

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra hospodářské úpravy lesů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Odhad postupu kůrovcové gradace v Národním parku
České Švýcarsko pomocí metod Dálkového průzkumu
Země**

Diplomová práce

Bc. Alena Ondrušková

Doc. Ing. Peter Surový, PhD.

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Alena Ondrušková

Lesní inženýrství

Název práce

Odhad postupu kůrovcové gradace v Národním parku České Švýcarsko pomocí metod Dálkového průzkumu Země

Název anglicky

Evolution of bark beetle outbreak in national park Bohemian Switzerland by means of remote sensing

Cíle práce

Cílem práce je zhodnotit vývoj kůrovcové gradace a její postup v letech 2018-2022 pomocí metod Dálkového průzkumu Země, konkrétně získáním dostupných materiálů DPZ a automatickou nebo semiautomatickou klasifikací získat informaci o plošném postupu v jednotlivých letech.

Metodika

Práce bude postupovat následujícími kroky:

- zajištění dostupných dat DPZ pro jednotlivá období, ideálně kombinace družice/letadlo.
- Vytvoření mapového projektu a kontrola překrytu jednotlivých vrstev.
- výběr reprezentativní vzorky lokálních bodů pro odhad přesnosti a správnosti klasifikace. Zdůvodnění a statistická evaluace výběru.
- provedení klasifikace, zdůvodnění výběru, srovnání s jinými metodami.
- dodatečné úpravy odstranění cest a dalších nesouvisejících informací.
- Podle potřeby určit dodatečné měření a pozemní kontrolu, nebo vizuální interpretaci materiálu DPZ.
- Zhodnocení přesnosti, správnosti, popsat dynamiku plošného postupu.

Doporučený rozsah práce

60 stran včetně grafů tabulek a obrázků

Klíčová slova

lýkožrout, dálkový průzkum Země, národní park České Švýcarsko

Doporučené zdroje informací

- Fassnacht, F.E.; Latifi, H.; Stereńczak, K.; Modzelewska, A.; Lefsky, M.; Waser, L.T.; Straub, C.; Ghosh, A. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 2016, 186, 64–87
- Korpela, I.; Mehtatalo, L.; Markelin, L.; Seppanen, A.; Kangas, A. Tree species identification in aerial image data using directional reflectance signatures. *Silva Fenn.* 2014, 48, 1087
- Krzystek, P.; Serebryanyk, A.; Schnörr, C.; Červenka, J.; Heurich, M. Large-Scale Mapping of Tree Species and Dead Trees in Šumava National Park and Bavarian Forest National Park Using Lidar and Multispectral Imagery. *Remote Sens.* 2020
- Krzysztof Stereńczak, Bartłomiej Kraszewski, Miłosz Mielcarek, Żaneta Piasecka, Inventory of standing dead trees in the surroundings of communication routes – The contribution of remote sensing to potential risk assessments, *Forest Ecology and Management*, Volume 402, 2017, Pages 76-91,
- KUŽELKA, K. *Měření lesa : moderní metody sběru a zpracování dat*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, 2014. ISBN 978-80-213-2498-5.
- KUŽELKA, K. – SUROVÝ, P. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA. *Statistika v R : zpracování dat závěrečných prací pro lesnické obory*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2018. ISBN 978-80-213-2921-8.
- KUŽELKA, K. – SUROVÝ, P. *Systém operativního leteckého snímkování pro doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách : metodika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2017. ISBN 978-80-213-2811-2.
- Leckie, D.G.; Gougeon, F.; McQueen, R.; Oddleifson, K.; Hughes, N.; Walsworth, N.; Gray, S. Production of a Large-Area Individual Tree Species Map for Forest Inventory in a Complex Forest Setting and Lessons Learned. *Can. J. Remote Sens.* 2017, 43, 140–167.
- Li, J.; Hu, B.; Noland, T.L. Classification of tree species based on structural features derived from high density LiDAR data. *Agric. For. Meteorol.* 2013, 171–172, 104–114.
- SUROVÝ, P. – KUŽELKA, K. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA. *Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-3008-5.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Peter Surový, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra hospodářské úpravy lesů

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2023

doc. Ing. Peter Surový, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2023

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Odhad postupu kůrovcové gradace v Národním parku České Švýcarsko pomocí metod Dálkového průzkumu Země" jsem vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Petera Surového, PhD. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Petrovi Suróvému, PhD., za odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala za veškerou pomoc a trpělivost Ing. Júlíi Matejčíkové. Poděkování taktéž náleží mé rodině, přítelovi a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

Odhad postupu kůrovcové gradace v Národním parku České Švýcarsko pomocí metod Dálkového průzkumu Země

Souhrn

Diplomová práce se zabývá určením postupu kůrovcové kalamity, která propukla v Národním parku České Švýcarsko. Cílem práce bylo vyhodnotit postup prosychání napadených stromů pomocí leteckých snímků z let 2020 a 2021, které byly poskytnuty správou národního parku a satelitních snímků z let 2018 až 2022, které byly staženy z online platformy PlanetLab. Snímky byly pořízeny vždy v období měsíce srpna a září tak, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků podzimním opadem. Pouze satelitní snímek z roku 2022 byl pořízen v měsíci říjen. Vyhodnocování postupu kůrovcové kalamity proběhlo v programu ArcGIS® PRO za pomoci klasifikace založené na objektech (letecké snímky) a klasifikace založené na pixelech (satelitní snímky) vždy pomocí algoritmu *Support Vector Machine*.

Ukázalo se, že vrchol kalamity nastal v roce 2021, avšak její vývoj není u konce. Z vyhodnocení leteckých snímků se ukázalo, že v roce 2020 bylo na území NPČŠ 2250,13 ha souší a v roce 2021 činila plocha souší 2981,27 ha. Satelitními snímky bylo hodnoceno delší období, přičemž plocha kůrovcových souší v roce 2018 činila 502,15 ha, v roce 2019 celkem 1308,74 ha, 2202,71 ha za rok 2020 a 3348,75 ha souší bylo detekováno v roce 2021. Satelitní snímek z roku 2022 byl z důvodu rozsáhlého požáru, který postihl NP, hodnocen samostatně. V tento rok bylo na území NPČŠ, které nebylo postiženo požárem, celkem 3348,3 ha souší celkem. Porovnáním reálných dat s modely růstových křivek nebyla prokázána žádná významná odchylka.

Metody dálkového průzkumu Země přinášejí mnoho možností nejen v lesnictví ale i v jiných odvětvích. Přesnost a spolehlivost jednotlivých metod jsou díky rychlému technickému vývoji zvyšovány a tím mohou ulehčit práci při včasné detekci a monitoringu lesních porostů.

Klíčová slova: lýkožrout, dálkový průzkum Země, Národní park České Švýcarsko

Evolution of bark beetle outbreak in national park Bohemian Switzerland by means of remote sensing

Summary

This diploma thesis deals with determining the course of the bark beetle calamity that broke out in the Bohemian Switzerland National Park. The aim of this work was to evaluate the drying process of the attacked trees using aerial photographs from the years 2020 and 2021, which were provided by the national park administration, and satellite images from the years 2018 to 2022, which were downloaded from the PlanetLab online platform. The images were always taken in the months of August and September so that the results were not distorted by autumn leaf fall. Only the 2022 satellite image was taken in the month of October. The evaluation of the progression of the bark beetle (*Ips typographus*) was carried out in the ArcGIS® PRO program using object-based classification (aerial images) and pixel-based classification (satellite images), always using the Support Vector Machine algorithm.

It turned out that the peak of the calamity occurred in 2021, but its development is not over. The evaluation of aerial photographs showed that in 2020 there were 2250,13 ha of dry land on the territory of the Bohemian Switzerland National Park, and in 2021 the area of dry land was 2981,27 ha. A longer period was evaluated by satellite images, with the area of bark beetle land in 2018 being 502,15 ha, in 2019 a total of 1308,74 ha, 2202,71 ha in 2020 and 3348,75 ha of land was detected in 2021. Satellite image from 2022 was evaluated separately due to the large-scale fire that affected the NP. This year, there was a total of 3348.3 ha of dry land in the Bohemian Switzerland National Park territory that was not affected by the fire. Comparing real data with growth curve models showed no significant deviation.

Remote sensing methods bring many possibilities not only in forestry but also in other sectors. Thanks to rapid technical development, the accuracy and reliability of the individual methods are increased and thus can facilitate the work of early detection and monitoring of forest stands.

Keywords: bark beetle, remote sensing, the Bohemian Switzerland National Park

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cíl práce.....	13
3 Literární rešerše.....	14
3.1 Národní park České Švýcarsko.....	14
3.1.1 Správa Národního parku České Švýcarsko.....	15
3.1.2 Geologie.....	15
3.1.3 Klimatické podmínky	15
3.2 Lýkožrout smrkový (<i>Ips typographus</i>).....	15
3.2.1 Rozšíření druhu <i>Ips typographus</i>	16
3.2.2 Vývoj <i>Ips typographus</i>	16
3.2.3 Hostitelské dřeviny	17
3.2.4 Přirození nepřátelé	18
3.2.5 Kontrola a monitoring.....	18
3.2.5.1 Základní stav	18
3.2.5.2 Zvýšený stav	19
3.2.5.3 Kalamitní stav.....	19
3.2.6 Ochrana.....	19
3.2.7 Obranná opatření.....	20
3.3 Dálkový průzkum Země	20
3.3.1 Historie v DPZ.....	21
3.3.2 Nosiče dálkového průzkumu Země	22
3.3.2.1 Letadla	23
3.3.2.2 Satelity.....	24
3.3.2.3 Drony	26
3.3.3 Snímače v DPZ.....	28
3.3.3.1 Pasivní senzory	28
3.3.3.2 Aktivní senzory	30
3.4 Klasifikace obrazu v dálkovém průzkumu Země	32
3.4.1 Klasifikace založená na pixelech (Pixel-based image classification).....	32
3.4.2 Klasifikace založená na objektech (Object-based image classification) ..	33
3.4.2.1 Segmentace obrazu	34

3.4.3	Klasifikační metody	34
3.4.3.1	Maximum Likelihood classification.....	35
3.4.3.2	Support vector machine	35
3.4.3.3	Random forest	36
4	Metodika	37
4.1	Popis zkoumaného území	37
4.2	Materiál	38
4.2.1	Letecké snímky	38
4.2.2	Satelitní snímky	39
4.3	Zpracování dat	41
4.3.1	Letecké snímky	41
4.3.2	Satelitní snímky	44
4.4	Statistické vyhodnocení	48
5	Výsledky	49
5.1	Letecké snímky	49
5.2	Satelitní snímky	50
5.2.1	Požár v Národním parku České Švýcarsko (2022).....	52
5.3	Porovnání leteckých snímků se satelitními snímky.....	52
5.4	Statistické vyhodnocení	53
6	Diskuze	54
7	Závěr a doporučení pro praxi	59
8	Literatura.....	60
9	Seznam obrázků a tabulek	69

Seznam použitých zkratek a symbolů

1. ALS = *Aerial Laser Scanning*
2. ANNs = *artificial neural networks*
3. CIR = *Color Infrared*
4. DAP = *Digital Aerial Photogrammetry*
5. DPZ = dálkový průzkum Země
6. DRL = *Discrete return LiDAR*
7. GIS = geografické informační systémy
8. LČpVP = letecká činnost pro vlastní potřebu
9. LP = letecké práce
10. MLC (ML) = *Maximum Likelihood classification*
11. MTOM = *Maximum Take-off Mass* (maximální vzletová hmotnost)
12. MZe = Ministerstvo Zemědělství
13. MŽP = Ministerstvo Životního prostředí
14. MWCL = *Multi-Wavelength Canopy LiDAR*
15. NIR = blízké infračervené záření
16. NP = Národní park
17. NPČŠ = Národní park České Švýcarsko
18. PS = PlanetScope
19. RE = *red-edge*
20. RF = *Random forest*
21. RPAS – *Remotely Piloted Aerial Systems*
22. SAM = *spectral angle mapper*
23. SAR = *Synthetic Aperture Radar*
24. SVM = *Support vector machine*
25. SWIR = short-wave infrared
26. UAS – *Unmanned Aerial Systems*
27. UAV = *Unmanned Aerial vehicles*
28. VNIR = *visible and near infrared*
29. VÚLHM = Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti v. v. i.

1 Úvod

Jedním z největších problémů současné doby je klimatická změna, která ovlivňuje veškeré dění na planetě Zemi. Klimatické změny s sebou přinášejí řadu problémů, jako například sucho, zvyšování teplot, požáry, prodlužování vegetační doby, zavlékání nepůvodních invazivních druhů a v neposlední řadě vytvářejí velmi příznivé podmínky pro vývoj a rychlé šíření podkorního hmyzu. Velkoplošných disturbancí tohoto typu bude pravděpodobně v budoucnu přibývat a s tím přichází problém s předčasným odumíráním porostů.

V posledních letech se Česká republika potýká s kůrovcovou kalamitou, která se postupně rozšířila do všech krajů a zapříčinila velké problémy na rozsáhlých smrkových porostech. Je známo, že úspěšné napadení smrku kůrovcem závisí jak na stavu populace, tak na schopnosti smrku se bránit, a právě tyto schopnosti bývají oslabeny stresem, který je vyvolán především suchem a nedostatkem podzemní vody. Mimo klimatické změny rychlému šíření podkorního hmyzu přispívají například i větrné kalamity, a především nedostatek pracovních sil v lesním hospodářství, díky čemuž nejsou z porostů včas odstraňovány napadené stromy. Všechny zmíněné faktory ovlivňují to, jak rychle jsou napadené stromy detekovány a jak rychle je provedena jejich asanace. Právě včasnými zásahy v napadených porostech lze regulovat výskyt daného škůdce a omezit tak možné škody. V současnosti má tato gradace spíše ustupující charakter a nastává období, kdy bude důležité se věnovat výzkumu předcházení těmto vysokým ekologickým ale i hospodářským škodám.

Předcházet škodám lze řadou způsobů. Obecně platí, že by se měl vybírat pouze nejkvalitnější sadební materiál a využívat pouze ty dřeviny, které jsou pro danou lokalitu vhodné a volit správné výchovné zásahy. Pro snížení škod na lesních porostech napáchaných jakoukoliv hmyzí kalamitou je prioritou včasná detekce napadených stromů případně celých porostů a jejich odstranění. Nejběžnějším způsobem monitoringu jsou pěší pochůzky po revírech, při kterých jsou vizuálně vyhledávány napadené stromy. Avšak tento způsob při tak rozsáhlých kalamitách nemusí být vždy dostačující. Mnohem rychlejším a efektivnějším řešením se zdají být metody dálkového průzkumu Země (DPZ). Mezi tyto metody lze zařadit například letecké, bezpilotní nebo satelitní snímání povrchu Země. Tyto metody jsou specifické tím, že senzor, který je nesen některým z druhů nosičů, není v kontaktu se zemským povrchem. Metody DPZ lze využívat nejen v lesnictví. Svou významnou funkci začínají nacházet i v zemědělství, ekologii, krajinném inženýrství, geografii, kartografii, meteorologii nebo v navigačních systémech a podobně.

Národní park České Švýcarsko (NPČŠ) je jedna z mnoha oblastí, kterou postihla rozsáhlá kůrovcová kalamita. Jedná se o zatím nejmladší a zároveň nejlesnatější národní park v České republice s vysokým zastoupením smrku ztepilého (*Picea abies*). Způsob hospodaření v NPČŠ v kombinaci se změnou klimatu vytvořili vhodné podmínky pro rychlé a nekontrolovatelné šíření podkorního hmyzu.

2 Cíl práce

Cílem práce je zhodnotit vývoj kůrovcové gradace a její postup v letech 2018-2022 pomocí metod dálkového průzkumu Země, konkrétně získáním dostupných materiálů DPZ a automatickou nebo semiautomatickou klasifikací získat informaci o plošném postupu v jednotlivých letech.

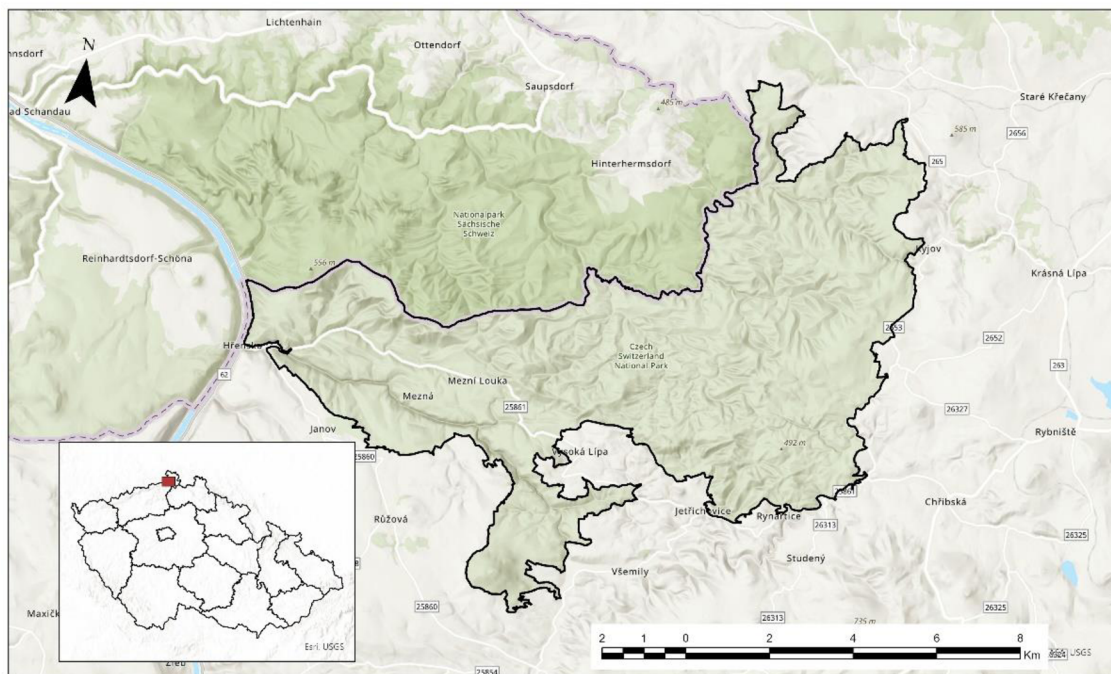
V rámci diplomové práce bylo stanoveno několik dílčích postupů. Prvním krokem bylo získat letecké a satelitní snímky. Druhým krokem byla tvorba mapového dokumentu v programu ArcGIS[®] PRO, ve kterém byly na jednotlivých snímcích vyhledány souše pomocí automatické klasifikace. Následovala vizuální kontrola, při které byla provedena manuální oprava a v případě špatně klasifikovaného snímku byla provedena nová klasifikace. Další krok zahrnoval výpočty plochy, na kterých se nacházely stojící souše a dílčí roční přírůsty. Po odstranění holin a lesních cest byly výsledné hodnoty upřesněny. Finální fáze zahrnovala vyrovnaní zjištěných dat růstovou funkcí pro odhad vývoje do budoucna.

3 Literární rešerše

3.1 Národní park České Švýcarsko

Národní park České Švýcarsko (NPČŠ) byl založen ke dni 1. ledna 2000 a jedná se tak o nejmladší park v České republice. V době svého založení činila jeho rozloha téměř 8 000 ha. V současné době je celková výměra NPČŠ 7 933 ha, z toho lesy jsou na celkové ploše 7 621 ha (96,1 %) a jedná se tak o nejlesnatější park v České republice. NPČŠ sousedí na hranici s Německem s Národním parkem Saské Švýcarsko (Obrázek 1), který byl založen již v roce 1990 a jeho plocha činí 9300 ha. NPČŠ byl založen na základě zákona číslo 161/1999 Sb. Cílem založení NPČŠ byla především ochrana CHKO Labské pískovce, uchování a zlepšení přírodního prostředí, ochrana jehličnatých geomorfologických hodnot, planě rostoucích rostlin a volně žijících živočichů a zachování typického vzhledu krajiny. Na území NPČŠ platí zákon o ochraně přírody a krajiny (MZe, 2022; NPCŠ, 2023).

V roce 2021 činila těžba zapříčiněná abiotickými faktory na území parku celkem 1 m³. Rozsah těžby nahodilé zapříčiněné kůrovcovou kalamitou činil 5 138 m³. Úmyslnou těžbou bylo vytěženo celkem 1 722 m³. Těžba celkem činila 6 861 m³ (MZe, 2022).



Obrázek 1: Poloha Národního parku České Švýcarsko.

3.1.1 Správa Národního parku České Švýcarsko

Na základě vyhlášení NPČŠ zákonem 161/1999 Sb., byla zřízena Správa Národního Parku České Švýcarsko se sídlem v Krásné Lípě. Fungování Správy NPČŠ spadá pod Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Správu NPČŠ vede ředitel, který může být jmenován a odvolán ministrem MŽP (Zákon č. 161/1999 Sb., 1999).

