

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská  
Katedra hospodářské úpravy lesů



**Tvorba stromové mapy na kalamitním území s využitím  
bezpilotního letadla**

Bakalářská práce

Autor: Martin Koudelka  
Vedoucí práce: Ing. Karel Kuželka PhD.

2020



# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Koudelka

Lesnictví  
Lesnictví

Název práce

**Tvorba stromové mapy na kalamitním území s využitím bezpilotního letadla**

Název anglicky

**Utilization of small unmanned aerial system imagery for developing tree map of a post-windthrow forest stand**

### Cíle práce

Ověřit možnosti využití dat získaných pomocí bezpilotního letadla pro vytvoření mapy ležících a stojících stromů na kalamitním území.

Vyhodnotit přesnost a správnost vytvořené mapy pomocí validačních dat.

Vyhodnotit časovou náročnost tvorby mapy.

### Metodika

Z dat pořízených pomocí bezpilotního letadla v součinnosti s katedrou HÚL bude pomocí fotogrammetrických metod odvozen digitální model terénu a digitální model povrchu a vytvořena ortomozaika. Georeferencované rastery budou dále zpracovány v prostředí ArcGIS, kde budou sloužit jako vstupy pro vytvoření mapy ležících a stojících stromů. Přesnost a správnost mapy bude zjednodušeně vyhodnocena pomocí validačního výběru ležících a stojících vzorníků zaměřených v terénu. Bude zhodnocena vhodnost jednotlivých typů vstupních dat pro tvorbu mapy.

**Doporučený rozsah práce**

40 stran

**Klíčová slova**

bezpilotní letadlo, mapování, fotogrammetrie, kalamitní území

**Doporučené zdroje informací**

- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2392–2410.
- Puliti, S., Ørka, H., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*, 7(8), 9632–9654.
- Röder, M., Latifi, H., Hill, S., Wild, J., Svoboda, M., Brůna, J., ... Heurich, M. (2018). Application of optical unmanned aerial vehicle-based imagery for the inventory of natural regeneration and standing deadwood in post-disturbed spruce forests. *International Journal of Remote Sensing*, 00(00), 1–22.
- Rosnell, T., & Honkavaara, E. (2012). Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. *Sensors*, 12(1), 453–480.
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791–797.
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., ... Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2427–2447.

**Předběžný termín obhajoby**

2019/20 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Karel Kuželka, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra hospodářské úpravy lesů

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

**Ing. Peter Surový, PhD.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 15. 06. 2020

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Tvorba stromové mapy na kalamitním území s využitím bezpilotního letadla“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Kuželky PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.  
Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 14.6.2020

Podpis autora

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Karlu Kuželkovi PhD. za odborné rady, konzultace, vedení polního sběru dat i průběhu jejich zpracování a tvorbu podkladů v podobě ortomozaiky.

## Tvorba stromové mapy na kalamitním území s využitím bezpilotního letadla

### Abstrakt

Předmětem této práce je ověření aplikace bezpilotního letadla a tvorba stromové mapy kalamitní události nacházející se na území Národního parku Šumava, na základě které jsou následně odvozeny dendrometrické veličiny. Plocha byla zasažena větrnou kalamitou se sekundárním napadením hmyzími škůdci, zejména lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*). Data budou dále použita pro výzkum šíření těchto škůdců. V první části jsou popsány bezpilotní letadla, konstrukce, nesené senzory a jejich využití v lesnictví. V rámci práce je také přiblížen základní princip získávání fotogrammetrických dat s pomocí bezpilotního letadla, metoda tvorby referenčních dat a jejich analýza v mapovém programu ArcGIS Desktop a tabulkového softwaru Microsoft Excel. Celkem bylo na ploše 22 ha označeno 655 ležících kmenů a 1552 stojících stromů. Průměrné i konkrétní hodnoty rozdílů určení výčetního průměru a délky kmenů jsou porovnány mezi zkusnou plochou a rastrovým modelem. Výsledná průměrná relativní čtvercová chyba tlouštěk dosahovala 17 %, zatímco v případě výšek 22 %. Co se týče přesnosti selekce, z digitálních dat bylo určeno 78 % všech stromů oproti počtu jedinců zaměřených na ploše pozemní validací. V diskuzi jsou rozebrány důvody zkreslení dat a návrhy na eliminaci chybovosti obou posuzovaných veličin.

**Klíčová slova:** bezpilotní letadlo, mapování, fotogrammetrie, kalamitní území

## Calamity area tree map creation with use of unmanned aircraft.

### Abstract

The main subject of this thesis is evaluation of UAV application for dendrometric data acquisition through previously created tree map of forest located in National park Šumava, which has been struck by windthrow followed by the secondary bark beetle (*Ips typographus*) outbreak. The data will be further used for research of this insect's dispersal. In the first part there is a description of unmanned aircraft, their construction, sensors carried and their use in forestry. Furthermore, it is described the base principal of photogrammetric data acquisition with help of an unmanned aircraft, referential data acquisition principle and their analysis in map software ArcGIS Desktop and table software Microsoft Excel. Overall on the 22 field there was discovered 655 lying stems and 1552 standing trees. Mean and absolute values of diameters at breast height and longitude gained from raster data and field measurements differences are compared. Total relative mean square error of diameters was 17 % and 22 % in terms of longitude. Precision of stem selection was 78 % comparing raster and ground field validation data. The reasons causing distortions and propose for error elimination is described in the discussion.

**Keywords:** unmanned aircraft, mapping, photogrammetry, calamity area



## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Úvod</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>2 Cíl práce</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>3 Rozbor problematiky</b> .....                                     | <b>15</b> |
| 3.1 Představení oboru dálkového průzkumu Země.....                     | 15        |
| 3.1.1 Průzkum z vesmíru .....  | 15        |
| 3.1.2 Pilotovaná letadla.....  | 15        |
| 3.1.3 Bezpilotní letadla .....   | 16        |
| 3.1.4 Hlavní druhy senzorů nesených technikou DPZ.....                 | 16        |
| Tvorba 3D modelu terénu .....  | 16        |
| Multi a hyperspektrální snímače.....                                   | 18        |
| 3.1.5 Nejčastější typy konstrukčních řešení bezpilotních letadel ..... | 18        |
| Bezpilotní letadla s elektrickým pohonem.....                          | 19        |
| Bezpilotní letadla se spalovacím motorem .....                         | 19        |
| Bezpilotní letadla s hybridním pohonem .....                           | 20        |
| 3.2 Využití bezpilotních letounů v lesnictví .....                     | 20        |
| 3.2.1 Měření pro hospodářsko-manažerské účely .....                    | 21        |
| 3.2.2 Odvození zdravotního stavu a fyziologie dřevin .....             | 22        |
| 3.2.3 Tvorba podkladů pro krizový management .....                     | 23        |
| 3.3 Základní přehled legislativy vztahující se na provoz UAV .....     | 24        |
| 3.3.1 Užití bezpilotních letadel pro komerční účely.....               | 25        |
| 3.3.2 Rozsah nasazení bezpilotních letadel .....                       | 25        |
| <b>4 Metodika</b> .....  | <b>26</b> |
| 4.1 Prostředí výzkumu .....  | 26        |
| 4.2 Použitá technika .....   | 27        |
| 4.2.1 Konfigurace letadla.....   | 28        |
| 4.2.2 Konfigurace pozemního měřicího aparátu.....                      | 28        |
| 4.3 Letové podmínky a parametry letu .....                             | 28        |
| 4.4 Pozemní sběr dat .....   | 28        |
| 4.5 Sledování časové náročnosti .....                                  | 29        |
| 4.6 Vyhodnocování dat .....  | 29        |
| 4.6.1 Metody vyhodnocení výsledků leteckých snímků.....                | 29        |
| 4.6.2 Metody vyhodnocení zkusné plochy .....                           | 30        |
| 4.6.3 Porovnávané veličiny.....  | 31        |
| <b>5 Výsledky</b> .....  | <b>32</b> |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.1      | Stromová mapa.....   | 32        |
| 5.1.1    | Digitální data.....  | 33        |
| 5.2      | Přesnost selekce kmenů z digitálního modelu.....           | 33        |
| 5.3      | Výsledné hodnoty $h_s$ , $d_{1,3}$ a vyhodnocení chyb..... | 35        |
| 5.4      | Zásoba a hmotnost stromů v porostu kalamitního území.....  | 37        |
| 5.5      | Časová náročnost práce.....                                | 38        |
| <b>6</b> | <b>Diskuse.....</b>  | <b>39</b> |
| 6.1      | Reflexe chyb a potenciál jejich odstranění.....            | 39        |
| 6.1.1    | Odvození průměru $d_{1,3}$ .....                           | 39        |
| 6.1.2    | Odvození výšky $h_s$ .....                                 | 41        |
| 6.1.3    | Přesnost záznamu a lokalizace kmenů.....                   | 43        |
| 6.1.4    | Časová náročnost.....                                      | 44        |
| 6.1.5    | Vyhodnocení zásoby.....                                    | 45        |
| <b>7</b> | <b>Závěr.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>8</b> | <b>Seznam literatury a použitých zdrojů.....</b>           | <b>48</b> |

## Seznam obrázků

- Obr. č.1 ortofotosnímek s přibližným zákresem území [zdroj:mapy.cz]
- Obr. č.2 vzlet dronu DJI Phantom na výzkumné ploše [zdroj:archiv autora]
- Obr. č.3 schéma způsobu záznamu kmenů, kroky jsou číselně označeny
- Obr. č.4 náčrt designu výpočtu výšky a tloušťky
- Obr. č.5 náhled stromové mapy
- Obr. č.6 náhled GNSS bodů na mapě a lokalizace jednotlivých kmenů
- Obr. č.7 detail nenalezených stromů při manuální identifikaci
- Obr. č.8 detail zkusné plochy
- Obr. č.9 detail chyby kmene ID rastr 154
- Obr. č.10 detail chyby kmene ID rastr 153
- Obr. č.11 detail chyby na kmene ID rastr 99
- Obr. č.12 detail zkusné plochy, modré linie - nejvíce chybové kmene, modré kruhové body – poloha vrcholů dle GNSS měření
- Obr. č.13 detail zkusné plochy s vyznačením vynechaných kmenů

## Seznam tabulek

Tab. č.1 vyhodnocení dat GNSS měření a porovnání s rastrovým modelem

Tab. č.2 zobrazení možné chybovosti GNSS měření z duplicitního záznamu téhož kmene

Tab. č.3 Zobrazení absolutní velikosti relativních chyb a jejich procentuální vyjádření

Tab. č.4 popis časové náročnosti provedené práce

Tab. č.5 Přehled objemových veličin porostu

Tab. č.6 vyhodnocení chyby v závislosti na převýšení terénu u jednotlivých kmenů

## Seznam použitých zkratk

**UAV** – unmanned aerial vehicle – bezpilotní letadlo

**LiDAR** - Light Detection And Ranging – metoda dálkového měření vzdálenosti na základě výpočtu doby šíření pulsu laserového paprsku

**DPZ** – dálkový průzkum Země

**RGB** – Red Green Blue – barevné spektrum – červená, zelená, modrá

**EASA** - Evropská agentura pro bezpečnost letectví

**RTK** - real-time kinematic – kinematika v reálném čase

**PPK** – post-processing kinematic – kinematika s následným zpracováním

**SDG** – stepped diameter gauge – odstupňované měřidlo průměru

## 1 Úvod

Při zjišťování zásoby porostu jsou v běžné praxi využívány zejména konvenční metody přímého měření a odhadu založené na ručních měřících pomůckách [1]. V posledních letech si v lesnictví nachází své uplatnění také použití bezpilotních letadel, jako tomu je i v mnoha dalších oborech. Nabízí zásadní zvýšení efektivity oproti klasickým pozemním metodám, i zcela nové možnosti získávání dat.

V případě lesních porostů na území České republiky na pozemcích určených pro plnění funkce lesa se jedná z 45,8 % o smrk ztepilý (*Picea Abies*) [5], který může být jako dřevinný druh pěstovaným monokulturním způsobem náchylný k poškození větrem [3] a k následným napadáním také přeživších porostů hmyzími škůdci v blízkosti vzniklých polomů. [4]. Právě v takových to případech je rozhodující rychlost reakce lesního hospodáře, který může včasnými opatřeními zamezit šíření především kalamitních škůdců. K projektování zásahu je ale zapotřebí znát lokaci i rozsah poškození [40]. Ověření možností aplikace inovativních přístupů v lesním hospodářství na konkrétním případě větrné kalamity je hlavním cílem této bakalářské práce.

