

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

**Detekce napadených stromů lýkožroutem pomocí
bezpilotních leteckých prostředků v Krkonošském
národním parku**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

Bakalant: Lenka Stiborová

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lenka Stiborová

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Detekce napadených stromů lýkožroutem pomocí bezpilotních leteckých prostředků v Krkonošském národním parku

Název anglicky

Detection of infested trees by bark beetle using unmanned aerial vehicles in the Krkonoše National Park

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je detekovat napadené stromy lýkožroutem smrkovým pomocí dat pořízených senzory umístěnými na bezpilotních leteckých prostředcích (UAV) v Krkonošském národním parku (lokality Obří důl).

Dílčí cíle práce souvisí s těmito výzkumnými otázkami:

- (a) Jsou profesionální multispektrální UAV senzory schopné "včasné" detekovat napadené stromy? Liší se jejich úspěšnost oproti běžným RGB senzorům?
- (b) Přináší spektrální pásmo Red Edge v oblasti monitoringu zdravotního stavu vegetace nějakou přidanou hodnotu oproti běžněji používanému pásmu NIR?
- (c) Jsou spektrálně odlišitelné napadené stromy v roce 2019 od zdravých již v roce 2018?

Metodika

Metodiku bakalářské práce lze rámcově rozdělit na:

- (a) Pre-processing časové řady šesti multispektrálních UAV snímků
- (b) Výběr vhodných vegetačních indexů a detekčních přístupů
- (c) Stanovení tříd klasifikace/detekce (zdravý, napadený a mrtvý strom)
- (d) Výpočet vegetačních indexů (Greenness Index, NDVI a NDI45)
- (e) Detekce prahováním vegetačních indexů (thresholding)
- (f) Detekce založená na vlastním rozhodovacím stromě (decision tree)
- (g) Zhodnocení přesnosti vybraných přístupů
- (h) Tvorba výstupů a zodpovězení výše uvedených výzkumných otázek

Zpracování bude probíhat v softwarech ArcGIS Pro a ArcMap (ESRI).

Doporučený rozsah práce

30 – 50 stran

Klíčová slova

dálkový průzkum Země, bezpilotní letecké prostředky, lesní disturbance, lýkožrout smrkový

Doporučené zdroje informací

- Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A.K., Groen, T.A., Heurich, M., 2018. European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 64, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.009>
- Brovkina, O., Cienciala, E., Surový, P., Janata, P., 2018. Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands. *Geo-Spatial Inf. Sci.* 21, 12–20. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1416994>
- Fassnacht, F.E., Latifi, H., Ghosh, A., Joshi, P.K., Koch, B., 2014. Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality. *Remote Sens. Environ.* 140, 533–548. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.014>
- Klouček, T., Komárek, J., Surový, P., Hrach, K., Janata, P., Vašíček, B., 2019. The Use of UAV Mounted Sensors for Precise Detection of Bark Beetle Infestation. *Remote Sens.* 11, 1561. <https://doi.org/10.3390/rs11131561>
- Minařík, R., Langhammer, J., 2016. Use of a multispectral UAV photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. – ISPRS Arch.* 41, 711–718. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-711-2016>
- Näsi, R., Honkavaara, E., Blomqvist, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Holopainen, M., 2018. Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban For. Urban Green.* 30, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.010>
- Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., 2015. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sens.* 7, 15467–15493. <https://doi.org/10.3390/rs71115467>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-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. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Stoyanova, M., Kandilarov, A., Koutev, V., Nitcheva, O., Dobрева, P., 2018. Potential of multispectral imaging technology for assessment coniferous forests bitten by a bark beetle in Central Bulgaria. *MATEC Web Conf.* 145. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20181450100>

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2021

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 3. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 15. 03. 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Detekce napadených stromů lýkožroutem pomocí bezpilotních leteckých prostředků v Krkonošském národním parku vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Praze dne

.....

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu Ing. Tomáši Kloučkovi, Ph.D. za podnětné rady, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnoval. Děkuji také Ing. Janu Komárkovi, Ph.D. za pomoc při řešení přístupu k aplikacím.

Abstrakt

Tématem bakalářské práce je detekce napadených stromů lýkožroutem smrkovým v Krkonošském národním parku (KRNAP). Snímky použité v této práci byly pořízeny profesionálními multispektrálními senzory, konkrétně MicaSense RedEdge-M a Tetracam Micro-MCA, umístěnými na bezpilotním leteckém prostředku Zefyros Oktos XL. Nálety proběhly v letech 2018 a 2019 v oblasti Obřího dolu, vznikla tak časová řada 6 snímků. Obří důl spadá do přírodní zóny KRNAP, proto je zde možné sledovat kontinuální změnu zdravotního stavu lesních porostů způsobenou lýkožroutem smrkovým. Pro provedenou časoprostorovou analýzu byly zvoleny dvojice multispektrálních snímků a to vždy v obdobích mezi červnem 2018 a následujícím měsícem (konkrétně: červen - červenec, červen – srpen, červen – září, červen – listopad, červen – červenec 2019).

Praktická část této práce je zaměřena na aplikaci dvou detekčních metod a jejich statistického vyhodnocení. Jedná se o metody rozhodovacího stromu a prahování z vegetačních indexů. Metoda rozhodovacího stromu byla optimalizována tak, aby bylo možné odlišit tři různé kategorie – zdravé, napadené a mrtvé stromy. Použité senzory mimo jiných obsahují kanál Red Edge, který je v řadě teoretických studií považován za přínosný. Proto jsem se rozhodla ho do svých analýz také zahrnout. Z výsledků bakalářské práce vyplývá, že detekce metodou prahování z vegetačních indexů dosáhla vyšší přesnosti (konkrétně Greenness Index (GI) 82 %), než metoda rozhodovacího stromu (78 %). Metody se ale liší hlavně u přesnosti detekce nově napadených stromů. Výsledky práce dále neprokázaly přínos kanálu Red Edge při detekci stromů napadených lýkožroutem.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, bezpilotní letecké prostředky, lesní disturbance, lýkožrout smrkový

Abstract

The topic of this bachelor thesis is the Detection of infested trees by bark beetle using unmanned aerial vehicles in the Krkonoše National Park. Images used in this work were taken by professional multispectral sensors, namely MicaSense RedEdge-M and Tetracam Micro-MCA, placed on the unmanned aerial vehicle Zefyros Oktos XL. The data acquisition took place in 2018 and 2019 in the region of Obří důl, therefore was created a time series of 6 images. Obří důl falls to the KRNAP's natural zone, so it is possible monitor the continuous change in the forest's health caused by the bark beetle. For the performer spatiotemporal analysis were selected pairs of multispectral images in periods between June 2018 and the following months (specifically: June – July, June – August, June – September, June – November, June – July 2019).

The practical part of this work is focused to the application of two detection methods and their statistical evaluation. It is about methods of decision tree and thresholding from the vegetatiton indices. The decision tree method was modified to distinguish three categories – healthy, infested and dead trees. Used sensors offer, among other, the Red Edge channel, which is considered beneficial in many theoretical studies. For that I decide to include it in my analyzes as well. Finally, the results of this bachelor thesis show that the thresholding from vegetation indices achieved a higher absolutely accuracy (specifically Greenness Index (GI) 82 %) than the decision tree method (78 %). However, the methods differ mainly in the accuracy of detection of newly infested trees. The results didn't show the benefit of the Red Edge channel in the detection of infested trees by bark beetle.

Key words: remote sensing, unmanned aerial vehicles, forest disturbance, bark beetle

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Cíle práce	13
3	Literární rešerše	13
3.1	Lýkožrout smrkový (<i>Ips Typographus (L.)</i>)	13
3.1.1	Morfologie lýkožrouta smrkového.....	13
3.1.2	Výskyt lýkožrouta smrkového	15
3.1.3	Způsob života.....	16
3.1.4	Obranná opatření.....	16
3.1.5	Fáze zamoření	17
3.2	Fyzikální podstata elektromagnetického záření vzhledem k zdravotnímu stavu vegetace	17
3.2.1	Elektromagnetické spektrum.....	17
3.2.2	Zdravotní stav lesních porostů	18
3.2.3	Vegetační indexy.....	19
3.3	Bezpilotní letecké prostředky (UAV)	20
3.3.1	Definice UAV	20
3.3.2	Dělení bezpilotních leteckých prostředků.....	20
3.3.3	Využití UAV	20
3.4	Současný stav kůrovcové problematiky.....	21
3.5	Krkonošský národní park	25
3.5.1	Fyzicko-geografické poměry Krkonoš.....	25
3.5.2	Zonace KRNAP	26
4	Metodika	27
4.1	Charakteristika studijního území	27
4.2	Použitá kamera a senzor.....	28
4.3	Metodika	30

4.3.1	Technika rozhodovacího stromu (angl. decision tree)	30
4.3.2	Technika prahování z vegetačních indexů (angl. thresholding).....	32
4.3.3	Hodnocení přesnosti.....	33
5	Výsledky práce.....	33
5.1	Výsledky techniky rozhodovacího stromu.....	33
5.2	Výsledky techniky prahování z vegetačních indexů.....	34
6	Diskuse.....	35
7	Závěr a přínos práce.....	37
8	Seznam příloh	39
8.1	Obrázky.....	39
8.2	Tabulky	39
8.3	Přílohy.....	40
9	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	40
9.1	Legislativní zdroje	44
10	Přílohy.....	45

Seznam použitých zkratk

B – blue channel – modré pásmo

G – green channel – zelené pásmo

GI – Greenness Index

ICAO - International Civil Aviation Organization - Mezinárodní organizace pro civilní letectví

KRNAP – Krkonošský národní park

MSI - Moisture Stress Index

NDI45 - Difference Index 45

NDMI - Normalised Difference Moisture Index

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index – Normalizovaný diferenční vegetační index

NIR - near infrared channel – blízké infračervené pásmo

PDC - point dense cloud - bodové mračno

R – red channel – červené pásmo

RE – Red Edge channel – pásmo Red Edge

REM - MicaSense RedEdge-M

SRTM DEM – z angl. Shuttle Radar Topography Mission, Digital elevation model - Digitální model terénu

SWIR - Short-wave infrared; krátkovlnné infračervené pásmo

TTC - Tetracam Micro-MCA

UAS – unmanned aerial systems - bezpilotní letecké systémy

UAV – unmanned aerial vehicle – bezpilotní letecké prostředky

VCI - Vegetation Condition Index

1 Úvod

Kůrovci jsou součástí jehličnatých ekosystémů již po miliony let. Za normálních podmínek je jejich životní strategií využití rozptýlených stresovaných stromů, takže nemají vliv na dlouhodobou produktivitu lesů. Z ekologického hlediska je toto působení kůrovce přínosné, protože vytváří stanoviště pro ptáky a savce hnízdící v dutinách. Úmrtí stromů se na dané půdě projeví větší přístupností světla a následně většími výkyvy teploty a vlhkosti. Při rozkladu těchto stromů se z nich uvolňují živiny a z tohoto důvodu roste rozmanitost podrostu. Větší koncentrace mrtvých stromů ovšem zvyšuje šanci lesního požáru a snižuje schopnost zadržování vody v půdě (Goheen, Hansen 1993, Skuhravý 2002).

Problémy související s přemnožením kůrovce (tzv. kůrovcové kalamity) přišly s lidskou činností, která začala zasahovat do přirozeného lesního prostředí, aby zvýšila jeho ekonomickou hodnotu. V důsledku mnoha z těchto zásahů populace kůrovců vzrostla, a tak jsou napadány i stromy relativně zdravé, které by za normálních okolností napadeny nebyly. Mezi faktory ovlivňujícími průběh kalamit se totiž řadí i vysazování rozlehlých monokultur, které během 20. století nahradily původní smíšené lesy. Takovéto porosty poskytují dostatek prostoru pro množení. Kalamity lýkožrouta smrkového (*Ips Typographus (L.)*) totiž často vznikají ve stejnověkových smrkových porostech. Ovšem není to podmínkou, jsou známy i případy výskytu ve smíšených lesích. Změna struktury a složení lesa může celkově zvyšovat citlivost vůči klimatickým vlivům (Seidl et. al 2017). V hospodářských lesích představují mrtvé stromy velké ekonomické ztráty (Goheen, Hansen 1993, Skuhravý 2002, Zahradník et al. 2010). Při kalamitních stavech, kdy již vznikají rozsáhlá ohniska žíru (Skuhravý 2002), je proto nutná včasná detekce napadených stromů (Müllerová et al. 2017).

Dalšími faktory, které rozhodují o velikosti populace lýkožrouta, jsou v první řadě vysoké teploty během vegetačního období, které umožňují, aby se během roku vyvinuly až tři generace. Dlouhodobě rostoucí teploty jsou také globálním trendem. Rozhodující může být i dlouhodobý nedostatek srážek oslabující stromy, které pak nedokážou útokům odolávat. Přemnožení může vznikat též po kalamitách způsobených větrem, sněhem nebo námrazou, čímž vzroste potravní nabídka (Pfeffer 1989, Skuhravý 2002, Zahradník et al. 2010). Vznik těchto disturbancí je sice nedílnou

součástí lesních ekosystémů, nicméně jejich výskyt v důsledku změny klimatu roste (Seidl et. al 2017).

