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.002>
- SUROVÝ, P. – KUŽELKA, K. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. *LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA. Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-3008-5.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Monitoring šíření lýkožrouta v NPR Rejvíz z dat Landsat 8 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 dne

.....
(podpis autora práce)

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Tomáši Kloučkovi, Ph.D. za trpělivé a laskavé vedení při zpracování bakalářské práce a své rodině a blízkým za podporu během celého studia.

Monitoring šíření lýkožrouta v NPR Rejvíz z dat Landsat 8

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá monitorováním šíření lýkožrouta smrkového pomocí družicových dat Landsat 8 v letech 2013 až 2021. Práce je zaměřena na národní přírodní rezervaci Rejvíz, která se nachází v okrese Jeseník poblíž osady Rejvíz a leží v chráněné krajinné oblasti Jeseníky. Z družicových snímků této oblasti byly vypočteny tři spektrální indexy, pomocí nichž je možné pozorovat zdravotní stav vegetace. Konkrétně se jedná o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) a Moisture Stress Index (MSI). Tyto tři spektrální indexy byly následně statisticky porovnány pomocí Wilcoxonova a Kruskal-Wallisova testu, aby bylo možné zjistit, zda se od sebe v jednotlivých letech liší. Porovnávány byly jak porosty, kde se po celou dobu nevyskytoval lýkožrout, tak porosty, kde se vyskytovala ohniska jeho napadení. Výsledky statistických testů ukazují, že hodnoty indexů MSI a NDMI vykazují mezi nenapadenými a napadenými plochami velmi podobných hodnot, naopak NDVI se svými výsledky od zbylých indexů liší. NDVI vykazuje menší statistický rozdíl mezi nenapadenými a napadenými oblastmi, přesto je tento rozdíl u kritických let statisticky významný. NDVI také působí citlivěji na menší změny, které nejsou tak znatelné, naopak MSI a NDMI tyto menší změny spíše zanedbávají a znatelně zachycují hlavně extrémnější odchylky od normálních hodnot. Bakalářská práce prokazuje, že multispektrální družicová data vysokého rozlišení a z nich vypočtené spektrální indexy poskytují vhodný nástroj pro dlouhodobé pozorování zdravotního stavu smrkových porostů a jejich poškození lýkožroutem.

Klíčová slova: lýkožrout; dálkový průzkum Země; multispektrální data; NDVI; MSI; NDMI

Monitoring of the bark beetle spreading around NPR Rejvív using Landsat 8 data

Abstract

The bachelor thesis is focused on monitoring the spreading of the bark beetle using Landsat 8 satellite data between 2013 and 2021. The thesis is focused on the Rejvív National Nature Reserve, located in the Jeseník district near the village of Rejvív and situated in the Jeseníky Protected Landscape Area. Three spectral indices have been calculated from satellite images of this area to observe the health status of the vegetation. Specifically, these indices are Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) and Moisture Stress Index (MSI). These three spectral indices were statistically compared using Wilcoxon and Kruskal-Wallis tests to see if they differed from one another from year to year. Comparisons were made between stands that were not infested by the bark beetle over time and stands that had outbreaks of the bark beetle. The results of the statistical tests show that the MSI and NDMI index values show very similar values between the uninfested and infested areas, while the results of the NDVI differ from the other indices. The NDVI shows less statistical difference between uninfested and infested areas, yet this difference is statistically significant for critical years. The NDVI is also more sensitive to smaller changes that are not so obvious, whereas the MSI and NDMI tend to neglect these smaller changes and capture mainly the more extreme differences from normal values. The bachelor thesis demonstrates that high-resolution multispectral satellite data and the spectral indices calculated from them provide a suitable tool for long-term observation of spruce stand health and its damage by bark beetle.

Keywords: bark beetle; remote sensing; multispectral data; NDVI; MSI; NDMI

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíle práce.....	11
3	Literární rešerše.....	12
3.1	Elektromagnetické záření.....	12
3.1.1	Elektromagnetické spektrum	12
3.1.2	Spektrální projevy vegetace	13
3.2	Dálkový průzkum Země.....	16
3.2.1	Nosiče DPZ	16
3.2.2	Snímače DPZ.....	18
3.2.3	Zpracování obrazových dat.....	19
3.3	Lýkožrout smrkový.....	20
3.3.1	Bionomie	20
3.3.2	Kalamity lýkožrouta smrkového	21
3.4	Současný stav řešené problematiky	21
3.4.1	Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2 (Bárta, et al., 2021).....	21
3.4.2	Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery (Meddens, et al., 2013)	22
3.4.3	Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains (Havašová, et al., 2015)	22
3.4.4	Spatial characterization of bark beetle infestations by a multirate synergy of SPOT and Landsat imagery (Latifi, et al., 2013).....	23
3.4.5	Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (<i>Ips typographus</i> , L.) Infestation (Abdullah, et al., 2019)	23
3.4.6	Characterizing spectral–temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series (Senf, et al., 2015).....	24
4	Charakteristika studijního území	25
4.1	Národní přírodní rezervace Rejvíz	25
5	Metodika.....	27

5.1	Druhová skladba.....	27
5.2	Kůrovcová mapa.....	28
5.3	Landsat 8 Collection 2 Level 2.....	28
5.4	Tvorba spektrálních indexů.....	28
5.4.1	NDVI.....	28
5.4.2	NDMI.....	29
5.4.3	MSI.....	29
5.5	Zpracování snímků.....	30
5.6	Zpracování rastrových dat.....	30
5.6.1	Tvorba porovnávacích ploch.....	31
5.7	Statistické vyhodnocení.....	32
5.7.1	Shapiro-Wilkův test.....	32
5.7.2	Kruskal-Wallisův test.....	32
5.7.3	Wilcoxonův test.....	32
6	Výsledky.....	34
6.1	Kruskal-Wallisův test.....	34
6.2	Wilcoxonův test.....	35
6.3	Zobrazení spektrálních indexů.....	36
6.3.1	NDVI.....	36
6.3.2	NDMI.....	38
6.3.3	MSI.....	40
7	Diskuse.....	42
8	Závěr a přínos práce.....	44
9	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	46
10	Přílohy.....	49

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Národní přírodní rezervace Rejvíz ležící v okrese Jeseník, ČR.....	26
Obrázek 2:	Zvektorizovaná vrstva druhové skladby.....	27

Obrázek 3: Reklasifikovaná vrstva zobrazující oblačnost (bíle) a bezoblačné oblasti (černě) v NPR Rejvíz (červeně) v roce 2016..... 27

Obrázek 4: Porovnávací plochy pro nenapadené a napadené stromy lýkožroutem smrkovým v NPR Rejvíz 28

Seznam tabulek

Tabulka 1: Datum pořízení snímků z družice Landsat 8 použitých pro výzkum; zdroj: vlastní 27

Tabulka 2: p hodnoty Kruskal-Wallisova testu pro jednotlivé spektrální indexy u napadených a nenapadených ploch..... 34

Tabulka 3: p hodnoty Kruskal-Wallisova testu pro jednotlivé spektrální indexy u jedné napadené a nenapadené plochy 34

Tabulka 4: Wilcoxonův test zobrazující p hodnotu napadené a nenapadené plochy pro spektrální indexy v letech 2013 až 2021 35

Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty NDVI napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021 36

Graf 2: Hodnoty NDVI celého smrkového porostu v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021..... 37

Graf 3: Hodnoty NDMI napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021 38

Graf 4: Hodnoty NDMI celého smrkového porostu v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021..... 39

Graf 5: Hodnoty MSI napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021..... 40

Graf 6: Hodnoty MSI celého smrkového porostu v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021..... 41

Seznam příloh

Příloha 1: NDVI v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021..... 49

Příloha 2: MSI v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021..... 50

Příloha 3: NDMI v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021 50

1 Úvod

Dálkový průzkum Země (DPZ) je čím dál více používanější metodou pro pozorování Země z družic, letadel a dronů, kterou lze využít v mnoha oborech, včetně lesnictví. Družicové snímky mají různé prostorové rozlišení, vlnový rozsah a měřítko a pomocí jejich opakovaného snímkování v konkrétní oblasti trvajících několik hodin až let je možné modelovat a monitorovat změny vzdušných nebo pozemních jevů (Surový, et al., 2019). Tímto způsobem lze například sledovat zdravotní stav vegetace nad konkrétním územím a vytvářet vlastní časoprostorové analýzy.

Významným tématem v lesnictví jsou kůrovcové kalamity, které způsobují obrovské škody zejména ve smrkových porostech. Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) se řadí mezi nejvážnějšího škůdce vyskytujícího se na smrkových porostech v Evropě. Jeho kalamiční přemnožení v původních lesích v Evropě lze dohledat již v 17. století, ale jeho zájem zvláště upoutaly smrkové monokultury ve 20. století, které postupně nahradily či změnilly původní smíšené lesy (Skuhrový, 2002).

Jelikož družicová data využívají mnoho oblastí elektromagnetického spektra, jako například viditelné, blízké infračervené, střední infračervené či tepelné záření, je možné pomocí konkrétních pásem družicových snímků vytvářet spektrální indexy, které jsou zvláště citlivé například na obsah vody ve vegetaci. Pomocí těchto indexů lze mapovat aktivitu lesních škůdců, kteří způsobují usychání a úmrtnost stromů a pozorovat jejich šíření v průběhu mnoha let. Mezi tyto spektrální indexy patří například Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) a Normalized Stress Index (MSI).

2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je monitorování šíření lýkožrouta smrkového v národní přírodní rezervaci Rejvíz za použití družicových snímků družice Landsat 8, z nichž byly vypočteny tři následující spektrální indexy: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) a Normalized Stress Index (MSI). Pomocí těchto spektrálních indexů lze sledovat stres vegetace v oblastech, kde se vyskytoval lýkožrout smrkový a mapovat úbytek vlhkosti v souvislosti s kůrovcovou kalamitou. Cílem této práce je také zjistit, jak se od sebe tyto vybrané spektrální indexy liší v průběhu let a jak korelují s kůrovcovou kalamitou.

Za použití statistických testů bude zjištěno, zda se u již zmíněných spektrálních indexů od sebe v jednotlivých letech statisticky významně liší oblasti, kde se po celou

dobu nevyskytoval lýkožrout smrkový od oblastí, které byly ohniskem jeho šíření. Dále se bude posuzovat, zda je některý z vybraných spektrálních indexů citlivější pro mapování šíření lýkožrouta smrkového a jak se od sebe tyto indexy v průběhu let liší.

3 Literární rešerše

3.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je vlnění v elektromagnetickém poli, které se pomocí vln šíří prostorem (Dobrovolný, 1998). Vlnová délka a frekvence jsou dva hlavní parametry tohoto záření, popisují délku vlny a kmitočty. Ve své podstatě elektromagnetické záření tvoří transformace různých forem energií, jako například kinetické, tepelné, elektrické, magnetické, jaderné nebo chemické. Tyto transformace poskytují ve většině případů elektromagnetické vlny v různých oblastech elektromagnetického spektra (Halounová & Pavelka, 2005).

Na spektrální složení a intenzitu elektromagnetického záření má velký vliv atmosféra. Dříve než je záření zaznamenáno senzorem pro DPZ, musí projít skrz atmosféru Země (Kropáček, et al., 2020). Míra ovlivnění se liší v závislosti na několika faktorech, jako vlnová délka, atmosférické podmínky, délka dráhy záření a síla emitovaného signálu (Dobrovolný, 1998). V atmosféře nejvíce ovlivňuje záření rozptyl, propustnost a pohlcování, nebo také odraz od atmosféry, rozklad či ohyb záření (Kropáček, et al., 2020). Záření se v atmosféře rozptyluje na molekulách plynů i na aerosolech. Rozptyl se dělí na několik kategorií podle velikosti rozptylujících částic, například na Rayleighův, Mieův (aerosolový) a neselektivní (Horák, 2014).

DPZ využívá jen některé oblasti elektromagnetického záření (tyto oblasti se nachází v tzv. atmosférických oknech), protože jiné jsou pohlcovány atmosférou.

3.1.1 Elektromagnetické spektrum

Pro získávání informací o jevech a objektech v dálkovém průzkumu Země hraje hlavní roli elektromagnetické záření, které se prostorem šíří pomocí elektromagnetické vlny. V přírodě se vyskytuje v podobě spojitého spektra, které lze podle vlnové délky rozdělit do mnoha oblastí. Základními oblastmi elektromagnetického spektra jsou kosmické záření, UV záření, infračervené a blízké střední termální záření, mikrovlnné záření a televizní a radiové vlny (Dobrovolný, 1998).

Dálkový průzkum Země nevyužívá celé elektromagnetické spektrum, nejvíce je využíváno 6 následujících oblastí (Dobrovolný, 1998):

- ultrafialové záření (0,1 až 0,4 mikrometrů)
- viditelné záření (0,4 až 0,7 mikrometrů)
- blízké infračervené záření (0,7 až 1,4 mikrometrů)
- střední infračervené záření (1,4 až 3 mikrometry)
- tepelné záření (3 mikrometry až 1 mm)
- mikrovlnné záření (1 mm až 1 m)

Lidské oko je citlivé jen na malou část elektromagnetického spektra, kterému se říká viditelné záření neboli světlo (Dobrovolný, 1998). Rozsah vlnových délek této části spektra je 0,38 až 0,72 μm a dělí se na tři části, tedy na modrou (Blue; B), zelenou (Green; G) a červenou (Red; R) (Horák, 2014).

3.1.2 Spektrální projevy vegetace

Projevy vegetace jsou velmi důležité už jen kvůli tomu, že se vegetační kryt vyskytuje téměř na všech snímcích a obrazových záznamech povrchu. I když na snímku nemusí vegetace na první pohled působit různorodě (monokultury listnatých a jehličnatých lesů), jsou odrazové vlastnosti těchto povrchů rozmanité (Dobrovolný, 1998). List obsahuje mnoho látek, se kterými záření různě interaguje a výsledná charakteristika je dána výsledkem interakce s těmito látkami.

Spektrální křivka vegetace má tři hlavní části (Horák, 2014):

- oblast pigmentační absorpce (0,4 – 0,7 μm)
- oblast buněčné struktury (0,7 – 1,3 μm)
- oblast vodní absorpce (1,3 – 3 μm)

V oblasti pigmentační absorpce jsou pro spektrální chování listů velmi důležité pigmentační látky jako karoteny a chlorofyl. Chlorofyl odráží zelenou část spektra a pohlcuje většinu červené a modré části. Pro spektrální projev oblasti buněčné struktury je typická vysoká odrazivost ve vlnových délkách blízkých 0,7 μm , která je ovlivňována morfologickým utvářením listu. To je užitečné například pro rozpoznávání jednotlivých druhů rostlin (Dobrovolný, 1998). V oblasti vodní absorpce je záření dopadající na list absorbováno vodou obsaženou v listech (Horák, 2014).