Zájmové území se nachází na hřebeni jižnější části Národního parku Šumava v blízkosti státní hranice České republiky a Spolkové republiky Německo v nadmořské výšce zhruba okolo 1 300 výškových metrů nad mořem v okolí hory Smrčina (1 338 m.n.m.). Část východního svahu české strany pohoří byla prohlášena bezzásahovým územím. Názory na správnost rozhodnutí nelikvidovat podkorním hmyzem napadené stromy v horních partiích pohoří se velmi různí [43]. V současné době se v bezzásahové četné nachází četné polomy, které nejsou likvidovány v souladu s rozhodnutím, což má za následek šíření podkorních škůdců. Je možné, že teoretické rozsáhlé (ač dočasné) odlesnění pohoří by mohlo mít významné důsledky, v případě tohoto výzkumu například na vodní režim [16].

Podobné střety názorů zastánců přirozeného koloběhu lesa a některými lesníky jsou k vidění v sousedním Bavorském národním parku, kde v důsledku vyhlášení bezzásahové zóny v sedmdesátých letech minulého století došlo k první rozsáhlému šíření hmyzích škůdců ve střední Evropě způsobeného zejména četnými polomy na přelomu století [43].

Důsledky rozhodnutí o nelikvidování kalamity, ale nemusí trápit pouze české a německé lesníky, vzbuzují obavy i u rakouských kolegů, kteří na svém území spravují hospodářský les podobného charakteru jehličnatých porostů jako na české straně,

s rozdílem v určení lesních pozemků. Nejedná se o zvláště chráněné území ani bezzásahovou lokalitu, ale o pozemek určený primárně k hospodářskému využití. Devastace porostu má bezesporu značný vliv na ekonomickou bilanci takových porostů, jelikož nutná obnova si žádá výdaje nekryté možným zhodnocením vzniklým těžbou dřeva v takovém rozsahu. Nehledě na finanční stránku, možné škody mohou být i ekologického a klimatického typu, jak bylo zmíněno na předchozí stránce.

Aplikace metod DPZ v případě přírodní katastrofy přináší výhody v podobě bezpečnosti, rychlosti i efektivity [2,20]. V úvahu je třeba brát významně zvýšené riziko poranění a snížení celkové bezpečnosti a hygieny práce při pohybu na ploše, v případě této práce po nezajištěných ležících kmenech často ve značné výšce nad povrchem.

Při zvážení metodiky zjišťování zásoby se dá přirovnat zvolená metoda analýzy k průměrkování naplno, která je značně přesná [1]. Teoreticky může přinést i přesnější výsledky, protože jsou u každého jednotlivého stromu zjišťován nejen průměr, ale také výška. Ta je při zmíněném klasickém přístupu zjišťována pouze jako průměrná hodnota z několika náhodně vybraných jedinců pro tloušťkové stupně [1]. Výsledná zjištění jsou proto porovnána na jedné pozemní zkusné ploše vytyčené a měřené pomocí geodetického GNSS systému se zpřesňujícím stacionárním bodem.

Použití bezpilotních letadel i dalších metod dálkového průzkumu země ukazuje na příkladu této práce svůj potenciál pro zlepšení fungování lesního hospodářství za použití moderních technologií. Zavedené konvenční metody ale prozatím převládají a nové postupy zůstávají stále povětšinou ve stádiu výzkumů. Svůj podíl na tom jistě má obtížná integrace nových, zejména moderních technologií z pohledu financí i zákonů. Otázkou zůstává roztržštěná a nedovyvinutá legislativa leteckého provozu z pohledu bezpilotních systémů, která klade překážky nasazení do praxe [2]. V neposlední řadě také zůstává finanční hledisko. Cena nových technologií a na míru šitých podprogramů vyžaduje znalosti hned několika různých oborů a prostředí, což výslednou cenu, zejména z hlediska ohodnocení analytika, může rapidně navýšit. I přesto jak se ukázalo v případě studie využití DPZ metody pro monitoring hmyzích škůdců, výsledná ekonomická bilance může překonat klasické přístupy například v ochraně lesa [44].

## 2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je seznámení se technologiemi DPZ a jejich aplikací za účelem zjištění obtížnosti integrace nových přístupů pro uživatele bez extenzivních znalostí pokročilých systémů. Předmětem není inovace či vývoj nových přístupů a metod, nýbrž ověření možností využitelnosti a potenciálu bezpilotních letadel a dat s jejich pomocí získaných. Letecké snímky budou využity pro vyhodnocení dendrometrických veličin padlých kmenů na kalamitním území. Aby bylo možné vyhodnotit správnost digitálního měření a získané výsledky lze pokládat za ověřené, bude vytyčena jedna zkusná plocha na zájmovém území. Pro úspěšnou validaci by bylo třeba mnohem rozsáhlejšího testování, to se ale není hlavním cílem práce, pozemní data slouží pouze jako porovnání a základní vyhodnocení správnosti. Zároveň je pozitivní fakt, že výsledné výstupy, respektive rastrová stromová mapa, může mimo jiné vypomoci dalším výzkumům šíření hmyzích škůdců, především kolegům z Fakulty lesnické a dřevařské.

## 3 Rozbor problematiky

### 3.1 Představení oboru dálkového průzkumu Země

S rychlým rozvojem letectví a kosmonautiky zažívá znatelný rozmach také odvětví dálkového průzkumu země. Jedná se o získávání dat o povaze a stavu zemského povrchu, jeho součástí i samostatných objektů za pomoci letounů a družic různých konstrukcí i velikostí. Pro výběr použité technologie je třeba zvážit rozsah i měřítko požadovaného výstupu [2], ale v neposlední řadě také celkovou cenovou hladinu, která úzce souvisí právě s výběrem měřítka a požadovaného detailu [6]. Výsledná data lze použít při zdokonalování širokého spektra podoborů lesnického managementu i při jiných aplikacích, případně pro tvorbu zcela nových pohledů na problémy, které jsou obecně pokládány za vyřešené, a na které lze díky tomu nahlížet ze zcela odlišného úhlu pohledu. Jedná se o efektivní nástroj, jehož využití spočívá v inovativních schopnostech výzkumných pracovníků a odborníků v oboru. Mnohá řešení jsou již ověřena, četné metody se pomalu stávají konkurenceschopnější pro zavedené postupy a řada inovací stále čeká na objevení.

#### 3.1.1 Průzkum z vesmíru

Zařízení instalovaná na oběžné dráze země patří ke starším přístupům v tomto odvětví. Vzhledem k jejich poloze musí být vybaveny nákladnými, vysoce kvalitními senzory, které ve spojení s vysokou cenou instalace i údržby udávají také výslednou částku dat nimi pořízených. Dokáží poskytnout snímky velkých měřítek a rozsahů při minimální časové dotaci. Rozlišení je ale v porovnání s dalšími metodami nejhrubší [6]. Mezi nesporné výhody tohoto řešení patří jistě i snadná tvorba časové řady dat za delší časové období pro určité aplikace. [33]

#### 3.1.2 Pilotovaná letadla

Získávání dat pomocí letounů s lidskou posádkou se považuje za nejstarší a tradiční přístup. Jakožto velké stroje přepravující lidskou posádku, nemají letadla problém unést různé druhy senzorů [6] a napájet je po delší dobu. Z hlediska měřítka a rozlišení se jedná o přechod mezi satelitem a kompaktním bezpilotním systémem. Pořízení dat touto metodou je ale opět velmi drahé a bývá spojeno s větším akčním polem [7], což znemožňuje použití zejména na plochách o malém rozsahu.

### 3.1.3 **Bezpilotní letadla**

Velkému rozvoji využití napříč mnoha obory se těší právě bezpilotní letadla neboli Unmanned aerial vehicles (UAVs). Nabízí vynikající poměr přijatelné celkové ceny, selektivní volby umístění i rozsahu zkoumaného území či velmi vysoké rozlišení získávaných dat [8,6] a v neposlední řadě také časovou flexibilitu provádění měření. Je tak možné vyhnout se například špatnému počasí i jiným vlivům rušivé povahy, které mohou mít degradační efekt na kvalitu výstupních dat. Pilotovaná letadla i družice mohou mít pro měření přesně vyhrazený čas určen bez garantovaného výsledku. Moderní konstrukce dovolují nesení různých typů senzorů a techniky [9], díky čemuž jsou právě bezpilotní letadla skutečně univerzálním nástrojem použitelným v různých odvětvích a aplikacích. Je však třeba zmínit, že i přes rychlý vývoj výkonné techniky, může být podpora složitějších systémů nelehkým úkolem, přičemž nejvíce limitujícím faktorem je jejich přílišná hmotnost [2].

### 3.1.4 **Hlavní druhy senzorů nesených technikou DPZ**

Pro lepší představu o povaze získaných dat je vhodné uvést základní typy používaných snímačů pro potřeby DPZ. Vylíšena jsou především dvě odvětví, a to senzory pro tvorbu ortomosaiky a 3D modelu terénu sloužící k odvození tvaru a velikosti objektů, nebo multi/hyperspektrální snímače [6], které odhalují spíše povahu a stav předmětů zájmu na tvořené rastrové síti skenované oblasti. Letadla a satelity však mohou nést různé druhy techniky, takže je jen na vývojáři, jaké řešení je pro jeho práci ideální.

#### **Tvorba 3D modelu terénu**

Do této kategorie spadá i technika použitá pro získávání dat, která je předmětem právě čtené práce. Díky schopnosti letadla osazeného touto technikou efektivně převádět tvary a tím i rozměry skutečných objektů či předmětů do digitální podoby a 3D modelu, je hojně využívána napříč různými odvětvími od zeměměřičství, architektury, přes environmentální vědy až po monitoring při různých příležitostech. Díky stále se snižující ceně jednoduchých továrních řešení se snadným ovládním a zjednodušeným vyhodnocováním si nachází cestu k uživatelům různých povolání.



Ze základních principů fungování jsou známy především dva hlavní směry. Fotogrametrie sází na odvozování tvaru na základě překrývající se série fotografií, zatímco alternativní přístup využívá laserového senzoru a odrazivosti vyslaných prostředků. Poskytuje sice detailnější obraz, ale bývá, alespoň prozatím, finančně nákladnějším řešením, a také generuje nesenou hmotnost letadla, takže si žádá robustnější techniku [6].

### **Fotogrammetrie**

Mezi nejvíce rozšířené senzory patří běžný či více specializovaný RGB foto-snímač. Letadlo dle letového plánu přelétá zájmové území, nad kterým je pořizována řada snímků s určitým překryvem v jednotlivých řadách. Optimální nastavení letové hladiny v návaznosti na rozlišení senzoru nabízí pilotovi možnost volby potřebného detailu, rychlosti snímání, ale také objemu získaných dat. Odvozována řada údajů o poloze, tvaru i povaze pozorovaných objektů. Řada prací používá výsledný 3D modely pro určení dendrometrických veličin [10], jiné projekty se věnují monitoringu zdravotního stavu lesů [3]. Výhodou je především nízká pořizovací cena ve srovnání s nabízeným výkonem i možnost použití hotových konstrukčních řešení komerčních značek určených také pro širokou veřejnost, filmaře i rekreační využití. Benefit takových letadel spočívá například také integraci bezpečnosti sensoriky v základní sestavě, jelikož je předpokládána nevelká zkušenost pilotů, ale také podpora výrobce, co se týče náhradních dílů i řešení problémů s fungováním. V případě potřeby zvýšení kvality záznamu, zejména co se týká odvozování 3D objektů, prokázala kvalitní výsledky studie používající sestavu dvou RGB kamer [31].