Díky rostoucímu výskytu útoků na lesní ekosystémy vzrostla poptávka po efektivních metodách jejich identifikace. Proto začínají být stále více využívány rychle se vyvíjející (Näsi et al. 2015) metody dálkového průzkumu Země, včetně technologie bezpilotních leteckých prostředků (Unmanned Aerial Vehicles; UAV). Jednou ze zásadních výhod UAV je, že data lze sbírat pro požadované časové období, což umožňuje detekovat napadené stromy přesně v takový okamžik, kdy už jsou spektrálně odlišitelné, ale zatím se neprojevila žádná vizuální změna na jejich korunách. Při odhalení v této fázi je možné začít plánovat určitá opatření a pokusit se tak snížit ztráty (Müllerová et al. 2017, Klouček et al. 2019a).

2 Cíle práce

Cílem bakalářské práce je detekovat napadené stromy lýkožroutem smrkovým pomocí dat pořízených senzory umístěnými na bezpilotních leteckých prostředcích (UAV) v Krkonošském národním parku (lokalita Obří důl).

Díličí cíle práce souvisí s těmito výzkumnými otázkami:

- Jsou profesionální multispektrální UAV senzory schopné “včasné“ detekovat napadené stromy? Liší se jejich úspěšnost oproti běžným RGB sensorům?
- Přináší spektrální pásmo Red Edge v oblasti monitoringu zdravotního stavu vegetace nějakou přidanou hodnotu oproti běžněji používanému pásmu NIR?
- Jsou spektrálně odlišitelné napadené stromy v roce 2019 od zdravých již v roce 2018?

3 Literární rešerše

3.1 Lýkožrout smrkový (*Ips Typographus* (L.))

3.1.1 Morfologie lýkožrouta smrkového

Lýkožrout smrkový spadá pod veřejně známé označení čeledi kůrovcovití (*Scolytidae*). Do této kategorie se řadí přes 5 700 druhů. Dále lýkožrouta smrkového řadíme do podčeledi kůrovci (*Ipinae*), tribu lýkožrouti (*Ipini*) a rodu *Ips*. Je známo 8 zástupců tohoto rodu, u nás se vyskytuje 6 z nich (Pfeffer 1989). Celé zařazení lýkožrouta smrkového je zobrazeno v Tab. 1. Za latinským názvem se píše L

v závorce, které značí, že lýkožrout smrkový původně patřil do jiného rodu (Skuhravý 2002).

Tab. 1: Systematické zařazení lýkožrouta smrkového

Říše	<i>Animalia</i>	Živočichové
Kmen	<i>Arthropoda</i>	Členovci
Třída	<i>Insecta</i>	Hmyz
Řád	<i>Coleoptera</i>	Brouci
Nadčeleď	<i>Curculionidae</i>	Nosatci
Čeleď	<i>Scolytidae</i>	Kůrovcovití
Podčeleď	<i>Ipinae</i>	Kůrovci
Třeba	<i>Ipini</i>	Lýkožrouti
Rod	<i>Ips</i>	Lýkožrout
Druh	<i>Ips Typographus</i>	lýkožrout smrkový

Zdroj: Maratová 2010 ex. Linnaeus 1758, upraveno

Jak je patrné z Obr. 1, dospělec lýkožrouta smrkového je v průměru 4 mm dlouhý a 1,9 mm široký černý lesklý brouk, i když na první pohled se zdá být matný, protože jeho tělo je z velké části pokryto hustými žlutými chloupky. Jeho krovky mají široký válcovitý tvar a jsou pravidelně tečkovaná, kromě konce krovek. Čelo je charakteristické drobným hrbolkem na středu. Samičí čelo je oproti samčímu ochlupenější. Rozeznat pohlaví lze také podle podélných rýh pod ústním ústrojím, jež mají jen samice (Pfeffer 1989, Skuhravý 2002).



Obr. 1: Lýkožrout smrkový; zdroj: Kůrovcové info ©2021

3.1.2 Výskyt lýkožrouta smrkového

Lýkožrout smrkový je, stejně jako lýkožrout menší, lýkožrout modřínový, lýkožrout lesklý, lýkohub matný či lýkohub drvař, významným škůdcem na smrkových porostech. U lýkožrouta smrkového se nejčastěji jedná o porosty starší šedesáti let, které většinou přesahují výšku 15 m. V ojedinělých případech může lýkožrout smrkový kromě smrků napadat i modříny, borovici blatku, borovici kleč nebo borovici lesní (Pfeffer 1989, Zahradník et al. 2010).

První zprávy o přemnožení v Evropě pochází již ze sedmnáctého století. Mezi tři nejvýznamnější kalamity se řadí kalamita z let 1868-1878, která zasáhla části území Bavorska, Rakouska a Česka, dále kalamita, která v letech 1942-1953 postihla Německo a střední Evropu. Jako třetí největší kalamita je označována kalamita ze střední Evropy z let 1970-2000. (Skuhravý 2002).

Lýkožrout smrkový se vykytuje v Evropě a Asii. Jak píše Skuhravý (2002), nejzápadnějším místem jeho výskytu jsou Pyreneje na španělsko-francouzských hranicích, nejvýchodnější hranici určuje ostrov Hokkaidó, severní hranice prochází Laponskem a na jihu Řeckem a Tureckem. Severní hranici rozšíření v Asii tvoří jižní oblast arktické tundry na 68°-69° severní šířky, jižní hranice prochází nejsevernějším Kazachstánem, Mongolskem a severní Čínou.

V České republice se lýkožrout vyskytuje ve všech nadmořských výškách. Ovšem nebylo tomu tak vždy. Před druhou světovou válkou napadal pouze lesy v oblastech nad 800 m. Tato změna v jeho výskytu byla ovlivněna nahrazováním listnatých dřevin smrkem (Skuhravý 2002, Zahradník et al. 2010).

Ve vyhlášce č. 101/1996 Sb., kterou se stanoví podrobnosti o opatřeních k ochraně lesa a vzor služebního odznaku a vzor průkazu lesní strážce, se píše: „*Kalamitními hmyzími škůdci jsou bekyně mniška, lýkožrout smrkový, lýkožrout lesklý, klikoroh borový, obaleč modřínový a ploskohřbetky*“. Lýkožrout smrkový se tedy již několik posledních desetiletí řadí mezi největší hrozby smrkových porostů v Evropě. Jak uvádí Zahradník et al. (2010), v České republice mluvíme konkrétně o 29 mil.m³ napadeného dřeva za uplynulých 30 let. Jedná se o fyziologického škůdce. Po jeho napadení totiž rostliny hynou (Vysoký 1995).

3.1.3 Způsob života

Lýkožrouty je vhodnější vyhledávat během roku přímo v dřevinách, protože většinu života přebývají pod kůrou kmenů. Létají jen během období rojení, a to pouze ve dne, jedná se totiž o druh s tzv. diurnální aktivitou (Pfeffer 1989, Skuhravý 2002). Jarní rojení běžně začíná koncem dubna, ve vyšších nadmořských výškách v závislosti na teplotách až například v druhé polovině května. Letní rojení následuje po 8-10 týdnech. Při příznivých podmínkách může dojít koncem srpna i k třetímu rojení (Kůrovcové info ©2021).

Během období rojení žijí polygamicky, na jednoho samečka připadají 1-3 samičky. Samečci v lýku vytvoří snubní komůrku, v níž produkují agregační feromony, jimiž přilákají samičky. Strom se brání výrony pryskyřice, ovšem není schopen se ubránit při velké populační hustotě, kdy je jednotlivé závrtky schopný zalít jen velmi malým množstvím pryskyřice (Skuhravý 2002), takže je brzy porušena jeho obranyschopnost. Strom je napadán od pařezové části až do poloviny koruny. Příznakem napadení jsou rezavé drtinky u kmene stromu (Pfeffer 1989, Vysoký 1995, Zahradník et al 2010).

Po náletu samičky hlodají matečnou chodbu, rovnoběžnou s osou kmene (Skuhravý 2002), a do vrubů po jejích stranách kladou bílá vajíčka. U lýkožrouta smrkového je matečná chodba 2,5-2,7 cm široká a 6-15 cm dlouhá (Pfeffer 1989, Zahradník et al 2010).

Po 10-14 dnech se vylíhnou slepé beznohé larvy. Larvy se živí podhoubím ambróziových hub, které přenáší samička po chodbách, a pletivem stromu. Vývoj larev je ukončen po 7-50 dnech. Larvy v lýku hlodají larvové chodby, které ústí v kolébku, kde se nakonec kuklí. Období kukly trvá zhruba 8 dnů (Pfeffer 1989, Vysoký 1995, Skuhravý 2002). Po vylíhnutí následuje 2-3 týdenní proces, během něhož brouci postupně dosáhnou černé barvy a pohlavně dozrávají. Poměr pohlaví je vyrovnaný (Zahradník et al. 2010).

3.1.4 Obranná opatření

Obranná opatření proti lýkožroutu by měla mít hlavně preventivní charakter, aby předcházela vzniku kalamit. Jedná se o odstranění veškerých stromů vhodných k vývoji lýkožrouta, odstranění polomového dříví či odstranění již infikovaných stromů před jeho vyrojením (Skuhravý 2002, Stoyanova et al. 2018).

Kůrovci obecně mají mnoho přirozených nepřátel. Může se jednat o jiný hmyz, obojživelníky, plazy, ptáky a dokonce i savce (Vysoký 1995). Nicméně v ohniscích žíru se využívají různé metody pro odchyt a hubení lýkožrouta. Využívají se lapáky, feromonové lapače, otrávené lapáky a další (Skuhravý 2002, Zahradník et al. 2010).

3.1.5 Fáze zamoření

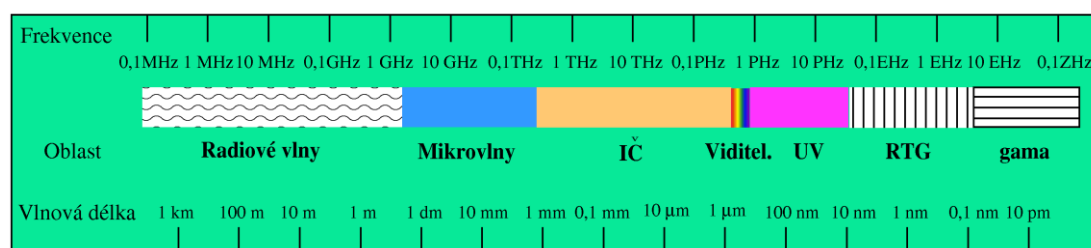
Pro posouzení rizika a případné plánování opatření se zkoumá fáze zamoření (Skuhravý 2002, Stoyanova et al. 2018). Zelená fáze je taková, kdy stromy ještě nevykazují žádné vizuální známky napadení, ale je již ovlivněn jejich fyziologický a chemický stav. Na zemi je zasažené stromy možné odhalit podle drtinek u kmene stromu, chybějící kůry či viditelných vrtů (Fassnacht et al. 2014). Odhalení napadení v této fázi je zásadní pro kontrolu lýkožrouta a ochranu před zamořením. Jelikož by ale takové ověřování v terénu bylo relativně nákladné, nabízí se využít metod dálkového průzkumu Země (Abdullah et al. 2017), konkrétně technologie UAV. Ta je v porovnání s náklady na terénní práce rychlá a levná (Näsi et al. 2018).

Během červené fáze, která obvykle přijde po několika měsících (Fassnacht et al. 2014), již nově vyvinutí brouci opustili hostitelské stromy a napadají další. Odhalení této fáze tudíž není dostačující pro zastavení šíření ohniska. Na takto napadeném stromě se již viditelně mění barva jehlic ze zelené na žlutou a červeno-hnědou. Postupně jehlice opadávají, až zbude jen holý strom. Tím je charakteristická právě poslední fáze zamoření, nazývaná šedá (Abdullah et al. 2017).

3.2 Fyzikální podstata elektromagnetického záření vzhledem k zdravotnímu stavu vegetace

3.2.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření je tvořeno elektromagnetickými vlnami. Jak vyplývá z Obr. 2, vlnové délky se v přírodě vyskytují ve spojitém spektru, které se dělí do několika oblastí (Halounová, Pavelka 2005, Mather, Tso 2009).