Důležité odrazové vlastnosti vegetačního krytu (Dobrovolný, 1998):

- zdravotní stav
- obsah vody ve vegetaci
- vnitřní struktura částí rostlin
- vnější uspořádání vegetačního krytu

- vlastnosti půdního substrátu

Vegetační indexy

Vegetační indexy jsou velmi vhodné hlavně pro dálkový průzkum vegetace, který se provádí zejména získáváním informací o odrazivosti elektromagnetických vln od korun stromů pomocí pasivních senzorů.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Normalizovaný rozdílový vegetační index je velmi užitečný index pro dálkový průzkum Země a je velmi oblíbený pro svou univerzální použitelnost v mnoha různých oborech (Moravec, et al., 2021). Zobrazuje množství zelené biomasy a je vhodný pro sledování zdravotního stavu vegetace nebo obsahu chlorofylu, dále lze tímto indexem charakterizovat růst korun (Xue & Su, 2017). Je to normalizovaný poměr mezi červeným (RED) a blízkým infračerveným (NIR) pásmem a má rozsah hodnot mezi -1 až 1 (Kropáček, et al., 2020).

Výpočet NDVI pomocí rovnice vypadá následovně:

Vzorec 1: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Normalized Difference Water index (NDWI)

NDWI je normalizovaný rozdílový vodní index, který koresponduje s obsahem vody ve vegetaci. Tento index je odvozený z pásem blízkého infračerveného záření (NIR) a krátkovlnného infračerveného záření (SWIR). Kombinace pásem NIR a SWIR odstraňuje odchylky vyvolané vnitřní strukturou listů, čímž se zvyšuje přesnost při získávání obsahu vody ve vegetaci. Množství vody obsažené ve vnitřní struktuře listů určitým způsobem ovlivňuje spektrální odrazivost krátkovlnného infračerveného záření. Rozsah hodnot je stejný jako u indexu NDVI, tedy od -1 do 1 (Gao, 1996).

Výpočet NDWI pomocí rovnice vypadá následovně:

Vzorec 2: Normalized Difference Water Index (NDWI)

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Moisture Stress Index (MSI)

MSI je index, který měří odrazivost citlivou na zvyšující se obsah vody v listech a jeho analýza je zaměřená na stres v korunách stromů. Oproti ostatním spektrálním indexům má inverzní hodnoty, to znamená, že vyšší hodnoty znamenají větší stres vegetace. Hodnoty tohoto indexu se pohybují v rozmezí od 0 do 3 (custom-scripts, 2022).

MSI se vypočítá následujícím způsobem:

Vzorec 3: Moisture Stress Index (MSI)

$$MSI = \frac{(SWIR)}{(NIR)}$$

Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

NDMI je normalizovaný rozdílový index vlhkosti, který pomocí krátkovlnného infračerveného a blízkého infračerveného pásma zobrazuje vlhkost ve vegetaci. Pomocí pásma SWIR lze pozorovat změny obsahu vody ve vegetaci, naopak NIR reaguje na vnitřní strukturu listů a jejich obsah sušiny. Kombinací těchto dvou pásem jsou odstraněny odchylky vznikající kvůli vnitřní struktuře listů a tímto je zvýšená přesnost měření obsahu vody v listech (custom-scripts, 2022).

Výpočet NDMI pomocí následující rovnice:

Vzorec 4: Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

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

Projevy poškození vegetace lýkožroutem smrkovým

Přítomnost lýkožrouta smrkového je možné při pochůzce lesem pozorovat pomocí drtinek (dřevitý prach vypadávající na zem či kůru z požerku) u kmene stromu, nebo opadávající kůrou (Klouček, et al., 2019). V pozdějších stádiích lze sledovat i změnu barvy koruny v důsledku požerků larev, které znemožňují tok vody z kořenů do koruny. Nejprve se jehlice zbarví do žluté barvy a později do červenohnědé, což značí odumření stromu (Näsi, et al., 2015).

Sledování takových projevů lýkožrouta smrkového ale není velmi efektivní, proto se pro efektivnější průzkum zdravotního stavu lesů a zjišťování narušení lesních porostů škodlivým hmyzem uplatňuje dálkový průzkum Země například ve formě snímků z družic, letadel a dronů (Näsi, et al., 2015). Hlavním klíčem pro pozorování těchto změn jsou spektrální vlastnosti stromů (Klouček, et al., 2019).

3.2 Dálkový průzkum Země

Za dálkový průzkum Země (DPZ) lze považovat veškeré metody, při nichž je povrch Země snímán z letadla, družice i bezpilotních prostředků bez přímého kontaktu. DPZ nezkoumá pouze souš a vodu, je možné získat data i o dolních vrstvách atmosféry, nebo vodním sloupci a vrstvách sedimentů (Dobrovolný, 1998). Nevztahuje se pouze na Zemi, stejným principem lze zkoumat i jiné planety, jako například Mars a Měsíc (Kropáček, et al., 2020).

Data z DPZ lze získat v obrazové i neobrazové formě. Obrazovou formou se myslí snímek zobrazující určitou oblast, neobrazovou formu představují například grafy sestavené z různých typů měření. Zařízení, která zaznamenávají intenzitu elektromagnetického záření se umísťují na různé typy nosičů (Dobrovolný, 1998).

Je několik typů měření DPZ, které lze dělit následovně (Horák, 2014):

- Multispektrální – více částí spektra
- Multitemporální – měření ve více časových okamžicích
- Multipolarizační – kombinované měření pomocí polarizovaného mikrovlnného záření
- Hyperspektrální – desítky až stovky částí elektromagnetického spektra

Dále lze data DPZ dělit na konvenční a nekonvenční. Konvenčními metodami v konkrétním okamžiku vzniká pomocí centrální projekce fotografie. Nekonvenční metody využívají pořizování obrazu v podobě skenerů, které snímají přicházející elektromagnetické záření.

3.2.1 Nosiče DPZ

Povrch Země je potřeba snímat pohyblivými nosiči, které obsahují snímače pro dálkový průzkum. Těmito nosiči mohou být například vesmírné družice, letadla či bezpilotní prostředky (Horák, 2014). Výhody a nevýhody jednotlivých nosičů jsou zmíněné v následujících podkapitolách.

Družicové systémy

Snímání Země družicemi má oproti ostatním nosičům několik výhod. Mezi hlavní výhody patří výška letu družice, je tedy možné nasnímat velké množství plochy i při menším úhlu záběru. Další výhodou je časové rozlišení, při kterém družice opakovaně snímá zemský povrch. Časové rozlišení je zhruba 15-20 dnů, ale je možné dosáhnout i tří dnů (Halounová & Pavelka, 2005).

Oběžné dráhy družic

Družice létají na oběžných drahách (orbitách), které mají tvar elipsy (Kropáček, et al., 2020). Tyto oběžné dráhy zajišťují stabilitu a minimální odchylky, které jsou problémem například u letadel kvůli větru a změně výšky (Horák, 2014).

Oběžné dráhy družic se dělí na několik typů (Majer, 2020):

- Geostacionární oběžná dráha (GEO)
- Nízká oběžná dráha (LEO)
- Střední oběžná dráha (MEO)
- Polární a heliosynchronní oběžná dráha (SSO)

Družice obíhající na geostacionární dráze jsou ve své podstatě nehybné a stále zůstávají nad stejným místem díky době trvání jednoho oběhu, které je dlouhé 23 hodin, 56 minut a 4 sekundy (Majer, 2020). Tato dráha je nad rovníkem ve výšce 35786 km. Většina družic DPZ se pohybuje na nízké oběžné dráze (<2000 km), díky které mají lepší rozlišení (Kropáček, et al., 2020).

Landsat

Americký Landsat byl jeden z prvních a nejdůležitějších civilních programů společnosti NASA, který umožňuje sledování zemského povrchu a přírodních zdrojů (Kropáček, et al., 2020). Tento systém poskytuje ucelená data již od roku 1972, kdy byla vypuštěna první družice pod názvem ETRS 1, později Landsat 1 (Dobrovolný, 1998). Byla to první družice pro pozorování Země, která nesla senzor a příčný multispektrální skener, jenž zaznamenává data ve čtyřech pásmech – zeleném, červeném a dvou infračervených. Landsat 1 přesáhl svoji plánovanou životnost o pět let, fungoval do ledna 1978 (NASA, 2021). Program Landsat celkem vypustil devět družic, ale družice Landsat 6 shořela při startu (Kropáček, et al., 2020). Nyní jsou aktivní tři družice, jsou to Landsat 7, 8 a 9.

Landsat 8

Tato družice létá ve výšce 705 km s velikostí scény 185 x 185 kilometrů a stejné území snímá každých 16 dní (Horák, 2014). Využívá přístroj OLI (Operational Land Imager), což je senzor snímající ve viditelné, blízké infračervené a krátkovlnné infračervené části spektra. Snímky mají v panchromatické části prostorové rozlišení 15 metrů a v multispektrální části 30 metrů. Dalším přístrojem na palubě Landsat 8 je termální infračervený senzor (Thermal Infrared Sensor, TIRS) měřící teplotu povrchu Země ve dvou tepelných pásmech (NASA, 2021).

Letadla

Letecké nosiče se hojně využívají díky velkému prostoru na palubě pro umístění různých dodatekových přístrojů (např. navigační přístroje, kamery a teleskop). Na rozdíl od družice umožňuje velmi dobré prostorové rozlišení způsobené nízkou výškou letu (Horák, 2014). Ovšem i při snímání letadlem vzniká řada nevýhod, jako velké zkreslení kvůli širokému záběru leteckého skeneru a odlišné světelné podmínky na různých místech způsobené delší dobou snímání a limitující výškou terénu (jen do 10% výšky letu) (Horák, 2014).

V dnešní době už jsou letecké snímky digitální, ale dříve se používaly snímky analogové. Ty jsou důležité hlavně kvůli dokumentaci vývoje krajiny, poskytují obrazové informace o krajině asi za posledních sto let. Tyto snímky je potřeba naskenovat a je možné je získat například v archivech. Na analogových leteckých snímcích je přístrojová lišta, která nese informace o snímku, kameře a letu. Dále jsou v rozích a uprostřed na stranách rámové značky, které jsou užitečné při fotogrammetrii (Kropáček, et al., 2020).

Bezpilotní prostředky

Bezpilotní prostředky neboli drony, mají oproti družicím tu výhodu, že létají nad pozorovaným územím v poměrně malé výšce a mají schopnost snímat v mnohem větším detailu. Avšak nasnímají značně menší území, proto je vhodné používat bezpilotní prostředky například pro snímání porostů a přírodních památek, ale snímání velkoplošně chráněných území může být vhodnější z letadel či družic. Pomocí dronů je možné snímat velmi detailně v řádech desítek milimetrů (Komárek & Vávra, 2019).

Pro zvolení správné platformy (drony, letadla a družice) je kromě míry detailu a velikosti nasnímaného území třeba dbát i na časové rozlišení, které může být klíčové. Družice jsou závislé na svých oběžných drahách a jejich časové rozlišení je na ně fixované. Konkrétní území je pomocí družic možné nasnímat jednou za několik dní. V případě letadel a bezpilotních prostředků je to variabilnější, protože lze dané území nasnímat na vyžádání (Komárek & Vávra, 2019).

3.2.2 Snímače DPZ

Multispektrální snímání

Multispektrální senzory jsou takové, které pro snímání využívají více pásem, ale ne více než deset. Spektrální pásmo běžných senzorů je široké zhruba 10-100 nm, ale

u novějších přístrojů se lze setkat s užšími pásmy (Kropáček, et al., 2020). Multispektrální snímání lze rozlišit na dvě kategorie, a to paralelní a sekvenční. Při paralelním snímání se na jedné scéně současně měří více vlnových délek, na rozdíl u sekvenčního snímání probíhá měření na scéně postupně po jednotlivých vlnových délkách (Horák, 2014).

Hyperspektrální snímání

Hyperspektrální snímání neboli obrazová spektrometrie (Dobrovolný, 1998), využívá senzory používající vysoký počet spektrálních pásem, řádově jsou to desítky až stovky pásem (Halounová & Pavelka, 2005).

Je využíván hyperspektrální skener, který funguje na stejném principu jako klasické snímací zařízení. Rozdíl je v tom, že využívá velké množství pásem při snímání dané scény. Použité intervaly spektra jsou velmi úzké a na sebe navazující a jsou v oblastech viditelného, blízkého a středního infračerveného elektromagnetického záření. Takový způsob snímání umožňuje studovat mnohem větší detaily v rámci spektrálního chování (Dobrovolný, 1998).

3.2.3 Zpracování obrazových dat

Zpracování obrazových dat pro DPZ lze dělit na čtyři hlavní kategorie, ve kterých se provádí následující operace (Halounová & Pavelka, 2005):

1. Restaurace a rektifikace je předzpracování, kde se zpracovávají počáteční originální data ve formě úprav geometrických zkreslení, radiometrických kalibrací a eliminací šumu.
2. Zvýraznění obrazu, které zlepšuje vlastnosti obrazu pro rozlišení jednotlivých prvků obrazu.
3. Klasifikace, jejímž produktem je tematická mapa.
4. Postklasifikační úpravy a spojování dat s jinými formami obrazových dat.

Další způsoby zpracování dat se dělí podle toho, zda jsou pořízená data v analogové (fotografie na fotografickém papíře), nebo digitální (matice čísel) formě (Dobrovolný, 1998).

Analogové letecké snímky je nejprve potřeba naskenovat na větších skenerech při rozlišení 3628 dpi, což zachovává informace obsažené na negativech (Kropáček, et al., 2020). Data nesou dva typy informací, jsou to topografické (geometrické) vlastnosti objektu a tematická informace. Pro správné rozpoznávání objektů ze snímku slouží fotointerpretace, která je založena na interpretačních znacích

(Dobrovolný, 1998). Podle Kropáček et al. (2020) lze pro fotointerpretaci rozlišit následující znaky:

- tvar
- velikost
- textura
- stín
- barevný tón nebo stupeň šedi
- prostorový vzor
- asociace

3.3 Lýkožrout smrkový

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) je jeden z nejdůležitějších lesních škůdců, který se vyskytuje na smrkových porostech. Jeho masivní rozšíření způsobují hlavně smrkové monokultury, které nahradily původní přirozené smíšené lesy (Skuhrový, 2002).