### **Využití laserové techniky**

Alternativní přístupy sází na použití laserových senzorů typu LiDAR, pomocí kterých jsou vytvářeny digitální modely povrchu i objektů na něm umístěných [11]. Princip spočívá v odrazivosti laserových paprsků dopadajících na povrch, které se po dopadu na určitou plochu postupně vrací. Pokud je senzorem zachycena doba návratu dílčích paprsků, tak je možné rozpoznat i detaily zkoumaných objektů. Výsledkem je husté mračno bodů, které je pomocí počítačové editace vytvořen 3D model. Tato varianta může být i mnohonásobně dražší nejen z pohledu pořizovací ceny, ale také náročnosti zpracování těchto dat, a tudíž je nutné pečlivě zvážit, zda jsou takto detailní snímky zapotřebí, či zda si tento typ dat žádá podstatu práce. [31] Bezpilotní prostředky

nesoucí LiDAR ale představují zejména finančně zajímavou alternativu pro letadla s posádkou osazená stejnou technikou [12]. Dalším benefitem kompaktních systémů může být větší výběrnost i detail zjišťovaných ploch [6].

### **Multi a hyperspektrální snímače**

Pro potřeby určitých studií a aplikací je nezbytné zaznamenat změnu určitého atributu na každém jednotlivém bodě (pixelu) snímku. K tomu lze mimo klasické RGB snímače použít i kamery, které dokáží zaznamenávat světlo i o jiné vlnové délce, a to ať už kratší, nebo delší, než je rozsah viditelného spektra. Právě v těchto mezích lze často odhalit indikátory problémů, které jsou okulárnímu pozorování skryté a umožnit je efektivně porovnávat. Pro potřeby lesního hospodářství se objevují například studie, které snaží odvodit zdravotní stav, respektive úroveň napadení hmyzími škůdci, na základě změny poměru složek RGB spektra, přesněji jeho zelené složky v chlorofylu stromů v průběhu času, a také změny infračerveného spektra získaného pomocí multispektrálního snímače [25]. Rozdíl mezi multispektrálním a hyperspektrálním snímačem spočívá v počtu zachycovaných pásem. Rozsah multispektrálního typu obývá oblast jednotek snímaných frekvencí, přičemž hyperspektrální dosáhne až na nižší stovky různých druhů vlnových délek napříč celým spektrem, což z něj činí specializovaný senzor s vysokou mírou detailu [45].

#### **3.1.5 Nejčastější typy konstrukčních řešení bezpilotních letadel**

Jakožto poměrně čerstvá technologická novinka, i mezi bezpilotní mi letadly je nabízena celá řada provedení. Momentálně se jejich vývoji věnuje značná pozornost, a dokonce se objevují mimo konvenčních konstrukcí s elektrickým či spalovacím motorem i hybridní prototypy, které jsou předmětem studia mnoha prací posledních let [např.13]. Co se samotného principu letu týče, tak se na trhu pohybují celkem dvě nejčastější konstrukční provedení – multikoptéra a letoun s fixním křídlem. V následujících podkapitolách jsou uvedeny hlavní druhy pohonného ústrojí, a zároveň nástin konstrukce typické pro danou kategorii. Zmíněno je i několik z hlavních způsobů využití a směrů, na které se obrací pozornost výzkumů.

### **Bezpilotní letadla s elektrickým pohonem**

Mezi nejtypičtější konstrukce se řadí i veřejnosti dobře známé multikoptéry s elektrickým pohonem, přičemž počet rotorů se může lišit dle konkrétního řešení. Jedná se o osvědčenou konstrukci, která nabízí dobré letové vlastnosti v kombinaci s přijatelnou hmotností. Při průzkumu trhu lze narazit na celou řadu velikostí od kompaktních strojů do 250 g celkové hmotnosti a vestavěnou fototechnikou, až po několika kilogramové stroje, které nabízí volné pole působnosti, což se voleného neseného senzoru/fotoaparátu týče. Hlavní výhody tohoto řešení je univerzálnost, vysoká intenzita získávání dat na ploše [6] různého rozsahu, vysoká efektivita [14] i nízké pořizovací a provozní náklady.

Dalším velice známým a využívaným řešením motorem poháněné pevné křídlo nesoucí fototechniku. Toto řešení umožňuje pokrytí větší plochy s nižším energetickým výdejem [14]. Jelikož se jedná o skutečný letoun, tak dokáže poskytnout větší pokrytí plochy při podobné úrovni detailu díky nižší energetické náročnosti [30]. Často ale vyžadují vzletovou a přistávací plochu i větší zkušenosti pilota, ale také jsou i přes kompaktnější složitelné konstrukce náročnější na přepravu.

### **Bezpilotní letadla se spalovacím motorem**

Zvláště v případech vyžadujících nesení větší zátěže či potřeby prodloužení doby letu najde svoje využití konstrukce se spalovacím motorem, jelikož poměr uložené energie ke hmotnosti hraje ve prospěch kapalného paliva oproti bateriovým článkům [13]. Přes svoje výhody ale přináší určité nedostatky. Jednotka spalovacího leteckého motoru sama o sobě představuje větší zátěž, takže přirozeně se jedná o dimenzionálně větší stroj [15]. Nejde tedy většinou o techniku, kterou by mohl snadno přenášet člověk na delší vzdálenosti, ale naopak v některých případech zapotřebí dokonce podpůrného vozidla pro přepravu a údržbu. S rozvojem moderních bateriových článků pro pohon stavbou podstatně jednodušších elektromotorů se toto odvětví zdá být nevhodné pro běžné aplikace zvláště kvůli vyšším konstrukčním i údržbovým nákladům [14]. Svoje uplatnění mohou najít ve speciálních případech vyžadujících větší dolet či nesení těžkých břemen [13].

### **Bezpilotní letadla s hybridním pohonem**

Při snaze o zvětšení doletu, jakožto nejvíce limitujícího faktoru, v kombinaci se sníženou spotřebou paliva se do zorného pole dostávají také pohony s elektromotory i jednotkou spalující fosilní paliva. Výsledkem kombinace dvou výše zmíněných provedení je nižší spotřeba paliva oproti strojům s čistě spalovacím motorem a zvýšený dolet než elektrická varianta [15]. Hlavní myšlenka spočívá v dobíjení baterií za letu energií generovanou kompaktním spalovacím motorem, který operuje stále v optimálních otáčkách, a tudíž i s minimalizovanou spotřebou paliva. Hlavní zdroj napájení spočívá většinou v elektromotorech, které jsou schopny krýt výkonové špičky při energeticky náročných částech letu. Navíc implementace spalovací jednotky umožní optimálnější využití baterie v krajní mezi vybití, kdy je ponechávána rezerva pro bezpečné přistání letounu [13]. Vhodnou kombinací jednotek a jejich efektivním řízením je možné dosáhnout zvýšení efektivity, respektive spotřeby paliva, v rozmezí jednotek až nižších desítek procent oproti čistě spalovacím motorům [13,15]. Podstatnou nevýhodou je složitější konstrukce a tím i cena, což z pohledu široké použitelnosti opět nahrává čistě elektrickým strojům. Hybridní pohony jsou však zatím především v oblasti vývoje a do budoucna je možné, že s větším rozšířením a sníženou cenou mohou být tyto systémy zdatnou konkurencí zavedeným řešením.

### **3.2 Využití bezpilotních letounů v lesnictví**

Tématu použití systémů typu UAV je věnováno nespočet prací v rámci oboru lesního hospodářství [6]. Postupem času cena technologických řešení klesá, čímž se stávají přístupnější a konkurenceschopnější tradičním metodám a postupům [8]. Inovativní pojetí přináší přesnější, rychlejší i zcela nové, dříve jen těžko získatelné, výsledky. Velký počet prací sdílí prostřednictvím hlavního cíle společného jmenovatele, kterým je trvale udržitelné (lesní) hospodářství [11,12,2], což obecně rezonuje v posledních letech celým odvětvím lesnictví. Dá se očekávat, že snadná tvorba rozličných typů dat přinese v budoucnu nové odpovědi na dlouho nezodpovězené otázky či nové pohledy na stanoviska prakticky pokládaná za dogmata. Zároveň by aplikací moderních technologií mohlo být docíleno efektivnější, včasné a tzv. ad-hoc správy zejména aktuálně obnovovaných lesních pozemků tak, aby nedoházelo k poškozování porostů, přílišímu stárnutí hospodářských lesů, ale také aby pro výchovu a management

bio-diverzifikovaných a přírodě blízkých kultur [6]. Plošné nasazení má ale stále řadu překážek, a to především legislativních, ale také finančních i profesních ve smyslu absence komplexního uživatelského rozhraní [2].

### 3.2.1 Měření pro hospodářsko-manažerské účely

S příslibem snížení časové náročnosti, zvýšení efektivity a také celkové finanční bilance či zkvalitnění péče o vlastní či svěřené pozemky začíná být použití bezpilotních letadel již téměř reálné i ve větší než jen omezené míře. Svůj díl na této skutečnosti má také nízká pořizovací cena techniky i snadný provoz a řízení [2]. Hotová řešení v podobě multi-koptéry s fotoaparátem dokáží s pomocí mobilních aplikací pro chytré telefony či tablety samostatně vykonávat letecké mise, na kterých sbírají snímky terénu. Složitá není ani tvorba ortofotomozaiky, ze které jsou potom odvozovány potřebné údaje, jako je například zásoba porostu či druhové složení nebo výšková struktura a zápoj [6]. Pro identifikaci lze použít jednoduchých i složitých skriptů, nebo ruční zadávání v mapovém softwaru, díky čemuž je možné odvozovat údaje i při minimálních znalostech pokročilých funkcí. Pozornost je ale, zejména na akademickém a výzkumném poli, věnována i složitějším problémům s detailnější a pokročilejší technikou v podobě například laserových senzorů pro přesné odvození tvarů a objektů [11,12].

Jako příkladem lze uvést práce pro automatizované zjištění počtu ležících stromů a jejich objemu pomocí počítačového algoritmu [3], případně detekce pokrytí stanoviště jehličnatými dřevinami pomocí fotogrammetrie z 2D i 3D zdroje [10]. Problematice inventarizace se blíže věnuje také alternativní výzkum kombinující letecké RGB snímky s pozemní fotogrammetrií [26]. Spojením dvou přístupů bylo možné získat detailní 3D model všech individuálních stromů v porostu. Podařilo se tak eliminovat nedostatky použití pouze leteckých snímků, které neposkytují dostatečné informace o nižších patrech lesa.

S určitým do-vývojem a utilizací podobné aplikace ve formě například podprogramu jako nástroje inventarizace se integrace do běžného lesného hospodářství nezdá dalekou budoucností [2]. Zvláště při použití poměrně neustále levnější a přístupnější fotogrammetrické techniky.

### 3.2.2 Odvození zdravotního stavu a fyziologie dřevin

Jak již bylo nastíněno v předchozích kapitolách, existuje celá řada vědeckých výzkumů, které se věnují získání údajů o zdravotním stavu lesních porostů na základě zcela jednoduchých principů i složitějších pracovních postupů za použití nejmodernějších technologií [8,21]. Aktuální situace expanze hmyzích škůdců spojená s decimací porostů je jednou z hlavních otázek oboru ochrany lesa, kterému slouží DPZ jako nástroj pomáhající porozumět dynamice a šíření populace škodlivých organismů [6]. V současné době tak tento obor úzce souvisí s krizovým managementem lesního hospodářství kvůli mimořádně alarmujícím stavem některých lesů. Ve výzkumech monitoringu se lze setkat s rozdílnými přístupy. Se zjištěním vysoké míry pravděpodobnosti zjištění šíření napadení 78-96 % se setkává přístup používající bezpilotní letadlo osazené fototechnikou [25]. Předpověď postupu škůdců vychází z porovnávání RGB složek světla, respektive jejich změn v relativně krátkém čase. Další příklady lze nalézt ve výzkumu, který svou pozornost větší rozloze a značně delšímu časovému období. Využívá jednu z podstatných výhod satelitních snímků, jejich dlouho sahající časovou řadu z minulosti, se výzkum zaměřuje zpětně na historická data a pozoruje působení škůdců v dřívějších obdobích. Získaná data pak slouží pro předpověď budoucího šíření škodlivého faktoru [24].