3.1.2 Geologie

Národní park České Švýcarsko se nachází v místech, kde dochází ke styku dvou velkých bloků zemské kůry, kterými jsou sasko-durynská oblast (saxothuringikum) a lužická oblast (lugikum). Sasko-durynská oblast je tvořena převážně metamorfovanými vyvřelinami (hlavně žula) – jsou to horniny tvořené křemenem, živci, světlou a tmavou slídou. Lužická oblast je tvořena převážně mladšími horninami. Hlavní horniny tohoto komplexu jsou drob a sericitický fylit. Oblast styku obou oblastí se nazývá „středosaské nasunutí“. Tato zóna prochází přes Ostrov u Tisé, obcí Sněžník a pokračuje směrem na jihovýchod (Adamovič et al., 2020).

V oblasti národního parku docházelo k těžbě nerostného bohatství – těžba stavebního kamene z pískovců, vulkanitů nebo granitoidů (Adamovič et al., 2020).

3.1.3 Klimatické podmínky

Průměrné roční teploty na území Ústeckého kraje za rok 2018 a 2019 činily 9,7 °C, V roce 2020 byla průměrná roční teplota 9,3 °C, rok 2021 byl oproti předešlým rokům chladnější, průměr činil 8,2 °C a rok 2022 byl opět teplejší, průměr byl 9,6 °C (ČHMÚ, 2023).

Z pohledu průměrných srážek na území Ústeckého kraje byl rok 2018 podprůměrný, roční průměr činil 438 mm/rok, v roce 2019 činil roční úhrn srážek 547 mm/rok, v roce 2020 to bylo 569 mm/rok. Rok 2021 se již přiblížil dlouhodobému srážkovému normálu (640 mm/rok), průměrně tento rok spadlo 655 mm. Operativní data průměrných srážek za rok 2022 činí 524 mm/rok (ČHMÚ, 2023).

3.2 Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*)

Kůrovci jsou obecně označováni jako nejvýznamnější hmyzí škůdci v Evropě a to především z důvodu stoupajícího výskytu a většího poškození lesních porostů (Wermelinger et Seifert, 2001; Schelhaas et al., 2003; Seidl et al., 2014; Holuša et al., 2017; Stereńczak et al., 2020). Tento druh působí po celé Evropě, ale i ve světě nevídané ekonomické ztráty a negativně ovlivňuje lesní ekosystémy (Stereńczak et al., 2020). Pro minimalizaci těchto ztrát je důležité

včasně odhalit napadené stromy, které však zatím nevykazují vizuální známky stresu (Abdullah et al., 2018).

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) je typický sekundární škůdce starších smrkových porostů z řádu brouků (*Coleoptera*) a čeledi kůrovcovitých (*Scolytidae*). Napadá převážně oslabené stojící smrky, polomy či čerstvě pokácené dříví (Lesnická práce, 2007).

Množství napadeného kůrovcového dříví bylo za rok 2021 okolo 14,2 mil. m³, za rok 2020 bylo evidováno kolem 22 mil. m³ a v roce 2019 zhruba 21 mil. m³. Na celém území České republiky se v roce 2021 lýkožrout smrkový vyskytoval v tzv. kalamitním stavu. Na 1 ha tedy připadá zhruba 11 m³ ve smrkových porostech všech věkových tříd. Docházelo tak i v tomto období k překročení základního stavu, který stanovuje vyhláška MZe č. 101/1996 Sb. v aktuálním znění na hodnotu 0,20 m³ na 1 ha smrkových porostů starších 50 let (MZe 2022).

V roce 2021 činila výše těžby kůrovcového dříví v Národním parku České Švýcarsko 5 138 m³, což je zhruba 74,9 % z celkového objemu všech provedených těžeb. Zhruba 30 % z pokácené dřevní hmoty bylo ponecháno v porostech k zetlení (MZe, 2022).

Ke zvýšení stavů lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) přispívají faktory jako například nárůst průměrné roční teploty, delší období sucha a posuny vegetačního období. K rozsáhlým kalamitám přispívá akutní nebo chronický stres působený právě klimatickou změnou. Děje se tak ve všech lesích mírného pásma, a to i na území České republiky. Takovéto klimatické změny přispívají k šíření nepůvodních invazivních druhů směrem na sever. Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) je schopen eruptivního populačního růstu, který ve většině případů způsobuje odumírání stromů, především smrku ztepilého (*Picea abies*), ve velkém rozsahu (Bentz et al., 2019; Stereńczak et al., 2020; Abdollahnejad et al., 2021; Trubin et al., 2022).

3.2.1 Rozšíření druhu *Ips typographus*

Ips typographus má relativně velké geografické rozšíření, vyskytuje se v celé Evropě a severní Asii s výjimkou Velké Británie a Středomoří. Souvislý areál rozšíření má i ve Skandinávii. Původně se jednalo o druh vyskytující se v horských smrčinách, ze kterých se postupně rozšířil do smrkových monokultur v nižších polohách. Dnes se v České republice vyskytuje všude ve smrkových porostech (Lesnická práce, 2007; Bentz et al., 2019).

3.2.2 Vývoj *Ips typographus*

V podmínkách České republiky má *Ips typographus* nejčastěji dvě generace do roka, méně často i tři. První rojení probíhá na přelomu dubna a května, druhé pak od poloviny června

do počátku srpna. Třetí může probíhat následně v srpnu až v září. Změny klimatu poskytují kůrovci vhodné podmínky pro vytvoření dalších generací během jednoho roku a přispívají k jejich šíření dále na sever (Lesnická práce, 2007; Trubin et al., 2022).

Wermelinger et Seifert (2001) popisují u vývoje lýkožroutů tzv. sesterská rojení. Sesterské rojení probíhá po naklazení vajíček, kdy samička přelétne na další strom, kde bez kopulace naklade další vajíčka. Tento jev je u *Ips typographus* dobře popsán.

První nalétávají na strom samečci, vyhlodají tzv. snubní komůrku a následně nalétávají samičky. Obvykle na jednoho samečka připadají 1-3 samičky. Samičky v požercích během zhruba týdne nakladou vajíčka, kterých bývá až okolo 100 kusů. Po dalších 6-18 dnech se líhnou larvy, které se vyvíjejí 7-50 dní. Následně se larvy kuklí, v této fázi setrvávají další týden. Po tomto stádiu následuje líhnutí bílých dospělců, kteří postupně žloutnou až zhnědnou. V tomto stádiu provádějí tzv. zralostní žír, který trvá asi 2-3 týdny a následně probíhá vylétnutí a rojení (Lesnická práce, 2007).

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) se žíví a rozmnožuje pod kůrou stromů, které mají dostatečnou tloušťku kůry. *Ips typographus* může přezimovat v jakémkoliv stádiu vývoje a to jak pod kůrou, tak v hrabance (Lesnická práce, 2007; Bentz et al., 2019).

Wermelinger (2004) uvádí ve své studii souhrn známých informací o kůrovcích publikovaných v letech 1990 až 2002. Zmiňuje například tyto hodnoty: minimální teplota pro vývoj je 6-8,3 °C, teplota pro klazení vajíček se pohybuje okolo 11,4 °C, optimum pro vývoj vajíček a larev je až okolo 29-30 °C. Optimální letová teplota se pohybuje v rozmezí 22-26 °C, přičemž letová aktivita probíhá zhruba od 9 hodin dopoledne do 21 hodin večer. Nejvyšší aktivita probíhá vpoledne a brzy odpoledne. Délka jednotlivých letů byla stanovena na více jak 500 m. Nejrizikovější stromy jsou ty stojící na jižní či západní expozici s dlouhodobým osluněním ve věku od 70 do 100 let a ty jedinci napadení hnilobou.

3.2.3 Hostitelské dřeviny

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) se vyskytuje především na smrku ztepilém (*Picea abies*), výjimečně může napadat i modřín opadavý (*Larix decidua*), vzácně i borovici lesní (*Pinus sylvestris*). Může se však vyvíjet i na jiných druzích smrků jako například na *Picea omorika*, *P. obovata*, *P. jezoensis* a na borovici *Pinus cembra sibirica* (Lesnická práce, 2007).

3.2.4 Přirození nepřátelé

Je známo, že i lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) má mnoho přirozených nepřátel, mezi které se řadí predátoři i parazitoidi. Nejznámějšími čeleděmi jsou *Cleridae*, *Dolichopodidae*, *Pteromalidae* a *Braconidae* (Wermelinger, 2004).

Existují druhy, které jsou přímo specializované na kůrovce. Jedná se o pestrokrovečníka mravenčího (*Thanasimus formicarius*) spolu s ním to může být i pestrokrovečník *Thanasimus femoralis*. Každá larva pestrokrovečníka během svého vývoje spořádá zhruba 50 kusů larev kůrovců, dospělci jich během života spořádají okolo 100 kusů. Zástupci z řad brouků jsou například drabčik *Nudobius lentus* a *Pytho depressus*. Z řádu blanokřídlých lze zařadit parazitoidy jako například lumčika (*Braconidae*) *Coeloides bostrichorum*. Co se týče dvoukřídlých, tak je to *Medetera signaticornis*, kteří jsou predátorem larev (Wermelinger, 2004; Lesnická práce, 2007).

Pokud dojde k odskrytí larev skrytých pod kůrou, bývají požírány vosami, mravenci ale i různými druhy střevlíků. Mezi predátory můžeme zařadit i ptáky, například šplhavce (Lesnická práce, 2007).

Na tělech lýkožroutů se mohou vyskytovat i roztoči (*Uropoda polytricha* Vitzth.) nebo hlístice (*Diplogaster bütschli*). Dále to mohou být i entomopatogenní houby z rodu *Beauveria* (*B. bassiana*, *B. densa*, *B. globulifera*) nebo různé druhy mikroorganismů (Lesnická práce, 2007).

3.2.5 Kontrola a monitoring

Vyhláška MZe ČR číslo 101/1996 Sb. § 3 je lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) považován za kalamitního škůdce spolu s bekyní mniškou (*Lymantria monacha*), lýkožroutem lesklým (*Pityogenes chalcographus*), lýkožroutem severským (*Ips duplicatus*), klikorohem borovým (*Hylobius abietis*), obalečem modřínovým (*Zeiraphera griseana*) a ploskohřbetkami (*Cephalcia*). Vyhláška stanovuje základní, zvýšený a kalamitní stav rozšíření lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) (Vyhláška č. 101/1996 Sb., 1996; Lesnická práce, 2007).

3.2.5.1 Základní stav

Při základním stavu objem kůrovcem napadeného dříví z předchozího roku v průměru nedosáhl 1 m³ na 5 ha smrkových porostů, a nedošlo ani k vytvoření ohnisek lýkožrouta. Kontroly probíhají formou pochůzek s využitím lapáků a lapačů (Vyhláška č. 101/1996 Sb., 1996; Lesnická práce, 2007).

3.2.5.2 Zvýšený stav

Zvýšený stav je charakteristický tím, že objem kůrovcového dříví z předchozího roku v průměru dosáhl nebo překročil 1 m³ na 5 ha a nedosáhl 5 m³ na 5 ha smrkových porostů ale došlo k vytvoření ohnisek výskytu. Tento stav již upozorňuje na možnost kalamitního přemnožení lýkožrouta (Vyhláška č. 101/1996 Sb., 1996). Při kontrole jsou využívány lapáky a lapače ve všech porostech starších 60 let, v případě, že je smrk zastoupen ve více jak 20 %. Využití lapáků a lapačů se orientuje na nejohroženější místa. Bývá umístován 1 lapák/lapač na 5 ha. Jde především o obranou funkci (Vyhláška č. 101/1996 Sb., 1996; Lesnická práce, 2007).

3.2.5.3 Kalamitní stav

Pokud objem kůrovcového dříví z předchozího roku dosáhl nebo překročil 5 m³ na 5 ha smrkových porostů, jedná se o tzv. kalamitní stav. Při tomto stavu lýkožrout způsobuje rozsáhlá poškození lesních porostů ve stěnách, uvnitř porostů vznikají ohniska případně plošné napadení lesních porostů (Vyhláška č. 101/1996 Sb., 1996; Lesnická práce, 2007).

3.2.6 Ochrana

Ochrana lze shrnout do tří základních kroků. Jde především o včasné zpracování napadeného dříví, včasné odstranění napadeného dříví před dokončením vývoje a soustředění a hubení lýkožroutů v ohniscích, a to s využitím lapáků, feromonových lapačů či otrávených lapáků (Lesnická práce, 2007).

Existuje mnoho typů lapačů, například Theysohn. K odchytu lýkožroutů a jejich lákání do lapačů či na lapáky se využívají feromony. Využívány jsou například komerční feromony Pheroprax[®] a Chalcoprax[®] (Jurc et al., 2006).

Mezi různými druhy feromonů se nevyskytují významné rozdíly v množství a podílu odchycených samců *Ips typographus*. Lepšího efektu lze docílit s využitím feromonů, které mají sníženou rychlost uvolňování. Za nejvyužívanější feromony lze považovat právě Pheroprax[®], IT Ecolur (Jakuš et Šimko, 2000).

Pro ochranu smrkových porostů jsou důležitá důsledná preventivní opatření, mezi která lze zařadit vyhledávání, vyznačování a evidenci. K tomu, aby mohlo být napadené dříví včas odvezeno z porostů se tradičně v lesnictví využívají terénní pochůzky, při kterých se vyhledávají napadené stromy podle závrťů v kůře a drtinek, které spadají k patě stromu (Abdullah et al., 2018). Díky těmto opatřením lze včas dohledat napadené porosty a brzy je zpracovat tak,

aby nedocházelo k dalšímu napadení ostatních stojících stromů. Nutné je i důsledné odstraňování materiálu vhodného k rozmnožování různých druhů kůrovců – jedná se o vytěžené dříví, polomy, oslabené stromy (Lesnická práce, 2007; Stereńczak et al., 2020).

Průlom v tomto směru přináší metody dálkového průzkumu Země. Poskytují nové, rychlé a přesné možnosti v detekci a mapování napadených porostů, které se mohou nacházet na velmi rozsáhlých územích. Fungování metod dálkového průzkumu Země je spojeno s různými funkcemi a strukturálními rysy rostlin (množství chlorofylu, dehydratace, množství dusíku, obsah vody apod.). Změny v těchto rysech lze rozlišit pomocí různých barevných spekter, které mohou být jak ve viditelném spektru, tak v neviditelném spektru. Obecně se tyto změny prokazují na změně odrazivosti určitých spekter (Abdullah et al., 2018).

3.2.7 Obranná opatření

Obranným opatřením předchází právě preventivní opatření, která pokud se provádějí systematicky, včas a správně, mohou snížit nutnost využití obranných opatření případně zvýšit jejich účinnost. V obraně jsou využívány lapáky, lapače, otrávené lapáky, insekticidní sítě, odkorňování apod. Pro chemickou asanaci jsou využívány přípravky uvedené v Seznamu povolených přípravků na ochranu rostlin, který je vydáván Ministerstvem zemědělství ČR (MZe) společně se Státní rostlinolékařskou správou, nebo v Seznamu povolených přípravků na ochranu lesa, který je vydáván Výzkumným Ústavem lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM) (Lesnická práce, 2007).

Wermelinger (2004) zmiňuje, že optimální období pro těžbu napadených stromů je hlavně v období od napadení po vylétnutí první generace. V případě využití stojících lapáků byla dokázána účinnost až 30krát vyšší jak u feromonových lapačů. Wermelinger (2004) také uvádí, že při mechanickém odkorňování dochází k poměrně velké mortalitě jedinců, a to až v 93 % případů.

3.3 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) je obor zabývající se metodami bezkontaktního získávání dat a informací pomocí snímání povrchu Země zařízeními, které nejsou obecně v kontaktu s povrchem ani se zkoumanými objekty (Lillesand et al., 2015; Toth et Józskó, 2016; Žížala et al., 2021).

K získání dat jsou zapotřebí různé druhy senzorů, které dokážou vzdáleně snímat zvolené objekty. Nasnímaná data lze analyzovat a následně tak získat informace o jevech, oblastech či objektech (Lillesand et al., 2015; Toth et Józsków, 2016).

Díky snímkování objektů či ploch můžeme zjišťovat další užitečné, a především přesnější informace například o výšce či objemu daného tělesa. Do metod DPZ lze obecně zahrnout metody zpracování získaných dat, jejich analýzu ale i jejich výslednou interpretaci do požadovaného výsledku (Lillesand et al., 2015; Žížala et al., 2021).

Vývoj technologií dálkového průzkumu Země v posledních desetiletích umožnil využívat hned několik typů senzorů (Fassnacht et al., 2016).

Fassnacht et al. (2016) uvádí, že metodami DPZ lze například mapovat druhy stromů, jejich umístění atd. Dále se zmiňuje, že v současné době chybí studie zaměřené na větší geografické oblasti. Většina studií se zabývá spíše optimalizací přesnosti klasifikace.

Dálkový průzkum Země se neustále zlepšuje především díky nebyvale rychlému vývoji, který je poháněn pokroky v oblasti senzorů spolu s rozvíjející se informační strukturou (Toth et Józsków, 2016).

3.3.1 Historie v DPZ

Než mohl začít opravdový dálkový průzkum Země, prošly letecké prostředky dlouhým vývojem, který započal již ve třetím století v Číně, kde využívali létající papírové lampióny štěstí. V Evropě byli průkopníky v leteckém světě v roce 1782 bratři Montgolfierovi, kteří vynalezli horkovzdušné balóny. Další převrat v létání přinesli američtí bratři Wrightovi, kteří sestrojili aerodynamický tunel, v němž mohli testovat různé profily křídel letadel v kombinaci se směrovkou. První zkušební let se s jejich letadlem uskutečnil dne 17. prosince 1903. Letadla byla využívána především ke sportovním nebo poštovním účelům. Velmi významný rozvoj různých technologií nastal ve válečném období. Během obou světových válek bylo jedním z cílů ovládnout vzdušný prostor a došlo tak k rychlému vývoji leteckých prostředků. Po dosažení vzdušného prostoru lidé začali usilovat o dobytí vesmíru (Surový et al., 2019; Žížala et al., 2021).

Započal vývoj umělých družic, které obíhají po oběžné dráze Země. První družice Sputnik I. byla vynesena na oběžnou dráhu Sovětským Svazem dne 4. října 1957. Start této rakety zahájil závod o prvenství v dobývání vesmíru (Pavelka, 2010; Surový et al., 2019).

Satelitní technologie byly využívány především ve vojensko-politickém světě ale své využití nalézaly i pro civilní využití např. v meteorologii či telekomunikaci (Pavelka, 2010).

V současné době se na oběžné dráze Země vyskytují tisíce družic, které jsou využívány k vojenským, navigačním, telekomunikačním, vědeckým i pozorovacím účelům. Satelity poskytují například snímky povrchu Země. V posledních letech jsou taktéž hojně využívány drony (Surový et al., 2019; Žižala et al., 2021).

Data získaná z družic se řadí mezi základní informační zdroje, které lze využívat například v lesnictví, zemědělství, ekologii, krajinném inženýrství, geografii, kartografii, meteorologii nebo při speciálních aplikacích v rybolovu, navigacích a podobně. Po rychlém vývoji technologií byl prokázán význam ve snímkování zemského povrchu a mohl tak vzniknout nový obor nazývaný „Dálkový průzkum Země“ (Pavelka, 2010).

3.3.2 Nosiče dálkového průzkumu Země

Nosiče jsou v DPZ obvykle prostředky, které nesou snímače určené ke snímání zemského povrchu. Bývají to obvykle prostředky využívané například k přepravě lidí, případně materiálů nebo prostředky k plnění telekomunikačních či meteorologických funkcí. Jedná se především o letadla nebo satelity, případně mohou být senzory umístěny i na drony (Mozgeris et al., 2018), na pozemní vozidla nebo mohou být nesené na zádech v tzv. „backpack“ provedení (Hartley et al., 2022). Výběr nosiče závisí na několika faktorech (Obrázek 2) jako je například rychlost měření, správnost, přesnost a především cena (Žižala et al., 2021; Surový et al., 2022).

Pro přesné a efektivní měření s vysokým rozlišením by bylo v ideálním případě zapotřebí co nejrovnoměrnějšího a co nejpomalejšího pohybu nosiče. Pro co nejkvalitnější měření je zapotřebí výběr vhodného nosiče. Zefektivnit měření lze například využitím více snímačů najednou, případně kooperativním snímáním (Toth et Józkw, 2016).



Obrázek 2: Rozdělení druhů nosičů se vztahem k rozsahu, rychlosti, přesnosti a správnosti měření.

