

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



**MAPOVÁNÍ PROSTOROVÉ DYNAMIKY LESNÍCH
DISTURBANCÍ NA SEVERNÍ MORAVĚ**

Diplomová práce

Studijní obor: Krajinné a pozemkové úpravy

Autor práce: Bc. Monika Nenáhlová

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

Praha 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Monika Nenáhlová

Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

Mapování prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě

Název anglicky

Mapping spatial dynamics of forest disturbances in the North of Moravia

Cíle práce

Cílem diplomové práce je na základě časové řady multispektrálních a termálních snímků vysokého rozlišení z družice Landsat 8 porovnat odlišné spektrální a teplotní projevy lesních disturbancí způsobených zejména lýkožroutem smrkovým (napadený vs. nenapadený lesní porost), a to ve vybrané části České republiky významně zasažené přemnožením lýkožrouta smrkového (tzv. kůrovcovou kalamitou) mezi lety 2013-2018.

Dílní cíle diplomové práce souvisí s těmito výzkumnými otázkami:

- (a) Jsou data pořízená družicí Landsat 8 vhodným datovým zdrojem pro monitoring lesních disturbancí v regionálním měřítku?
- (b) Je možné pomocí multispektrálních snímků vysokého rozlišení pozorovat změny ve zdravotním stavu (obsahu chlorofylu), které způsobuje stres vyvolaný lýkožroutem?
- (c) Liší se vlhkost mezi napadenými a zatím nenapadenými lesními porosty?
- (d) Vykazují lesní porosty v období před napadením lýkožroutem vyšší teplotu?

Metodika

Metodiku diplomové práce lze rámcově rozdělit na:

- (a) Výběr vhodného zájmového území s ohledem na dostupnost dostatečného množství "bezoblačných" snímků z družice Landsat 8
- (b) Pre-processing snímků (odrazivost a teplota povrchu), volba zájmových lokalit (napadené vs. nenapadené lesní porosty)
- (c) Výpočet vegetačních indexů: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a Normalized Difference Water Index (NDWI)
- (d) Odečtení hodnot NDVI, NDWI a teploty povrchu a jejich porovnání (napadené vs. nenapadené lesní porosty) napříč zájmovým obdobím
- (e) Zodpovězení výše uvedených výzkumných otázek

Doporučený rozsah práce

40-60 stran

Klíčová slova

Landsat 8; vegetační indexy; teplota povrchu; lesní disturbance; lýkožrout smrkový

Doporučené zdroje informací

- 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. [h ps://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2346955](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2346955)
- Hais, M., Wild, J., Berenc, 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. [h ps://doi.org/10.3390/rs8080687](https://doi.org/10.3390/rs8080687)
- Havašová, M., Bucha, T., Ferencík, 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. [h ps://doi.org/10.15287/afr.2015.388](https://doi.org/10.15287/afr.2015.388)
- Meddens, A.J.H., Hicke, J.A., Vierling, L.A., Hudak, A.T., 2013. Evaluation methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 132, 49–58. [h ps://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.002](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.002)
- Meigs, G.W., Kennedy, R.E., Cohen, W.B., 2011. A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests. *Remote Sens. Environ.* 115, 3707–3718. [h ps://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.009](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.009)
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Marín-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyer, C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 7, 395–402. [h ps://doi.org/10.1038/nclimate3303](https://doi.org/10.1038/nclimate3303)
- Senf, C., Pflugmacher, D., Wulder, M.A., Hostert, P., 2015. Characterizing spectral-temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series. *Remote Sens. Environ.* 170, 166–177. [h ps://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.019](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.019)
- Senf, C., Seidl, R., Hostert, P., 2017. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 60, 49–60. [h ps://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.004)
-

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 25. 3. 2019

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Tomáše Kloučka, Ph.D., a že jsem uvedla všechny použité zdroje, ze kterých jsem pro svou práci čerpala.

V Praze dne 18. 4. 2019

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Tomáši Kloučkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na mapování prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě v letech 2013-2018. V práci jsou vysvětleny pojmy související s dálkovým průzkumem Země, problematikou lýkožrouta smrkového a vegetačních indexů. K jednotlivým analýzám bylo použito šest snímků vysokého rozlišení časové řady Landsat 8. Na těchto snímcích byl proveden výpočet dvou vegetačních indexů, kterými byly Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a Normalized Difference Water Index (NDWI), a teploty povrchu. Průměrné hodnoty NDVI, NDWI a teploty byly porovnávány na úrovni deseti lokalit představujících lesní porosty napadené lýkožroutem smrkovým a deseti lokalit představujících lesní porosty lýkožroutem smrkovým nenapadené. Výsledky byly interpretovány pomocí grafů a podpořeny statistickými testy. Z vizuálního porovnání graficky znázorněných hodnot indexu NDVI, NDWI a teploty povrchu je zřejmé, že se od sebe napadené a nenapadené lesní porosty liší. Odlišnost průměrných hodnot NDVI, NDWI a teploty napadených a nenapadených lesních porostů potvrzuje i statistické vyhodnocení (T-test). Významné změny NDVI, NDWI a teploty povrchu napříč lokalitami se shodují se skutečným nástupem kůrovcové kalamity na Severní Moravě v roce 2015. Na základě porovnání hodnot indexů a teploty mezi napadenými a nenapadenými lokalitami vyšlo najevo, že index NDVI se k detekci disturbancí způsobených působením lýkožrouta použít nedá, protože se hodnoty NDVI napadených a nenapadených lesních porostů napříč lokalitami víceméně neliší, a index NDWI lze použít v případě detekce již napadených stromů. Naopak nejprůkaznější proměnou je teplota povrchu, jejíž hodnoty se ve zkoumaných lokalitách liší téměř vždy. Součástí práce je diskuse zaměřená na zasazení získaných výsledků do kontextu již provedených studií.

Klíčová slova

Lesní disturbance, Landsat 8, lýkožrout smrkový, vegetační indexy, teplota povrchu

Abstract

The diploma thesis is focused on mapping spatial dynamics of forest disturbances in the North of Moravia in years 2013-2018. In the work are explained concepts related to remote sensing, the issue of bark beetle and vegetation indexes. For each analysis were used six high resolution images from the Landsat 8 time series. On these images were calculated two vegetation indexes, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI), and surface temperature. The results were compared at the level of ten localities representing forests, which are attacked by bark beetle, and ten localities representing forests, which are not attacked by bark beetle. The results were interpreted by charts and supported by statistical tests. From the visual comparison of a graphical representation values of the NDVI, NDWI and surface temperature is obvious, that the attacked and non-attacked forests are different. The difference between the average values of NDVI, NDWI and the temperature of the attacked and non-attacked forest are confirmed by the statistical evaluation (T-test). Significant changes of NDVI, NDWI and surface temperature across the localities coincide with the real succession of bark beetle calamity in the North of Moravia in 2015. Based on the comparison of indexes and temperature values between attacked and non-attacked localities became clear, that NDVI cannot be used for detecting disturbances caused by bark beetle, because the NDVI values of attacked and non-attacked forests do not differ, and NDWI index can be used for already attacked trees. On the other hand, the most significant variable is the surface temperature, whose values are almost always different in the studied localities. A part of the thesis is a discussion focused on putting results into context of conducted studies.

Key words

Forest disturbances, Landsat 8, bark beetle, vegetation indexes, surface temperature

Obsah

1	Úvod	11
2	Cíle práce	12
3	Literární rešerše.....	13
3.1	Dálkový průzkum Země	13
3.2	Vegetační indexy	14
3.2.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	15
3.2.2	Normalized Difference Water Index (NDWI).....	16
3.3	Spektrální projevy vegetace.....	17
3.4	Landsat 8.....	17
3.5	Lýkožrout smrkový.....	18
3.6	Hodnocení dosavadní literatury a pramenů.....	20
3.6.1	Bright et al. 2014: Landsat Time Series and Lidar as Predictors of Live and Dead Basal Area Across Five Bark Beetle-Affected Forests	20
3.6.2	Hais et al. 2016: Landsat Imagery Spectral Trajectories – Important Variables for Spatially Predicting the Risks of Bark Beetle Disturbance.....	20
3.6.3	Meigs et al. 2011: A Landsat Time Series Approach to Characterize Bark Beetle and Defoliator Impacts on Tree Mortality and Surface Fuels in Conifer Forests	21
3.6.4	Meddens et al. 2013: Evaluating Methods to Detect Bark Beetle-Caused Tree Mortality Using Single-Date and Multi-Date Landsat Imagery	22
3.6.5	Senf et al. 2015: Characterizing Spectral–Temporal Patterns of Defoliator and Bark Beetle Disturbances Using Landsat Time Series	23
3.6.6	Havašová et al. 2015: Applicability of a Vegetation Indices-Based Method to Map Bark Beetle Outbreaks in the High Tatra Mountains.....	24
3.6.7	Seidl a Rammer 2017: Climate Change Amplifies the Interactions Between Wind and Bark Beetle Disturbances in Forest Landscapes.....	24
3.6.8	Senf et al. 2017: Remote Sensing of Forest Insect Disturbances: Current State and Future Directions.....	25
4	Metodika	26
4.1	Výběr zájmového území	26

4.2	Pre-processing snímků a volba zájmových lokalit	26
4.2.1	Odstranění oblačnosti	26
4.2.2	Přepočet na hodnoty TOA reflectance	28
4.2.3	Volba zájmových lokalit.....	29
4.3	Výpočet vegetačních indexů	30
4.3.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	30
4.3.2	Normalized Difference Water Index (NDWI).....	31
4.4	Výpočet teploty povrchu.....	32
4.4.1	Přepočet na hodnoty TOA radiance	32
4.4.2	Konverze na At-Satellite Brightness Temperature.....	33
4.4.3	Úprava hodnot o hodnotu emisivity povrchu	34
4.4.4	Výpočet konečné teploty povrchu	35
5	Výsledky	37
5.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	37
5.2	Normalized Difference Water Index (NDWI).....	38
5.3	Teplota povrchu	40
6	Diskuse.....	42
6.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	42
6.2	Normalized Difference Water Index (NDWI).....	43
6.3	Teplota povrchu	45
7	Závěr	47
8	Zdroje informací	49
8.1	Použitý software	51
9	Seznam příloh.....	52
10	Přílohy	53

Seznam obrázků

Obrázek 1	Spektrální křivka odrazivosti	13
Obrázek 2	Spektrální kanály Landsat 7 a Landsat 8	15

Obrázek 3 Spektrální křivka zdravé vs. napadené vegetace	17
Obrázek 4 Lýkožrout smrkový.....	18
Obrázek 5 Snímek BQA.....	26
Obrázek 6 Přepočítaný BQA snímek	27
Obrázek 7 Bezoblačný snímek	27
Obrázek 8 Snímek s hodnotami TOA reflectance	28
Obrázek 9 Multispektrální bezoblačný snímek;	29
Obrázek 10 Vybrané zájmové lokality. Zelené čtverce reprezentují nenapadené a červené napadené lokality	30
Obrázek 11 Index NDVI.....	31
Obrázek 12 Index NDWI.....	32
Obrázek 13 Snímek TIRS 1 přepočtený na hodnoty TOA Radiance	33
Obrázek 14 At-Satellite Brightness Temperature	34
Obrázek 15 Index NDVI upravený o hodnotu emisivity	34
Obrázek 16 Teplota povrchu.....	35
Obrázek 17 Průměrné hodnoty NDVI indexu v letech 2013-2018	37
Obrázek 18 Průměrné hodnoty NDWI indexu v letech 2013-2018	38
Obrázek 19 Průměrné teploty povrchu v letech 2013-2018.....	40

Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled snímků získaných z webu USGS	26
Tabulka 2 Výsledky statistických testů indexu NDVI	38
Tabulka 3 Výsledky statistických testů indexu NDWI	39
Tabulka 4 Výsledky statistických testů teploty povrchu	40
Tabulka 5 Hodnoty p statistického testu T-test pro jednotlivé prediktory	41

1 Úvod

Pomocí metod dálkového průzkumu Země (DPZ) se mohou vědci zabývat celou řadou dějů probíhajících na Zemi. Systémy DPZ mohou použít například pro sledování oblačnosti pro předpovědi počasí, mapování mořského dna, sledování růstu měst a změn zemědělské a lesní půdy v průběhu několika let nebo sledování lesních disturbancí způsobených větrem, ohněm či kalamitními škůdci (USGS 2018).

Ve své diplomové práci se budu zabývat lesními disturbancemi způsobenými zejména lýkožroutem smrkovým. Problematika lýkožrouta smrkového se na území České republiky řeší už od konce minulého století, kdy v 90. letech proběhla tzv. kůrovcová kalamita způsobená dlouhodobým působením sucha. Další kalamita na území České republiky proběhla v letech 2003-2015 (MeziStromy.cz 2019).

Výzkum lesních disturbancí způsobených kalamitními škůdci se v současnosti provádí jak pozemním měřením, tak systémy dálkového průzkumu Země. Jako jeden z efektivních a zatím ne zcela probádaných přístupů, jak pomocí DPZ monitorovat lesní disturbance, se jeví postup založený na sledování změny hodnot vegetačních indexů a teploty povrchu. Ten vychází z předpokladu, že po napadení vegetace škůdцем se změní její schopnost odrážet elektromagnetické záření, a to odlišně v různých částech spektra (Klouček et al. 2019) a zároveň tato vegetace vykazuje vyšší povrchovou teplotu (Bright et al. 2014). Mezi základní vegetační indexy používané pro monitoring zdravotního stavu vegetace patří například Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a Normalized Difference Water Index (NDWI). Jedním z nejvhodnějších datových zdrojů, umožňujících výpočet jak vegetačních indexů, tak teploty povrchu, pro výzkum lesních disturbancí způsobených kalamitními škůdci jsou v současnosti časové řady snímků vysokého rozlišení pořízené družicí Landsat 8.

2 Cíle práce

Cílem mé diplomové práce je, na základě časové řady multispektrálních a termálních snímků vysokého rozlišení z družice Landsat 8, zkoumat dynamiku lesních disturbancí a porovnat odlišné spektrální a teplotní projevy lokalit postižených lesními disturbancemi způsobenými zejména lýkožroutem smrkovým (napadený vs. nenapadený lesní porost) na Severní Moravě v letech 2013-2018.

Výsledků bude dosaženo prostřednictvím výpočtu dvou vegetačních indexů, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a Normalized Difference Water Index (NDWI), a teploty povrchu a jejich vzájemným porovnáním ve dvaceti vybraných lokalitách rozdělených na deset lokalit označených jako napadené a deset lokalit označených jako nenapadené.

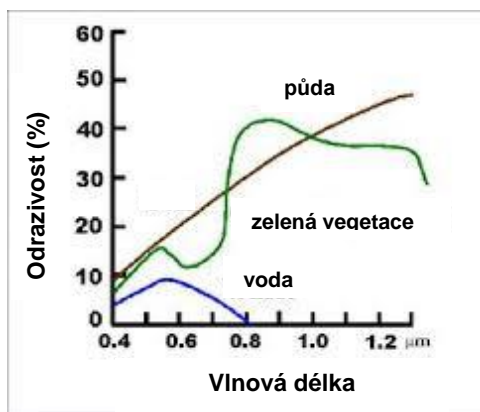
Od práce očekávám přínos ve formě zasloučení do problematiky lýkožrouta smrkového a jeho působení ve vybrané lokalitě České republiky (Severní Morava) a dále ve vyhodnocení možné využitelnosti zvolených technik dálkového průzkumu Země pro monitoring lesních disturbancí způsobených hmyzem, se kterým souvisí zodpovězení předem stanovených výzkumných otázek:

- Jsou data pořízená družicí Landsat 8 vhodným datovým zdrojem pro monitoring lesních disturbancí v regionálním měřítku?
- Je možné pomocí multispektrálních snímků vysokého rozlišení pozorovat změny ve zdravotním stavu (obsahu chlorofylu), které způsobuje stres vyvolaný lýkožroutem?
- Liší se vlhkost mezi napadenými a zatím nenapadenými lesními porosty?
- Vykazují lesní porosty v období před napadením lýkožroutem vyšší teplotu?

3 Literární rešerše

3.1 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země je metoda zkoumání zemského povrchu bez kontaktu s pozorovaným objektem. Princip dálkového průzkumu je založen na spektrální odrazivosti elektromagnetického záření. Spektrální odrazivost sledovaných objektů se zaznamenává do spektrální křivky odrazivosti (Weng 2013).



Obrázek 1 Spektrální křivka odrazivosti; Zdroj: DOCPLAYER 2018 (upraveno)

Spektrální odrazivost objektů je možné zaznamenat množstvím snímacích senzorů, například speciálními typy kamer a digitálních skenerů, mohou být umístěny na různých platformách, kterými mohou být letadla, družice či raketoplány. Snímací senzor spolu s platformou, na které je umístěn, tvoří jeden DPZ systém (Weng 2013).

V závislosti na rozsahu může být dálkové snímání rozděleno na:

- satelitní snímání
- fotografie a fotogrammetrie, které se používají k zachycení viditelné části spektra
- tepelné snímání, při kterém se používá infračervená část spektra (IR)
- radarové snímání, při kterém jsou používány mikrovlnné vlnové délky
- laserové snímání (LiDAR), kdy se při přenosu laserových impulsů měří vzdálenost od země na základě doby návratu každého z impulsů (Weng 2013).

Senzory pro dálkový průzkum Země se dělí na aktivní a pasivní. Aktivní senzory mají svůj vlastní zdroj světla a jeho snímač měří odraženou energii. Mezi aktivní senzory se řadí například Radarsat-2, který na cíl snímání vysílá vlastní elektromagnetické záření

a měří, kolik energie se odrazí zpět do senzoru. Oproti tomu pasivní snímače měří odražené světlo vycházející ze Slunce. Příkladem pasivního snímače je Landsat 8, který měří sluneční energii odraženou od Země (GISGeography 2018).

Pasivní dálkové snímání lze dále rozdělit na multispektrální a hyperspektrální, přičemž hlavním rozdílem mezi nimi je počet a šířka pásem. Multispektrální snímky mají obecně 3 až 10 pásem získaných pomocí radiometru. Hyperspektrální snímky obsahují mnohem užší pásy o šířce 10-20 nm. Hyperspektrální obraz by mohl mít stovky tisíc pásem získaných pomocí zobrazovacího spektrometru (GISGeography 2018).

Dálkový průzkum Země je v současné době propojen s dalšími moderními geoprostorovými technologiemi, jako jsou geografické informační systémy (GIS), globální systém určování polohy (GPS) či mobilní mapování (Weng 2013).

Snímky z dálkového průzkumu Země mohou být použity například pro sledování oblačnosti pro předpovědi počasí, mapování mořského dna, sledování růstu měst a změn zemědělské a lesní půdy v průběhu několika let nebo sledování lesních disturbancí způsobených větrem, ohněm či kalamitními škůdci (USGS 2018).

3.2 Vegetační indexy

Vegetační indexy získané z dat dálkového průzkumu Země jsou, oproti jiným aplikacím, poměrně jednoduché a účinné algoritmy vhodné pro kvantitativní a kvalitativní hodnocení vegetačního pokryvu, jeho intenzity a dynamiky růstu (Xue a Su 2017).

Data dálkového průzkumu Země (například data Landsat, Sentinel či Spot) jsou primárními zdroji pro analýzu environmentálních procesů jak v lokálním, tak i v globálním měřítku. Jsou velmi užitečná pro vizualizaci, klasifikaci a analýzu dané oblasti (LinkedIn 2019).

Mezi tři základní třídy krajinného pokryvu patří vegetace, vodní plochy a zástavba. Proto se v této kapitole budu zabývat indexy, které tyto třídy charakterizují. Jsou jimi Normalized Different Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI) a Normalized Difference Build up Index (NDBI) (LinkedIn 2019). Jelikož se ve své diplomové práci zabývám dynamikou lesních disturbancí, budu se nadále zabývat pouze indexy NDVI a NDWI.

Jedněmi z globálně nejpoužívanějších dat pro klasifikaci obrazu jsou data Landsat, která mají v závislosti na typu družice (Landsat 5, 7 a 8) rozdílné množství spektrálních pásem (modré pásmo, zelené pásmo, červené pásmo, infračervené pásmo, termální pásmo, panchromatické pásmo apod.) lišících se svoji vlnovou délkou. Například data

Landsat 7 mají celkem osm spektrálních pásem a data Landsat 8 mají jedenáct spektrálních pásem. Pro analýzu indexů NDVI a NDWI se ale používají pouze čtyři spektrální pásma, kterými jsou zelené, červené, NIR (blízké infračervené) a SWIR (krátkovlnné infračervené) pásmo (LinkedIn 2019).

S.N.	Landsat 7 Enhanced Thematic Mappers Plus (ETM +)			Band	Landsat 8 Operational Land Imagers (OLI) & Thermal Infrared Sensor (TIRS)		
	Resolution (meter)	Wavelength (micrometer)	Band Name		Band Name	Wavelength (micrometers)	Resolution (meter)
1	30	0.45-0.52	Blue	Band 1	Ultra-Blue	0.435-0.451	30
2	30	0.52-0.60	Green	Band 2	Blue	0.452-0.512	30
3	30	0.63-0.69	Red	Band 3	Green	0.533-0.590	30
4	30	0.77-0.90	NIR	Band 4	Red	0.636-0.673	30
5	30	1.55-1.75	SWIR 1	Band 5	NIR	0.851-0.879	30
6	60* (30)	10.40-12.50	Thermal	Band 6	SWIR 1	1.566-1.651	30
7	30	2.09-2.35	SWIR 2	Band 7	SWIR 2	2.107-2.294	30
8	15	0.52-0.90	Panchromatic	Band 8	Panchromatic	0.503-0.676	15
9				Band 9	Cirrus	1.363-1.384	30
10				Band 10	TIRS 1	10.60-11.19	100 * (30)
11				Band 11	TIRS 2	11.50-12.51	100 * (30)

Obrázek 2 Spektrální kanály Landsat 7 a Landsat 8; Zdroj: LinkedIn 2019

3.2.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) je celosvětově nejpoužívanějším vegetačním indexem pro sledování zeleně. Mezi další běžně používané vegetační indexy patří například Enhanced Vegetation Index (EVI), Perpendicular Vegetation Index (PVI) a Ration Vegetation Index (RVI) (LinkedIn 2019).