Mimo studia šíření hmyzích škůdců se objevují také práce sledující napadení a úpadek porostů obecně bez rozdílu původce. Monokulturní hospodářský les je oproti diverzifikovanému přírodnímu porostu totiž snadno plošně napaden nejen hmyzem, či houbovými onemocněními, ale i nemocemi jiného původu [21]. S postupnou změnou globálního klimatu se tyto často uměle vysázené porosty stávají ještě zranitelnějšími [23]. Metody dálkového průzkumu Země jsou slibným aspirantem na pozici efektivního nástroje pro monitoring, management i zastavení či zpomalení potenciaálního šíření škodlivých činitelů [24], teoreticky i těch, kteří mohou mít mimo oblast svého přirozeného výskytu sklony k expanzivnímu až invazivnímu chování. Příkladem budiž původce chřadnutí jasanů v Evropě způsobené zavlečeným organismem původem z Asie [22]. Pomocí metody termografie, které využívá rozdíl teplot zdravého a napadeného stromu jako indikátoru disturbance. Špatné fungování fyziologických procesů v rostlině zapříčiní zvýšení teploty v koruně jedince z důvodu snížení

evapotranspirace, což vede ke snížení vlhkosti a tím i měřitelnému lokálnímu oteplení [22]. Dle citované studie lze pomocí bezpilotní techniky osazené termokamerou tyto změny efektivně zachytit a registrovat tak škodlivý činitel různého původu.

### 3.2.3 Tvorba podkladů pro krizový management

Jelikož se lesy nejen souvislostí s globální změnou potýkají se zhoršeným zdravotním stavem, tak by se do kategorie řízení mimořádných situací dala zařadit velká část kategorie výzkumu fyziologie a zdraví [např. 25], stejně tak jako odvozování dendrometrických veličin padlých kmenů [např. 3] a disturbancí pro efektivní řízení odstranění kalamity. Za zmínku ale jistě stojí mimo již probraného také pomoc při zdolávání lesních požárů a odstraňování jejich následků. Při přírodních katastrofách zvláště většího rozsahu může být značnou výhodou možné bezplatné zpřístupnění aktuálních dat ze satelitů, aby bylo možné zmírnit možné dopady či zabránit postupu [33]. Svě využití ale bezesporu naleznou i kompaktní UAV, jak je nastíněno dále. S nastávající globální změnou klimatu vrůstá počet lesních požárů nejen v našich podmínkách, ale zejména v jižnějších regionech, jako je například Španělsko či Portugalsko [17], nebo aridnějších prostředích hlouběji ve vnitrozemí. Svědectví o tom podává rostoucí požární aktivita na území boreálních lesů a tajgy v ruském vnitrozemí [19] i v dalších státech.

Při boji s lesními požáry je rozhodujícím faktorem je rychlost reakce záchranných složek na krizovou situaci. Pozoruhodné řešení nabízí výzkum zaměřující se na kombinaci pozemního a leteckého dohledového systému s využitím radiokomunikačních věží [20]. Autoři práce instalovali na věž mobilního operátora kamerový systém s termovizí, který je schopen monitorovat až 3,5km rádius lesních pozemků v okolí. Při detekci možné požární události je automaticky vysláno z dokovací stanice bezpilotní letadlo, které putuje do místa výskytu ohně a poskytuje hasičskému sboru informace potvrzující existenci a rozsah požáru, čímž zkracuje reakční dobu na minimum. Vyslané jednotce je také přímo generována trasa pro nejrychlejší přístup po lesní cestní síti do bezpečné vzdálenosti od události. Při takové instalaci je ale nutné zvážit hustotu sítě věží, která nemusí být pro tyto účely dostatečná ve všech oblastech nasazení, tudíž by bylo třeba vybudovat vlastních zařízení, což může nevhodně navýšit výsledné náklady.

Komplexnější řešení problematiky by mohlo spočívat v trvalém dohledu leteckou technikou a větším počtu úkolů letadel – dozor, detekce, asistence při likvidaci události. [18]. Pravidelné přelety i skripty umělé inteligence detekující požár na základě tvorby kouře slibují spolehlivější fungování i podstatně rozšířené akční pole stroje a redukci planých poplachů, nicméně otázkou stále zůstává legislativní hledisko fungování autonomní letecké techniky, ale také hlukový smog [32] působený nízkou letovou hladinou v oblastech méně či vůbec neovlivněné lidskou činností. Svůj význam by mohlo toto řešení najít při použití pilotovaného letounu či satelitních snímků v oblastech s nízkým až nulovým osídlením. Užitečné, a naopak legislativně spíše možné, se zdá být využívání UAV při přímém zdolávání požáru a krizovém rozhodování.

Při odstraňování škod způsobených požárem je zásadní zjistit zdravotní stav eventuální zbylé vegetace a rozsah plochy zdevastovaného porostu. Při aplikaci letecké techniky lze snadno získat data o existenci a dimenzích přeživších stromů jevící známky obnovy, stejně tak jako rozeznat přibližnou úroveň poškození i identifikovat zcela mrtvé jedince bez známek regenerace [17]. Zmíněná studie k těmto účelům využívá běžné RGB snímače, ale také multispektrální sensoriku. S rozdílem chtěného detailu i velikosti území byl volen letoun s fixním křídlem schopný nést infračervený senzor a multikoptéra s RGB aparátem. Co se týče technologie, tak se jedná o relativně levné a spolehlivé řešení, které si zachovává pozitivní ekonomický atribut, což nahrává možnému budoucímu efektivnímu nasazení.

### 3.3 Základní přehled legislativy vztahující se na provoz UAV

Bezpilotní letadla provozovaná ve veřejném vzdušném prostoru podléhají legislativním úpravám a musí respektovat zákony a nařízení související v letovém provozem dle norem státních i vyšších správních celků. V rámci České republiky je pilot povinen se řídit především zákonem o civilním letectví č. 49/1997 Sb. a Doplněkem X leteckého předpisu L2 o bezpilotních systémech. Další dílčí legislativa je uvedena ve zmíněném předpisu, respektive jeho doplňku. Evropská nařízení potom upravují provoz pouze systému přesahujících celkovou vzletovou hmotnost 25 kg dle přílohy II nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č.216/2008, ze kterého Doplněk X vychází [34]. V tomto roce se budou pravidla pro celou Unii zpřísňovat, jakmile nabydou 1.7.2020



v platnost nová pravidla Evropskou agenturu pro bezpečnost letectví – EASA [35]. Změny se týkají především registrace, oprávnění k létání i dalších bezpečnostních opatření cílených zejména na provoz kompaktních systémů [37].

### 3.3.1 Užití bezpilotních letadel pro komerční účely

Pokud je letadlo používáno pro jiné než rekreační a sportovní účely bez rozdílu hmotnosti stroje při vzletu, je pilot povinen vlastnit povolení k provozování leteckých prací / leteckých činností pro vlastní potřebu, dále je nutné pojištění odpovědnosti, povolení k létání a nutná je taktéž registrace stroje [36]. Do této kategorie spadají lety pro získávání dat, která jsou potřebná pro tuto práci.

### 3.3.2 Rozsah nasazení bezpilotních letadel

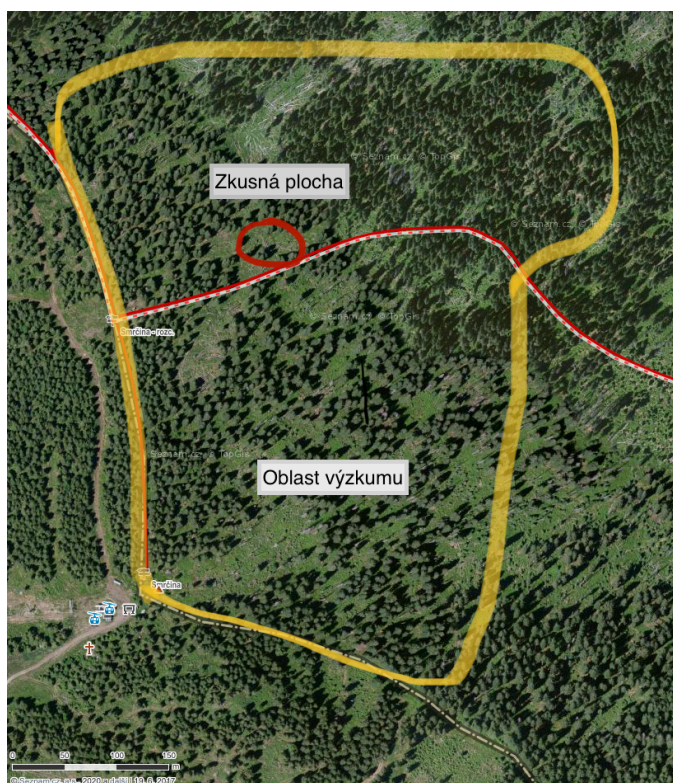
Bez rozdílu určení jsou bezpilotní letadla regulována, co se týče pohybu napříč letovým prostorem [34]. Pravidla dostupnosti jsou blíže definována zmíněnými předpisy zejména v okolí letišť, bezletových zón včetně přírodních oblastí, u určitých případech i oblačnosti a s příchodem nové evropské legislativy bude definován také provoz v blízkosti osob a pořizování záznamu s nimi [35]. Pro lepší orientaci ve složitých předpisech slouží podpůrné aplikace organizace letu, které uvádí omezení dostupnosti a zpřesňují plánovanou aktivitu. Příkladem lze uvést aplikace Droneview či Létejte zodpovědně [38]. Základní značně omezující pravidlo v jakékoliv letové oblasti spočívá v nutnosti udržování neustálého vizuálního kontaktu s letícím strojem.

V posledních letech se objevují výzkumy věnující se zcela bezpilotním systémům či konfiguracím s minimálním zásahem pilota [39]. Sami autoři citované práce uznávají, že k plně funkčnímu systému je ještě dlouhá cesta, nicméně po dokončení vývoje a potřebné evaluaci testy a zkouškami by takový přístup mohl změnit pohled legislativy na nasazení letadel a podmínku dodržení stálého dozoru by teoreticky bylo možné zrušit. Automatizace představující další milník tohoto odvětví by mohla rozvinout pravý potenciál kompaktních leteckých systémů co by nástroje pro zmíněné, nevyzdvihnuté, i neobjevené aplikace.

## 4 Metodika

### 4.1 Prostředí výzkumu

Oblast horského jehličnatého lesa na území Národního parku Šumava v blízkosti státní hranice Česko-Německo a vrcholu Smrčina (1 338 m.n.m.). Spadá do třinácté přírodní lesní oblasti a náleží osmému a sedmému lesnímu vegetačnímu stupni – smrkovému a buk-smrkovému. Zmíněný vrchol patří k nejvyšším v celém pohoří na české straně, v Německu se vyskytují i lokality oscilující okolo 1 400 m.n.m. I přes značnou nadmořskou výšku zde panují relativně příznivé atmosférické, srážkové i klimatické podmínky pro růst kompaktního horského porostu který je ve většině případů celistvě zapojen, respektive by měl být zapojen, ale je lokálně narušen disturbancemi.



Obr. č.1 ortofotosnímek s přibližným zákresem území [zdroj:mapy.cz]

Průměrná roční teplota se pohybuje okolo +3 °C, srážkový úhrn cca 800-900(1 600) mm, přičemž co se klimatu týče, tak se jedná o chladnou oblast. Časté jsou i větrné bouře a to okolo 30 dní ročně. Z hlediska půdních podmínek se zde nachází kyselé půdotvorné substráty s častým vysokým podílem skeletu v půdě i vodou ovlivněné půdy včetně lokálního výskytu organozemí [27]. Zájmové území se rozkládá na ploše přibližně 22 hektarů.

Na tomto území byla vytyčena jedna zkusná plocha pro tvorbu pozemních validačních dat o rozměrech 30 x 30 m. Měřeny byly kmeny alespoň částečně zasahující do plochy. Z hlediska dostupnosti a větší bezpečnosti při pohybu po kalamitní ploše byla umístěna v blízkosti lesní pěšiny.

#### 4.2 Použitá technika

Při volbě použitých přístrojů a metod byla volena levná, bezpečná i rychlá varianta využívající kvadrokoptéru pro leteckou akvizici snímků, na jejichž základě vytvořená data byla validována pozemním měřením jedné zkusné plochy s využitím lesnické průměrky a geodetického GNSS systému.



