

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DETEKTCE NAPADENÝCH STROMŮ LÝKOŽROUTEM POMOCÍ BEZPILOTNÍCH LETECKÝCH PROSTŘEDKŮ V NOVÉM MĚSTĚ NA MORAVĚ

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

Diplomant: Bc. Petr Novák

2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Petr Novák

Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

Detekce napadených stromů lýkožroutem pomocí bezpilotních leteckých prostředků v Novém Městě na Moravě

Název anglicky

Detection of infested trees by bark beetle using unmanned aerial vehicles in Nové Město na Moravě

Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je detekovat napadené stromy lýkožroutem smrkovým za použití dat pořízených multispektrálním senzorem umístěným na bezpilotním leteckém prostředku v okolí Nového Města na Moravě. Pro zpracování této práce bylo stanoveno několik dílčích cílů, dle následujícího seznamu:

- Je zvolený Normalized Difference Water Index (NDWI) index vhodný pro detekci stromů napadených lýkožroutem?
- Jsou vybrané indexy RedEdge Normalized Difference Vegetation Index (NDVI_{re}) a Normalized Difference RedEdge (NDRE) vhodné pro detekci stromů napadených lýkožroutem?
- Mají výsledky výše uvedených indexů NDWI, NDVI_{re} a NDRE stejnou až vyšší přesnost než běžněji používaný index NDVI?

Metodika

Metodiku diplomové práce lze popsat dle následujícího seznamu:

- Úprava vstupních dat
- Výběr vhodných vegetačních indexů
- Výběr klasifikátoru
- Výpočet vegetačních indexů (NDWI, GI, NDRE, Nre, NDVI)
- Tvorba trénovacích dat
- Aplikace Random Trees klasifikátoru
- Zhodnocení přesnosti jednotlivých vegetačních indexů

Doporučený rozsah práce

cca 40 normovaných stran

Klíčová slova

dálkový průzkum Země, bezpilotní letecké prostředky, vegetační indexy, lýkožrout smrkový, multispektrální snímkování

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.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1), 95–120.
- 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.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G., 2020. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. In *Journal of Forestry Research*, 32(1).
- 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.
- 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.
- 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.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2022

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Detekce napadených stromů lýkožroutem pomocí bezpilotních leteckých prostředků v Novém Městě na Moravě** vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. / 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 vědom, že odevzdáním diplomové 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 Litoměřicích, dne

Poděkování

V následujících odstavcích bych rád poděkoval lidem, kteří podporovali tvorbu této práce a trpěli mou osobnost.

V první řadě bych moc rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Tomáši Kloučkovi, Ph.D. za jeho čas, trpělivost a rady, které mi v průběhu zpracování této práce věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu a skvělé zázemí a své přítelkyni za emocionální podporu.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá detekcí stromů napadených lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus* (L.)) v Novém Městě na Moravě za použití vegetačních indexů NDWI, GI, NDRE, NDVI_{re} a NDVI. Pro detekci byly vybrány dva snímky, pořízené v období letního rojení kůrovce (červenec, srpen). Tato data byla pořízena Českou zemědělskou univerzitou v Praze za použití senzoru MicaSense RedEdge-MX a nosiče eBee X. Detekce napadených stromů probíhala metodou prahování z vegetačních indexů. Hraniční hodnoty byly klasifikovány řízenou klasifikací s využitím Random Forest klasifikátoru. Nejvyšší přesnosti za období července dosahoval index NDVI s celkovou přesností 84 %. V srpnu, kdy byla klasifikace rozšířena o třídu již mrtvých stromů, vykazoval nejvyšší přesnost index NDVI_{re} s celkovou přesností 86 %. Z výsledků práce je patrné, že multispektrální senzory nesené UAV jsou přínosným nástrojem pro detekci stromů napadených kůrovcem. The results show that multispectral sensors carried by UAVs are a useful tool for detecting bark beetle infested trees.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, bezpilotní letecké prostředky, vegetační indexy, lýkožrout smrkový, multispektrální snímkování

ABSTRACT

The thesis deals with the detection of trees infested with bark beetle (*Ips typographus* (L.)) in Nové Město na Moravě using vegetation indices NDWI, GI, NDRE, NDVI_{re} and NDVI. Two images were selected for detection. These data were mediated by Czech University of Life Sciences in Prague using a MicaSense RedEdge-MX sensor and an eBee X drone. Infested trees were detected by thresholding from vegetation indices. The thresholds were classified by supervised classification using the Random Forest classifier. The NDVI achieved the highest accuracy for July, with an overall accuracy of 84 %. In August, when the class of already dead trees extended the classification, the highest accuracy was detected by the NDVI_{re} index with an accuracy of 86 %. The results show that multispectral sensors carried by UAVs are a useful tool for detecting bark beetle infested trees.

Key words: Remote Sensing, Unmanned Aerial Vehicles, Vegetation Indices, Bark Beetle, Multispectral Imaging

OBSAH

ÚVOD	9
CÍLE PRÁCE	10
1 Dálkový průzkum země	11
2 Bezpilotní letecké prostředky ve vztahu k DPZ	13
2.1 Definice UAV	13
2.2 Historie UAV	13
2.3 Legislativa v ČR	15
2.4 Typy a kategorie bezpilotních leteckých prostředků	15
2.5 Senzory	19
3 Práce s daty	21
3.1 Získávání dat.....	21
3.2 Předzpracování dat.....	22
3.3 Zvýraznění obrazu	23
3.4 Klasifikace dat	24
3.4.1 Neřízená klasifikace.....	24
4 Ekologie lýkožrouta smrkového (<i>Ips typographus</i>, L.)	27
4.1 Způsob života a rozmnožování	27
4.2 Prostředí lýkožrouta.....	28
4.3 Přirození nepřátelé lýkožrouta	29
4.4 Ohrožení lýkožroutem	30
4.5 Prevence a obranná opatření	31
4.6 Legislativa.....	31
5 Vývoj sledování lýkožrouta pomocí metod DPZ	32
6 Metodika	37
6.1 Popis zájmového území	37
6.2 Pořízení a úprava dat.....	39
6.3 Prahování z vegetačních indexů	40
7 Výsledky	44
8 Diskuse	46
9 Závěr	48
CITOVANÁ LITERATURA	49
PŘÍLOHY	56

ÚVOD

Kůrovci jsou významným činitelem lesní disturbance již po mnoho let. Jejich nekalamitní vliv na lesní ekosystém nemá z hlediska ekologie příliš negativní dopady, coby sekundární škůdce, který napadá především čerstvě odumřelé dříví z polomů, či těžby (Kůrovcové info 2022).

Významným problémem se stává v případě přemnožení kůrovce (tzv. kůrovcové kalamity), kdy kůrovec napadá mimo oslabených jedinců i mladé a zdravé stromy. Tento problém vychází již z minulosti, kdy člověk začal zasahovat do přirozeného lesního ekosystému výsadbou ekonomicky a technicky výhodných smrků ztepilých (*Picea abies*) i mimo oblasti jeho přirozeného výskytu. Zároveň probíhající změnou klimatu (Hlásný et al. 2019).

Napadení takových jedinců má přímý škodlivý vliv na lesní hospodářství, kdy dřevo poškozené kůrovcem ztrácí na jakosti. Zároveň, napadne-li kůrovec mladé, nezralé stromy, vzniká ztráta i z důvodu předčasné těžby. Je tedy nutné zdůraznit, že hlavní ztráty v hospodářských lesích mývají především kvalitativní charakter nežli kvantitativní (Zumr 1995).

Pro ochranu před lýkožroutem je velmi důležitá prevence. Preventivním opatřením se rozumí především terénní průzkum pro označení napadených stromů a zpracováním kůrovcového materiálu nejpozději před zakuklením larev (Zumr 1995). Tento postup je ale komplikovaný z hlediska finanční a časové náročnosti, kdy mnoho lesních pozemků je špatně přístupných, či příliš velkých. Vhodnou alternativou, či doplněním terénního průzkumu se nabízí metody a technologie dálkového průzkumu Země (Klouček 2019a).

Detekce stromů napadených lýkožroutem pomocí metod dálkového průzkumu Země spočívá v pozorování změn ve spektrálních vlastnostech jehlic stromu (Ahern 1988; Abdullah et al. 2018). Pro tyto účely je možné použít snímaná data ze satelitů (Abdullah et al. 2019), či data pořízená pomocí bezpilotních leteckých prostředků (Unmanned Aerial Vehicles – UAV).

CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je detekovat napadené stromy lýkožroutem smrkovým za použití dat pořízených multispektrálním senzorem umístěném na bezpilotním leteckém prostředku v okolí Nového Města na Moravě. Pro zpracování této práce bylo stanoveno několik dílčích cílů, dle následujícího seznamu:

- Je zvolený Normalized Difference Water Index (NDWI) index vhodný pro detekci stromů napadených lýkožroutem?
- Jsou vybrané indexy RedEdge Normalized Difference Vegetation Index (NDVI_{re}) a Normalized Difference RedEdge (NDRE) vhodné pro detekci stromů napadených lýkožroutem?
- Mají výsledky výše uvedených indexů NDWI, NDVI_{re} a NDRE stejnou až vyšší přesnost než běžněji používaný index NDVI?

1 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ

Dálkový průzkum Země je disciplína, která se zabývá získáváním informací a dat různých objektů či jevů jejich pozorováním z dálky. Tedy bez nutnosti fyzického kontaktu s danými objekty či jevy. Pro získávání informací se využívají přístroje schopné zachytit odražené, či emitované záření povrchu různých objektů, skrze různé vlnové délky (resp. frekvence) elektromagnetického záření (Dobrovolný 1998).

Obor DPZ má interdisciplinární charakter. Existence metod DPZ je založena na přenosu informací skrze elektromagnetické záření. Čili pro získávání informací jsou důležité disciplíny fyzikálního charakteru jako elektrodynamika, termální radiace a optika (Halounová, Pavelka 2008). Pro zpracování výsledného obrazu či dat se běžně používají poznatky z geodzie, kartografie a geografie, pomocí specializovaných geoinformačních programů (ArcGIS, ENVI, GRASS). Výsledky DPZ jsou poté použitelné v různých odvětvích ať už jde o zemědělství (Mulla 2012; Wójtowicz et al 2016), archeologii (Agapiou, Lysandrou 2015.), ekologii (Kerr, Ostrovsky 2003; Klouček 2018), či krizový management (Voigt et al 2007).

Elektromagnetické záření (vlnění) je příčné, postupné vlnění magnetického a elektrického pole, jenž se pohybuje rychlostí světla c . Záření je dále charakterizováno vlnovou délkou λ a její frekvencí f . V daných fyzikálních veličinách také platí nepřímá úměrnost – čím menší je vlnová délka, tím vyšší je frekvence a naopak.

Základním principem a také důvodem, proč je dané záření nezbytné pro metody DPZ je, že každý předmět, jehož teplota je větší než absolutní nula ($0^\circ \text{K} = -273,15^\circ \text{C}$), je schopný vydávat, absorbovat, či odrážet elektromagnetické záření.

Podle zdroje elektromagnetického záření, lze rozdělit metody DPZ na pasivní a aktivní. Toto rozdělení má také vliv na celkový proces postupu práce s daty. Pasivní systémy jsou schopné zaznamenat data skrze záření odražené od zemského povrchu, resp. objektu, který je snímán. Běžným zdrojem, který pasivní senzory zaznamenávají je slunce. Jako příklad pasivních systémů můžeme jmenovat například satelity Landsat, Sentinel-2, či IKONOS (Khoi, Munthali 2012). Aktivní senzory mají vlastní zdroj elektromagnetického záření. Toto záření je vysláno směrem ke sledovanému

objektu. Část záření se od objektu odrazí a je zachyceno přijímačem daného systému. Mezi aktivní systémy můžeme zařadit např. RADAR, LiDAR či SONAR (Khoi, Munthali 2012).

2 BEZPILOTNÍ LETECKÉ PROSTŘEDKY VE VZTAHU K DPZ

Tato kapitola představí bezpilotní letecké prostředky z hlediska historie a současné legislativy v ČR. Dále zde budou představeny různé typy bezpilotních prostředků a senzorů a jejich vztah k dálkovému průzkumu Země.

2.1 Definice UAV

Bezpilotní letecké prostředky, které budou dále v práci označovány jako UAV (angl. *Unmanned aerial vehicles*) jsou dle definice dle úřadu pro civilní letectví „letadla určená k provozu bez pilota na palubě (může se jednat a většinou se jedná o součást bezpilotního systému). V kontextu legislativního rámce České republiky se za bezpilotní letadla považují všechna bezpilotní letadla s výjimkou modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 25 kg“.

Mimo označení UAV se lze v této práci setkat také s označením bezpilotního prostředku jako „dron“. Mezi těmito termíny je rozdíl, ovšem pro uvedení do problematiky je tento rozdíl nepatrný. Dron označuje jakýkoli autonomní, či naváděný prostředek, kterým může být letoun, ponorka, či automobil. UAV, jak je z názvu patrné, je limitováno pouze na letecké prostředky. Respektive všechny UAV jsou dronem, ale všechny drony nejsou UAV.