Ve většině případů se vyskytuje ve smrkových porostech starších šedesáti let, které jsou nějakým způsobem poškozeny a oslabeny. Mladší porosty nebo jiné dřeviny napadá jen v případě nedostatečné potravní nabídky (Jakuš, et al., 2015).

Nejčastěji se vyskytuje na smrku ztepilém (*Picea abies*), ale i na ostatních druzích smrku, dále pak obývá modřín opadavý (*Larix decidua*), borovici kleč (*Pinus mugo*), borovici sibiřskou (*Pinus sibirica*) a jiné (Anon., 2016).

3.3.1 Bionomie

Lýkožrout smrkový je nosatcovitý brouk z podčeledi kůrovcovitých (*Scolytinae*). Jeho barva je hnědá až černá, dospělý jedinec má velikost těla v rozmezí 4 až 5,5 cm (Anon., 2016). Vajíčka jsou bílá a oválná s rozměry 0,6 až 0,9 mm. Samci tohoto podkorního škůdce vytváří snubní komůrky v požerku, kam lákají samičky. Samičky poté vytváří matečné chodby (Skuhrový, 2002) dlouhé 6–10 cm a široké 3–4 mm a kladou do nich vajíčka. Délka a šířka chodeb je závislá na hustotě požerků a počtu samic. Je to polygamní druh, jeden samec má dvě až tři samice, z nichž každá naklade 30 až 60 vajíček do zářezů v matečných chodbách (Jakuš, et al., 2015).

Aktivita lýkožrouta smrkového začíná koncem jara, kdy se začíná rojit a požírat lýko starších a oslabených stromů, které se nedokážou tak efektivně bránit smolením (Klouček, et al., 2019).

3.3.2 Kalamity lýkožrouta smrkového

Vznik kalamit lýkožrouta smrkového ovlivňuje několik faktorů, jako například teplota, silný vítr, krátkodobé a dlouhodobé srážky a zdravotní stav smrků. Nedostatečné srážky způsobují, že se smrky nemohou bránit útokům lýkožrouta a nemohou ho zalít pryskyřicí. Kvůli vysoké teplotě (zejména v jarních a letních měsících) se tvoří větší počty generací, které potom více oslabují stromy a les je náchylnější pro tvorbu kalamity. Kvůli vysokému větru se vyvrací a láme větší množství stromů a tím se zvyšuje potravní nabídka pro lýkožrouta (Skuhrový, 2002).

3.4 Současný stav řešené problematiky

3.4.1 Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2 (Bárta, et al., 2021)

Vědci v této studii zkoumali možnosti využití vybraných vegetačních indexů a sezónních trajektorií družice Sentinel-2 pro včasnou detekci napadení smrkových monokultur v České republice lýkožroutem smrkovým, kdy jsou stromy stále zelené.

Pro vegetační sezónu roku 2018 (duben až listopad) se na základě 14 družicových pozorování zkonstruovaly spektrální trajektorie devíti pásem a šesti vegetačních indexů, ze kterých byly rozlišeny čtyři třídy napadení. Mezi nejslibnější vegetační indexy pro analýzy patří tasseled cap wetness (TCW) a normalized difference index kombinující pásma NIR (B8a) a SWIR (B11).

Byly sledovány sezónní změny odrazivosti lesních porostů s cílem určení nejcitlivějších spektrálních pásem a vegetačních indexů pro včasné rozpoznání napadených stromů. Detekce byla provedena algoritmem random forest, který vyhodnotil pásma nacházející se v oblasti SWIR (B12), red (B4), a red edge (B5, B6) jako nejvhodnější.

Predikční model pro sezónu 2018 s využitím TCW byl použit ve vegetační sezóně roku 2019 k předpovědi stádia nedávno napadených zelených stromů. Výstupy se následně ověřily pomocí terénních pozorování na 80 smrkových lesních plochách. Celková přesnost oddělení tříd zdravých a napadených stromů dosáhla 78 %.

Studie poukazuje na velký potenciál multitemporálního snímání a použití krátkovlnného infračerveného záření pro včasnou detekci odumírání smrkových lesů způsobeného lýkožroutem smrkovým.

3.4.2 Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery (Meddens, et al., 2013)

V této studii vědci porovnávali jedno-snímkovou klasifikaci za použití klasifikátoru maximum likelihood a více-snímkovou klasifikaci, při které se využívají časové řady spektrálních indexů a ze snímků Landsat bylo hodnoceno, jak se mění přesnost detekce v souvislosti s různými fázemi úmrtnosti stromů způsobenými lýkožroutem.

U každé metody bylo hodnoceno několik vegetačních indexů a spektrálních pásem a byl identifikován ten, který vykazoval nejvyšší přesnost. Scéna snímku Landsat s vysokým rozlišením posloužila jako referenční data pro hodnocení a porovnávání metod. U jedno-snímkové klasifikace obrazu byla dosažena celková přesnost 91 % s 11,7 % omission a 2,3 % commission error pro třídu červeného stádia úmrtnosti stromů za použití indexů brightness, greenness a wetness transformace Tasseled Cap. U více-snímkové klasifikaci byla mezi spektrálními indexy dosažena nejvyšší přesnost 89,6 % s 12,6 % omission a 7,1 % commission errorem.

Dále byly v rámci jednoho pixelu v celém rozmezí úmrtnosti stromů porovnávány přesnosti nejlepších metod jedno-snímkové a více-snímkové klasifikace. Více-snímková metoda byla přesnější při měření střední úrovně úmrtnosti stromů a jedno-snímková metoda se ukázala být přesnější u vysoké úrovně úmrtnosti stromů.

Výsledky studie dokazují, že mapování lesních disturbancí z dat Landsat za využití jedno-snímkových i více-snímkových metod může mít vysokou přesnost klasifikace.

3.4.3 Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains (Havašová, et al., 2015)

Cílem této studie bylo určit nejvhodnější a nejcitlivější vegetační index pro nalezení současných i starých ohnisek lýkožrouta metodou Vegetation Index Differencing. Pro studium bylo využito šest snímků z družice Landsat (senzor Thematic Mapper) z let 2005-2009 a 2011, z nichž byly vytvořeny vegetační indexy citlivé na zdravotní stav jehličnanů s převahou smrků ve Vysokých Tatrách.

Pro každý rok byly zvlášť vypočteny následující indexy: Vegetation Condition Index (VCI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Moisture Stress Index (MSI), Disturbance Index (DI) a Changed Disturbance Index (DI'). Metodika odčítání indexů byla použita vždy pro

dvouletá období v letech 2005 až 2011 (např. 2005-2006, 2006-2007 atd.) a výsledkem byl Changed Vegetation Index (ΔVI).

Pro klasifikaci napadených a nenapadených stromů v důsledku ohnisek lýkožrouta byly pro vegetační indexy stanoveny prahové hodnoty, dále se hodnotily vegetační indexy a jejich citlivost pro detekci ohnisek lýkožrouta. V letech 2007 a 2011 bylo dosaženo nejpřesnější klasifikace.

Nejméně přesným vegetačním indexem pro detekci ohnisek je NDVI, ale všechny ostatní vegetační indexy jsou velmi citlivé. Nejvhodnější indexy pro výzkum epidemických fází jsou podle autorů MSI, VCI a NDMI díky jejich jednoduchosti a snadné interpretaci.

3.4.4 Spatial characterization of bark beetle infestations by a multivariate synergy of SPOT and Landsat imagery (Latifi, et al., 2013)

V této studii vědci zkoumali prostorovou detekci tříd poškození stromů lýkožroutem za použití dat dálkového průzkumu Země a neparametrické klasifikace v Národním parku Bavorský les v období 2001-2011. Pro analýzu bylo použito 10 geometricky rektifikovaných scén ze senzorů družic SPOT a Landsat.

Hlavním cílem bylo zjistit, zda mají data se středním rozlišením potenciál pro klasifikaci napadených oblastí. Dalším cílem bylo prozkoumat, zda je možné oddělit časově sousedící napadené oblasti. Vědci použili model random forest (RF) na letecké snímky s vysokým rozlišením.

Výsledky ukazují, že dostatečně velké plochy vizuálně identifikovatelné do jednotlivých tříd napadení je možné oddělit od nenapadených oblastí. Na rozdíl od toho byly ostatní třídy poškození klasifikovány s vyššími chybami a také s vyššími klasifikačními odchylkami. Dále ze studie vyplývá, že jsou satelitní snímky se středním rozlišením v kombinaci s vhodnými referenčními daty vhodné pro mapování plošného napadení v pokročilých stádiích. Nicméně pro mapování menších ploch je rozhodující spektrální rozlišení družicových dat, kvalita referenčních dat a velikost zamořených oblastí.

3.4.5 Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus*, L.) Infestation (Abdullah, et al., 2019)

Cílem této studie bylo zkoumat ranou fázi napadení lýkožroutem smrkovým pomocí optických a termálních dat Landsat 8. Během června a začátku července roku 2016

byl proveden rozsáhlý terénní průzkum, při kterém byla shromážděna data celkem ze 157 napadených a zdravých stromů v Národním parku Bavorský les v Německu.

Byly studovány tři snímky z družice Landsat 8 z května, července a srpna 2016, které reprezentují různá stadia napadení (raná fáze, pokročilá fáze a fáze po napadení). Z viditelné, blízké a krátkovlnné infračervené části elektromagnetického spektra byly vypočteny spektrální vegetační indexy citlivé na měřené charakteristiky. Dále byla použitím algoritmu mono-window vypočtena teplota povrchu koruny (CST) z termálního infračerveného pásma. Autoři tohoto článku se snažili najít souvislosti mezi zkoumanými charakteristikami listů (jako obsah vody, fluorescence chlorofylu a stomatální vodivost) a daty z družic.

Výsledky ukazují, že naměřené charakteristiky listů se významně liší u napadených a nenapadených stromů. Dále studie ukazuje, že metoda CST je lepší pro zjišťování jemných změn v korunách stromů oproti spektrálním vegetačním indexům. Tato studie tedy přináší nový poznatek, že detekce stresu vyvolaného lýkožroutem je lepší pomocí termálních pásem družice Landsat 8 oproti spektrálním vegetačním indexům vypočítaných z optických pásem. Potenciál metody CST by tedy měl mít pozitivní důsledky při detekci raného stadia napadení lýkožroutem pro lesnickou praxi.

3.4.6 Characterizing spectral–temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series (Senf, et al., 2015)

V této studii vědci charakterizovali spektrální vzorce lesních disturbancí způsobených hmyzem skrze časové řady družic Landsat mezi lety 1990 a 2013. Cílem bylo zjistit, zda je možné odlišit disturbance těchto dvou druhů pomocí dat družic Landsat. Analyzovali nedávné přemnožení lýkohuba (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins) a obaleče smrkového (*Choristoneura freemani* Razowski) v Kanadě, provincie Britská Kolumbie.

Algoritmus LandTrendr byl použit pro charakterizaci trendů souvisejících s hmyzími disturbancemi a následně byly jeho spektrální trajektorie přizpůsobeny ročním časovým řadám Normalized Burn Ratio (NBR) a Tasseled Cap (TC), z nichž byla získána sada metrik disturbancí. Tato sada sloužila pro vytvoření dvou random forest modelů, které a) rozlišovaly disturbance způsobené hmyzem od disturbancí způsobených těžbou a požáry, b) rozpoznat, který činitel konkrétních disturbancí je nejpravděpodobnější (lýkohub/obaleč smrkový).

Celková přesnost mapování hmyzích disturbancí je 76 % a zařazení jejich původců proběhlo s přesností od 75 % do 88 % v souvislosti s tím, zda byly pro výpočet

považovány porosty s výskytem pouze jednoho druhu, nebo porosty s výskytem obou druhů. V porostech s výskytem obou druhů bylo skoro 45 % disturbancí obaleče smrkového chybně přiřazeno lýkohubovi.

Spektrální metriky popisující intenzitu disturbancí byly pro rozlišení obou hmyzích původců důležitější než doba trvání disturbancí. Spektrální změny způsobené disturbancí obaleče smrkového byly menší než u lýkohuba, navíc disturbance obaleče smrkového byly silně spjaty se změnami TC greenness, naproti tomu u lýkohuba byly silně spjaty se změnami TC brightness a wetness.

Výsledky studie ukazují, že časové řady družic Landsat mají potenciál pro mapování disturbancí lýkožroutů a defoliátorů. Také poukazuje na potřebu rozlišovat tyto dva činitele pro adekvátní zachycení dopadu na životní prostředí.

4 Charakteristika studijního území

4.1 Národní přírodní rezervace Rejvíz

Národní přírodní rezervace (NPR) Rejvíz se nachází v okrese Jeseník poblíž osady Rejvíz a leží v chráněné krajinné oblasti Jeseníky (Franc, 2005). NPR se nachází ve výšce 731–805 m n. m. a zaujímá rozlohu 328,56 ha (AOPKČR, c2022) a považuje se za největší rašeliniště na Moravě i ve Slezsku (Franc, 2005).

Jedná se o vrchovištní rašeliniště, které vzniklo zadržováním vody zhruba před 6–7 tisíci lety na konci doby ledové (Limbergová, 2021). Odstředivý růst trsů rašeliníků způsobuje zaoblený tvar vrchoviště, který se člení na další mikro reliéfy, tedy na bulvy (vypouklé a suché) a šlenky (zalité vodou) (Tichopádová, c2002-2022).