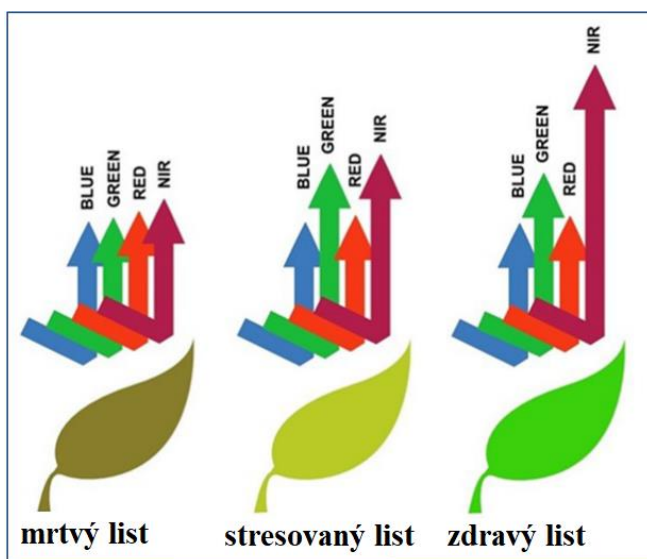
Obr. 2: Dělení elektromagnetického spektra; zdroj: Zölzer 2007

Dálkový průzkum zjišťuje informace o objektech z části elektromagnetického spektra, která se dostane k měřicímu přístroji. Daná informace se k detektoru může dostat odrazem, rozptylem nebo novým vyzářením (Lillesand et. al 2007).

Co se týče vegetace, spektrální křivka odrazivosti různých dřevin si zachovává svůj typický tvar, identická ve viditelné části spektra, ovšem nárůst v blízkém infračerveném pásmu (near infrared channel; NIR) je u listnatých stromů ještě o něco vyšší než u jehličnatých. Vysoká absorpce slunečního záření blízko 0,45 a 0,68 μm v oblasti modré (blue channel; B) a červené (red channel; R) části spektra je příčinou toho, že jsou listy zelené (Dobrovolný 1998).

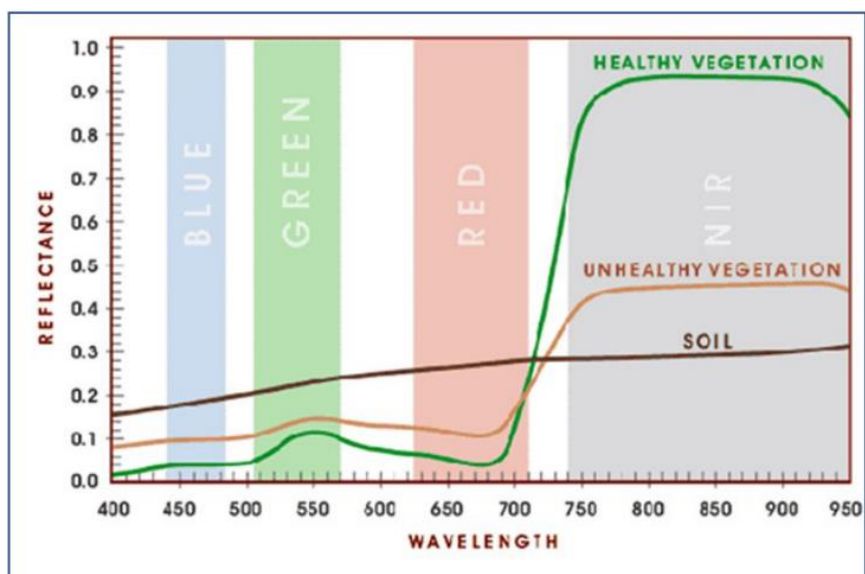
3.2.2 Zdravotní stav lesních porostů

Dále můžeme rozlišovat zdravotní stav porostu. Zdravé rostliny mají totiž výrazně vyšší odrazivost v NIR než mrtvé a stresované stromy, což je patrné z Obr. 3 i Obr. 4. Stres ve vegetaci vede totiž k poklesu fotosynteticky aktivních pigmentů, ve výsledku z tohoto důvodu u stresovaných stromů dále roste odrazivost v modré a červené části spektra (Jones, Vaughan 2010, Stoyanova et al. 2018).



Obr. 3: Schematické znázornění schopnosti odrazu mrtvé, stresované a zdravé vegetace; zdroj: Stoyanova et al. 2018

Změna v pásmu NIR proto může pomoci odhalit napadený strom dříve, než jsou změny na stromě viditelné pouhým okem. Napadení se v pozdější fázi projevuje změnou barvy jehlic či opadáváním kůry (Klouček et al. 2019a).



Obr. 4: Spektrální projevy stresované (unhealthy) a zdravé (healthy) vegetace; zdroj: Stoyanova et al. 2018

3.2.3 Vegetační indexy

Pro monitoring zdravotního stavu stromů se většinou využívá tzv. vegetačních (spektrálních) indexů, které kombinují dvě či více spektrálních pásem (Klouček et al. 2019a). Využívá se buď rozdílů nebo různých poměrů mezi pásmy. Tyto vztahy jsou vytvářeny na základě chování vegetace v různých vlnových délkách. Ve spektrálním chování se odráží i fyziologický stres, obsah vody, chemické nebo mechanické poškození rostliny a další (Halounová, Pavelka 2005, Mather, Tso 2009).

Vegetačních indexů existuje velké množství. Konkrétně je mimo jiné často zmiňován normalizovaný diferenční vegetační index (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI), který využívá červenou část viditelného spektra a pásmo NIR. Dosahuje hodnot od -1 do 1 . Tyto hodnoty značí obsah zelené hmoty v pixelu (Dobrovolný 1998, Stoyanova et al. 2018, Klouček et al. 2019a). Vzorec sloužící k výpočtu NDVI: $(Nir - Red) / (Nir + Red)$, kde Nir = blízké infračervené záření a Red = červené záření.

3.3 Bezpilotní letecké prostředky (UAV)

3.3.1 Definice UAV

J. Karas a T. Tichý (2016) ve své knize definují UAV následovně: „*Bezpilotní letecké prostředky, známé také jako drony (z anglického „drone“), jsou letecké prostředky bez posádky na palubě, které jsou ovládány manuálně na dálku nebo mohou létat automaticky dle předem nadefinovaných letových plánů nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů.*“

3.3.2 Dělení bezpilotních leteckých prostředků

Základní způsoby dělení komerčních UAV jsou uspořádány v Tab. 2. Blíže se podíváme na dělení podle typu. Pod názvem multikoptéry se skrývají koptéry nebo vrtulníky, které vzlétají a přistávají kolmo. Z tohoto důvodu jim při vzletu (přistání) stačí relativně malý prostor. Konkrétní názvy se většinou odvíjí od počtu vrtulí, např. koptéra se čtyřmi vrtulemi se nazývá kvadrokoptéra. Jejich počet je ovšem vždy sudý. Sousední vrtule koptér se vždy točí proti sobě, polovina z nich je tedy levotočivých a druhá polovina pravotočivých. Čím je jejich počet větší, tím bývá koptéra při letu stabilnější. Na koptéru je možné umístit různé mikro senzory (Karas, Tichý 2016).

Tzv. křídla mohou vzlétat z odpalovacích ramp nebo hodem z ruky. Přistání probíhá pozvolným klesáním někdy až na ploše stovek metrů, na které nesmí být žádné překážky. Jelikož jsou křídla lehčí než koptéry, vydrží ve vzduchu delší dobu, proto se využívají většinou pro mapování větších ploch. Oba typy UAV mohou létat automaticky podle předem definovaných letových plánů nebo mohou být řízeny manuálně (Karas, Tichý 2016).

Tab. 2: Základní způsoby dělení komerčních UAV

Podle typu zaměření:	Běžní uživatelé	Pokročilí uživatelé	Profesionálové	
Podle pohonu:	Elektrický-baterie	Spalovací		
Podle typu:	Multikoptéry	Letouny („křídla“)		
Podle způsobu řízení:	Manuální	Automatické	Kombinované	Autonomní

Zdroj: Karas, Tichý 2016

3.3.3 Využití UAV

Bezpilotní letecký prostředek (UAV) je oproti satelitním snímkům nebo letadlům vhodný pro cílené monitorování menších ploch. Konkurovat těmto metodám ovšem může vysokým obrazovým rozlišením (Karas, Tichý 2016). Data je možné sbírat vždy,

pokud se mraky pohybují vysoko a neprší (Müllerová et al. 2017). Další omezení vyplývají z obecně platných právních norem a také z úmluvy Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organization; ICAO) a jejích příloh (annexů), kterými se řídí předpisy členských států (Karas, Tichý 2016).

Obecně jejich výhodami je, že snímkování může být načasováno dle konkrétních potřeb, může proběhnout v oblastech, které by pro člověka mohly být nebezpečné, nebo které jsou mimo monitorovací síť. Poskytují data ve vysokém prostorovém rozlišení (Torresan et al. 2016).

Během posledních 15 let vzrostl zájem o technologie UAV jak v civilní oblasti, tak ve vojenském průmyslu. Vzrostla také nabídka služeb pro koncové uživatele. UAV se v posledních letech stále častěji používá také v lesnictví, ať už z pohledu inventarizace zdrojů, mapování chorob, klasifikaci druhů, monitorování požárů (Torresan et al. 2016) či invazivních druhů (Müllerová et al. 2017). Díky takovým možnostem je při mapování kůrovce možné například odhalit různé fáze zamoření (Skuhřavý 2002, Stoyanova et al. 2018).

3.4 Současný stav kůrovcové problematiky

(1) The Use of UAV Mounted Sensors for Precise Detection of Bark Beetle Infestation – T. Klouček, J. Komárek, P. Surový, K. Hrach, P. Janata, B. Vašíček; 2019

V této studii byly použity nízkonákladový RGB a upravený NIR senzor umístěné na UAV. Sloužily pro detekci jednotlivých stromů v zelené fázi napadení. Autoři použili 5 různých vegetačních indexů, které byly aplikovány na snímky pořízené v různých časových obdobích napříč sezónou. Jejich úspěšnost byla porovnávána s daty z terénu v kombinaci s vizuálně interpretovanými ortomozaikami. Nejlépe dopadl Greenness Index (GI). Indexy, které využívají NIR pásmo, tak dobrých výsledků nedosahovaly. Z výsledků též vyplývá, že rozlišení napadených a zdravých stromů je snazší s delší dobou po napadení (Klouček et al. 2019b).

(2) European spruce bark beetle (Ips typographus, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties – H. Abdullah, R. Darvishzadeh, A. K. Skidmore, T. A. Groen, M. Heurich; 2018

Cílem výzkumu Abdullaha et al. (2017) bylo na území Německa odhalit stromy napadené kůrovcem v tzv. zelené fázi. Během roku 2015 odebrali vzorky jehlic ze 120

zdravých stromů a stejný počet ze stromů v zelené fázi napadení. Mezi vzorky pozorovali významné rozdíly v odrazivosti v pásmu NIR a SWIR (Short-wave infrared; krátkovlnné infračervené pásmo), ale také v biochemickém složení (obsah chlorofylu a kyslíku). Právě pokles chlorofylu souvisí s vegetačním stresem. I když v NIR a SWIR se hodnota odrazivosti u napadených stromů v zelené fázi snížila, ve viditelném spektru naopak vzrostla. Z výsledků studie tak vyplývá, že zamoření lýkožroutem ovlivňuje spektrální i biochemické vlastnosti jehlic, což lze tím pádem využít při aplikaci dat dálkového průzkumu Země při monitoringu napadených stromů kůrovcem (Abdullah et. al 2018).

(3) Geo-spatial Information Science Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands – O. Brovkina, E. Cienciala, P. Surový, P. Janata, F. Group; 2018

Zájmovým územím této studie byly Beskydy. Jelikož se nacházejí v oblasti velkých průmyslových oblastí, které v minulosti silně přispívaly ke znečištění ovzduší, dodnes se zde potýkají s problémy s překyselenou půdou. Díky tomu je odolnost smrku norského, jež se v této lokalitě nachází, nízká, a proto jsou náchylné k napadení houbami či kůrovci. V této práci je využíváno viditelné a infračervené záření v kombinaci s výškovou informací získanou z bodového mračka (point dense cloud; PDC) pro rozpoznání druhů stromů. Tyto informace jsou ověřovány s pozorováními z terénu. Z výsledků práce je zřejmé, že index NDVI dokázal dobře rozpoznat mrtvé stromy oproti zdravým u všech druhů. V rozpoznání rozdílů mezi smrkem a jedlí byl také úspěšný, ale pro identifikaci rozdílů těchto dvou druhů od buku není vhodný. Jednotlivé druhy byly lépe identifikovány pomocí PDC (Brovkina et. al 2018).

(4) Potential of multispectral imaging technology for assessment coniferous forests bitten by a bark beetle in Central Bulgaria - M. Stoyanova, A. Kandilarov, V. Koutev, O. Nitcheva, P. Dobreva; 2018

Na území Bulharska byly napadeny jehličnaté lesy lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus* (L.)), lýkožroutem vrcholkovým (*Ips acuminatus*) a lýkožroutem borovým (*Ips sexdentatus*). V roce 2017 zde proběhl za pomoci UAS (unmanned aerial systems; bezpilotní letecké systémy) test s multispektrální kamerou s velkým rozlišením. Ten potvrdil užitečnost UAS pro detekci napadených stromů na relativně velkých jinak nepřístupných plochách. K identifikaci poškozených míst byl použit

index NDVI, jež u zdravých stromů dosahoval hodnot 0,7 až 0,95, u té části lesa, jež byla vystavena nějakému stresu hodnot do 0,65 a u poškozených stromů se pohyboval v rozmezí 0,45 až 0,5. Tímto způsobem lze tedy hodnotit stupeň ohrožení. Zdravá vegetace má totiž v NIR vyšší odrazivost než napadená vegetace. Stres ve vegetaci vede k poklesu fotosynteticky aktivních pigmentů (Stoyanova et. al 2018).