Zdravá vegetace obecně dobře absorbuje elektromagnetické záření ve viditelné části spektra. Chlorofyl obsažený ve vegetaci dobře absorbuje modrou a červenou část spektra, a naopak odráží zelenou. Zdravé rostliny mají vysokou odrazivost elektromagnetického záření v oblasti blízkého infračerveného záření (NIR), což je způsobeno především vnitřní strukturou listů rostlin, a právě kvůli vysoké absorpci v červené části spektra a vysoké odrazivosti v NIR se k výpočtu NDVI používají právě tyto dva spektrální kanály (LinkedIn 2019).

Index NDVI se počítá podle vzorce

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

$$\text{pro data z Landsat 7 } NDVI = \frac{(Band 4 - Band 3)}{(Band 4 + Band 3)}$$

$$\text{pro data z Landsat 8 } NDVI = \frac{(Band 5 - Band 4)}{(Band 5 + Band 4)}$$

Výsledné hodnoty NDVI se pohybují v rozmezí od -1 do 1. Vyšší hodnoty indexu znamenají vysokou odrazivost v NIR, což značí hustou vegetaci. Obecně zaznamenáváme tyto výsledky:

- hodnoty NDVI v rozmezí -1 až 0 představují vodní útvary
- hodnoty NDVI v rozmezí -0,1 až 0,1 představují holé skály, písek nebo sníh
- hodnoty NDVI v rozmezí 0,2 až 0,5 představují keře a pastviny, případně stárnoucí plodiny
- hodnoty NDVI v rozmezí 0,6 až 1,0 představují hustou vegetaci nebo tropický deštný les (Linkedin 2019).

3.2.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)

Normalized Difference Water Index (NDWI) se používá pro analýzu vodních ploch. Index využívá SWIR a blízké infračervené spektrum obrazů pořízených metodami DPZ. Ve většině případů může index NDWI výrazně zpřesnit informace o vodě. Pro přesnější posouzení kontextu změn vzniklých ve sledované oblasti, se výsledky indexu NDWI často kombinují s výsledky indexu NDVI (Linkedin 2019).

Vodní útvary se vyznačují nízkou odrazivostí. Elektromagnetické záření odráží pouze ve viditelné části spektra. Vodní útvary v kapalném skupenství odráží elektromagnetické záření v modré části spektra lépe než v zelené a v červené. Čistá voda má největší odrazivost elektromagnetického záření v modré části viditelného spektra a kalná voda má největší odrazivost v zelené části spektra. Index NDWI vyvinula společnost McFeeters v roce 1996 s cílem zlepšit vlastnosti krajiny související s vodou. K výpočtu NDWI se používají spektrální kanály NIR a SWIR (krátkovlnné infračervené záření) (Linkedin 2019).

Index NDWI se počítá podle vzorce

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR},$$

$$\text{pro data z Landsat 7 } NDWI = \frac{(Band\ 4 - Band\ 5)}{(Band\ 4 + Band\ 5)},$$

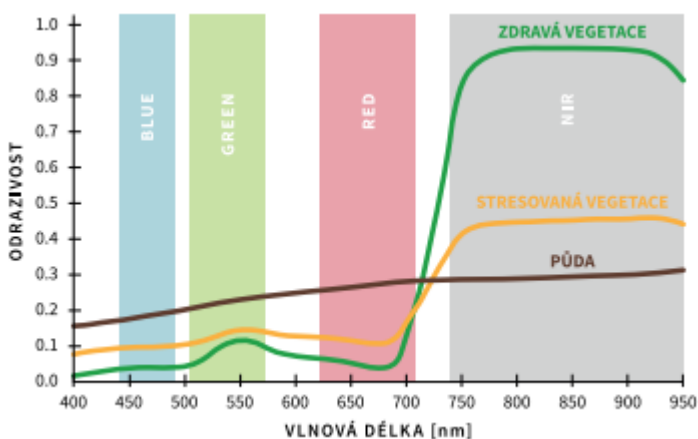
$$\text{pro data z Landsat 8 } NDWI = \frac{(Band\ 5 - Band\ 6)}{(Band\ 5 + Band\ 6)}.$$

Výsledné hodnoty NDWI se pohybují v rozmezí od -1 do 1. Vodní útvary dosahují hodnot 0,5. Vegetace dosahuje mnohem nižších hodnot, díky kterým je dobře odlišitelná od vodních útvarů. Hodnoty zastavěných území se pohybují v rozmezí 0 až 0,2 (Linkedin 2019).

3.3 Spektrální projevy vegetace

V rámci dálkového průzkumu Země se zdravotní stav vegetace posuzuje na základě množství odraženého elektromagnetického záření. Vegetace vykazuje specifickou odrazivost v jednotlivých pásmech elektromagnetického záření. V případě zdravé vegetace je během procesu fotosyntézy převážná část modré a červené části záření absorbována a část zeleného spektra je odrážena. Proto se vegetace jeví lidským očím zeleně. V oblasti blízkého infračerveného spektra (NIR) je většina záření odrážena. Jinými slovy odrazivost ve viditelné části spektra podává informaci o stavu fotosyntetického aparátu, oproti tomu v NIR podává informaci o množství biomasy (Mechanizace zemědělství 2013).

Detekce napadené vegetace pomocí technik DPZ spočívá ve sledování změny schopnosti vegetace odrážet elektromagnetické záření v různých částech spektra. Změna schopnosti odrážet elektromagnetické záření se projeví změnou tvaru spektrální křivky napříč celým elektromagnetickým spektrem. Jak už bylo řečeno, pásmo NIR, které je citlivé na změnu obsahu chlorofylu například v listech a jehlicích lesních porostů, je důležitým ukazatelem zdravotního stavu vegetace, se kterým úzce souvisí i rozpoznání částí vegetace napadených hmyzem. Existuje domněnka, že napadení vegetace se v pásmu NIR projeví dříve než ve viditelné části spektra (RGB). Pokud je tato domněnka správná, pak lze konkrétní strom napadený hmyzem odhalit dříve, než se projeví vizuální známky jeho napadení, jako je změna barvy jehlic či opadání kůry (Klouček et al. 2019).



Obrázek 3 Spektrální křivka zdravé vs. napadené vegetace;
Zdroj: Klouček et al. 2019

3.4 Landsat 8

Ve své diplomové práci budu používat snímky ze satelitu Landsat 8, jehož provozovatelem je USGS (USA). Landsat 8 byl vypuštěn 11. února 2013

z Vandenbergské základny v Kalifornii na raketě Atlas-V 401. Satelit se skládá ze dvou přístrojů, a to ze senzoru OLI (Operational Land Imager) a ze senzoru TIRS (Thermal Infrared Sensor). Tyto dva senzory poskytují sezónní globální pokrytí zemské šířky (81°N-81 °S) v prostorovém rozlišení 30 m (viditelné, NIR a SWIR záření), 100 m (tepelné záření) a 15 m (panchromatické pásmo). Landsat 8 pořizuje snímky každých šestnáct dní (NASA 2018).

3.5 Lýkožrout smrkový

Lýkožrout smrkový je přibližně 4,5 mm dlouhý, tmavě hnědý až téměř černý brouk, který napadá především smrk ztepilý. Kromě smrku ztepilého může ovšem napadat i jiné druhy smrků, případně modřín a při přemnožení dokonce i borovici blatku, borovici kleč či borovici lesní (kurovcoveinfo.cz 2019b).



Obrázek 4 Lýkožrout smrkový; Zdroj: kurovcoveinfo.cz 2019b

Jarní rojení lýkožrouta smrkového v nižších a středních polohách v posledních letech začíná koncem, výjimečně i začátkem dubna. V předchozích letech začínalo jarní rojení na přelomu dubna a května. Ve vyšších nadmořských výškách začíná rojení kvůli teplotám o něco později, tedy až ve druhé polovině května. K letnímu rojení dochází po 8-10 týdnech od začátku jarního rojení. Letní rojení tedy probíhá v období přibližně od poloviny června do začátku srpna. Na přelomu srpna a září může dojít ke třetímu rojení, přičemž vývoj nové generace lýkožrouta zůstane nedokončen a brouci jsou připraveni k jarnímu rojení v následujícím roce (kurovcoveinfo.cz 2019b).

Lýkožrout smrkový je typickým sekundárním škůdce, který se nejčastěji vyskytuje ve smrkových porostech starších šedesáti let. Jeho primární kořisti jsou čerstvě odumřelé stromy, mezi které patří například polomové dříví či dříví z těžeb, stromy "vystresované"

suchem či z jiných příčin odumírající stromy. Zdravé stromy napadá lýkožrout smrkový až při přemnožení (kurovcoveinfo.cz 2019b).

Podle vyhlášky Ministerstva zemědělství č. 101/1996 sb. je lýkožrout zařazen do kategorie kalamitních škůdců. Proto pro něj byl stanoven:

- **základní stav** – základní stav je takový počet lýkožroutů, kdy průměrná hodnota objemu kůrovcového dříví nedosáhla 1 m³ na 5 ha smrkových porostů a nedošlo k tvorbě ohnisek
- **zvýšený stav** – zvýšený stav je takový počet lýkožroutů, kdy průměrná hodnota objemu kůrovcového dříví překročila 1 m³ na 5 ha smrkových porostů a došlo k vytvoření ohnisek; tento stav upozorňuje na možnost přemnožení
- **kalamitní stav** – kalamitní stav je takový početní stav lýkožroutů, který způsobuje rozsáhlá poškození porostů na stěnách, popřípadě i vznik rozsevů uprostřed porostu (kurovcoveinfo.cz 2019b).

Význam lýkožrouta smrkového zásadně souvisí se zdravotním stavem porostů. Jedním z rozhodujících faktorů pro vznik přemnožení je průběh počasí. Vysoké a rovnoměrné srážky mají pozitivní vliv na zdravotní stav stromů a tím zvyšují jejich obranyschopnost proti napadení škůdci. Oproti tomu dlouhodobý srážkový deficit způsobuje zhoršení zdravotního stavu stromů, a tím i snížení jejich obranyschopnosti vůči napadení škůdci. Takové stromy se pak pro lýkožrouta stávají snadnou kořistí. Vysoké teploty urychlují vývoj lýkožrouta smrkového a díky tomu může mít lýkožrout i více generací v průběhu jednoho roku. Dalším rozhodujícím faktorem je včasné provádění preventivních a obranných opatření (kurovcoveinfo.cz 2019b).

Sucho jako příčina vzniku kůrovcových kalamit bylo dlouho podceňováno. V České republice však lze suchem vysvětlit přemnožení podkorního hmyzu jak v 90. letech minulého století, tak i přemnožení v letech 2003-2015. Obě krize byly způsobeny suchem podpořeným častým výskytem rozsáhlých větrných kalamit, po kterých byly polomy zlikvidovány příliš pozdě. Svou roli sehrály také nedostatky v asanaci kůrovcového dříví (MeziStromy.cz 2019).

V České republice dosáhl v letech 2003-2015 objem kůrovcového dříví více než 14 mil. m³ (kurovcoveinfo.cz 2019b). Názorným příkladem gradace lýkožrouta smrkového je například území Severní Moravy. Konkrétně v okrese Bruntál byl v roce

2011 objem evidovaného kůrovcového dříví na úrovni přibližně 50 000 m³. Poté začal objem kůrovcového dříví stoupat a v roce 2015 již dosáhl objemu téměř 400 000 m³ (MeziStromy.cz 2019).

3.6 Hodnocení dosavadní literatury a pramenů

3.6.1 Bright et al. 2014: Landsat Time Series and Lidar as Predictors of Live and Dead Basal Area Across Five Bark Beetle-Affected Forests

V rámci tohoto projektu vědci kvantifikovali živou a mrtvou bazální oblast (BA), která je definovaná jako průřezová plocha kmenů stromů pro danou oblast, v lokalitách napadených kůrovci na území Severní Ameriky. Zkoumanými oblastmi byly Aljaška, Arizona, Colorado, Idaho a Oregon. Vědci porovnávali, jak dobře dva zdroje dat dálkového průzkumu Země, LiDAR a časové řady Landsat analyzované pomocí tzv. LandTrendr algoritmu (na základě dat Landsat založená detekce trendů disturbancí a obnovy), dokáží předpovědět živou a mrtvou BA stromů v lesech napadených kůrovci.

Studie dokazuje, že systémy dálkového průzkumu Země dokáží detekovat a mapovat škody způsobené hmyzem. Na rozdíl od zdravých stromů odráží mrtvé stromy odlišné množství elektromagnetického záření a lokality, kde se tyto stromy nacházejí, vykazují vyšší teplotu povrchu, což umožňuje detekci úmrtnosti stromů pomocí pasivních systémů dálkového průzkumu Země. Po úmrtí stromů dochází rovněž ke změně horizontální a vertikální struktury lesů, čehož lze využít pro detekci úmrtnosti stromů pomocí aktivních systémů dálkového průzkumu Země, jako je LiDAR.

Proměnné BA byly predikovány z LiDAR a LandTrendr pomocí Random Forest (RF) algoritmu, jehož modely vysvětlují 28-61% variability živých a mrtvých BA. LiDAR proměnné vyšly jako lepší pro predikci celkové a živé BA, zatímco LandTrendr proměnné byly lepšími prediktory mrtvých a procentuálního množství mrtvých BA.

3.6.2 Hais et al. 2016: Landsat Imagery Spectral Trajectories – Important Variables for Spatially Predicting the Risks of Bark Beetle Disturbance

V této studii vědci představují spektrální trajektorie před disturbancí, získané ze snímků Landsat Thematic Mapper (TM), společně s běžně používanými environmentálními prediktory, mezi které můžeme zařadit například atributy lesních porostů, jako je hustota stromů, nebo také běžné abiotické faktory, kterými jsou topografie, klima, geologie či půda. Studie byla provedena na území centrální části

Šumavy. Referenční data o výskytu kůrovce byla získána z leteckých snímků pořízených v letech 1991-2000.

Spektrální trajektorie před disturbancí byly definovány lineární regresí tzv. Tasseled Cap komponent (Wetness, Brightness, Greenness) vypočítaných z časové řady 16 snímků Landsat TM v průběhu let od roku 1984 do jednoho roku před napadením kůrovcem. Aby zohlednili možný posun významu jednotlivých prediktorů během disturbance, vypočítali vědci za období od roku 1994 do roku 2000 prediktivní modely zvlášť za každý rok. Prediktivní schopnost modelů napadení kůrovci významně zlepšilo zahrnutí dvou spektrálních trajektorií, a to sklon křivky komponenty Wetness (Wetness slope) a sklon křivky komponenty Brightness (Brightness slope) napříč obdobími.

Prediktivní síla většiny modelů obvykle postupem času klesá a modely popisující počáteční fáze vypuknutí kůrovcové kalamity se zdají být spolehlivější pro provádění prognóz v blízké budoucnosti. Spektrální trajektorie před disturbancí jsou tedy vhodné nejen pro posouzení rizika vzniku kůrovcové kalamity, ale i k detekci dlouhodobých postupných změn v nelesních ekosystémech.

3.6.3 Meigs et al. 2011: A Landsat Time Series Approach to Characterize Bark Beetle and Defoliator Impacts on Tree Mortality and Surface Fuels in Conifer Forests

V rámci této studie vědci charakterizovali spektrální trajektorie a zkoumali jejich vztah k pozemnímu měření úmrtnosti stromů na území Cascade Range Oregon v USA.

Pro svůj výzkum použili algoritmus LandTrendr (algoritmus založený na detekci změn z časové řady snímků), každoroční letecký průzkum zdravotního stavu lesních porostů (ADS) a měření v terénu. V západní části Severní Ameriky určili 38 lokalit napříč různými typy lesů a jejich dominantní hmyzí škůdce (western spruce budworm and mountain pine beetle).

Dopady působení hmyzu byly evidentní v časových řadách Landsat jako kombinace jak krátkodobých, tak dlouhodobých změn spektrálního indexu NBR (Normalized Burn Ratio), který má za úkol určit spálené oblasti a odhadnout závažnost poškození. Ukázalo se, že trajektorie obaleče smrkového vykazuje konzistentní časový vývoj dlouhodobě nižší odrazivosti elektromagnetického záření (ztráty vegetace) a následné zotavení, zatímco stromy napadené lýkohubem vykazovaly jak krátkodobé, tak dlouhodobé poklesy odrazivosti elektromagnetického záření a proměnlivé rychlosti zotavení. Přestože jsou časově proměnlivé, vyhovují lokality napadené hmyzem obecně

čtyřem spektrálními trajektoriím: krátkodobému poklesu s následným zotavením, krátkodobému poklesu, dlouhodobému poklesu a dlouhodobému poklesu s následným zotavením.

Tím, že charakterizuje několik různých časových projevů aktivity hmyzu v jehličnatých lesích, demonstruje tato studie užitečnost mapování hmyzu metodami, které zachycují široký rozsah spektrálních trajektorií. Studie také potvrzuje, že družicové snímky mohou hrát roli v porozumění interakcím mezi hmyzem a lesním porostem.

3.6.4 Meddens et al. 2013: Evaluating Methods to Detect Bark Beetle-Caused Tree Mortality Using Single-Date and Multi-Date Landsat Imagery

Vědci v této studii hodnotí potenciál multi-temporální detekce lesních disturbancí s využitím dat Landsat, oproti metodám založeným pouze na jedno-snímkové (single-date) klasifikaci obrazu. Cílem této studie je proto porovnat single-date klasifikaci (klasifikátor maximum likelihood) s multi-date klasifikačním přístupem (klasifikace s využitím časových řad spektrálních indexů) využívajícím časové řady dat Landsat a na základě dosažených výsledků zhodnotit využitelnost obou přístupů pro detekci různých fází mortality stromů po napadení lesních porostů lýkožroutem.

Pro každou metodu vědci vyhodnotili buď několik spektrálních pásem anebo spektrální vegetační indexy a identifikovali ten, který dosáhl nejvyšší přesnosti. Jako referenční data použili letecký snímek vysokého rozlišení. Při single-date klasifikaci obrazu dosáhli celkové přesnosti 91 % pomocí Tasseled Cap transformace (komponenty Brightness, Greenness, a Wetness). Při multi-date klasifikaci obrazu přinesla nejvyšší přesnost časová řada spektrálního indexu Band5/Band4, která dosáhla přesnosti klasifikace 89,6 % (v obou případech při detekci stromů v červené fázi (red stage) napadení).

Následně vědci porovnávali přesnost mezi nejlepšími single-date a multi-date metodami klasifikace v celém rozsahu jednotlivých fází mortality stromů. Multi-date metoda byla přesnější při střední úrovni úmrtnosti stromů, zatímco single-date metoda byla přesnější při vysoké úrovni mortality stromů. Výsledky studie jasně ukazují, že mapování lesních disturbancí, která využívají single-date nebo multi-date metody, vedou k vysoké přesnosti klasifikace obrazu.

3.6.5 Senf et al. 2015: Characterizing Spectral–Temporal Patterns of Defoliator and Bark Beetle Disturbances Using Landsat Time Series

V rámci této studie charakterizovali vědci časově-spektrální vzorce spojené s lesními disturbancemi pomocí časových řad Landsat v letech 1990 až 2013. Jejich cílem bylo testovat, zda lze pomocí dat Landsat rozlišit disturbance způsobené dvěma druhy hmyzu. Pro analýzu si vybrali nedávné napadení lesů lýkohubem (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins) a obalečem smrkovým (*Choristoneura freemani* Razowski) v Britské Kolumbii v Kanadě.

Pro charakterizaci disturbančních a regeneračních trendů spojených s disturbancemi způsobenými hmyzem použili vědci algoritmus LandTrendr. Spektrální trajektorie LandTrendr byly vytvořeny na základě časové řady Normalized Burn Ratio indexu (NBR) a Tasseled Cap (TC), na jejichž základě byla extrahována sada disturbančních metrik. Tyto metriky následně sloužily jako vstup do dvou Random Forest modelů, jejichž cílem bylo (a) rozlišit disturbance způsobené hmyzem od těžby a požárů, (b) přiřadit disturbance způsobené hmyzem nejpravděpodobnějšímu činiteli, tj. lýkohubovi nebo obaleči smrkovému.

Disturbance způsobené hmyzem byly úspěšně mapovány s celkovou přesností 76,8 % a činitelé byli úspěšně přiřazeni s celkovou přesností v rozmezí od 75,3 % do 88 %, v závislosti na tom, zda byla uvažována pouze čistá hostitelská stanoviště nebo smíšené porosty s hostiteli obou druhů hmyzu. V případě smíšených hostitelských porostů bylo téměř 45 % disturbancí způsobených obalečem smrkovým mylně připisováno lýkohubovi.

Spektrální změny spojené s disturbancemi způsobenými obalečem smrkovým měly obecně nižší hodnoty odrazivosti elektromagnetického záření než disturbance způsobené lýkohubem. Kromě toho byly disturbance způsobené obalečem smrkovým silněji asociovány se změnami komponenty Greenness v TC, zatímco disturbance způsobené lýkohubem byly silněji spojeny se změnami komponent Brightness a Wetness v TC.

Studie demonstruje potenciál časových řad Landsat pro mapování lesních disturbancí způsobených obecně lýkožrouty a defoliátory a zdůrazňuje potřebu rozlišovat, z důvodu adekvátního zachycení jejich dopadů na životní prostředí, disturbance způsobené těmito dvěma činiteli.

3.6.6 Havašová et al. 2015: Applicability of a Vegetation Indices-Based Method to Map Bark Beetle Outbreaks in the High Tatra Mountains

Cílem této studie bylo identifikovat nejcitlivější vegetační index pro monitoring minulých i současných ohnisek lýkožrouta, který bude využitelný při detekci založené na metodě odčítání obrazu (Vegetation Index Differencing). Šest družicových snímků s převahou smrků ve Vysokých Tatrách za časové období 2005–2009 a 2011 ze sady Landsat Thematic Mapper (TM) bylo převedeno na vybrané vegetační indexy citlivé na zdraví jehličnatých stromů.