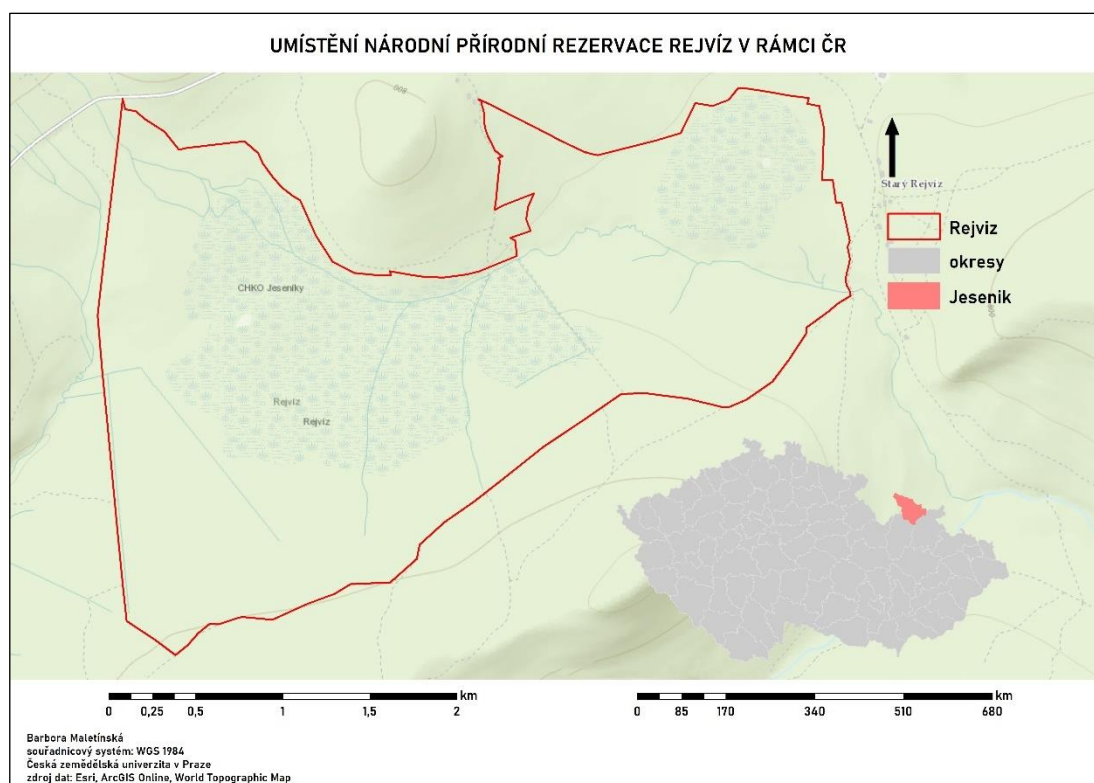
V oblasti se nachází Velké mechové jezírko, Malé mechové jezírko a rašelinné louky. Největší mocnost rašeliny má Malé mechové jezírko (cca 660 cm), u Velkého mechového jezírka je mocnost rašeliny poloviční (Franc, 2005). Předmětem ochrany je komplex rašelinných ekosystémů se všemi druhy rostlin a živočichů na ně vázanými a jejich horninového, vodního a půdního prostředí (AOPKČR, c2022).

V NPR se vyskytují převážně lesní biotopy, nejčastěji zastoupené jsou smrčiny s různým stupněm přirozenosti. Lze se setkat s podmáčenými rašelinnými smrčinami, čistým smrkovým porostem, nebo se smrčinou, kde se vyskytuje i buk. Cenné jsou přírodní blatkové bory, pod kterými roste rojovník bahenní, kyhanka sivolistá a rašelinné březiny. Pro primární bezlesé oblasti jsou charakteristická přechodová rašeliniště, kde se bohatě vyskytuje rosnatka okrouhlolistá a prstnatec plamatý (AOPKČR, c2022).

Specifické povětrnostní podmínky ve formě nízké průměrné teploty, častých srážek a dlouhotrvajících mrazů ovlivňují faunu a flóru, které se na území vyskytují (Franc, 2005). V některých lesních porostech se vyskytují i vzácné druhy brouků, například kovaříků. Konkrétně se zde vyskytuje kovařík pruhovaný (*Danosoma fasciata*) a *Diacanthous undulatus* a kromě brouků bylo v NPR nalezeno i 18 druhů vážek (AOPKČR, c2022). V rašeliništích se daří i několika obojživelníkům, jako skokanu rašelinnému, čolкови horském a čolкови karpatskému. Dalšími obyvateli jsou netopýr severní, ořešník kropenatý, zmije obecná, chřástal polní a bekasina otavní (Franc, 2005).

Umístění NPR Rejvíc v rámci České republiky lze vidět na *Obrázek 1*.

Obrázek 1: Národní přírodní rezervace Rejvíc ležící v okrese Jeseník, ČR



5 Metodika

Pro mapování šíření lýkožrouta smrkového v NPR Rejvíz byly použity družicové snímky z družice Landsat 8 získané z webu EarthExplorer. V rozmezí let 2013 až 2021 byl pro každý rok použit jeden snímek z měsíců červenec až říjen v závislosti na oblačnosti. Družicové snímky použité pro bakalářskou práci jsou představené v následující *Tabulka 1*.

Tabulka 1: Datum pořízení snímků z družice Landsat 8 použitých pro výzkum; zdroj: vlastní

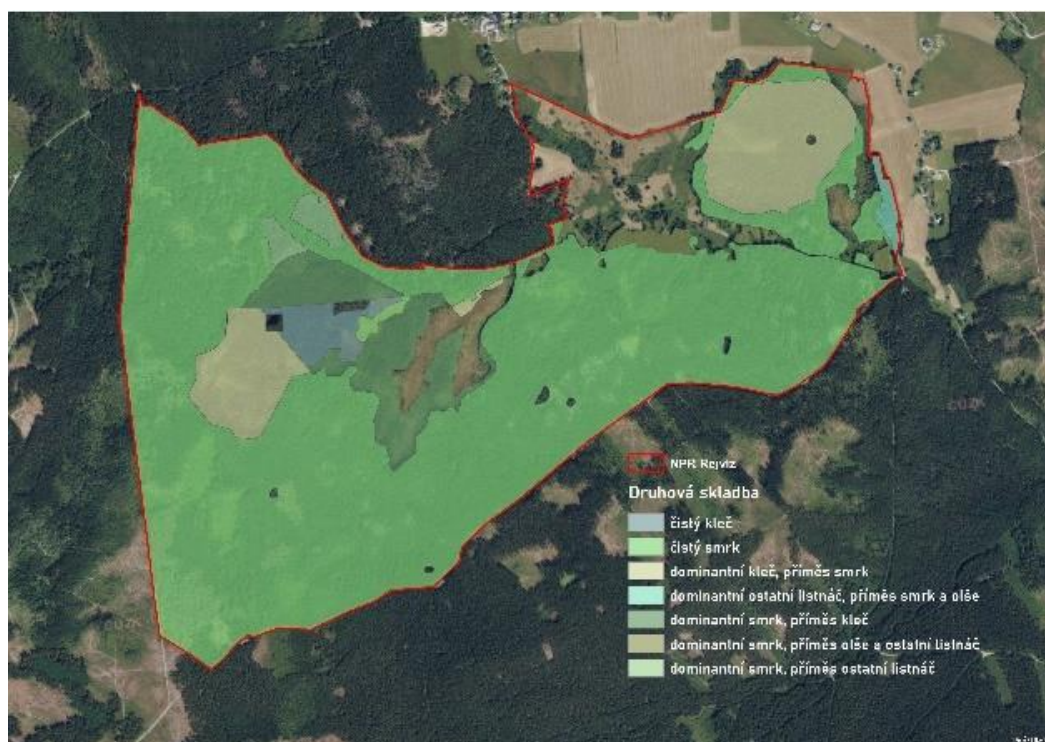
Rok	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Datum pořízení	06.09.	25.09.	11.08.	30.09.	31.07.	03.08.	31.08.	09.09.	30.10.

5.1 Druhová skladba

Dále byla pro zájmové území vytvořena Shapefile vrstva druhové skladby, která vychází z georeferencovaného snímku obrazovky pořízeného z webu Ústav pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHUL) zobrazujícího druhovou skladbu s jednotlivými druhy zastoupení. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu neposkytnutí zdrojových vektorových vrstev pro potřeby závěrečné práce ÚHUL.

Následující *Obrázek 2* zobrazuje vektorovou vrstvu vytvořenou v programu ArcMap 10.8.1.

Obrázek 2: Zvektorizovaná vrstva druhové skladby



Pro další práci s daty byla vybrána pouze kategorie čistého smrku, ze které byla vyexportována samostatná Shapefile vrstva.

5.2 Kůrovcová mapa

Aby bylo možné provádět další analýzy a zpracovávat statistické testy pro zdravé a napadené stromy lýkožroutem zvlášť, byla vytvořena vektorová vrstva podle Kůrovcové mapy z webu kurovcovamapa.cz. Tato vrstva znázorňuje oblasti smrkových porostů napadených lýkožroutem v letech 2018 až 2021. Z let před rokem 2018 nejsou data z kůrovcové mapy dostupná, proto je v této práci za počátek aktivity lýkožrouta v zájmové lokalitě považován rok 2018. Byla vytvořena ze stejného důvodu totožným způsobem jako vrstva druhové skladby, tedy byla zvektorizována podle snímku obrazovky vytvořeného na stránkách Kůrovcová mapa. Vytvořená vrstva za každý zájmový rok obsahuje několik polygonů, které znázorňují čerstvě vytěžené plochy a suchý les vzniklé působením lýkožrouta smrkového.

5.3 Landsat 8 Collection 2 Level 2

Druhá kolekce družice Landsat 8 obsahuje data úrovně 2, která jsou založená na odrazivosti a teplotě povrchu a vychází z úrovně 1. Jsou to globální produkty dostupné od roku 2013 do současnosti. Produkty Surface Reflectance (SR) jsou generovány z kódu Surface Reflectance Code (LaSRC), který pomocí kalibračních parametrů z metadat generuje Top Of Atmosphere (TOA) Reflectance a TOA Brightness Temperature (BT) (Landsat Missions, 2022).

Na data TOA Reflectance jsou aplikovány postupy pro atmosférickou korekci za použití vstupních dat, jako vodní pára, ozón, optická tloušťka aerosolů (AOT) a digitální nadmořská výška (U.S. Geological Survey, 2021).

5.4 Tvorba spektrálních indexů

Z jednotlivých pásem družicových snímků byly pro již zmíněné dny vypočteny spektrální indexy, konkrétně Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) a Moisture Stress Index (MSI).

5.4.1 NDVI

Pro vybrané oblasti NPR Rejvíz byl jako první vypočítán spektrální index NDVI. Pro Landsat 8 se NDVI počítá pomocí pásma Band 4, které zastupuje červenou část spektra a pásma Band 5, které zastupuje blízkou infračervenou část spektra. Vegetační index NDVI byl vytvořen pomocí funkce Raster Calculator v programu ArcMap 10.8.1. Vzorec v Raster Calculatoru vypadal následovně:

Vzorec 5: výpočet NDVI pomocí pásem družice Landsat 8

$$\text{NDVI} = \frac{\text{float}(\text{Band 5} - \text{Band 4})}{\text{float}(\text{Band 5} + \text{Band 4})}$$

Výsledkem tohoto vzorce je samostatný rastr reprezentující index NDVI a byl vypočítán pro každý z vybraných dní od roku 2013 do roku 2021. Tyto vytvořené rastry byly následně oříznuty vektorovou vrstvou znázorňující pouze čisté smrkové porosty, aby byl výzkum prováděn jen na smrcích. Pro takové oříznutí byl použit nástroj Clip pro rastry v ArcToolboxu. Zobrazené rastry NDVI pro jednotlivé roky lze najít v *Příloze 1*.

5.4.2 NDMI

Pro další analýzy byl použit spektrální index NDMI, který zobrazuje úroveň vlhkosti ve vegetaci a sucho. Pro Landsat 8 se NDMI počítá pomocí pásma Band 5, které zastupuje blízkou infračervenou část spektra a pásma Band 6, které zastupuje krátkovlnnou infračervenou část spektra. Spektrální index NDMI byl také vytvořen pomocí funkce Raster Calculator v programu ArcMap 10.8.1. Vrozec v Raster Calculatoru vypadal následovně:

Vzorec 6: výpočet NDMI pomocí pásem družice Landsat 8

$$\text{NDMI} = \frac{\text{float}(\text{Band 5} - \text{Band 6})}{\text{float}(\text{Band 5} + \text{Band 6})}$$

Stejně jako u tvorby NDVI je výsledkem samostatný rastr, který byl vytvořen pro všechna již zmiňovaná období. Tyto výstupy byly také oříznuty vektorovou vrstvou čistého smrkového porostu nástrojem Clip pro rastry v ArcToolboxu. Zobrazené rastry NDMI pro jednotlivé roky lze najít v *Příloze 3*.

5.4.3 MSI

Posledním spektrálním indexem pro výzkum v NPR Rejvíz je MSI, který je citlivý na zvyšující se obsah vody v listech má rozmezí hodnot 0 až 3, zdravá vegetace je v rozsahu 0,4 až 2. Stejně jako NDMI je tvořen blízkým infračerveným a krátkovlnným infračerveným pásmem, ale v tomto případě se pouze vydělí krátkovlnné infračervené pásmo blízkým infračerveným pásmem. Vzorec v nástroji Raster Calculator vypadal následovně:

Vzorec 7: výpočet MSI pomocí pásem družice Landsat 8

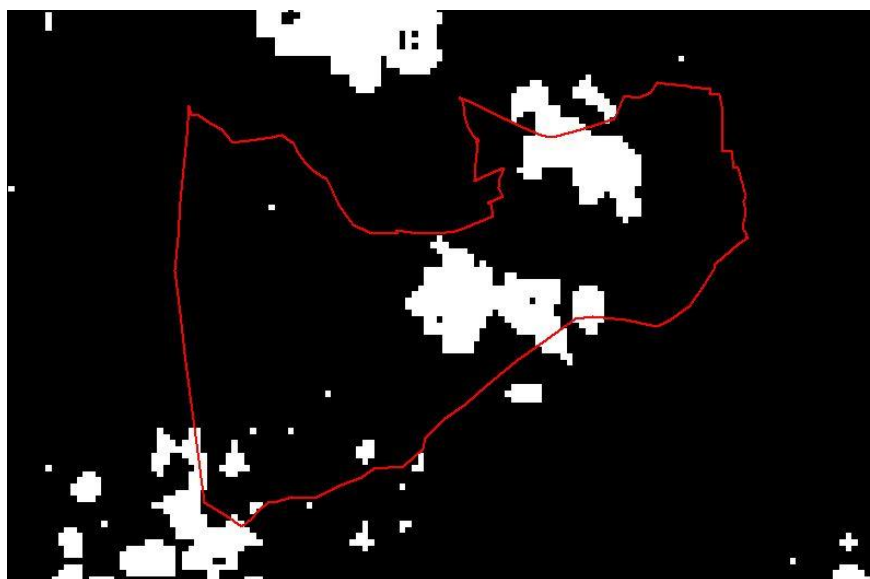
$$\text{MSI} = \frac{\text{float}(\text{Band 6})}{\text{float}(\text{Band 5})}$$

Tento vzorec byl aplikován pro všechny vybrané dny z let 2013 až 2021, čímž vzniklo 9 rastrů reprezentujících MSI. Tyto rastry byly rovněž oříznuty vektorovou vrstvou čistých smrkových porostů nástrojem Clip pro rastry v ArcToolboxu. Zobrazené rastry MSI pro jednotlivé roky lze najít v *Příloze 2*.