Obr. č.2 vzlet dronu DJI Pahntom na kalamitní ploše [zdroj:archiv autora]

#### 4.2.1 Konfigurace letadla

K získání leteckých dat byla využita bezpilotní kvadrokoptéra Phantom 4 Pro tovární značky DJI. Z pohledu nákladů se jedná o ekonomickou variantu techniky, která disponuje fixním RGB snímačem bez možnosti záměny neseného senzoru 1“ CMOS s efektivním rozlišením 20 megapixelů. [28] Zvolená kvadrokoptéra DJI Phantom 4 Pro je kompletní konstrukční řešení výrobce, které si nežadá externích přístrojů mimo vizuálního a výpočetního rozhraní, které nabídne běžný chytrý telefon vložený do ovladače dodávaného jako součást produktu. Mezi přednostmi takové techniky je například relativně nízká cena nejen pořízení, ale i provozu. [28]

#### 4.2.2 Konfigurace pozemního měřicího aparátu

Pro tvorbu dat byla využita metoda měření délek na základě rozdílů souřadnic pozemního GNSS systému v konfiguraci se zpřesňujícím statickým bodem. Zvolený přístroj Trimble R2 GNSS přijímač, respektive dvě jednotky pracující v kooperaci, dokáží pořádat data o poloze s přesností  $\pm 2$  centimetry horizontálně a  $\pm 5$  centimetrů vertikálně v ideálních podmínkách. [29] Ve vzdálenosti 1,3 metru byla u každého kmenu zjištěna výčetní tloušťka pomocí lesnické průměrky.

#### 4.3 Letové podmínky a parametry letu

Světelné podmínky byly uspokojivé. Slunečné počasí či polojasné podmínky nabídl dostatek světla pro použití minimálních hodnot ISO rozsahu snímače, což přispělo minimalizované zrnitosti fotografií, a tudíž i celkové věrohodnosti výsledného modelu. Data byla kompletována z více letů v různých dnech s identickými parametry letové hladiny i překryvu snímků. Letadlo se pohybovalo ve výšce 100 m nad zemským povrchem, kterou neměnilo dle reliéfu během letu, rychlost dosahovala 6 m/s a podíl podélného a příčného překryvu snímků se rovnal 85/75.

#### 4.4 Pozemní sběr dat

Z důvodu absence mobilního datového pokrytí nebylo možné využít pro získání údajů ze zkusné plochy metodou RTK (real-time kinematika), a proto bylo měření provedeno PPK (post-processing kinematika) s využitím přístroje Trimble R2 pro záznam polohy. Po úspěšné inicializaci obou přístrojů typu R2 byly na každém kmenu zachyceny dva body určující polohy bodu paty a vrcholu ležícího kmene. Výčetní

**Okomentoval(a): [KK1]:** Tady není zřejmé, že se jedná o jednu validační plochu v rámci celé plochy. Chcete uvést, že jsme založili jednu zkusnou plochu 30 x 30 m (pokud si dobře vzpomínám) a přibližně ji zakreslit to toho snímku  
Uvedl bych to už to té kapitoly 4.1

tloušťka ve vzdálenosti 1,3 m od čepu byla zaznamenána na základě měření lesnickou průměrkou dvakrát kolmo na sebe, což odpovídá standartním metodám používaným při taxaci. [1]

#### 4.5 Sledování časové náročnosti

Pro srovnání konkurenceschopnosti metody byla jednoduchým způsobem sledována časová náročnost práce. Výsledné údaje byly zaokrouhleny na celé hodiny a přehledně zobrazeny v jednoduché tabulce.

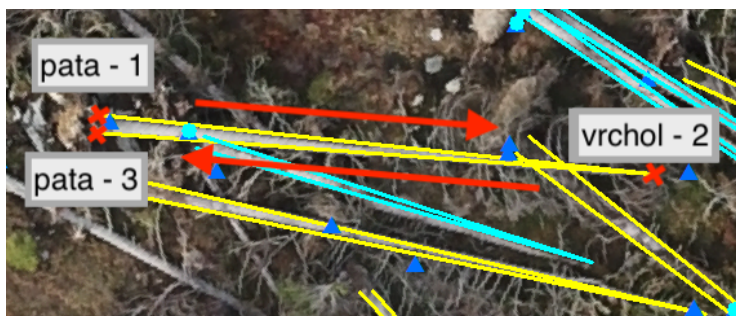
#### 4.6 Vyhodnocování dat

##### 4.6.1 Metody vyhodnocení výsledků leteckých snímků

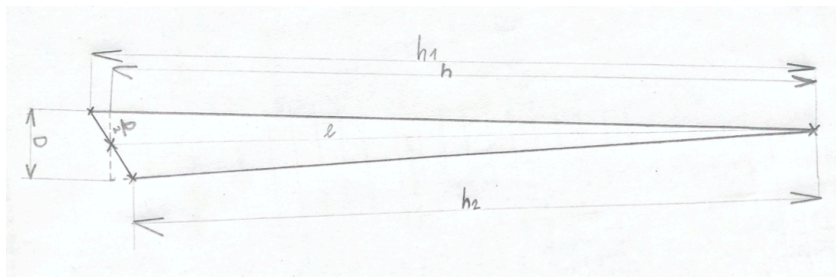
Z fotografií ve zvoleném překryvu byla v součinnosti s vedoucím práce v rámci činnosti Katedry hospodářské úpravy lesa pomocí softwaru Agisoft Metashape odvozena ortomozaika, ve které byly padlé kmeny v zájmovém území zaměřeny pomocí liniové spojnice 3 bodů – pata - 1, vrchol - 2, pata - 3. Reprezentovány byly pomocí linie, ze které byly potom určeny pomocí nástrojů ArcGIS Desktop [46]. Na základě rozdílů souřadnic, principů Pythagorovy věty a lineární interpolace určen u každého kmenu průměr ve výčetní výšce a celková výška každého jednotlivého stromu prostřednictvím programu Microsoft Excel [47]. Ve speciálních případech zlomení stromu byla celková výška i průměr odvozen na podobném principu určení výšky dílčích částí reprezentovaných čtyřhranem a analogicky trojúhelníkem, jako u neporušeného kmene.

**Okomentoval(a): [KK2]:** Tomuhle rozumíme my, kteří jsme to viděli, ale asi ne jiný čtenář. Chtělo by vysvětlit, ideálně i s obrázkem jednoho stromu (nakreslená linie přes strom – screenshot z GISu)

Obr. 3 Schéma způsobu záznamu kmenů, kroky jsou číselně označeny.



Průměr byl potom zjištěn na základě údajů čtyřúhelníkového tělesa. Blíže popsáno příloženým nákresem a rovnicemi. Odvozený postup je univerzální pro použití na kmenech ležících v jakémkoliv směru, a zohledňuje také možnost neekvivalentní vzdálenosti mezi třemi body vzniklou nepřesností zadávání i povahou a tvarem kmenu, například růstu ve svahu. Při obeznávání jednotlivých kmenů byly brány v potaz jen následky nedávných větrných kalamit, tudíž byly dle subjektivního okulárního odhadu zhodnoceny a bodově reprezentovány pouze nedávno padlé kmeny. Návrh a konzultace metodiky výpočtu probíhal pod vedením vedoucího práce.



Obr. č.4 nákres designu výpočtu výšky a tloušťky

$$D = 2 * \sqrt{h^2 - l^2} \qquad h = h1 - \frac{h1 - h2}{2}$$

Dále byly hodnoceny i stojící stromy, a to prostřednictvím jejich přítomnosti, respektive jejich počtu, nikoliv jejich velikostí a rozměrů. Mohla být tak lépe posouzena situace kalamitní události, ale také data mohou sloužit dalším účelům, jak bylo nastíněno dříve. Na ověřovací ploše se žádné stojící vzorníky nevyskytovaly, a proto není tento faktor posuzován.

#### 4.6.2 Metody vyhodnocení zkusné plochy

Z pořízených GNSS souřadnic byly opět pomocí podobných principů jako u digitálně vytvořených dat určeny délky kmenů. Tato metoda ověření ale oproti

ortofotomozaice přinesla teoreticky přesnější data obohacená o nadmořskou výšku bodu, takže byly provedeny korekce i ve vertikálním směru.

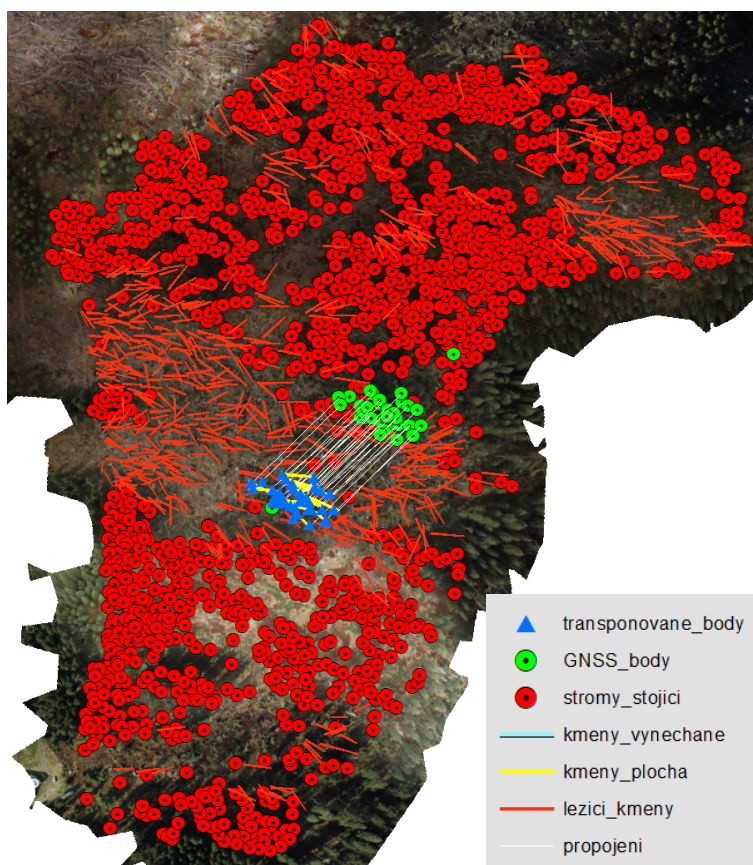
#### 4.6.3 Porovnávané veličiny

Jako vhodné srovnávací hodnoty byly vybrány výšky stromů –  $h$ , výčetní tloušťky –  $d_{1,3}$  m, rozdíl těchto hodnot na identifikovaných stromech a čtvercová odchylka všech měření. Pro lepší představu přesnosti výběru a identifikace stromů je uveden poměr počtu v digitálním modelu označených a fyzicky změřených stromů na zkusné ploše. V rámci zjednodušení experimentu v souladu s cílem práce byla vybrána pouze jedna zkusná plocha. Pomocí té není odvozována zásoba, jako tomu je při měření zkusných ploch pro taxační účely [1], ale porovnávány jsou přímo rozměry kmenů. Pro srovnání zásoby by bylo nutné stanovení podstatně většího počtu ploch, což se neztotožňovalo z prezentovanými cíli. Vzhledem k rozdílným datům pořizování fotografií a měření zkusné plochy nelze ani s jistotou prohlásit snímky za identické se skutečnou situací zachycenou pozemním měřením. Jako srovnávaná hodnota byla brána v úvahu také časová náročnost celého procesu ve srovnání s přibližným trváním pozemního sběru odvozovaného na základě údajů o časové náročnosti měření zkusné plochy.

## 5 Výsledky

### 5.1 Stromová mapa

Pro vytvoření mapy kalamitního území byl využitý digitální model generovaný na základě leteckých snímků pomocí mapového softwaru ArcGIS Desktop [46]. Výsledný produkt v podobě datových vrstev vzniklých vektorizací modelu vhodně virtuálně reprezentuje stojící stromy i ležící kmeny na zájmovém území o rozloze přibližně 22 ha, jejich počty a nepřímo i rozměry padlých jedinců. Nejedná se tedy o mapu v klasickém pojetí, ale o datovou rastrovou vrstvu. Vytvořená data slouží k přímému určení dendrometrických veličin na základě postupu popsaného v kapitole 4.