Využití těchto bezpilotních systémů je velmi široké. Od armádního využití, po profesionální fotografování, natáčení filmových scén, logistice, závodění, či vědeckého výzkumu.

2.2 Historie UAV

Historie pořizování snímků z leteckých prostředků sahá až do poloviny 19. století, kdy novinář a fotograf Gaspar Felix Tournachon, přezdívaný Nadar, pořídil první leteckou fotografii z horkovzdušného balónu ve výšce zhruba 1600 stop (487,68 metrů) (Krulc 2014).

Znatelný vývoj použití UAV byl zaznamenán v období první světové války (1914-1918). V roce 1916 byl vyvinut koncept UAV torpéda, které mělo být schopné unést až 450 kg váhy a uletět vzdálenost 80 km. Tento projekt financovalo námořnictvo Spojených států amerických a do konce války nebyl použit v přímém konfliktu. Mimo námořnictvo se do vývoje dálkově řízených letounů také angažovala americká armáda. V roce 1917 dostal americký vynálezce Charles Kettering za úkol navrhnout bezpilotní „létající bombu“, která je schopná zasáhnout cíl na vzdálenost 80 km. Svůj vynález pojmenoval „Kettering Bug“ a stejně jako torpédo námořnictva se nikdy neúčastnil válečného konfliktu (Keane 2013).

V období druhé světové války (1938–1945) vyvinuli němečtí vědci jednoduché bezpilotní letadlo pojmenované jako V-1 „Buzzbomb“. Tento bezpilotní letoun byl schopný letět rychlostí až 400 mil za hodinu (643,7 km/h) ve výšce 1000 stop nad zemí (304,8 m). Letoun V-1 byl použitý při bombardování Londýna. Během války spadlo na Londýn 8892 těchto bomb a způsobili smrt více jak 6000 lidí (Cook 2007).

Po druhé světové válce výzkum bezpilotních systémů pokračoval a byl podporován především armádními sbory. V 50. letech 20. století chtěly armády vyvinout bezpilotní letoun, který bude dosahovat nadzvukové rychlosti. V roce 1956 americké armádní letectví vytvořilo první bezpilotní systém AQM-35, který byl schopný dosáhnout rychlosti Mach 1 (340,3 m/s). Jeho hlavním cílem byla obrana proti nadzvukovým letadlům. Dohromady bylo vyrobeno 25 letounů. Program tohoto bezpilotního systému byl ale pozastaven, protože byl letoun tak rychlý, že jej americký obranný systém nebyl schopný zaměřit (Palik, Máté 2019).

Další zásadní vývoj pro bezpilotní prostředky se odehrává v 70. letech 20. století. V této době byl hlavním výrobcem UAV stát Izrael. Vznikly 2 technologicky vyspělé drony „Mastiff“ a „Scout“, které byly schopné přenášet obraz v reálném čase. Tyto drony plnili především průzkumné mise, kdy sbírali informace o poloze a pohybu nepřátelských vojsk (Palik, Máté 2019).

V 80. letech vznikl dron „Pioneer“, který byl schopný letět sám předprogramovanou trasu a v případě potíží mohl pilot znovu převzít řízení. Tento dron vyvíjela znovu izraelská armáda, ale byl používán především americkým námořnictvem. Byl používán v období války v Perském zálivu (1990–1991) a účastnil se mnoha misí, z nichž nejznámější je například operace Pouštní bouře (Keane 2013).

Zhruba pro roce 2010 se drony začaly dostávat i do mimovojenských sfér. Příkladem může být zábavní průmysl, především kinematografie, kde místo helikoptér, či nepraktických jeřábů s kamerou začali používat bezpilotní letecké prostředky k točení jak akčních, tak dokumentárních scén. Jedním z prvních filmů, kde byl dron použit k natáčení scén byl například ve filmu Skyfall z roku 2012 (Zacharek 2018).

2.3 Legislativa v ČR

V České republice bylo možné do konce roku 2020 létat podle doplňku X, předpisu L 2 Úřadu pro civilní letectví. Od 31. 12. 2020 ovšem začala v ČR platit nová pravidla, která vychází z Prováděcího nařízení Komise (EU) 2019/947 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel. Dle nové legislativy se uvádí 3 kategorie provozu – otevřená, specifická a certifikovaná. Otevřená kategorie se dále dělí na dle provozních omezení na třídy A1(drony do 500 g vzletové hmotnosti), A2(drony do vzletové hmotnosti 2 kg) a A3(drony od 0,5 kg do 25 kg). Specifická kategorie je určena především k profesionální činnosti a jejich provozovatel musí vypracovat tzv. posouzení provozních rizik. Kategorie certifikovaná je specifická spíše pro budoucí využití dronu, kdy, se uvažuje nad přepravou osob, nebo zboží bezpilotním systémem. Pro používání leteckých prostředků je povinnost registrace provozovatele dronu u úřadu pro civilní letectví. Existuje výjimka z registrace, pokud vzletová váha dronu nepřekročí 250 g, nemá kameru nebo jiný senzor, případně, pokud se jedná o hračku (EU 2019).

2.4 Typy a kategorie bezpilotních leteckých prostředků

V současnosti se můžeme v praxi setkat se dvěma největšími skupinami bezpilotních leteckých prostředků – multikoptéry a letouny s pevným křídlem. Multikoptéry jsou letecké prostředky s více rotory. Patří sem kvadrokoptéry (4 rotory), hexakoptéry (6 rotorů) a oktokoptéry (8 rotorů). Právě počet ramen s rotory má vliv na celkové chování stroje (stabilita, spotřeba výkonu, rychlost, hbitost). Obecně lze říct, že koptéry s menším počtem vrtulí jsou méně stabilnější, ovšem spotřebují méně energie a jsou hbitější než koptéry s více rameny. Jak dron vypadá a z jakých částí se skládá můžeme zjistit na následujícím obrázku.

Na trhu se lze setkat s velkým množstvím různých typů koptér. Nejčastěji se vyskytují modely kvadrokoptér složené a připravené k letu (RTF–Ready to Fly) nebo jako stavebnice (ARF–Almost Ready to Fly). Výrobou těchto dronů se zabývá například firma DJI, která má v nabídce drony jak pro civilní (DJI Mavic 2 Pro), tak pro profesionální použití (DJI INSPIRE 2). V ČR se výrobou dronů pro civilní, vládní a vojenský sektor zabývá firma Primoco UAV s modelem UAV ONE 150 (Primocco UAV 2021).



Obrázek č. 1: DJI Mavic 2 Pro (Zdroj: <https://dronpro.cz/dji-mavic-2-pro>)

Druhý typ letounu s pevným křídlem je tvarem podobným letadlu (viz obrázek č. 2). Výrobou tohoto dronu se zabývá například společnost Sensefly. Jejich letouny řady eBee jsou navrženy pro velmi efektivní a přesné mapování terénu, s rozsáhlým pokrytím. Například stroj eBee X je schopný za pomoci korekčního signálu RTK dosáhnout absolutní přesnosti až na 3 cm bez pozemních vlíčovacích bodů. Z principu využití a především ceny těchto strojů se tyto drony s pevným křídlem nepoužívají v civilním sektoru pro zábavu, ale jako profesionální nástroje ve fotogrametrii, precizním zemědělství atd. (bezpilotne.cz 2021).



Obrázek č. 2: Sensefly eBee X (Zdroj: <https://bezpilotne.cz/sensefly-ebex/>)

Mimo společnost Sensefly se dronům s pevným křídlem také věnuje společnost Atmos a Wingtra. Produkty těchto společností jsou rovněž k použití především v profesionálním sektoru v oborech fotogrammetrie, stavitelství, či precizním zemědělství.

Nicméně i když výše zmíněné konstrukční typy letounu se mohou zdát jako logická, funkční a již ustálená, stále je možné s jejich konstrukčním potenciálem experimentovat. Budiž příkladem dron pocházející z University of Tokyo, DRAGON (Dual Rotor Embedded Multilink Robot with the Ability of Multi-Degree-of-Freedom Aerial Transformation). Tento bezpilotní prostředek je svou konstrukcí – dvourotorové moduly spojené pohyblivým kloubem – schopný za letu měnit svůj tvar. Tato schopnost, společně se senzory pro orientaci v prostoru, umožňuje dronu prolézat se složitými překážkami. Dalším možným příkladem jsou prostředky, které k pohybu využívají Coandova jevu, nebo odstředivé turbíny (Novák 2021).

Kromě rozdělení těchto strojů dle typu konstrukce můžeme jednotlivé drony rozdělovat do dalších kategorií například podle hmotnosti, účelu využití a způsobu pilotování.

2.4.1 Drony dle hmotnosti

Vzletová hmotnost bezpilotního prostředku je jedna z klíčových vlastností pro ovladatelnost, hbitost, rychlost, výdrž a cenu stroje. Tato veličina je zároveň ukotvena v legislativě konkrétně v prováděcím nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24.

května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel. Tato kategorie je uvedena především z důvodu evidence leteckých prostředků a pilotů. Dle legislativy (EU 2019) se dělí na následující kategorie:

- < 250 g
- < 900 g
- < 4 kg
- < 25 kg
- > 25 kg

2.4.2 Drony dle účelu využití

Jak již bylo zmíněno výše, letecké prostředky nachází využití v mnoha sektorech lidské činnosti, jež může zahrnovat stavitelství, výzkum, logistiku, kinematografii, zemědělství, či pouhou rekreační záležitost. Dle předpisů o používání bezpilotních prostředků dělíme drony na 4 kategorie:

- Rekreačně sportovní
- Výdělečné
- Experimentální
- Výzkumné

Toto dělení vychází již z neplatného Doplnku X, který byl před rokem 2021 předpisem o používání bezpilotních systémů v České republice. I když je tento dokument neplatný, je zmíněn z důvodu chybějící kategorizace v již platném Prováděcím nařízení Komise (EU) 2019/947 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel (Řízení letového provozu 2017).

2.4.3 Způsobu pilotování

Způsob pilotování z hlediska jak pilot „vidí“ dron. Tuto kategorii lze rozdělit na pohled okem ze stanoviště, ze kterého ovládá letecký model, či na pohled z kamery, která je součástí konstrukce dronu. Obraz kamery můžeme sledovat buď na ovladači s displejem, který přijímá signál z dronu (u mnoha rekreačních dronů je celkem běžné použití externího displeje skrze aplikaci v chytrém telefonu), nebo skrze FPV brýle (*First Person View*), které přijímají signál vysílaný dronem, který následně vidíme v displeji brýlí. V legislativě je dáno, že pilot (či poučený pozorovatel) musí mít model

bezpilotního prostředku stále na dohled, bez jakýchkoliv vizuálních pomůcek např. dalekohled (EU 2019).

2.5 Senzory

Senzor je nutná podmínka pro získávání obrazových dat z bezpilotních leteckých prostředků. Již výše byly rozděleny metody DPZ na aktivní a pasivní. Tyto metody jsou závislé na použitém senzoru. V následující kapitole budou blíže popsány jednotlivé pasivní senzory, které jsou v kontextu s touto diplomovou prací.

2.5.1 RGB senzory

Senzory RGB jsou schopné zachycovat snímky v pásmech elektromagnetického spektra zhruba od 400-700 nm, což je oblast viditelného spektra. Získaný snímek se tedy jeví v přirozených barvách, které lze rozpoznat i pouhým okem. Tyto kamery jsou oproti ostatním níže jmenovaným velmi cenově dostupné (Fingas, Brown 1997).

2.5.2 Multispektrální senzory

Multispektrální senzory jsou v současnosti hojně využívané senzory v mnoha oborech lidské činnosti. Jejich využití se nachází v environmentálních vědách, astrologii, zemědělství, lesnictví či medicíně. Multispektrální senzor sbírá spektrální data z více pásem elektromagnetického spektra. Mezi taková pásma lze zařadit například červené, zelené, modré, blízké infračervené (NIR) a RedEdge pásma. Protože je každý povrch jinak citlivý na odražené světlo, lze ze získaných dat pozorovat jednotlivé rozdíly v materiálech či pomocí jednoduchých matematických operací vypočítat různé vegetační indexy (Kelcey, Lucieer 2012).

2.5.3 Termální senzory

Dalším ze sensorů využitelných pro analýzy dálkového průzkumu je termální senzor. Tyto senzory měří tepelné vlastnosti jednotlivých objektů, což je skrze senzor konvertováno do viditelných obrazů. Tyto obrazy se nazývají termogramy. Senzory snímají termální infračervené pásma elektromagnetického spektra. Tyto senzory mají široké využití ve stavitelství, astronomii, medicíně a v poslední době také v zemědělství. V zemědělství se využití termografie zaměřuje především na plánování

zavlažování, detekci chorob a patogenů, hodnocení zralosti či na odhad výnosu (Ishimwe et al. 2014).