3.3.2.1 Letadla

Velké množství relevantních informací o stavu lesních porostů nám mohou poskytnout právě snímky získané z leteckého snímkování, především pokud jde o georeferencované snímky, které jsou definované souřadnicovým systémem nebo o ortorektifikované bez geometrického zkreslení (Kuželka et Surový, 2017).

Letadla jsou základním typem nosiče, který se pohybuje a pracuje v atmosféře, mohou to být motorová i proudová letadla. Hodí se především pro sběr dat na úrovni jednotlivých podniků, které lze nasnímat při jednom přeletu (Surový et al., 2019; Surový et al., 2022). Mezi tyto nosiče lze zařadit například i vrtulníky, které nalézají své uplatnění převážně při přesnějším monitoringu z menších výšek od 50 do zhruba 2 000 m. Při využití a výběru letadel je důležité zhodnotit určité podmínky, jako například možnost letu při nízkých rychlostech, stabilitu letu, délku doletu a další jako například klimatické podmínky (Mudrych, 1985). Pro DPZ jsou využívána vrtulová letadla jako Cessna 206, Cessna 208, Cessna 402, Commander 690, Diamond DA42, Piper Navajo. Tato letadla pracují ve výškách od 1 000 do 10 000 m, pro snímání se využívají hlavně fotoaparáty a LiDARové senzory. Využita mohou být i trysková letadla – LearJet 35A, které létá ve výšce 14 000 m, využívat může kamery GeoSAR nebo InSAR. U helikoptér typu Bell 206, Eurocopter A350, Robinson R44 nebo Schweizer 333 je letová výška okolo 3 000 až 5 000 m a nejvhodnější jsou fotoaparáty nebo LiDARové senzory. Mimo tyto běžné prostředky jsou v poslední době využívány i ultralighty jako například AutoGyro Cavalon, tzv. vírník, který se pohybuje ve výškách do 3 000 m a opět může využívat LiDAR nebo fotoaparáty (Toth et Józków, 2016).

Data, která získáme při leteckém sběru dat můžeme rozdělit na optická (fotografie, multispektrální a hyperspektrální) a laserová. S využitím letadel lze získat i radarová data, která se při zkoumání lesů využívají málokdy. Pro skenování za pomoci letadel se využívají menší letadla nesoucí jeden ale i více senzorů, a to jak ty aktivní, tak pasivní. Zároveň lze skenovat laserově a multispektrálním či hyperspektrálním snímkováním (Surový et al., 2019; Surový et al., 2022).

Nejvíce prostudovaná a známá se zdají být data získávaná z leteckých laserových skenerů (ALS = Aerial Laser Scanning), avšak zájem o využití dat z digitální letecké fotogrammetrie (DAP = Digital Aerial Photogrammetry) roste. Výstupem obou těchto metod jsou 3D bodová mračna (Goodbody et al., 2019; Surový et al. Kuželka, 2019).

Letecké snímky lze pořizovat prakticky kterýmkoliv typem fotoaparátu. Některé úspěšné aplikace využívaly letecké snímky pořizené manuálními fotoaparáty. Dnes jsou pro tyto účely navrženy speciální kamery, které zvládají pořizovat velké množství fotografií v rychlém sledu a maximální geometrickou přesností (Lillesand et al., 2015).

Při laserovém skenování je povrch snímán v jednotlivých pásech, které jsou následně rozděleny do dlaždic (*tiles*). Toto rozdělení usnadňuje další zpracování dat. Rozlišení jednotlivých snímků je dáno několika faktory: letovou výškou, letovou rychlostí, překryvem letových linií a rychlostí snímacího zařízení (Surový et al., 2019).

Mezi nejčastěji zjišťované údaje v porostech patří výška porostu nebo stromu, plocha, průměry a objemy, které lze považovat za nejzásadnější parametry při plánování těžby dřeva apod. (Surový et al. Kuželka, 2019).

3.3.2.2 Satelity

Žížala et al. (2021) zmiňují, že nejvyužívanější technologií v DPZ jsou právě družicové systémy. Surový et al. (2022) uvádí, že se jedná o umělé družice Země nesoucí senzory, které umožňují získat data velkého rozsahu jež jsou vhodná pro monitorování velmi velkých území, jako jsou například státy či světadíly. Umělé satelity se pohybují v tzv. trajektoriích (orbitech). Mudrych (1985) píše o trajektoriích, které bývají kruhové či eliptické a výška letu může být od několika set kilometrů po desítky tisíc kilometrů. Surový et al. (2022) dále vysvětlují, že stanovené území snímají umělé družice periodicky a poskytují tak opakované údaje o daném území.

Orbity družic jsou nastaveny tak, aby pokryly celý zemský povrch. Pro urychlení snímání mohou být satelity zdvojeny (např. Pleiades, Sentinel-2), jejich dráhy jsou synchronizovány anebo mohou být synchronizovány až stovky družic (např. Planet).

Vesmírné satelity jsou využívány již více jak 40 let (Lulla et al., 2012). Toth et Józkóv (2016) připomínají, že některé satelity, např. Landsat-1 vypuštěný v roce 1972, SPOT-1 v roce 1986, Ikonos v roce 1999, jsou považovány za zahajovatele éry komerčních satelitů. Satelity svým dosavadním vývojem umožnily získávat cenově dostupné snímky.

Od roku 2016 zemský povrch zachycuje konstelace satelitů společnosti PlanetScope (PS), která poskytuje multispektrální snímky pro komerční využití. Tato firma se zabývá vývojem malých satelitů (*smallsats, cubesats*), které je mnohem jednodušší a rychlejší vyrábět ale i vypouštět do vesmíru. Tato technologie přináší nové příležitosti ve vývoji a mohou být častěji aktualizovány a doplněny v případě poruch. Z tohoto důvodu se malé komerční satelity, konkrétně družice společnosti PS, jeví jako zásadní pro snímkování Země (Frazier et Hemingway, 2021).

Pavelka (2021) popisuje výhody a nevýhody, které družicové systémy přinášejí. Mezi řadu výhod lze zařadit například rychlost a komplexnost sběru dat jednoho území, bezkontaktní měření velkého množství veličin, možnost volby typu snímače společně s možností zvolení rozlišení a dále například periodičita sběru dat. Dále se lze zmínit i o existenci archivních fotografií. K nevýhodám sběru dat za pomoci družicových systémů lze zařadit například vyšší cenu, nedostupnost dat v určitém období, která může být způsobená denní dobou, změnami atmosférických podmínek, změnami počasí. Žížala et al. (2021) mezi nevýhody zařazuje například i malé prostorové rozlišení.

Za pomoci satelitů lze data získávat pouhým snímkováním daného území pomocí fotografií, mimo to lze data získávat například měřením, které je převáděno do obrazové podoby v mikrovlnné části spektra (zobrazující radary), v tepelné infračervené oblasti a dalších částech elektromagnetického spektra (kontroly radioaktivního záření). Družice dokážou získat ale i řadu dalších měření, která se dále nezobrazují (laserová měření, atmosférická mikrovlnná měření, měření ozonu atd.) (Pavelka, 2010).

Snímky ze satelitů nám poskytují hustá data časových řad, která obsahují časové informace o objektech na povrchu Země. Tato data se používají například k rozlišení různých typů

krajinného pokryvu, ke sledování sezónní vegetace, k odhadům úrody a výnosů nebo ke zkoumání vazby mezi ekosystémy a klimatem (Schneider, 2012; Johnson et al., 2016).

Při detekci poškozených stromů různými druhy škůdců jsou nejvyužívanější technikou optické senzory. Jejich výhodou je zvýšený počet spektrálních pásem. Vlastnosti těchto pásem lze efektivně využít pro monitorování a mapování narušených oblastí (větrné kalamity, poškození hmyzími škůdci apod.). Pro včasnou detekci před poškozením kůrovci lze využít například satelitní snímky WorldView-2, který má vysokou citlivost (Abdollahnejad et al., 2021).

3.3.2.3 Drony

Vývoj dronů sahá až k vynálezci jménem Nikola Tesla, který v roce 1898 získal patent na teleautomatizaci. Jednalo se o dálkově ovládané motorové loďky, ale v jeho úvahách se objevovaly i nápady na sestavení bezpilotního leteckého systému (Karas et Tichý, 2016). V současné době probíhá velmi rychlý vývoj, jež přispívá k hojnému využívání dronů v praxi dálkového průzkumu Země. Drony nebyly vyvinuty primárně pro DPZ jako takový, původně ale i v současnosti jsou hojně využívány ve vojenském sektoru (Toth et Józkw, 2016).

Surový et al. (2022) popisuje rychlý rozmach během několika posledních let ve vývoji bezpilotních letadel (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) a bezpilotních systémů (UAS – Unmanned Aerial Systems, RPAS – Remotely Piloted Aerial Systems), tzv. dronů. Novák (2021) zmiňuje, že označování dronů jakožto bezpilotní letadla je již zastaralý a doporučuje se využívat termín bezpilotní systémy.

Drony umožňují průzkum především menších území, a to převážně z důvodu přísné legislativy, která omezuje možnosti letu na území České republiky. Tyto bezpilotní systémy mohou v dnešní době nést celou řadu nosičů – např. fotoaparáty s vysokým rozlišením, zmenšené hyperspektrální senzory nebo lehké laserové skenery (Surový et al., 2022).

Karas (2017) porovnává výhody a nevýhody využívání dronů oproti jiným, příbuzným metodám. Za výhody lze považovat například: jednoduché ovládání a stabilita na rozdíl od leteckých modelů, jejich malá velikost a váha, snadná mobilita a flexibilita, velké množství dronů na výběr, nízká cena provozu, online přenos obrazu na velkou vzdálenost v reálném čase, možnost vysokého rozlišení, využití i za nízké viditelnosti. Hlavní nevýhody při využívání dronů jsou následující: krátká doletová vzdálenost, krátký letový čas, malá nosnost, a především nejednotná mezinárodní legislativa.

Díky velkému zájmu o UAS je kladen důraz i na vývoj vhodných snímacích senzorů, které musejí být malé, lehké a současně výkonné. Nejčastěji jsou využívány optické kamery, které jsou nejdostupnější v lehkých a levných variantách, mimo to jsou využívány například nemetrické kamery, které vytvářejí hustá bodová mračna. Vývoj je směřován především ke zdokonalování již známých systémů, které jsou jen přetvářeny. Mezi využívané LiDARové snímače lze zařadit ultralehký Velodyne VLP-16 nebo výkonný VUX-1. U hyperspektrálních snímačů je to kamera Rikola. Nejsou to však jediné systémy, na kterých se pracuje (Toth et Józków, 2016).

3.3.2.3.1 Kategorie dronů

Karas (2017) rozděluje drony do čtyř kategorií, a to na multikoptéry, bezpilotní vrtulníky, bezpilotní letouny a křídla. Multikoptéry k pohybu využívají vrtule a motory, a jsou schopné kolmo vzlétnout. S vyšším počtem vrtulí vzrůstá i stabilita a bezpečnost letu. Tyto multikoptéry jsou opatřeny tzv. gimbaelem, na který se umísťují snímače. Bepilotní vrtulníky bývají větší a k letu využívají spalovací motory. Ty se nevyužívají tak často. Bepilotní letouny vynikají možností delších letů oproti multikoptérám. Mívají pevně umístěné senzory, kterými snímají krajinu. Start těchto letounů probíhá buďto hodem rukou, odpalovacími drahami nebo mohou být opatřeny vrtulí pro kolmý vzlet. Křídla jsou speciálním typem letounů, jejichž princip spočívá v jejich unikátní konstrukci. Jsou tenké a svým tvarem připomínají právě křídlo, tvořené jsou například z uhlíkových vláken.

Další rozdělení dle MTOM v ČR bylo stanoveno podle maximální vzletové hmotnosti, do 0,91 kg, mezi 0,91 až 7 kg, kategorie mezi 7 až 20 kg a ty nad 20 kg. Pro tyto kategorie jsou dále stanoveny minimální horizontální vzdálenosti od cizích osob, nemovitostí a zástavby. Při hmotnosti do 7 kg záleží hlavně na uvážení pilota, kdežto u těžších strojů je stanovena vzdálenost na více jak 50 m při vzletu a přistání a na 100 m od osob a staveb během letu, 150 m platí u osídlených prostor (Karas, 2017).

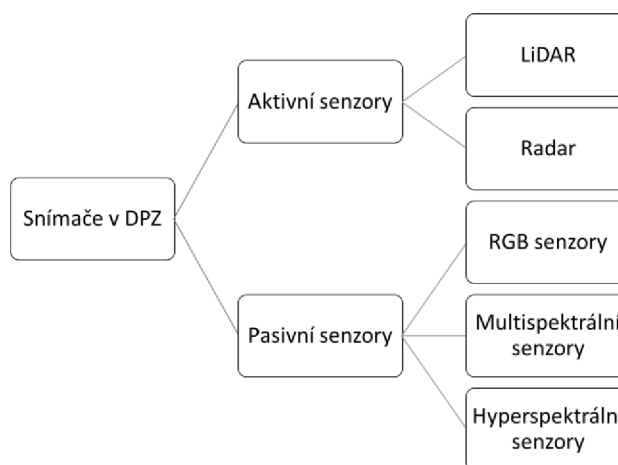
3.3.2.3.2 Legislativa

Využívání dronů podléhá v České republice zákonu č. 49/1997 Sb. o civilním letectvu. Pro létání s drony může být zapotřebí povolení k létání s drony, které je nutné v případě využívání ke komerčním činnostem (využití k Leteckým pracím – LP), pro vlastní podnikatelskou činnost (využití k Letecké činnosti pro vlastní potřebu – LČpVP) a k provozu modelu letadla či dronu, které jsou těžší jak 20 kg při rekreačním či sportovním využití (Karas, 2017).

3.3.3 Snímače v DPZ

Základní součástí jakéhokoliv systému v dálkovém průzkumu Země jsou snímače, kterými lze snímat prostor (Toth et Józków, 2016; Žížala et al., 2021).

Surový et al. (2022) rozdělují snímače využívané v DPZ na pasivní a aktivní senzory (Obrázek 3). Pasivní senzory pracují se signály, které se za normálních okolností vyskytují v přírodě. Zaznamenávají tedy odraz světla od objektů. Jedná se především o elektromagnetická záření různých vlnových délek – záření ve viditelném spektru, elektromagnetická záření jako je blízké infračervené záření (NIR). Aktivní senzory pracují s vlastním zdrojem pro osvětlení objektů, s jehož pomocí zaznamenávají obraz. Mezi pasivní senzory lze zařadit běžné fotoaparáty, mezi aktivní senzory zařazujeme například radary nebo lasery.



Obrázek 3: Rozdělení snímačů v DPZ.

3.3.3.1 Pasivní senzory

Jde o nejstarší technologii, která je založena na snímání prostoru za pomoci klasických fotoaparátů či kamer. Tato technologie poskytuje statický obraz ve viditelném spektru. Dříve se využívaly filmy, dnes tuto technologii nahradily digitální senzory (Toth et Józków, 2016).

Tento druh senzorů lze rozdělit na multispektrální a hyperspektrální (zobrazovací spektroskopie) systémy. Většina multispektrálních sensorických systémů pracuje s typicky 4-8 pásmy, oproti tomu hyperspektrální systémy využívají úzká, souvislá pásma, která mohou snímat viditelnou (VIS), blízkou infračervenou (NIR) i krátkovlnnou infračervenou (SWIR) část elektromagnetického spektra (Fassnacht et al., 2016).

Surový et al. (2022) rozdělují pasivní senzory na RGB senzory, multispektrální senzory a senzory hyperspektrální.

3.3.3.1.1 RGB senzory

Surový et al. (2022) popisují RGB senzory jako klasické fotoaparáty či kamery. Tato zařízení snímají obraz ve viditelné části spektra. Výsledným výstupem jsou fotografie, které kódují barvu v každém jednotlivém pixelu v kombinaci červené (R), zelené (G) a modré (B).

3.3.3.1.2 Multispektrální senzory

Jedná se o digitální optické senzory jejichž zaznamenávání vlnových délek je rozšířené o infračervené světlo. Takovéto senzory obvykle zaznamenávají spektrální hodnoty minimálně na čtyřech kanálech, ty novější mívají pět a více kanálů. Jedná se o kanály zachycující viditelné spektrum (R, G, B), okrajové červené světlo (RE, red-edge) a kanály zachycující blízké infračervené záření (NIR, near infrared) nebo krátkovlnné infračervené záření (SWIR, short-wave infrared) (Surový et al., 2022).

Pro získání kvalitnějších snímků je potřeba vyšší multispektrální rozlišení, např. se často využívá snímání v 8-15 pásmech. Je to typický příklad pro multispektrální senzory využívané na satelitech, kde je jednoduché implementovat velké množství pásem, díky využití lineárních senzorů (Toth et Józkw, 2016).

Multispektrální data dálkového průzkumu Země byla velmi využívána pro mapování využití či pokryvu v různých měřících, avšak i tento způsob má své hranice. Například u spektrálních rysů, které si jsou velmi podobné, je těžké rozlišování, pokud je využito jen málo spektrálních pásem (Petropoulos et al., 2013).

3.3.3.1.3 Hyperspektrální senzory

Pokud je zapotřebí dosáhnout vysokého spektrálního rozlišení a širokých spektrálních rozsahů (až ve stovkách pásem), je vhodné zvolit hyperspektrální senzory. Díky svým vlastnostem poskytují cenné informace i pro klasifikaci dřevin (Toth et Józkw, 2016; Wang et al., 2023).

Takovéto senzory jsou schopny zaznamenat odraženou energii od objektů na povrchu Země v několika úzkých souvislých spektrálních pásmech (Petropoulos et al., 2013). Zaznamenávají od viditelného po infračervené pásmo (VNIR, visible and near infrared). Hyperspektrální senzory udávají každému pixelu podrobnou spektrální křivku v rozsahu od 400 do 1 000 nm, kterou charakterizují vlastnost snímaného povrchu (Surový et al., 2022). Jsou tak schopny poskytovat mnohem přesnější úroveň spektrálních informací zaznamenaných selektivními kanály daného senzoru. Hyperspektrální snímky v DPZ se tak staly jedním z nejvýznamnějších zdrojů

dat a lze je využít pro různé zpracování, jako například pro klasifikaci krajinného pokryvu a pro detekci změn (Petropoulos et al., 2013).

Hyperspektrální data ovšem nemohou poskytnout přesné obrazy struktur porostů ve vertikálním směru, poskytují však údaje o povrchu. Pro odstranění tohoto nedostatku lze využívat hyperspektrální data v kombinaci s LiDARovými technologiemi (Wang et al., 2023).

Petropoulos et al. (2013) uvádí senzor Hyperion jako jeden z nejpoužívanějších hyperspektrálních senzorů. Jedná se o jeden z prvních hyperspektrálních senzorů, který byl vypuštěn na satelitu Earth Observer-1 (EO-1) v rámci programu NASA New Millennium Program v roce 2000.

3.3.3.2 Aktivní senzory

Surový et al. (2022) mezi aktivní senzory zařazují novější LiDARové a starší radarové technologie. Toth et Józskó (2016) poukazují na fakt, že aktivní senzory mohou poskytovat lepší pozorovací schopnosti, protože mohou být více specializované a konkrétně zaměřené, a navíc nebyvají tolik závislé na okolnostech prostředí.

3.3.3.2.1 LiDAR (Light detection and Ranging)

V posledních letech se staly dostupnějšími LiDARová zařízení, která se využívají u vesmírných i pozemních měření. Fungují na základě soustředěného paprsku, který je distribuován ze skenovacího zařízení směrem k cíli, od něhož se odraží zpět k senzoru. Výsledkem je sada 3D bodů, které představují snímané povrchy. Vzdálenost, kterou paprsek urazí lze měřit pomocí tranzitního času pulzu nebo měřením fázového posunu společně se zjištěným počtem celých vln známé délky mezi cílem a senzorem. V současnosti se LiDAR zařízení využívají na všech platformách – pozemní technologie, UAV, letecké prostředky ale i ty satelitní (Toth et Józskó, 2016; Lausch et al., 2017; Surový et al., 2022).

Bo et al. (2011) zmiňují vhodnost využití systému *Multi-Wavelength Canopy LiDAR* (MWCL) pro monitorování vegetace. Samotný přijímač je složen ze čtyř kanálů, které zachycují zpětné signály ve čtyřech vlnových délkách (556 nm, 670 nm, 700 nm, 780 nm). Tyto vlnové délky vhodně zobrazují například koncentraci chlorofylu, obsah dusíku i další biochemické a biofyzikální (rozměry stromů, vlastnosti korun) vlastnosti (Lausch et al., 2017). Systém MWCL tak poskytuje mnohem přesnější údaje než samotný LiDAR s jednou vlnovou délkou. LiDAR zařízení s jednou vlnovou délkou existují delší dobu, ale jejich vývoj je pomalý z důvodu vysoké složitosti snímače a malého trhu (Gelbart et al., 2002; Toth et Józskó, 2016).