Obr. č.5 náhled stromové mapy – rastru reprezentujícího stromy a kmeny



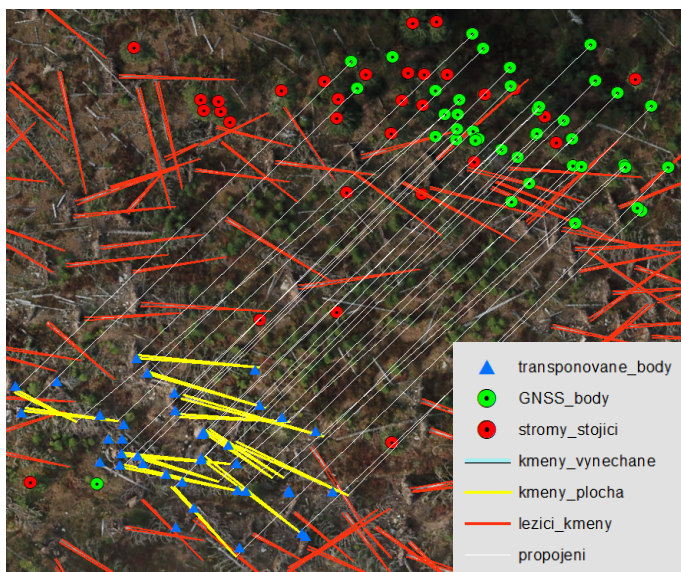
### 5.1.1 Digitální data

Pro vhodnou reprezentaci objektů a pro pozdější vyhodnocení byly vytvořeny dvě datové vrstvy.

Bodová vrstva slouží k označení stojících stromů, respektive k hodnocení jejich počtů bez dalšího podrobnějšího určování tvarů a velikostí. Tímto způsobem bylo označeno 1552 jedinců na zmíněné ploše.

Druhým výstupem je vrstva obsahující linie reprezentující ležící kmeny v souladu s uvedenou metodikou. Tato vrstva byla poté převedena na dílčí body, aby bylo možné jednoduchým způsobem odvodit požadované dendrometrické veličiny. Při identifikaci ležících kmenů bylo zaznamenáno 649 kusů, z toho 6 kmenů rozlomených na dvě části. Právě zlomy jsou zásadní pro další výzkum šíření hmyzích škůdců z důvodů vylučovaných primárních atraktantů.

### 5.2 Přesnost selekce kmenů z digitálního modelu



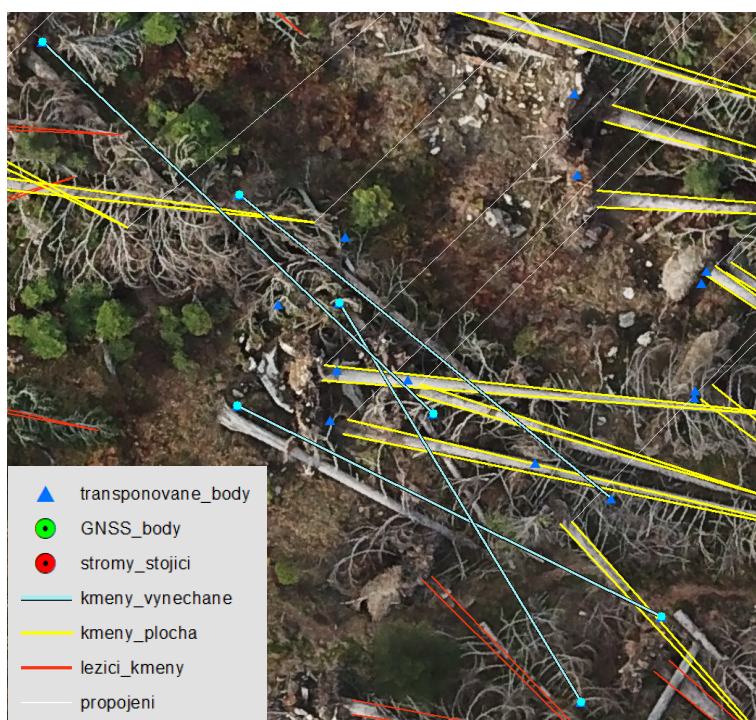
Obr. č.6 náhled GNSS bodů, jejich transpozice a lokalizace jednotlivých kmenů na mapě

Reflexe výsledků získaných z digitální mapy a z měřených údajů na zkušné ploše poukázala nepřesnosti ve vytyčování ležících kmenů v rámci digitálního modelu tak, že

odhalila celkem čtyři kmeny nezaznamenané na základě leteckých snímků. Vzhledem k celkovému počtu osmnácti kmenů na ploše, lze jednoduše odvodit velmi přibližnou spolehlivost záznamu 78 %. Nezasnesené kmeny jsou zobrazeny na obrázku níže. Kmen ID rastr 156 = č.107,119 byl měřen dvakrát v průběhu měření, z čehož lze pro představu odvodit řádově možnou chybu pozemního záznamu.

Pro přesné spárování hodnot z pozemní GNSS stanice a digitálního modelu, bylo nutné provést posunutí bodů dle obrázku směrem na jihovýchod (obr.5). Na vině je nejpravděpodobněji malá přesnost modulu určování polohy použitého dronu.

Tento výstup je hodnocen pouze jako přesnost selekce, nikoliv však jako faktor ovlivňující přesnost určení dendrometrických veličin.



Obr. č.7 detail nenalezených stromů při zpětné identifikaci

### 5.3 Výsledné hodnoty hs, d1,3 a vyhodnocení chyb

Hodnoty v následujících tabulkách „Strom č.“ označují kmen měřený na zkušné ploše pozemní metodou, „ID rastr“ jeho protějšek v rastrových datech, proměnné „hs“ a „d1,3“ značí hodnocenou veličinu – délku kmene a výčetní tloušťku. Přídomek „měřené“ mají sloupce dat získané polní měřeními a „gis“ náleží datům vypočítaných z rastrového podkladu. Dále jsou použity zkratky „prům. abs. Ch.“ značící průměrnou absolutní chybu, a „r2 ch.“ pro označení čtvercové chyby. Hodnota na konci sloupce r2 je vždy durhá mocnina průměru celého sloupce.

Tab. č.1 vyhodnocení dat GNSS měření a porovnání s rastrovým modelem.

| Strom č. | ID rastr  | hs měření | d1,3 měření | hs gis | d1,3 gis | prům. abs. Ch. hs | prům. abs. Ch. d1,3 | r2 ch. hs | r2 ch. d1,3 |
|----------|-----------|-----------|-------------|--------|----------|-------------------|---------------------|-----------|-------------|
| 101      | nenalezen | 21,83     | 0,48        |        |          |                   |                     |           |             |
| 102      | 100       | 25,19     | 0,53        | 24,60  | 0,65     | -0,69             | 0,12                | 0,35      | 0,01        |
| 103      | 103       | 21,69     | 0,57        | 19,44  | 0,43     | -2,25             | -0,14               | 5,06      | 0,02        |
| 104      | 370       | 24,00     | 0,53        | 16,83  | 0,50     | -7,17             | -0,03               | 51,35     | 0,00        |
| 105      | nenalezen | 22,15     | 0,52        |        |          |                   |                     |           |             |
| 106      | 99        | 24,60     | 0,51        | 22,93  | 0,66     | 1,67              | 0,15                | 2,79      | 0,02        |
| 107      | 156       | 26,98     | 0,62        | 25,01  | 0,80     | 1,97              | 0,18                | 3,89      | 0,03        |
| 108      | nenalezen | 21,36     | 0,41        |        |          |                   |                     |           |             |
| 109      | nenalezen | 24,98     | 0,59        |        |          |                   |                     |           |             |
| 110      | 108       | 22,96     | 0,6         | 14,08  | 0,64     | -8,88             | 0,04                | 78,86     | 0,00        |
| 111      | 524       | 22,05     | 0,59        | 19,35  | 0,68     | -2,70             | 0,09                | 7,28      | 0,01        |
| 112      | 152       | 24,64     | 0,49        | 25,11  | 0,56     | 0,46              | 0,07                | 0,21      | 0,00        |
| 113      | 97        | 22,70     | 0,57        | 22,75  | 0,70     | 0,05              | 0,13                | 0,00      | 0,02        |
| 114      | 98        | 30,93     | 0,71        | 30,30  | 0,78     | -0,63             | 0,07                | 0,40      | 0,01        |
| 115      | 96        | 25,22     | 0,63        | 25,28  | 0,66     | 0,06              | 0,03                | 0,00      | 0,00        |
| 116      | 153       | 21,68     | 0,45        | 16,81  | 0,54     | -4,87             | 0,09                | 23,70     | 0,01        |
| 117      | 155       | 22,06     | 0,48        | 18,22  | 0,47     | -3,84             | -0,01               | 14,75     | 0,00        |
| 118      | 154       | 24,09     | 0,62        | 25,40  | 0,73     | 1,31              | 0,11                | 1,72      | 0,01        |
| 119      | 156       | 26,06     | 0,61        | 25,01  | 0,80     | -1,06             | 0,19                | 1,12      | 0,04        |
| m        |           | 24,32     | 0,57        | 22,07  | 0,64     | -2,25             | 0,07                | 3,57      | 0,11        |
| cm       |           |           | 56,73       | 64,00  |          |                   | 7,27                |           | 11,16       |

Digitálně odvozené údaje o poloze bodů identifikovaných na ležících kmenech z leteckého snímku umožnily určit požadované rozměry délky a prsní tloušťky jednotlivých kmenů. Souhrnný výsledek lze prezentovat formou průměrným vyjádřením těchto hodnot a to  $h_s = 18,67$  m,  $d_{1,3} = 50,2$  cm na celé ploše a  $h_s = 22,07$  m,  $d_{1,3} = 64,0$  cm na území zkušné plochy.

Tato zjištění lze konfrontovat s údaji získanými pozemním měřením na zkušné ploše. Metoda přímého měření zjistila průměrné hodnoty  $h_s = 24,32$  m a  $d_{1,3} = 56,7$  cm, přičemž pro účely porovnání byly zahrnuty pouze kmeny spárované s digitálním záznamem. Při přímém porovnání hodnot lze stanovit, že výška byla systematicky podhodnocována v průměru o  $-2,25$  m s převahou záporných hodnot 4:11, zatímco tloušťka soustavně nadhodnocována v průměru o  $7,27$  cm na jedince a až na tři případy byla vždy větší oproti skutečnosti s poměrem 3:12. Faktické srovnání je ale spíše orientační, takže je dále doplněno o vyhodnocení chybovosti.

K zobrazení celkové velikosti chyb, bez ohledu na zápornou, či kladnou povahu je na místě uvést také průměrnou čtvercovou odchylku, respektive relativní procentuální vyjádření k velikosti, při měření obou veličin. V případě výšky se jedná o  $3,57$  m ( $22$  %), a co se týče výčetní tloušťky, dosahuje taková chyba  $11,2$  cm ( $17$  %). Podrobnosti ohledně relativní velikosti chyb uvedených v závorkách, sděluje tabulka č.3 na str. 37.

Jak již bylo nastíněno, měření kmenu ID rastr 156 proběhlo celkem dvakrát – v první polovině a na konci měření. Na základě přímého srovnání těchto hodnot lze velmi zevrubně vytvořit představu o řádové přesnosti takového způsobu získávání dat za daných podmínek. Zajímavé je především měření výšky, které se lišilo téměř o celý metr. Pro spolehlivé vyhodnocování chybovosti záznamu by bylo nutné metodu kalibrovat a stanovit přesnost měření zkušných ploch touto technikou. Takový rozsah pokusu se ale neztotožňuje s cíli této práce a orientační hodnoty jsou pro tento účel dostatečné.