2.5.4 Hyperspektrální senzory

Posledním zmíněným typem senzorů jsou hyperspektrální senzory. Tyto senzory jsou uzpůsobené snímat data v stovkách až tisících různých pásem. Díky velkému množství spektrálních kanálů je možné zjistit detaily, které by například multispektrálnímu senzoru unikly. Oproti tomu je pak náročné zpracování takových dat skrze omezení výpočetních aplikací v reálném čase (Adão et al. 2017). Hyperspektrální senzory jsou použitelné v mnoha vědeckých odvětvích. Příkladem může být využití levné hyperspektrální technologie ke sledování zdravotního stavu vegetace (Näsi et al. 2015).

3 PRÁCE S DATY

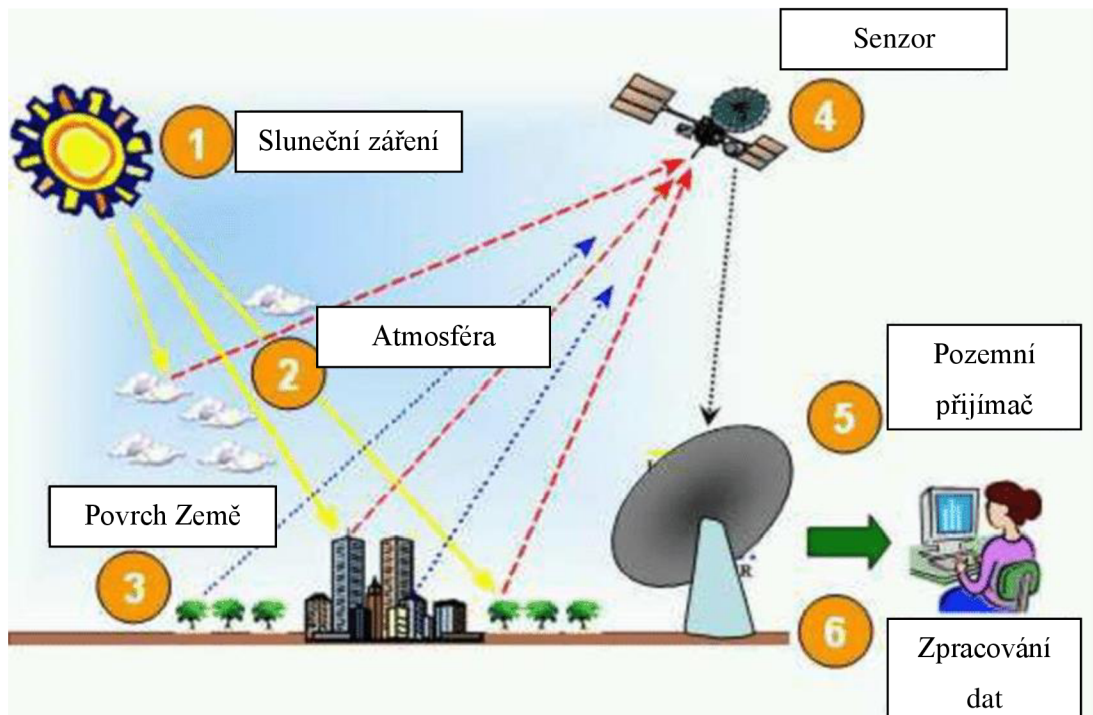
Dálkový průzkum není pouze o získávání informací, ale také o jejich zpracování a následné vyhodnocení a interpretaci výsledných dat. Hrubá data ze senzoru je dále nutné filtrovat či jinak upravovat, pro jejich správnou interpretaci. K jejich zpracování se využívají programy se specializovanými funkcemi, případně jejich kombinace.

3.1 Získávání dat

Pro získávání dat, která můžeme dále zpracovávat je nutné, aby letecký prostředek obsahoval také zařízení pro pořízení dat ať už pasivním, či aktivním způsobem. Pro získávání dat pasivním způsobem využíváme zařízení ve formě fotoaparátu, či kamery. Na trhu se lze setkat s různými typy pro různé využití a v různé cenové relaci.

Postup, jakým se získávají data (viz. Obrázek č. 3), přiblíží následující seznam.

1. Zdroj energie (pasivní nebo aktivní)
2. Přenos energie ze zdroje na povrch Země či objektu
3. Interakce s povrchem Země či objektu
4. Přenos energie k senzoru
5. Výstup dat



Obrázek č. 3: Proces získávání dat dálkovým průzkumem (Zdroj: https://www.researchgate.net/profile/Deepak-Soni-4/publication/328233099/figure/fig2/AS:680847137046529@1539338015540/Remote-Sensing-Process_W640.jpg); přeloženo autorem

3.2 Předzpracování dat

Na základě přijatých dat je zrekonstruován obraz. Tento obraz se skládá z jednotlivých pixelů, kdy každý pixel obsahuje diskretní hodnotu z konečného intervalu od 0 do 255. Tento interval se v získaných datech zaznamenává ve stupních šedi. Pixel značí relativní intenzitu signálu, kdy menší hodnota odraženého signálu má tmavší odstíny šedi a vysoká intenzita signálu má světlé až bílé odstíny šedi. Velikost těchto pixelů je závislá na rozlišovací schopnosti systému DPZ. Ve vědách dálkového průzkumu ovšem pracujeme s různými typy rozlišení. Výše zmíněné rozlišení dle velikosti pixelu se označuje jako prostorové rozlišení. Dále rozeznáváme rozlišení radiometrické (schopnost systému rozlišit mezi objekty podobné odrazivosti), spektrální (počet spektrálních pásem, ve kterých snímá daný senzor) a časové (frekvence s jakou je snímáno určité území (Kropáček 2020).

Jedním z prvních postupů zpracování dat je digitální fotogrammetrie. Cílem je sestavení jednotlivých snímků vedle sebe a vytvořit scelenou mozaiku (v literatuře také uváděná jako ortomozaika) většího území, které se na jeden snímek při určitém prostorovém rozlišení nevejde. Pro vytvoření takové mozaiky je nutné stanovit vnitřní

a vnější orientaci každého snímku. Pro přesné lícování snímků je žádoucí na snímkovanou oblast umístit vlíčovací body. Tyto body jsou na zdrojovém snímku jasně identifikovatelné a polohopisně a výškopisně zaměřené. Zaměření výšky je nutné pro vytvoření digitálního modelu povrchu. Pro zpřesnění je vhodné, aby se vlíčovací body nacházely na překryvu více snímků. Tento základní postup je možné zpracovat v programech GIS (feature matching), či ve specifických fotogrammetrických aplikacích, ať placených (Agisoft Metashape), nebo open source (Meshroom) programech (Kropáček 2020).

3.3 Zvýraznění obrazu

Dalším krokem je vylepšení získaného obrazu tak, aby se zvýšilo vizuální odlišení mezi jednotlivými prvky obrazu. Pokud máme panchromatický obraz, je možné toto vizuální odlišení provádět například pomocí rozdělení obrazu dle úrovně šedi, manipulací s kontrastem, filtry či zvýrazněním hran. Při snímku, který obsahuje informace z více pásem je možné vypočítat vegetační indexy (Halounová 2005).

Vegetační indexy byly vyvinuty pro aplikaci ve vědách dálkového průzkumu pro kvalitativní i kvantitativní vyhodnocení vegetačního krytu použitím spektrálních pásem. Do roku 1995 bylo vyvinuto přes 40 různých vegetačních indexů, pro co nejpřesnější vyhodnocení zkoumaného jevu. Vegetační indexy se získávají jednoduchými matematickými operacemi mezi různými kombinacemi spektrálních pásem (Bannari et al. 1995).

Jeden z nejpopulárnějších vegetačních indexů se nazývá Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), který se používá k rozpoznávání vegetace a k určení jejího zdravotního stavu. Byl to jeden z prvních produktů k zjednodušení komplexních multispektrálních obrazů. Pro výpočet NDVI se používají pásma blízkého infračerveného a červeného záření dle rovnice č. 1. Index dosahuje hodnot od -1 do 1 (Dobrovolný 1998). Obecně lze říct že záporné hodnoty vymezují vodní plochy, písek, či betonová tělesa. Kladné hodnoty pak vykazují různou vegetaci od travních porostů po lesy. V literatuře je také zaznamenána chyba označená jako „saturation phenomenon“. To znamená že za určitých atmosférických podmínek a sytosti barev nerozeznává jednotlivé plochy vegetace rozdílně od sebe. Může se tedy stát, že hodnoty NDVI například u lesních porostů a travních porostů budou velmi podobné (Huang et al. 2020).

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

Rovnice 1: Normalized difference vegetation index

Další příklady vegetačních indexů jsou uvedeny v následující tabulce číslo jedna.

Tabulka 1: Příklady vegetačních indexů

Celý název	Zkratka
Greenness index	GI
Normalized Difference Water Index	NDWI
Normalized Difference RedEdge	NDVire
RedEdge NDVI	NDRE
Leaf Water Content Index	LWCI
Disease Water Stress Index	DSWI
Respiratory Disturbance Index	RDI

3.4 Klasifikace dat

Po vytvoření ortomozaiky ze snímků je důležité klasifikovat data. To znamená, že v těchto datech musíme najít podobné prvky a ty seskupit do určitých skupin či kategorií. Těmto kategoriím bude poté přiřazen jejich informační význam. Klasifikaci obrazu můžeme rozdělit na řízenou a neřízenou, z čehož řízenou klasifikaci dále dělíme na objektovou, nebo pixelovou (Halounová 2005).

3.4.1 Neřízená klasifikace

Neřízená klasifikace je proces, při kterém každý pixel na daném obraze zařazen do určité kategorie, bez použití tréninkových vzorků. Pixely na obraze agreguje do skupin na základě jejich tendence vytvářet shluky. Tato klasifikace závisí algoritmech strojového učení. V případě obrazových dat je cílem, aby došlo k přirozenému statistickému seskupení na základě spektrální podobnosti a aby se rozlišení klasifikovaných objektů při dalších iteracích výrazně neměnilo. Klasifikace probíhají dle různých algoritmů, které si rozepíšeme dále (Olaode et al. 2014).

Jedním z neřízených přístupů je například klasifikace K-means. Tento algoritmus potřebuje zadat pouze počet shluků. Algoritmus sám vygeneruje polohu středů jejich rovnoměrným rozmístěním v prostoru a poté je každý pixel klasifikován

do shluku, k jehož průměrovému vektoru má nejbližší. Tento proces se dále opakuje určitým počtem iterací. Zájmem je, aby každá další iterace se příliš neměnila od té předešlé (Dobrovolný 2008).

Další možnou klasifikací je dle algoritmu ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis). Tento algoritmus funguje na podobném principu jako algoritmus K-means. Její rozdíl spočívá v tom, že umožňuje počet shluků automaticky během iterace upravit jejich spojením či rozdělením (Abbas et al. 2016).

3.4.2 Řízená klasifikace

Při řízené klasifikaci vytváříme na analyzovaném obrazu trénovací polygony, kterým následně určíme jejich třídu. Tyto třídy bývají rozděleny podle spektrální odlišnosti. Kvalita trénovacího procesu určuje úspěšnost kvalifikace. Je žádoucí, aby analytik, který s těmito daty pracuje, byl dobře seznámen s daným geografickým prostředím, aby mohl vytvářet precizní data. Stejně jako u neřízené klasifikace je i zde několik algoritmů, podle nichž probíhají řízené klasifikace (Lillesand 2004).

Klasifikace maximum likelihood pracuje na principu přiřazení pixelu do určité třídy dle pravděpodobnosti příslušnosti k dané třídě, jejíž průměr a kovariance jsou modelovány tak, že tvoří normální rozdělení (Sisodia et al. 2014)

Další možnou klasifikací je metoda minimum distance. Všechny pixely na obraze jsou klasifikovány podle střední hodnoty tréninkové třídy, ke které mají nejbližší. Tato metoda počítá vektor pro každou třídu a dále počítá Euklidickou vzdálenost od každého pixelu ke střední hodnotě vektoru jednotlivých tříd (Abinaya 2019).

Objektová klasifikace (object-based, OBIA) je typ klasifikace, která jednotlivé pixely sjednotí na základě jejich tvaru, spektrálních charakteristik a textury. Tato klasifikace je vhodná především pro data s velkým prostorovým rozlišením (GISGeography 2021).

Pro praktickou část diplomové práce byla zvolena metoda Random forest. Tato metoda používá neparametrický algoritmus strojového učení, který používá kombinaci více klasifikátorů rozhodovacích stromů (decision trees). Tato metoda se vyznačuje vysokou klasifikační přesností a flexibilitou z hlediska využití pro různé statistické analýzy – regrese, řízená i neřízená klasifikace (Cutler et al. 2007). Pro její využití

postačuje pouze pár parametrů jako počet stromů (N_{trees}) a počet predikčních prvků (m) (Ballanti et al. 2016).