5.5 Zpracování snímků

V zájmovém území nebyla na většině snímků významně zastoupena oblačnost. Přesto bylo nutné u let 2014, 2015 a 2016 odstranit mraky a stíny mraků pomocí pásma Aerosol Quality Assessment (QA), které je klíčové pro výpočet atmosférických korekcí. Tato rastrová vrstva byla reklasifikována na vrstvu, která obsahuje pixely s hodnotou 1 a NoData. NoData reprezentují oblasti, kde se vyskytoval vliv oblačnosti a hodnota 1 reprezentuje zbytek, tedy bezoblačné oblasti. Tento postup byl aplikován u pásma Aerosol QA pro již zmíněné tři roky. Výsledným rastrem byly oříznuty vytvořené vrstvy znázorňující spektrální indexy NDVI, NDMI a MSI, čímž se odstranil vliv oblačnosti. *Obrázek 3* níže znázorňuje reklasifikovanou vrstvu v oblasti NPR Rejvíc (červeně) zobrazující oblačnost (bíle) a bezoblačné oblasti (černě) v NPR Rejvíc (červeně) v roce 2016

Obrázek 3: Reklasifikovaná vrstva zobrazující oblačnost (bíle) a bezoblačné oblasti (černě) v NPR Rejvíc (červeně) v roce 2016



5.6 Zpracování rastrových dat

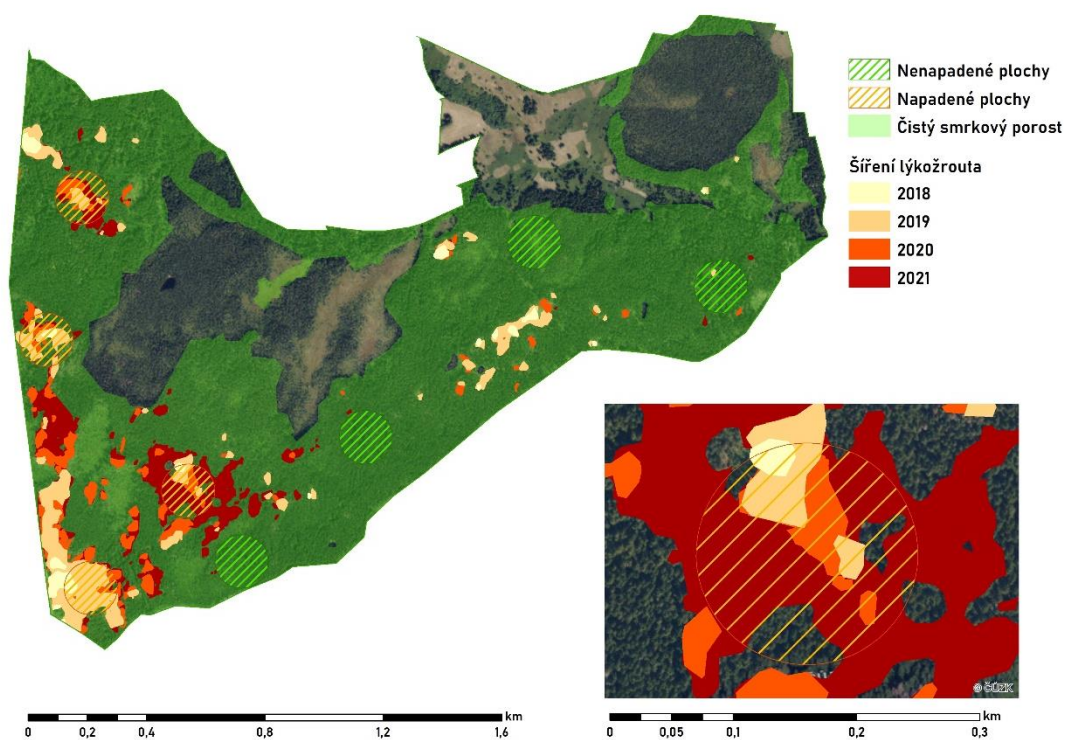
Aby bylo možné pracovat s hodnotami jednotlivých pixelů u rastrů znázorňujících spektrální indexy, byl rastr převeden na bodovou vrstvu, u které je každý pixel znázorněn jedním bodem, který nese jeho hodnotu. Pro vytvoření takové bodové vrstvy byla použita funkce Raster to Point v programu ArcMap 10.8.1. Tento postup byl aplikován pro všechny rastry spektrálních indexů. Dalším krokem byl export tabulek zastupujících bodové vrstvy do programu Microsoft Excel. Každá Shapefile bodová vrstva obsahuje soubor s příponou .dbf, kde jsou obsažené požadované hodnoty. Proto byl tento soubor pro každou bodovou vrstvu exportován do sešitu Excel, kde probíhala další práce s daty.

5.6.1 Tvorba porovnávacích ploch

Pro následující statistické testy byla vytvořena polygonová vrstva, která znázorňuje čtyři kruhové plochy o poloměru 90 metrů, které jsou umístěné na místech nejvyšší aktivity lýkožrouta. Poloměr o velikosti 90 metrů byl zvolen z toho důvodu, že prostorové rozlišení pixelů činí 30 metrů, tudíž jsou v porovnávací ploše od středu tři pixely po každé straně. Jednotlivé rastry spektrálních indexů byly oříznuty touto vrstvou porovnávacích ploch a pro následující práci s hodnotami jednotlivých pixelů byly opět rastry převedeny na bodovou vrstvu, kde každý bod reprezentuje jeden pixel.

Aby bylo možné spolu porovnávat oblasti napadené lýkožroutem s nenapadenými oblastmi, byly vytvořeny čtyři další kruhové plochy o poloměru 90 metrů pro oblasti, kde nepůsobil lýkožrout škody. Tyto plochy byly zasazeny do oblastí, kde se napříč všemi lety nevyskytovaly prázdné hodnoty v rastroch kvůli oblačnosti. Vrstvou těchto ploch byly opět oříznuty rastry spektrálních indexů a hodnoty z výsledných kruhových ploch byly převedeny do Excelu stejným způsobem, jako rastry spektrálních indexů.

Obrázek 4: Porovnávací plochy pro nenapadené a napadené stromy lýkožroutem smrkovým v NPR Rejvíz a detail jedné plochy v napadené oblasti lýkožroutem



Obrázek 4 znázorňuje čtyři plochy v oblastech, kde působil škody lýkožrout a čtyři plochy v oblastech nepoškozených lýkožroutem. Dále zobrazuje detail šíření lýkožrouta v jedné kruhové ploše v letech 2018 až 2021. Všechny tyto plochy jsou ve smrkových porostech v podobné věkové kategorii, která byla určena z porostní mapy

z webu Ústav pro hospodářskou úpravu lesů. Nejmladší porost je starý zhruba 120 let, nejstarší 170 let. Dále zobrazuje šíření lýkožrouta v průběhu let 2018 až 2021, jak je zobrazeno v legendě.

5.7 Statistické vyhodnocení

Pro ověření, zda se mezi sebou data spektrálních indexů v letech 2013 až 2021 liší, je vhodné použít statistické testy. Pomocí statistického vyhodnocení je možné určit míru odlišnosti spektrálních indexů v jednotlivých letech, která není na první pohled znát.

5.7.1 Shapiro-Wilkův test

Aby bylo možné počítat různé statistické testy, je potřeba ověřit, zda má základní soubor normální rozdělení. Toto lze ověřit například pomocí Shapiro-Wilkova testu. Pomocí tohoto testu bylo v programu RStudio prověřeno, zda mají plochy v nenapadených a napadených oblastech lýkožroutem v jednotlivých letech pro všechny spektrální indexy normální rozdělení.

Jelikož byla p hodnota Shapiro-Wilkova testu ve většině letech menší než 0,05; byla zamítnuta nulová hypotéza a tím bylo dokázáno, že data nemají normální rozdělení. Toto zjištění je důležité pro výběr následujících statistických testů, protože část z nich pracuje s předpokladem, že jsou data normálně rozdělena.

5.7.2 Kruskal-Wallisův test

Kruskal-Wallisův test, neboli neparametrická analýza variace, je neparametrická alternativa testu ANOVA v případě, že nejsou splněny podmínky normality pro parametrický test (Lepš & Šmilauer, 2016). Jelikož se data ukázala být nenormálně rozdělena, nelze použít pro testování více skupin najednou analýzu variace. Proto byl pro tento účel použit Kruskal-Wallisův test.

Pro každý spektrální index vznikly dva soubory hodnot, které byly testovány, tedy základní soubor nenapadených ploch a základní soubor napadených ploch v letech 2013 až 2021. Dohromady byl test vypočítán šestkrát, testovalo se vždy devět skupin mezi sebou (jedna skupina zastupuje jeden rok), kdy každá skupina obsahuje 110 hodnot (jedna hodnota znázorňuje jeden pixel vyjadřující daný spektrální index), které zastupují porovnávací plochy.

5.7.3 Wilcoxonův test

Tuto statistickou metodu lze považovat za neparametrickou obdobu párového t-testu. Test je založen na spočítání rozdílů mezi hodnotami jednotlivých pozorování v párech a následnému seřazení rozdílů od nejmenšího k největšímu podle jejich velikosti

absolutní hodnoty. Pozorování, která mají nulový rozdíl jsou z výpočtu vyloučena (Lepš & Šmilauer, 2016).

Pro zjištění, zda existuje významný statistický rozdíl mezi napadenými a nenapadenými plochami pro jednotlivé roky byl použit Wilcoxonův test. Wilcoxonův test byl vypočítán v programu RStudio, kam byly importovány hodnoty všech spektrálních indexů zastoupených porovnávacími plochami. Aby měly rozdíly mezi jednotlivými plochami co nejmenší vliv na toto statistické vyhodnocení, byla pro výpočet použita pouze jedna plocha zastupující nenapadené stromy a jedna plocha zastupující napadené stromy. Pro statistický výpočet byla tedy porovnávána dvojice ploch pro každý rok v letech 2013 až 2021. Jedna porovnávací plocha obsahuje 32 pixelů, to znamená, že bylo porovnáváno 32 hodnot pro nenapadené a 32 hodnot pro napadené plochy. U každého spektrálního indexu byl tento test vypočítán devětkrát.

6 Výsledky

6.1 Kruskal-Wallisův test

Tabulka 2: p hodnoty Kruskal-Wallisova testu pro jednotlivé spektrální indexy u napadených a nenapadených ploch

Kruskal-Wallisův test (čtyři plochy)		
	Nenapadené plochy	Napadené plochy
MSI	3,86643E-94	1,16555E-127
NDMI	3,87983E-94	1,16717E-127
NDVI	3,34500E-107	9,36081E-127

Výsledky Kruskal-Wallisova testu v *Tabulka 2* znázorňují p hodnotu u jednotlivých indexů, kde byly jako základní soubor považovány porovnávací plochy pro nenapadené a napadené porosty. Výsledná hodnota p je u všech výsledků mnohem menší než hodnota 0,05; což znamená zamítnutí nulové hypotézy a výsledky se od sebe statisticky významně liší.

U nenapadených ploch lze u MSI a NDMI pozorovat velmi podobné hodnoty, naproti tomu NDVI vykazuje menší hodnotu p, než MSI a NDMI. To znamená, že u NDVI byl rozdíl statisticky průkaznější než u zbylých dvou indexů.

U napadených ploch jsou opět velmi podobné p hodnoty u MSI a NDMI. V tomto případě má NDVI nejvyšší hodnotu a MSI nejnižší hodnotu. To ukazuje, že oproti nenapadeným plochám NDVI zobrazuje mezi lety nejméně statisticky průkazný rozdíl ve srovnání s ostatními indexy, MSI má naopak nejvíce statisticky průkazné rozdíly.

Tabulka 3: p hodnoty Kruskal-Wallisova testu pro jednotlivé spektrální indexy u jedné napadené a nenapadené plochy

Kruskal-Wallisův test (jedna plocha)		
	Nenapadené plochy	Napadené plochy
MSI	8,56178E-26	1,43334E-39
NDMI	8,56178E-26	1,43769E-39
NDVI	1,52253E-25	1,89998E-42

Jelikož byla p hodnota u Kruskal-Wallisova testu velmi nízká, byl tento test vypočítán ještě jednou pouze pro jednu nenapadenou plochu a jednu napadenou plochu, aby byl eliminován rozdíl mezi jednotlivými plochami v jednom roce. Výsledky druhého testu lze vidět v *Tabulka 3*, která má na rozdíl od *Tabulka 2* vyšší hodnoty p, ale stále jsou velmi nízké na to, aby mohla být potvrzena nulová hypotéza. Jak lze v *Tabulka 3* vidět, tak jsou hodnoty indexů velmi podobné u MSI a NDVI jak u nenapadené, tak u napadené plochy.

Výsledky testu ukazují, že nejméně statisticky průkazný rozdíl mezi lety u nenapadené plochy je u NDVI, kde je p hodnota nejvyšší, naopak nejvíce statisticky průkazný rozdíl je u zároveň u MSI a NDMI, protože mají p hodnotu stejnou. U napadené plochy je nejvíce průkazný rozdíl u NDVI a nejméně průkazný u NDMI.

Výsledek druhého testu je tedy odlišný od výsledku prvního testu, kde byl u nenapadených ploch nejméně statisticky průkazný rozdíl mezi lety u NDMI, ale nyní je nejmenší rozdíl u NDVI. U napadených ploch byl nejméně statisticky průkazný rozdíl u NDVI, ale u druhého testu vykazuje NDVI největší rozdíl, naopak má nyní nejmenší rozdíl NDMI.