**Okomentoval(a): [KK3]:** To je dost velké číslo, vypadá hrozivě, protože to byly poměrně silné stromy. Stálo by za to to číslo vyjádřit i relativně (tj. spočítat relativní odchylky pro každý strom (chyba/tloušťka, resp. chyba/výška) a z nich zase spočítat průměr a rmse a dát to do závorky v procentech za tu hodnotu v metrech a centimetrech

Tab. č.2 zobrazení možné chybovosti GNSS měření z duplicitního záznamu téhož kmene

| Strom č. | ID rastr | hs měření | d <sub>1,3</sub> měření |
|----------|----------|-----------|-------------------------|
| 107      | 156      | 26,98     | 0,62                    |
| 119      | 156      | 26,06     | 0,61                    |
| m        |          | 0,92      | 0,01                    |

Tab. č.3 Zobrazení absolutní velikosti relativních chyb a jejich procentuální vyjádření

| Strom č. | ID rastr  | hs měření | d1,3 měření | hs gis | d1,3 gis | rel. Ch. d1,3 | rel. Ch. hs | r2 rel. Ch d1,3 | r2 rel. Ch. hs |
|----------|-----------|-----------|-------------|--------|----------|---------------|-------------|-----------------|----------------|
| 101      | nenalezen | 21,83     | 0,48        |        |          |               |             |                 |                |
| 102      | 100       | 25,19     | 0,53        | 24,60  | 0,65     | 0,18          | -0,02       | 0,032           | 0,001          |
| 103      | 103       | 21,69     | 0,57        | 19,44  | 0,43     | 0,33          | -0,12       | 0,106           | 0,013          |
| 104      | 370       | 24,00     | 0,53        | 16,83  | 0,50     | 0,07          | -0,43       | 0,005           | 0,181          |
| 105      | nenalezen | 22,15     | 0,52        |        |          |               |             |                 |                |
| 106      | 99        | 24,60     | 0,51        | 22,93  | 0,66     | 0,23          | -0,07       | 0,053           | 0,005          |
| 107      | 156       | 26,98     | 0,62        | 25,01  | 0,80     | 0,23          | -0,08       | 0,052           | 0,006          |
| 108      | nenalezen | 21,36     | 0,41        |        |          |               |             |                 |                |
| 109      | nenalezen | 24,98     | 0,59        |        |          |               |             |                 |                |
| 110      | 108       | 22,96     | 0,6         | 14,08  | 0,64     | 0,06          | -0,63       | 0,004           | 0,398          |
| 111      | 524       | 22,05     | 0,59        | 19,35  | 0,68     | 0,13          | -0,14       | 0,018           | 0,019          |
| 112      | 152       | 24,64     | 0,49        | 25,11  | 0,56     | 0,12          | 0,02        | 0,014           | 0,000          |
| 113      | 97        | 22,70     | 0,57        | 22,75  | 0,70     | 0,18          | 0,00        | 0,033           | 0,000          |
| 114      | 98        | 30,93     | 0,71        | 30,30  | 0,78     | 0,09          | -0,02       | 0,008           | 0,000          |
| 115      | 96        | 25,22     | 0,63        | 25,28  | 0,66     | 0,05          | 0,00        | 0,002           | 0,000          |
| 116      | 153       | 21,68     | 0,45        | 16,81  | 0,54     | 0,17          | -0,29       | 0,030           | 0,084          |
| 117      | 155       | 22,06     | 0,48        | 18,22  | 0,47     | 0,03          | -0,21       | 0,001           | 0,044          |
| 118      | 154       | 24,09     | 0,62        | 25,40  | 0,73     | 0,16          | 0,05        | 0,024           | 0,003          |
| 119      | 156       | 26,06     | 0,61        | 25,01  | 0,80     | 0,24          | -0,04       | 0,058           | 0,002          |
| m        |           | 24,32     | 0,57        | 22,07  | 0,64     | 9%            | -13%        | 17%             | 22%            |
| cm       |           |           | 56,73       |        | 64,00    |               |             |                 |                |

#### 5.4 Zásoba a hmotnatost stromů v porostu kalamitního území

Dle zjištěných hodnot základních rozměrů stromů na ploše lze stanovit exaktní objem ležících kmenů a přibližně odhadnout také, kolik kubických metrů představují stále rostoucí stromy. K odvození byla použita funkce k výpočtu objemu smrku podle Petráše a Pajtíka vycházející z výčetního průměru a výšky stromu. Objemové veličiny nejsou hlavní náplní práce a slouží pouze pro představu. Proto není postup výpočtu dále popisován.

Tab. č.4 Přehled objemových veličin porostu

|                               |         |           |
|-------------------------------|---------|-----------|
| průměrná hmotnost kmenů       | 1,49    | [m3 b.k.] |
| celkový objem ležících kmenů  | 954,05  | [m3 b.k.] |
| odhad zásoby stojících stromů | 2309,95 | [m3 b.k.] |
| celková zásoba                | 3264,00 | [m3 b.k.] |

## 5.5 Časová náročnost práce

Po dobu získávání dat i jejich vyhodnocování byla sledována celková časová náročnost jednotlivých úkonů pro představu konkurenceschopnosti takto pořízených dat s pozemním měřením.

Tvorba datové vrstvy pro záznam rozměrů ležících stromů zabrala okolo 8 hodin práce v prostředí mapového softwaru ArcGIS [46]. Následovala konstrukce výpočetní tabulky na základě souřadnic, vyhodnocení zkusné plochy a určení zájmových rozměrů dle rastrových dat. Tyto operace trvaly přibližně dalších 30 hodin práce včetně návrhu výročních metod. Dají se považovat za fixní složku, která by nebyla nutná při opakovaném měření na další ploše. Samotná tvorba leteckých snímků nebyla předmětem práce, a tudíž není hodnocena

Tab. č.5 popis časové náročnosti provedené práce

| Položka                               | časová náročnost | typ složky |
|---------------------------------------|------------------|------------|
| Záznam ležících kmenů                 | 6h               | variabilní |
| Záznam stojících stromů               | 2h               | variabilní |
| Měření zkusné plochy                  | 2h               | variabilní |
| Design výpočtu a testování            | 4h               | fixní      |
| Transformace dat a export             | 2h               | fixní      |
| Návrh výpočetní tabulky               | 8h               | fixní      |
| Testování a opravy chyb               | 6h               | fixní      |
| Závěrečné úpravy                      | 1h               | fixní      |
| Návrh výpočetní tabulky zkusné plochy | 2h               | fixní      |
| Vyhodnocování chyb a párování dat     | 7h               | fixní      |
| Závěrečné úpravy                      | 1h               | fixní      |
| Celkem                                | 40h              |            |

## 6 Diskuse

Po sumarizaci výsledků lze prohlásit hlavní cíle práce splněné. Stromová mapa byla vytvořena a stromové veličiny byly z těchto dat odvoditelné. V kontrastu hodnot pozemního měření byly odhaleny určité chyby s náznakem systematického i náhodného charakteru. Většina z těchto selháních je poměrně snadno odstranitelná zejména větší obezráností s technikou i přesností pracovníka, ale také by mohla pomoci větší konzistentností získávání dat, například situování snímkování do jednoho dne za stálých atmosférických podmínek.

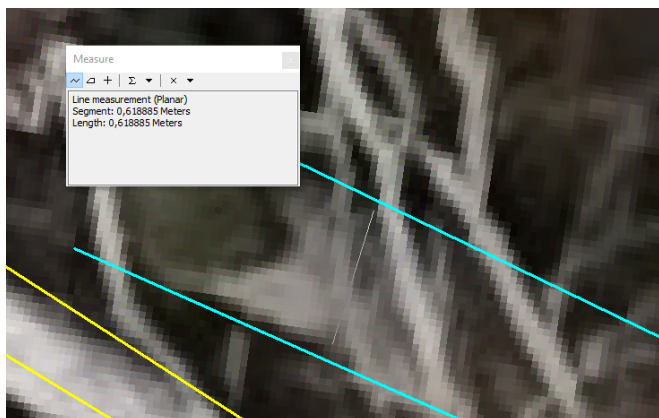
### 6.1 Reflexe chyb a potenciál jejich odstranění



Obr. č.8 detail zkusné plochy

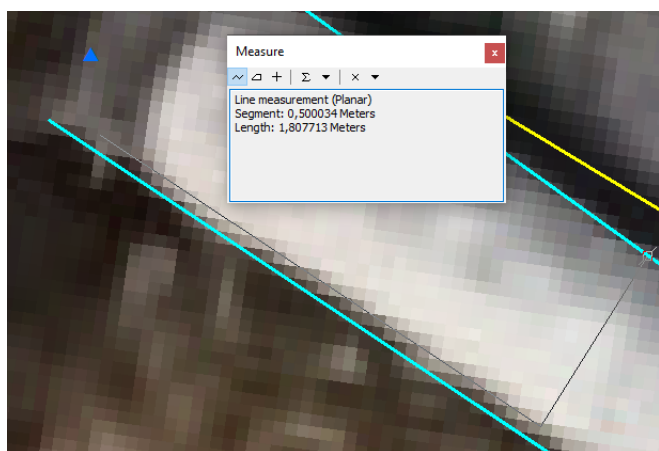
#### 6.1.1 Odvození průměru $d_{1,3}$

Výsledné porovnání kalibračních dat a hodnot rastrového původu byla naznačeno soustavné nadhodnocování. Odstranění této chyby je s největší pravděpodobností dosažitelné větší zkušeností pracovníka a pečlivým umístěním bodů na hranici kmene. K účelu výcviku analytika mohou sloužit kalibrační data ze zkusné plochy. Na následujícím snímku je patrné zdánlivě správné označení kmene ID rastr 154, které se ale po přiblížení jeví jako očividně chybné.



Obr. č.9 detail chyby kmene ID rastr 154

Zároveň se ale projevila úmyslná chyba nahrazení skutečného tvaru kmene rotačním tělesem, díky čemuž není při aplikaci lineární interpolace patního průměru do výšky 1,3 m zjištěn skutečný výčetní průměr.



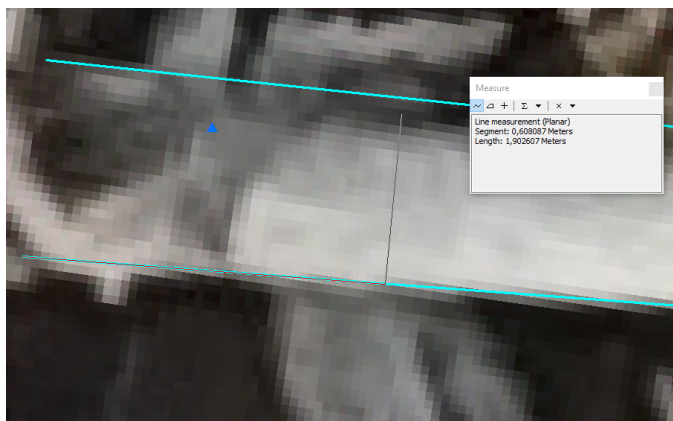
Obr. č.10 detail chyby kmene ID rastr 153

Za použití navrhované metodiky není tedy možné dosažení správného výsledku zejména u kmenů se zbytněným oddenkem či značnou sbíhavostí. Optimalizaci by mohla přinést záměna interpolace za rovnici morfologické křivky pro přepočtení průměru do



požadované výšky. Jev je možné pozorovat na kmeni ID rastr 153 s  $d_{1,3} = 50$  cm dle zevrubného měření a 45 cm dle údajů zkusné plochy.

Další chyba, kterou již není možné eliminovat je tvarová vada zploštění kmene či jiná deformace. Na následujícím snímku je zevrubně předveden příklad zpětného měření v mapovém softwaru, ve kterém je jasně patrné, že údaj naměřený na zkusné ploše neodpovídá skutečnosti, respektive po jeho umístění do mapy, by očividně nedosahoval patrných okrajů kmene. Alternativně je daný fakt vysvětlitelný nesprávným odečtením průměru při polním měření metodou 2x kolmo na sebe. Příkladem budiž kmen ID rastr 99 se průměrem  $d_{1,3} = 51$  cm dle polního měření a minimálně 60 cm dle rastru.



Obr. č.11 detail chyby na kmeni ID rastr 99

Alternativní inovativní výzkum pozemního měření pomocí SDG – speciálního odstupňovaného průměrového měřidla ukázal na průměrnou chybu 3,8 % při určování výčetní tloušťky s maximálními hodnotami okolo 7 % [41]. Je tedy zjevné, že v současné podobě je v této práci využítá metodika neschopná konkurovat a vyžaduje zlepšení dle popsaných návrhů s následným ověřením

### 6.1.2 Odvození výšky $h_s$

Při vyhodnocení získané výšky bylo zjištěno systematické podhodnocování rastrových veličin oproti polnímu měření. Jak je již patrné ze snímků zkusné plochy, v blízkosti se nachází turistická cesta, ze které byly kmeny částečně odstraněny, a tudíž

nebyl vždy úspěšně určen koncový bod – špička. Jedná se především o stromy ID rastr 153, 155, u kterých byly zaznamenány chyby velkého významu. Dalším důvodem výskytu chyb je velká hustota polomů na jednom místě, což znemožnilo s jistotou přesně umístit bod v ortofotosnímku u kmenů ID rastr 108 a 99. Tento problém pravděpodobně není možné odstranit na určitých stanovištích.