4 EKOLOGIE LÝKOŽROUTA SMRKOVÉHO (*IPS TYPOGRAPHUS*, *L.*)

Lýkožrout smrkový je jedním z nejvýznamnějších škůdců jehličnatých porostů zejména ve střední, severní a východní části Evropy. V této kapitole přiblížíme taxonomii a biologii lýkožrouta, jeho nároky na prostředí, a především, čím je lýkožrout nebezpečný pro člověka a životní prostředí.

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*, L.), v běžné hovorové mluvě také známý jako kůrovec, je řádem brouk (Coleoptera) z čeledi kůrovcovitých (*Scolytidae*). Jeho taxonomické určení prodělalo v minulosti mnoho změn. K této čeledi v současnosti náleží více než 5000 druhů. Z toho na území ČR bylo zjištěno až 106 druhů z této čeledi. Lýkožrout smrkový je lesklý, hnědočerný brouk s válcovitým tělem, dlouhým mezi 4,2 – 5,5 mm. Na zadní části krovek má čtyři ozubené hrbolky. Po celém obvodu těla je brouk světle žlutě ochlupený. Pohlavní dimorfismus u jedinců lýkožrouta nelze, alespoň podle vnějších znaků, jasně rozlišit (Zumr 1995).

Vajíčka lýkožrouta jsou oválná, lesklá a bílá. V průměru jsou 0,6-1,0 mm dlouhá. Larvy jsou beznohé, po čerstvém vylíhnutí jsou zhruba 2 mm dlouhé. Kukla je dlouhá okolo 5-6 mm. Je dlouhá, bílá a na zadní části má dva krátké trny (Zahradník, Knížek 2019).

V běžném koloběhu, kdy je populace brouků malá, se lýkožrout živí především dřevem mrtvých stromů (dříví po těžbě, nebo stromy poničené vlivem disturbance). Jeho larvy se po vylíhnutí živí převážně lýkem v místech, kde se vylíhnuli. Požíráním lýka budují tzv. larvální chodbičky směrem od matečných chodeb (Hlásný et. al. 2019).

4.1 Způsob života a rozmnožování

V období zimy kůrovec v dospělém stádiovém cyklu hibernuje poblíž místa, odkud se vyrojil. Zimu přečkává pod kůrou stromů, nebo zahrabaný v zemi. Je schopný tolerovat velmi nízké teploty až k -30°C (Christiannsen 1988).

Rozmnožování a fertilita lýkožrouta je velmi závislá na teplotě okolí. Vzhledem k našemu podnebí a nízkým polohám dřevin má lýkožrout nejčastěji dvě generace do roka (jarní a letní rojení). Ve vyšších nadmořských polohách má do roka pouze 1 generaci. Jarní rojení začíná běžně mezi dubnem a květnem, kdy se teplota vzduchu blíží k 20°C. Ve vyšších oblastech začíná až o měsíc později. Letní rojení probíhá někdy od poloviny června do počátku srpna. Výjimečně může přijít i třetí rojení, které následuje na přelomu srpna a září. Po jarním rojení, za 2–3 týdny nastává tzv. sesterské rojení. Toto rojení je specifické tím, že dochází k přerojování samic na stejný či na jiný strom. Stává se tak, když je jeden strom napaden velkým počtem brouků. Samička tedy pokračuje v kladení vajíček na jiném místě, než kde začala. (Zahradník, Knížek 2007).

V období rozmnožování proniká dospělý samec lýkožrouta smrkového pod kůru stromu do lýka, kde vytvoří snubní komůrku. Pro komunikaci s opačným pohlavím produkuje agregační feromon složený z organických látek cis-Verbenolu, dimethyltributedinolu a malého množství Ipsdienolu. Zejména druhá jmenovaná látka je pro zkoumaný druh lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) specifická. Po přivábení samičky do snubní komůrky začnou samci produkovat další feromony, které mají antiagregační funkci verbenon a ipsenol, čímž si vymezují vlastní teritorium a regulují obyvatelnost komůrky (Christiannsen 1988).

4.2 Prostředí lýkožrouta

Lýkožrout je velmi důležitou složkou v oblastech přirozených lesních ekosystémů. Živí se především lýkem a dřevem smrku ztepilého (*Picea abies*), jehož areál se nachází oblastech střední Evropy (ČR, Německo, Slovensko), severní Evropy (Norsko, Švédsko, Finsko) a severní částí Ruska.

Smrk ztepilý (*Picea abies*) je v Evropě a západní Asii původní, nahosemenný, horský strom. Přirozeně se vyskytuje v nadmořských výškách nad 1100 m n. m. V nižších polohách byl přirozenou součástí rašelinišť, či údolí s teplotní inverzí. Tento druh se dorůstá výšky až 50 m a dožívá se 300-400 let. Má pyramidální pravidelně přeslenitou korunu. Větvení pravidelně přeslenité, vztyčené, či mírně ohnuté k zemi. Jehlice jsou radiálně uspořádané tmavě zelené, do 2 cm délky. Na stromě vytrvávají 6-9 let. Patří do čeledi borovicovitých (Musil, Hamerník 2003).

Smrk ztepilý je hlavní hospodářskou dřevinou lesů v ČR. Vlivem lesního hospodářství byl pro jeho ekonomickou hodnotu rozšířen na nepůvodní lokality, kde i v současnosti tvoří rozsáhlé monokultury. Přirozeně je smrk vázán na území s dostatečným zásobením vodou a v prostředí společenstev, ve kterých je schopný prosadit svou růstovou strategii. Nedostatek vody u smrku vyvolává stres, který zvyšuje riziko napadení biotickým škůdcem. Smrk je také ohrožen silným větrem, kvůli mělkému kořenovému systému (Tesař 2008). Jako hlavní hospodářská dřevina lesů v ČR je smrk k roku 2020 zastoupen na ploše 1 274 241 hektarů, což je 48,8 % z celkové druhové skladby lesů v ČR. Oproti roku 2000 byla plocha smrkových porostů snížena o 5,3 % na úkor hlavně listnatých dřevin, především buku a dubu (MZe 2020).

V ČR je smrk ztepilý skloňován především v souvislosti s monokulturními porosty. Monokultury smrků byly pěstovány začátkem 19. století z důvodu prudkého rozvoje průmyslu. Bylo potřeba mnoho dřeva na palivo, výstavbu, či na technický materiál a smrk byl díky rychlému růstu a vysoké objemové produkci dřeva určen jako vhodná dřevina pro dané účely. První generace monokulturních smrků měla ještě k dispozici kvalitní lesní půdu po přirozených lesních (zejména listnatých) porostech a výsledky objemové produkce byly velmi uspokojivé. Toto zjištění velmi přispělo k podpoře pěstování smrkových monokultur. Tento způsob ale rozrušil přirozenou strukturu, provzdušnění a retenční kapacitu lesní půdy. Dalším negativním dopadem bylo zanedbání využívání semen z místních podmínek, čímž došlo ke zničení domácích stanovištních ekotypů dřevin. To bylo způsobeno obchodem se semeny, která byla vykupována za levnější ceny z různých specializovaných luštíren a semenářských velkozávodů z různých koutů Evropy. Jak bylo zmíněno v předešlém odstavci, smrky mají mělký kořenový systém. Téměř od počátku pěstování monokultur byly smrky poškozovány větrnými polomy. Na příkladu záznamů z let 1821 a 1833 bylo v Jeseníkách evidováno zničených 442 000 m³ dřevního materiálu. Téměř po každé větrné kalamitě přichází kalamita kůrovcová (Mohelský 2019).

4.3 Přirození nepřátelé lýkožrouta

Lýkožrout smrkový má mnoho přirozených nepřátel. Mohou to být predátoři, paraziti, různé patogenní organismy, nebo také samotný obranný mechanismus stromu. Kůrovce napadají v různých fázích jeho vývojového cyklu. Mezi zásadní predátory

kůrovce z řad hmyzu patří například pestrokrovečník mravenčí (*Thanasimus formicarius*, L.) z čeledi pestrokrovečnickovitých nebo drabčík (*Nudobius lentus*). Další druhy hmyzu loví kůrovce příležitostně, pokud je zrovna dostupnou potravou. Takovými druhy mohou být například různé vosy, či různí střevlíci a mravenci. Z řad predátorů nelze opomenout ani ptáky, kterými jsou zejména šplhavci jako datel černý (*Dryocopus martius*) nebo strakapoud velký (*Dendrocopos major*). Z parazitických škůdců můžeme jmenovat například lumčíky (*Braconidae*) nebo roztoče (např. *Uropoda polytricha*) a hlístice (např. *Parasotiphelenchus typographi*). Z řady patogenních organismů můžeme jmenovat mikroorganismy hromadinky (*Gragarina typographi*) nebo haplosporidie (*Haplosporidium typographi*). Mimo organismy, které je přímo ohrožují na bytí mohou být lýkožrouti také ohroženi konkurencí jiných druhů, specializujících se na ten samý potravní zdroj (Zahradník, Knížek 2007).

Stromy mají také možnost se proti útoku lýkožrouta bránit svými chemickými a fyziologickými obrannými mechanismy. Příkladem může být produkce toxických látek v místě napadení kůrovcem, které jsou schopny usmrtit jak dospělé kůrovce, tak jejich larvy a houbovité symbionty. Vzhledem k této schopnosti zdravých stromů je pro kůrovce strategické útočit především na mrtvé či odumírající jedince (Hlásný et. al. 2019).

4.4 Ohrožení lýkožroutem

Jak bylo zmíněno výše, lýkožrout je důležitým prostředkem přirozené disturbance v smrkových lesích. Jeho vliv je pro les zdravý a užitečný. Problém nastává při přemnožení druhu v areálu lesního ekosystému. Kůrovec začíná napadat i zdravé jedince, které svým zásahem do vodivých pletiv usmrtí. I když se lýkožrout smrkový obvykle vyvíjí především na smrku ztepilém, byly zaznamenány případy, kdy lýkožrout napadl i modřín opadavý a velmi vzácně také borovici lesní (Zahradník, Knížek 2007).

Lýkožrout nejčastěji napadá smrkové porosty nad 60 let, především na osluněných porostních stěnách. Ve vnitřním prostředí lesa se vyskytuje zejména v místech s nižším zakmeněním nebo za gradace. Lýkožrout smrkový nenapadá tenké části kmene (cca pod 10 cm) (Zahradník, Knížek 2007).

4.5 Prevence a obranná opatření

Obecně by měla ochranná opatření mít hlavně preventivní charakter, aby se předcházelo vzniku kalamit. Takovými opatřeními se rozumí například včasné zpracování veškerého dříví vhodného pro vývoj a množení kůrovce (např. polomové dříví) a včasné odstranění veškerého infikovaného dříví, kdy je lýkožrout stále v larválním stadiu (Hlásný et al. 2019).

Jako jeden z příkladů prevence invazivnější metodou je například očkování smrků pomocí houby *Ceratocystis polonica*. U této metody je nepravděpodobné její využití v lesním hospodářství, ovšem pro alespoň částečnou ochranu cenných dřevin, které jsou lýkožroutem ohrožené, má daná metoda potenciál (Christiansen, Krokene 1999).

4.6 Legislativa

V případě poškození lesů kůrovcem, je možné využít program „Finanční příspěvek na zmírnění dopadů kůrovcové kalamity v lesích“. Jde o dotaci pro vlastníky lesů, či osoby s právy a povinnostmi vlastníka lesa, kterou zprostředkovává ministerstvo zemědělství. V roce 2021 činil příspěvek na dřevo poškozené kůrovcem 383 Kč/m³ (MZe 2021).

5 VÝVOJ SLEDOVÁNÍ LÝKOŽROUTA POMOCÍ METOD DPZ

V České republice se sledováním kůrovce pomocí metod DPZ věnuje mnoho akademických i soukromých subjektů. Příkladem mohou uvést Přírodovědeckou fakultu Univerzity Karlovy a její projekt „Monitoring šíření kůrovce v pražských lesích“ jenž měl za cíl testovat potenciál pokročilých technologií DPZ pro monitoring a vyhodnocení dynamiky šíření lýkožrouta na lesních pozemcích hl. města Prahy. Tento projekt byl řešen v letech 2018–2019 (UK 2022).

Dalším příkladem budiž projekt „kůrovec“ fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze. Tento projekt je řešen na třech úrovních:

1. Precizní detekce jednotlivých stromů pomocí UAV
2. Popisu dlouhodobé časoprostorové dynamiky šíření škůdce prostorem
3. Extrapolaci archivních a aktuálních dat pro následnou predikci šíření

V rámci tohoto projektu vyšla rovněž metodika pro využití bezpilotních systémů pro detekci napadených stromů. Tato metodika byla certifikována Ministerstvem zemědělství ČR (ČZU 2022).

Před začátkem výzkumu diplomové práce bylo nutné udělat literární rešerši dosavadní práce různých výzkumníků v oblasti detekce napadených stromů kůrovcem pomocí metod dálkového průzkumu Země. V následujících odstavcích je pár vybraných prací přiblíženo.