6.2 Wilcoxonův test

Tabulka 4: Wilcoxonův test zobrazující p hodnotu napadené a nenapadené plochy pro spektrální indexy v letech 2013 až 2021

Wilcoxonův test									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
MSI	0,247	0,571	0,057	4,69E-09	0,598	0,055	0,526	3,14E-11	5,77E-10
NDMI	0,247	0,571	0,057	4,69E-09	0,598	0,055	0,526	3,14E-11	5,77E-10
NDVI	0,063	0,095	0,057	0,847	0,026	0,847	0,158	6,17E-08	7,68E-07

Tabulka 4 znázorňuje výsledek Wilcoxonova testu, který porovnával dvě plochy, z nichž jedna zastupuje oblast nenapadenou lýkožroutem a druhá zastupuje oblast napadenou lýkožroutem. Tento test byl vypočítán pro každý rok zvlášť a výsledkem je p hodnota, která buď potvrzuje nulovou hypotézu, tedy že mezi dvěma plochami není významný statistický rozdíl, nebo ji zamítá. Podobně jako u Kruskal-Wallisova testu jsou výsledky MSI a NDMI totožné, ale NDVI se od těchto dvou indexů odchyluje.

V letech 2013 až 2015 není statisticky významný rozdíl mezi plochami u všech spektrálních indexů. Rok 2015 ukazuje u všech spektrálních indexů stejnou hodnotu. MSI a NDMI mají velkou odchylku v roce 2016, kde je p hodnota velmi nízká a tento výsledek potvrzuje, že mezi plochami je významný statistický rozdíl. U NDVI je odchylka v roce 2017, ale p hodnota není tak nízká jako u MSI a NDMI v roce 2016 a rozdíl je tedy menší, ale stále statisticky významný. Roky 2018 a 2019 u všech spektrálních indexů také nepředpokládají významný statistický rozdíl. Významný pokles nastává u všech spektrálních indexů v letech 2020 a 2021, který naznačuje, že jsou dvojice mezi sebou velmi odlišné. P hodnota NDVI je vyšší než u zbylých dvou indexů jak v roce 2020, tak v roce 2021. To znamená, že mezi dvojicí nebyl takový rozdíl jako u MSI a NDMI, ale přesto byl statisticky významný. Hodnoty MSI a NDMI jsou opět stejné, mezi plochami je u obou indexů stejný statistický rozdíl.

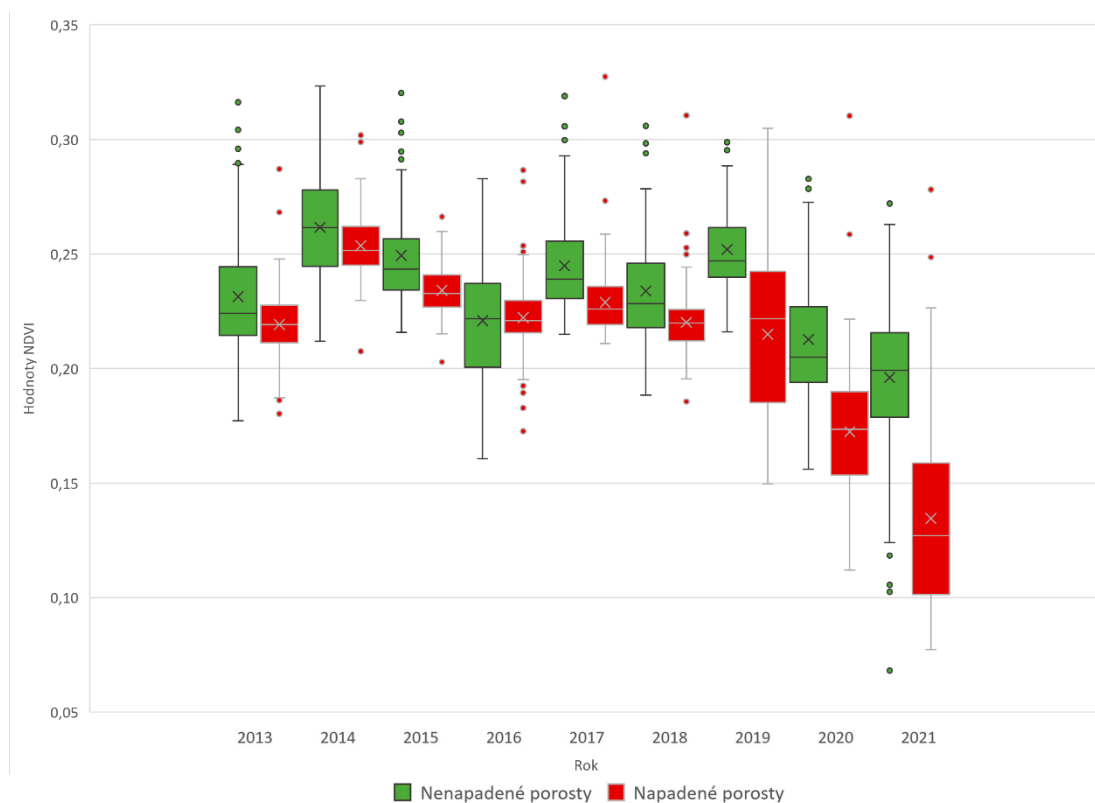
Výsledky tohoto testu ukazují, že rozdíly u MSI a NDMI jsou ve všech případech stejné, tudíž tyto indexy reagují na změny mezi napadenými a nenapadenými plochami velmi podobně, ne-li stejně. NDVI je od zbylých dvou indexů odlišné a rozdíly u kritických let, kdy byla aktivita lýkožrouta nejvyšší, jsou menší než u MSI a NDMI. Tento výsledek koresponduje s výsledky Kruskal-Wallisova testu, kde byly rozdíly mezi jednotlivými lety u nenapadených i napadených ploch také nejméně statisticky průkazné.

6.3 Zobrazení spektrálních indexů

Pro lepší reprezentaci výsledných hodnot byly pro každý index vytvořeny dva grafy. Jedná se o boxplot, který porovnává kruhové plochy v oblastech nenapadených lýkožroutem s plochami v napadených oblastech. Tento boxplot zobrazuje vývoj stavu porostů podle tří indexů v kruhových referenčních plochách v průběhu let 2013 až 2021. Druhý typ grafu zobrazuje barevnými liniemi jednotlivé roky v celém smrkovém porostu, ne jen v oblastech uvnitř referenčních ploch.

6.3.1 NDVI

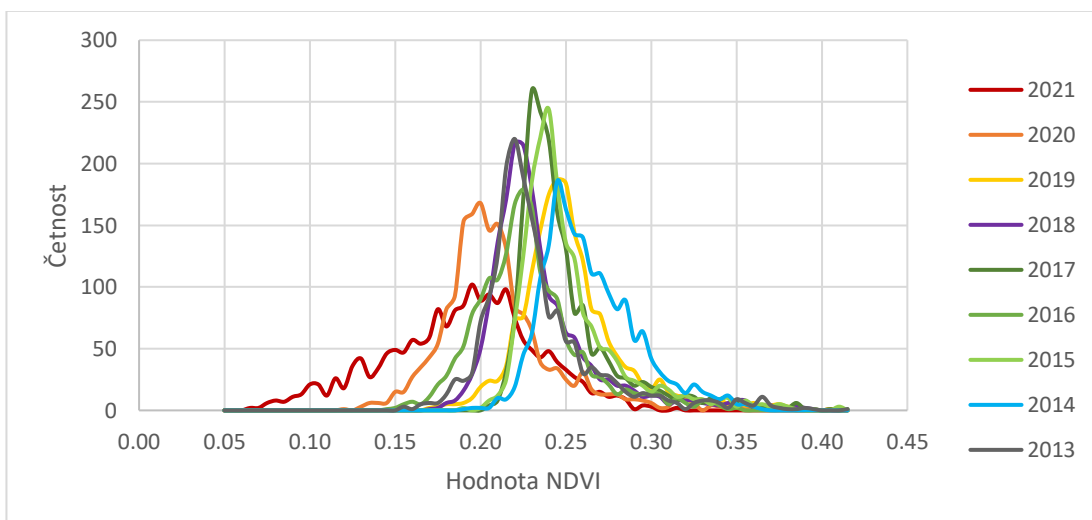
Graf 1: Hodnoty NDVI napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021



Graf 1 znázorňuje a porovnává hodnoty NDVI nenapadených a napadených porostů lýkožroutem smrkovým v letech 2013 až 2021. U boxplotu medián značí, že 50 % dat je nad mediánem a 50 % dat je pod mediánem. Kvartily rozdělují data na čtvrtiny,

první kvartil značí, že je čtvrtina hodnot pod jeho hranicí a tři čtvrtiny hodnot nad jeho hranicí, třetí kvartil naopak značí, že je čtvrtina hodnot nad jeho hranicí. Medián dosáhl nejvyšších hodnot v roce 2014 u napadených i nenapadených ploch, zatímco nejnižších hodnot dosáhl u napadených i nenapadených ploch v roce 2021. Tento pokles v roce 2021 u zdravých porostů by mohl být způsoben tím, že byl použit snímek z konce října, kdy už vegetace začíná přirozeně usychat a také tím, že v tomto období byl pozorován nejmenší úhrn srážek, který na daném území činil 17 mm. Zdravé porosty vykazují stabilnější hodnoty, které se od sebe tolik neliší jako napadené porosty. U napadených ploch jsou kromě roku 2014 hodnoty v letech 2013 až 2018 poměrně stabilní, ale od roku 2019 je znatelný pokles, který pokračuje až do roku 2021. Tento pokles je z důvodu napadení smrků lýkožroutem smrkovým, v jehož důsledku začaly na území NPR Rejvíz usychat stromy v roce 2018.

Graf 2: Hodnoty NDVI celého smrkového porostu v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021

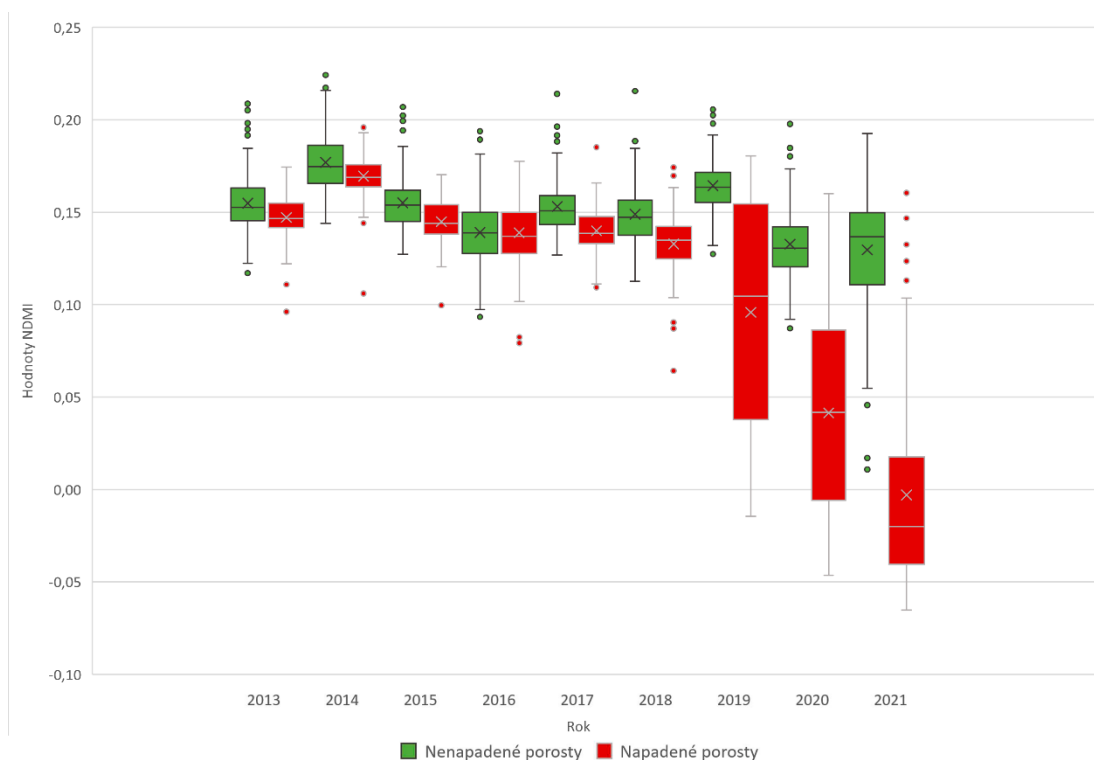


Graf 2 zastupuje hodnoty NDVI v celém smrkovém porostu během jednotlivých let od roku 2013 až do roku 2021, kdy bylo napadení smrkových porostů lýkožroutem nejintenzivnější. Tento graf poměrně koresponduje s boxplotem, u kterého výsledky vycházejí podobně. Křivka roku 2014 je nejčetněji zastoupena ve vyšších hodnotách, stejně jako u boxplotu, kde tento rok vykazoval nejvyšší hodnoty.

Nejhorší zdravotní stav smrkových porostů podle tohoto spektrálního indexu vykazuje rok 2021, kde jsou nejčetněji zastoupeny nejnižší hodnoty. Hned po roku 2021 je rok 2020, kde jsou také velmi čteně zastoupeny nízké hodnoty. Zbylé roky vykazují poměrně podobné hodnoty, kromě roku 2019, jehož křivka se vyskytuje ve vyšších hodnotách než u zbylých let, stejně jako u boxplotu.