Gwenzi et Lefsky (2014) doplňují, že za pomoci LiDAR systémů lze měřit výšku vegetace, nadzemní biomasy ale i ukládání uhlíku. Pro studie v malém měřítku je vhodný systém *Discrete return LiDAR* (DRL), jež byl využíván na vesmírné družici ICESat-GLAS, která již byla vyřazena z provozu. Náhradou za něj je mise ICESat-2 (pozn. autora: vypuštěna na oběžnou dráhu v roce 2018), která využívá techniku počítání fotonů. Lausch et al. (2017) uvádějí i vhodnost těchto zařízení k monitorování lesních porostů čímž lze získat 3D struktury korun, ale i toho co se nachází pod korunami.

Zprvu byly LiDARové senzory schopny zaznamenat pouze první nebo poslední odraz paprsku což může být vrchol stromu a terén. Novější typy senzorů mohou detekovat a zaznamenat celou dráhu paprsku LiDAR, navíc mohou poskytnout další atributy odrazu, kterými jsou například amplituda nebo intenzita, jež mohou být nápomocné v další klasifikaci a zprostředkovávat tak podrobnější výsledky (Lausch et al., 2017). Pro inventarizaci strukturních proměnných lesů je vhodné například spojovat LiDARová bodová mračka s optickými snímky (Latifi et Heurich, 2019; Krzystek et al., 2020).

LiDARové technologie lze rozdělit na vysokoenergetické (které představují největší segment), nízkoenergetické, jednofotonové systémy a systémy v Geigerově módu, které jsou v současnosti vyvíjeny (Toth et Józków, 2016).

3.3.3.2 Radar (Radio Detection and Ranging)

Skenování za pomoci radarů se systematickou strukturou (SAR, Synthetic Aperture Radar) funguje na podobném principu jako u laserového skenování. Ze zařízení je vyslán úzce lokalizovaný mikrovlnný signál z antény k cíli, který je posléze opět zachycen snímačem. Pro skenování je využíváno elektromagnetické záření rádiového spektra – C (4-8 GHz) a L (1-2 GHz) jsou nejčastěji využívaná pásma (Lausch et al., 2017; Surový et al., 2022).

Pracovní výška radarových systémů musí být o něco vyšší než u LiDAR tak, aby se zvýšila šířka záběru zkoumané oblasti (Toth et Józków, 2016).

Radarové zařízení vynikají schopností snímat i v prostředí, které je pro VNIR senzory neprůhledné, jde například o mraky či mlhu (Lausch et al., 2017; Surový et al., 2022).

Toth et Józków (2016) popisují palubní radarové systémy jako poměrně drahou záležitost, ale svou vysokou pořizovací hodnotu kompenzují vysokou produktivitou. Komerčních operá-

torů je ale jen velmi málo, největším poskytovatelem dat je Intermap (spektrum X). Mimo letecké systémy jsou celosvětově využívány i vesmírné radarové systémy. Mezi ně můžeme zařadit například:

- Sentinel-1, fungující v Evropě od roku 2014 ve spektru C, pokryvnost je 20-400 km s cyklem opakování 12 dní.
- TanDEM-X, poskytující data pro Německo od roku 2010 ve spektru X, pokryvnost $5 \times 10 - 1500 \times 100$ km, interval je 11 dní.
- ALOS (2006), ALOS-2 (2014), snímají území Japonska ve spektru L, zachycují území 25-350 km v intervalu 46 (14) dní.
- RADARSAT-1 (1995) a RADARSAT-2 (2007), snímání území Kanady ve spektru C, snímá 18-500 km, interval je 24 dní, fungují v tandemu.

3.4 Klasifikace obrazu v dálkovém průzkumu Země

Mapování krajinného pokryvu je obecně považován za komplikovaný proces s řadou faktorů ovlivňujících kvalitu konečného produktu (Khatami et al., 2016; Ma et al., 2017). Aby bylo možné se získanými snímky dále pracovat, je nutné je převést na hmatatelné informace, které lze využít ve spojení s jinými soubory dat využívanými v geografických informačních systémech (GIS) (Blaschke, 2010). Nabízí se možnost klasifikace snímků, získaných při dálkovém průzkumu Země, jedná se o jeden z nejnáročnějších úkonů při analýze snímků s vysokým rozlišením. Cílem jakékoliv klasifikace je rozřadit vzdáleně snímané body do skupin nebo tříd (Zhang et al., 2019). Jde o proces seskupování pixelů s podobnými vlastnostmi do různých typů krajinného pokryvu (Lillesand et al., 2015). Při klasifikaci vstupních dat se vytvářejí prvky, které jsou přiřazeny charakteristickým hodnotám zájmových dat. Takto vzniklé prvky mohou být znázorněny jako body, linie nebo polygony. Když porovnáme množství charakteristických hodnot vytvořeného souboru s původním vstupním souborem, pokles počtu charakteristických hodnot signalizuje klasifikaci vstupních dat. Důležité je, že vstupní data samotná nejsou změněna, protože klasifikace vytvářejí nová data (Huisman et de By, 2009). Pro klasifikaci snímků DPZ se obecně používají dvě klasifikační metody: klasifikace založená na pixelech a klasifikace založená na objektech (Shakya et al., 2021).

3.4.1 Klasifikace založená na pixelech (Pixel-based image classification)

Při klasifikaci založené na pixelech dochází k analýze jednotlivých pixelů pomocí obsažených spektrálních informací (Richards et Xiuping, 1999). Tento druh klasifikace vychází z

reflexních charakteristik jednotlivých položek zemského povrchu a jejich spektrálních reflexancí za účelem provedení klasifikace přiřazením pixelů ke třídám krajinného pokryvu (Petropoulos et al., 2013).

Jedná se o hojně využívaný druh klasifikace, protože bere v úvahu pouze spektrální hodnoty informací o třídách, což usnadňuje a urychluje její využití. Lze říct, že jde o tradiční způsob klasifikace, která není obtížná na implementaci obrazu. Avšak mezi nedostatky této klasifikace lze zařadit například to, že klasifikace nebere v úvahu prostorové kontexty či šum (Makinde et al., 2016; Shakya et al., 2021).

Mezi nejvíce používané klasifikace založené na pixelech lze zařadit *maximum likelihood* (ML – maximální pravděpodobnost) nebo *artificial neural networks* (ANNs – umělé neuronové sítě). Takovéto klasifikace poskytují uspokojivé výsledky i v prostorech se složitější strukturou díky sadám s trénovacími vzorky. Dále lze zmínit tzv. *spectral angle mapper* (SAM – spektrální úhlový mapovač), který je populární díky své jednoduchosti a rychlosti, mimo jiné dokáže potlačit vliv stínících efektů a zvýrazní charakteristiky odrazivosti cíle. Jedná se o kontrolovanou klasifikační techniku, která pracuje na základě výpočtů podobnosti spektrálního úhlu mezi referenčním zdrojem a cílovým spektrem (Petropoulos et al., 2013).

3.4.2 Klasifikace založená na objektech (Object-based image classification)

Počátky této klasifikace sahají až do 70. let minulého století. Při klasifikaci založené na objektech nejsou potřebné informace seskupeny v jednotlivých pixelech ale v reprezentativních objektech (Petropoulos et al., 2013; Shakya et al., 2021). Vývoj této klasifikace byl nutný kvůli zvětšujícím se velikostem analyzovaných dat ze satelitních, leteckých anebo bezpilotních skenování (Ma et al., 2017). Dochází k využívání geometrické, textové, spektrální, jasové a zpětně rozptýlené hodnoty obrazu ke klasifikaci krajinného pokryvu do příslušných tříd (Petropoulos et al., 2013). Tento nástroj se používá k analýze obrazů, které mají vysoké prostorové rozlišení a pocházejí z různých typů senzorů, jako jsou například multispektrální, hyperspektrální nebo radarové se syntetickou aperturou (Liu et al., 2018). Za poslední roky je klasifikace založená na objektech využívána pro analýzy vegetace, mokřadů i městských oblastí, využívána je hojně i při analýzách v lesnictví (Johnson et Ma, 2020).

Na začátku klasifikace založené na objektech je nutné posoudit, jaká metoda segmentace a klasifikačního algoritmu je nejvhodnější tak, aby mohly být správně stanoveny trénovací vzorky a rozdělení do tříd (Ma et al., 2017). V tomto případě se proces odvíjí od funkcí členění založených na znalostech, které definují sadu pravidel pro klasifikaci prvku. První fáze v této

klasifikaci je tzv. segmentace obrazu, při níž se snímky rozdělí do oblastí (segmentů), z nichž každá je homogenní ale žádné dvě oblasti nejsou homogenní (Pal et Pal, 1999). Druhá fáze zahrnuje spojení segmentovaného obrazu společně s texturními, kontextovými informacemi a spektrálními informacemi pro vytvoření tematické mapy. Výhodou této klasifikace je, že zahrnuje spektrální i prostorové informace, a dokonce zohledňuje atributy jednotlivých objektů (Petroopoulos et al., 2013).

3.4.2.1 Segmentace obrazu

Segmentace obrazu se v DPZ využívá již asi dvě desetiletí a spočívá v rozdělení obrazu do relativně homogenních oblastí, tzv. segmenty či objekty obrazu. Vzniklé segmenty obrazu následně mohou sloužit jako základní jednotka pro další analýzy, jako klasifikace obrazu nebo detekce změn. Segmentaci lze považovat za velmi důležitý a základní krok ve zpracování dat, protože kvalita výsledků segmentace často ovlivňuje přesnost následných analýz (Johnson et Ma, 2020). Bylo vyvinuto i testováno mnoho segmentačních algoritmů, které dosahují kvalitních výsledků (Marçal et Rodrigues, 2009; Witharana et Civco, 2014).

Pro klasifikaci založenou na objektech jsou segmenty nezbytné, neboť představují základní stavební bloky, na jejichž základě se provádí klasifikace. Kvalita těchto segmentů má vliv na přesnost celé klasifikace (Johnson et Ma, 2020). Využívají se algoritmy jako *Random forest* (RF) nebo *Support Vector Machine* (Liu et al., 2018)

3.4.3 Klasifikační metody

V posledních letech byla vyvinuta řada klasifikačních algoritmů pro analýzu dat z DPZ, jako nejpopulárnější lze označit *Maximum Likelihood classification* (MLC), *Support vector machine* (SVM) a *Random forest* (RF) (Otukey et Blaschke, 2010). Mimo již zmíněné klasifikační metody existuje mnoho dalších. Rodriguez-Galiano et al. (2012) uvádí například tyto: algoritmus strojového učení *artificial neural networks*, *decision trees* a soubory klasifikátorů. V posledních letech se ukázalo, že strojové učení je lepší při práci s většími soubory dat (mapování velkých oblastí). Takovéto algoritmy dosahují vysoké účinnosti a efektivity, protože nevyžadují splnění předpokladů o distribuci dat (normalita dat), a obvykle poskytují vyšší přesnost. I když některé metody strojového učení, jako jsou neuronové sítě nebo SVM, poskytují vysokou účinnost, mohou být kvůli velkému počtu parametrů, které je třeba upravit, a nemožnosti automatizace, složité. Kromě toho se tyto algoritmy často potýkají s problémem překrývání dat.

3.4.3.1 Maximum Likelihood classification

Algoritmus *Maximum Likelihood classification* (MLC) je jeden z parametrických klasifikátorů využívaných pro *supervised classification* (Otukey et Blaschke, 2010; Rodriguez-Galiano et al., 2012). V tomto případě se jedná o statistickou metodu, při které se musí vytvořit trénovací vzorky reprezentativních tříd (Lillesand et al., 2015). Algoritmus funguje na dvou principech: buňky v každé třídě jsou normálně rozmístěny a na Bayesovo teorii rozhodování (Esri ©2023).

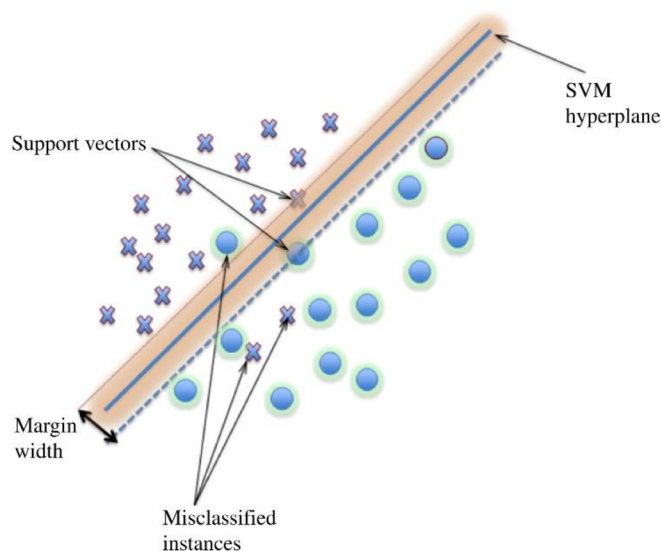
3.4.3.2 Support vector machine

Metoda *Support vector machine* (SVM) společně s metodou *Random forest* (RF) jsou metodami dosahující největší přesnosti při klasifikacích různých druhů dřevin. SVM využívá metodu jádrového učení (*kernel learning method*). Jedná se o neparametrický algoritmus strojového učení, který analyzuje data a vzory (*pattern analyse*). SVM se obvykle využívá, pokud máme v datech méně než tři klasifikační třídy (Michałowska et Rapiński, 2021; Surový et al., 2022). SVM algoritmy byly úspěšně aplikovány v různých oblastech výzkumu, včetně kategorizace textu a hypertextu, detekce struktury proteinů a jejich vzdálené homologie, klasifikace obrazu DPZ, bioinformatiky (pro klasifikaci proteinů a rakoviny), rozpoznávání ručně psaných znaků, detekce obličejů, generalizované prediktivní kontroly a v dalších disciplínách (Cervantes et al., 2020).

Mountrakis et al. (2011) popisují metodu (SVM) jako lineární binární klasifikátor, který přiřazuje danému testovacímu vzorku třídu z jedné z možností. Pro klasifikaci mohou být použity jak multispektrální data, tak hyperspektrální data (Obrázek 4).

Jako i jiné metody má tato své slabiny a úskalí: výběr parametrů, algoritmická složitost, která ovlivňuje dobu trénování klasifikátorů ve velkých souborech dat, vývoj optimálních klasifikátorů pro více tříd anebo výkon SVM v nevyvážených souborech dat. Ve velkých souborech dat roste matice trénovacích vzorků v kvadratické podobě s velikostí souboru dat, což způsobí, že trénování SVM ve velkých souborech dat je velmi pomalý proces. Z toho vyplývá, že SVM není vhodný pro klasifikaci velkých souborů dat. SVM však může být velmi užitečná metoda i v reálném světě. Trénovací metody pro SVM lze rozdělit podle použité strategie na následující kategorie: výběr dat, dekompozici, geometrické metody, paralelní implementace a heuristiky. Cílem těchto metod je snížit velikost datových sad tím, že odstraní instance, které nepřispívají k definici optimální oddělovací nadroviny. Určité varianty SVM se zaměřují na

zkrácení doby trénování a jsou schopné dosáhnout rychlejšího výpočtu na úkor přesnosti (Cervantes et al., 2020).



Obrázek 4: Metoda SVM (zdroj: Mountrakis et al., 2011).

3.4.3.3 Random forest

Jeden z nejnovějších nelineárních modelů *Random forest* (RF) je výkonný klasifikátor strojového učení, který je velmi přesný a odolný vůči šumu. Jeho přesnost však závisí na síle jednotlivých „stromových“ klasifikátorů a míře jejich vzájemné závislosti (Surový et al., 2022).

Oproti jiným metodám je nastavení RF poměrně jednoduché, jelikož není nutné žádné přesné ladění parametrů. Mezi jeho výhody lze zařadit například neparametrickou povahu, vysokou přesnost klasifikace a schopnost učit proměnnou důležitost. RF mimo jiné umožňuje odhadovat chybějící hodnoty, je flexibilní při provádění několika typů analýz dat, včetně regrese, klasifikace a analýzy přežití. Algoritmus RF dokáže klasifikovat s 92% přesností i krajinný pokryv (Rodriguez-Galiano et al., 2012).

Poslední dobou se RF stává v DPZ stále důležitější. RF lze využít například při klasifikaci krajinného pokryvu, ekologické zonaci, mapování sesuvů, prognózách požárů nebo při identifikaci spektrálních rozdílů dřevin (Stumpf et Kerle, 2011; Rodriguez-Galiano et al., 2012). Nejčastěji se RF využívá v kombinaci s hyperspektrálními daty (Immitzer et al., 2012). Pro použití tohoto algoritmu je třeba definovat pouze několik parametrů, jako například počet stromů (N) a počet predikčních rysů (m).

4 Metodika

Tato část práce se věnuje popisu monitorované oblasti, prostředkům a materiálům k tomu využitých a postupem, kterým byla práce zpracována. První část této kapitoly obsahuje popis vybrané lokality, v následující části jsou popsány technologie a přístroje využité pro dálkový průzkum Země a jejich následné zpracování.

4.1 Popis zkoumaného území

Pozorované území se nachází v Národním parku České Švýcarsko (NPČŠ), jež se nachází v okrese Děčín při státních hranicích s Německem, a to mezi obcemi Hřensko, Chřibská a Brtníky. Celková plocha NPČŠ činí 79,23 km². LHC NP43 zasahuje celkem do dvou přírodních lesních oblastí (PLO). Větší část parku zasahuje do PLO 19 (lužická pískovcová vrchovina) a menší část je v PLO 20 (lužická pahorkatina). Zastoupené lesní vegetační stupně (LVS) jsou v rozmezí od 3. LVS do 6. LVS. Největší zastoupení zde má 4. LVS (50,17 %), dále následují 5. LVS (40,30 %), 3. LVS (9,53 %) a 6. LVS (0,001 %) (NPCS, 2023).

Jedná se o nejlesnatější národní park (NP) v České republice, lesy pokrývají 97 % území. Původně byl na území nejvíce zastoupen buk lesní (*Fagus sylvatica*), který dnes ale nahradil smrk ztepilý (*Picea abies*). Na území NPČŠ převládají se zastoupením 81,90 % jehličnaté dřeviny, listnaté dřeviny jsou na 18,10 %. Mezi nejvíce zastoupené jehličnany se řadí smrk ztepilý (*Picea abies*) se zastoupením 59,4 % plochy NPČŠ, následuje borovice lesní (*Pinus sylvestris*) s 19,31 % a jedle bělokorá (*Abies alba*) se zastoupením 1,21 %. Z nepůvodních jehličnanů je zastoupena na 0,53 % borovice vejmutovka (*Pinus strobus*) a na 1,37 % modřín opadavý (*Larix decidua*). Z listnatých dřevin se na území NPČŠ nachází buk lesní (*Fagus sylvatica*) na 11,48 % a bříza bělokorá (*Betula pendula*) na 4,32 %. Zastoupení ostatních druhů dřevin nepřesahuje 1 %. Průměrný věk lesních porostů je 79,5 roku. Většina území parku je v pásmu C imisního ohrožení, západní část parku spadá do pásma D (NPCS, 2023).

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*), lýkožrout lesklý (*Pityogenes chalcographus*) a lýkožrout severský (*Ips duplicatus*) jsou nejvíce rozšířené druhy na území NPČŠ, dalším významným druhem je lýkožrout menší (*Ips amitinus*) a s lokálním výskytem lýkohub matný (*Polygraphus polygraphus*). Z listožravého hmyzu se v NPČŠ vyskytují druhy jako bekyně mniška (*Lymantria monacha*), tmavoskvrnáč borový (*Bupalus piniarius*), sosnokaz borový (*Panolis flammea*), bourovec borový (*Dendrolimus pini*), hřebenule (*Diprionidae*) nebo ploskohřbetky (*Cephalcia spp.*), tyto druhy jsou v národním parku pouze v základním stavu (NPCS, 2023).