Vegetation Condition Index (VCI), Moisture Stress Index (MSI), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Disturbance Index (DI) a Changed Disturbance Index (DI') byly vypočteny zvlášť pro každý rok a metodika založená na odčítání vegetačního indexu byla aplikována na jednotlivá časová období (2005–2006, 2006–2007, 2007–2008, 2008–2009 a 2010–2011), čímž byl vytvořen Changed Vegetation Index (Δ VI).

Na úrovni Δ VI byl stanoven soubor prahových hodnot pro klasifikaci zdravých lesů a lesů postižených disturbancemi kůrovce. Hodnocena byla také citlivost různých vegetačních indexů k identifikaci kůrovcových ohnisek. Nejvyšší přesnosti klasifikace bylo dosaženo v letech 2007 a 2011, která byla charakterizována epidemickou fází kůrovcových ohnisek.

Studie dokázala, že všechny vybrané vegetační indexy, s výjimkou indexu NDVI, byly vysoce citlivé na přítomnost kůrovcových ohnisek. Stanovená stabilní prahová hodnota pro detekci změn však není široce použitelná pro detekci minulých lesních disturbancí způsobených kůrovcem. Díky jednoduchému výpočtu a snadné interpretovatelnosti autoři studie doporučují využívání vegetačních indexů VCI, MSI a NDMI.

3.6.7 Seidl a Rammer 2017: Climate Change Amplifies the Interactions Between Wind and Bark Beetle Disturbances in Forest Landscapes

V rámci této studie vědci tvrdí, že lesní disturbance jsou citlivé na změny klimatu, ale naše chápání dynamiky lesních disturbancí v reakci na klimatické změny zůstává zatím neúplné.

Vědci poskytují globální syntézu účinků klimatických změn na důležité abiotické (sucho, vítr, sníh a led) a biotické (hmyz a patogeny) činitele. Teplejší a sušší podmínky

usnadňují zejména působení sucha a hmyzu, zatímco teplejší a vlhčí podmínky zvyšují počet disturbancí způsobených větrem a patogeny.

Rozsáhlé interakce mezi činiteli pravděpodobně zesílí disturbance, zatímco nepřímé klimatické účinky, jako jsou změny vegetace, mohou zmírnit dlouhodobou citlivost lesních disturbancí na změny klimatu. Budoucí změny v disturbancích budou pravděpodobně nejvýraznější v jehličnatých lesích a boreálním biomu. Vědci došli k závěru, že ekosystémy i společnost by měly být v budoucnu připraveny na zvyšující se počet lesních disturbancí.

3.6.8 Senf et al. 2017: Remote Sensing of Forest Insect Disturbances: Current State and Future Directions

V rámci této studie (review) vědci rozdělují hmyzí škůdce do třech skupin: do skupiny kůrovců, do skupiny defoliátorů listů a do skupiny defoliátorů jehličnatých stromů, na jejichž základě systematicky porovnávají senzory a metody používané pro mapování lesních disturbancí způsobených hmyzem.

Výsledky studie naznačují, že existují významné rozdíly mezi metodami používanými pro mapování disturbancí způsobených kůrovcem a defoliátory a mezi metodami používanými pro mapování disturbancí způsobených defoliátory listnatých a jehličnatých stromů. Z tohoto důvodu vědci zdůrazňují přístupy, které jsou zvláště vhodné pro každý typ hmyzu.

Dále pak vědci určili budoucí výzkumné směry pro zkoumání lesních disturbancí způsobených hmyzem metodami DPZ. Doporučují zejména:

- a) oddělit disturbance způsobené hmyzem od jiných činitelů,
- b) rozšířit prostorové a časové oblasti analýzy,
- c) použít hustější časové řady snímků,
- d) monitorovat disturbance způsobené hmyzem v reálném čase,
- e) identifikovat disturbance způsobené hmyzem v souvislosti s lidsko-přírodními systémy,
- f) zlepšit kvalitu referenčních dat pro hodnocení disturbancí způsobených hmyzem.

Výzkum lesních disturbancí způsobených hmyzem pomocí metod DPZ je předmětem zájmu i mimo komunitu dálkového průzkumu Země, což může v budoucnu významně přispět k rychlejší integraci DPZ produktů do lesního hospodářství.

4 Metodika

4.1 Výběr zájmového území

K mapování prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě jsem použila snímky ze satelitu Landsat 8 získané z webu USGS. Vzhledem k vysoké oblačnosti se mi podařilo získat v rozmezí let 2013-2018 jeden snímek za každý rok.

Tabulka 1 Přehled snímků získaných z webu USGS

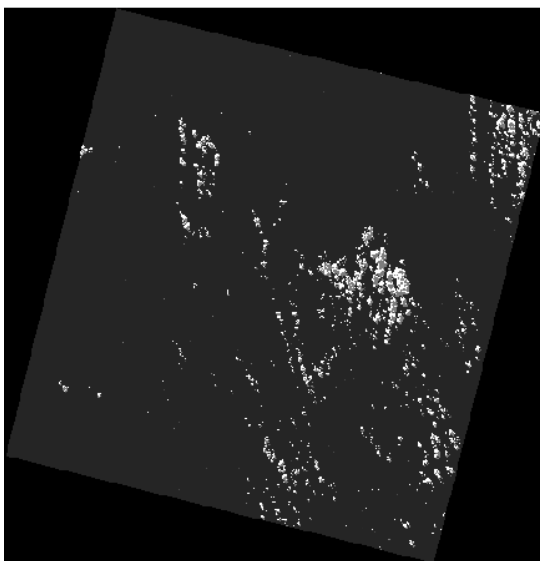
Přehled snímků získaných z webu USGS						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Datum pořízení	18.03.	20.05.	21.04.	14.09.	28.05.	29.04.

Zdroj: Vlastní

4.2 Pre-processing snímků a volba zájmových lokalit

4.2.1 Odstranění oblačnosti

Pro potřebu dalších analýz jsem nejprve musela ze získaných snímků odstranit oblačnost. Pro odstranění oblačnosti jsem použila snímek BQA (Quality Assessment Band), který je důležitým doplňkem datových souborů Landsat 8. Každý pixel v QA pásmu obsahuje celé číslo, které představuje kombinaci povrchových, atmosférických a senzorických podmínek, které mohou ovlivnit celkovou kvalitu daného pixelu (USGS 2019b).

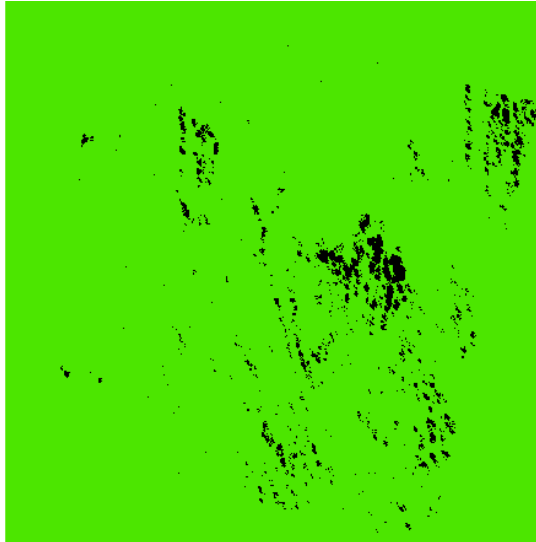


Obrázek 5 Snímek BQA; Zdroj: USGS 2019a

Pro odstranění oblačnosti jsem použila program ArcMap 10.6.1. Pomocí funkce Identify jsem zjistila nejvyšší hodnotu pixelu bez oblačnosti (2720 pro všechny snímky)

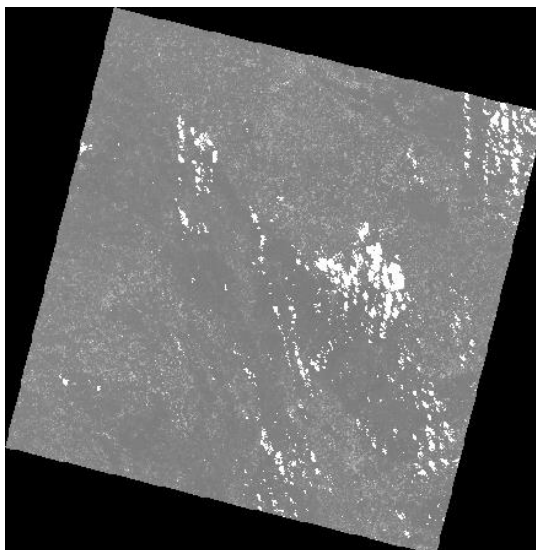
a pomocí nástroje *Raster Calculator* jsem snímek přepočítala na diskretní rastr s hodnotami 1 a 0, přičemž hodnota 0 představovala mraky a hodnota 1 naopak bezoblačnou oblast. Pro výpočet jsem v nástroji *Raster Calculator* použila vzorec

$$Band_{cloud} = Con(BQA \geq 2720, 0, 1) \text{ (YouTube 2019).}$$



Obrázek 6 Přepočítaný BQA snímek; Zdroj: Vlastní

Výsledný rastr jsem pomocí nástroje *Reclassify* reklasifikovala tak, že bezoblačná oblast dostala hodnotu 1 a oblasti, které byly původně překryty mraky, dostaly hodnotu NoData, čímž v obraze vznikla pomyslná díra. Výsledným rastrem jsem pomocí nástroje *Raster Calculator* vynásobila snímky všech jednotlivých kanálů. Tento postup jsem použila pro odstranění oblačnosti ze všech snímků.



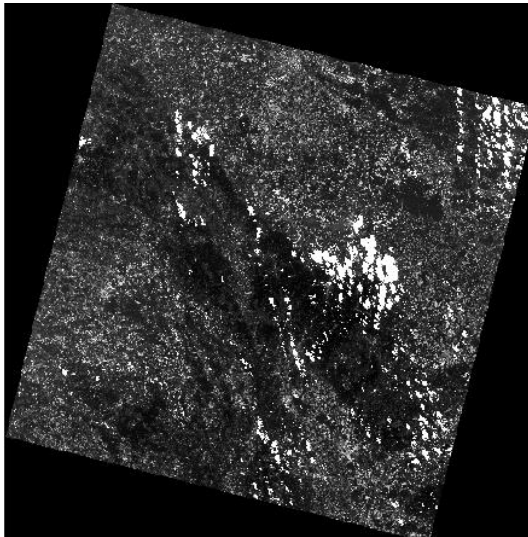
Obrázek 7 Bezoblačný snímek; Zdroj: Vlastní

4.2.2 Přepočítání na hodnoty TOA reflectance

Pro výpočet hodnot odrazivosti jsem použila snímky jednotlivých kanálů po odstranění oblačnosti. K výpočtu jsem potřebovala hodnoty uvedené v souboru metadat příslušného snímku. Těmito hodnotami byly REFLECTANCE_MULT_BAND, REFLECTANCE_ADD_BAND a SUN_ELEVATION. Pro výpočet jsem v programu ArcMap 10.6.1 použila nástroj *Raster Calculator*, do kterého jsem vepsala vzorec

$$Atm_{cor} = \frac{((REFLECTANCE_MULT_BAND * SNÍMEK\ SPEKTRÁLNÍHO\ KANÁLU) + REFLECTANCE_ADD_BAND)}{\sin(SUN_ELEVATION)}$$

(USGS 2019c).



Obrázek 8 Snímek s hodnotami TOA reflectance;
Zdroj: Vlastní

Takto jsem vypočítala hodnoty TOA (Top of Atmosphere) reflectance jednotlivých kanálů. Následně jsem snímky všech kanálů spojila pomocí nástroje *Composite Bands* do jednoho multispektrálního snímku. Tento postup jsem použila pro všechny snímky.



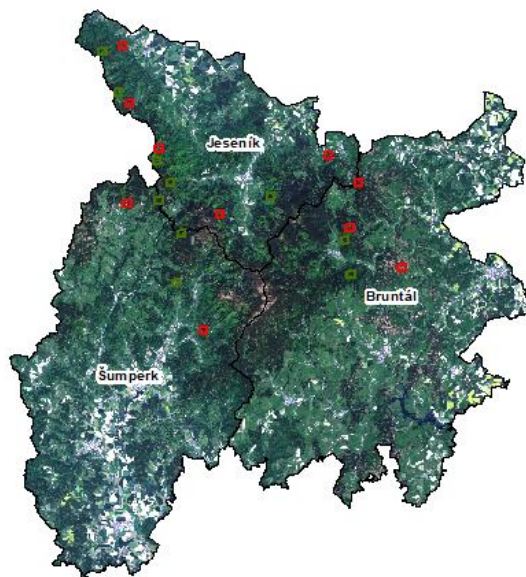
Obrázek 9 Multispektrální bezoblačný snímek;
Zdroj: Vlastní

4.2.3 Volba zájmových lokalit

Pro analýzu prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě jsem vybrala 20 zájmových lokalit o rozloze přibližně 10 ha, které jsem rozdělila na 10 lokalit, které mají představovat nenapadený lesní porost a 10, které mají představovat lokality lesního porostu napadeného lýkožroutem smrkovým.

Tyto lokality jsem vybírala na základě dat z Ústavu pro hospodářskou úpravu lesa (ÚHÚL) o zdravotním stavu vegetace, dále podle dat z ÚHÚL o druhové skladbě lesa tak, aby byl ve vybraných lokalitách primárním druhem smrk, a konečně podle dat z webu kurovcoveinfo.cz o výskytu a množství odchyceného lýkožrouta smrkového.

Všech 20 vybraných lokalit se nachází na území okresů Jeseník, Bruntál a Šumperk. Proto jsem všechny multispektrální, korigované, bezoblačné snímky pomocí nástroje *Ectract by Mask* ořízla podél hranic těchto okresů, jejichž hranice jsem nejprve musela pomocí nástroje *Project* převést ze souřadnicového systému S-JTSK do souřadnicového systému WGS 1984 UTM Zone 33N, ve kterém jsou uloženy snímky získané z USGS, stejně jako všechny nově vytvořené vrstvy.



Obrázek 10 Vybrané zájmové lokality. Zelené čtverce reprezentují nenapadené a červené napadené lokality; Zdroj: Vlastní

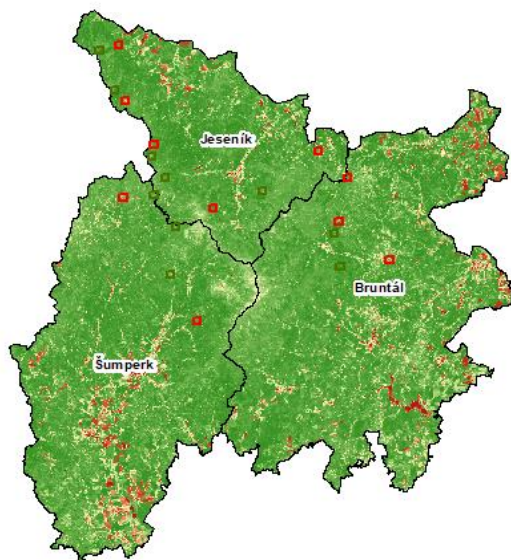
4.3 Výpočet vegetačních indexů

4.3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

První analýzou, kterou jsem v rámci výzkumu prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě provedla, byl výpočet vegetačního indexu NDVI, který indikuje množství chlorofylu ve vegetaci. Hodnoty indexu se pohybují v rozmezí -1 až 1. Pro výpočet NDVI jsem použila spektrální kanál NIR (Band 5), který představuje blízké infračervené záření, a kanál červeného spektra (Band 4). Výpočet jsem provedla v programu ArcMap 10.6.1 v nástroji *Raster Calculator*, podle vzorce

$$NDVI = \frac{Float(Band\ 5 - Band\ 4)}{Float(Band\ 5 + Band\ 4)} \text{ (Linkedin 2019).}$$

Výsledný obraz jsem pomocí nástroje *Ectract by Mask* ořízla podle hranic příslušných okresů. Následně jsem zjistila průměrné hodnoty indexu NDVI v jednotlivých lokalitách pomocí nástroje *Zonal Statistics as Table*. Tento postup jsem provedla u všech snímků a z výsledků z jednotlivých zonálních statistik jsem v programu Microsoft Excel 2016 vytvořila graf *Průměrné hodnoty NDVI indexu v letech 2013-2018* (viz. Výsledky). Pro správnou interpretaci výsledků byl v programu Statistica proveden test normality a následně jsem v programu Microsoft Excel 2016 provedla dva statistické testy, F-test a T-test, a vytvořila tabulku jejich výsledků *Výsledky statistických testů indexu NDVI* (viz. Výsledky).



Obrázek 11 Index NDVI; Zdroj: Vlastní

Nakonec jsem za každý rok vytvořila mapu *Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk* (viz. Přílohy). Do mapy jsem pro lepší interpretaci zanesla názvy a hranice okresů, hranici státu, satelitní snímek oblasti a tabulku s průměrnou hodnotou NDVI ve všech lokalitách reprezentujících napadený i nenapadený porost.

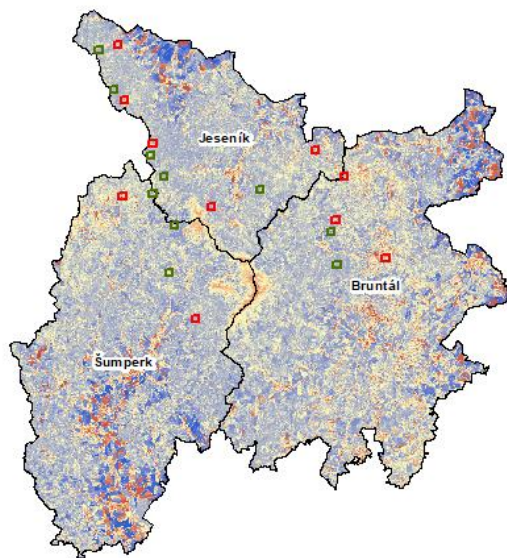
4.3.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)

Druhou analýzou, kterou jsem v rámci výzkumu prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě provedla, byl výpočet vegetačního indexu NDWI, který indikuje množství vody ve vegetaci. Hodnoty indexu se pohybují v rozmezí -1 až 1. Pro výpočet NDWI jsem použila spektrální kanál NIR (Band 5), který představuje blízké infračervené záření, a kanál SWIR (Band 6), který reprezentuje krátkovlnné infračervené záření. Výpočet jsem provedla v programu ArcMap 10.6.1 v nástroji *Raster Calculator*, podle vzorce

$$NDWI = \frac{Float(Band\ 5 - Band\ 6)}{Float(Band\ 5 + Band\ 6)} \text{ (Linkedin 2019).}$$

Výsledný obraz jsem pomocí nástroje *Extract by Mask* ořízla podle hranic příslušných okresů. Následně jsem zjistila průměrné hodnoty indexu NDWI v jednotlivých lokalitách pomocí nástroje *Zonal Statistics as Table*. Tento postup jsem provedla u všech snímků a z výsledků z jednotlivých zonálních statistik jsem v programu Microsoft Excel 2016 vytvořila graf *Průměrné hodnoty NDWI indexu v letech 2013-2018* (viz. Výsledky). Pro správnou interpretaci výsledků byl v programu Statistica proveden test normality a následně jsem v programu Microsoft Excel 2016 provedla dva statistické testy, F-test

a T-test, a vytvořila tabulku jejich výsledků *Výsledky statistických testů indexu NDWI* (viz. Výsledky).



Obrázek 12 Index NDWI; Zdroj: Vlastní

Nakonec jsem za každý rok vytvořila mapu *Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk* (viz. Přílohy). Do mapy jsem pro lepší interpretaci zanesla názvy a hranice okresů, hranici státu, satelitní snímek oblasti a tabulku s průměrnou hodnotou NDWI ve všech lokalitách reprezentujících napadený i nenapadený porost.

4.4 Výpočet teploty povrchu

Poslední analýzou, kterou jsem v rámci výzkumu prostorové dynamiky lesních disturbancí na Severní Moravě provedla, byl výpočet teploty povrchu. Teplota povrchu je výsledkem kombinace několika na sebe navazujících výpočtů, které jsem provedla v programu ArcMap 10.6.1. K výpočtu teploty povrchu jsem použila snímky termálních kanálů TIRS 1 (Band 10) a TIRS 2 (Band 11) a již vypočtený index NDVI.

4.4.1 Přepočítání na hodnoty TOA radiance

Prvním krokem výpočtu teploty povrchu byl přepočítání na hodnoty TOA (Top of Atmosphere) radiance. Pro její výpočet jsem použila nástroj *Raster Calculator*, ve kterém jsem použila vzorec

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + AL,$$

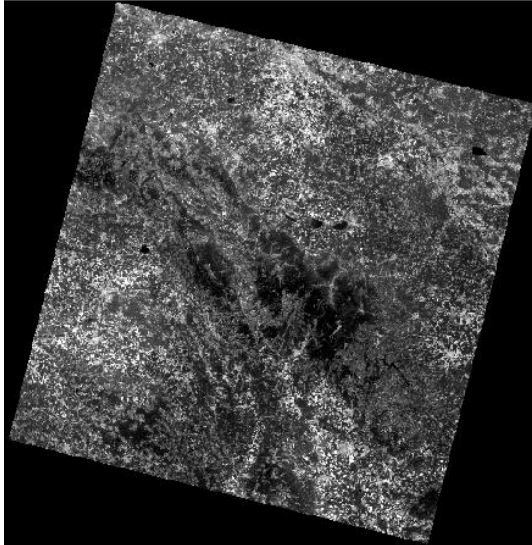
kde

L_{λ} = TOA radiance

M_L = faktor odečtený ze souboru metadat (RADIANCE_MULT_BAND_x)

AL = specifický faktor odečtený ze souboru metadat
(RADIANCE_ADD_BAND_x)

Q_{cal} = hodnoty pixelů (snímek TIRS 1/TIRS 2) (USGS 2019c).