(5) Urban Forestry & Urban Greening Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft – R. Näsi, E. Honkavaara, M. Blomqvist, P. Lyytikäinen-saarenmaa, T. Hakala, N. Viljanen, T. Kantola, M. Holopainen; 2018

Cílem této studie bylo vyvinout a porovnat automatizované postupy pro detekci stromů napadených kůrovcem založené na levné hyperspektrální technologii. Studie probíhala v městských lesích Lahti, v jižním Finsku, kde se vyskytuje smrk ztepilý. Kamera byla umístěna na UAV a na malém letadle typu Cessna, takže byly porovnávány 2 odlišně velké plochy s rozdílným prostorovým rozlišením. Stromy byly klasifikovány do 3 kategorií – zdravé, napadené a mrtvé. Nejobtížněji identifikovatelnou kategorií byly napadené stromy. Data z obou systémů dosáhla dobrých výsledků, ale z UAV dopadla přesněji. Studie dokazuje jejich velký potenciál při hodnocení zdravotního stavu městských lesů v lokálním měřítku. Snímání je rychlé a levné v porovnání s náklady na práce v terénu (Näsi et. al 2018).

(6) Use of a multispectral UAV photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics - R. Minařík, J. Langhammer; 2016

Ve výzkumu zabývajícím se Šumavou byly použity multispektrální snímky s vysokým prostorovým a spektrálním rozlišením. Ve zmiňované oblasti se po 20 let střídají kůrovcové kalamity a kalamity způsobené vichrem, les se zde dokáže relativně rychle obnovovat. Na základě výsledků studie je patrné, že nevhodnější indexy pro tento typ analýzy jsou NDVI, Simple Ratio 800/650 Pigment a Red-edge index. U těchto indexů se povedlo nejvýrazněji rozlišit kategorie zdravý les, mrtvé stromy a zamořený les (Minařík, Langhammer 2016).

(7) Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains – M. Havašová, T. Bucha, J. Ferenčík, R. Jakuš; 2015

V roce 2005 proběhl výzkum na Slovensku ve Vysokých Tatrách, jehož cílem bylo odhalení vypuknutí epidemie lýkožrouta smrkového (*Ips typographus* (L.)).

V těchto lesích převládá smrk ztepilý (*Picea abies*). V tomto případě byly použity snímky družice Landsat z let 2005-2009, 2010 a 2011 a byla vytvořena dvouletá časová období (2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 a 2010-2011) na nichž byly aplikovány různé vegetační indexy. Pro detekci kůrovce v těchto přírodních podmínkách dopadly nejlépe indexy VCI (Vegetation Condition Index), MSI (Moisture Stress Index) a NDMI (Normalised Difference Moisture Index) (Havašová et. al 2015).

(8) *Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level* – R. Näsi, E. Honkavaara, P. Lyytikäinen-Saarenmaa, M. Blomqvist, P. Litkey, T. Hakala, N. Viljanen, T. Kantola, T. Tanhuanpää, M. Holopainen; 2015

V rámci této studie probíhala detekce zdravotního stavu u smrku norského (*Picea abies*) za pomoci miniaturizovaného hyperspektrálního senzoru založeného na Fabry-Pérotovu interferometru, který pracuje v rozsahu vlnových délek 500-900 nm. Umístěn byl na malé UAV platformě. Autorům se podařilo vyvinout novou metodu pro analýzu spektrální charakteristiky korun stromů v lesním prostředí využívající hyperspektrální snímky vysokého prostorového rozlišení schopnou též identifikace jednotlivých stromů. Jednotlivé stromy byly detekovány z hustého bodového mračna. Stromy napadané lýkožroutem smrkovým (*Ips Typographus* (L.)) byly rozděleny opět do 3 kategorií – zdravé, napadené a mrtvé. Metoda dosáhla dobré přesnosti, je vhodná pro malé oblasti. Z výsledků studie je zřejmé, že jsou hyperspektrální senzory vhodné pro detekci drobných odchylek ve spektrálních charakteristikách jednotlivých korun stromů v různých stádiích napadení. Je možné tuto metodu využít například i pro klasifikaci druhů stromů (Näsi et. al 2015).

(9) *Remote Sensing of Environment Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality* – F. E. Fassnacht, H. Latifi, A. Ghosh, P. K. Joshi, B. Koch; 2014

V této studii byla mapována úmrtnost způsobená lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus* (L.)) z hyperspektrálních dat. Zkoumány byly 3 scénáře klasifikace, které se lišily definicí třídy napadenosti. Ve výsledné klasifikaci byla výrazně nadhodnocena třída odpovídající zelené fázi, mrtvé stromy byly od zdravých určeny s vysokou přesností. K přesné klasifikaci přispěly hlavně kanály v zelené oblasti, v oblasti

absorpce chlorofylu a v oblasti růstu pásma Red Edge (Red Edge channel; RE) (Fassnacht et. al 2014).

3.5 Krkonošský národní park

Krkonoše byly jako národní park vyhlášeny po dlouhém usilování lesníků a přírodovědců v roce 1963, na polské straně (Karkonoski Park Narodowy) dokonce již v roce 1959. Snažili se docílit komplexní ochrany pohoří, které v porovnání s dalšími evropskými středohorami disponuje velkou pestrostí krajiny, flóry a fauny. Současná rozloha parku je 550 km² včetně ochranného pásma (KRNAP 2020a).

3.5.1 Fyzicko-geografické poměry Krkonoš

Krkonoše jsou velmi staré pohoří dělené hlubokými říčními údolími, která vznikla ve třetihorách zpětnou říční erozí. Krkonoše a Jizerské hory tvoří tzv. krkonošsko-jizerské krystalinikum, jež se skládá převážně z krystalických břidlic. Na jihu Krkonoš se krystalinikum zarývá do zemského povrchu, kde ho překrývá tzv. podkrkonošský permokarbon (KRNAP 2020b, KRNAP 2020c). Podloží, tvořené zmíněným krystalinikem, je poměrně kyselé a minerálně chudé, takže i většina půd je kyselá. Kyselost se zhoršila také s imisí kalamitou na konci 20. století (KRNAP 2020d).

Na krkonošských svazích lze nalézt pět různých výškových stupňů, konkrétně tyto: submontánní (podhorský) stupeň, montánní (horský) stupeň, alpínskou (horní) hranici lesa oddělující stupeň montánní a spodní alpínský, spodní alpínský (subalpínský) stupeň a svrchní alpínský stupeň (KRNAP 2020e).

V krkonošském podhůří a na úpatí hor do 800 m n. m. se rozprostírá submontánní stupeň. Zabírá 50 % z celkové plochy. Původně se zde nacházely spíše listnaté lesy s převahou buku a javoru, ty však byly při osidlování nahrazeny smrkovými monokulturami nebo přeměněny na louky, pastviny či pole (KRNAP 2020e). Na submontánní stupeň navazuje stupeň montánní. Na svazích ho můžeme najít až do výšky 1 200 m n. m. na 40 % z celkové rozlohy. Typicky se zde nacházely husté smrkové lesy, na jejichž místě kvůli hospodářství v tuhle chvíli nalezneme spíše druhově bohaté květnaté louky (KRNAP 2020e). Pro spodní alpínský stupeň jsou charakteristické namísto stromů již jen keře, traviny, byliny či severská rašeliniště. Nalezneme ho do výšky 1 450 m n. m. převážně na západě a východě Krkonoš (KRNAP 2020e). Svrchní alpínský stupeň se nachází pouze na vrcholech Krkonoš nad

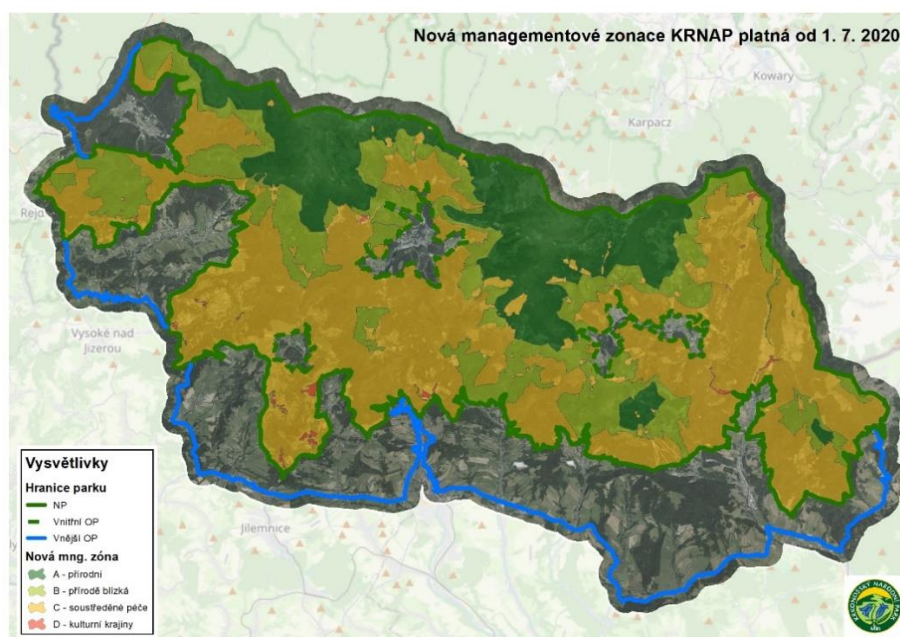
hranicí 1 450 m n. m. Najdeme zde jen drobné keříčky, traviny, mechy a lišejníky (KRNAP 2020e).

Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 0 až 6 °C, klesá s přibývajícím nadmořskou výškou, takže nejstudenější je vrchol Sněžky. Nejteplejším obdobím je červenec, kdy se teploty vyšplhají až k hodnotám mezi 14 a 8 °C a nejchladnějším je měsíc leden, během kterého se teplota pohybuje od -7,2 do -4,5 °C (KRNAP 2020f).

Množství srážek je opět závislé na nadmořské výšce, na úpatích ročně spadne zhruba 800 mm a na hřebenech až 1400 mm. V údolních polohách mohou být srážky ještě vyšší. Ve vyšších nadmořských polohách během roku převládá pevná forma srážek (sníh, kroupy, námraza) nad dešťovými (KRNAP 2020g). Větrné proudění je vzhledem k členitosti pohoří velmi proměnlivé, nejvíce ovšem převládají severozápadní až jihozápadní větry. Na vrcholu Sněžky může vítr dosáhnout až rychlosti 150 km/h (KRNAP 2020h).

3.5.2 Zonace KRNAP

Krkonošský národní park (KRNAP) byl 1. července 2020 vyhláškou č.257/2020 Sb., o vymezení zón ochrany přírody Krkonošského národního parku, rozdělen dle nové managementové zonace do zón podle stupně ochrany přírody, viz. Obr. 5. Do 30. 6. 2020 bylo území děleno pouze do tří zón (KRNAP 2020a).



Obr. 5: Nová managementová zonace KRNAP;

zdroj: https://www.krnep.cz/data/Files/pages/zonace_159040000834.574.jpg

Nová zonace je ve vyhlášce specifikována následovně. Přírodní zóna A je tvořena ucelenými plochami s převažujícím výskytem přirozených ekosystémů, které mají být zachovány. Cílem je, aby v ní mohly nerušeně probíhat přírodní procesy. Jedná se o místa s nejpřísnější ochranou. Přírodě blízkou zónu B tvoří ucelené plochy s převažujícím výskytem člověkem částečně pozmeněných ekosystémů. Časem by se tyto plochy měly dostat do stavu přirozeného ekosystému.

Ekosystémy významně pozmeněné člověkem spadají do zóny C - soustředěné péče, která si za cíl klade zachování, postupné zlepšení nebo obnovu přírodě blízkých ekosystémů. Nejvíce člověkem zasaženou zónou je zóna D - kulturní krajiny, do které spadají zastavěné plochy obcí, obhospodařovaná pole a louky.