1. **The effects of bark beetle stress on the foliar spectral reflectance of lodgepole pine - F.J. Ahern, 1988:** Tato práce se zabývá vlastnostmi listové odrazivosti stromů borovice pokroucené (*lodgepole pine tree – Pinus contorta*). Cílem této práce také bylo identifikovat spektrální oblasti vykazující nejdřívejší známky napadení lýkožroutem. Výrazné známky napadení byly interpretovány vizuálně. Studie byla prováděna na severu provincie Britské Kolumbie v Kanadě. Ty jemnější byly studovány analýzou rozptylových

metod. V rámci práce byly identifikovány tři spektrální pásma (zelené, RedEdge a NIR-shoulder region) jako nejslibnější pro detekci raného napadení kůrovcem. Tři další měřená pásma (modré, červené a NIR – plateau region) jsou označena jako referenční pásma pro účely kalibrace a srovnání. Rozdíl v odrazivosti listů mezi zdravým a napadeným jedincem je nejzřetelnější ve viditelné a RedEdge oblasti spektra.

2. **Use of multispectral UAV photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics – Minařík et al., 2016:** Tato práce pojednává o využití multispektrálních dat z bezpilotních leteckých prostředků k prostorovému a kvalitativnímu hodnocení lesních disturbancí. Pro výzkum byla využita multispektrální data s vysokým rozlišením, pořízena senzorem Tetracam Micro Multiple Camera Array. Studie byla prováděna v oblasti Šumavy na hranicích České republiky a Německa. Tato oblast je výskytem lýkožrouta dlouhodobě postižena. V rámci studie bylo pořízeno 200 multispektrálních fotografií, které byly následně georeferencovány a sceleny do ortofotomozaiky. Dále byla v programu agisoft photoscan vytvořena 3d rekonstrukce zájmové oblasti a vytvořena digitální mapa povrchu. Nejinformativnější spektrální pásma pro detekci disturbance způsobenou kůrovcem byly pásma 2 (650nm), 3 (700nm) a pásmo 4 (800nm) z RedEdge a NIR části spektra. V práci byly dále počítány různé spektrální indexy, kdy pouze 3 indexy vykazovaly správné výsledky detekce rozdílných lesních disturbancí. Šlo o indexy NDVI, Simple 800/650 Ratio Pigment specific simple ratio B1 a RE index.
3. **The Use of UAV Mounted Sensors for Precise Detection of Bark Beetle Infestation – Klouček et al., 2019b:** Tato práce se zabývá použitím levné RGB kamery s upraveným infračerveným (NIR) senzorem k detekci lýkožrouta smrkového. Studie byla prováděna v bezzásahové severní části KRNaPu, kde je oproti hospodářským, monokulturním lesům šíření lýkožrouta smrkového pomalé. Z dat nasnímaných upravenou kamerou Lumix TZ7 byla vytvořena ortofotomozaika, která byla následně radiometricky zkalibrována kvůli odrazivosti povrchu. V rámci detekce kůrovce bylo spočítáno 5 různých vegetačních indexů (Simple Ratio, Greenness Index,

Green Ration Vegetation Index, Normalized Difference Vegetation Index, Green Normalized Difference Vegetation Index) a vytvořena klasifikace dle napadených a zdravých stromů ve čtyřech časových obdobích pomocí maximum likelihood klasifikátoru. Výsledky prokázali, že je možné použít nízkonákladový senzor pro detekci aktivity lýkožrouta. Nejlepší výsledky byly získány s Greenness Indexem (GI), jehož celková přesnost dosahovala hodnot od 78 % do 96 % skrze měřené časové období. Výsledky indexů založené na pásmu NIR byly nižší.

- 4. European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties – Abdullah et al. 2018:** Tato práce se zabývá včasnou detekcí lýkožrouta smrkového čili ještě před vizuálními projevy stresu z napadení kůrovcem. Toto období se v literatuře nazývá jako zelená fáze (anglicky „green attack“). Očekává se, že napadení kůrovcem v této fázi ovlivní fyziologický a chemický stav dřevin, proto je v této studii zkoumána včasná detekce především skrze spektrální vlastnosti listů (400-2000 nm). Tato studie byla prováděna v Národním parku Bavorský les v Německu. Během roku 2015 odebrali vzorky listů ze 120 zdravých stromů a 120 jehlic ze stromů v zelené fázi napadení. Spektrální vlastnosti listů byly měřeny pomocí polního spektrometru ASD FieldSpec3. Nejvýraznější rozdíly mezi zdravými a infikovanými vzorky listů byly pozorovány v oblastech NIR a SWIR mezi 730 a 1370 nm. Dále byly zjištěny rozdíly v biochemickém složení listů zdravých a infikovaných jedinců, především v koncentraci dusíku a chlorofylu.
- 5. Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands – Brovkina et al., 2018:** Tato studie prozkoumává potenciál využití bezpilotních leteckých prostředků a analýz z oborů dálkového průzkumu pro monitoring zdraví norských smrků v postižených lesích. Hlavními cíli bylo:
 - otestování využitelnosti UAV zařízení pro získání dat viditelného a blízkého infračerveného záření a geometrických dat pro vytvoření rastru bodového mračka (PDC)

- prozkoumání vztahu mezi daty pořízenými z UAV a daty pořízenými odběrem vzorků z terénu
- Prozkoumat možnost kvalitativní klasifikace zdravotního stavu smrku skrze indikátory

Pro separaci jednotlivých druhů stromů byla použita metoda spektrálních vegetačních indexů NDVI a PDC. Zároveň tato analýza rozdělila stromy na živé a mrtvé. Analýza indexem NDVI byla schopna identifikovat přítomnost klíčových ukazatelů zdravotního stavu smrku, jako je mechanické poškození stonku, nebo ronění pryskyřice, které je spojené s napadením houbami.

6. Potential of multispectral imaging technology for assessment coniferous forests bitten by a bark beetle in Central Bulgaria – Stoyanova et al., 2018:

Tato práce se zabývá využitím multispektrální kamery na bezpilotním prostředku pro získání dat a mapování velkých území a jejího potenciálu pro hodnocení dopadů dřevin poškozených kůrovcem. Získaná data z multispektrální kamery dovolila vytvoření mnoha map s různými indexy zkoumané vegetace z míst těžce přístupných. Studie byla prováděna v lesích v okolí města Kalofer v Bulharsku. Tyto lesy prošli lesníci a identifikovali místa výskytu kůrovce. V rámci studie byl používán spektrální index NDVI, který v rozmezí 0,7 – 0,95 charakterizuje zdravý strom a pod hodnotou 0,65 strom, který je napadený. V silně poškozených oblastech se NDVI index pohybuje v rozmezí 0,45 – 0,5. Tímto rozříděním lze ohodnotit různé stupně ohrožení. Zdravá vegetace má v NIR vyšší odrazivost než vegetace napadená kůrovcem. Zároveň se zjistilo, že stres ve vegetaci vedl k poklesu fotosynteticky aktivních pigmentů.

7. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographu*, L.) compared with Landsat-8 – Abdullah et al., 2019:

Tato práce se zabývá zhodnocením schopnosti spektrálních vegetačních indexů extrahovaných ze snímků družic Landsat-8 a Sentinel-2 ke zmapování kůrovcem napadených stromů v zelené fázi. Oblast studie se nachází v Národním parku Bavorský les v Německu. V této práci bylo zjištěno, že většina spektrálních vegetačních indexů počítaná z dat družice Sentinel-2 byla

schopná rozlišit zdravého jedince od jedince napadeného. Konkrétně šlo o indexy RedEdge NDRE 2 a NDRE 3 a indexy vázané na vodu (SR-SWIR, NDWI, DSWI, LWCI) pracující především s pásmem SWIR (short wave infrared – krátkovlnné infračervené). Data z družice Landsat-8 byla schopná rozlišit zdravý strom od napadeného pouze skrze indexy vázané na vodu (NDWI, DSWI a RDI). Zároveň bylo možné stanovit, že zásoba chlorofylu a vody v listech byla významně vyšší ve zdravých stromech nežli v napadených stromech. Výsledky z družic byly dále porovnávány s výsledky, získanými ze senzoru bezpilotního leteckého prostředku. Lze říct, že data z družice Sentinel-2 (67% přesnost pixelů identifikovaných jako napadený) byly přesnější než z družice Landsat-8 (36 %).

6 METODIKA

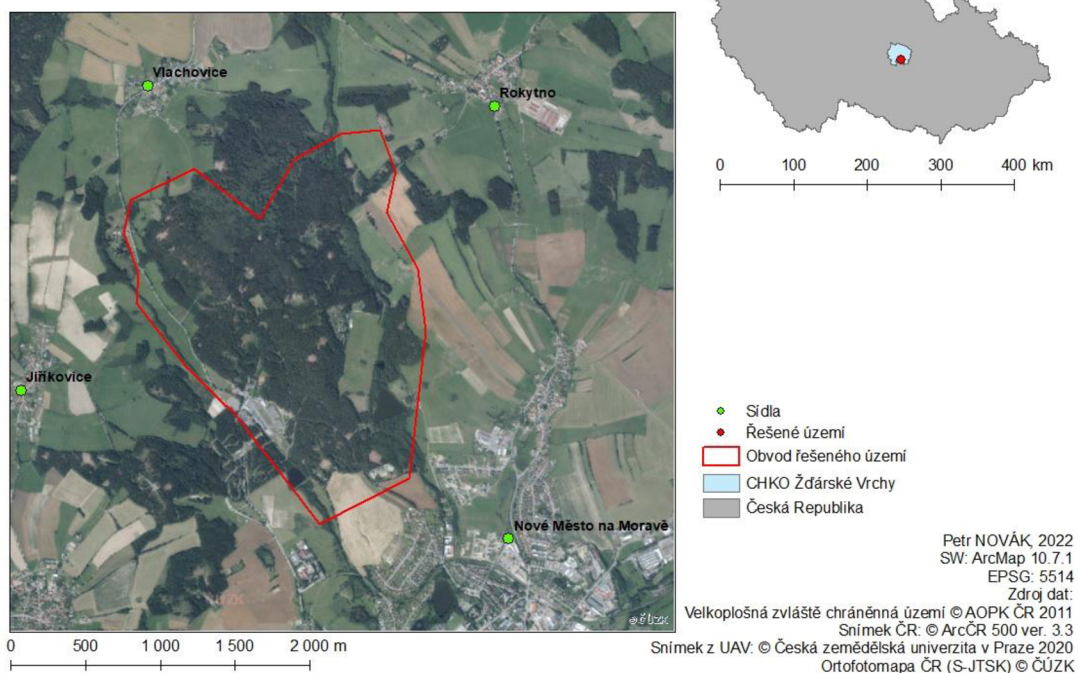
Tato kapitola bude zaměřena na jednotlivé postupy výzkumu předkládané diplomové práce. V první části bude popsáno řešené území a jeho přírodní poměry. V následující části bude popis techniky využití k získání dat a popis doplňkových dat z internetových zdrojů. V poslední části bude znázorněn postup zpracování dat.

6.1 Popis zájmového území

Zájmová oblast se nachází v katastrálním území Nového Města na Moravě (viz. Obrázek č. 4). Nové Město na Moravě je město, nacházející se v okrese Žďár nad Sázavou v kraji Vysočina. Řešené území je lesním pozemkem. Řešená oblast leží na jižní části CHKO Žďárské Vrchy.

Poloha řešeného území

v rámci České republiky



Obrázek č. 4: Poloha zájmového území (Zdroj: autor)

6.1.1 Přírodní poměry – Geologie a pedologie

Podloží zájmové oblasti je tvořeno silimaniticko-biotitickými migmatitizovanými a granitizovanými pararulami, v nichž jsou obsaženy minerály amfibolitů, serpentinitů

a krystalických vápenců. Tato oblast náleží ke stráženeckému moldanubiku. Ráz oblasti byl formován ve starším kvartéru mrazovým zvětráváním skalních masivů (AOPK 2022a). Hlavním půdním typem na řešeném území jsou kambizemě. Ostrůvkovitě jsou v okolí Žďárských Vrchů zastoupeny litozemě, regozemě či pararendziny. Místa se na řešeném území vyskytují také oglejené půdy (AOPK 2022b). Geomorfologické členění řešeného území je uvedené v následujícím bodovém seznamu (AOPK 2022c).

- Systém Hercynský
- Provincie Česká vysočina
- Subprovincie Česko-moravská soustava
- Oblast Českomoravská vrchovina
- Celek Hornosvratecká vrchovina
- Podcelek Žďárské vrchy
- Okrsek Devítiskalská vrchovina

6.1.2 Přírodní poměry – Klima

Dle Quitta leží celé území v chladné oblasti CH7. Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 6,8 °C až 5 °C. Průměrný roční úhrn srážek se pohybuje mezi 650-875 mm. V okolí se běžně vytvářejí teplotní inverze (AOPK 2022d).