Obrázek 13 Snímek TIRS 1 přepočtený na hodnoty TOA radiance; Zdroj: Vlastní

4.4.2 Konverze na At-Satellite Brightness Temperature

Dalším krokem ve výpočtu teploty povrchu je konverze na tzv. At-Satellite Brightness Temperature. Pro její výpočet jsem použila nástroj *Raster Calculator*, kde jsem použila vzorec

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 272,15 \text{ [}^\circ\text{C]},$$

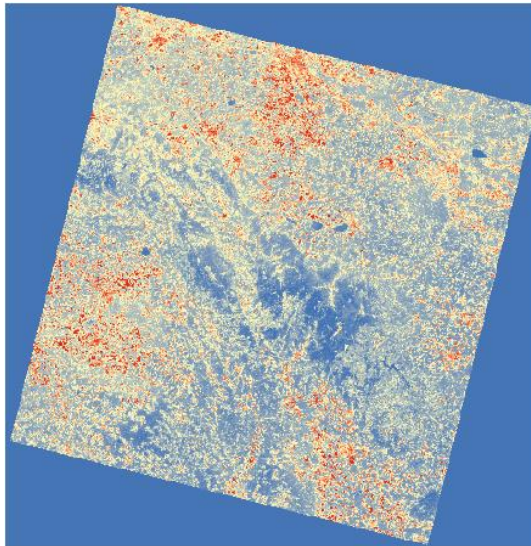
kde

T = At-Satellite Brightness Temperature

L_λ = TOA radiance

K_1 = specifická termální konstanta odečtená ze souboru metadat
(K1_CONSTANT_BAND_x)

K_2 = specifická termální konstanta odečtená ze souboru metadat
(K2_CONSTANT_BAND_x) (USGS 2019c).



Obrázek 14 At-Satellite Brightness Temperature snímek; Zdroj: Vlastní

4.4.3 Úprava hodnot o hodnotu emisivity povrchu

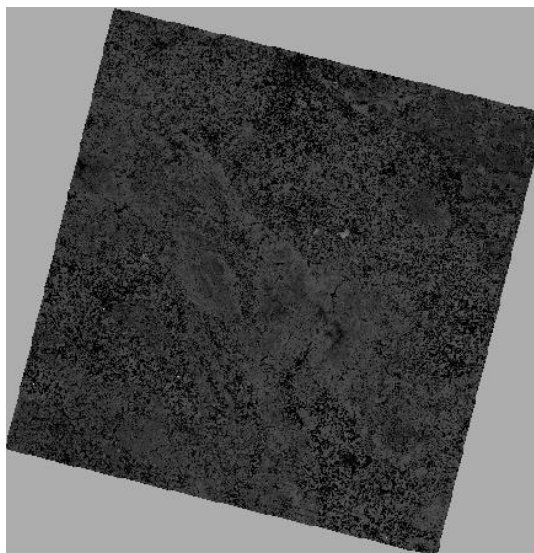
Třetím krokem výpočtu teploty povrchu byla úprava hodnot indexu NDVI o hodnotu emisivity povrchu. K výpočtu jsem použila v nástroji *Raster Calculator* vzorec

$$e = 0,004Pv + 0,986,$$

kde

Pv = podíl vegetace

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \text{ (USGS 2019c).}$$



Obrázek 15 Index NDVI upravený o hodnotu emisivity povrchu; Zdroj: Vlastní

4.4.4 Výpočet konečné teploty povrchu

Posledním krokem k výpočtu teploty povrchu byl samotný výpočet teploty povrchu v nástroji *Raster Calculator* pomocí vzorce

$$\text{Teplota povrchu} = T / 1 + w * (T / p) * \ln(e),$$

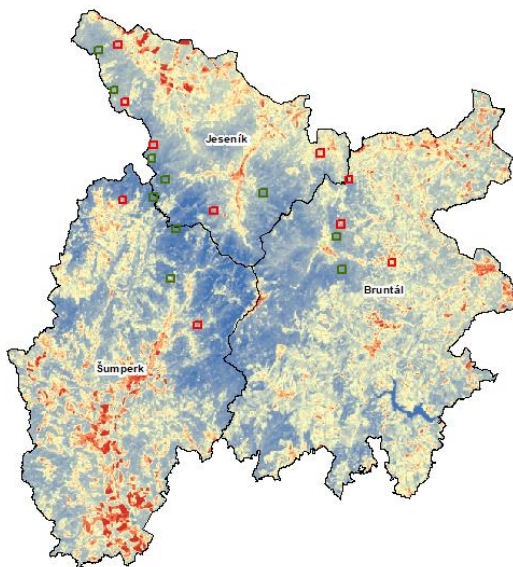
kde

$$p = 14380$$

T = At-Satellite Brightness Temperature

w = vlnová délka emitované radiance (TIRS 1/TIRS 2) (USGS 2019c).

Následně jsem pomocí nástroje *Cell Statistics* vypočítala průměrnou hodnotu teploty povrchu z teplot vypočítaných ze snímků TIRS 1 a TIRS 2. Výsledný obraz jsem pomocí nástroje *Extract by Mask* ořízla podle hranic příslušných okresů. Následně jsem zjistila průměrné hodnoty teploty povrchu v jednotlivých lokalitách pomocí nástroje *Zonal Statistics as Table*. Tento postup jsem provedla u všech snímků a z výsledků z jednotlivých zonálních statistik jsem v programu Microsoft Excel 2016 vytvořila graf *Průměrné teploty povrchu v letech 2013-2018* (viz. Výsledky). Pro správnou interpretaci výsledků byl v programu Statistica proveden test normality a následně jsem v programu Microsoft Excel 2016 provedla dva statistické testy, F-test a T-test, a vytvořila tabulku jejich výsledků *Výsledky statistických testů teploty povrchu* (viz. Výsledky).

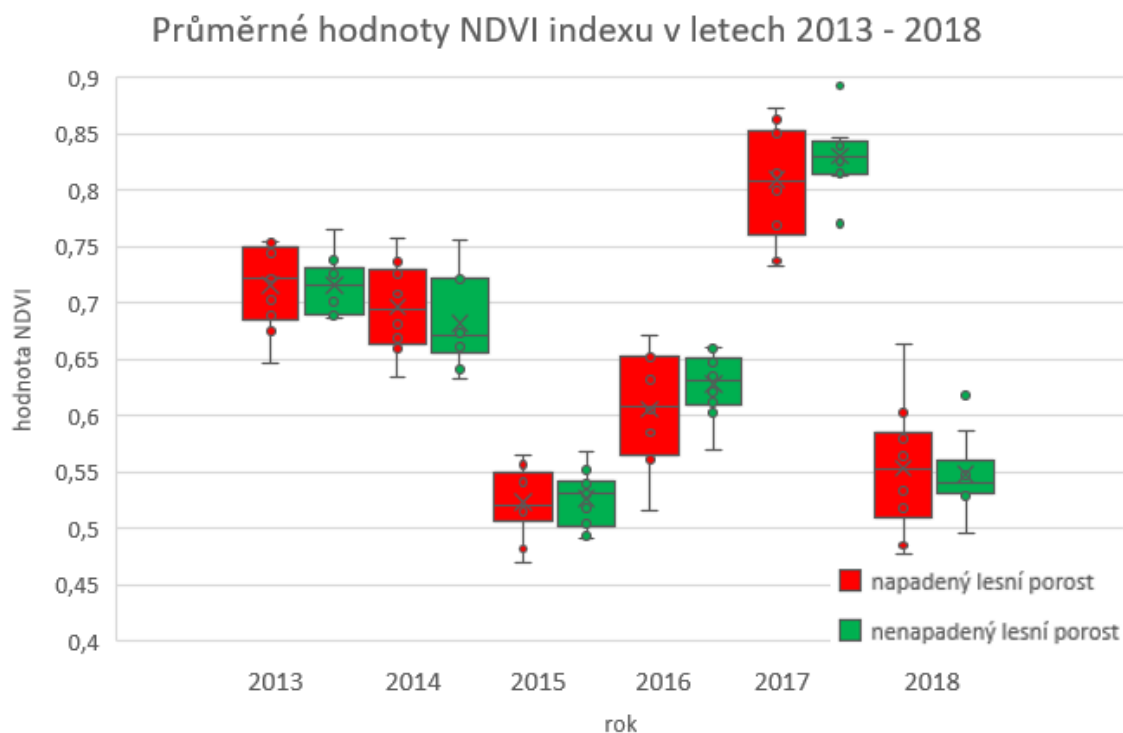


Obrázek 16 Teplota povrchu; Zdroj: Vlastní

Nakonec jsem za každý rok vytvořila mapu *Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk* (viz. Přílohy). Do mapy jsem pro lepší interpretaci zanesla názvy a hranice okresů, hranici státu, satelitní snímek oblasti a tabulku s průměrnou hodnotou teploty povrchu ve všech lokalitách reprezentujících napadený i nenapadený porost.

5 Výsledky

5.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)



Obrázek 17 Průměrné hodnoty NDVI indexu v letech 2013-2018; Zdroj: Vlastní

Výsledky vypočteného indexu NDVI zobrazené v grafu *Průměrné hodnoty NDVI indexu v letech 2013-2018* znázorňují dynamiku hodnot NDVI jak v jednotlivých letech, tak i v hodnotách reprezentujících napadené a nenapadené lesní porosty.

Z výsledků je patrná klesající tendence hodnot NDVI v letech 2013-2015, kdy v roce 2015 dosáhl pokles hodnot svého vrcholu a od roku 2016 došlo k opětovnému zlepšení, ovšem kromě roku 2018, kdy hodnoty indexu NDVI zaznamenaly prudký pokles. Ve většině případů dosahovaly průměrné hodnoty indexu NDVI nenapadených lesních porostů nepatrně vyšších hodnot než hodnoty porostů napadených. Opačný trend se projevil pouze v roce 2014 a 2018. Rozdíly mezi hodnotami byly ale skutečně pouze minimální.

Tabulka 2 Výsledky statistických testů indexu NDVI

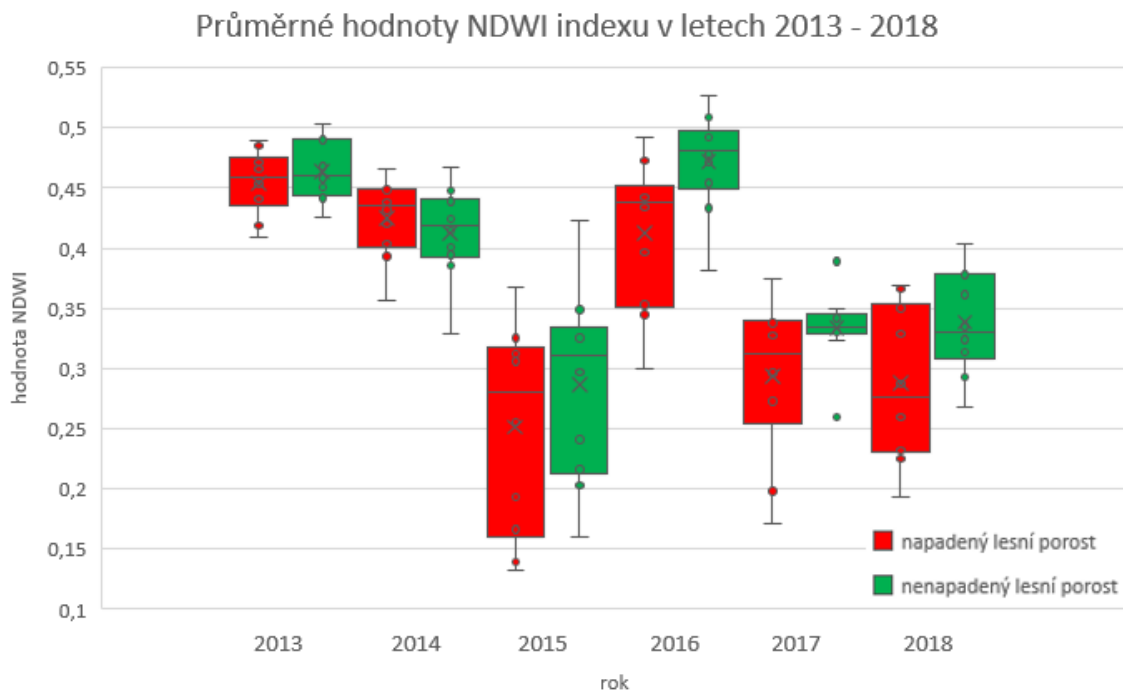
Výsledky statistických testů indexu NDVI						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
F-test	0,291	0,949	0,550	0,118	0,156	0,153
T-test	0,497	0,210	0,403	0,114	0,159	0,394

Zdroj: Vlastní výpočet

Teorii o minimálních rozdílech mezi hodnotami reprezentujícími napadené a nenapadené lesní porosty založenou na vizuální interpretaci grafu potvrzují i výsledky provedených statistických testů F-test a T-test zobrazené v tabulce *Výsledky statistických testů indexu NDVI*.

Výsledky F-testu, které slouží pro zjištění statistického rozdílu dvou rozptylů (napadené a nenapadené lesní porosty), potvrdily, že se od sebe jednotlivé rozptyly nijak významně statisticky neliší, jelikož hodnota p byla ve všech případech vyšší než 0,05. Také výsledky dvouvýběrového nepárového T-testu potvrdily, že se střední hodnoty napadených a nenapadených lesních porostů v podstatě neliší, jelikož hodnoty p byly ve všech případech vyšší než 0,05. Největšího, i když minimálního, rozdílu hodnot indexu NDVI dosáhl rok 2016, kdy se $p = 0,114$.

5.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)



Obrázek 18 Průměrné hodnoty NDWI indexu v letech 2013-2018; Zdroj: Vlastní

Výsledky vypočteného indexu NDWI zobrazené v grafu *Průměrné hodnoty NDWI indexu v letech 2013-2018* znázorňují dynamiku hodnot NDWI jak v jednotlivých letech, tak i v hodnotách reprezentujících napadené a nenapadené lesní porosty.

Z výsledků je patrná klesající tendence hodnot NDWI v letech 2013-2015, kdy v roce 2015 dosáhl pokles hodnot svého vrcholu, následný nárůst v roce 2016 a opětovný pokles v letech 2017 a 2018. Ve většině případů dosahovaly průměrné hodnoty indexu NDWI nenapadených lesních porostů nepatrně vyšších hodnot než hodnoty porostů napadených. Opačný trend se projevil pouze v roce 2014. Největší rozdíly byly patrné v roce 2016, kdy se rozdíl mezi hodnotami zdá být největší, dále pak v letech 2017 a 2018.

Tabulka 3 Výsledky statistických testů indexu NDWI

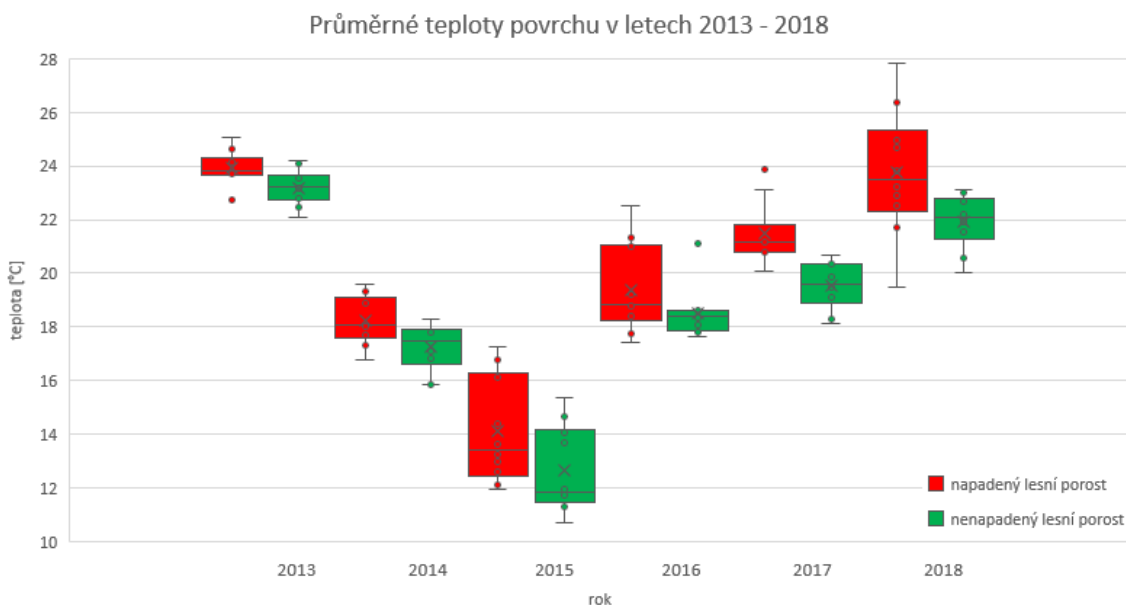
Výsledky statistických testů indexu NDWI						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
F-test	0,827	0,645	0,824	0,249	0,040	0,259
T-test	0,224	0,226	0,174	0,011	0,052	0,025

Zdroj: Vlastní výpočet

Teorii o rozdílech mezi hodnotami reprezentujícími napadené a nenapadené lesní porosty, založenou na vizuální interpretaci grafu, potvrzují i výsledky provedených statistických testů F-test a T-test zobrazené v tabulce *Výsledky statistických testů indexu NDWI*.

Výsledky F-testu, které slouží pro zjištění statistického rozdílu dvou rozptylů, potvrdily, že se od sebe rozptyly v letech 2013, 2014 a 2015 nijak významně statisticky neliší, jelikož hodnota p byla v těchto letech vyšší než 0,05. Na rozdíl od roku 2017, kdy byla hodnota $p < 0,05$. Menší rozdíly v rozptylu hodnot byly patrné také v letech 2016 a 2018. Také výsledky dvouvýběrového nepárového T-testu potvrdily stejnou tendenci, kdy se střední hodnoty napadených a nenapadených lesních porostů nejvíce lišily v letech 2016-2018, kdy hodnoty p byly v letech 2016 a 2018 nižší než 0,05 a v roce 2017 se $p = 0,052$. Největší rozdíly hodnot NDWI byly zaznamenány v roce 2016, kdy se $p = 0,011$.

5.3 Teplota povrchu



Obrázek 19 Průměrné teploty povrchu v letech 2013-2018; Zdroj: Vlastní

Výsledky vypočtených hodnot teploty povrchu zobrazené v grafu *Průměrné teploty povrchu v letech 2013-2018* znázorňují dynamiku teploty jak v jednotlivých letech, tak i v teplotách reprezentujících napadené a nenapadené lesní porosty.

Z výsledků je patrná klesající tendence teplot v letech 2013-2015, kdy v roce 2015 dosáhly teploty svého minima, a následný nárůst v letech 2016-2018. Co se rozdílů teplot mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty týče, byly, na rozdíl od předchozích dvou analýz, nejvíce patrné. Ve všech případech dosahovaly průměrné teploty povrchu nenapadených lesních porostů znatelně nižších hodnot než hodnoty porostů napadených.

Tabulka 4 Výsledky statistických testů teploty povrchu

Výsledky statistických testů teploty povrchu						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
F-test	0,844	0,819	0,576	0,128	0,423	0,017
T-test	0,009	0,013	0,045	0,087	0,000	0,022

Zdroj: Vlastní výpočet

Teorii o rozdílech mezi teplotami reprezentujícími napadené a nenapadené lesní porosty založenou na vizuální interpretaci grafu potvrzují i výsledky provedených statistických testů F-test a T-test zobrazené v tabulce *Výsledky statistických testů teploty povrchu*.

Výsledky F-testu, které slouží pro zjištění statistického rozdílu dvou rozptylů, potvrdily, že se od sebe rozptyly v letech 2013, 2014, 2015, 2016 a 2018 nijak významně statisticky neliší, jelikož hodnota p byla v těchto letech vyšší než 0,05. Oproti tomu v roce 2017 byla hodnota $p < 0,05$. Menší rozdíly v rozptylu hodnot byly patrné také v roce 2016. Také výsledky dvouvýběrového nepárového T-testu potvrdily stejnou tendenci, kdy se střední hodnoty teplot napadených a nenapadených lesních porostů lišily ve všech letech kromě roku 2016, kdy byla hodnota $p > 0,05$. Největší rozdíl mezi středními hodnotami teplot byl zaznamenán v roce 2017, kdy se hodnota $p = 0.000$.

Tabulka 5 Hodnoty p statistického testu T-test pro jednotlivé prediktory

Hodnoty p statistického testu T-test pro jednotlivé prediktory						
Prediktor	2013	2014	2015	2016	2017	2018
NDVI	0,497	0,210	0,403	0,114	0,159	0,394
NDWI	0,224	0,226	0,174	0,011	0,052	0,025
Teplota povrchu	0,009	0,013	0,045	0,087	0,000	0,022

Zdroj: Vlastní

6 Diskuse

6.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Průměrné hodnoty indexu NDVI jsou zobrazeny v grafu *Průměrné hodnoty NDVI indexu v letech 2013-2018* (viz. Výsledky). Z výsledků je patrná klesající tendence hodnot v letech 2013-2015, následné zvýšení hodnot v letech 2016 a 2017 a opětovný prudký pokles v roce 2018.

Klesající tendence hodnot indexu NDVI v letech 2013-2015, jejichž úbytek znamená ztrátu chlorofylu v lesních porostech, naznačuje probíhající kůrovcovou kalamitu, která vyvrcholila v roce 2015. Tuto domněnku potvrzují také výsledky výzkumu publikované na webu MeziStromy.cz, které tvrdí, že se v České republice v důsledku působení sucha objevily dvě kůrovcové kalamity. Jedna proběhla v 90. letech minulého století a druhá se projevila právě v letech 2003-2015 (MeziStromy.cz 2019). V České republice dosáhl v letech 2003-2015 objem kůrovcového dříví více než 14 mil. m³ (kurovcoveinfo.cz 2019b). Jedním z příkladů lokalit dokazujících gradaci lýkožrouta smrkového je území Severní Moravy. Konkrétně v okrese Bruntál byl v roce 2011 objem evidovaného kůrovcového dříví na úrovni přibližně 50 000 m³. Poté začal objem kůrovcového dříví stoupat a v roce 2015 již dosáhl objemu téměř 400 000 m³ (MeziStromy.cz 2019).