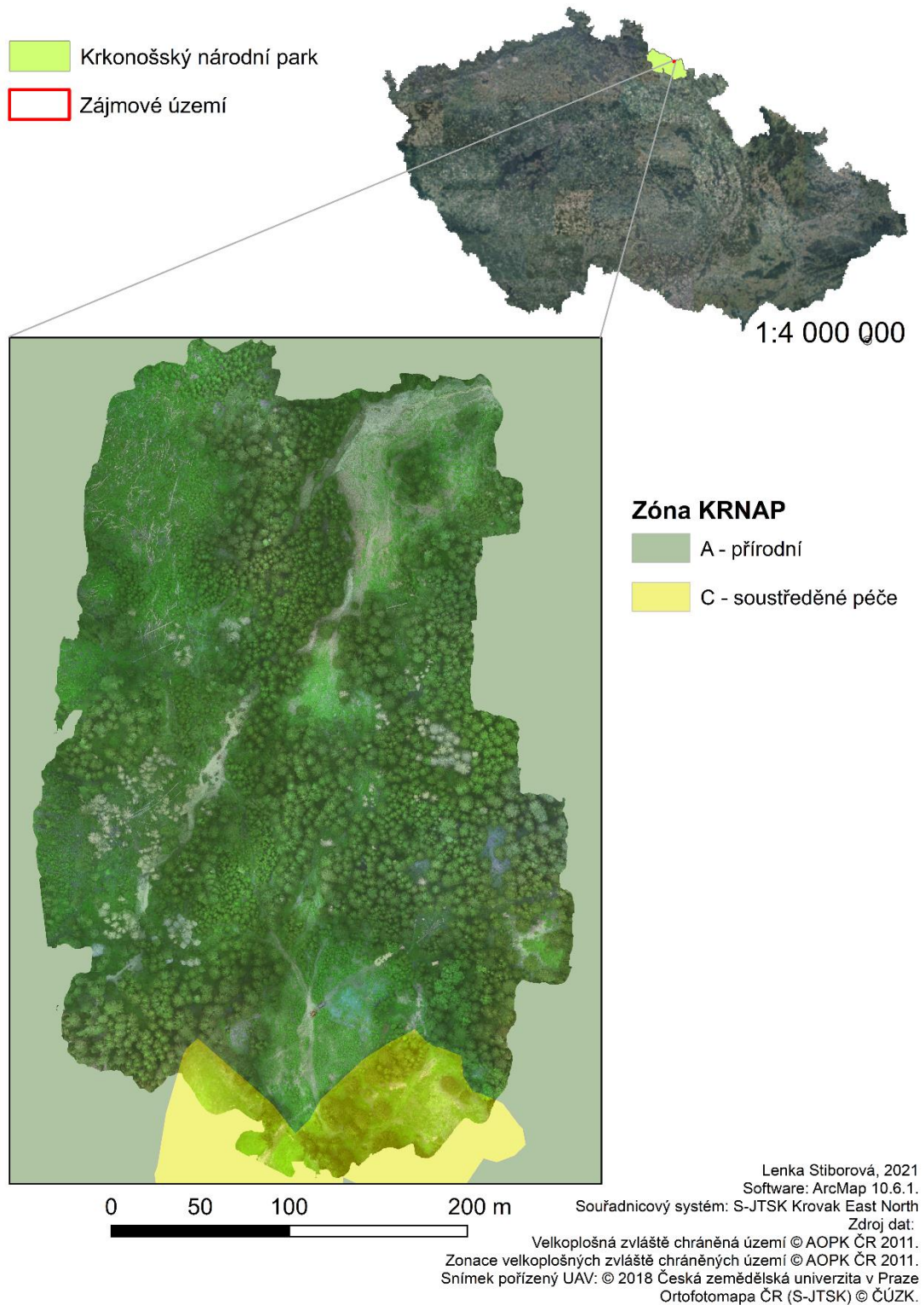
4 Metodika

4.1 Charakteristika studijního území

Zmiňovaná zájmová lokalita se nachází v Krkonošském národním parku na severu Čech. Konkrétně se práce zabývá zpracováním dat pořízených v oblasti Obřího dolu o rozloze zhruba 10 ha. Tato oblast leží v přírodní zóně KRNAP, což můžete vidět na Obr. 6, v nadmořské výšce 985 m n.m. (informace ze SRTM DEM; z angl. Shuttle Radar Topography Mission, Digital elevation model; Digitální model terénu).

V této oblasti vznikla v karbonu (300 mil. let před současností) vlivem geologických procesů ložiska nerostných surovin (KRNAP 2020c), proto není divu, že zde v minulosti vznikaly hornické osady. Okolní lesy byly ovšem lidskou činností velmi poznamenány (KRNAP 2021a). Během čtvrtohor, kdy se střídaly doby ledové a meziledové, se oblast přeměnila v ledovcové údolí (KRNAP 2020b).

Do dnešních dní se v tomto území dochovaly pralesovité horské smrčiny, pro něž jsou typické kapradiny, traviny a mechorosty (KRNAP 2021b), ale také zbytky květnatých horských luk (KRNAP 2021c). Vzhled této krajiny je ovlivněn zemními lavinami (KRNAP 2020d).



Obr. 6: Poloha zájmového území v rámci ČR

4.2 Použitá kamera a senzor

Použity byly multispektrální snímky z roku 2018 pořízené kamerami Tetracam Micro-MCA (TTC) a MicaSense RedEdge-M (REM) umístěnými na bezpilotním

prostředku Zefyros Oktos XL v KRNAPu. Snímky jsou vlastnictvím České zemědělské univerzity, byly nasnímány a zpracovány v rámci projektu kurovec.czu.cz.

Tab. 3: Použité snímky; TTC – Tetracam Micro-MCA,REM – MicaSense RedEdge-M

Datum	Kamera / Senzor
22.6. 2018	REM (multispektrální)
25.7. 2018	TTC (multispektrální)
22.8. 2018	TTC (multispektrální)
25.9. 2018	TTC (multispektrální)
6.11. 2018	TTC (multispektrální)
3.7. 2019	TTC (multispektrální)

Na dané lokalitě bylo v průběhu roku 2018 pořízeno 5 snímků. Použité snímky jsou uvedené v Tab. 3. Použitím senzoru REM vznikl pouze snímek z června. V analýze byl využit také snímek z roku 2019. Senzor TTC snímá v 6 pásmech, REM pouze v pěti, viz. Tab. 4 a Tab. 5.

Tab. 4: Vlnové délky senzoru TTC

Pásma	Název pásma	Střed vlnové délky (nm)	Šířka vlnové délky (nm)
1	Near IR 1	800	10
2	Blue	490	10
3	Green	550	10
4	Red	680	10
5	Red Edge	720	10
6	Near IR 2	900	20

Tab. 5: Vlnové délky senzoru REM

Číslo pásma	Název pásma	Střed vlnové délky (nm)	Šířka vlnové délky (nm)
1	Blue	475	20
2	Green	560	20
3	Red	668	10
4	Near IR	840	40
5	Red Edge	717	10

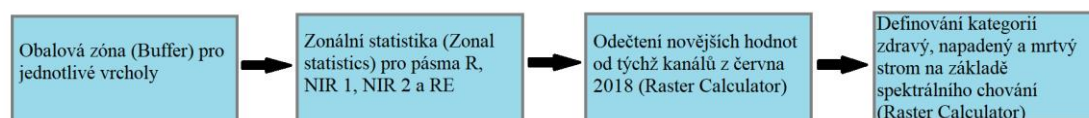
4.3 Metodika

Větší část analýzy se zabývala rokem 2018, nicméně zahrnut byl i stav napadení v roce 2019, pro zjištění, zda se napadené stromy lišily od zdravých již v roce 2018. Snímky, které se v postupu objevují, jsou vypsané výše v Tab. 3 v kap. 4. 2 Použitá kamera a senzor. Pro zpracování mi byla také poskytnuta bodová vrstva jednotlivých stromů s již zjištěnými atributy výšek. Ty byly získány z normalizovaného digitálního modelu povrchu. Atributová tabulka též obsahuje stav napadení v jednotlivých rocích. Vrstva byla, stejně jako snímky z UAV, vytvořena v rámci projektu kurovec.czu.cz. Z tohoto shapefilu byly pouze odstraněny listnaté stromy, jimiž se má analýza nezabývá.

V této práci byly použity dvě detekční techniky, (a) metoda rozhodovacího stromu, (b) metoda prahování z vegetačních indexů. Metody analýzy vychází z publikace Kloučka et al. (2019a). Na jednotlivé snímky byly nejprve aplikovány vybrané indexy kombinující pásma R, G (green channel; zelené pásmo), NIR 1, NIR 2 a RE. Indexy byly vytvořeny k metodě prahování. Zmíněné techniky byly nakonec statisticky porovnány. Pro zpracování byl použit software Esri ArcGIS Pro 2.6, Esri ArcMap 10.6.1. a Microsoft Excel.

4.3.1 Technika rozhodovacího stromu (angl. decision tree)

Technika rozhodovacího stromu je určena k porovnávání 2 snímků, na nichž je patrný rozdíl mezi zdravým a napadeným stromem, resp. před napadením a po něm. Metoda vychází z toho, že dokážeme definovat jednotlivé kategorie (zdravý, mrtvý, napadený) na základě spektrálního chování před a po napadení. Čím více se do výpočtu zahrne pásem, tím pravděpodobnější je správné zařazení stromů do daných kategorií (Klouček et al. 2019a). V mém případě byl postup opakován pětkrát (pro dvojice červen – červenec, červen – srpen, červen – září, červen – listopad, červen – červenec 2019), aby byly využity všechny dostupné snímky z roku 2018. Postup je schematicky znázorněn na Obr. 7.

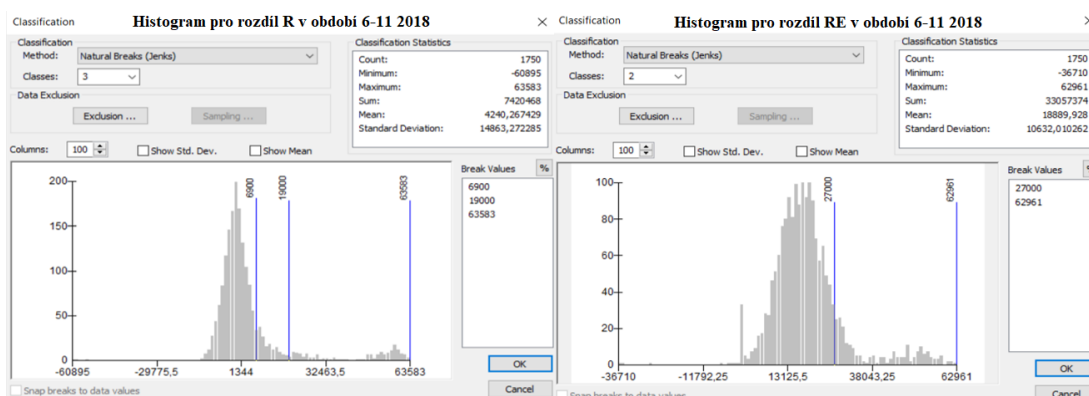


Obr. 7: Schéma jednotlivých kroků při zpracování snímků technikou rozhodovacího stromu

Pro jednotlivé vrcholy stromů byly funkcí Zonal statistics spočítány průměrné hodnoty odrazivosti v pásmech R, NIR 1, NIR 2 a Red Edge ze všech zmiňovaných snímků. Jelikož byl snímek z června pořízen senzorem REM, poskytuje pouze jedno NIR pásmo. Z tohoto důvodu byl výpočet rozdílů pro jednotlivé dvojice opakovan dvakrát, přičemž bylo vždy použito jedno z NIR pásem, které je k dispozici u snímků pořízených TTC.

Pro odečtení novějších hodnot od starších ve vybraných kanálech byl využit nástroj Raster Calculator. Vznikly tak jejich rozdíly. Výsledné vrstvy následně sloužili jako vstup do Raster Calculatoru, konkrétně do vzorce s využitím funkce Con. Ta vyhodnotí podmínku stanovenou v závorce a pokud je pravdivá, je výslednému rastru přiřazena hodnota za první čárkou. Pokud je podmínka nepravdivá, bude výslednému rastru přiřazena hodnota za druhou čárkou, resp. je-li v mém případě výsledkem hodnota 0, strom je zdravý, pokud 1, tak napadený a pokud 2, tak mrtvý.

Rozlišením zdravých a mrtvých stromů se můj postup liší od postupu uvedeného v Certifikované metodice (Klouček et. al 2019a). Napadené, zdravé a mrtvé stromy byly pomocí vzorce rozlišeny na základě hodnot rozdílů zmíněných pásem – R, RE. Podmínka Con byla definována na základě chování dat. V histogramu byla individuálně hledána hodnota, která by odlišila stresované a mrtvé stromy. Vzorec, který byl využit ke klasifikaci zdravotního stavu pro období 6-11 2018 s použitím pásma RE zní: $\text{Con}((\text{"6_11_R.tif"} > 6900) \& (\text{"6_11_RE.tif"} > 27000), 1, \text{Con}(\text{"6_11_R.tif"} > 19000, 2, 0))$. Ukázka histogramů, vztahujících se k tomuto vzorci, s definicí použitých hranic rozlišující zdravotní stav je znázorněna na Obr. 8.



Obr. 8: Ukázka histogramů pro rozdíly v pásmech R a RE pro období 6–11 2018 s definovanými hranicemi odlišujícími zdravé a napadené/mrtvé stromy

Proces byl následně zopakován znovu, pouze s tím rozdílem, že pásmo RE bylo nahrazeno kanály NIR 1 a NIR 2 pro posouzení, zda toto pásmo přináší do výsledků nějakou přínosnou informaci.