6.1.3 Přírodní poměry – Hydrologie

Řešené území spadá do hydrologického povodí druhého řádu Svratka po Jihlavu. Územím také protéká řeka Bobrůvka a nejmenovaný potok. V okolí se rovněž vyskytuje mnoho vodních nádrží (VÚV TGM 2015).

6.1.4 Přírodní poměry – Lesnictví a zemědělství

V lesích dominují zejména kulturní smrčiny. Vyskytuje se zde jen 5. jedlovo-bukový vegetační stupeň s typickou hercynskou biotou. Na částech území jsou zachovány zbytky původního bukového lesa a blatkové rašeliniště. Mnoho luk bylo devastováno melioracemi a vzhledem k nadmořské výšce má zde značné zastoupení zemědělská půda (Culek 2013). V dřevinné skladbě potenciálně přirozené vegetace převládá buk lesní a jedle bělokorá. Smrk ztepilý byl zastoupen především na minerálně chudých a

podmáčených stanovištích. Mimo poškození dřeva lýkožroutem byla velká část porostů poškozena ohryzem a okusem přemnoženou jelení zvěří (AOPK 2022e).

6.1.5 Přírodní poměry – Fauna a Flóra

Pro dané území jsou typické lesní vegetace vyšších poloh, zejména acidofilní smrkové bučin. Jejich dřevinnou skladbu tvoří buk lesní (*Fagus sylvatica*), smrk ztepilý (*Picea abies*) a jedle bělokorá (*Abies alba*). Z nižších bylin je zde možné nalézt sedmikvítek evropský (*Trientalis europaea*), plavuň pučivá (*Lycopodium annotinum*), nebo ptačinec dlouholistý (*Stellaria longifolia*). Dle fytogeografického členění patří daná oblast do obvodu České oreofytikum (AOPK 2022f). Z významných druhů nacházejících se na zájmovém území můžeme jmenovat ježka západního (*Erinaceus europaeus*), čápa černého (*Ciconia nigra*), mloka skvrnitého (*Salamandra salamandra*) nebo mihuli potoční (*Lampetra planeri*) (AOPK 2022g).

6.1.6 Přírodní poměry – Ochrana přírody

CHKO Žďárské vrchy byla vyhlášena v roce 1970. Do roku 2013 zde bylo 45 maloplošných zvláště chráněných území. K těm hlavním můžeme jmenovat například NPR Žákova hora, NPR Ransko, či PP Pernovka, které přímo zasahuje do řešené oblasti (Culek 2013). Do současnosti se počet maloplošných zvláště chráněných území zvýšil na 51 (AOPK 2022h).

6.2 Pořízení a úprava dat

Tato kapitola obsahuje údaje o použitém senzoru a nosiči, které byly využité k pořízení dále klasifikovaných dat.

6.2.1 Senzor

Pro zpracování diplomové práce byl použit senzor MicaSense RedEdge-MX. Jde o multispektrální senzor, který snímá data v modrém (475 nm), zeleném (560 nm), červeném (668 nm), RedEdge (717 nm) a blízkém infračerveném (842 nm) pásmu. Prostorové rozlišení je 8 cm na pixel ve výšce 120 m nad povrchem snímané oblasti. Váha senzoru je 231.9 g. Pořízené snímky jsou ve vlastnictví České zemědělské univerzity (MicaSense 2022).

6.2.2 Bezpilotní systém

Nosičem senzoru Micasense byl bezpilotní prostředek eBee X firmy senseFly. Konstrukčně se jedná o letecký prostředek s pevným křídlem. Váha stroje se pohybuje pod 1,6 kg. Dle zdroje je tento prostředek schopný nasnímat oblast o rozloze 220 ha ve výšce 120 m za 1 hodinu (senseFly 2022).

6.2.3 Vstupní data

Veškerá data a snímky pořízena pro zpracování této diplomové práce jsou ve vlastnictví České zemědělské univerzity v Praze. Data jsou výsledkem dlouhodobého mapování kůrovce v oblasti Nového Města na Moravě. Data byla pořízena v období 9. června, 29. července a 13. srpna roku 2020. Zvolená období byla vybrána v době letního rojení lýkožrouta. V práci byly využita data z července a ze srpna, neboť v datech z června se kůrovec na zdravotním stavu stromů ještě neprojevil. Rozloha mapovaného území je cca 2,5 km². Protože se kůrovec vyskytoval pouze na několika málo místech, byly zájmové lokality selektovány a analýzy probíhaly právě tam. Snímky poskytnuté univerzitou již byly georeferencovány. Mimo snímky byla rovněž poskytnuta databáze stromů obsahující jejich stav v jednotlivých obdobích a výškové modely DSM (digital surface model – digitální model povrchu) a DTM (digital terrain model – digitální model terénu).

6.2.4 Další data

V rámci kartografického zobrazení řešeného území byly dále využity mapy maloplošných a velkoplošných chráněných území poskytnutá agenturou ochrany přírody a krajiny ČR (AOPK 2011) a vybraná administrativní data o České republice ArcČR® 500, verze 3.3 (ArcČR 2016).

6.3 Prahování z vegetačních indexů

Pro detekci kůrovce byla vybrána metoda prahování vegetačního indexu, jejíž technika je založena na hledání hraniční (prahové) hodnoty rozlišující stromy napadené od zdravých jedinců. Pro aplikaci této metody lze použít pouze jednokanálové vstupy, kterými budou právě vegetační indexy skládající se z různých spektrálních pásem (Klouček 2019a). Tato hranice byla hledána skrze vytvořená tréninková data a jejich

následnou klasifikací skrze Random Forest. Pro úplnost budou v následující tabulce 2 popsána použitá spektrální pásma.

Tabulka 2: Popis pásem použitých ve vegetačních indexech (MicaSense RedEdge-MX)

Zkratka	Celý název	Vlnová délka (mm)
B	Blue	475
G	Green	560
R	Red	668
RE	RedEdge	717
NIR	Near-Infrared	842

Na snímky byly aplikovány následující vegetační indexy:

- Normalized Difference Vegetation Index: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$
- Greenness Index: $GI = G / (R + G + B)$
- RedEdge NDVI: $NDVI_{re} = (RE - R) / (RE + R)$
- Normalized Difference RedEdge: $NDRE = (NIR - RE) / (NIR + RE)$
- Normalized Difference Water Index: $NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)$

Index NDVI a index GI byl vybrán dle metodiky Kloučka et al. (2019a). Index NDRE index byl použitý v práci Abdullaha (2019), kdy při měření družicových dat sentinel-2 vykazoval vzhledem k nízké přesnosti družicových dat velmi dobré výsledky. RedEdge NDVI byl použitý v práci Minaříka a kolektivu (2016). Index NDWI byl v rovněž uveden v práci Abdullaha (2019), ovšem v upravené formě, kde bylo místo zeleného pásma uvedeno krátkovlnné infračervené pásmo (SWIR). Protože pásmo SWIR využívaná datová sada neobsahuje, bude v práci použito výše zmíněné zelené pásmo (Ji et al. 2009).

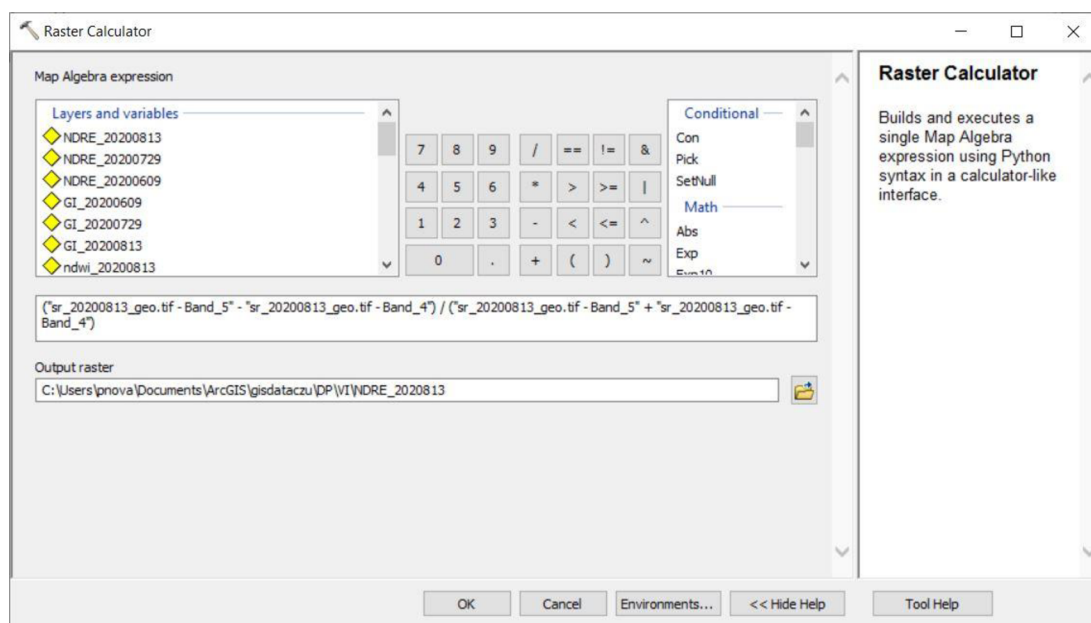
6.3.1 Příprava dat

Prvním krokem pro zpracování dat bylo vymezení území, kde se kůrovec projevil. Území bylo vymezeno dle metodiky Kloučka (2019a), kde byla stanovena kritická vzdálenost pro napadení stromu lýkožroutem na 50 metrů. Tato vzdálenost byla aplikována v programu Arcmap pomocí funkce Buffer od stromu napadeného kůrovcem. Tímto způsobem byly vybrány 3 oblasti vykazující kůrovcem napadené stromy. Následně byly pomocí nástroje Clip vybrány stromy zasahující do stanoveného kritického území.

Protože kůrovec napadá především starší stromy, byla následujícím krokem selekce jedinců, jejichž výška nedosahuje více jak 20 metrů. Tento krok byl proveden odečtením rastrů „digitálního modelu terénu“ od „digitálního modelu povrchu“. Následně byla pomocí nástroje Reclassify stanovena prahová hodnota 20 metrů, čímž vznikl rastrový obraz znázorňující plochy pod 20 metrů a nad 20 metrů. Z ploch pod 20 metrů byly následně eliminovány příliš nízké stromy. Tímto vznikl soubor dat, obsahující celkem 380 jedinců, kdy červencová data obsahovala 331 zdravých a 49 napadených stromů a pro srpnová data 323 zdravých, 3 napadené a 54 mrtvých stromů.

6.3.2 Aplikace vegetačních indexů

Veškeré vegetační indexy byly počítány v programu Arcmap pomocí nástroje Raster Calculator. Do zmíněného nástroje byly zapsány jednotlivé rovnice, dle obrázku č. 5.



Obrázek č.5: Příklad využití Raster Calculatoru pro vegetační index NDRE (Zdroj: autor)

Následně byly pro bodovou vrstvu stromů v řešeném území vytvořeny obalové zóny pomocí funkce Buffer o poloměru 1 m. Tato vzdálenost byla zvolena proto, aby se jednotlivé zóny nepřekrývaly, a zároveň aby daná zóna odpovídala velikosti koruny, na které se symptomy napadení kůrovcem projeví nejdříve. Dále byla pomocí funkce Zonal Statistics vypočítána průměrná hodnota vegetačního indexu v oblasti obalové zóny.

Pro další postup bylo nutné vytvořit trénovací data. Tato data byla vytvořena pro každou zkoumanou skupinu stromů a rozdělena na jedince zdravé, napadené a

mrtvé. Pro klasifikaci dat byla vybrána metoda strojového učení s použitím nástroje Train Random Trees Classification a následné promítnutí klasifikovaných dat pomocí nástroje Classify Raster.

6.3.3 Hodnocení přesnosti analýzy

Data z klasifikovaných výsledků byly následně pomocí Compute Confusion Matrix. Tato analýza spočítá matici změn, která vyhodnotí kvalitu klasifikovaných dat. Výstupem je tabulka, obsahující ve sloupcích hodnoty dle skutečnosti a v řádcích předpověď použitého klasifikátoru. Matice změn nám poskytuje celkem 3 výsledky. Celkovou přesnost, která vychází z poměru hodnot na diagonále matice ku celkovému počtu bodů. Zpracovatelskou přesnost (P_a), což je poměr mezi správně klasifikovanými body a body použitými pro testování dané třídy. Uživatelská přesnost (U_a) se počítá pro každou třídu zvlášť jako podíl správně klasifikovaných bodů, ku počtu bodů, které do dané třídy byly zařazeny (Lillesand et al. 2004).

7 VÝSLEDKY

Výsledky metody prahování z vegetačních indexů jsou zobrazeny v Tabulce 3 pro červenec a v Tabulce 4 pro srpen. Tabulka obsahuje absolutní počty zdravých, napadených a mrtvých stromů pro jednotlivé vegetační indexy ve sledovaném období. Grafické zobrazení těchto výsledků a výsledky matice změn lze nalézt v příloze č.1 a detailní výsledky matice chyb v příloze č.2.