Po vyvrcholení kůrovcové kalamity v roce 2015 došlo v následujících letech ke zvýšení hodnot indexu NDVI, které znamenají zvýšení množství chlorofylu v lesních porostech, což bylo pravděpodobně způsobeno založením nových lesních porostů po prodělané kalamitě. Prudký pokles hodnot indexu v roce 2018 může mít hned několik příčin. Jelikož neexistují žádná pro potřeby diplomové práce dostupná data, kterými bych mohla svá tvrzení podložit, mohu se jen domnívat, že prudký pokles hodnot v roce 2018 by mohlo mít na svědomí nadměrné horko a sucho, které v loňském roce panovalo. Na druhou stranu by nízké hodnoty indexu mohly poukazovat na počátek dalšího postupu kůrovcové kalamity, protože podle dostupné literatury (například Senf et al. 2017) vysoké teploty a nedostatek srážek lýkožroutu smrkovému vyhovují a podporují jeho zrychlený vývoj. Při takto příznivých podmínkách se může vyvinout i několik generací lýkožrouta během jedné sezóny (kurovcoveinfo.cz 2019b).

Zástupce lokalit představujících lesní porosty zasažené a lesní porosty nezasažené lesní disturbancí jsem vybírala na základě dat ÚHÚL o zdravotním stavu vegetace z roku 2017 a následně jsem porovnávala, jestli lokality označené v roce 2017 jako nezasažené

lesní disturbancí vykazují vyšší hodnoty indexu NDVI než lokality označené jako zasažené a zda tomu tak bylo i v ostatních letech.

Při porovnávání hodnot NDVI mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty jsem vycházela z myšlenky, že se napadená vegetace projevuje změnou schopnosti odrážet elektromagnetické záření v různých částech spektra, což vede ke změně tvaru spektrální křivky zejména v pásmu NIR, které je citlivé na změnu obsahu chlorofylu například v listech a jehlicích, a tudíž by lesní porosty označené jako nenapadené měly vykazovat vyšší hodnoty indexu NDVI (Klouček et al. 2019).

Jak vizuální interpretace grafu, tak statistické výsledky dokazují, že hodnoty indexu NDVI se mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty ani v jednom roce mezi sebou statisticky nijak významně neliší. Ovšem i mezi minimálními rozdíly se dají najít mírné odlišnosti. Ve všech letech, kromě roku 2014 a 2018, vykázaly lesní porosty označené jako nenapadené nepatrně vyšší hodnoty indexu NDVI než porosty označené jako napadené, což potvrzuje předchozí myšlenku. Ovšem i ty minimální rozdíly jsou tak malé, že se dá říci, že během kůrovcové kalamity byly napadené i porosty označené jako nenapadené, a naopak po skončení kalamity se zlepšily hodnoty napadených porostů stejně jako nenapadených.

Neprokázaná odlišitelnost napadených a nenapadených lesních porostů na základě vegetačního indexu NDVI se shoduje například se závěry Havašové et al. (2015) či Abdullah et al. (2019) kteří rovněž identifikovali NDVI jako ne zcela vhodný vegetační index při detekci kůrovcem napadených stromů pomocí snímků pořízených družicemi Landsat. Opačných výsledků ale dosáhli například Klouček et al (2019), kteří úspěšně, v podrobnějším měřítku na úrovni jednotlivých stromů, využili NDVI vypočtené z multispektrálních dat pořízených senzory umístěnými na bezpilotních leteckých prostředcích.

6.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)

Kůrovcovou kalamitu, která proběhla v letech 2013-2015, dokazují i výsledky hodnot indexu NDWI zobrazené v grafu *Průměrné hodnoty NDWI indexu v letech 2013-2018* (viz. Výsledky), které jsou citlivé na množství vody ve vegetaci. Stejně jako hodnoty indexu NDVI, vykazují hodnoty NDWI klesající trend hodnot v letech 2013-2015.

Stejně jako v případě indexu NDVI došlo i v tomto případě v roce 2016 k nárůstu hodnot, které podporují mou domněnku o nově založených porostech po proběhlé kalamitě. Ovšem na rozdíl od indexu NDVI došlo k opětovnému poklesu hodnot indexu

NDWI už v roce 2017, což ale může být způsobeno nedostatkem srážek, který v roce 2017 panoval. Pokles hodnot pokračoval i v roce 2018. Jak už bylo řečeno, pokles hodnot indexu NDWI v roce 2018 může mít, podobně jako v případě NDVI, několik příčin. Těmito příčinami mohou být jak nadměrné sucho a horko, tak i například počátek dalšího postupu kůrovcové kalamity.

Pro porovnání hodnot mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty jsem použila stejné lokality jako u indexu NDVI vybrané na základě dat ÚHÚL o zdravotním stavu vegetace z roku 2017 a zkoumala jsem, zda porosty označené jako nenapadené vykazují vyšší hodnoty indexu NDWI než porosty označené jako napadené.

Stejně jako u indexu NDVI jsem při porovnávání hodnot NDWI mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty vycházela z myšlenky, že se napadená vegetace projevuje změnou schopnosti odrážet elektromagnetické záření v různých částech spektra, což vede ke změně tvaru spektrální křivky zejména v pásmu NIR, které je citlivé na změnu obsahu chlorofylu například v listech a jehlicích, a tudíž by lesní porosty označené jako nenapadené měly vykazovat vyšší hodnoty indexu NDWI (Klouček et al. 2019).

Vizuální interpretace grafu i statistické výsledky prokázaly, že hodnoty indexu NDWI se mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty v letech 2013-2015 mezi sebou statisticky nijak významně neliší, což znamená, že během kůrovcové kalamity byly napadené i porosty označené jako nenapadené. Myšlenku o tom, že nenapadené lesní porosty by měly vykazovat vyšší hodnoty indexu NDWI, potvrzují hodnoty z let 2016 a 2018. Nejvyšší rozdíl mezi středními hodnotami byl zaznamenán v roce 2016, kdy se hodnota p statistického testu T-test rovnala 0,011. Patrný rozdíl středních hodnot mezi napadenými a nenapadenými porosty byl i v roce 2018, kdy se hodnota $p = 0,025$. Malý statistický rozdíl mezi hodnotami indexu NDWI napadených a nenapadených porostů byl zaznamenán i v roce 2017, kdy se hodnota $p = 0,052$.

Z výsledků je proto patrné, že na základě NDWI je možné prokazatelně detekovat lesní porosty, které byly v konkrétním období napadené lýkožroutem smrkovým. Index NDWI je tak možné doporučit jako jednoduchý ukazatel zdravotního stavu lesních porostů v souvislosti s přítomností lesních škůdců, který lze prakticky aplikovat v lesním managementu. Využitelnost indexu NDWI dokládají i výsledky dosažené například Havašovou et al. (2015).

6.3 Teplota povrchu

Výsledky průměrných teplot jsou zobrazeny v grafu *Průměrné teploty povrchu v letech 2013-2018* (viz. Výsledky). Podle studie *Landsat Time Series and Lidar as Predictors of Live and Dead Basal Area Across Five Bark Beetle-Affected Forests* by lokality označené jako napadené měly vykazovat vyšší teploty povrchu než lokality označené jako nenapadené (Bright et al. 2014).

Podle zmíněné studie by tedy teploty povrchu měly během kůrovcové kalamity postupně až k jejímu vrcholu v roce 2015 stoupat a po jejím skončení by měly opět klesnout. Výsledky výpočtu ale vykazují úplně opačný trend. Stejně jako tomu bylo v případě vegetačních indexů, hodnoty do roku 2015 klesaly a od roku 2016 se začaly opět zvyšovat. To, že výsledné teploty neodpovídaly předpokladu, mohl způsobit fakt, že snímky, na jejichž základě jsem hodnoty počítala, nebyly pořízené každý rok ve stejném ročním období, a proto výsledné hodnoty nevyšly podle předpokladu. Jeden snímek byl pořízen v červnu, jeden v září, dva v květnu a dva v dubnu. Dalším faktem, který mohl vývoj teplot povrchu podpořit, je skutečnost, že po napadení lesního porostu kůrovcem došlo ve zkoumané lokalitě k vytěžení lokality. Těžba může způsobit nárůst teploty tím, že prozatím neosázené holiny vykazují vyšší teploty povrchu než napadený porost s ještě stojícími, byť už suchými stromy.

Co ale tvrzení z již zmíněné studie dokazuje, jsou rozdíly teploty mezi jednotlivými napadenými a nenapadenými lesními porosty. Pro porovnání jsem použila stejné lokality jako u vegetačních indexů vybrané na základě dat ÚHÚL o zdravotním stavu vegetace z roku 2017 a zkoumala jsem, zda porosty označené jako nenapadené vykazují nižší teploty povrchu než porosty označené jako napadené. Následně jsem zkoumala, zda tomu tak bylo i v ostatních letech.

Ve všech případech vykázaly lokality označené jako nenapadené nižší průměrné teploty povrchu než lokality napadené. Kromě roku 2016 se hodnoty i významně statisticky lišily. Největší rozdíl teplot mezi napadenými a nenapadenými porosty jsem zaznamenala v roce 2017, kdy se hodnota statistického testu T-test rovnala 0.

Teplota povrchu je jedinou ze zkoumaných proměnných, jejíž hodnoty vykazují prokazatelnou rozdílnost mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty už v období před nástupem kůrovcové kalamity v roce 2015. Proto se teplota jeví jako potenciální prediktor napadení lýkožroutem, což je v souladu například s aktuálními výsledky Abdullah et al. (2019), kteří lokalizovali svoji zájmovou lokalitu v Šumavském národním

parku a došli k velmi podobnému výsledku při detekci napadených stromů v tzv. zelené fázi.

Výsledky diplomové práce, stejně jako práce předchozích autorů (ZDROJE viz souhrn článků v rešerši), prokazují, že dálkový průzkum Země je nehraditelným nástrojem pro detekci porostů napadených lesními škůdci, který umožňuje jak detekovat aktuálně napadené lesní porosty, tak s dostatečnou přesností predikovat ohniska nového napadení. Mé tvrzení, že jak data Landsat, tak i data z jiných zdrojů dat DPZ jsou vhodná pro výzkum lesních disturbancí i v regionálním měřítku, potvrzuje i řada studií, mezi které patří například studie *Remote Sensing of Forest Insect Disturbances: Current State and Future Directions*.

Stejně tak je ze studie patrné, že vegetační indexy, případně z nich odvozované trajektorie (vývoj hodnoty indexu v čase) jsou využitelným nástrojem pro hodnocení zdravotního stavu lesních porostů (ZDROJE viz souhrn článků v rešerši).

Jako v každé studii, mohou být i moje výsledky ovlivněny několika vstupními neurčitostmi, kterými jsou zejména odlišné pořízení vstupních Landsat snímků (duben-červen) a neprovedení přepočtu TOA reflectance na surface reflectance a atmosférické korekce v případě výpočtu teploty povrchu. Neprovedení těchto metodických kroků mohlo potencionálně ovlivnit absolutní hodnoty vegetačních indexů a teploty v jednotlivých obdobích, což mohlo mít teoreticky za následek odlišnost ve vývoji zkoumaných proměnných oproti jiným studiím (ZDROJE viz souhrn článků v rešerši), který zcela nekorespondoval s obecně přijímanými předpoklady. Nicméně rozhodně toto drobné zanedbání neovlivnilo relativní porovnání napadených a nenapadených stromů v rámci jednotlivých let, které bylo hlavní náplní diplomové práce.

Kdybych měla provést celý průzkum znovu, zařadila bych do metod předzpracování obrazu také atmosférickou korekci, která by pomohla zpřesnit výsledné hodnoty jednotlivých výpočtů, a tím dosáhnout lepší porovnatelnosti výsledků mezi jednotlivými roky. Pokud bych já nebo někdo jiný chtěl ve výzkumu na Severní Moravě pokračovat, doporučila bych rozšíření vzorku sledovaných lokalit pro dosažení komplexnějších výsledků.

7 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabývala prostorovou dynamikou lesních disturbancí na Severní Moravě v letech 2013-2018 způsobené především působením lýkožrouta smrkového. K analýze jsem použila snímky vysokého rozlišení časové řady Landsat 8. V teoretické části jsem vysvětlila základní pojmy týkající se systémů dálkového průzkumu Země a problematiky lýkožrouta smrkového a pokusila jsem se vysvětlit jak základní metody používané ve výzkumech zdravotního stavu vegetace, tak i praktické příklady výzkumů řešených několika významnými výzkumnými týmy odborníků.

Na základě získaných poznatků jsem zvolila způsob řešení, který spočíval ve výpočtu dvou vegetačních indexů a teploty povrchu. Přesný postup jsem popsala v metodické části práce. Výsledkem práce jsou vypočtené a vizuálně a statisticky vzájemně vyhodnocené průměrné hodnoty NDVI, NDWI a teploty povrchu pro napadené a nenapadené lesní porosty, které byly prezentovány prostřednictvím tří grafů a 18 map zobrazujících výsledky jednotlivých veličin zvlášť za každý zkoumaný rok.

Před samotným řešením diplomové práce bylo spolu s vedoucím stanoveno několik základních výzkumných otázek, na které se práce svými výsledky snaží odpovědět. První z otázek se zabývala tím, zda jsou data pořízená družicí Landsat 8 vhodným datovým zdrojem pro monitoring lesních disturbancí v regionálním měřítku. Vzhledem k vysokému rozlišení snímků a na základě zjištěných výsledků mohu konstatovat, že časová řada snímků Landsat 8 je vhodná k výzkumu lesních disturbancí v regionálním měřítku.

Druhá otázka se zabývá myšlenkou, zda je možné pomocí multispektrálních snímků vysokého rozlišení pozorovat změny ve zdravotním stavu vegetace (úbytek chlorofylu), které způsobuje stres vyvolaný lýkožroutem smrkovým. Jak už bylo v práci mnohokrát citováno, vegetace se zhoršeným zdravotním stavem se vyznačuje změnou schopnosti odrážet elektromagnetické záření v různých částech spektra, a to zejména v části červené a NIR. A právě tato dvě spektrální pásma se využívají k výpočtu celosvětově nejpoužívanějšího vegetačního indexu, který indikuje právě množství chlorofylu ve vegetaci, a tímto indexem je Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Ovšem jak z mé, tak i z práce například z práce Havašové et al. (2015) je zřejmé, že pozorovat změny ve zdravotním stavu vegetace způsobené stresem vyvolaným

lýkožroutem smrkovým možné není, protože ani v jednom období nevykazuje NDVI mezi napadenými a nenapadenými lesními porosty žádnou statisticky významnou změnu.

Další otázka se zabývala tím, zda se liší vlhkost mezi napadenými a zatím nenapadenými lesními porosty. Stejně jako v případě indexu NDVI se i množství vody ve vegetaci hodnotí na základě změny schopnosti napadené vegetace odrážet elektromagnetické záření, tentokrát v částech NIR a SWIR. V tomto případě se jedná o výpočet indexu Normalize Difference Water Index (NDWI). Na základě poznatků ze studií a výsledků vlastního výzkumu mohu konstatovat, že zatím nenapadené lesní porosty vykazují vyšší obsah vody než porosty již napadené.

Poslední otázka se zabývala myšlenkou, zda lesní porosty vykazují v období před napadením lýkožroutem vyšší teplotu. Podle poznatků získaných ze studií zpracovaných v teoretické části by tomu tak být nemělo. Naopak nenapadené lesní porosty by měly vykazovat teploty nižší. Ovšem výsledky mého výzkumu ukázaly pravý opak. Tento jev, jak už bylo vysvětleno v diskusi, mohl být způsoben faktem, že všechny snímky použité k výpočtu teploty povrchu nebyly pořízeny ve stejném ročním období, a také neproběhla standardizace pomocí atmosférické korekce. Proto výsledné teploty neodpovídaly předpokladu.

Na základě získaných výsledků mohu konstatovat, že se metodami dálkového průzkumu Země skutečně dá monitorovat průběh lesních disturbancí, a to i v celku jednoduchými metodami založenými na výpočtu několika základních veličin souvisejících s obsahem chlorofylu (NDVI), vlhkostí (NDWI) a teplotou, které umožňují identifikovat zdravotní stav vegetace. Z dosažených výsledků diplomové práce je patrné, že nejvhodnější ze studovaných proměnných je pro odlišení (ne)napadených lesních porostů je teplota, následovaná NDWI. Naopak nejméně vhodným ukazatelem je NDVI. Jelikož se jedná pouze o případovou studii lokalizovanou v Severní Moravě, nejsou dosažené výsledky obecně aplikovatelné pro jakékoliv jiné území, ale platí pouze v lokalitách blízkých se svými fyzicko-geografickými podmínkami Severní Moravě.

Problematika působení lýkožrouta smrkového na lesy v České republice je v současné době velmi diskutovaným a aktuálním tématem. Proto si myslím, že výsledky mé práce by se mohly stát jakousi pilotní studií prokazující využitelnost zvoleného metodického postupu pro další výzkum lesních disturbancí způsobených lesními škůdci, zejména pak lýkožroutem smrkovým.

8 Zdroje informací

ABDULLAH, Haidi, Roshanak DARVISHZADEH, Andrew SKIDMORE, Marco HEURICH, Haidi ABDULLAH, Roshanak DARVISHZADEH, Andrew K. SKIDMORE a Marco HEURICH, 2019. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus*, L.) Infestation. *Remote Sensing* [online]. B.m.: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **11**(4), 398 [vid. 2019-04-16]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11040398

BRIGHT, Benjamin C, Andrew T HUDAK, Robert E KENNEDY a Arjan J H MEDDENS, 2014. Landsat Time Series and Lidar as Predictors of Live and Dead Basal Area Across Five Bark Beetle-Affected Forests. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING* [online]. **7**(8) [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: doi:10.1109/JSTARS.2014.2346955

DOCPLAYER, 2018. *Systémy dálkového průzkumu Země - PDF* [online] [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/45769370-Systemy-dalkoveho-pruzkumu-zeme.html>

GISGEOGRAPHY, 2018. *What is Remote Sensing? The Definitive Guide to Earth Observation - GIS Geography* [online] [vid. 2018-12-19]. Dostupné z: <https://gisgeography.com/remote-sensing-earth-observation-guide/>

HAIS, Martin, Jan WILD, Luděk BEREC, Josef BRŮNA, Robert KENNEDY, Justin BRAATEN a Zdeněk BROŽ, 2016. Landsat Imagery Spectral Trajectories—Important Variables for Spatially Predicting the Risks of Bark Beetle Disturbance. *Remote Sensing* [online]. **8**(8), 687 [vid. 2019-03-30]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs8080687

HAVAŠOVÁ, Mária, Tomáš BUCHA, Ján FERENČÍK a Rastislav JAKUŠ, 2015. Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Annals of Forest Research* [online]. **58**(2), 1 [vid. 2019-03-30]. ISSN 20652445. Dostupné z: doi:10.15287/afr.2015.388

KLOUČEK, Tomáš, Jan KOMÁREK, Ondřej LAGNER, Michal FOGLE a Kateřina GDULOVÁ, 2019. *Detekce napadení lesních porostů pomocí bezpilotních leteckých prostředků - Certifikovaná metodika*. ISBN 9788021329324.

KUROVCOVEINFO.CZ, 2019a. *Kůrovcové Info* [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.kurovcoveinfo.cz/>

KUROVCOVEINFO.CZ, 2019b. *Lýkožrout smrkový | Kůrovcové Info* [online] [vid. 2019-

03-25]. Dostupné z: <http://www.kurovcoveinfo.cz/lykozrout>

LINKEDIN, 2019. *NDVI, NDBI & NDWI Calculation Using Landsat 7, 8* [online] [vid. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160304987>

MECHANIZACE ZEMĚDĚLSTVÍ, 2013. *Využití dálkového průzkumu pro lokálně cílenou agrotechniku | Mechanizace zemědělství* [online] [vid. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.mechanizaceweb.cz/vyuziti-dalkoveho-pruzkumu-pro-lokalne-cilenou-agrotechniku/>

MEDDENS, Arjan J.H., Jeffrey A. HICKE, Lee A. VIERLING a Andrew T. HUDAK, 2013. Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* [online]. B.m.: Elsevier, **132**, 49–58 [vid. 2019-03-30]. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/J.RSE.2013.01.002

MEIGS, Garrett W., Robert E. KENNEDY a Warren B. COHEN, 2011. A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests. *Remote Sensing of Environment* [online]. **115**(12), 3707–3718 [vid. 2019-03-30]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2011.09.009

MEZISTROMY.CZ, 2019. *Lýkožrout smrkový (kůrovec) – příčiny přemnožení | MeziStromy.cz* [online] [vid. 2019-03-27]. Dostupné z: [https://www.mezistromy.cz/lesni-kalamity/lykozrout-smrkovy-\(kurovec\)-priciny-premnozeni/odborny#](https://www.mezistromy.cz/lesni-kalamity/lykozrout-smrkovy-(kurovec)-priciny-premnozeni/odborny#)

NASA, 2018. *Landsat 8 Overview* « *Landsat Science* [online] [vid. 2018-12-20]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview/>

SEIDL, Rupert a Werner RAMMER, 2017. Climate change amplifies the interactions between wind and bark beetle disturbances in forest landscapes. *Landscape Ecology* [online]. **32**(7), 1485–1498 [vid. 2019-03-30]. ISSN 0921-2973. Dostupné z: doi:10.1007/s10980-016-0396-4

SENF, Cornelius, Dirk PFLUGMACHER, Michael A. WULDER a Patrick HOSTERT, 2015. Characterizing spectral–temporal patterns of defoliator and bark beetle disturbances using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment* [online]. B.m.: Elsevier, **170**, 166–177 [vid. 2019-03-30]. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/J.RSE.2015.09.019

SENF, Cornelius, Rupert SEIDL a Patrick HOSTERT, 2017. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. B.m.: Elsevier, **60**, 49–60 [vid. 2019-03-30]. ISSN 0303-2434. Dostupné z: doi:10.1016/J.JAG.2017.04.004

ÚHÚL, 2019a. *ÚHÚL: Informace o lesním hospodářství* [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/mapylhpovyst.html>

ÚHÚL, 2019b. *ÚHÚL: Zdravotní stav lesů* [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://geoportal.uhul.cz/mapy/mapyzsl.html>

USGS, 2018. *What is remote sensing and what is it used for?* [online] [vid. 2018-12-19]. Dostupné z: https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products

USGS, 2019a. *EarthExplorer - Home* [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

USGS, 2019b. *Landsat 8 Pre-Collection Quality Assessment Band | Landsat Missions* [online] [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://landsat.usgs.gov/qualityband>