4.3.2 Technika prahování z vegetačních indexů (angl. thresholding)

Tato technika je založena na hledání hraniční hodnoty, která dokáže odlišit stanovené kategorie, v této práci tedy zdravé, napadené a mrtvé stromy. Pro tuto metodu lze použít jen jednobandové vstupy (Klouček et. al 2019a), kterými budou v mém případě vegetační indexy.

4.3.2.1 Aplikování indexů na snímky

Na snímky ve formátu *.tif byly aplikovány následující vegetační indexy:

- Greenness Index: $GI = \text{Green} / (\text{Red} + \text{Green} + \text{Blue})$
- Normalized Difference Vegetation Index: $NDVI = (\text{Nir} - \text{Red}) / (\text{Nir} + \text{Red})$
- Difference Index 45: $NDI45 = (\text{Red Edge} - \text{Red}) / (\text{Red Edge} + \text{Red})$.

Index NDVI je již zakomponován v softwaru ArcGIS Pro, a tak mohl být na snímky přímo aplikován. GI a NDI45 byly počítány pomocí nástroje Aritmetika pásem, kde byly pomocí jednoduchých rovnic, vyplývajících z pásem senzoru, definovány. Index NDVI byl počítán dvakrát, pokaždé s využitím jiného NIR pásma dostupného ze senzoru TTC.

4.3.2.2 Práhování z vegetačních indexů

Pomocí nástroje Recclasify byly vytvořeny specifické kategorie pro každou z kategorií – mrtvý strom, napadený a zdravý. V histogramu byly tedy manuálně, individuálně pro každý ze snímků, vytvořeny hranice těchto kategorií tak, aby jim co nejlépe odpovídaly. Značení zůstalo jako u techniky rozhodovacího stromu, tedy že 0 označuje strom zdravý, 1 napadený a 2 mrtvý. U červnového snímku byly ale kategorie klasifikovány tak, aby hodnota 100 odpovídala zdravým, 50 napadeným a 70 mrtvým stromům.

Následně byly pro jednotlivé prvky z referenční vrstvy monitoringu zdravotního stavu stromů v Obřím dole, resp. detekované vrcholy stromů, vytvořeny obalové zóny (Buffer) o poloměru 1 m. Tato vzdálenost byla definována proto, aby se jednotlivé zóny nepřekrývaly, ale stále zhruba odpovídaly velikosti koruny, na které

se symptomy napadení projeví nejdříve. V obalové zóně každého stromu byla funkce Zonal Statistics spočítána převažující hodnota z reklasifikovaných dat.

Tyto vrstvy byly poté odečteny od červnových dat a znovu reklasifikovány. Nová hodnota jim byla přiřazena na základě toho, zda se jejich stav změnil (zhoršil) nebo zůstal stejný. Aby byl tento postup zřejmý, představme si, že strom byl v červnu klasifikován jako zdravý (100) a v červenci jako napadený (1). Po odečtení byl takový strom označen hodnotou 99 a při druhé reklasifikaci byl tedy označen jako napadený (1). Tato úprava byla zařazena proto, aby vznikla opět data pro určená období a bylo možné je srovnat s druhou z metod.

4.3.3 Hodnocení přesnosti

Výstupy, resp. vzorek dat, z obou analýz následně sloužily jako vstup do výpočtu chybové matice (nástroj Compute Confusion Matrix). Tyto hodnoty byly porovnávány se skutečností, tedy s počtem skutečně napadených, zdravých a mrtvých stromů. Vzorek o 200 prvcích byl vybrán náhodně s ohledem na početní zastoupení každé kategorie.

5 Výsledky práce

5.1 Výsledky techniky rozhodovacího stromu

Výsledky této metody jsou uspořádány v Tab. 6. Je z ní možné vyčíst počty napadených, zdravých a mrtvých stromů pro jednotlivá období. Grafické představení těchto výsledků ve formě výřezů je předmětem Přílohy 1. Výřez byl v prostoru vybrán náhodně, shoduje se i u reprezentace dat druhé metody. Celková přesnost klasifikace, která je výstupem z nástroje Compute Confusion Matrix, je zobrazena v Příloze 3.

Tab. 6: Výsledky techniky rozhodovacího stromu

	Období				
	6 - 7 2018	6 - 8 2018	6 - 9 2018	6 - 11 2018	6 - 7 2019
	technika rozhodovacího stromu s využitými kanály R a Red Edge				
Mrtvé	98	151	114	66	173
Napadené	222	191	123	127	221
Zdravé	1067	1451	1600	1557	1499
	technika rozhodovacího stromu s využitými kanály R, NIR 1 a NIR 2				
Mrtvé	56	110	88	56	82
Napadené	201	208	157	123	350
Zdravé	1130	1475	1592	1571	1461

U metody rozhodovacího stromu bylo u varianty s využitím NIR identifikováno méně mrtvých stromů než při použití RE. Z vypočtené chybové matice ale vychází, že výsledky obou variant jsou víceméně rovnocenné. Zpracovatelská přesnost Pa při využití pásma RE dosahovala při určení zdravých stromů nejnižší přesnosti 82 % (v tom případě byla přesnost uživatele Ua 95 %), u mrtvých 57 % (Ua 80 %) a u napadených 8 % (Ua 7 %). Při využití NIR pásem u zdravých stromů 84 % (Ua 94%), u mrtvých 45 % (Ua 50 %) a u napadených 17 % (Ua 14 %). Napadené stromy byly u obou variant určeny s nejnižší přesností, při využití NIR se úspěšnost pohybovala o něco výš.

5.2 Výsledky techniky prahování z vegetačních indexů

Výsledky metody prahování z vegetačních indexů jsou zaneseny do Tab. 7. Můžeme z ní vyčíst počty napadených, zdravých a mrtvých stromů pro jednotlivá období. Grafická reprezentace těchto výsledků je předmětem Přílohy 2.

Tab. 7: Výsledky techniky prahování z vegetačních indexů

	Období				
	6 - 7 2018	6 - 8 2018	6 - 9 2018	6 - 11 2018	6 - 7 2019
	GI				
Mrtvé	329	332	332	404	352
Napadené	416	331	345	457	310
Zdravé	2426	2524	2480	2317	2516
	NDI45				
Mrtvé	291	349	409	315	387
Napadené	362	570	324	386	407
Zdravé	2507	2268	2416	2475	2398
	NDVI s NIR 1				
Mrtvé	264	236	311	288	233
Napadené	679	538	633	689	737
Zdravé	2217	2413	2204	2185	2211
	NDVI s NIR 2				
Mrtvé	194	267	248	343	250
Napadené	591	529	589	494	644
Zdravé	2383	2375	2314	2324	2284

Nejlépe odlišené byly u techniky prahování z vegetačních indexů taktéž ve všech případech zdravé stromy. V chybové matici z indexu GI u nich zpracovatelská přesnost Pa vždy převyšovala 83 % (v tom případě byla přesnost uživatele Ua 100 %), u určení mrtvých stromů byla nejnižší hranicí 88 % úspěšnost (Ua 67 %), ve většině případů ale vyšší. Nejhorší přesnosti však dosahovalo opět určení napadených stromů, Pa 30 % (Ua 12 %). Co se týče přesnosti indexu NDI45, určení zdravých stromů u

zpracovatelské přesnosti ve všech případech převyšovala 80 % (Ua 98 %), u mrtvých 79 % (Ua 61 %). Nejhůře identifikovány byly opět napadené stromy s Pa 36 % (Ua 21 %). U indexu NDVI s použitím NIR 1 dosahovala přesnost u zdravých stromů nejméně 77 % (Ua 98 %), u mrtvých 60 % (Ua 60 %) a u napadených 43 % (Ua 14 %). Určení u posledního indexu, NDVI spočítaného za použití NIR 2, u zdravých stromů převyšovalo 82 % (Ua 99 %), u mrtvých 44 % (Ua 58%) a u napadených stromů 30 % (Ua 16 %). Identifikace napadených stromů dopadla ve všech případech nejhůře. Celkově nejlépe dopadla identifikace u GI a následně u NDI45.

Je nutno říci, že celková přesnost obou metod je relativně podobná, liší se hlavně u přesnosti detekce nově napadených stromů, kde dosahuje vyšších hodnot metoda prahování. Daná kategorie je ovšem v porovnání s ostatními třídami méně zastoupena, proto se tento jev na celkové přesnosti příliš neprojeví. Obecně je také viditelný růst přesnosti detekce od doby pořízení dat.

6 Diskuse

V praktické části jsem se zabývala zpracováním dat metodami (a) rozhodovacího stromu a (b) prahováním z vegetačních indexů. Počet napadených stromů ve výsledcích se u obou technik liší. Možnou příčinou nižší přesnosti metody založené na rozhodovacím stromu mohlo být to, že snímek z června byl pořízen senzorem REM a zbytek dat pomocí TTC. Sensory se odlišují svým spektrálním rozlišením, takže při odečtení jejich dat může vznikat šum, který zhoršuje výsledek klasifikace. Senzor REM oproti TTC poskytuje pouze jedno NIR pásmo, což jsem se snažila vynahradit opakováním výpočtů s různými kombinacemi těchto pásem, viz. kapitola 4. 3 Metodika.

Z poskytnutých dat jsem se rozhodla nefiltrovat smrkové porosty nedosahující výšky 15 m. Byť by takové stromy za normálních okolností napadeny nebyly, při kalamitních stavech jsou napadány i mladší porosty, než je běžné. V takových porostech obvykle lýkožrout nedokončí svůj vývoj (Zahradník et. al 2010), ale může zde proběhnout úživný zír, jež ovlivňuje vitalitu stromů (Zahradník et. al 2007). Když se podíváme, jaké stromy byly skutečně napadány, průměrná výška porostu byla 25 m, rozsah hodnot se pohyboval od 9 do 36 m. Stromů nižších než 15 m ale bylo mezi napadenými/mrtvými jen 14.

Při srovnání metod dopadly proti očekávání o něco lépe výsledky dosažené metodou prahování z vegetačních indexů, hlavně co se týče rozlišení čerstvě napadených stromů. Nejlepší přesnosti dosáhl konkrétně GI se zpracovatelskou přesností Pa 88 % (přesnost uživatele Ua 24 %) a to pro období 6-11 2018. Index GI dopadl lépe než NDVI i v případě Kloučka et. al (2019b). U obou použitých metod byla dosažena nejnižší přesnost při určení napadených stromů, jejich rozlišení rostlo s delší dobou po napadení. Tento závěr se objevuje i v publikaci Kloučka et. al (2019b). Kategorie napadených stromů byla podhodnocena, což ovšem nekladu za vinu použitému senzoru. V přesnosti metod hraje velkou roli uživatel, jelikož ten je nucen manuálně určit hranice pro jednotlivé kategorie. Ty je případně možné upravit dle jeho potřeb.

Když srovnám úspěšnost mezi mými výsledky a například mezi zmíněnými výsledky Kloučka et. al (2019b), kteří využívali běžný RGB senzor, je nutno podotknout, že dosahují velmi podobné celkové přesnosti (u GI 78-96 %, u NDVI 70-94 %). Zpracovatelská přesnost u GI se pro zdravé stromy pohybovala mezi 75 a 98 %, což by se také dalo považovat za obdobné jako u mých výsledků, ovšem rozdíly v přesnosti napadených stromů (Pa 80-90 %) jsou markantní. Totéž platí i u indexu NDVI, kde zpracovatelská přesnost u zdravých stromů dosahovala 70-98 % a u napadených 70-90 %. V publikaci ale chybí odlišení kategorie mrtvých stromů, proto její přesnost ověřit nemůžu. Podobné přesnosti klasifikace dosáhli i Nási et. al (2018) s levnou hyperspektrální technologií, kteří již rozlišovali také všechny tři kategorie. Zpracovatelská přesnost při určení zdravých stromů se pohybovala v rozmezí 74-98 %, u mrtvých mezi 67 a 78 %. I zde byla nejhůře identifikována kategorie napadených stromů (Pa 0–45 %), která měla vliv na snížení celkové přesnosti (71-87 %). Z porovnání tedy vyplývá, že je možné v praxi využít i takových variant. Běžný uživatel dle mého názoru nutně nepotřebuje profesionální multispektrální nebo hyperspektrální senzory, které jsou schopné detekovat i drobné odchylky ve spektrálních charakteristikách (Nási et. al. 2015).

Dle referenční vrstvy byl od listopadu 2018 do července 2019 čerstvě napaden pouze 1 strom. Když se podíváme, zda byl odlišen jednotlivými metodami v období 6-7 2019, zjistíme, že byl odhalen metodou rozhodovacího stromu při použití NIR pásem, dále metodou prahování u indexů NDVI, NDVI s NIR 2 a NDI45. Stromy napadené v roce 2019 by tedy bylo možné odlišit od zdravých při použití většiny

technik. Změnu ve spektrálním chování jehlic při napadení lýkožroutem potvrzuje i výzkum Abdullaha et. al (2017).