Tabulka 3: Výsledky prahování pomocí vegetačních indexů pro červencová data

Použitý index	Zdravý	Napadený	Celková přesnost
NDWI	264	116	76 %
GI	263	117	76 %
NDRE	269	111	78 %
NDVI _{re}	246	134	73 %
NDVI	288	92	84 %

V červenci se v zájmovém území vyskytovaly stromy pouze se dvěma kategoriemi zdravotního stavu – zdravé a napadené. Nejvyšší celkové přesnosti dosahovala data s použitým indexem NDVI (84 %). Zpracovatelská přesnost Pa také pro dané období dosahovala největších hodnot. Pro zdravé stromy 85 % a pro napadené 84 % (přesnost uživatele Ua byla pro zdravé stromy 97 % a pro napadené 45 %). Indexy NDWI a GI se lišily pouze o promile a jejich celková přesnost byla zaokrouhlena na 76 %. Pa byla pro index NDWI 76 % pro zdravé a 73 % pro napadené stromy. Ua byla 95 % pro zdravé a 31 % pro napadené. Pa a Ua u indexu GI se oproti NDWI lišila pouze u napadených stromů (Pa 78 % a Ua 32 %). Následoval index NDRE, jehož celková přesnost byla 78 %. Pa byla pro zdravé i napadené stromy stejná, 78 % (Ua byla pro zdravé stromy 96 % a pro napadené 34 %). Nejnižší hodnotu pro dané období vykazuje index NDVI_{re} se 73 %. Pa vykazuje u zdravého stromu 72 % (Ua 97 %) a u napadeného 84 % (Ua 31 %).

Tabulka 4: Výsledky prahování pomocí vegetačních indexů pro srpnová data

Použitý index	Zdravý	Napadený	Mrtvý	Celková přesnost
NDWI	273	16	91	81 %
GI	249	28	103	78 %
NDRE	213	21	146	69 %
NDVI _{re}	282	25	73	86 %
NDVI	255	29	96	81 %

Pro toto období byl zdravotní stav stromů dělen do 3 tříd – zdravé, napadené a mrtvé. Nejvyšší celkovou přesnost zde vykazuje index NDVI_{re} (86 %). Uživatelská přesnost vykazovala pro zdravé stromy 85 % (Ua 99 %), pro napadené 100 % (Ua 12 %) a pro mrtvé 87 % (Ua 64 %). Průměrná přesnost pro indexy NDWI a NDVI vychází totožně 81 %. U NDWI byla přesnost Pa pro zdravé stromy 82 % (Ua 97 %), pro napadené stromy 100 % (Ua 19 %) a pro mrtvé stromy 78 % (Ua 46 %). Index NDVI měl zpracovatelskou přesnost pro zdravé stromy 78 % (Ua 99 %), pro napadené 100 % (Ua 10 %) a pro mrtvé stromy 96 % (54 %). Následoval index GI, jehož Pa pro zdravé stromy bylo 76 % (Ua 98 %), pro napadené 100 % (Ua 10 %) a pro mrtvé 91 % (Ua 48 %). Nejnižší přesnosti klasifikace byla zaznamenána u indexu NDRE, jehož hodnota dosahovala 69 %. Uživatelská přesnost pro zdravé stromy byla 65 % (Ua 99 %), pro napadené 100 % (Ua 14 %) a pro mrtvé 94 % (Ua 35 %).

8 DISKUSE

V praktické části diplomové práce byly zpracovány a posuzovány multispektrální snímky lesa napadeného kůrovcem, pomocí metody prahování vegetačních indexů. Pro rozlišení stromů od zdravých po napadené, či mrtvé, byla zvolena metoda řízené klasifikace, kdy byla vytvořena tréninková data a klasifikována pomocí algoritmu Random Forest. Zvolený klasifikátor byl vybrán na základě jeho jednoduchosti a efektivity spočívající ve schopnosti klasifikovat snímek i na základě ne zcela optimálních trénovacích dat. Tento klasifikátor použil například Ballanti et al. (2016).

Při porovnání mých výsledků např. s Kloučkem et al. (2019b) dopadly oba shodné indexy (GI a NDVI) o několik málo procent hůře. Nejzřetelnější rozdíl je v případě indexu GI, kdy přesnost Kloučka et al. dosahovala ve sledovaném období hodnot od 78–96 %. V případě indexu NDVI byla celková přesnost bližší mým výsledkům (70–94 %). Možným rozdílem v našich výsledcích byla absence kroku eliminace stínů, kterou jsem v praktické části nevyužil. Tudíž klasifikátor mohl vyhodnotit zastíněnou část zdravého stromu jako napadený, či mrtvý strom. Tuto chybu jsem se pokusil odfiltrovat vyjmutím mladších jedinců, nedosahujících výšky alespoň 20 metrů. V dané publikaci ale není kategorie mrtvých stromů, proto její přesnost nemohu jistě ověřit. Blíže k mým výsledkům za srpnová data pasuje práce Näsäho (2015), který stíny rovněž nemaskoval a zároveň rozdělil stromy na zdravé, napadené a mrtvé. V tomto případě byla využita levná hyperspektrální kamera usazená na UAV a celková přesnost použitých vegetačních indexů dosahovala hodnot od 69–90 %.

Využitelnost RedEdge pásma pro detekci zdravotního stavu stromů popisuje mnoho autorů, jejichž články jsou velmi blízké této práci a zároveň danou využitelnost potvrzují. Namátkou lze jmenovat například Abdullaha et al. (2019), nebo Minaříka et al. (2014). Dané pásmo se nachází mezi červeným a NIR pásmem, čímž se jeví jeho využití pro detekci stresované vegetace příhodné. V této práci je využitelnost RedEdge pásma rozporupná. V prvním zkoumaném období vykazuje index NDRE druhou nejvyšší celkovou přesnost (78 %) za červencové období a index NDVI_{re} nejnižší celkovou přesnost (73 %) za stejné období. Naopak pro srpen vykazuje index NDRE

nejnižší celkovou přesnost (69 %) a index NDVI_{re} přesnost nejvyšší (86 %). Zajímavostí je především zpracovatelská přesnost mrtvých stromů v srpnovém období, kdy index NDRE vykazuje velmi vysokou hodnotu (94 %) a zdravé pouze 65 %. Toto porovnání znamená, že velké množství zdravých stromů bylo posouzeno jako mrtvé, což mohla způsobit přítomnost stínů.

Index NDWI byl využíván dle inspirace od Abdullaha et al. (2019). Ovšem jak je v kapitole 6.3 zmíněno, Abdullah et al. používá daný index v kontextu s krátkovlnným infračerveným pásmem SWIR. Toto pásmo nebylo v datové sadě k dispozici, neboť použitý senzor není schopný dané spektrální pásmo snímat. Nicméně byla dohledána jeho alternativa, která umožňuje využití pásma zeleného pásma namísto SWIR (Ji 2009). Přesnost daného indexu byla velmi podobná přesnosti běžněji používaného indexu NDVI, zejména v období srpna.

Pro snímání dat byl použit profesionální multispektrální senzor Micasense RedEdge-MX. Multispektrální senzory byly také použity ve výzkumu Minaříka et al. (2016) a Stoyanové et al. (2018). Výsledky těchto článků se shodují na využitelnosti pásem v oblasti NIR a RedEdge, což potvrzuje i můj výzkum, kdy indexy obsahující výše zmíněné kanály (konkrétně NDWI, NDRE, NDVI_{re} a NDVI) dosahovaly vyšší celkové přesnosti, nežli index GI, který pracuje pouze s pásmy RGB.

9 ZÁVĚR

Hlavním cílem předkládané práce byla detekce lýkožrouta smrkového v oblasti Nového Města na Moravě. Tato detekce probíhala metodou prahování vegetačních indexů s vybranými indexy NDWI, GI, NDRE, NDVI_{re} a NDVI za využití řízené klasifikace a klasifikátoru Random Forest. V červencovém období nejpřesněji vykazoval napadené a zdravé stromy index NDVI s celkovou přesností **84 %**. V srpnu, kdy byla klasifikace rozšířena o třídu již mrtvých stromů, vykazoval nejvyšší přesnost index NDVI_{re} s celkovou přesností **86 %**.

Na základě výsledků diplomové práce bylo možné zároveň odpovědět na v zadání stanovené výzkumné otázky:

- **Je zvolený Normalized Difference Water Index (NDWI) index vhodný pro detekci stromů napadených lýkožroutem?**

Index v obou sledovaných obdobích dosahoval podobných hodnot, jako ostatní indexy. Lze říci, že daný index je vhodný pro detekci stromů napadených lýkožroutem i stromů již uhynulých.

- **Jsou vybrané indexy NDVI_{re} a NRE vhodné pro detekci stromů napadených lýkožroutem?**

Výsledky ukázaly, že použité indexy dokázaly velmi dobře rozlišit mrtvé stromy od zdravých. Nicméně pro detekci čerstvě napadených stromů nevykazují žádné výhody, oproti jiným indexům.

- **Mají výsledky výše uvedených indexů NDWI, NDVI_{re} a NDRE stejnou až vyšší přesnost než běžněji používaný index NDVI?**

V prvním sledovaném období dosahovala celková přesnost indexu NDVI 84 %. Žádný z výše uvedených indexů se nepřiblížil k této hodnotě, tudíž lze konstatovat, že pro detekci čerstvě napadených stromů nejsou vhodné. Avšak v srpnovém období se celková přesnost NDVI (81 %) rovnala přesnosti indexu NDWI a vegetační index NDVI_{re} zároveň tuto hodnotu přesáhl o 5 %. Lze tedy říci, že tyto dva indexy se vyrovnávají indexu NDVI pro detekci již mrtvých stromů.

CITOVANÁ LITERATURA

Abbas, A., Sahibzada, A., Ahmad, N. & Khan, M., 2016. K-Means and ISODATA Clustering Algorithms for Landcover Classification Using Remote Sensing. *Sindh University Research Journal (ScienceSeries)*, pp. 315-318.

Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. & Heurich, M., 2019. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, pp. 1-20.

Abdullah, H. a další, 2018. European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, pp. 199-209.

Abinaya, V. & Poonkuntran, S., 2019. Classification of Satellite Image using Minimum Distance Classification Algorithm. *SSRG International Journal of Computer Science and Engineering*, pp. 15-18.

Adão, T. a další, 2017. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based. *remote sensing*, pp. 1-30.

Agapiou, A. & Lysandrou, V., 2015. Remote sensing archaeology: Tracking and mapping evolution in European scientific literature from 1999 to 2015. *Elsevier*, Záhř.

Ahern, F. J., 1988. The effects of bark beetle stress on the foliar spectral reflectance of lodgepole pine. *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1451-1468.

AOPK ĀR, 2022a. *Správa CHKO Źďárské Vrchy: Geologie*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/geologie/> [Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ĀR, 2022b. *Správa CHKO Źďárské Vrchy: Půdní poměry*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/pudni-pomery/> [Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ČR, 2022c. *Správa CHKO Žďárské Vrchy: Geomorfologie*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/geomorfologie/>

[Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ČR, 2022d. *Správa CHKO Žďárské Vrchy: Klimatické poměry*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/klimaticke-pomery/>

[Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ČR, 2022e. *Správa CHKO Žďárské Vrchy: Lesnictví*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/lesnictvi/>

[Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ČR, 2022f. *Správa CHKO Žďárské Vrchy: Vegetace a flóra*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/flora/>

[Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ČR, 2022g. *Správa CHKO Žďárské Vrchy: Fauna*. [Online] Available at: <https://zdarskevrchy.ochranaprirody.cz/zakladni-udaje-ochko/charakteristika-oblasti/fauna/>

[Přístup získán 31 Leden 2022].

AOPK ČR, 2022h. *Maloplošná chráněná území*. [Online] Available at: https://www.ochranaprirody.cz/lokality/?filter_rp=856&filter_vzchu=0&filter_ko=0&filter_text=

[Přístup získán 31 Leden 2022].

Ballanti, L., Blesius, L., Hines, E. & Kruse, B., 2016. Tree Species Classification Using Hyperspectral Imagery: A Comparison of To Classifiers. *Remote Sensing*, p. 445.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, pp. 95-120.

Bezpilotně, 2021. www.bezpilotne.cz. [Online]
Available at: <https://bezpilotne.cz/sensefly-ebee-x>
[Přístup získán 9 12 2021].

Brovkina, O., Cienciala, E., Surový, P. & Janata, P., 2017. Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment. *Geo-spatial Information Science*, pp. 12-20.

Cook, K., 2007. The Silent Force Multiplier: The History and Role of UAVs in Warfare. *IEEE Aerospace Conference, Červen*, pp. 1-7.

Culek, M., Grulich, V., Laštůvka, Z. & Divíšek, J., 2013. *Biogeografické regiony České Republiky*. 1. editor Brno: Masarykova univerzita.