USGS, 2019c. *Using The USGS Landsat 8 Product* [online] [vid. 2019-02-08]. Dostupné z: https://www.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php

WENG, Qihao, 2013. Introduction to remote sensing systems, data, and applications. *Remote Sensing of Natural Resources* [online]. (April), 3–19. Dostupné z: doi:10.1201/b15159

XUE, Jinru a Baofeng SU, 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors* [online]. **2017**, 1–17 [vid. 2019-04-09]. ISSN 1687-725X. Dostupné z: doi:10.1155/2017/1353691

YOUTUBE, 2019. *Remove Cloud Landsat8 in Arcgis - YouTube* [online] [vid. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=vx6VYLM48DQ>

8.1 Použitý software

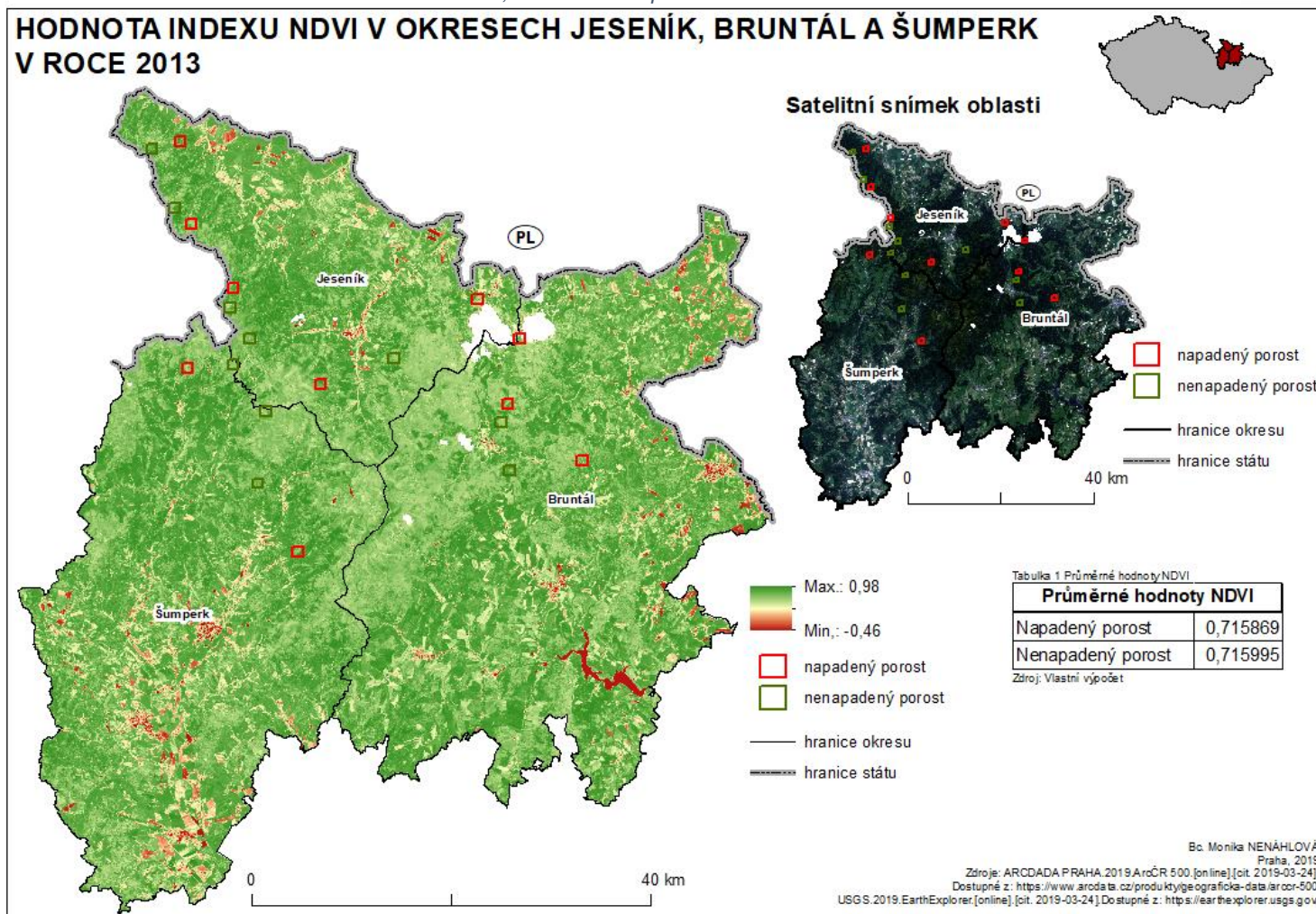
- Microsoft Office Word 2016
- Microsoft Office Excel 2016
- ArcMap 10.6.1
- Statistica

9 Seznam příloh

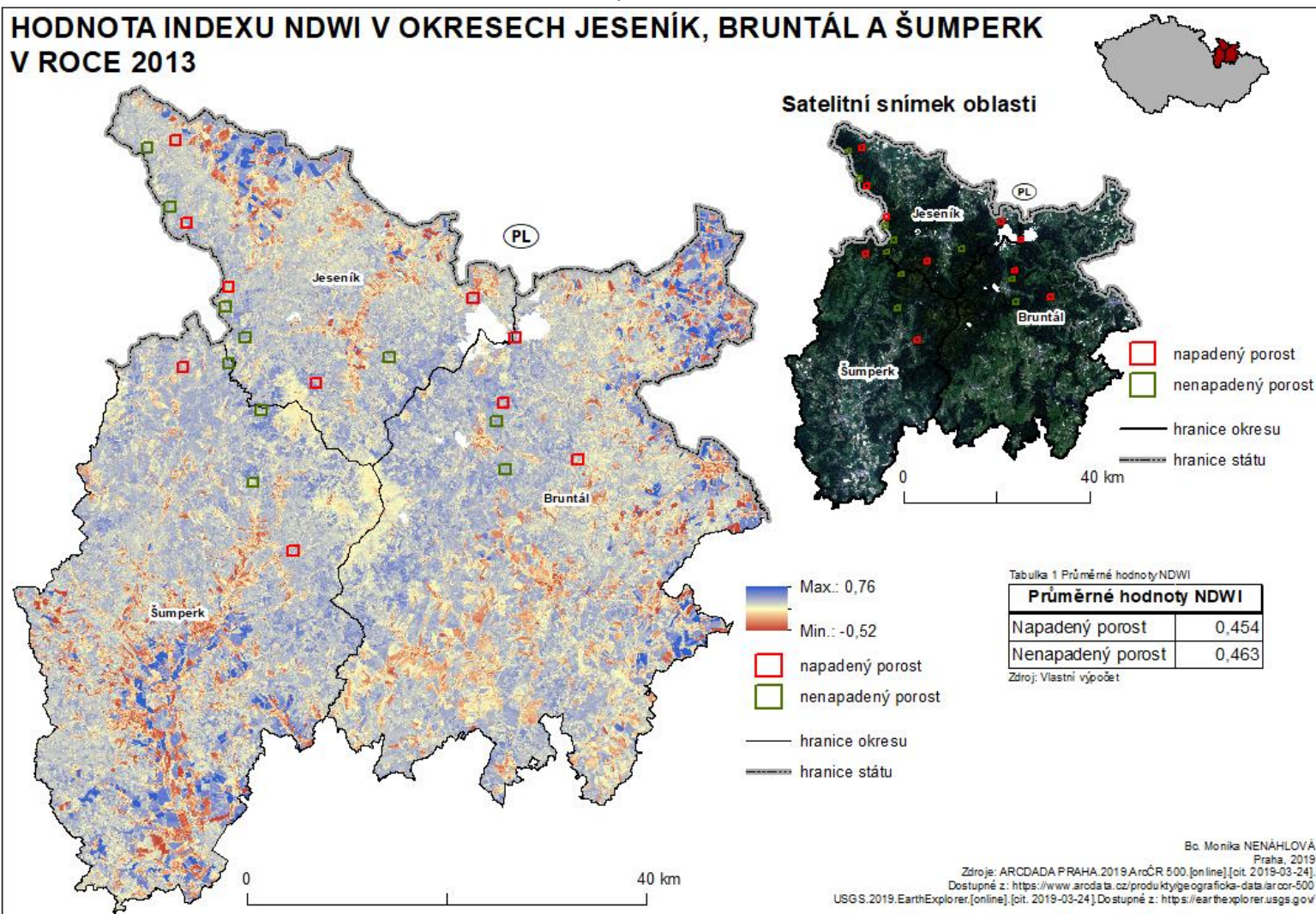
- Příloha 1** Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2013
- Příloha 2** Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2013
- Příloha 3** Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2013
- Příloha 4** Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2014
- Příloha 5** Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2014
- Příloha 6** Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2014
- Příloha 7** Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2015
- Příloha 8** Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2015
- Příloha 9** Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2015
- Příloha 10** Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2016
- Příloha 11** Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2016
- Příloha 12** Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2016
- Příloha 13** Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2017
- Příloha 14** Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2017
- Příloha 15** Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2017
- Příloha 16** Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2018
- Příloha 17** Hodnota indexu NDWI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2018
- Příloha 18** Teplota povrchu v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk roce 2018

10 Přílohy

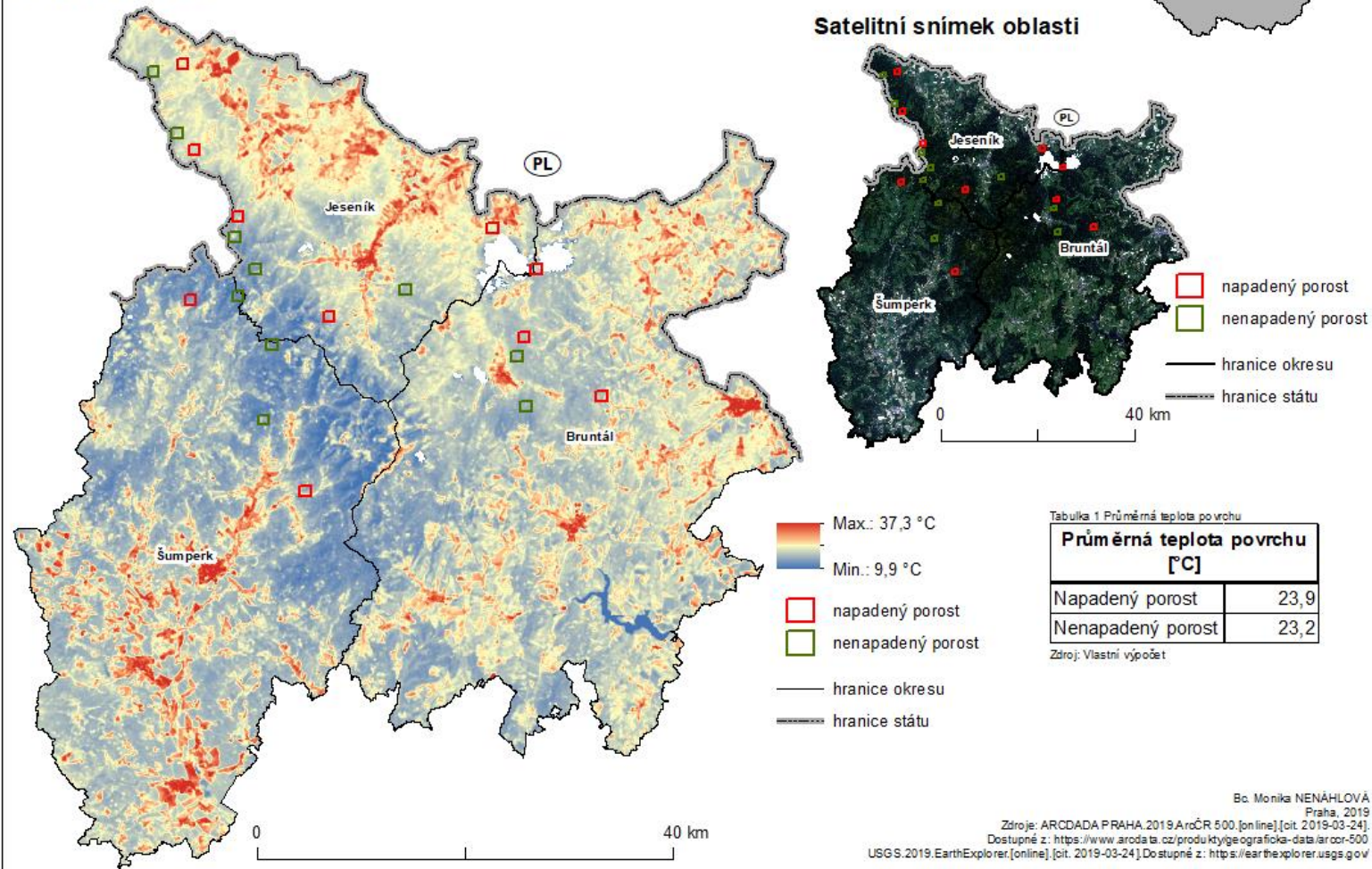
Příloha 1 Hodnota indexu NDVI v okresech Jeseník, Bruntál a Šumperk v roce 2013