6.3.2 NDMI

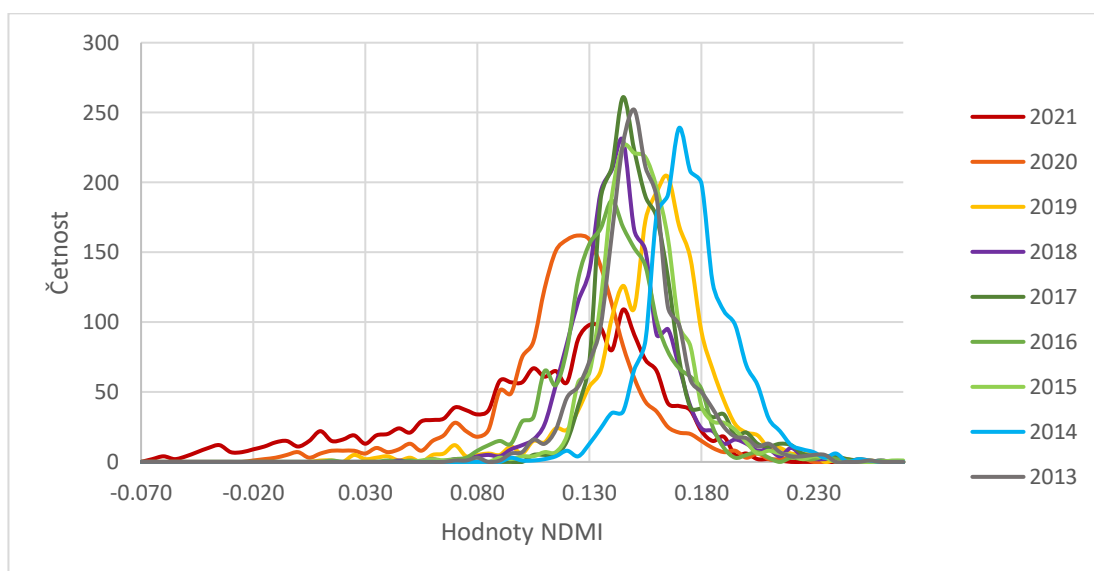
Graf 3: Hodnoty NDMI napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021



Graf 3 zobrazuje hodnoty NDMI u zdravých porovnávacích ploch, které nebyly napadeny lýkožroutem a hodnoty NDMI u porovnávacích ploch, které byly napadeny lýkožroutem. Oproti NDVI nevykazují zdravé plochy takové odchylky a data jsou stabilnější. Stejně jako u NDVI lze pozorovat nejvyšší hodnoty v roce 2014 jak u nenapadených, tak u napadených ploch. Tentokrát není nejnižší hodnota mediánu u nenapadených porostů v roce 2021, ale lze ji zpozorovat v roce 2020. Rozdíl mezi těmito dvěma indexy je také v rozsahu prvního a třetího kvartilu v jednotlivých letech u zdravých a nemocných ploch, kdy u NDMI jsou do roku 2018 rozsahy kvartilů těchto dvojic až na výjimky téměř identické, ale u NDVI mají kvartily nenapadených ploch mnohem větší rozsah.

Hodnoty indexu u napadených ploch začaly rapidně klesat v roce 2019 a tento pokles pokračuje až do roku 2021. Ale již v roce 2017 lze pozorovat, že třetí kvartil napadených ploch je téměř shodný s prvním kvantilem nenapadených ploch, což vypovídá o mírnějším poklesu hodnot NDMI nemocných stromů.

Graf 4: Hodnoty NDMI celého smrkového porostu v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021

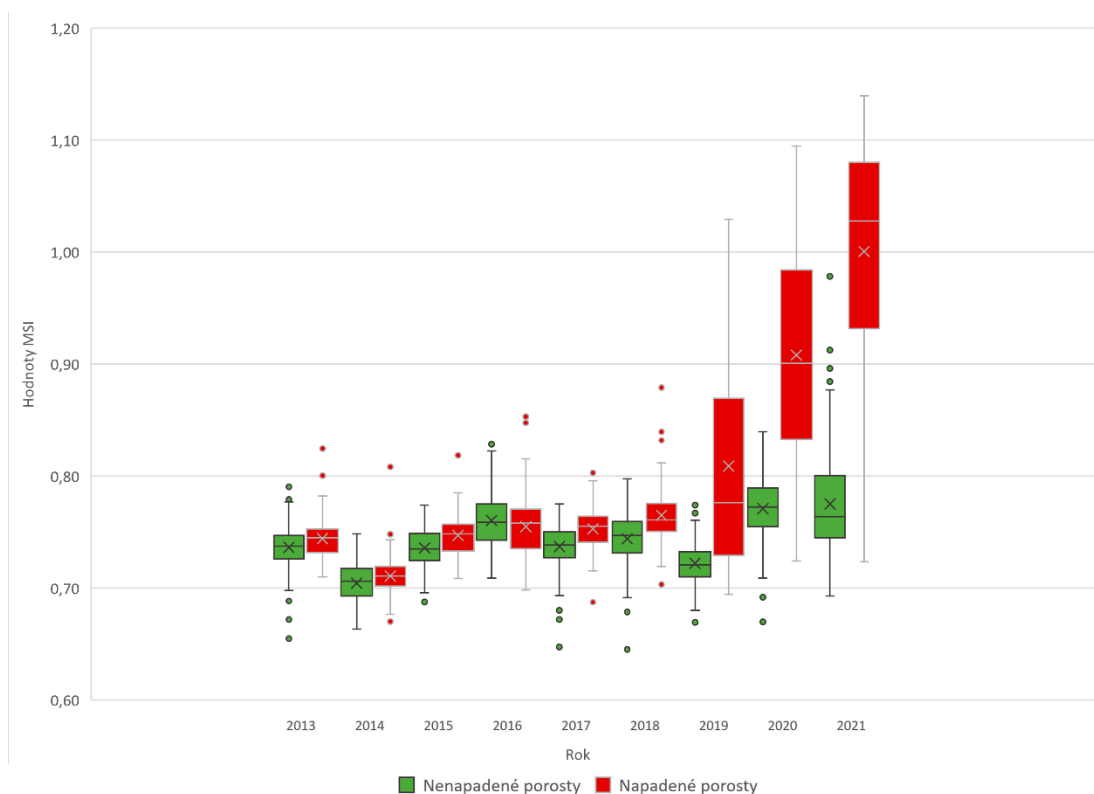


Na Graf 4 lze vidět hodnoty NDMI, které na rozdíl od boxplotu nezastupují pouze vybrané porovnávací plochy, ale zastupují celý smrkový porost v průběhu let. Oproti NDVI tento graf ukazuje, že nejhorší hodnoty indexu, a tudíž nejvíce nemocné smrky se vyskytovaly v roce 2020, stejně jako ukazuje boxplot. Roky 2013, 2015, 2017 a 2018 působí velmi podobně a jsou mezi nimi minimální rozdíly. Hodnoty tohoto indexu zobrazují nejlepší výsledky opět v roce 2014, dále rok 2019 vykazuje také velmi vysokou četnost vysokých hodnot, tudíž smrkové porosty v tomto roce trpí menším stresem než ostatní roky.

Podle tohoto indexu vykazují smrkové porosty nejvíce vlhkosti v roce 2014 a 2019, naopak nejméně vlhkosti se ve vegetaci vyskytuje v letech 2020 a 2021. Tento index se zdá být citlivější na extrémnější hodnoty, které jsou z výsledků lépe znát. Průměrné hodnoty s malými odchylkami jsou zobrazeny podobně bez větších rozdílů.

6.3.3 MSI

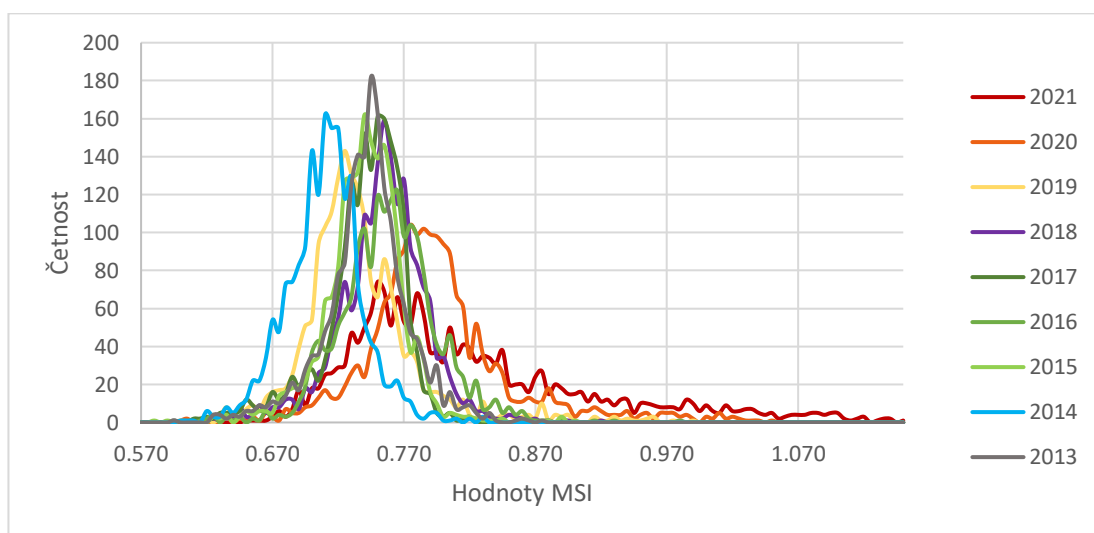
Graf 5: Hodnoty MSI napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021



Graf 5, stejně jako Graf 1 a Graf 3, zobrazuje hodnoty spektrálního indexu napadených a nenapadených porostů v letech 2013 až 2021. V tomto případě se jedná o MSI, který na rozdíl od předchozích indexů zobrazuje vegetaci ve stresu vyššími hodnotami. Mrtvé stromy a stromy ve stresu tedy vykazují rostoucí trend. Ale i v tomto případě platí, že v roce 2014 index zobrazuje obě plochy jako nejzdravější. U nenapadených ploch má medián nejvyšší hodnotu v roce 2020, tedy stejně jako u NDMI, kde má medián v roce 2020 nejnižší hodnotu. Od roku 2019 začínají hodnoty napadených ploch výrazně narůstat, takže jsou stromy více ve stresu a tato změna koresponduje s napadením ploch lýkožroutem.

Tento index vypadá velmi podobně jako NDMI, ale od NDVI se liší. Podle těchto boxplotů vyplývá, že je NDVI citlivější na změny mezi jednotlivými lety jak u nenapadených, tak u napadených porostů. Na rozdíl od toho jsou NDMI a MSI citlivější na projev extrémnějších hodnot a skupiny s podobnými hodnotami nezobrazují tak odlišně.

Graf 6: Hodnoty MSI celého smrkového porostu v NPR Rejvíz v letech 2013 až 2021



Graf 6 zobrazuje hodnoty MSI v čistém smrkovém porostu uvnitř NPR Rejvíz v průběhu let 2013 až 2021. Výsledky v tomto grafu jsou velmi podobné jako u NDMI, ale v tomto indexu vyšší hodnoty znamenají větší stres vegetace. Z grafu vyplývá, že stejně jako u zbylých spektrálních indexů se nejlépe jeví rok 2014, který má zde nejčetněji zastoupené nejnižší hodnoty a působí nejzdravěji. Dále kromě roků 2019, 2020 a 2021 působí všechny ostatní křivky velmi podobně, tudíž smrkové porosty v těchto letech vykazovaly velmi podobné hodnoty a nebyly zde zaznamenány větší odchylky.

Rok 2019 hned vedle roku 2014 zastupuje nejnižší hodnoty, lze tedy předpokládat, že se i v tomto roce navzdory počátku aktivity lýkožrouta dařilo smrkovým porostům dobře. V roce 2020 je na první pohled patrná největší četnost hodnot znázorňujících vyšší stres vegetace v porovnání s ostatními lety. V roce 2021 jsou také smrkové porosty ve stresu a trpí nedostatkem vlhkosti.

7 Diskuse

Monitoring šíření lesních škůdců z družicových dat vysokého rozlišení (například z družic Landsat a Sentinel) oproti ostatním metodám DPZ (drony a letadla) je poměrně nevýhodný v tom, že je nutné si vybírat snímky pouze z pevně daných časových intervalů, kdy se družice vyskytuje nad požadovaným územím. Dále jsou snímky velmi často zatíženy oblačností, a proto jsou některá data pro výzkum nepoužitelná. Výhodou družicových dat je například to, že je možné získat družicové snímky online ve stejném časovém intervalu po dobu mnoha let, takže jsou data velmi dobře použitelná pro dlouhé časoprostorové analýzy.

Jelikož má družice Landsat 8 ve většině pásmech rozlišení 30 metrů, není možné zkoumat hodnoty spektrálních indexů u jednotlivých stromů a v této práci se hodnotí plošný přístup. V porostní mapě také nemusí být zaznamenány všechny oblasti, kde se nevyskytuje les. Může se jednat například o nově vzniklé mýtiny, nebo světliny mezi stromy. V takových případech mohou být ovlivněny hodnoty spektrálních indexů, které mají vliv na výsledky statistických testů.

Výsledky spektrálních indexů velmi ovlivňuje datum pořízení snímku, a jelikož byly snímky pořízeny v rozmezí měsíců červenec až říjen, je potřeba brát ohledy na fenologické fáze vegetace. Rok 2014 vykazuje u všech spektrálních indexů nejlepší hodnoty, a tudíž se porostům dařilo v tomto období nejlépe, ale autorka se může jen domnívat, čím to bylo způsobené. Podle českého hydrometeorologického ústavu se na území v tento rok nevyskytovaly výrazně vyšší srážky oproti ostatním rokům, proto zřejmě existují jiné faktory, které tuto odchylku způsobují. Začínající pokles hodnot (u MSI nárůst hodnot) v roce 2019 velmi pravděpodobně ovlivňuje napadení smrkových porostů lýkožroutem, výsledky spektrálních indexů lze totiž porovnat s kůrovcovou mapou, která zobrazuje šíření lýkožrouta a hodnoty indexů zobrazující horší stav vegetace velmi dobře korespondují s oblastmi, kde se podle kůrovcové mapy tento lesní škůdce vyskytoval.

Kůrovcová mapa poskytuje data pouze od roku 2018, což může ovlivnit porovnání hodnot spektrálních indexů se skutečným šířením lýkožrouta, protože dřívější data nejsou dostupná a v letech 2013 až 2017 nelze napadení porostů lýkožroutem ověřit. Nicméně i podle spektrálních indexů začíná být aktivita lýkožrouta v NPR Rejvíz výrazně patrná až od roku 2018, z toho lze usuzovat, že se v dané oblasti začaly objevovat známky přítomnosti lýkožrouta až v roce 2018. Data z kůrovcové mapy ukazují, že se v roce 2018 lýkožrout vyskytoval pouze na malém území na třech ze čtyř ploch zastupujících napadené porosty, jedna plocha tedy ani v roce 2018 nebyla

lýkožroutem napadena. Skutečnost, že se lýkožrout v jednotlivých letech nevyskytoval na všech plochách rovnoměrně může ovlivnit výsledky statistických testů, protože se na těchto plochách vyskytují i hodnoty znázorňující zdravou vegetaci. Kdyby hodnoty uvnitř čtyř ploch znázorňujících napadené porosty obsahovaly pouze nemocné či mrtvé stromy, byly by výsledné hodnoty statistických testů pravděpodobně větší a rozdíl mezi referenčními plochami patrnější.