Cutler, R. a další, 2007. Random Forests for Classification in Ecology. *Ecology*, pp. 2783-2792.

Česká zemědělská univerzita, 2022. *Kůrovec*. [Online]
Available at: <https://kurovec.czu.cz/cs/r-13853-o-projektu>
[Přístup získán 2 5 2022].

Dobrovolný, P., 1998. *Dálkový průzkum Země*. Brno: Masarykova Univerzita.

EU, 2019. *Prováděcí nařízení komise (EU) 2019/947*. místo neznámé: Úřední věstník Evropské unie.

Fingas, M. & Brown, C., 1997. Review of Oil Spill Remote Sensing. *Spill Science & Technology Bulletin*, pp. 199-208.

G., K. D. D. e. M. K., 2012. *Multispectral Classification of Remote Sensing Data for Geospatial Analysis*. Japan, autor neznámý

GISGeography, 2021. GISGeography.com. [Online]
Available at: <https://gisgeography.com/image-classification-techniques-remote-sensing/>
[Přístup získán 28 Prosinec 2022].

Hlásný, T., Krokene, P., Liebhold, A. & Müller, J., 2019. Život s kůrovcem: Dopady, výhledy a řešení. *Od vědy ke strategii 8. Evropský lesnický institut*, pp. 2 - 51.

Huang, S. a další, 2020. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. pp. 1-6.

Christiansen, E. & Bakke, A., 1988. The spruce bark beetle of Eurasia. V: *Dynamics of Forest Insects Population*. místo neznámé: Norwegian Forest Research Institute, pp. 479-503.

Christiansen, E. & Krokene, P., 1999. Can Norway spruce trees be 'vaccinated' against attack by *Ips typographus*?. *Agricultural and Forest Entomology*, Červenec, pp. 185-187.

Ishimwe, R., Abutaleb, K. & Ahmed, F., 2014. Applications of Thermal Imaging in Agriculture - A Review. *Advances in Remote Sensing*, pp. 128-140.

Ji, L., Zhang, L. & Wylie, B., 2009. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Listopad, pp. 1307 - 1317.

Keane, J. & Carr, S., 2013. A Brief History of Early Unmanned Aircraft. *Johns Hopkins Applied Physics Laboratory*, pp. 558-571.

Kelcey, J. & Lucieer, A., 2012. Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing. *remote sensing*, pp. 1462-1493.

Kerr, J. T. & Ostrovsky, M., 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *TRENDS in Ecology and Evolution*, Červen, pp. 299-305.

Klouček, T., 2018. *Využití dat dálkového průzkumu Země v aplikované ekologii*. Praha: disertační práce.

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

Klouček, T. a další, 2019b. The Use of UAV Mounted Sensors for Precise of Bark Beetle Infestation. *remote sensing*, pp. 1-17.

Kropáček, J., Moravec, D. & Komárek, J., 2020. *Dálkový průzkum - I (skriptum)*. Verze 1.3 editor Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze - Fakulta životního prostředí.

Kruly, J., 2014. The Origins of Aerial Photography. *The New Yorker*.

Lillesand, T., Kiefer, R. & Chipman, J., 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 5. editor Danvers: Wiley.

Micasense, 2022. *Micasense: RedEdge-MX*. [Online] Available at: <https://micasense.com/rededge-mx/> [Přístup získán 16 Únor 2022].

Minařík, R. & Langhammer, L., 2014. USE OF A MULTISPECTRAL UAV PHOTOGRAMMETRY FOR DETECTION AND TRACKING OF FOREST DISTURBANCE DYNAMICS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 711-718.

Mohelský, M., 2019. Od počátku monokultur ke kalamitní těžbě. *Myslivost*, Červenec, p. 26.

Mulla, D. J., 2012. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Elsevier*, Záhř.

Musil, I. & Hamerník, J., 2003. *Lesnická dendrologie 1. Jehličnaté dřeviny*. 2. editor Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.

MZe ČR, 2020. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2020*. Praha: MZe ČR: 190 s.

Näsi, R. a další, 2015. Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sensing*, pp. 15468 - 15493.

Novák, J. A., 2021. *Drony. Kompletní průvodce včetně přehledu nové legislativy*. 1. editor Praha: Grada.

Olaode, A., Naghdy, G. & Todd, C., 2014. Unsupervised Classification of Images: A Review. *International Journal of Image Processing*, pp. 325-342.

Palik, M. & Máté, N., 2019. Brief History of UAV Development. *Repüléstudományi Közlemények XXXI. Évfolyam*, pp. 155-166.

Primocco UAV, 2021. www.uav-stol.com. [Online] Available at: <https://uav-stol.com/cs/primoco-uav-one-150/> [Přístup získán 9 12 2021].

Řízení letového provozu ČR, 2017. *DOPLNĚK X - BEZPILOTNÍ SYSTÉMY*. [Online] Available at: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/LL/2/data/effective/doplX.pdf> [Přístup získán 8 12 2021].

Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L. & Kefauver, S. C., 2020. Remote sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, Květen.

senseFly, 2022. *senseFly: eBee X*. [Online] Available at: <https://www.sensefly.com/drone/ebec-x-fixed-wing-drone> [Přístup získán 16 Únor 2022].

Sisodia, P., Tiwari, V. & Kumar, A., 2014. *Analysis of Supervised Maximum Likelihood Classification for Remote Sensing Image*. Jaipur, IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering.

Stoyanova, M., Nicheva, O. & Koutev, V., 2018. *Potential of multispectral imaging technology for assessment coniferous forests bitten by a bark beetle in Central Bulgaria*. místo neznámé, MATEC Web of Conferences 145.

Tesař, V. & Souček, J., 2008. *Metodika přestavby smrkových monokultur na stanovištích přirozených smíšených porostů*. Opocno: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i..

TGM, V., 2015. *Hydroekologický informační systém VÚV TGM*. [Online] Available at:

https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=mp_heis_voda&TMPL=HVMAP_MAIN&IFRAME=0&lon=16.0570997&lat=49.5794574&scale=7560

[Přístup získán 31 Leden 2022].

Univerzita Karlova, 2022. *Kůrovec v Praze*. [Online] Available at: <https://kurovec.natur.cuni.cz/o-projektu>

[Přístup získán 8 11 2021].

Voigt, S. a další, 2007. Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Červen, pp. 1521-1528.

Wójtowicz, M., Wójtowicz, A. & Piekarczyk, J., 2016. Application of remote sensing methods in agriculture. *Communications in biometry and crop science*, pp. 31-50.

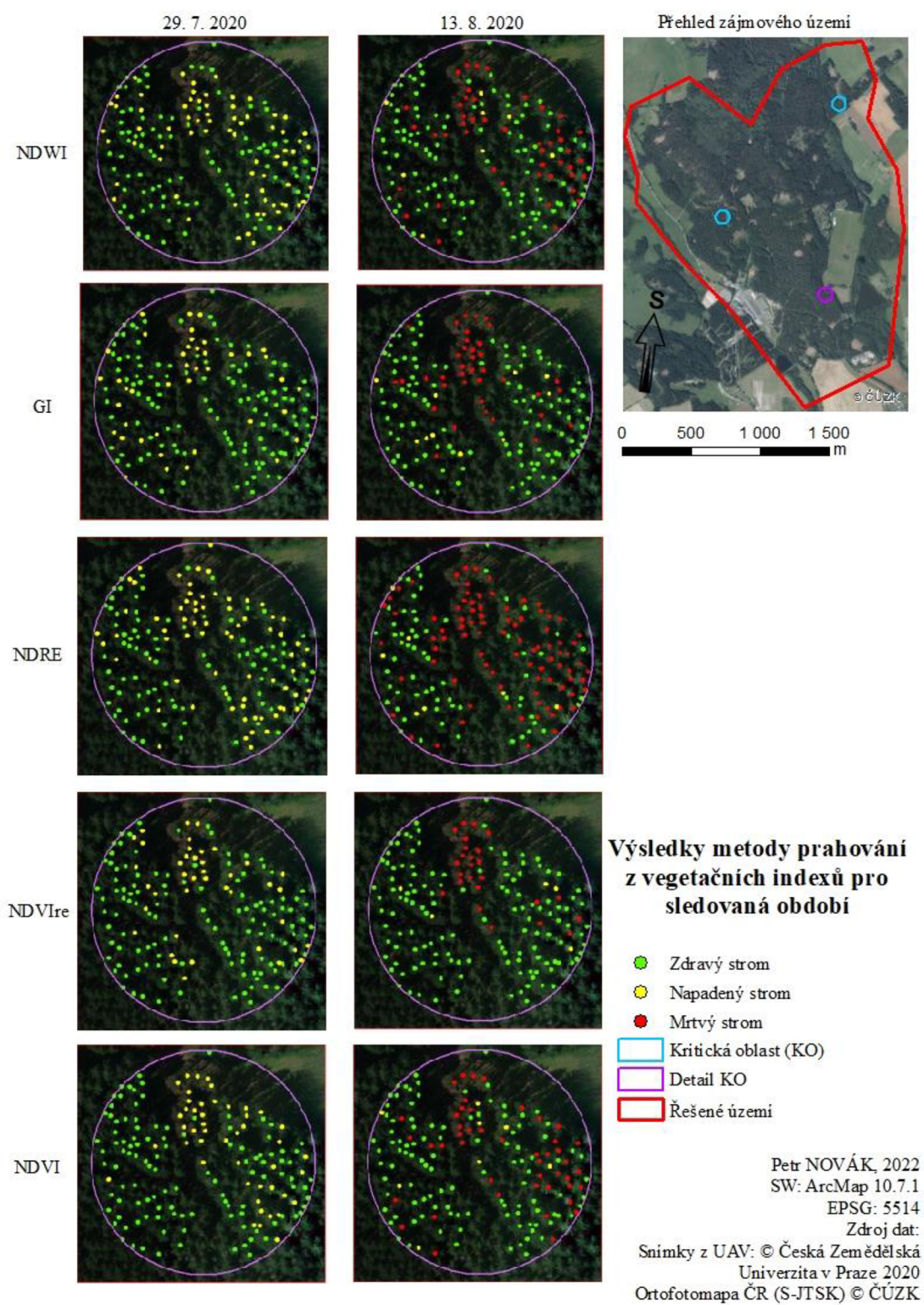
Zahradník, P. & Knížek, M., 2007. Lýkožrout smrkový - *Ips typographus*. *Lesnická práce*, 4, p. příloha.

Zacharek, S., 2019. How Drones Are Revolutionizing the Way Film and Television Is Made. *Time*, 31 Květen.

Zumr, V., 1995. *Lýkožrout smrkový - biologie, prevence a metody boje*. 1. editor Písek: Matice Lesnická.

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Grafické znázornění výsledků prahování z vegetačních indexů



Příloha č. 2: Výsledky chybové matice z klasifikovaných dat pomocí Random Forest

29.07.2020																								
NDWI					GI					NDRE					NDVire					NDVI				
	Z	N	Σ	Ua		Z	N	Σ	Ua		Z	N	Σ	Ua		Z	N	Σ	Ua		Z	N	Σ	Ua
Z	251	13	264	95%	Z	252	11	263	96%	Z	258	11	269	96%	Z	238	8	246	97%	Z	280	8	288	97%
N	80	36	116	31%	N	79	38	117	32%	N	73	38	111	34%	N	93	41	134	31%	N	51	41	92	45%
Σ	331	49	380		Σ	331	49	380		Σ	331	49	380		Σ	331	49	380		Σ	331	49	380	
Pa	76%	73%		76%	Pa	76%	78%		76%	Pa	78%	78%		78%	Pa	72%	84%		73%	Pa	85%	84%		84%

Z - Zdravý strom
 N - Napadený strom
 M - Mrtvý strom
 Pa - Zpracovatelská přesnost
 Ua - Uživatelská přesnost

13.08.2020																													
NDWI					GI					NDRE					NDVire					NDVI									
	Z	N	M	Σ	Ua		Z	N	M	Σ	Ua		Z	N	M	Σ	Ua		Z	N	M	Σ	Ua		Z	N	M	Σ	Ua
Z	264	0	9	273	97%	Z	244	0	5	249	98%	Z	210	0	3	213	99%	Z	275	0	7	282	98%	Z	253	0	2	255	99%
N	10	3	3	16	19%	N	25	3	0	28	10%	N	18	3	0	21	14%	N	22	3	0	25	12%	N	26	3	0	29	10%
M	49	0	42	91	46%	M	54	0	49	103	48%	M	95	0	51	146	35%	M	26	0	47	73	64%	M	44	0	52	96	54%
Σ	323	3	54	380		Σ	323	3	54	380		Σ	323	3	54	380		Σ	323	3	54	380		Σ	323	3	54	380	
Pa	82%	100%	78%		81%	Pa	76%	100%	91%		78%	Pa	65%	100%	94%		69%	Pa	85%	100%	87%		86%	Pa	78%	100%	96%		81%