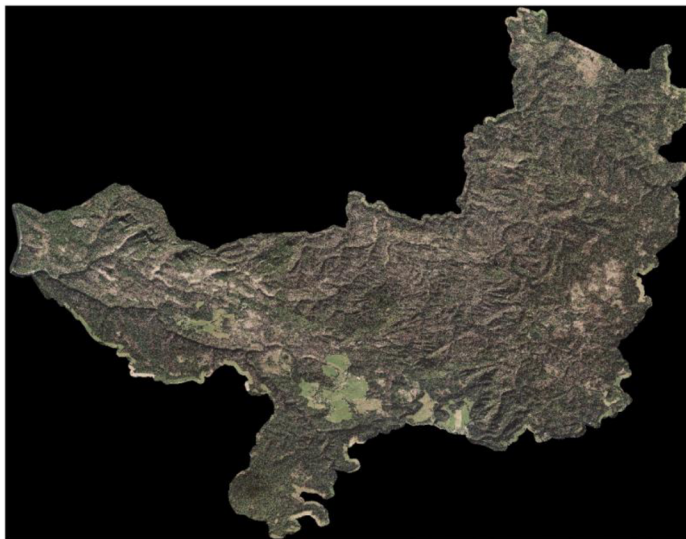
4.2 Materiál

4.2.1 Letecké snímky

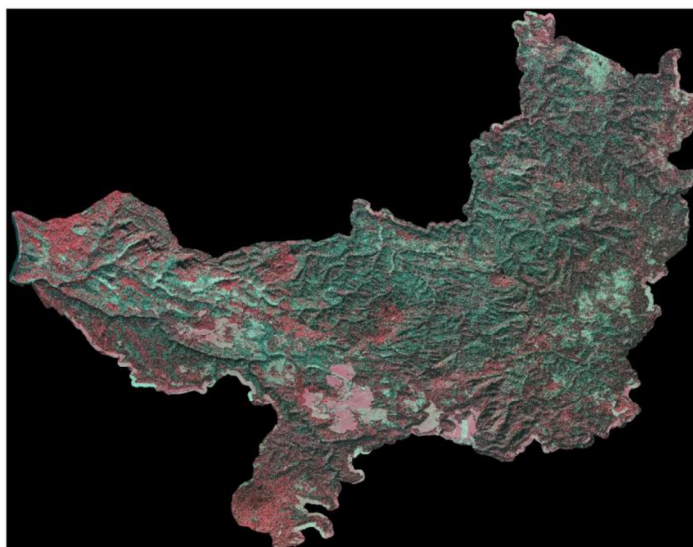
Pro účely této diplomové práce poskytla správa Národního parku České Švýcarsko digitální multispektrální letecké snímky, které byly pořízeny v letech 2020 a 2021.

Snímání území národního parku v roce 2020 proběhlo v měsíci září (Obrázek 5) kamerou Vexcel UltraCam Eagle Mark3, která byla nesena na letounu Cessna 402 B. Let proběhl za standardních meteorologických podmínek v letové výšce 4 229 m a bylo při něm pořízeno 316 snímků v 15 řadách s podélným překryvem 80 % a příčným překryvem 80 %. Poskytnuté 16bitové snímky byly ve formátu TIF a JPG v RGB a CIR (Obrázek 6) barevném rozlišení.

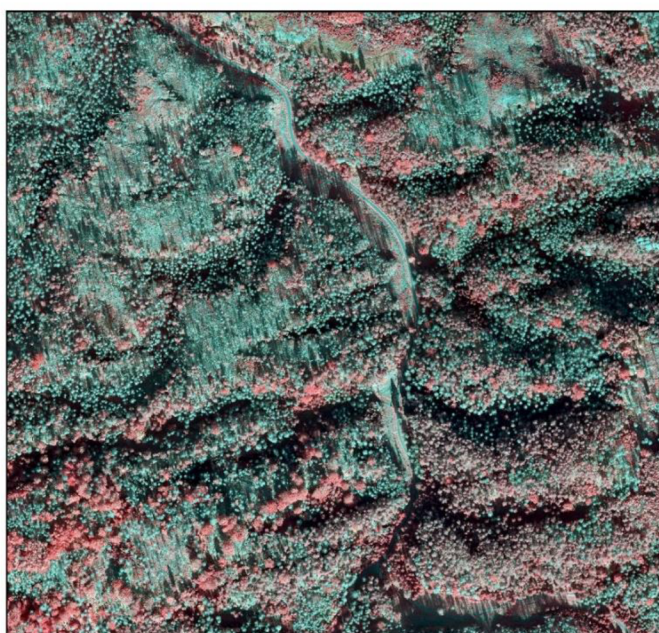
V roce 2021 snímkování proběhlo opět v měsíci září, za podobných letových podmínek jako při předchozím snímkování a se stejným technickým vybavením.



Obrázek 5: Ortofoto Národního parku České Švýcarsko, rok 2020 (zdroj: Oldřich Holešinský).



Obrázek 6: Ortofoto (CIR) Národního parku České Švýcarsko, rok 2020 (zdroj: Oldřich Holešinský).



Obrázek 7: Letecký snímek TOP_sluk_3_7 (2021).

4.2.2 Satelitní snímky

Pro účely této diplomové práce byly využity satelitní snímky Planet (Obrázek 8). Satelitní snímky byly staženy z online platformy PlanetLab, kterou je možné využívat pro komerční účely po zaplacení licenčního poplatku.

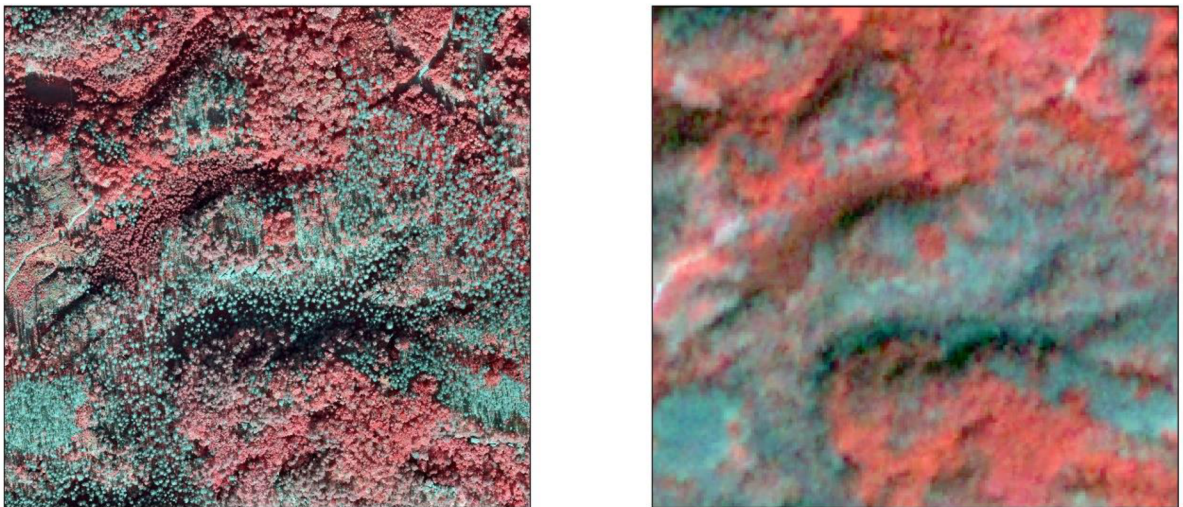
Na online platformě PlanetLab bylo zvoleno zájmové území, v tomto případě území NPČŠ. V nastavení bylo zvoleno časové rozmezí, v němž se hledaly konkrétní snímky. Zvoleným obdobím byl měsíc září. Dalším zvoleným parametrem bylo množství pásem. V případě

této diplomové práce stačila pásma červené, zelené, modré a blízké infračervené pásmo ve viditelném spektru. Posledním velmi důležitým faktorem byla oblačnost. Bylo potřebné najít snímky ze dní, kdy byla oblačnost pouze minimální.

Použité snímky byly nasnímané pomocí PlanetScope, což je konstelace více jak 200 satelitů, které zaznamenávají denně zemský povrch. Snímky z této konstelace mají prostorové rozlišení 3 m a časové rozlišení 1 den.



Obrázek 8: Snímky ze satelitu PlanetScope (2018, 2019, 2020, 2021).



Obrázek 9: Srovnání leteckého snímku (vlevo) a satelitního snímku (vpravo) z roku 2020.

Do zpracování dat měl být původně zahrnut právě i rok 2022, který byl ale kvůli ničivému požáru hodnocen samostatně (Obrázek 23). Požár vypukl v roce 2022 v noci z 23. na 24. 7. na území NPČŠ požár v Malinovém dole u Hřenska. Díky povětrnostním podmínkám se požár velmi rychle šířil. Zasažená plocha byla stanovena na 1300 ha.

4.3 Zpracování dat

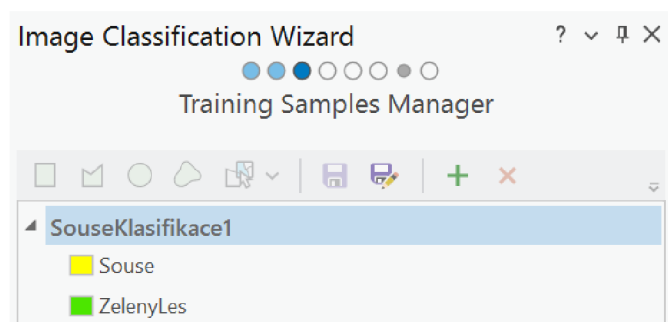
Data získaná z leteckého ale i satelitního monitoringu byla následně zpracována a vyhodnocena v programu ArcGIS® PRO. ArcGIS® PRO je desktopový program navržený společností ESRI a slouží k tvorbě či správě dat a jejich prostorové analýze. Postup práce je popsán v následujících kapitolách.

4.3.1 Letecké snímky

Letecké snímky z obou letů byly klasifikované řízenou klasifikací založenou na objektech. Jako první byly klasifikované snímky z roku 2020. Jednalo se o semiautomatickou klasifikaci.

V hlavním panelu v záložce *Imagery* byl vybrán nástroj *Classification Wizard*. Aby mohl být nástroj *Classification Wizard* spuštěn, musí se označit snímek, se kterých se bude dále pracovat. V prvním kroku byla určena klasifikační metoda – *Supervised*, typ klasifikace – *Object based*, klasifikační schéma a místo uložení.

Pro automatickou klasifikaci v softwaru ArcGIS® PRO je potřebné vytvořit klasifikační schéma, které stanoví počet a typ tříd, které jsou použité při klasifikaci. Pro tento účel bylo při klasifikaci vloženo v prvním kroku předvolené klasifikační schéma. Klasifikační schéma bylo dále modifikováno v *Training Samples Manager* tak, aby splňovalo požadované parametry. Vytvořené byly dvě třídy (Obrázek 10), „Souše“ a „ZelenýLes“.



Obrázek 10: Klasifikační třídy pro souše a zelený les.

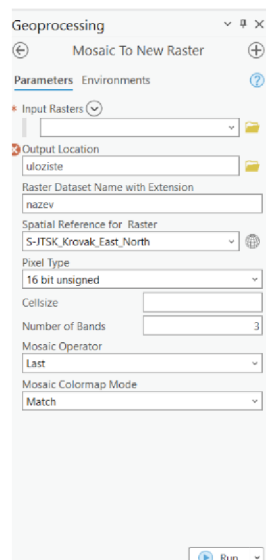
Jelikož šlo o klasifikaci založené na objektech, druhým krokem byla segmentace. Segmentace zahrnovala nastavení položek: *Spectral detail* (15,50), *Spatial detail* (15) a *Minimum segment size in pixels* (400) na základě, kterých se vytvořily jednotlivé objekty (segmenty). Dále následovala tvorba klasifikačních vzorků pro ‚Souše‘ a ‚ZelenýLes‘, vždy bylo vytvořeno 100 a 100 vzorků pro každou kategorii. Jeden vzorek reprezentoval jeden segment. Čtvrtý krok, nastavení klasifikátoru na *Support Vector Machine*. V kroku pět a šest nebylo nic změněno,

v posledním kroku byla vybrána správná složka pro uložení a vhodný název klasifikace. Vzniklé rastry bylo nutné převést na polygony tak, aby se s nimi dalo dále pracovat, k tomu posloužila funkce *Raster to Polygon* (Obrázek 13; Obrázek 14). Tento postup byl zopakován u všech 34 vzniklých snímků.

Aby byl výsledek klasifikace co nejpřesnější, vzniklá polygonová vrstva byla manuálně opravena. V případě, kdy některé oblasti byly klasifikované špatně (záměna mezi souší a zeleným lesem), byl atribut přepsán na správnou hodnotu. Takto vznikla polygonová vrstva, která reprezentovala souše a zelený les na území celého národního parku. Z této vrstvy bylo potřebné odstranit plochy, na kterých se nacházely holiny. K odstranění holin byla použita funkce *Clip*, přičemž vstupní vrstva byla klasifikovaný polygon, ve funkci *Clip* byla vrstva reprezentující plochu území NPCŠ v roce 2020 (*Holiny2020NPCS.shp*). Pro odstranění lesních cest byla využita liniová vrstva reprezentující cesty nacházející se na zkoumaném území. Z vrstvy byla pomocí funkce *Buffer* vytvořena nová polygonová vrstva. Buffer zóna byla stanovena na 2 m. Takto vzniklým polygonem byly pomocí funkce *Erase* oříznuty všechny snímky. Výsledkem tohoto procesu byla polygonová vrstva *Souse2020zariFinalHraniceNPCS.shp*. V atributové tabulce této vrstvy byl přidán sloupec ‚Plocha‘. V tomto sloupci pomocí funkce *Calculate Geometry* byla vypočítána plocha každého polygonu. Plocha je uváděna v hektarech.

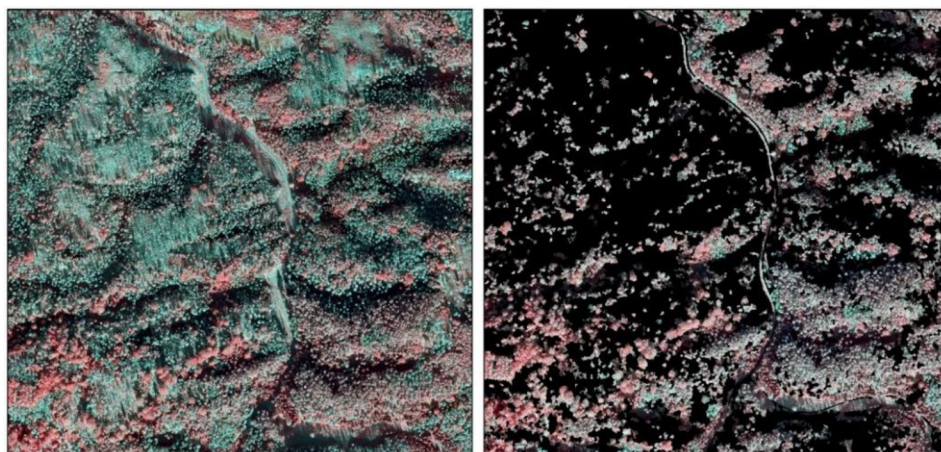
Snímky z roku 2021 poskytnuté správou NPCŠ ve formátu TIF byly rozděleny na 34 menších snímků. Tento krok byl proveden z důvodu nutnosti zkrátit čas potřebný pro proces klasifikace, jež i na zmenšených snímcích probíhal v rámci několika desítek minut.

Rozdělení snímků proběhlo následujícím postupem. V hlavní liště v záložce *Geoprocessing* byla zvolena funkce *Clip raster*, díky které mohly být snímky rozděleny. Snímky byly rozděleny podle již dříve existujících snímků. V několika případech bylo potřeba snímky opět spojit, tento krok byl proveden funkcí *Mosaic To New Raster* (Obrázek 11).

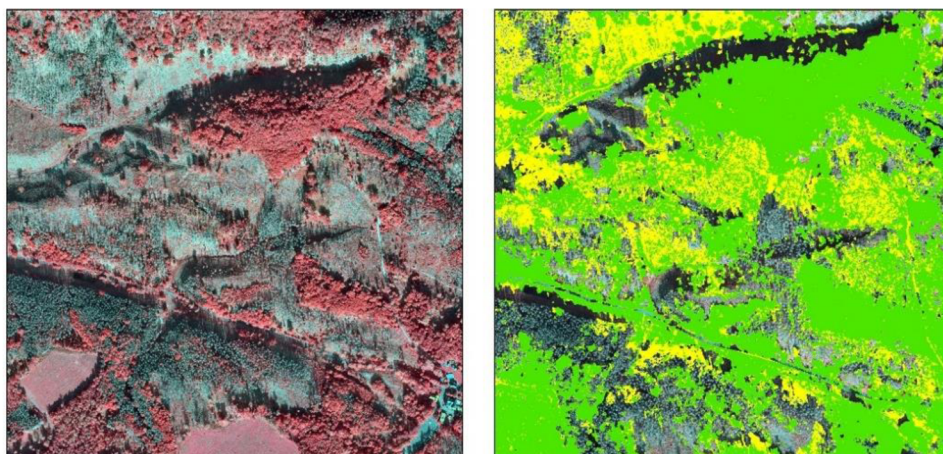


Obrázek 11: nastavení funkce Mosaic To New Raster.

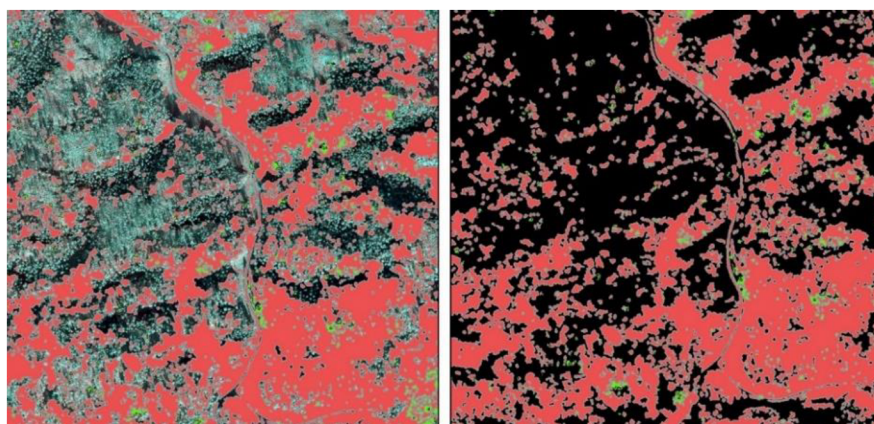
Připravené snímky byly oříznuty nástrojem *Clip raster* pomocí polygonové vrstvy *Souse2020zariFinalHraniceNPCS.shp*, ve které byl v *Select by Attributes* vyfiltrován jen „ZelenyLes“ a tím došlo k oříznutí vrstvy a zůstaly nám jen aktuální souše (Obrázek 12). Díky tomuto kroku byly snímky oříznuty i podle hranic NPCČŠ. Na závěr úprav byly snímky exportovány do výstupního formátu Tiff. (*Data – Export data*). Tento krok byl použit proto, aby se zkrátil čas automatické klasifikace, a aby už klasifikované souše z roku 2020 nebyly klasifikovány znovu. Tímto krokem byla zjištěna už jen plocha souší, která přibyla v průběhu jednoho roku od září 2020 do září 2021. Postup klasifikace i následná transformace rastru na polygon a zjištění plochy (s holinami a cestami ale i bez nich) byl stejný jako u snímků z roku 2020.



Obrázek 12: Letecký snímek (2021) s odstraněnými soušemi z předešlého roku (2020).



Obrázek 13: Letecký snímek (vlevo), klasifikace založená na objektech (vpravo).



Obrázek 14: Porovnání vzniklé klasifikace na leteckém snímku (2021) bez odstraněných loňských souší a s odstraněnými loňskými soušemi.

4.3.2 Satelitní snímky

Bylo potřebné změnit zobrazení satelitních snímků z pravých barev, do takzvaných falešných barev, aby byly dobře rozlišitelné suché stromy (souše) od živých stromů (zelený les). Pro tento účel se využilo infračervené zobrazení, kde v pásmu červené (RED) bylo zobrazené pásmo NIR, v pásmě zelené (GREEN) bylo zobrazené červené pásmo a modré pásmo (BLUE) zůstalo v původním nastavení. Toto zobrazení umožňuje rozeznat souše od zeleného lesa tak, že v oblasti blízkého infračerveného pásma dochází k odražení této složky světelného spektra a k absorpci červené složky světla u zdravých stromů (zelený les). Oproti tomu u souší dochází k odražení obou složek světelného spektra (červené i blízké infračervené), proto lze souše barevně rozlišit v zobrazení tzv. falešných barev.

Úprava proběhla v *Symbology*, tak aby jednotlivá pásma v RGB spektru zvýrazňovala souše a zelený les:

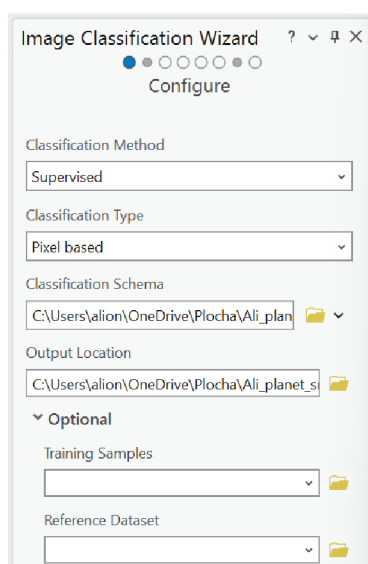
- Red: Band_4

- Green: Band_1
- Blue: Band_3
- Alpha: None

Satelitní snímky Planet mají svoje specifické označení jednotlivých pásem, Band_1 reprezentuje červenou, Band_2 zelenou, Band_3 modrou a Band_4 blízkou infračervenou.