Výsledky Wilcoxonova testu u MSI a NDMI v roce 2016 poukazují na statisticky významný rozdíl mezi referenčními plochami. Jedno z možných vysvětlení by mohlo být to, že tyto dva indexy predikovaly přítomnost lýkožrouta již v roce 2016. Tuto teorii ale nepodporuje výsledek z roku 2017 a 2018, který nepoukazuje na rozdíl mezi referenčními plochami jako statisticky významný. Společný statisticky významný rozdíl u všech tří indexů nastal až v roce 2020. Tento případ platí i pro NDVI, ale oproti MSI a NDMI byla odchylka v roce 2017, ne v roce 2016. Podle této teorie, tedy že rozdíl mezi referenčními plochami predikuje aktivitu lýkožrouta, se pro mapování jeho šíření a aktivity pomocí spektrálních indexů jeví jako vhodnější MSI a NDMI, protože byl rozdíl zachycen dříve než u NDVI.

Podle Havašová, et al. (2015) se NDVI jeví jako nejméně vhodný spektrální index pro mapování úbytku lesů, naopak MSI a NDMI jsou velmi vhodné pro hledání a mapování ohnisek lýkožrouta. Výsledky MSI a NDMI v této práci působí velmi podobně a lze je označit za stejně citlivé pro mapování této problematiky, výsledky statistických testů porovnávacích rozdílů mezi napadenými a nenapadenými plochami vychází u těchto dvou spektrálních indexů v podstatě stejně. Tato podobnost je způsobena tím, že výpočet MSI a NDMI se zakládá na poměru stejných pásem (NIR a SWIR), ale poměr NDMI je normovaný. Ještě před počátkem napadení lýkožroutem zkoumané lokality působí tyto dva indexy beze změn a hodnoty indexů v letech 2013 až 2019 jsou poměrně stabilní, toto tvrzení ale neplatí pro NDVI.

Podle vytvořených boxplotů z dat spektrálních indexů působí NDVI ze všech tří spektrálních indexů nejcitlivěji na drobnější změny v průběhu let i u zdravých porostů, naopak hodnoty napadených porostů nevykazují takové odchylky od nenapadených porostů. I z výsledku Wilcoxonova testu vyplývá, že mají dvojice nenapadených a napadených ploch v letech 2020 a 2021 menší statistický rozdíl než u MSI a NDMI.

Alvino, et al. (2020) ve své studii porovnává spektrální indexy pro zjištění variability u zavlažovaných plodin kukuřice. Mezi jeden ze spektrálních indexů patří mimo jiné i NDVI, jehož výsledky vyhodnocuje pro monitoring jako dobré, ale je méně citlivý na vysoké množství biomasy. MSI vychází jako velmi vhodný pro sledování obsahu vody

v listech kukuřice. Obecně v této studii ale uvádí, že jsou všechny spektrální indexy shodné a všechny lze použít pro rozlišování fenologických fází kukuřice. Dále z výzkumu Bárta, et al. (2021) vyplývá, že mezi velmi slibné způsoby pro včasnou detekci napadení smrkových monokultur patří tasselled cap wetness (TCW) a normalizovaný diferenční index kombinující pásma NIR a SWIR.

Podle Latifi, et al. (2013) je vhodné a lze použít satelitní snímky i se středním rozlišením s vhodnými referenčními daty pro mapování plošného napadení porostů lýkožroutem v pokročilých stádiích. Näsi et al. (2015) také uvádí, že pro průzkum ohnisek lýkožrouta smrkového na rozsáhlých územích jsou velmi vhodné snímky se středním a nízkým rozlišením. Naopak výsledky bakalářské práce prokazují vhodnost multispektrálních snímků vysokého rozlišení pro monitoring zdravotního stavu a šíření lýkožrouta v regionálním/lokálním měřítku.

8 Závěr a přínos práce

Cílem bakalářské práce bylo vypočítat tři spektrální indexy zobrazující šíření lýkožrouta smrkového a zdravotní stav smrkových porostů v NPR Rejvíz za použití družicových dat Landsat 8 v letech 2013 až 2021. Pomocí statistických testů byly porovnávány hodnoty indexů NDVI, NDMI a MSI ve zdravých smrkových porostech nenapadených lýkožroutem s napadenými smrkovými porosty. Byly vytvořeny referenční plochy, které reprezentovaly smrkové porosty, kde se lýkožrout po celou dobu nevyskytoval a porosty, kde začal lýkožrout aktivně působit.

Všechny již zmíněné indexy jsou vhodné pro zobrazování stromů napadených lýkožroutem, ovšem reagují rozdílně na meziroční změny. Jak bylo prokázáno ve výsledcích u statistických testů, NDVI se svými výsledky od zbylých dvou indexů liší a naopak MSI s NDMI reagují velmi podobně. Wilcoxonův test poukazuje na to, že u NDVI jsou rozdíly mezi nenapadenými a napadenými smrkami u kritických let menší než u zbylých dvou indexů, tudíž nezobrazuje nejkritičtější hodnoty tak výrazně. Podle výsledků v této bakalářské práci působí NDVI citlivěji na menší změny, které nejsou tak znatelné, naopak MSI a NDMI tyto menší změny spíše zanedbávají a jsou znatelné hlavně extrémnější odchylky od normálních hodnot. Z tohoto důvodu se indexy MSI a NDMI ukazují pro potřeby dlouhodobého časoprostorového monitoringu zdravotního stavu lesních porostů jako vhodnější nástroj, než NDVI.

Bakalářská práce prokazuje, že používání metod DPZ, zvláště družicových dat, je vhodné pro dlouhodobé pozorování zdravotního stavu vegetace pomocí spektrálních indexů a že vybrané spektrální indexy zachycují poškození smrkových porostů lýkožroutem. Dále prokazuje, že se hodnoty jednotlivých spektrálních indexů chovají

při časoprostorové analýze družicových snímků rozdílně a že každý z nich může být vhodný pro jiný typ výzkumu. V dalším navazujícím výzkumu by mohly být využity i další spektrální indexy využívající odlišné části elektromagnetického spektra (například zelené pásmo, Red Edge, termální apod.).

9 Přehled literatury a použitých zdrojů

Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. & Heurich, M., 2019: Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus*, L.) Infestation. *Remote Sensing*: 1–10.

Alvino, F. C. G., et al., 2020: Vegetation indices for irrigated corn monitoring. *Engenharia Agricola*: 1–12.

AOPK ČR, ©2022: Národní přírodní rezervace Rejvíz. (Online) [cit. 01.02.2022], dostupné z: <https://www.ochranaprirody.cz/lokality/?idlokality=371>

Bárta, V., Lukeš, P. & Homolová, L., 2021: Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*: 1–2.

custom-scripts, ©2022: Moisture index. (Online) [cit. 20.3.2022], dostupné z: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/msi/>

custom-scripts, ©2022: Normalized Difference Moisture Index (NDMI). (Online) [cit. 20.03.2022], dostupné z: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndmi/>

Dobrovolný, P., 1998: Dálkový průzkum Země – digitální zpracování obrazu. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, katedra geografie, Brno.

Franc, J., 2005: NPR Rejvíz v Jeseníkách. (Online) [cit. 01.02.2022], dostupné z: <https://www.turistika.cz/mista/npr-rejviz-v-iesenikach/detail>

Gao, B. C., 1996: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*: 1–3.

Halounová, L. & Pavelka, K., 2005: Dálkový průzkum Země. ČVUT, Praha.

Havašová, M., Bucha, T., Ferenčík, J. & Jakuš, R., 2015: Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Annals of forest research*: 1–13.

Horák, J., 2014: Dálkový průzkum Země. VŠB-TU Ostrava, Ostrava.

Jakuš, R., Holuša, J. & Blaženec, M., 2015: Principy ochrany dospělých smrkových porostů před podkorním hmyzem. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

kurovcovamapa.cz, ©2022: Kůrovcová mapa (Online) [cit. 10.03.2022], dostupné z: <https://www.kurovcovamapa.cz/>

kurovcoveinfo.cz, ©2016: Lýkožrout smrkový - *Ips typographus* (Online) [cit. 31.10.2021], dostupné z: <https://www.kurovcoveinfo.cz/skudci/lykozrout-smrkovy>

Klouček, T. a další, 2019: Detekce napadení lesních porostů pomocí bezpilotních leteckých prostředků – Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Komárek, J., 2021: Úvod do provozu bezpilotních leteckých systémů. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.

Komárek, J. & Vávra, M., 2019. Drony v environmentální praxi. Ochrana přírody 6: 14–17.

Kropáček, J., Moravec, D. & Komárek, J., 2020: Dálkový průzkum – I. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Landsat Missions, ©2022: Landsat Collection 2 Level-2 Science Products (Online) [cit. 04.03.2022], dostupné z: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>

Latifi, H., Schumann, B., Kautz, M. & Dech, S., 2013: Spatial characterization of bark beetle infestations by a multirate synergy of SPOT and Landsat imagery. ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT 186: 441–453.

Lepš, J. & Šmilauer, P., 2016: Biostatistika. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice.

Limbergová, M., 2021: Národní přírodní rezervace Rejvíz – nejrozsáhlejší rašeliniště ve Slezsku a na Moravě (Online) [cit. 01.02.2022], dostupné z: <https://primavylety.cz/narodni-prirodni-rezervace-rejviz-nejrozsahlejsi-moravske-raseliniste/>

Majer, D., 2020: Druhy oběžných drah (Online) [cit. 08.12.2022], dostupné z: <https://kosmonautix.cz/2020/04/druhy-obeznych-drah/>

Meddens, A., Hicke, J., Vierling, L. & Hudak, A., 2013: Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. Remote Sensing of Environment 123: 49–58.

Moravec, D., Komárek, J., López-Cuervo Medina, S. & Molina, I., 2021: Effect of Atmospheric Corrections on NDVI: Intercomparability. remote sensing: 1–4.

NASA, 2021. Landsat Science (Online) [cit. 29.11.2021], dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov>

Näsi, R. a další, 2015: Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *remote sensing* 7: 15467–15493.

Senf, C., Pflugmacher, D., Wulder, M. & Hostert, P., 2015: Characterizing spectral–temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment* 170: 166–177.

Skuhravý, V., 2002: Lýkožrout smrkový (*Ips typographus* L.) a jeho kalamity. Agrospoj, Praha.

Surový, P. a další, 2019: Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Tichopádová, R., ©2002-2022. Naučná stezka Rejvív - Mechové jezírko. (Online) [cit. 01.02.2022], dostupné z: <http://www.jeseniky.net/naucna-stezka-rejviz-mechove-jezirko>

U.S. Geological Survey, 2021: Landsat 8 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Sioux Falls, 42 s.

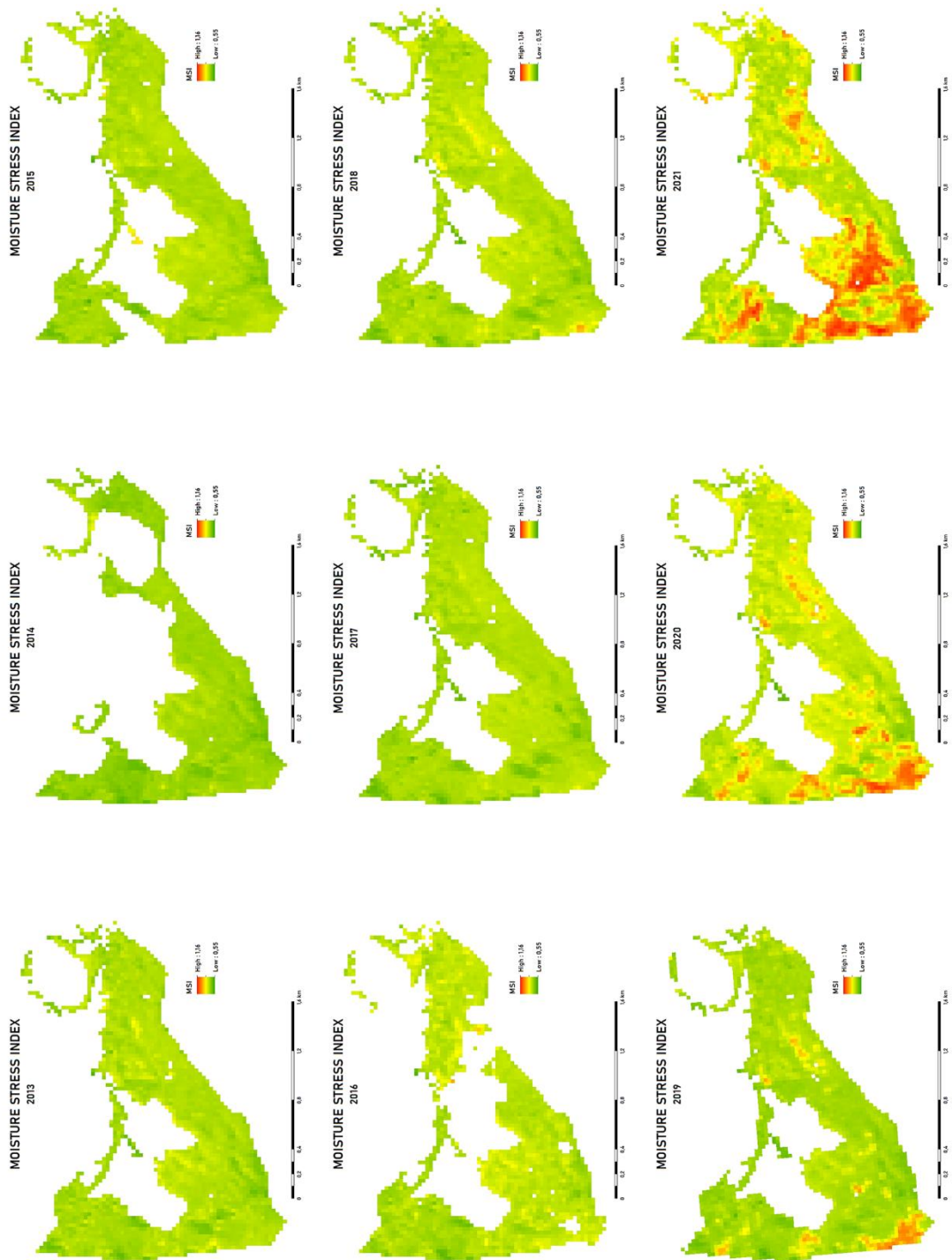
Xue, J. & Su, B., 2017: Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors* : 1–18.

10 Přílohy

Příloha 1: NDVI v NPR Rejvív v letech 2013 až 2021



Příloha 2: MSI v NPR Rejvíc v letech 2013 až 2021



Příloha 3: NDMI v NPR Rejvíc v letech 2013 až 2021