Co se týče pásma RE, které mají oba použité senzory, rozhodla jsem se ho do svých analýz zapojit pro zjištění, zda oproti běžněji používanému pásmu NIR přináší nějakou hodnotnou informaci. Pásmo se nachází mezi červeným a blízkým infračerveným pásmem, v místě, kde dochází k rozporu v odrazivosti zdravé a stresované vegetace. Z tohoto důvodu se zdálo být atraktivní pro monitorování zdravotního stavu vegetace. V mém případě při spojení s indexem NDI45 dopadl relativně úspěšně. U metody rozhodovacího stromu bylo při jeho použití odlišeno více mrtvých stromů, ale stav zbylých kategorií dopadl velmi podobně jako u druhé varianty. Z těchto poznatků v mém případě tedy plyne, že pro odlišení mrtvých stromů by mohl fungovat dobře, nicméně taková informace je dle mého názoru již bezpředmětná. Zásadní význam pásma RE v celkové klasifikaci, obzvláště pro napadené stromy, nevidím. Dosahoval víceméně rovnocenných výsledků jako NIR. K odlišení mrtvých stromů od zdravých v případě Fassnacha et. al (2014) významně dopomohlo právě pásmo RE, ale také pásma G a R, které se v mém případě objevují ve vzorci pro výpočet GI. Ten dosáhl, jak bylo řečeno výše, nejvyšší celkové přesnosti.

7 Závěr a přínos práce

Využití UAV v oblasti monitoringu kůrovcových kalamit je v současné době aktuálním tématem, i proto se rychle vyvíjejí různé detekční metody (Näsi et. al 2015). Mimo zde zmíněných slouží k detekci napadených stromů například i pokročilejší přístupy ne/řízené klasifikace. Tématu je věnováno mnoho článků, malý výčet z nich je popsán v kapitole 3.4 Současný stav kůrovcové problematiky. Podkladem pro praktickou část této práce sloužila konkrétně publikace *Detekce napadení lesních porostů pomocí bezpilotních leteckých prostředků* (Klouček et al., 2019a). V ní zmíněnými metodami (a) rozhodovacího stromu a (b) prahování z vegetačních indexů byla zpracována data pořízená profesionálními multispektrálními senzory umístěnými na UAV. Pro analýzu byly vybrány dvojice snímků v obdobích mezi červnem 2018 a vždy následujícím náletem provedeným v roce 2018 a 2019. Metoda rozhodovacího stromu byla optimalizována tak, aby bylo možné odlišit tři různé kategorie – zdravé, napadené a mrtvé stromy. Obě metody jsou ovlivněny uživatelem při definování hranic jednotlivých kategorií v histogramu. Pro dosažení lepší přesnosti by bylo možné,

namísto manuálního určení hranic, otestovat například automatický přístup založený na výpočtu směrodatné odchylky (Standard Deviation) (Klouček et. al 2019a).

Celková přesnost obou přístupů je relativně podobná, liší se hlavně v přesnosti detekce nově napadených stromů, která roste s delší dobou po napadení. Nejúspěšněji dopadla metoda prahování z vegetačního indexu GI, která u napadených stromů dosáhla nejvýše zpracovatelské přesnosti Pa 88 % (přesnost uživatele Ua 24 %) a to pro období 6–11 2018. Mé výsledky dopadly, co se týče celkové přesnosti, velmi podobně jako při použití levného hyperspektrálního senzoru v publikaci Näsiho et. al. (2015). Praktická část práce také prokázala, že kanál RE dosahoval víceméně rovnocenných informací jako NIR, takže do výsledků nevnese žádnou přidanou hodnotu. Odlišit strom napadený čerstvě v roce 2019 se podařilo metodou rozhodovacího stromu při použití NIR, metodou prahování z vegetačních indexů NDVI s NIR i s NIR 2 a NDI45.

8 Seznam příloh

8.1 Obrázky

Obr. 1: Lýkožrout smrkový, zdroj: <https://www.kurovcoveinfo.cz/lykozrout>

Obr. 2: Dělení elektromagnetického spektra, zdroj: Zölzer, Friedo. *Fyzikální optika: Doplnkové texty pro posluchače kombinované formy studia studijního programu „Ochrana obyvatelstva“ studijního oboru „Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE“*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2007.

Obr. 3: Schematické znázornění schopnosti odrazu mrtvé, stresované a zdravé vegetace, zdroj: Stoyanova et al. 2018

Obr. 4: Spektrální projevy stresované (unhealthy) a zdravé (healthy) vegetace, zdroj: Stoyanova et al. 2018

Obr. 5: Nová managementová zonace KRNAP, zdroj: https://www.krnep.cz/data/Files/pages/zonace_159040000834.574.jpg

Obr. 6: Poloha zájmového území v rámci ČR, zdroj: vlastní

Obr. 7: Schéma jednotlivých kroků při zpracování snímků technikou rozhodovacího stromu, zdroj: vlastní

Obr. 8: Ukázka histogramů pro rozdíly v pásmech R a RE pro období 6–11 2018 s definovanými hranicemi odlišujícími zdravé a napadené/mrtvé stromy, zdroj: vlastní

8.2 Tabulky

Tab. 1: Systematické zařazení lýkožrouta smrkového, zdroj: Maratová 2010 ex. Linnaeus 1758, upraveno

Tab. 2: Základní způsoby dělení komerčních UAV, zdroj: Karas, Tichý 2016

Tab. 3: Použité snímky, zdroj: vlastní

Tab. 4: Vlnové délky senzoru TTC, zdroj: ČZU

Tab. 5: Vlnové délky senzoru REM, zdroj: ČZU

Tab. 6: Výsledky techniky rozhodovacího stromu, zdroj: vlastní

Tab. 7: Výsledky techniky prahování z vegetačních indexů, zdroj: vlastní

8.3 Přílohy

Příloha 1: Grafické představení výsledků techniky rozhodovacího stromu, zdroj: vlastní

Příloha 2: Grafické představení výsledků techniky prahování z vegetačních indexů, zdroj: vlastní

Příloha 3: Chybová matice použitých metod, zdroj: vlastní

9 Přehled literatury a použitých zdrojů

1. Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Groen, T. A., & Heurich, M. (2018). European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64(July 2017), 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.009>
2. Brovkina, O., Cienciala, E., Surový, P., Janata, P., & Group, F. (2018). Geospatial Information Science Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands. *Geospatial Information Science*, 5020, 1–9. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1416994>
3. Chiara Torresan, Andrea Berton, Federico Carotenuto, Salvatore Filippo DiGennaro, Beniamino Gioli, Alessandro Matese, Franco Miglietta, Carolina Vagnoli, Alessandro Zaldei & Luke Wallace (2017) Forestry applications of UAVs in Europe: a review, *International Journal of Remote Sensing*, 38:8-10, 2427-2447. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>.
4. Dobrovolný, Petr. *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu*. Brno: Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1812-7.
5. Ewald, F., Lati, H., Ghosh, A., Kumar, P., & Koch, B. (2014). *Remote Sensing of Environment Assessing the potential of hyperspectral imagery to map bark beetle-induced tree mortality*. 140, 533–548. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.014>
6. Goheen, D., & Hansen, E. (1993). Effects of Pathogens and Bark Beetles on Forests. *Effects of Pathogens and Bark Beetles on Forests*, (March), 175–196. Retrieved from <http://digitalcommons.usu.edu/barkbeetles>

7. Halounová, Lena, Pavelka, Karel. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1.
8. 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. *Annals of Forest Research*, 58(2), 295–310. <https://doi.org/10.15287/afr.2015.388>.
9. Jones, H., Vaughan, R., 2010. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, techniques and application*. Oxford University Press, ISBN: 978-0-19-920779-4.
10. Karas, Jakub, Tichý, Tomáš. *Drony*. 1. vydání. Brno: Computer Press, 2016. 264 stran. ISBN 978-80-251-4680-4.
11. Klouček, Tomáš, Jan Komárek, Ondřej Lagner, Michal Fogl a Kateřina Gdulová. *Detekce napadení lesních porostů pomocí bezpilotních leteckých prostředků: certifikovaná metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2019a. ISBN 978-80-213-2932-4.
12. Klouček, T., Komárek, J., Surový, P., Hrach, K., Janata, P., Vašíček, B., 2019b. The Use of UAV Mounted Sensors for Precise Detection of Bark Beetle Infestation. *Remote Sens.* 11, 1561. <https://doi.org/10.3390/rs11131561>
13. KRNAP 2020a, ©2010: KRNAP a jeho ochranné pásmo (online) [cit.2020.11.06], dostupné z: <https://www.krnep.cz/krnap-a-jeho-ochrannepasmo/>.
14. KRNAP 2020b, ©2010: Geomorfologie (online) [cit.2020.11.06], dostupné z: <https://www.krnep.cz/geomorfologie/>.
15. KRNAP 2020c, ©2010: Geologie (online) [cit.2020.11.06], dostupné z: <https://www.krnep.cz/geologie/>.
16. KRNAP 2020d, ©2010: Půdy Krkonoš (online) [cit.2020.11.07], dostupné z: <https://www.krnep.cz/pudy-krkonos/>.
17. KRNAP 2020e, ©2010: Vegetační stupně (online) [cit.2020.11.07], dostupné z: <https://www.krnep.cz/vegetacni-stupne/>.

18. KRNAP 2020f, ©2010: Teplota (online) [cit.2020.11.07], dostupné z: <https://www.krnep.cz/teplota/>.
19. KRNAP 2020g, ©2010: Srážky (online) [cit.2020.11.07], dostupné z: <https://www.krnep.cz/srazky/>.
20. KRNAP 2020h, ©2010: Větrné proudění (online) [cit.2020.11.07], dostupné z: <https://www.krnep.cz/vetrne-proudeni/>.
21. KRNAP 2021a, ©2010: Historie vlivu člověka na území Krkonoš (online) [cit.2021.02.28], dostupné z: <https://www.krnep.cz/historie-vlivu-cloveka/>.
22. KRNAP 2021b, ©2010: Pralesovité horské smrčiny (online) [cit.2021.02.28], dostupné z: <https://www.krnep.cz/horske-smrciny/>.
23. KRNAP 2021c, ©2010: Květnaté horské louky (online) [cit.2021.02.28], dostupné z: <https://www.krnep.cz/kvetnate-horske-louky/>.
24. Kůrovcové info, ©2021: Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) (online) [cit.2021.02.28], dostupné z: <https://www.kurovcoveinfo.cz/lykozrout>.
25. Lillesand, T., Kiefer, R. and Chipman, J., 2007. Remote Sensing and Image Interpretation. 6th ed. United States of America: Wiley, ISBN-13: 978-0470052457.
26. Maratová, K., U. K. V. P. (2010). *Lýkožrout smrkový (Ips Typographus) na území Národního parku Šumava – biologie, výskyt a metody ochrany lesních ekosystémů. Bakalářská práce.* 81. Retrieved from https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/27494/BPTX_2010_1_11_410_0_196103_0_86978.pdf?sequence=1&isAllowed=y
27. Mather, P., Tso, B., 2009. *Classification Methods for Remotely Sensed Data.* 2nd ed. United States of America: Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1420090727.
28. Minařík, R., Langhammer, J., 2016. Use of a multispectral UAV photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch. 41, 711–718. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-711-2016>

29. Müllerová, J., Brůna, J., Bartaloš, T., Dvořák, P., Vítková, M., & Pyšek, P. (2017). Timing is important: Unmanned aircraft vs. Satellite imagery in plant invasion monitoring. *Frontiers in Plant Science*, 8(May), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00887>
30. Näsi, R., Honkavaara, E., Blomqvist, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Holopainen, M., 2018. Remote sensing of bark beetle damage in urban forests at individual tree level using a novel hyperspectral camera from UAV and aircraft. *Urban For. Urban Green*. 30, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.010>
31. Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., 2015. Using UAV-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level. *Remote Sens*. 7, 15467–15493. <https://doi.org/10.3390/rs71115467>
32. Pfeffer, Antonín. *Kůrovcovití a jádrohlodovití: Scolytidae a Platypodidae*. Vydání 1. Praha: Academia, 1989. 137 s. ISBN 80-200-0089-5.
33. Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-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. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
34. Stoyanova, M., Kandilarov, A., Koutev, V., Nitcheva, O., & Dobрева, P. (2018). Potential of multispectral imaging technology for assessment coniferous forests bitten by a bark beetle in Central Bulgaria. *MATEC Web of Conferences*, 145. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814501005>
35. Skuhřavý, Václav, 2002. Lýkožrout smřkový (*Ips typographus* L.) a jeho kalamity. Agrospoj, Praha, 196 pp., 125 obr.
36. Vysoký, Václav. *Přehled technicky škodícího hmyzu na dříví: Stručný souhrn znalostí z dostupné literatury*. Ústí nad Labem: Albis International, 1995. 296 s., Obr. ISBN 80-901761-1-9.