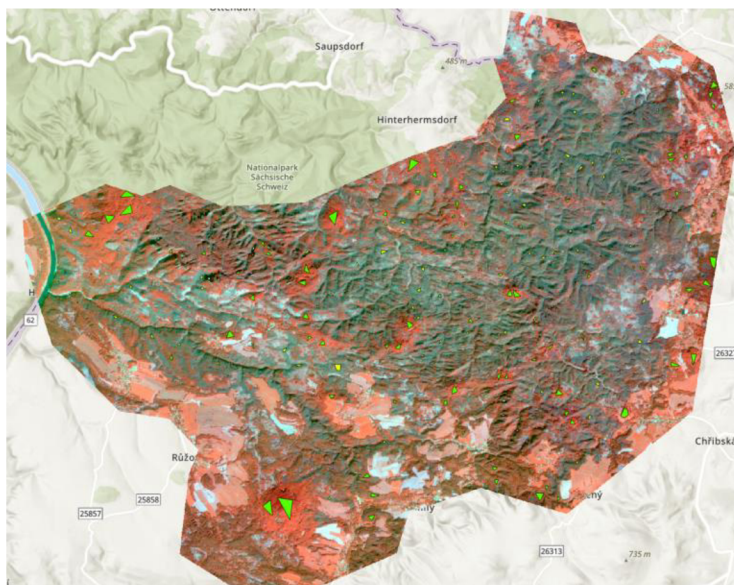
Po tomto kroku již mohla následovat samotná klasifikace. Byla využita kontrolovaná klasifikace založená na pixelech.

Při použití nástroje *Classification Wizard* v softwaru ArcGIS[®] PRO bylo úplně prvním krokem označení satelitního snímku v záložce *Contents*, aby se umožnil přístup k tomuto nástroji. V záložce *Imagery* byl vybrán nástroj *Classification Wizard*. V následujícím kroku *Configure* (Obrázek 15) byla zvolena klasifikační metoda *supervised* (kontrolovaná klasifikace) a klasifikační typ *Pixel based* (klasifikace založená na pixelech).



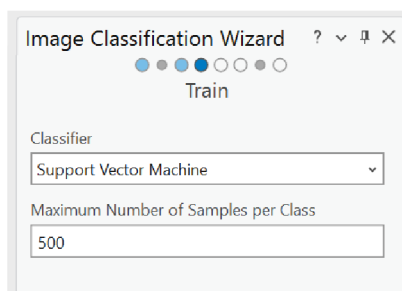
Obrázek 15: Použití nastavení nástroje *Classification Wizard* – *Configure*

Pro klasifikaci byly opět vytvořeny trénovací vzorky. Klasifikační schéma tvořili 3 kategorie - „Souše“, „ZelenyLes“ a „Stin“. A pro každou kategorii bylo vytvořeno 100 reprezentativních vzorků (Obrázek 16). Tento krok proběhl v *Training Samples Manager*.

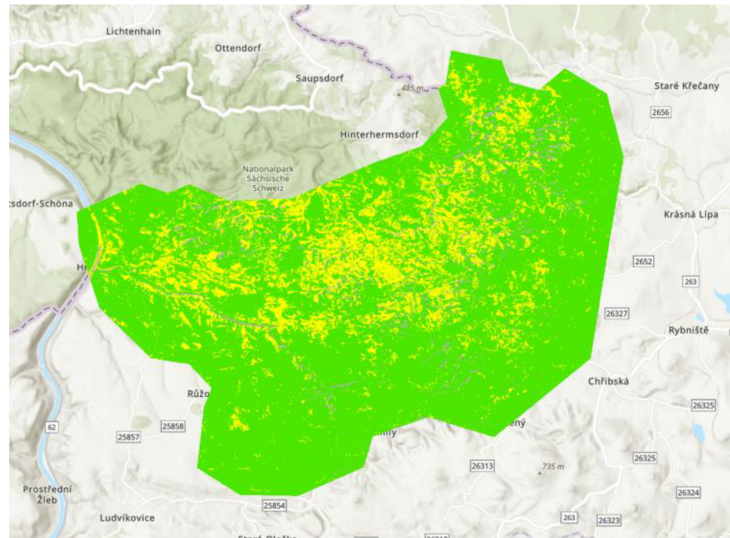


Obrázek 16: Trénovací vzorky vytvořené pro satelitní snímek – Souse, ZelenýLes, Stín.

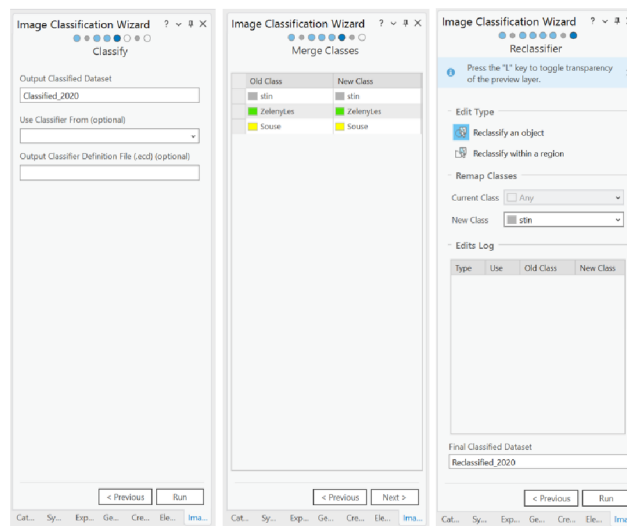
Pro trénovací vzorky v kroku *Train* byl zvolen algoritmus *Support Vector Machine* (Obrázek 17). Po zkontrolování vzniklé klasifikace (Obrázek 17) byla práce dokončena a uložena vždy pod odpovídajícím názvem (Obrázek 19).



Obrázek 17: Classification Wizard – zvolení klasifikační metody Support Vector Machine.



Obrázek 18: Vzniklá klasifikace.



Obrázek 19: Zbývající kroky klasifikace – Classify; Merge Classes; Reclassifier.

Pro zjištění velikosti ploch lesních porostů napadených kůrovcem v daný rok, bylo nutné provést odstranění překrývajících se vrstev. Nejprve byly exportovány vrstvy obsahující pouze souše. Pomocí funkce *Select by Attributes*, byly vyselektovány pouze souše (*Class name: Souše*). Následovalo exportování přes: *Data – Export Features*. Tento postup byl zopakován u všech snímků. K samotnému odstranění překrývajících se vrstev byl využit nástroj *Pairwise Erase* (*View – Geoprocessing – Pairwise Erase*). Překryv vrstev byl odstraňován od nejnovějšího snímku po nejstarší, tzn. od roku 2021 byl odstraněn překryv z roku 2020, od roku 2020 překryv z roku 2019 a rok 2019 byl oříznut rokem 2018. Tímto postupem vznikly tři nové vrstvy, které reprezentují postup kůrovcové gradace v jednotlivých letech sledování.

Na závěr úprav byly ze snímků odstraněny lesní cesty a holiny, které zkreslovali výsledky. Tento postup byl stejný jako u leteckých snímků.

4.4 Statistické vyhodnocení

K odhadu trendu hodnocení vývoje souší byla použita metoda vytvoření modelové růstové křivky, podobně jako v případě modelování růstu stromu. Jednotlivá měření obsahují chyby, které není možné odstranit například přítomnost šumu, nerovnoměrnost intervalu, různá doba pořízení snímků a podobně. Také biologická podstata šíření a gradace nemusí být vždy stejná. Tzn. ve stejný den např. 15.9. v jednom roce může být vývoj již naprosto ukončen, v jiném roce ještě ne. Pro odhad vývoje byla použita metoda nejmenších čtverců v programu Excel, pomocí nástroje *Solver*, který pomocí různé kombinace parametru růstové funkce hledá minimální sumu čtverců. Vzhledem k tomu, že celkově bylo z LHP 2011 odhadnuto na území parku 5600 ha smrku, byla jako omezující podmínka optimalizačního modelu zavedena maximální celková hodnota parametru A již zmíněných 5600 hektarů.

5 Výsledky

V této kapitole budou zmíněny a popsány výsledky, kterých bylo dosaženo výše zmíněnými postupy v programu ArcGIS® PRO. A jejich následné statistické srovnání. Bylo dosaženo těchto výsledků.

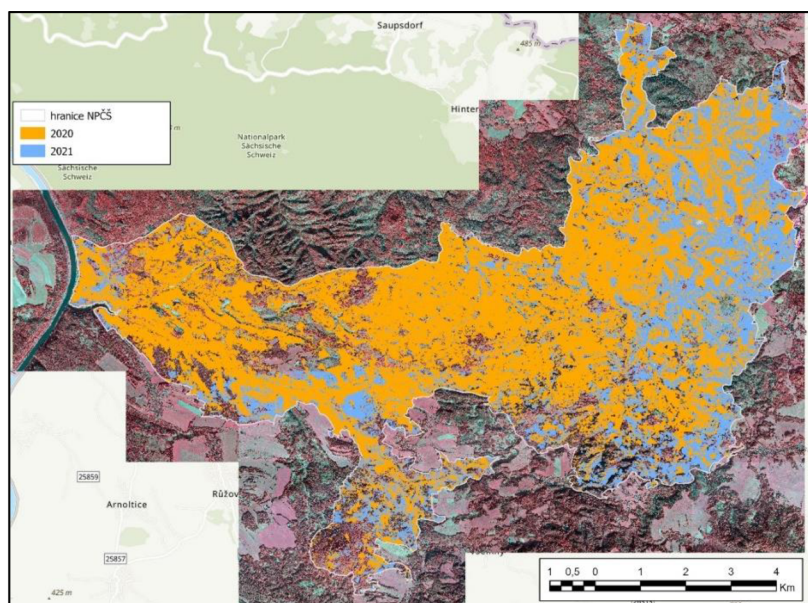
5.1 Letecké snímky

V roce 2020 bylo na území NPČŠ celkem detekováno 2 627 ha souší a v roce 2021 to bylo celkem 3 461 ha. Tyto hodnoty zahrnují jak plochu klasifikovaných souší, tak i plochu holin, které byly nesprávně klasifikovány jako souše. Po odstranění holin a cest z obou klasifikací bylo dosaženo hodnoty 2 240,33 ha souší (2020) a 2 968,04 ha (2021). Přírůst mezi rokem 2020 a 2021 byl stanoven na 727,71 ha (Tabulka 1).

Z mapových podkladů (Obrázek 20) lze vidět, že kůrovci napadené stromy, respektive jejich souše, se nacházejí již na většině plochy NPČŠ.

Tabulka 1: Postup šíření kůrovcových souší.

Rok	Souše celkem v daném roce (ha) s holinami a cestami	Souše celkem v daném roce (ha) bez holin a cest
2020	2 627	2 240,33
2021	3 461	2 968,04



Obrázek 20: Vývoj kůrovcové kalamity v letech 2020 a 2021 podle leteckého snímkování.

5.2 Satelitní snímky

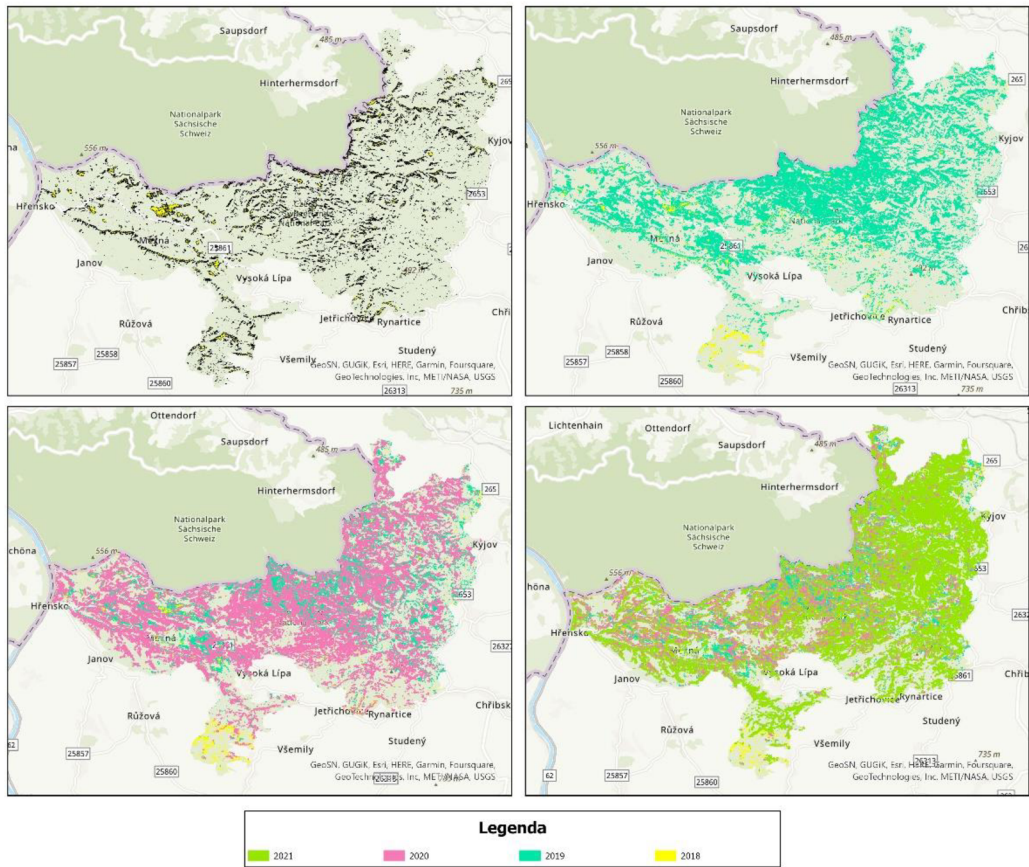
Z klasifikace, která byla provedena na satelitních snímcích, bylo nejprve vyhodnoceno, kolik hektarů souší bylo každý rok na území NPČŠ. V roce 2018 bylo detekováno celkem 502,15 ha souší, v roce 2019 celkem 1308,74 ha, v roce 2020 celkem 2202,71 ha souší, v roce 2021 celkem 3348,75 ha, a v roce 2022 bylo detekováno 4224,12 ha souší. V roce 2022 byla hodnota souší ale zkreslena o plochu zasaženou požárem. Proto byla plocha požářiště odečtena od výsledků a vznikla nová hodnota, která činila 3348,3 ha souší (Tabulka 2).

Po odečtení holin a souší vznikly tyto hodnoty: 500,19 ha (2018), 1302,29 (2019), 1964,02 (2020), 2907,77 ha (2021) (Tabulka 2).

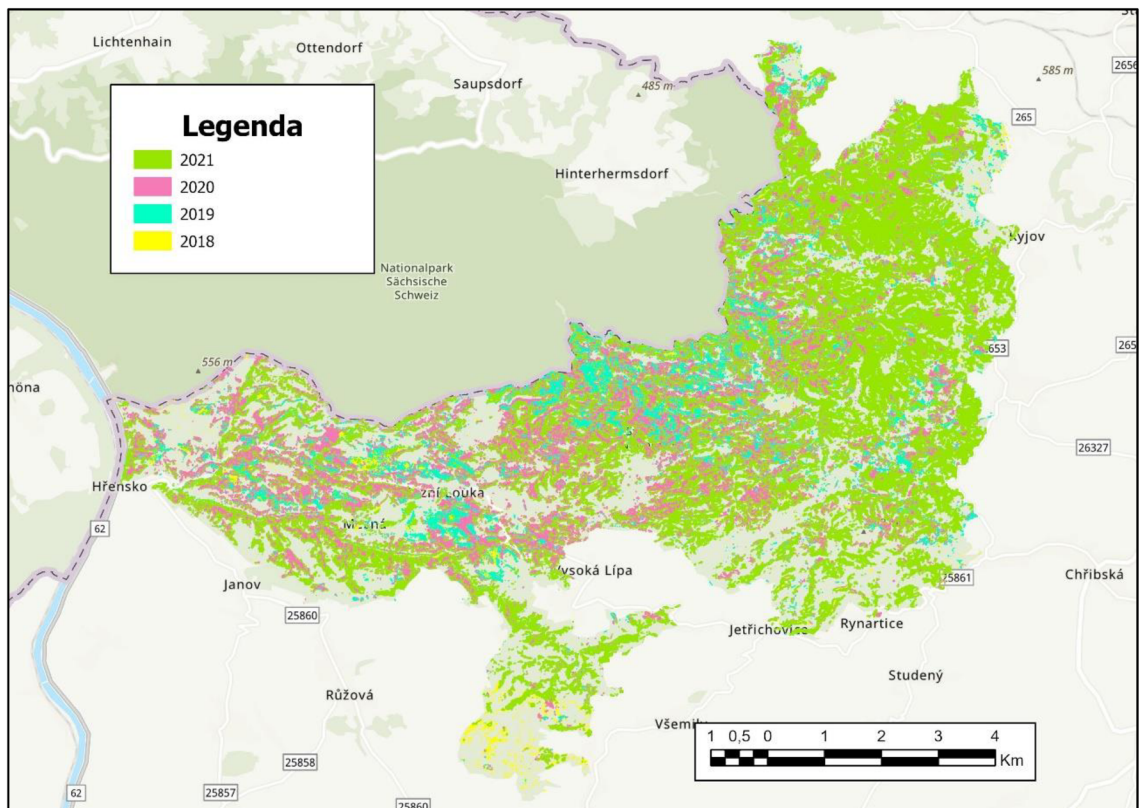
Zjištěný přírůst mezi jednotlivými roky činil 939,93 ha mezi lety 2018 a 2019, 1 263,30 ha mezi rokem 2019 a 2020, 1 435,39 mezi lety 2020 a 2021. Přírůst v roce 2022 nebyl z důvodu požáru hodnocen (Tabulka 2).

Tabulka 2: Postup vývoje plochy kůrovcových souší podle satelitních snímků.

Rok	Celkem v daném roce s holinami a cestami (ha)	Celkem v daném roce bez holin a cest (ha)	Roční přírůst (ha/rok)
2018	502,15	500,19	502,15
2019	1 308,74	1 302,29	939,93
2020	2 202,71	1 964,02	1 263,30
2021	3 348,75	2 907,77	1 435,39
2022	4 224,12	3 348,3 (bez požářiště)	×



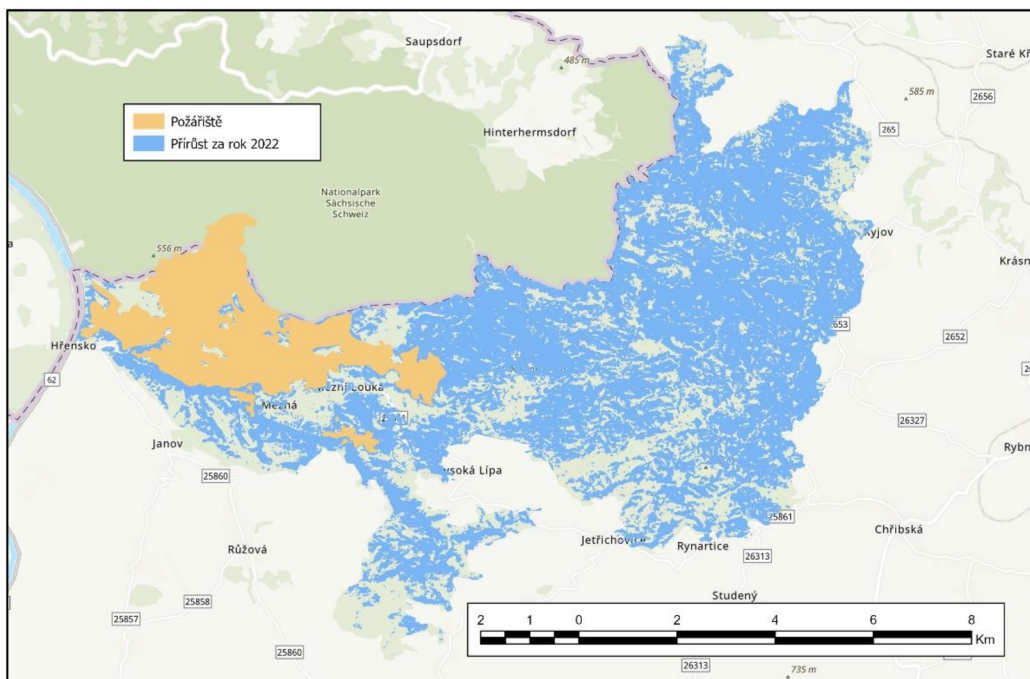
Obrázek 21: Vývoj přírůstu károvcových souší v jednotlivých rocích (2018, 2019, 2020, 2021).