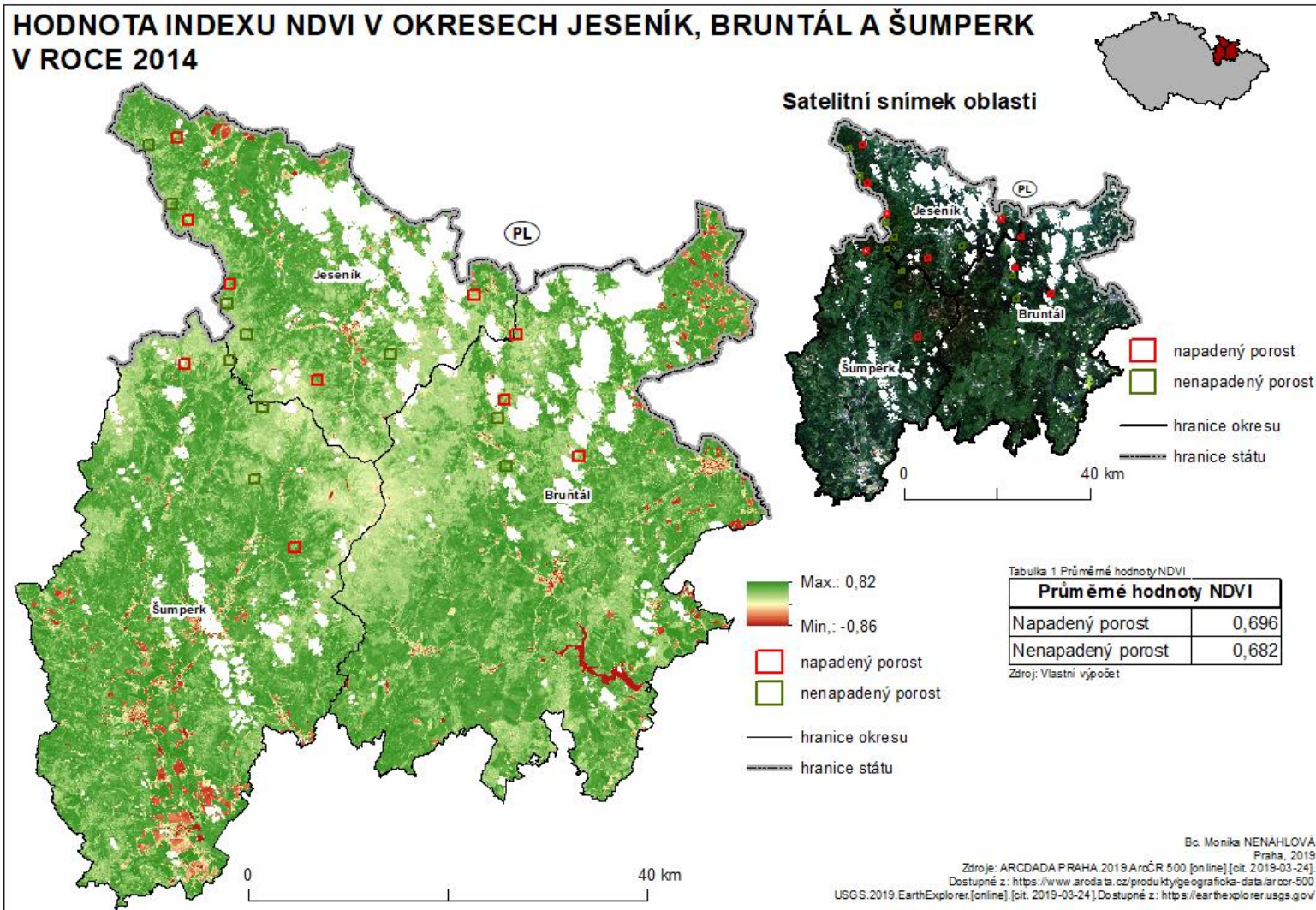


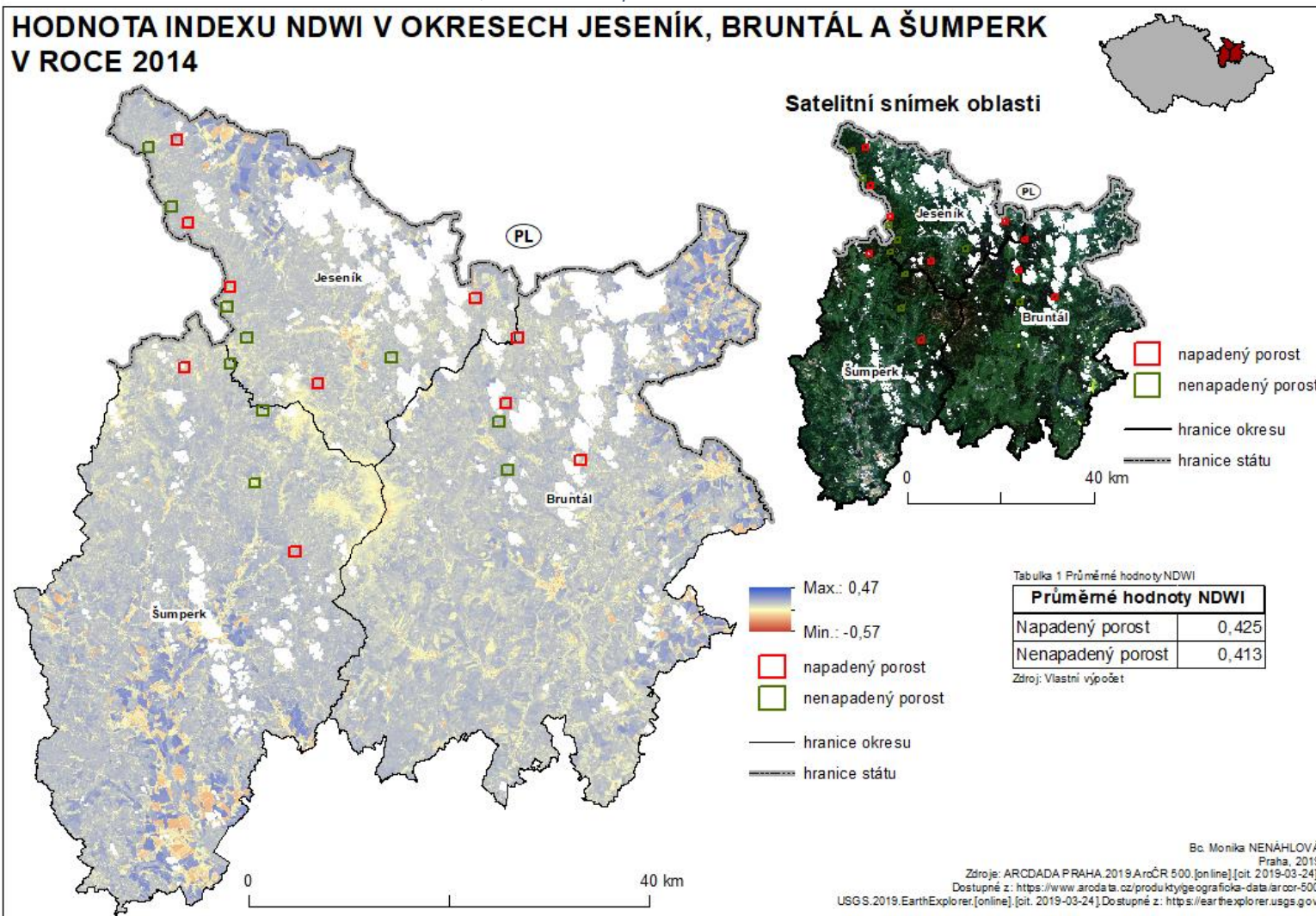
HODNOTA INDEXU NDWI V OKRESECH JESENÍK, BRUNTÁL A ŠUMPERK V ROCE 2013

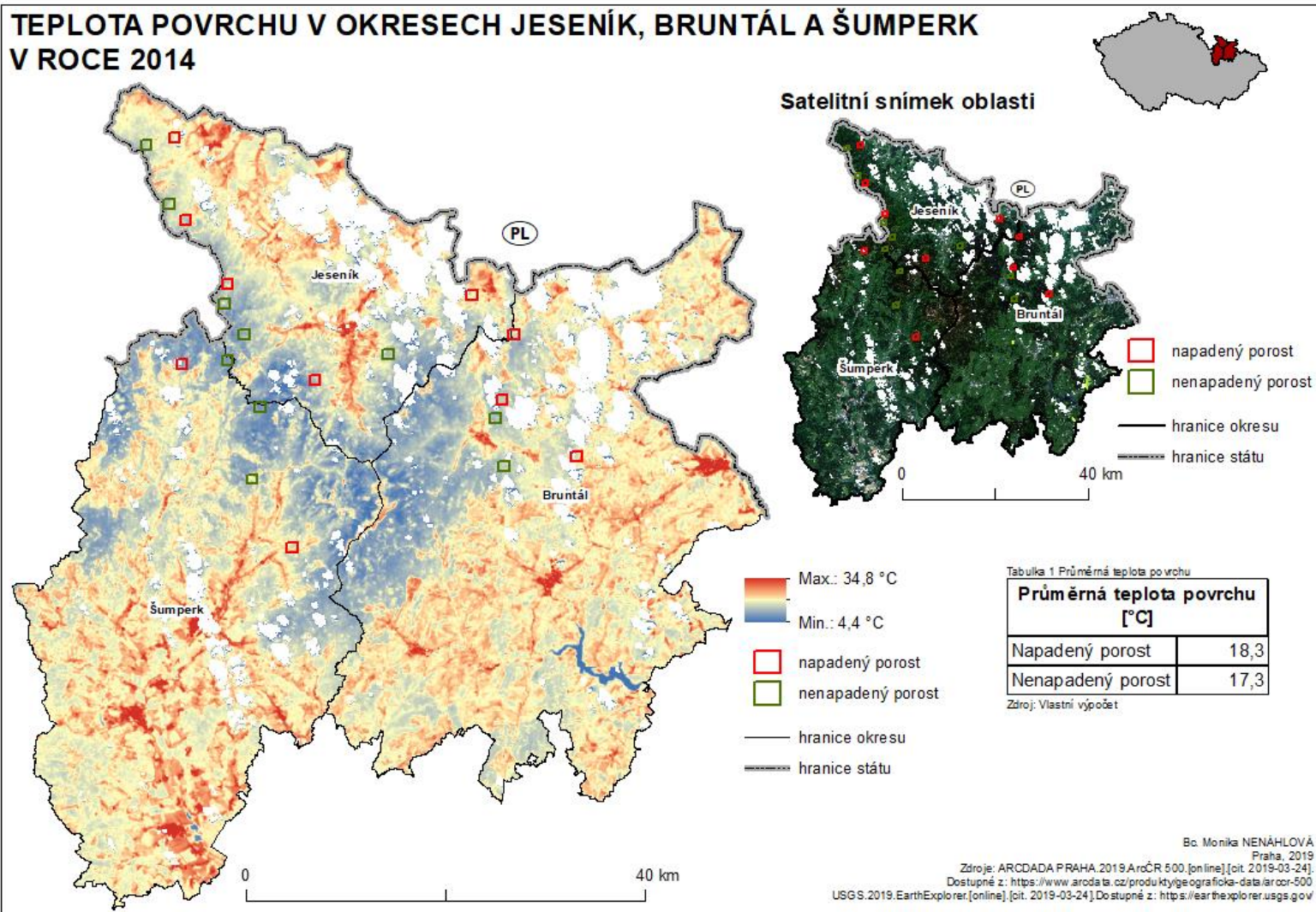


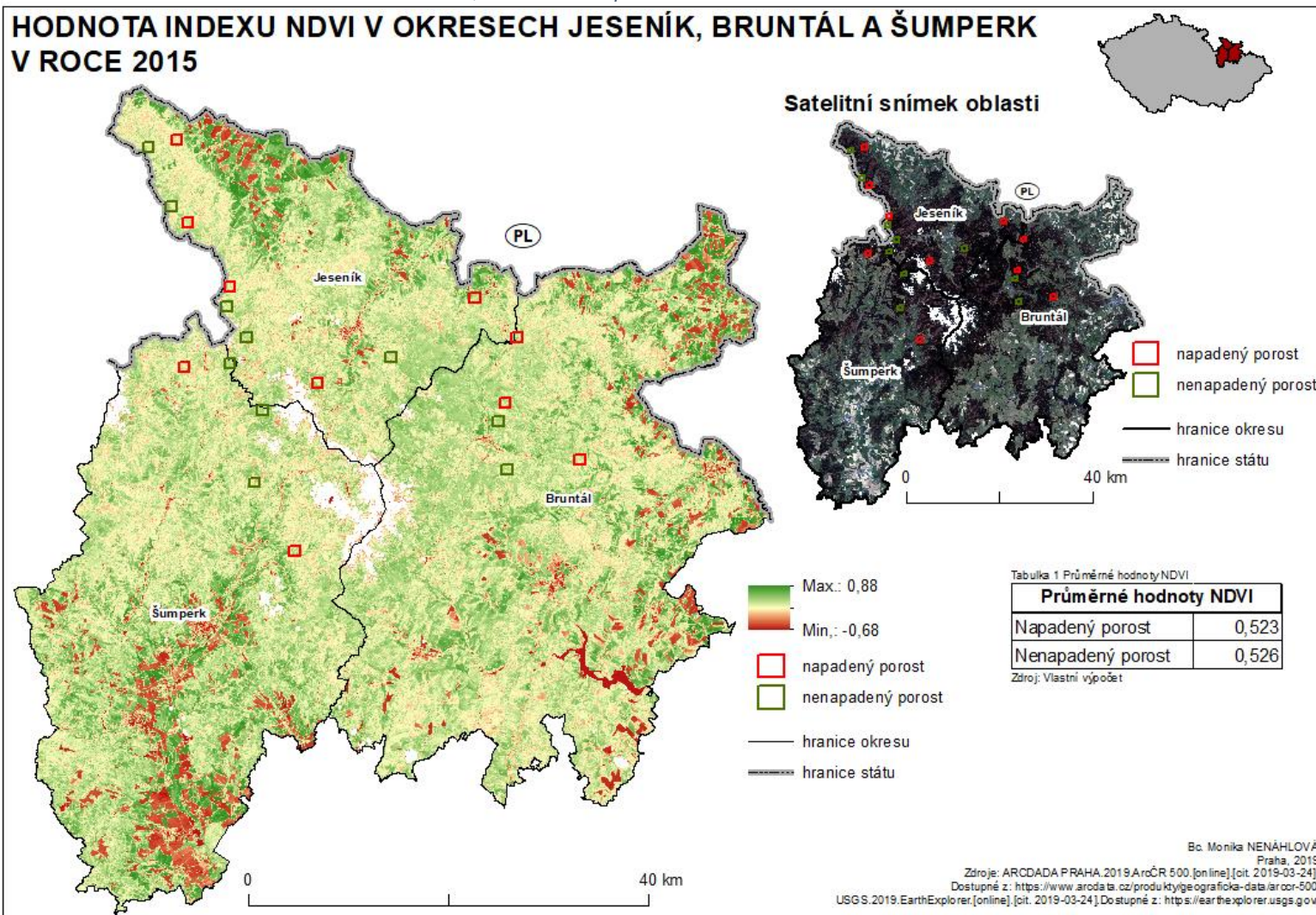
TEPLOTA POVRCHU V OKRESECH JESENÍK, BRUNTÁL A ŠUMPERK V ROCE 2013

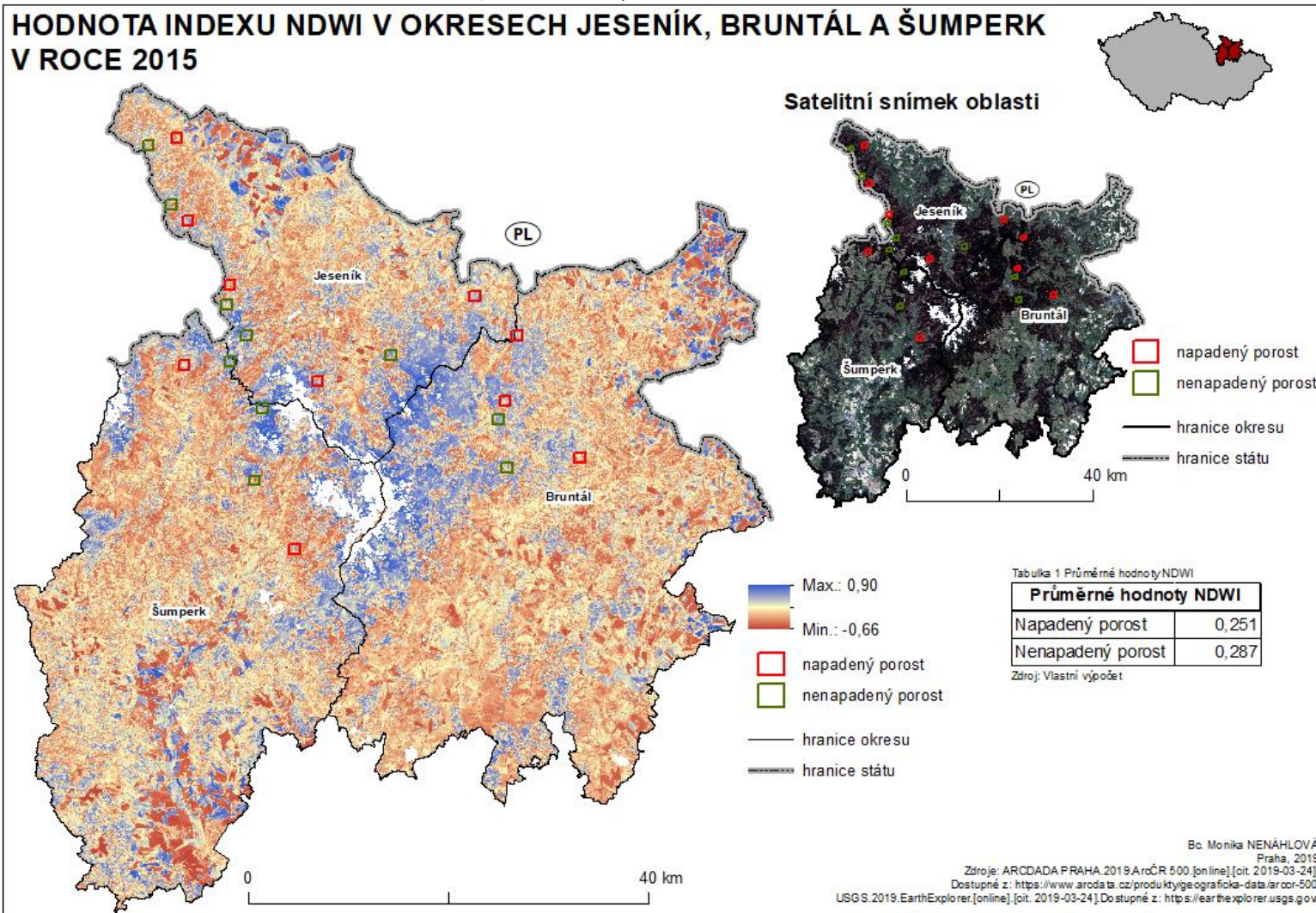


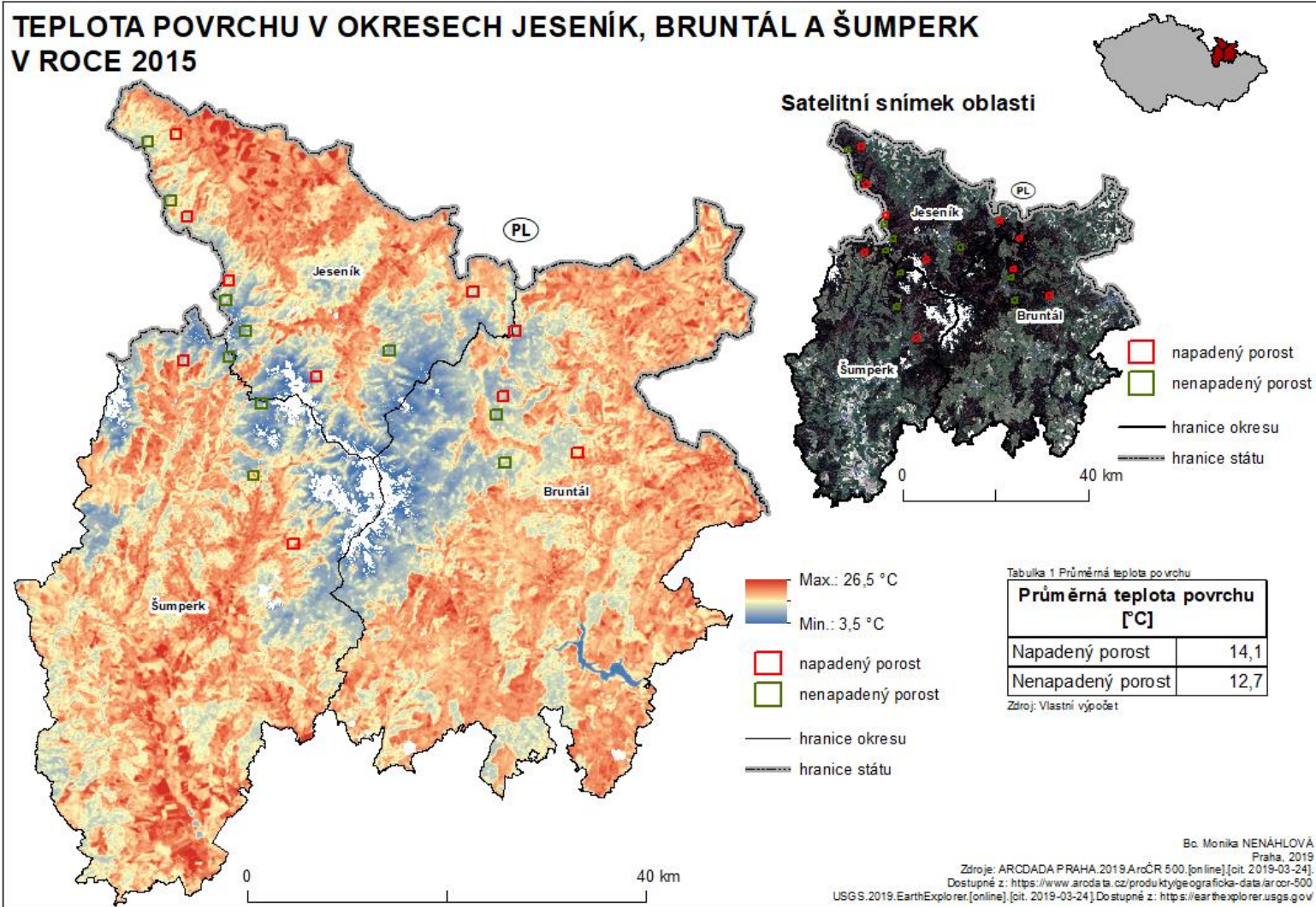


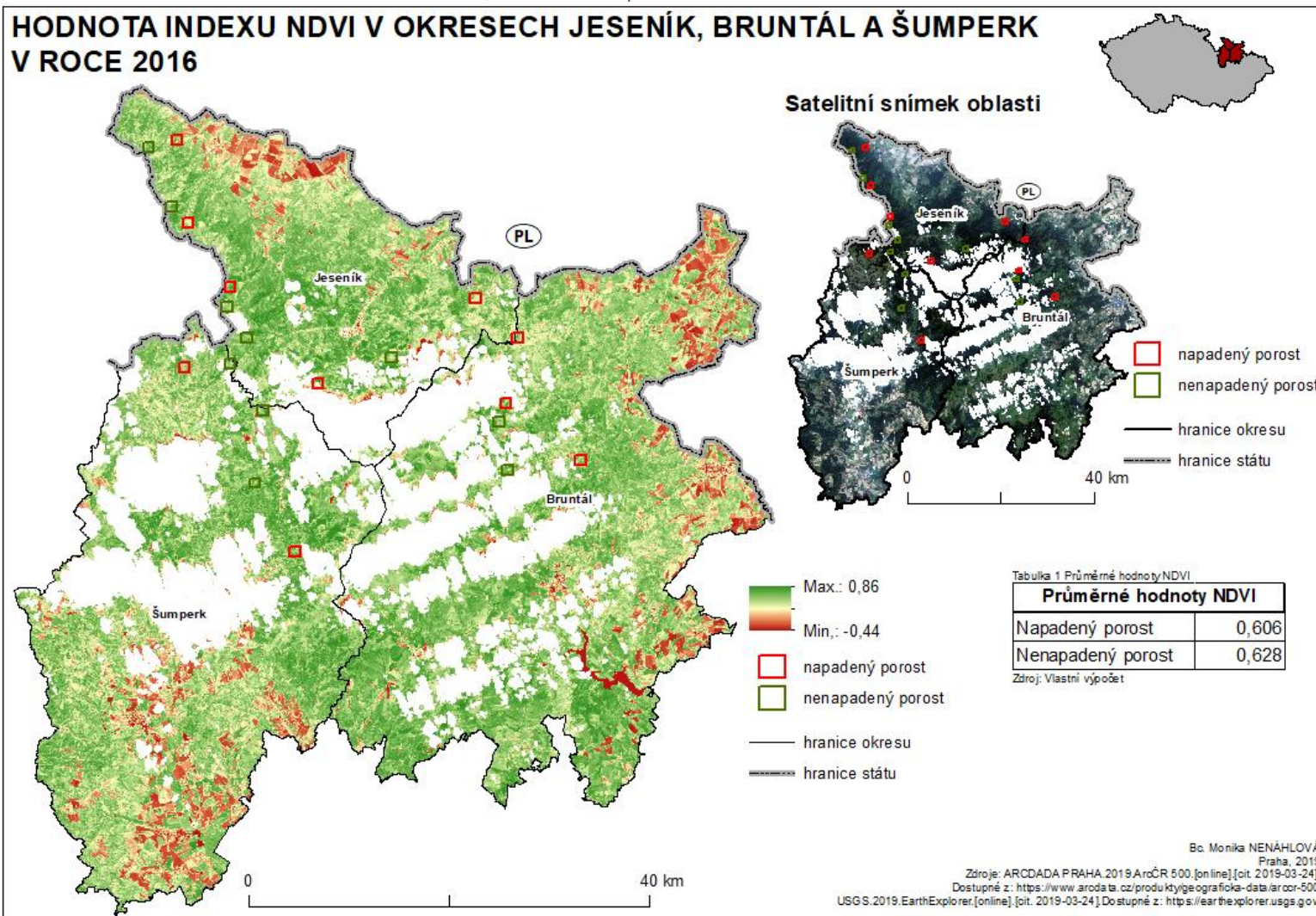