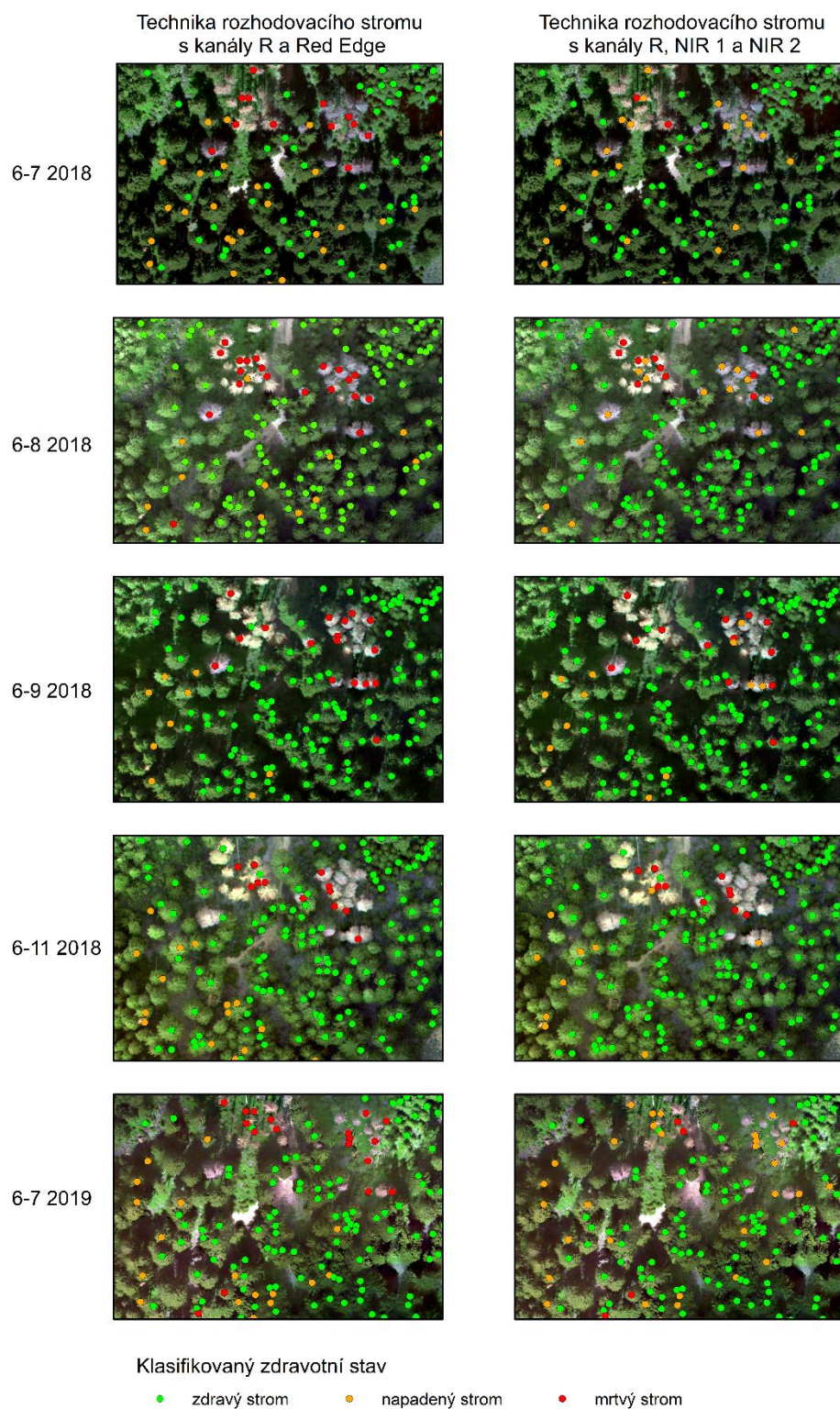
37. Zahradník Petr, Knížek Miloš, V. ústav lesního hospodářství a myslivosti. (2007). Lýkožrout smrkový *Ips typographus* (L .). *Příloha Časopisu Lesnická Práce*, (4/2007), 8.
38. Zahradník Petr, Geráková Marie, V. ústav lesního hospodářství a myslivosti. (2010). Lýkožrout smrkový *Ips typographus* (L .). *Příloha Časopisu Lesnická Práce*, (12/2010), 8.

9.1 Legislativní zdroje

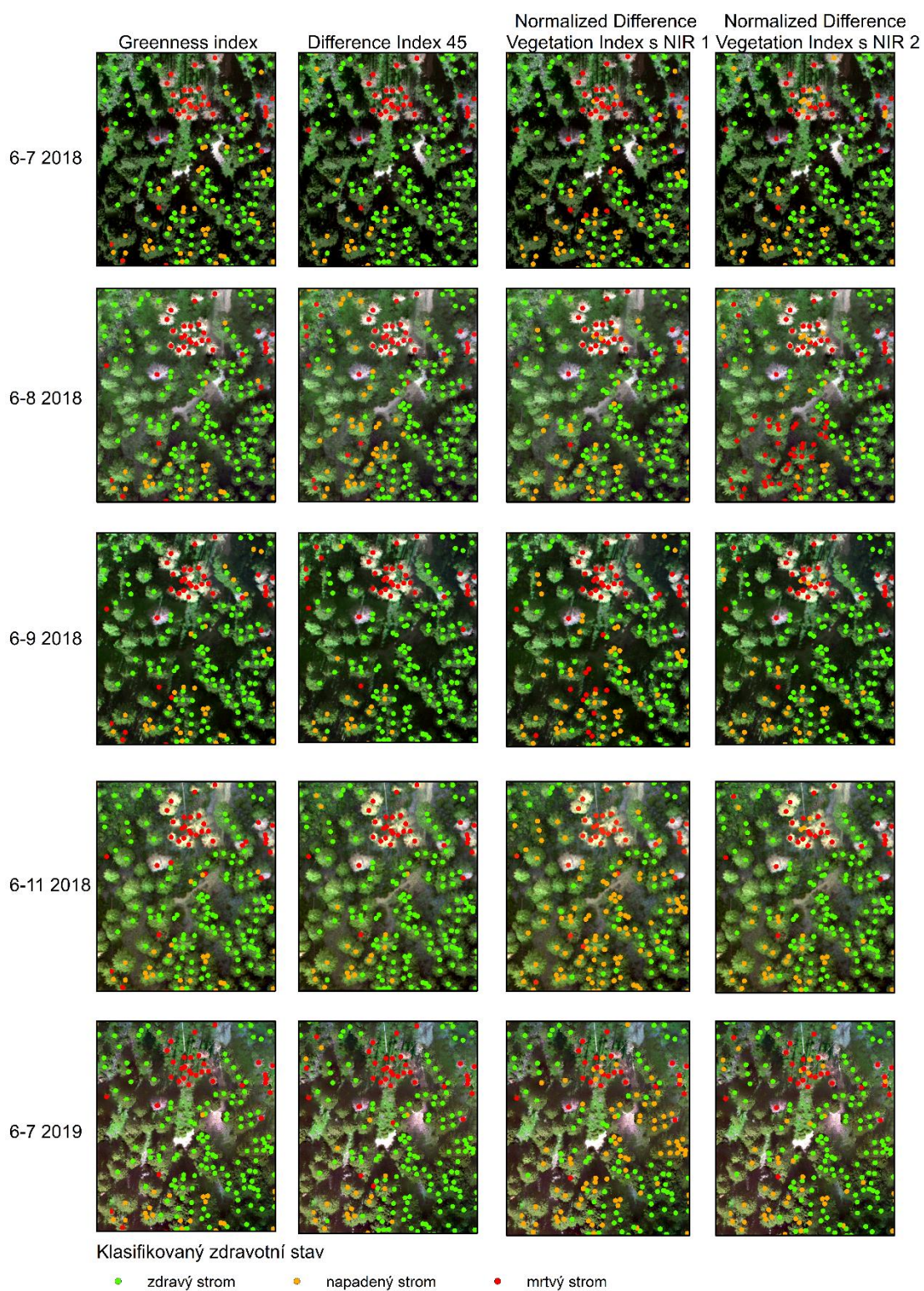
1. Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 101/1996 Sb., kterou se stanoví podrobnosti o opatřeních k ochraně lesa a vzor služebního odznaku a vzor průkazu lesní strážce. <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=101&r=1996>.
2. Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 257/2020 Sb., o vymezení zón ochrany přírody Krkonošského národního parku. <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-257>.

10 Přílohy

Příloha 1: Grafické představení výsledků techniky rozhodovacího stromu, zdroj: vlastní



Příloha 2: Grafické představení výsledků techniky prahování z vegetačních indexů, zdroj: vlastní



Příloha 3: Chybová matice použitých metod; Z – zdravý strom, N – napadený, M – mrtvý, Ua – přesnost uživatele, Pa – zpracovatelská přesnost

		Období																				
		6-7 2018			6-8 2018			6-9 2018			6-11 2018			6-7 2019								
Použitá pásma	Z	N	M	Σ	Ua	Σ	Ua	Z	N	M	Σ	Ua	Σ	Ua	Z	N	M	Σ	Ua			
		R, RE	147	4	3	154	0,95	151	0,93	166	4	4	174	0,95	164	9	5	178	0,92	153	3	2
	29	2	1	32	0,06	16	0,1	10	2	1	13	0,15	13	1	1	15	0,07	20	2	1	23	0,09
	3	3	8	14	0,57	2	0,76	2	2	8	12	0,67	0	2	8	10	0,8	3	5	10	18	0,56
	179	9	12	200		169		178	8	13	199		177	12	14	203		176	10	13	199	
Pa	0,82	0,22	0,67		0,79	0,89	0,83	0,93	0,25	0,61		0,88	0,93	0,08	0,57		0,85	0,87	0,2	0,77		0,83
	156	6	1	163	0,96	155	0,94	165	4	4	173	0,95	168	9	3	180	0,93	144	8	2	154	0,94
	21	4	4	29	0,14	14	0,22	10	4	3	17	0,24	10	2	2	14	0,14	26	7	4	37	0,19
R, NIR 1, NIR 2	2	2	6	10	0,6	2	0,83	1	2	7	10	0,7	0	1	9	10	0,9	2	3	5	10	0,5
	179	12	11	202		171		176	10	14	200		178	12	14	204		172	18	11	201	
Pa	0,87	0,33	0,55		0,82	0,91	0,85	0,94	0,4	0,5		0,88	0,94	0,17	0,64		0,88	0,84	0,39	0,45		0,78
		Období																				
		6-7 2018			6-8 2018			6-9 2018			6-11 2018			6-7 2019								
Použitá indexy	Z	N	M	Σ	Ua	Σ	Ua	Z	N	M	Σ	Ua	Σ	Ua	Z	N	M	Σ	Ua			
		GI	149	4	0	153	0,97	156	0,99	155	2	2	157	0,99	148	0	0	146	1	157	1	0
	22	3	1	26	0,12	14	0,33	12	8	2	22	0,36	22	7	0	29	0,24	15	5	0	20	0,25
	6	3	12	21	0,57	6	0,57	5	2	14	21	0,67	7	1	17	25	0,68	7	4	11	22	0,5
	177	10	13	200		176		172	12	16	200		175	8	17	200		179	10	11	200	
Pa	0,84	0,3	0,92		0,82	0,88	0,88	0,9	0,67	0,88		0,89	0,83	0,88	1		0,85	0,88	0,5	1		0,87
	154	4	1	159	0,97	139	0,98	149	2	2	153	0,97	148	7	1	156	0,92	146	3	1	150	0,97
	14	7	2	23	0,3	30	0,24	16	5	0	21	0,24	19	5	0	24	0,21	20	6	0	26	0,23
	5	2	11	18	0,61	5	0,55	9	3	14	26	0,54	3	2	15	20	0,75	6	5	13	24	0,54
	173	13	14	200		174		174	10	16	200		170	14	16	200		172	14	14	20	
Pa	0,89	0,54	0,79		0,88	0,8	0,78	0,86	0,5	0,88		0,84	0,87	0,36	0,94		0,84	0,85	0,43	0,93		0,83
	135	5	0	140	0,96	143	0,95	137	2	1	140	0,98	131	6	1	138	0,95	135	3	1	139	0,97
	36	6	1	43	0,14	25	0,18	34	4	2	40	0,1	27	12	5	44	0,27	31	11	4	46	0,24
	3	3	11	17	0,65	5	0,6	7	2	11	20	0,55	2	2	1	18	0,78	3	4	8	15	0,53
	174	14	12	200		173		178	8	14	200		160	20	20	200		169	18	13	200	
Pa	0,78	0,43	0,92		0,76	0,83	0,79	0,77	0,5	0,76		0,76	0,82	0,6	0,7		0,79	0,8	0,61	0,62		0,77
	147	2	1	150	0,98	148	0,99	146	1	0	147	0,99	144	3	0	147	0,98	143	0	1	144	0,99
	18	11	8	37	0,3	28	0,12	26	7	4	37	0,19	26	5	0	31	0,16	29	9	3	41	0,22
	2	3	7	12	0,58	4	0,59	1	4	11	16	0,69	5	9	8	22	0,36	3	6	7	16	0,44
	167	16	16	199		180		173	12	15	200		175	17	8	200		175	15	11	201	
Pa	0,88	0,69	0,44		0,63	0,82	0,81	0,84	0,58	0,73		0,82	0,82	0,3	1		0,79	0,82	0,6	0,64		0,41