Obrázek 22: Vývoj přírůstu károvcových souší od roku 2018 do roku 2021 podle satelitních snímků.

5.2.1 Požár v Národním parku České Švýcarsko (2022)

Plocha souší, která se na území NPČŠ vyskytovala v roce 2022 byla celkem 4 224,12 ha. Z tohoto pouze 3 348,3 ha tvořily souše nezasažené požárem. Z čehož vyplývá, že pravděpodobný roční přírůst byl mezi rokem 2021 a 2022 celkem 875,37 ha (Tabulka 2).



Obrázek 23: Stav kůrovcových souší v roce 2022.

5.3 Porovnání leteckých snímků se satelitními snímky

Pro vzájemné porovnání byly využity letecké a satelitní snímky z let 2020 a 2021. Z těchto snímků po odstranění holin byly zjištěny následující údaje (Tabulka 3).

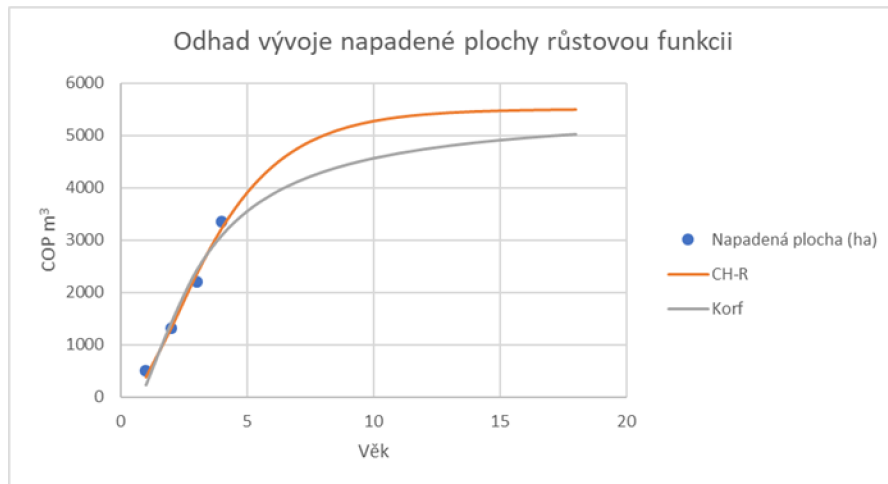
Tabulka 3: Porovnání množství kůrovcových souší v letech 2020 a 2021 na leteckých a satelitních snímcích.

Rok	Letecké snímky (ha)	Satelitní snímky (ha)
2020	2 240,33	1 964,02
2021	2 968,04	2 907,77

Z leteckých snímků z roku 2020 bylo detekováno celkem 2 240,33 ha kůrovcových souší, v roce 2021 počet souší narostl na 2 968,04 ha. Podle satelitních snímků bylo v roce 2020 pouze 1 964,02 ha kůrovcových souší oproti tomu v roce 2021 bylo množství souší 2 907,77 ha. Jednalo se tedy o téměř tisíci hektarový nárůst.

5.4 Statistické vyhodnocení

Ze statistického vyhodnocení je patrné, že vývoj kůrovcové kalamity zatím není u konce, ale již proběhl její vrchol, který nastal v roce 2021.



Obrázek 24: Graf vývoje napadené plochy růstovou funkcí.

Obě růstové funkce jak Richard-Chapmanova, tak Korfova, vykazují podobný průběh, který je více méně stejný jako v reálných datech, nedochází tedy k žádnému významnému vychýlení. Korfova funkce má pomalejší trend stoupání a asymptotu dosahuje později, v praxi by to značilo, že k úplnému ukončení gradace (kalamity) dojde později (Obrázek 24).

6 Diskuze

Dálkový průzkum Země se ukázal jako jedna z nejvhodnějších technik pro monitorování velkoplošných disturbancí, která je využívána od počátku 90. let minulého století. Výhodou DPZ je možnost rychlého zmapování velmi rozsáhlých oblastí, které lze následně analyzovat za pomoci automatických metod klasifikací a segmentací (Stereńczak et al., 2020).

Hlavním cílem této práce bylo na území Národního parku České Švýcarsko zmapovat šíření odumřelých stromů, které byly napadeny podkorním hmyzem, pomocí multispektrálních leteckých snímků a satelitních snímků.

Pro zpracování dat poskytla správa NPČŠ letecké snímky. Stereńczak et al. (2020) popisuje, že oproti satelitním snímkům s poměrně nízkým rozlišením poskytují právě letecké nebo bezpilotní systémy mnohem přesnější data (Obrázek 9).

Liu et al. (2018) uvádí, že pro mapování některých typů pokryvů (např. mokřady) jsou zapotřebí mnohem přesnější metody. Malé bezpilotní systémy (UAS) jsou vhodné pro monitorování malých nebo středně velkých ploch. UAS létají v nižších nadmořských výškách oproti satelitům i letadlům, proto jsou schopny generovat snímky s vysokým rozlišením (nižší než decimetr). Klasická pilotovaná letadla mohou sbírat snímky se srovnatelným rozlišením (i kolem 5-6 cm) jako UAS, provozní náklady a zvýšené nároky na bezpečnost zabraňují jejich častějšímu využívání. Flexibilita plánování letů UAS z nich činí preferovanou platformu dálkového průzkumu pro některé úkoly řízení přírodních zdrojů, jako je kontrola invazivní vegetace, která vyžaduje včasné a opakované monitorování krajinného pokryvu.

Přesnější údaje by měla vykazovat klasifikace provedená na leteckých snímcích, které poskytují mnohem přesnější výstupy než satelitní snímky. Na porovnání leteckých, bezpilotních a satelitních zdrojů dat v precizním zemědělství se ve své práci zaměřili Matese et al. (2015). Sběr snímků proběhl vždy za jasného počasí za pomoci senzoru Tetracam ADC Lite. Let bezpilotním systémem (UAS) byl proveden ve výšce 150 m a letoun se pohyboval ve výšce 2300 m. Multispektrální snímky byly získány z BlackBridge (archiv RapidEye – konstelace pěti družic). Průzkum prokázal různé úrovně přesnosti – nejpresnější se ukázaly snímky pořízené UAS. Nejvyšší cenové náklady na pořízení snímků na malém území (5 ha) jsou u satelitních snímků, následují letecké snímky a nejlevnější jsou UAS snímky. Oproti tomu na větším území (50 ha) byla nejdražší technologií ta bezpilotní, následovala letecká technologie a nejlevnější v tomto případě byly satelitní snímky. Z toho lze usuzovat, že satelitní snímky, z hlediska finančního,

jsou vhodné pro monitoring rozsáhlejších území, zatímco bezpilotní systémy se hodí pro monitoring menších ploch. Letecké snímkování má své výhody jak u menších, tak větších ploch. V potaz se však musí brát potřeba přesnosti, která ovlivňuje správnost následných analýz a klasifikací.

Výsledky mnoha studií prokazují, že letecké infračervené snímky s vysokým rozlišením (CIR) mohou detekovat jednotlivé mrtvé stromy s přesností více jak 90 % (Stereńczak et al., 2020).

Satelitní snímky z let 2018 až 2022 (Obrázek 8) byly získány z online platformy PlanetLab. K získání těchto snímků je nutná licence, kterou disponuje Fakulta lesnická a dřevařská. Frazier et Hemingway (2021) zhodnocují výhody a nevýhody snímků ze satelitů Planet. Výhodou využití malých satelitů je možnost jejich rychlé výstavby a rychlé doplnění poškozených satelitů. Mimo to poskytují vysoké prostorové ale i časové rozlišení snímků. Nevýhodou těchto satelitů je, že různé generace senzorů neposkytují vždy kompatibilní data, a při rychlém vývoji (inovace v oblasti sběru a zpracování dat) může být pro výzkumníky velmi obtížné zůstat aktuální.

Porovnáním (Tabulka 4) různých druhů družicových systémů (Sentinel, Landsat, Planet) se věnovali ve své práci Böhlen et al. (2022). Satelitní snímky Planet oproti jiným systémům disponují možností jemného rozlišení. Snímky pořízené systémem Landsat poskytují pouze hrubé rozlišení a snímky Sentinel mají střední rozlišení. Díky svému vyššímu rozlišení se snímky Planet hodí i pro monitoring území, kde je nutné mapovat větší detaily. V našem případě kůrovcové souše, případně i tropické oblasti. Kvůli ceně satelitních snímků Planet byl navržen přístup, který kombinuje využití více typů družicových snímků. Nejprve jsou k monitoringu využívány snímky z volně dostupných zdrojů (Sentinel, Landsat), využití družicových snímků s vyšším rozlišením (zpoplatněný PS) přichází pouze v případě, že dojde k odhalení změny stavu, která nelze popsat ze snímků s nižším rozlišením. Jedná se o koncept *tip and cue* (vytipuje se oblast, která je posléze překontrolována na jiných snímcích).

Tabulka 4: Přehled satelitních prostředků, jejich funkcí a omezení (zdroj: Böhlen et al., 2022).

	Landsat (7, 8)	Sentinel2 (A, B)	Planet (Dove, SuperDove)
K dispozici od	1999/2013	2015	2014/2022
Spektrální pásma	Coastal Aerosol, B, G, R, NIR, SWIR1, SWIR2 (30); Pan (15); Cirrus (Landsat 8 only, 30); TIR-1, TIR-2 (100)	Coastal Aerosol (60); B, G, R (10); IR1, IR2, IR3 (20); NIR (10); Narrow NIR (20); NIR2, SWIR1 (60); SWIR2, SWIR3 (20)	Dove: B, G, R, NIR (3.7); SuperDove: Coastal Blue, Blue, Green I, Green, Yellow, Red, Red Edge, NIR (3.7)
Rozlišení	15-30 m	10-60 m	3 × 3 m
Frekvence	16 dní	5 dní	24 hodin
Cena	Zdarma (po roce 2008)	Zdarma	Zpoplatněno
Satelity na oběžné dráze	1	2	~ 200 (6/2022)

Snímky ze satelitu Planet využil ve své práci Modlinger et al., (2019) pro vyhledávání polomů po větrné kalamitě v roce 2017. Avšak ani s rozlišením $3,7 \times 3,7$ m neposkytly snímky dostatečné rozlišení pro přesnou detekci polomů.

Stereńczak et al. (2020) uvádějí, že nejpoužívanějšími daty pro mapování rozsáhlých území napadených lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*) jsou data s nízkým nebo středním rozlišením a v současnosti jsou nejvíce využívány senzory Sentinel a Landsat. Satelitními snímky je ale velice obtížné odhalit jednotlivě stojící napadené stromy nebo jen malé skupiny, protože jejich velikost je mnohem menší než velikost pixelů. Výhodou těchto satelitních snímků je, že jsou zdarma a umožňují dodávat snímky v relativně malých intervalech pro velmi rozsáhlé oblasti, pokrývající několik desítek tisíc kilometrů čtverečných.

Porovnáním satelitních snímků pořízených ze systémů Sentinel-2 a Landsat-8 se věnovali Abdullah et al. (2018). Porovnána byla schopnost těchto senzorů včas rozlišit kůrovci napadené

stromy, které zatím nevykazují vizuální známky stresu (tzv. zelený útok). Ukázalo se, že snímky pořízené z obou druhů senzorů mohou sloužit k včasné detekci takto napadených stromů. V porovnání s daty leteckého snímání se vyšší citlivost prokázala u Sentinel-2 (67 %). Pro takovou detekci se využívá krátkovlnné infračervené světlo v elektromagnetickém spektru, z důvodu citlivosti této spektrální oblasti na změny obsahu vody v jehličí, což umožňuje přesnou detekci rezavějících ale i suchých stromů.

Klasifikace u leteckých snímků byla provedena metodou, která je založena na objektech. U satelitních snímků byla zvolena klasifikace založená na pixelech. Liu et al. (2018) zmiňují, že klasifikace založená na objektech má tendenci generovat výsledky s atraktivnějším vzhledem a srovnatelnou (ne-li vyšší) přesností ve srovnání s klasifikací založené na pixelech. Díky tomu je klasifikace založená na objektech preferovaným přístupem oproti metodě založené na pixelech, když se používají snímky s vysokým prostorovým rozlišením.

Pro vytvoření klasifikace byla zvolena metoda *Support vector machine*, o které se lze v literatuře dočíst, že může vykazovat přesnější výsledky klasifikace a je vhodná pro menší množství klasifikačních tříd (Michałowska et Rapiński, 2021).

Podobné problémy jako v Národním parku České Švýcarsko můžeme vidět například i v polském Bělověžském národním parku (Białowiecki Park Narodowy). Stejně jako v NPČŠ i v tomto parku je smrk ztepilý zastoupen na velké části území parku (Tabulka 5). Bělověžský NP se rovněž potýká s klimatickou změnou, která působí na smrkové porosty a snižuje jejich odolnost (stres z nedostatku vody, poškození větrem). Horká a suchá období v letech 2015 a 2016 přispěla k namnožení *Ips typographus*. Stejně jako v jiných parcích hraje významnou roli i v polském NP ochrana přírody a její různé stupně bezzásahovosti (Grodzki, 2016).

Tabulka 5: Porovnání Národního parku České Švýcarsko s Białowiecki Park Narodowy.

	Rozloha NP (km ²)	Jehličnaté porosty (%)	Zastoupení smrku (%)	Porosty >120 let (%)
Národní park České Švýcarsko	79,23	81,90	59,4	5,88
Bělověžský národní park	1 418	37	25	37

Na území národního parku Białowieża v Polsku se detekci suchých stromů věnovali Ste-reńczak et al. (2020). I zde stál za největším počtem suchých stromů lýkožrout smrkový (*Ips*

typographus). Pomocí satelitních snímků (Sentinel a Landsat) zmapovali celkem 283 166 suchých stromů. Velmi zajímavým zjištěním se ukázal fakt, že napadený strom lze odhalit již v ranných stádiích napadení. Tato možnost je v lesnictví velmi užitečná, v praxi lesníci obvykle rozpoznají až více napadené porosty, avšak metodami DPZ lze odhalit i jednotlivé stromy.

Z porovnání jednotlivých údajů mezi leteckými a satelitními snímky z let 2020 a 2021 jsou patrné rozdíly mezi výsledky, které vznikly v programu ArcGIS[®] PRO (Tabulka 3). Výraznější rozdíl mezi výsledky z roku 2020 byl pravděpodobně zapříčiněn využitím satelitního snímku, který byl pořízen v měsíci srpnu. Jiné datum stažení snímku bylo zvoleno, protože v měsíci září nebyl nalezen jediný snímek, který by nebyl ovlivněn zvýšenou oblačností. Snímky z měsíce října také nemohli být využity, v první polovině měsíce byla opět zvýšená oblačnost a druhá polovina by již byla zkraslená podzimním opadem. Na tomto satelitním snímku (2020) tedy pravděpodobně nebyl dokončen vývoj kůrovců a mnoho napadených stromů, zatím nevykazovalo známky usychání. Stav tzv. zeleného útoku popisují ve své práci Abdullah et al. (2018). Vliv počasí lze tedy považovat za limitující faktor u snímků pořízených různými druhy satelitů.

Na menší odchylky mohou mít vliv úbytky stojících souší, které v průběhu let popadaly například kvůli působení větrných poryvů. Tzn. v místě, kde se nacházela v roce 2020 stojící souš, byl v roce 2021 již pouze stín v jinak zdravém porostu. Bylo zřejmé, že se v tomto prostoru nacházela ležící souše, ale nadále tento prostor nebylo možné klasifikovat jako souš. Z tohoto důvodu byla tato místa klasifikována jako stíny. Další faktor, který mohl ovlivnit výsledky, byly holiny. Pro holiny vzniklé před rokem 2020 nebyly k dispozici podkladové vrstvy, díky kterým by bylo možné tato místa oříznout a zbavit se tak zkraslených údajů. Avšak holiny, které byly v roce 2018 klasifikovány jako souše, byly již v roce 2020 klasifikovány alespoň z části jako zelený les. Tento fakt ovlivňuje růst buřeneš na volných plochách a přirozená nebo umělá obnova. V neposlední řadě tyto rozdíly mohly být zapříčiněné i různou kvalitou získaných snímků.

Možnosti využití dálkového průzkumu Země jsou nesčetné. Pavelka (2010) zmiňuje využití DPZ v lesnictví, zemědělství, ekologii, krajinném inženýrství, geografii, kartografii, meteorologii nebo při speciálních aplikacích v rybolovu, navigacích a podobně. V lesnictví tyto metody mohou přinést pokrok při včasném detekování hmyzích napadení, které se projevuje na změně struktur např. v jehličí nebo listech.

7 Závěr a doporučení pro praxi

Tato diplomová práce se věnovala odhadu postupu kůrovcové kalamity na území Národního parku České Švýcarsko (NPCŠ). Hodnocení proběhlo na základě multispektrálních snímků pořízených ze satelitů Planet a leteckých snímků, které poskytla správa NPCŠ.

Práce ukázala, že kalamita není u konce, ale její vrchol pravděpodobně nastal již v roce 2021. Drobné odchylky mezi výsledky z leteckých a satelitních snímků nejsou tak výrazné, proto jsou oba přístupy považovány za vhodné pro využití v praxi. Avšak satelitní snímky oproti leteckým snímkům mají limitující faktor v množství vyskytující se oblačnosti, která může zakrývat snímaný zemský povrch.

V současnosti se mnoho studií věnuje porovnání různých druhů senzorů a metodám k rozlišování druhů jednotlivých druhů dřevin. Do budoucna by se hodilo výzkum zaměřit na zkoumání dynamiky sezónního a každoročního napadení kůrovcem a také na možnost detekce stromů ve fázi, kdy se zatím neprojevují vizuální známky napadení.

Pro praxi nelze doporučit jednu ideální metodu. Při výběru metody je nutné vždy zhodnotit dané meteorologické podmínky, velikost snímané plochy, finanční prostředky nebo třeba požadovaná rychlost zpracování. Metody dálkového průzkumu Země budou v budoucnu pravděpodobně využívány častěji, proto bude nutné provést další výzkumy, aby byla metoda dostatečně přesná.

8 Literatura

Abdollahnejad, A.; Panagiotidis, D.; Surový, P.; Modlinger, R. Investigating the Correlation between Multisource Remote Sensing Data for Predicting Potential Spread of *Ips typographus* L. Spots in Healthy Trees. *Remote Sensing* [online]. 2021, roč. 13, č. 23 [cit. 14.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13234953

Abdullah, H.; Skidmore, A. K.; Darvishzadeh, R.; Heurich, M.; Pettorelli, N.; Disney, M. 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* [online]. 2018, roč. 5, č. 1, str. 87-106 [cit. 29.3.2023]. ISSN 2056-3485. Dostupné z: Dostupné z: doi:10.1002/rse2.93

Adamovič, J.; Belisová, N.; Coubal, M.; Havránek, P.; Kukla, J.; Lysák, J.; Mikuláš, R.; Vařilová, Z. Geologie Českosaského Švýcarska. 1. vydání. Ústí nad Labem: Správa Národního parku České Švýcarsko. 2020. ISBN 978-80-86475-47-9.

Bentz, B. J.; Jönsson, A. M.; Schroeder, M.; Weed, A.; Wilcke, R. A.; Larsson, K. *Ips typographus* and *Dendroctonus ponderosae* Models Project Thermal Suitability for Intra- and Inter-Continental Establishment in a Changing Climate. *Frontiers in Forests and Global Change* [online]. 2019, roč. 2 [cit. 14.3.2023]. ISSN 2624-893X. Dostupné z: doi:10.3389/ffgc.2019.00001

Blaschke, T. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2010, roč. 65, č. 1, str. 2-16 [cit. 14.3.2023]. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004

Bo, Z.; Wei, G.; Shuo, S.; Shalei, S. A Multi-Wavelength Canopy LiDAR for Vegetation Monitoring: System Implementation and Laboratory-Based Tests. *Procedia Environmental Sciences* [online]. 2011. ročník 10. [cit. 1.3.2023]. ISSN 2775-2782. Dostupné z: doi:10.1016/j.proenv.2011.09.430

Böhlen, M.; Liu, J.; Iryadi, R. Combining Landsat, Sentinel2 and Planet Lab satellite assets for resource-constrained land cover analysis in the tropics. *Abstracts of the ICA* [online]. 2022, roč. 5, str. 1-2 [cit. 31.3.2023]. ISSN 2570-2106. Dostupné z: doi:10.5194/ica-abs-5-44-2022

Cervantes, J.; Garcia-Lamont, F.; Rodríguez-Mazahua, L.; Lopez, A. A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. *Neuro-computing* [online]. 2020, roč. 408, str. 189-215 [cit. 17.3.2023]. ISSN 0925-2312. Dostupné z: doi:10.1016/j.neucom.2019.10.118

ČESKO. Vyhláška č. 101 ze dne 29.4.1996, kterou se stanoví podrobnosti o opatřeních k ochraně lesa a vzor služebního odznaku a vzor průkazu lesní strážce. In: *Správní právo*. 1996, částka 33/1996. Dostupný z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1996-101>

ČESKO. Zákon č. 161 ze dne 23.7.1999, kterým se vyhláší Národní park České Švýcarsko, a mění se zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů. In: *Správní právo*. 1999, částka 54/1999. Dostupný z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1999-161>

Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2.3.2023]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/>

Esri. ArcGIS PRO. Esri.com [online]. © 2023 [cit. 16.3.2023]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-maximum-likelihood-classification-works.htm>

Fassnacht, F.; Latifi, H.; Stereńczak, K.; Modzelewska, A.; Lefsky, M.; Waser, L.; Christoph Straub, Ch.; Ghosh, A. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2016. ročník 186, 64-87 strana. [cit. 13.2.2023]. doi:10.1016/j.rse.2016.08.013.