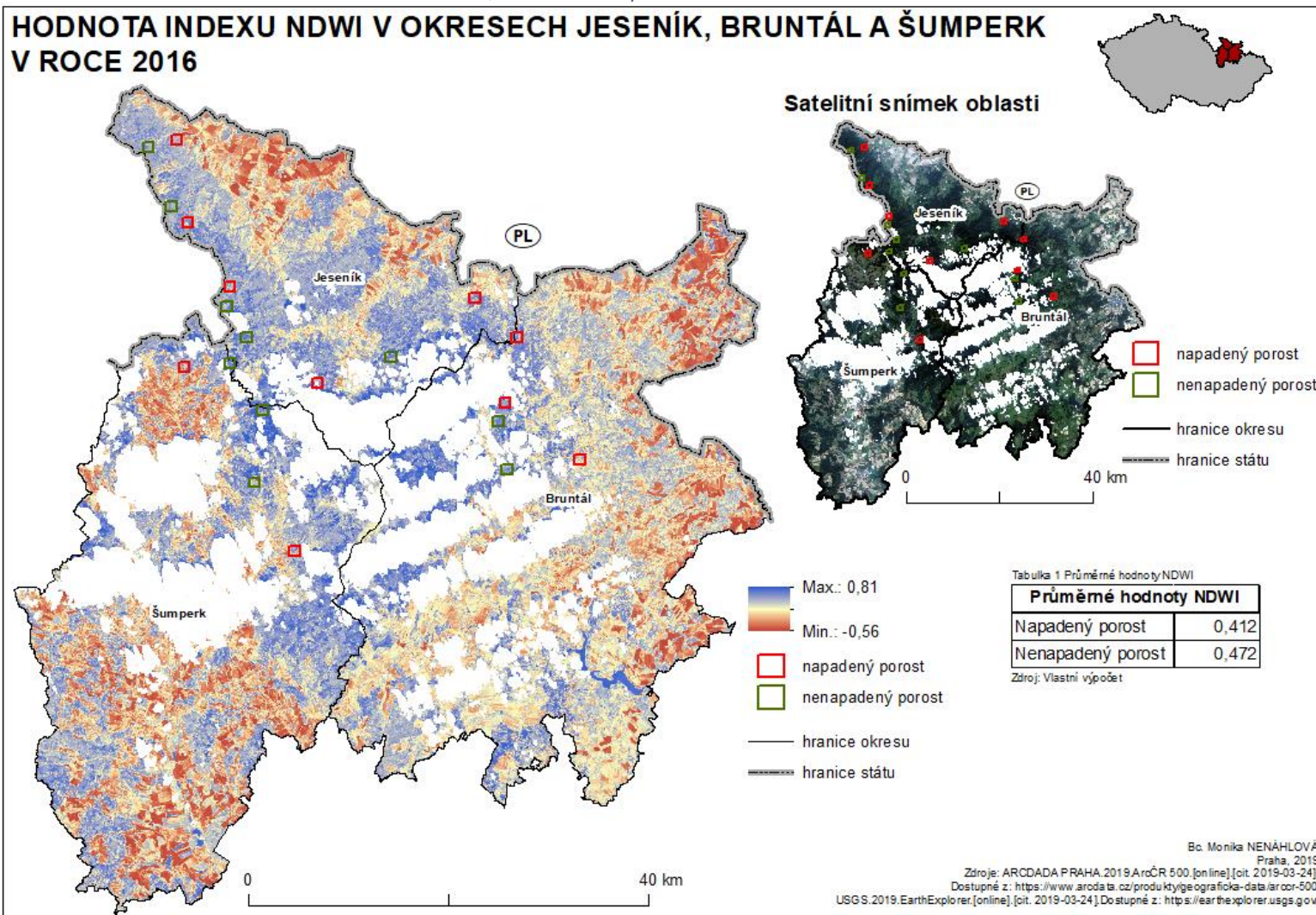




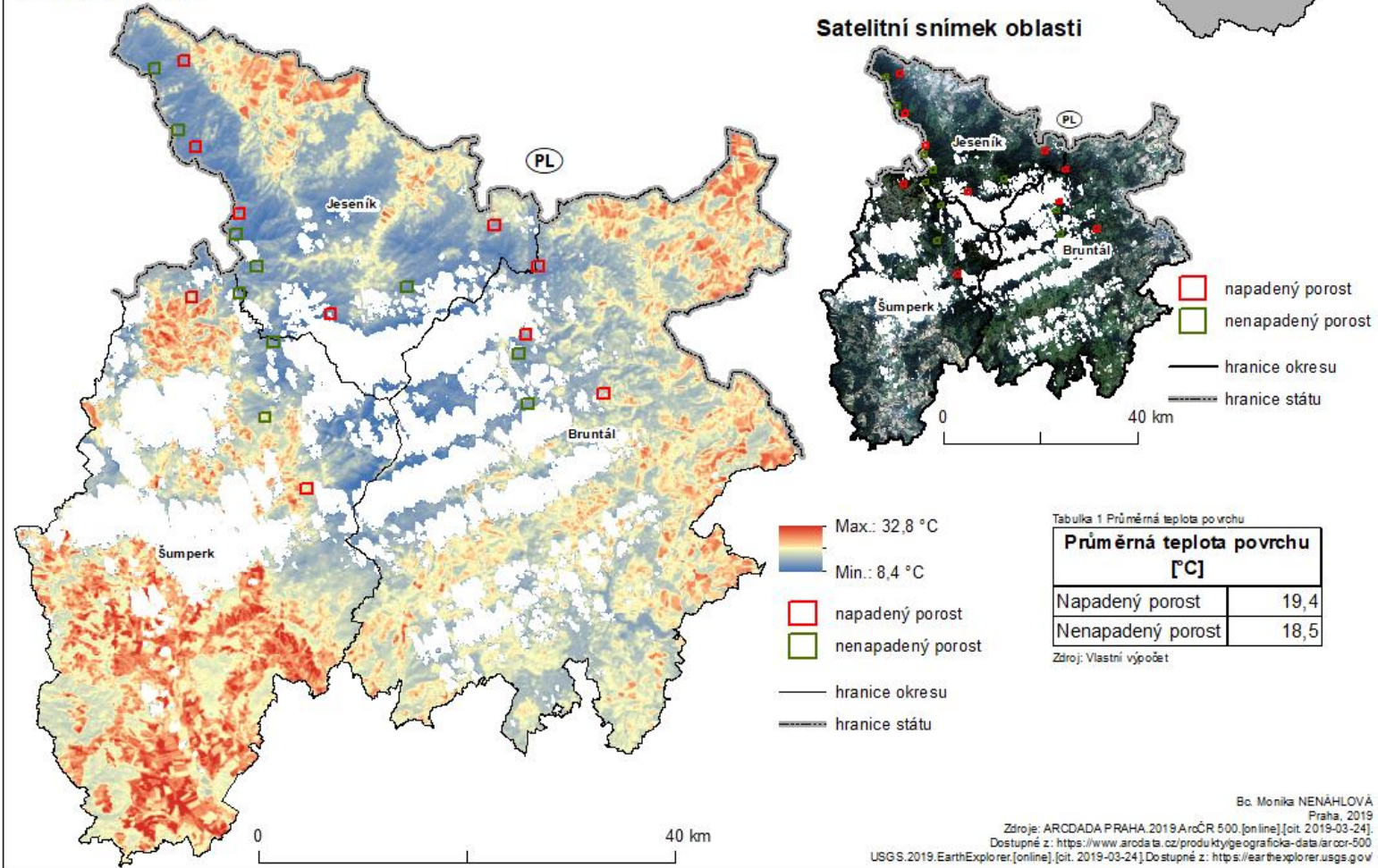


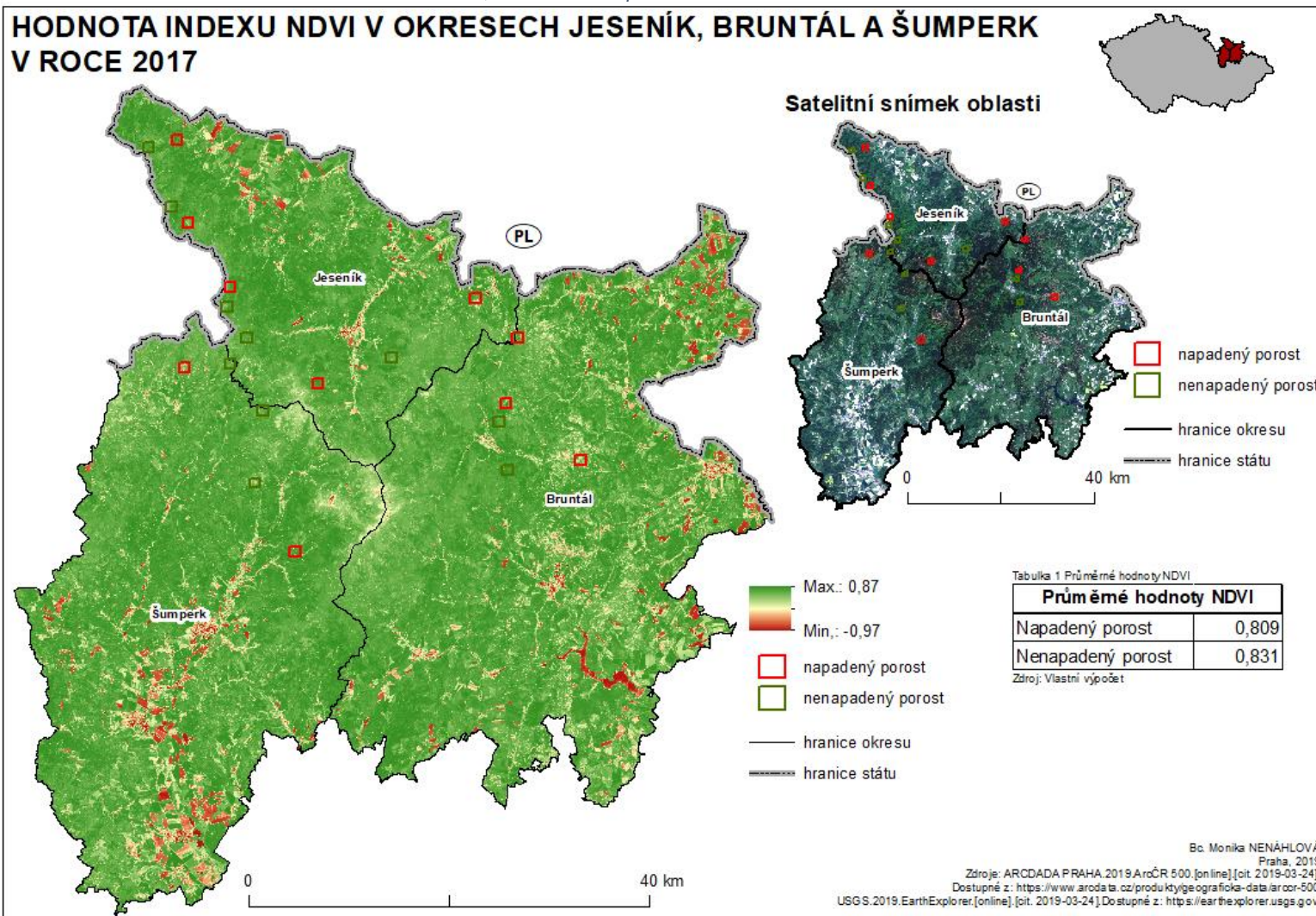


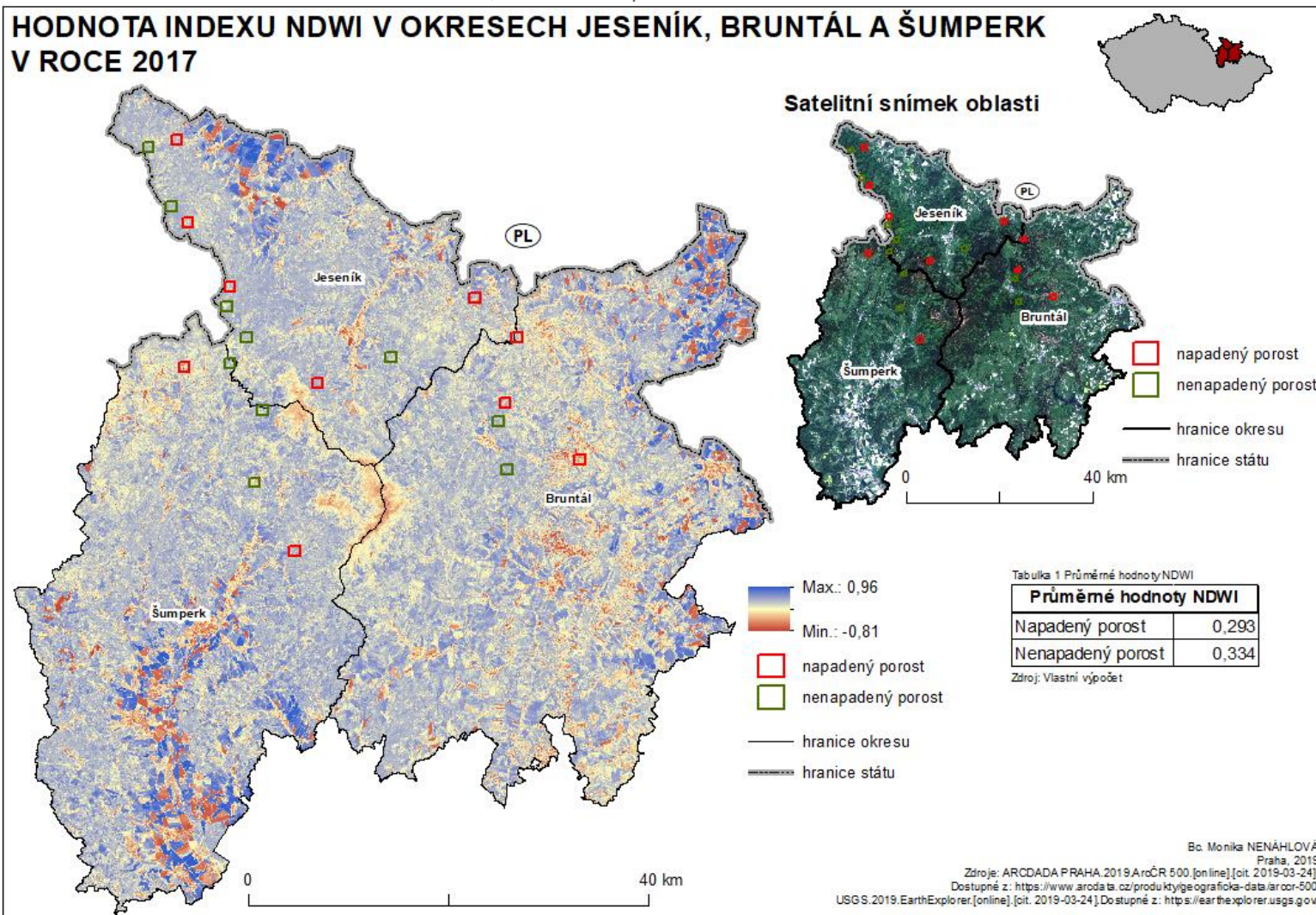


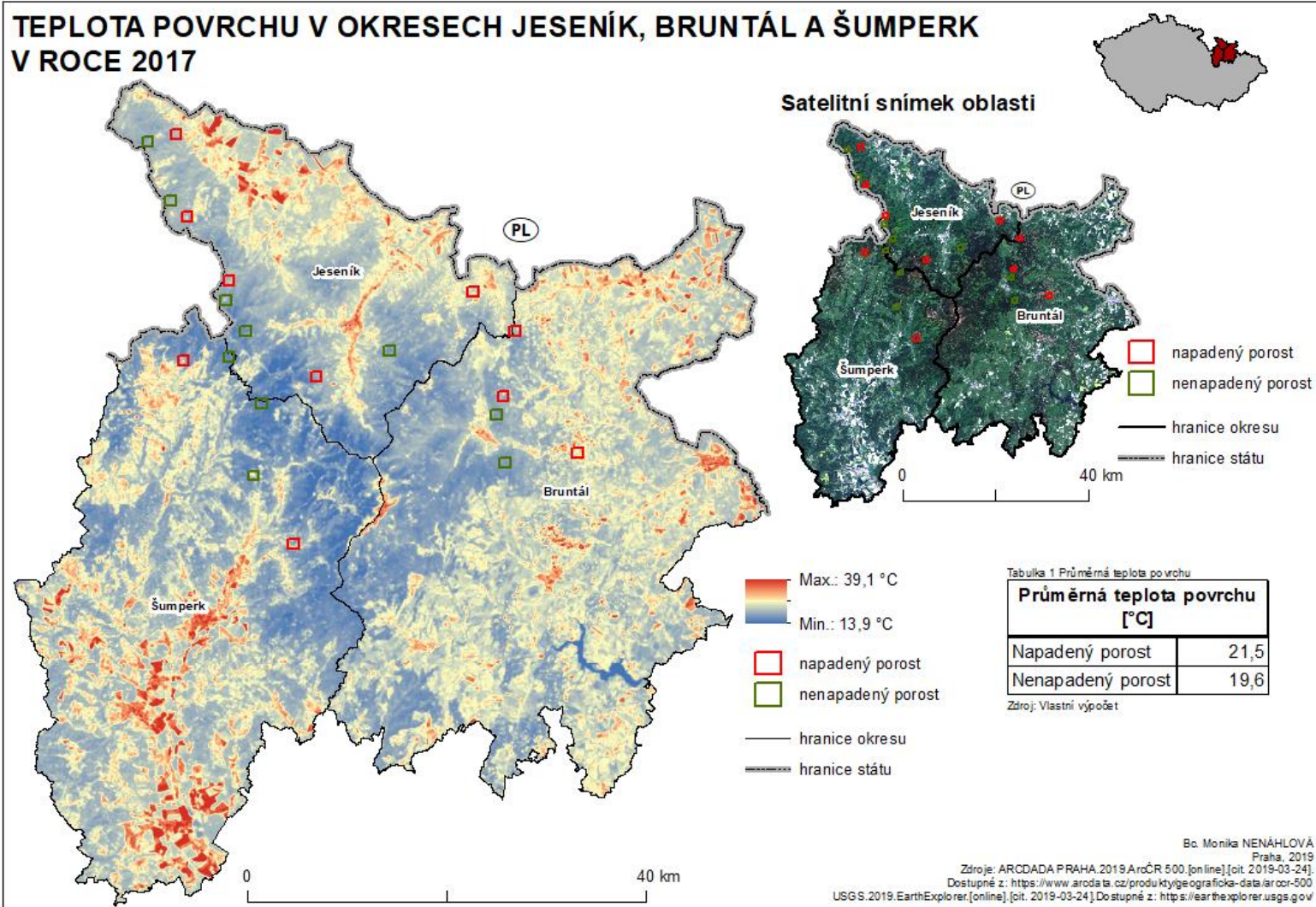


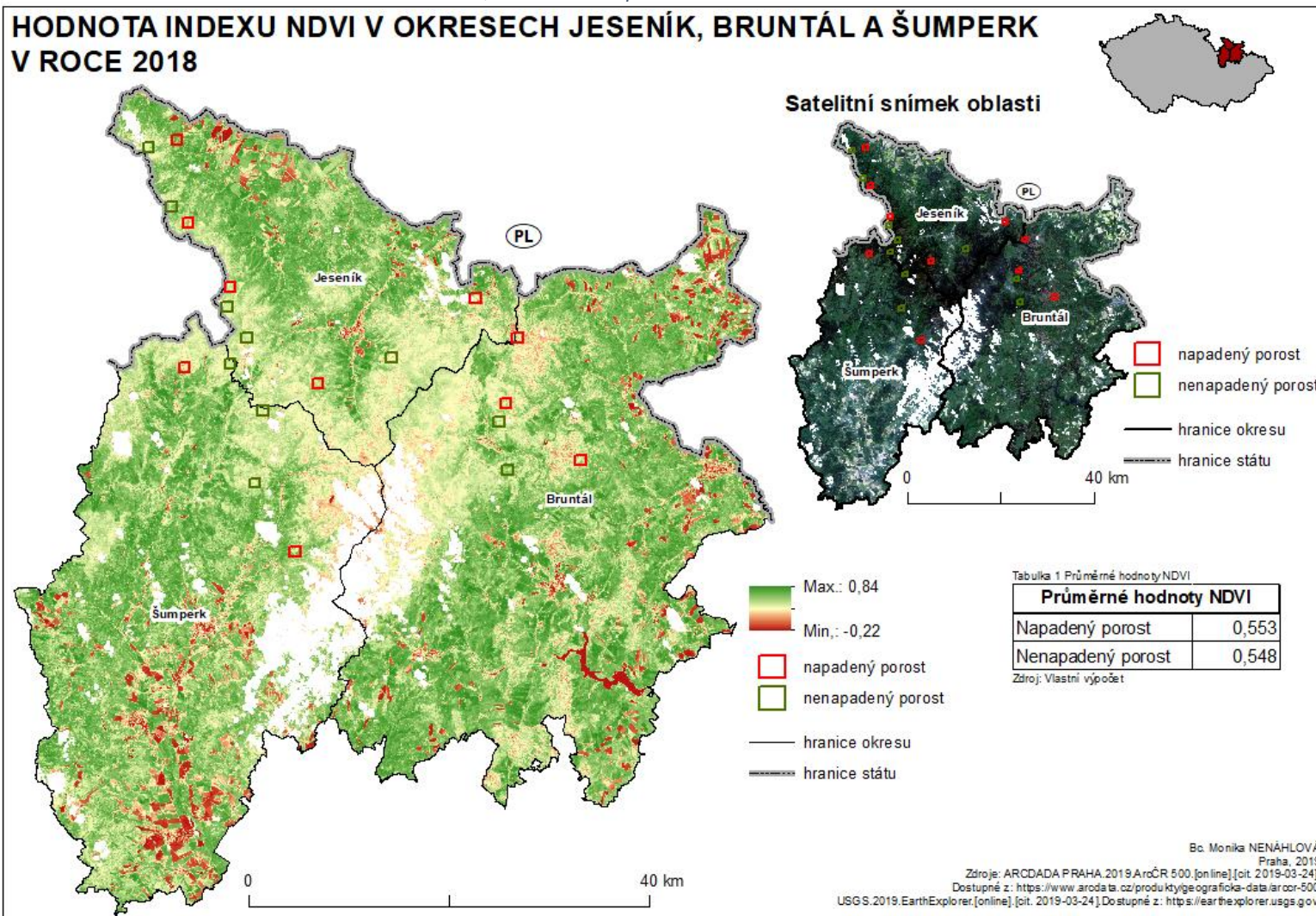
TEPLOTA POVRCHU V OKRESECH JESENÍK, BRUNTÁL A ŠUMPERK V ROCE 2016

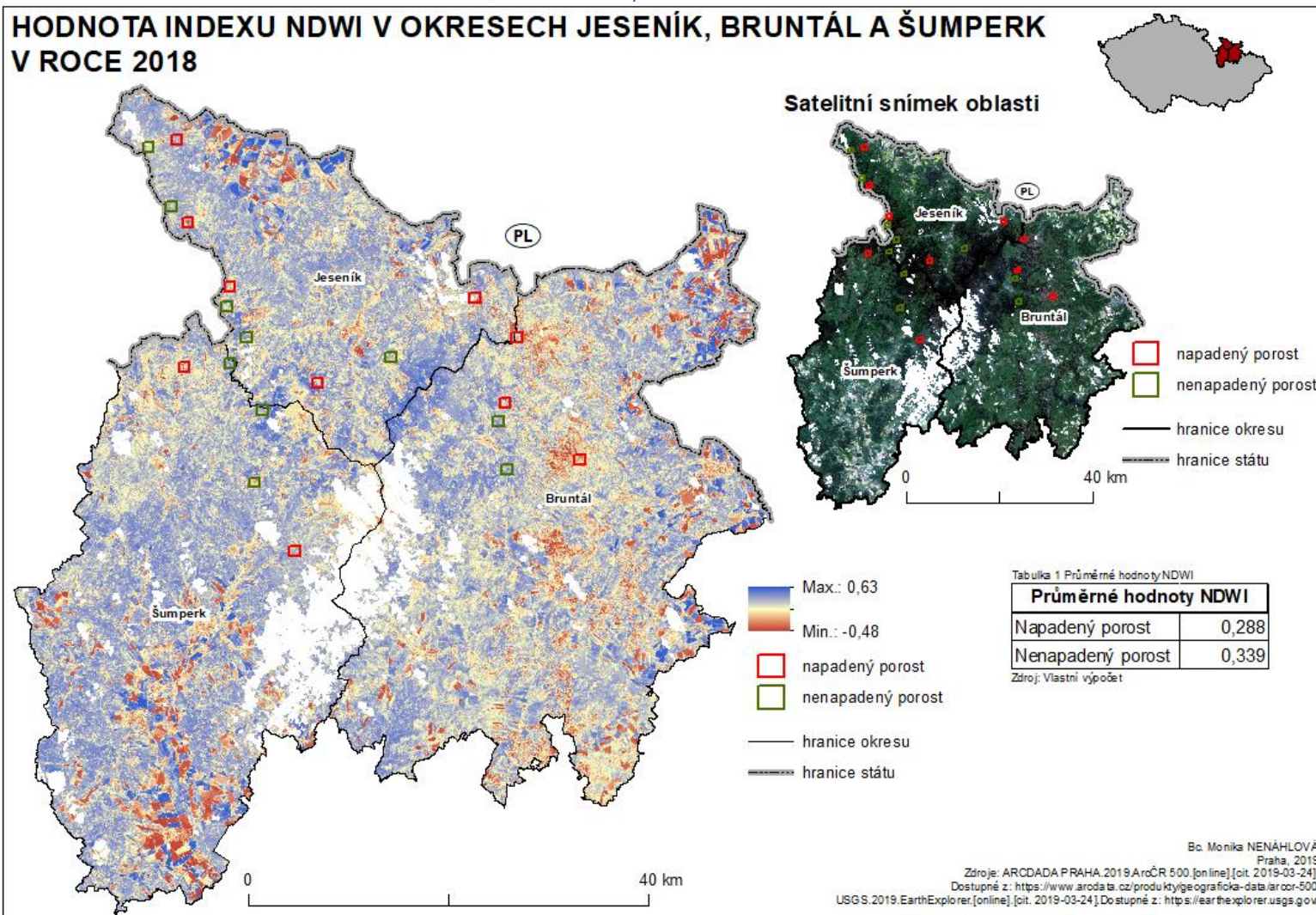












TEPLOTA POVRCHU V OKRESECH JESENÍK, BRUNTÁL A ŠUMPERK V ROCE 2018