Frazier, Amy E.; Hemingway, B. L.; A Technical Review of Planet Smallsat Data: Practical Considerations for Processing and Using PlanetScope Imagery. *Remote Sensing* [online]. 2021, roč. 13, č. 19 [cit. 4.1.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13193930

Gelbart, A.; Kamerman, G. W.; Redman, B. C.; Light, R. S.; Schwartzlow, C. A.; Griffis, A. J. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar. *SPIE* [online]. 2002 [cit. 1.3.2023]. Dostupné z: doi:10.1117/12.476407

Goodbody, T.; Coops, N.; White, J. Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports* [online]. 2019. Ročník 5, č. 2. [cit. 13.2.2023]. 55-75 strana. doi:10.1007/s40725-019-00087-2.

Grodzki, W. Grodzki, W. Mass outbreaks of the spruce bark beetle *Ips typographus* in the context of the controversies around the Białowieża Primeval Forest. *Forest Research Papers* [online]. 2016, roč. 77, č. 4, str. 324-331 [cit. 1.4.2023]. ISSN 2082-8926. Dostupné z: doi:10.1515/frp-2016-0033

Gwenzi, D.; Lefsky, M. A. Prospects of photon counting lidar for savanna ecosystem structural studies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2014. Ročník 40, č. 1, 141-147 stran [cit. 1.3.2023]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-141-2014

Hartley, R. J. L.; Jayathunga, S.; Massam, P. D.; De Ssilva, D.; Estarija, H. J.; Davidson, S. J.; Wuraola, A.; Pearse, G. D. Assessing the Potential of Backpack-Mounted Mobile Laser Scanning Systems for Tree Phenotyping. *Remote Sensing* [online]. 2022. Ročník 14. 1-226 strana. [cit. 5.2.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14143344

Holuša, J.; Hlásny, T.; Modlinger, R.; Lukášová, K.; Kula, E.. Felled trap trees as the traditional method for bark beetle control: Can the trapping performance be increased? *Forest Ecology and Management* [online]. 2017. ročník 404. [cit. 16.2.2023]. 165-173 strana. dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2017.08.019

Humisman, O.; de By, R. A. Principles of Geographic Information Systems: An introductory textbook. 4. vydání. Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009. ISBN 978-90-6164-269-5. Dostupné z: https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2009/general/principlesgis.pdf

Immitzer, M.; Atzberger, C.; Koukal, T. Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2 Satellite Data. *Remote Sensing* [online]. 2012, roč. 4, č. 9, str. 2661-2693 [cit. 15.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs4092661

Jakuš, R.; Šimko, J. The use of dispensers with different release rates at pheromone trap barriers for *Ips typographus*. *J. Pest Science*. Berlin, 2000, roč. 73, str. 33–36. ISSN 1436-5693.

Johnson, B. A.; Ma, L. Image Segmentation and Object-Based Image Analysis for Environmental Monitoring: Recent Areas of Interest, Researchers' Views on the Future Priorities. *Remote Sensing* [online]. 2020, roč. 12, č. 11 [cit. 15.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs12111772

- Johnson, M. D.; Hsieh, W. W.; Cannon, A. J.; Davidson, A.; Bédard, F. Crop yield fore-casting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. *Agricultural and Forest Meteorology* [online]. 2016. roč. 218-219, 74-84 stran, [cit. 5.2.2023]. ISSN 01681923. Dostupné z: doi:10.1016/j.agrformet.2015.11.003
- Jurc, M.; Perko, M.; Džeroski, S.; Demšar, D.; Hrašovec, B. Spruce bark beetles (*Ips typographus*, *Pityogenes chalcographus*, Col.: Scolytidae) in the Dinaric mountain forests of Slovenia: Monitoring and modeling. *Ecological Modelling* [online]. 2006. roč. 194, č. 1-3, 219-226 strana [cit. 16.2.2023]. ISSN 03043800. Dostupné z: 10.1016/j.ecolmodel.2005.10.014
- Karas, J. 222 tipů a triků pro drony. Brno: Computer Press, 2017, str. 208. ISBN 978-80-251-4874-7.
- Karas, J.; Tichý, T. Drony. Brno: Computer Press, 2019, str. 264. ISBN 978-80-251-4680-4.
- Khatami, R.; Mountrakis, G.; Stehman, S. V. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2016, roč. 177, str. 89-100 [cit. 18.3.2023]. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2016.02.028
- Kuželka, K.; Surový, P. Systém operativního leteckého snímkování pro doplňování ortofotografií po hospodářských zásazích nebo po kalamitách: metodika. 1. vydání. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2017. str. 53. ISBN 978-80-213-2811-3. Dostupné také z: <https://www.fld.czu.cz/cs/r-6828-projekty-a-spoluprace-s-praxi/r-12093-aplikovane-vystupy/r-12095-metodiky/r-13838-system-operativniho-leteckeho-snimkovani-pro-doplnovani-ortofotografii>
- Korpela, I.; Mehtätalo, L.; Markelin, L.; Seppänen, A.; Kangas, A. Tree species identification in aerial image data using directional reflectance signatures [online]. 2014. Roč. 48, č. 3, [cit. 4.2.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.14214/sf.1087>
- Krzystek, P.; Serebryanyk, A.; Schnörr, C.; Červenka, J.; Heurich, M. Large-Scale Mapping of Tree Species and Dead Trees in Šumava National Park and Bavarian Forest National Park Using Lidar and Multispectral Imagery. *Remote Sensing* [online]. 2020, roč. 12, č. 4, str. 22 [cit. 31.3.2023]. Dostupné z: doi:10.3390/rs12040661
- Latifi, H.; Heurich, M. Multi-Scale Remote Sensing-Assisted Forest Inventory: A Glimpse of the State-of-the-Art and Future Prospects. *Remote Sensing* [online]. 2019, roč. 11, č. 11 [cit. 14.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11111260

- Leckie, D. G.; Gougeon, F.; McQueen, R.; Oddleifson, K.; Hughes, N.; Walsworth, N.; Gray, S. Production of a Large-Area Individual Tree Species Map for Forest Inventory in a Complex Forest Setting and Lessons Learned. *Canadian Journal of Remote Sensing* [online]. 2017, roč. 43, č. 2, str. 140-167 [cit. 14.3.2023]. ISSN 0703-8992. Dostupné z: doi:10.1080/07038992.2017.1286974
- Lausch, A.; Erasmi, S.; King, D.; Magdon, P.; Heurich, M.; Lausch, A.; Erasmi, S.; King, D.; Magdon, P.; Heurich, M. Understanding Forest Health with Remote Sensing-Part II—A Review of Approaches and Data Models. *Remote Sensing* [online]. 2017. roč. 9, č. 2, [cit. 2.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs9020129
- Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. Remote Sensing and Image Interpretation. 7. vydání. United States of America. 2015. 770 stran. ISBN 978-1-118-34328-9.
- Lulla, K.; Nellis, M.; Rundquist. Celebrating 40 years of Landsat program's Earth observation accomplishments. *Geocarto International* [online]. 2012, roč. 27, č. 6, [cit. 24.2.2023]. ISSN 1010-6049. Dostupné z: doi:10.1080/10106049.2012.727604
- Liu, T.; Abd-Elrahman, A.; Morton, J.; Wilhelm, V. L.; Comparing fully convolutional networks, random forest, support vector machine, and patch-based deep convolutional neural networks for object-based wetland mapping using images from small unmanned aircraft system. *GIScience & Remote Sensing* [online]. 2018, roč. 55, č. 2, str. 243-264 [cit. 1.4.2023]. ISSN 1548-1603. Dostupné z: doi:10.1080/15481603.2018.1426091
- Ma, L.; Li, M.; Ma, X.; Cheng, L.; Du, P.; Liu, Y. A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2017, roč. 130, str. 277-293 [cit. 18.3.2023]. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.06.001
- Makinde, E. O.; Salami, A. T.; Olaleye, J. B.; Okewusi, O. Object Based and Pixel Based Classification Using Rapideye Satellite Imager of ETI-OSA, Lagos, Nigeria. *Geoinformatics FCE CTU* [online]. 2016, roč. 15, č. 2, str. 59-70 [cit. 15.3.2023]. ISSN 1802-2669. Dostupné z: doi:10.14311/gi.15.2.5
- Marçal, A. R. S.; Rodrigues, A. S. A method for multi-spectral image segmentation evaluation based on synthetic images. *Computers & Geosciences* [online]. 2009, roč. 35, č. 8, str. 1574-1581 [cit. 15.3.2023]. ISSN 0098-3004. Dostupné z: doi:10.1016/j.cageo.2008.11.008

- Matese, A.; Toscano, P.; Di Gennaro, S.; Genesio, L.; Vaccari, F.; Primicerio, J.; Belli, C.; Zaldei, A.; Bianconi, R.; Gioli, B. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing* [online]. 2015, roč. 7, č. 3, str. 2971-2990 [cit. 2.4.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs70302971
- Michałowska, M.; Rapiński, J. A Review of Tree Species Classification Based on Airborne LiDAR Data and Applied Classifiers. *Remote Sensing* [online]. 2021, roč. 13, č. 3 [cit. 16.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13030353
- Modlinger, R.; Bařa, D.; Raevsky, S.; Rouč, Z.; Leiner, M.; Tyřer, D.; Mráz, A.; Jakuř, R.; Kuřelka, K.; Surový, P. Monitoring říření lýkořrouta smrkového – *Ips typographus* (L.) v oblasti Smrčiny [online]. 2019, str. 43-48 [cit. 29.3.2023]. Dostupné z: https://www.infodatasys.cz/lesnik21-2019/lesnik2019_Modlinger.pdf
- Mountrakis, G.; Im, J.; Ogole, C. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2011, roč. 66, č. 3, str. 247-259 [cit. 16.3.2023]. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001
- Mozgeris, G.; Juodkienė, V.; Jonikavičius, D.; Straigyte, L.; Gadal, S.; Ouerghemmi, W. Ultra-Light Aircraft-Based Hyperspectral and Colour-Infrared Imaging to Identify Deciduous Tree Species in an Urban Environment. *Remote Sensing* [online]. 2018, roč. 10, č. 10, str. 1-22 [cit. 12.2.2023]. Dostupné z: doi:10.3390/rs10101668.
- Mudrych, Z. DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ. 1. vydání. Praha: Academia. 1985.
- Národní park České Švýcarsko a CHKO Labské Pískovce: *Správa Národního parku České Švýcarsko* [online]. Good Sailors [cit. 2.3.2023]. Dostupné z: <https://www.npcs.cz/>
- Novák, J. A. Drony: *kompletní průvodce včetně přehledu nové legislativy*. Praha: Grada Publishing, 2021, str. 304. ISBN 978-80-271-0775-9.
- Otukei, J. R.; Blaschke, T. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2010, roč. 12, str. 27-31 [cit. 16.3.2023]. ISSN 1569-8432. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2009.11.002
- Pal, N. R.; Pal, S. K. A review on image segmentation techniques. *Pattern Recognition* [online]. 1999, roč. 26, č. 9, str. 1277-1294 [cit. 14.3.2023]. ISSN 00313203. Dostupné z: doi:10.1016/0031-3203(93)90135-J

Pavelka, K. Dálkový průzkum Země: družicové systémy. 1. vydání. Praha: ČVUT. 2010. 112 stran. ISBN 978-80-01-04628-9

Petropoulos, G. P.; Vadrevu, K. P.; Kalaitzidis, Ch. Spectral angle mapper and object-based classification combined with hyperspectral remote sensing imagery for obtaining land use/cover mapping in a Mediterranean region. *Geocarto International* [online]. 2013, roč. 28, č. 2, str. 114-129 [cit. 10.3.2023]. ISSN 1010-6049. Dostupné z: doi:10.1080/10106049.2012.668950

Richards, J. A.; Xiuping, J. Remote Sensing Digital Image Analysis. 3. vydání. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg. 1999. ISBN 978-3-662-03978-6

Rodriguez-Galiano, V. F.; Ghimire, B.; Rogan, J.; Chica-Olmo, M.; Rigol-Sanchez, J. P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2012, roč. 67, str. 93-104 [cit. 15.3.2023]. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002

Schelhaas, M. J.; Nabuurs, G. J.; Schuck, A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* [online]. 2003, roč. 9, č. 11, str. 1620-1633 [cit. 14.2.2023]. ISSN 1354-1013. Dostupné z: doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x

Schneider, A. Monitoring land cover change in urban and peri-urban areas using dense time stacks of Landsat satellite data and a data mining approach. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2012, roč. 124, č. 1, str. 689-704 [cit. 5.2.2023]. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2012.06.006

Seidl, R.; Schelhaas, M.; Rammer, W.; Verkerk, P. J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* [online]. 2014, roč 4, č. 9, str. 806-810 [cit. 14.2.2023]. ISSN 1758-678X. Dostupné z: doi:10.1038/nclimate2318

Shakya, A.; Biswas, M.; Pal, M. Parametric study of convolutional neural network based remote sensing image classification. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2021, roč. 42, č. 7, str. 2663-2685 [cit. 10.3.2023]. ISSN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2020.1857877

Stereńczak, K.; Mielcarek, M.; Kamińska, A.; Kraszewski, B.; Piasecka, Ż.; Miścicki, S.; Heinrich, M. Influence of selected habitat and stand factors on bark beetle *Ips typographus* (L.) outbreak in the Białowieża Forest. *Forest Ecology and Management* [online]. 2020, roč. 459 [cit. 28.3.2023]. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2019.117826

- Stumpf, A.; Kerle, N. Object-oriented mapping of landslides using Random Forests. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2011, roč. 115, č. 10, str. 2564-2577 [cit. 15.3.2023]. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2011.05.013
- Surový, P.; Kuželka, K.; Abdollahnejad, A.; Sirotková, K.; Melichová, Z.; Slavík, M. Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví. 1. vydání. Praha: Česká zemědělská univerzita. 2019. 240 stran. ISBN 978-80-213-3008-5.
- Surový, P.; Kuželka, K.; Matejčíková, J.; Hüttnerová, T.; Modlinger, R.; Sukup, K.; Věbrová, D. Metodika pro zjišťování zásob stojícího mrtvého dřeva pomocí metod dálkového průzkumu Země. Praha. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze. 2022.
- Surový, P.; Kuželka, K. Acquisition of Forest Attributes for Decision Support at the Forest Enterprise Level Using Remote-Sensing Techniques—A Review. *Forests* [online], 2019, roč. 10, č. 3 [cit. 10.2.2023]. Dostupné z: doi:10.3390/f10030273
- Toth, Ch.; Józków, G.; Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2016, roč. 115 [cit. 24.2.2023]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004
- Trubin, A.; Mezei, P.; Zabihi, K.; Surový, P. Jakuš, R. Northernmost European spruce bark beetle *Ips typographus* outbreak: Modelling tree mortality using remote sensing and climate data. *Forest Ecology and Management* [online]. 2022, roč. 505 [cit. 14.3.2023]. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2021.119829
- Wang, B.; Liu, J.; Li, J.; Li, M. UAV LiDAR and Hyperspectral Data Synergy for Tree Species Classification in the Maoershan Forest Farm Region. *Remote Sensing* [online]. 2023, roč. 15, č. 4 [cit. 14.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs15041000
- Wermelinger, B. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus*—a review of recent research. *Forest Ecology and Management* [online], 2004, roč. 202, 67-82 strana [cit. 20.2.2023]. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2004.07.018
- Wermelinger, B.; Seifert, M. Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecological Entomology* [online], 2001, roč. 24, č. 1, 103-110 strana [cit. 20.2.2023]. ISSN 0307-6946. Dostupné z: doi:10.1046/j.1365-2311.1999.00175.x
- Witharana, Ch.; Civco, D. L. Optimizing multi-resolution segmentation scale using empirical methods: Exploring the sensitivity of the supervised discrepancy measure Euclidean distance 2

(ED2). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2014, roč. 87, str. 108-121 [cit. 15.3.2023]. ISSN 0924-2716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.11.006

Zhang, W.; Tang, P.; Zhao, L. Remote Sensing Image Scene Classification Using CNN-Caps-Net. *Remote sensing* [online]. 2019, roč. 11, č. 5 [cit. 9.3.2023]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11050494

Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2021. 1. vydání. Praha: Ministerstvo zemědělství. 2022. 144 stran. ISBN 978-80-7434-669-9.

Žížala, D.; Lukas, V.; Kumhálová, J. DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ A PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ. 1. vydání. Praha: Zemědělský svaz ČR – Česká technologická platforma pro zemědělství. 2021. [cit. 6.2.2023]. Dostupné z: https://www.ctpz.cz/media/upload/1646732225_17-precizni-zemedelstvi-5-web.pdf

9 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1: Poloha Národního parku České Švýcarsko.	14
Obrázek 2: Rozdělení druhů nosičů se vztahem k rozsahu, rychlosti, přesnosti a správnosti měření.	23
Obrázek 3: Rozdělení snímačů v DPZ.	28
Obrázek 4: Metoda SVM (zdroj: Mountrakis et al., 2011).	36
Obrázek 5: Ortofoto Národního parku České Švýcarsko, rok 2020 (zdroj: Oldřich Holešinský).	38
Obrázek 6: Ortofoto (CIR) Národního parku České Švýcarsko, rok 2020 (zdroj: Oldřich Holešinský).	39
Obrázek 7: Letecký snímek TOP_sluk_3_7 (2021).	39
Obrázek 8: Snímky ze satelitu PlanetScope (2018, 2019, 2020, 2021).	40
Obrázek 9: Srovnání leteckého snímku (vlevo) a satelitního snímku (vpravo) z roku 2020.	40
Obrázek 10: Klasifikační třídy pro souše a zelený les.	41
Obrázek 11: nastavení funkce Mosaic To New Raster.	43
Obrázek 12: Letecký snímek (2021) s odstraněnými soušemi z předešlého roku (2020).	43
Obrázek 13: Letecký snímek (vlevo), klasifikace založená na objektech (vpravo).	44
Obrázek 14: Porovnání vzniklé klasifikace na leteckém snímku (2021) bez odstraněných loňských souší a s odstraněnými loňskými soušemi.	44
Obrázek 15: Použité nastavení nástroje Classification Wizard – Configure.	45
Obrázek 16: Trénovací vzorky vytvořené pro satelitní snímek – Souse, ZelenyLes, Stin.	46
Obrázek 17: Classification Wizard – zvolení klasifikační metody Support Vector Machine.	46
Obrázek 18: Vzniklá klasifikace.	47
Obrázek 19: Zbývající kroky klasifikace – Classify; Merge Classes; Reclassifier.	47
Obrázek 20: Vývoj kůrovcové kalamity v letech 2020 a 2021 podle leteckého snímkování.	49
Obrázek 21: Vývoj přírůstu kůrovcových souší v jednotlivých rocích (2018, 2019, 2020, 2021).	51

Obrázek 22: Vývoj přírůstu kůrovcových souší od roku 2018 do roku 2021 podle satelitních snímků.....	51
Obrázek 23: Přírůst kůrovcových souší v roce 2022.	52
Obrázek 24: Graf vývoje napadené plochy růstovou funkcí.	53
Tabulka 1: Postup šíření kůrovcových souší.	49
Tabulka 2: Postup vývoje plochy kůrovcových souší podle satelitních snímků.	50
Tabulka 3: Porovnání množství kůrovcových souší v letech 2020 a 2021 na leteckých a satelitních snímcích.....	52
Tabulka 4: Přehled satelitních prostředků, jejich funkcí a omezení (zdroj: Böhlena et al., 2022).	56
Tabulka 5: Porovnání Národního parku České Švýcarsko s Białowiecki Park Narodowy.	57