Možným důvodem pro výskyt chyb je také převýšení terénu. Rastrová data jsou podepřena pouze 2D ortofotosnímkiem neobsahujícím informace o nadmořské výšce. V následující tabulce je demonstrována velikost korekce na konkrétním rozdílu převýšení paty a špičky kmenů na zkušné ploše. V závislosti na délce kmene se hodnoty zkreslení pohybovaly od jednotek centimetrů až po vyšší desítky s maximem okolo 80 cm. Vztaženo k celkové délce je potom chyba určena v průměru -0,56 m (3 %).

Tab. č.6 vyhodnocení chyby v závislosti na převýšení terénu u jednotlivých kmenů

| Strom č. | ID rastr | d1,3 [cm] | h bpv [m] | Δ h bpv [m] | hs' [m]   | hs [m] | hs-hs' [m] | rel.ch. | r2 ch. |
|----------|----------|-----------|-----------|-------------|-----------|--------|------------|---------|--------|
| 110      | 108      | 60        | 1316,44   | -6,074      | 22,14     | 22,96  | -0,82      | -0,0356 | 0,0018 |
|          |          |           | 1310,36   |             |           |        |            |         |        |
| 111      | 524      | 59        | 1315,52   | -6,031      | 21,21     | 22,05  | -0,84      | -0,0381 | 0,0015 |
|          |          |           | 1309,48   |             |           |        |            |         |        |
| 112      | 152      | 49        | 1310,03   | -5,242      | 24,08     | 24,64  | -0,56      | -0,0229 | 0,0005 |
|          |          |           | 1304,79   |             |           |        |            |         |        |
| 113      | 97       | 57        | 1309,42   | -4,703      | 22,20     | 22,70  | -0,49      | -0,0217 | 0,0005 |
|          |          |           | 1304,72   |             |           |        |            |         |        |
| 114      | 98       | 71        | 1309,35   | -6,275      | 30,29     | 30,93  | -0,64      | -0,0208 | 0,0004 |
|          |          |           | 1303,07   |             |           |        |            |         |        |
| 115      | 96       | 63        | 1310,67   | -6,02       | 24,49     | 25,22  | -0,73      | -0,0289 | 0,0008 |
|          |          |           | 1304,65   |             |           |        |            |         |        |
| 116      | 153      | 45        | 1308,58   | -4,49       | 21,21     | 21,68  | -0,47      | -0,0217 | 0,0005 |
|          |          |           | 1304,087  |             |           |        |            |         |        |
| 103      | 103      | 57        | 1308,891  | -1,304      | 21,653774 | 21,69  | -0,04      | -0,0018 | 0,0000 |
|          |          |           | 1307,587  |             |           |        |            |         |        |
| 104      | 370      | 53        | 1311,603  | -4,663      | 23,539885 | 24,00  | -0,46      | -0,0191 | 0,0004 |
|          |          |           | 1306,94   |             |           |        |            |         |        |
|          |          |           |           |             |           |        | -0,56      |         | 3%     |



Obr. č.12 detail zkušné plochy, modré linie - nejvíce chybové kmeny, modré kruhové body – poloha vrcholů dle GNSS měření

Chyby oscilující okolo jednoho metru již nejsou tak významné vzhledem k normálním přesnostem individuálního měření výšek stromů v dendrometrické praxi a jejich vlivu na další výpočty. Při porovnání záznamů z pozemního duplicitního měření stromu ID rastr 156 lze také pozorovat rozdílné hodnoty délky kmene 0,92 m dané okolnostmi zkušné plochy, obtížnou manipulací a pohybem na pracovišti kalamitní plochy, i odchylkou měření přístroje. Teoreticky tak i referenční hodnoty mohou být nepřesné.

Pro srovnání a představě o velikosti chyb pozemního je uveden výzkum použití laserové techniky s celkovou chybou 2,2 % při určování výšky [42].

### 6.1.3 Přesnost záznamu a lokalizace kmenů

Za nejvýznamnější vadu lze považovat nenalezení některého kmenu na snímku, a tudíž jeho nezahrnutí do měření. Celkem došlo k vynechání celkem čtyř kmenů z osmnácti měřených na zkušné ploše. Při pohledu od horní hrany snímku, první kmen mohl být lokalizován větší pečlivostí při tvorbě rastrových dat, avšak dva následující níže by nejspíše nebylo možné odhalit. Určení zabránilo zakrytí kmenů dalšími jedinci či větvemi a záznam by při nejlepším mohl být odhadem. Poslední čtvrtý kmen byl zaměněn za starší souši, které neměly být do dat zaneseny. Teoreticky by tedy bylo možné zamezit vzniku až

poloviny těchto chyb větší zkušeností a pozorností pracovníka, případě jinou lokací zkusné plochy či více detailními snímky.



Obr. č.13 detail zkusné plochy s vyznačením vynechaných kmenů č.101, 105, 108, 19

Při porovnání výsledků jsou k dispozici především výzkumy se zaměřením na automatické rozeznávání a detekci kmenů na základě strojového učení. Jedna z posledních prací poukazuje na přesnost určení přítomnosti polomů 94 % dle satelitních snímků [40]. Jedná se ale o pouhé určení výskytu disturbancí, nikoliv konkrétních kmenů.

S využitím výpočetní techniky a automatizovaných algoritmů pracovali i kolegové z Fakulty lesnické s dřevařské. Program dokázal odhalit kmeny s celkovou uživatelskou přesností 94,9 %, nicméně jak sami autoři podotýkají, plochy měly malou strukturální rozrůzněnost [3].

#### 6.1.4 Časová náročnost

Prvotní záměr před polním měřením byl postavit časovou náročnost zjišťování dendrometrických veličin porostu metodou odvozování z ortofotosnímku klasické metodě zkusných ploch. Měření na kalamitním území ale ukázalo náročnost takového měření danou specifickými podmínkami. Pohyb po ploše by se dal považovat z mimořádné ztížený a nebezpečný. Z tohoto důvodu není metoda polního měření vhodná a nemůže být tedy postavena do srovnání.

Bez ohledu na to, by bylo za použití pouze pozemního přístupu nutno zjistit počet ležících kmenů na celém rozsahu území, případě odhalit přežívající stromy. Z tohoto ohledu se použití bezpilotní techniky ukázalo jako mimořádnou výhodou. Zvláštní podmínky také neumožňují snadno typizovat klasické měření co se týče hodinové náročnosti, a tudíž při zohlednění všech zmíněných hledisek je od komparace upuštěno.

#### 6.1.5 Vyhodnocení zásoby

Výsledná hodnota celkového objemu dřevní hmoty je na první pohled překvapující, avšak při zvážení ovlivňujících faktorů také snadno vysvětlitelný. Stanovištní ekologické a růstové podmínky horského hřebene zřejmě nedovolují vývin smrkových lesů do takových poměrných dimenzí, jaké je možné pozorovat v klasickém hospodářském lese. Také celková zásoba je dle celkové výměry okolo 20 ha nezvykle nízká. Tento fakt je přisuzován rozvolněnému zápoji a nízkému celkovému zakmenění. Využití produkčního potenciálu ale nebylo hodnoceno, a tudíž hodnoty nejsou srovnávány s výsledky jiných autorů.

## 7 Závěr

Na základě digitálních dat bylo možné odvodit dendrometrické veličiny ležících kmenů s určitou chybou, kterou by bylo možné do určité míry eliminovat navrhovanými úpravami metodiky.

Klíčovým a hlavním výstupem vzhledem k cíli ověřit použitelnost metod je vlastní přesnost záznamu ověřitelná v prostředí zkusné plochy. Průměrné čtvercové relativní odchylky poukazují na 22% chybu při určování délky kmene a 17% chybu určení výčetního průměru kmenů.

Chyba určení tloušťky by mohla být snížena navrhovanými opatřeními zmíněnými v diskuzi, zejména použitím morfologické křivky kmenů namísto lineární interpolace i přesnějším záznamem analytika. Umístění bodů u paty kmenů by mělo být voleno s ohledem přesného zachycení patního průměru. Je nutné odprosit se od myšlenky, že tvořené linie by měly co nejlépe kopírovat kmen, ale že pro výpočet je zásadní vzájemná poloha dvou patních bodů a jejich vzdálenost od bodu ve špičce. Kmeny nejsou rotačními tělesy, a proto není možné, aby zaznamenávané linie ležely přesně na jejich povrchu. Šípkovitý profil záznamů byl volen pouze z ohledu ergonomie práce a nemají kmen reprezentovat z hlediska jeho exaktního tvaru.

Pozornost by měla být také umístění bodu do špičky kmene. Na ploše v blízkosti cesty se projevila chybovost v podobě odříznutých posledních několika metrů z provozních důvodů. Nejvíce chybová data v celé sadě údajů stromů zkusné plochy byla zjištěna právě u těchto stromů, proto se dá předpokládat, že v případě vhodnějšího umístění plochy by k tak velkým omylům nedocházelo. Pro maximální přesnost by bylo také nutné znát reliéf terénu a do výpočtů zahrnout korekci v dat v tomto ohledu.

Co se týče celkové přesnosti záznamu vyjádřené 78% podílem nalezených a vynechaných stromů by bylo možné zvýšit až na 89 %, pokud by byl záznam proveden s větší pečlivostí. Přesto by některé z kmenů pravděpodobně nebylo možné nalézt.

Zjištěné míry chybovosti touto prací zkoumané metodiky jsou v porovnání s pozemním měřením v diskuzi uvedených výzkumů značně větší, a proto by bylo na místě postup upravit postup dle návrhů v předchozích kapitolách. I kdyby ale chyba byla stále větší oproti standardům zavedeným v oboru dendrometrie, výhoda leteckého dálkového získávání dat je nediskutovatelná ve specifických případech, jako jsou právě polomy i jiné mimořádné

situace. Je řeč především o bezpečnosti pohybu po pracovišti. Zejména nerovný svažité terén velmi znesnadnil přístup k jednotlivým kmenům a často bylo zapotřebí pohybu i v několikametrové výšce nad terénem podle toho, jak byly kmeny složeny na sobě. Jedná se tedy o další případ, ve kterém metody DPZ nejen mohou usnadnit práci, ale také chránit zdraví terénních pracovníků v netypických podmínkách. Dalším přínosem oproti pozemnímu měření bylo získání informací o poloze konkrétních kmenů, což by bylo bez použití letecké techniky jen těžko dosažitelné.

Při aplikaci inovativních přístupů je vždy nutné detailní ověřování, testování a případný do-vývoj na základě poznatků o chybovosti. Při vypracování rozboru problematiky bylo možné prohlédnout a citovat řadu výzkumů pro nápadité aplikace bezpilotních systémů, z nichž mnohé neposkytly v závěru dokončené řešení cíle s praxí požadovanou spolehlivostí, nicméně jsou podkladem pro další práce autorů i cizích výzkumníků. Mezi takové spadá i tato bakalářská práce, zkoumá problematiku, ověřuje možnosti a vytváří podklady pro budoucí zlepšení a v neposlední řadě poukazuje na slepé uličky, které nevedou ke správnému výsledku.

Obor DPZ si stále ještě ve velké míře nenašel cestu do každodenní lesnické praxe, zejména právě kvůli absenci uceleného řešení konkrétní problematiky. Rozdíly pozorované mezi články vydanými s různým odstupem od sebe ale naznačují, že postupně dochází k velmi rychlým posunům v oblasti nasazení specializovaných dronů, stejně tak jako využití čím dál tím kvalitnější techniky nižších cenových hladin přístupnějších širší veřejnosti a tím i praktickému využití.

## 8 Seznam literatury a použitých zdrojů

- [1] K. Kuželka, R. Marušík, and V. Urbánek, *Dendrometrie*. V Praze, ČR: Česká zemědělská univerzita, 2017.
- [2] C. Torresan *et al.*, “Forestry applications of UAVs in Europe: a review,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 8–10, pp. 2427–2447, 2017, doi: 10.1080/01431161.2016.1252477.
- [3] D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad, P. Surový, and K. Kuželka, “Detection of fallen logs from high-resolution UAV images,” *NZJFS*, vol. 49, doi: 10.33494/nzjfs492019x26x.
- [4] M. Potterf, C. Nikolov, E. Kočíková, J. Ferenčík, P. Mezei, and R. Jakuš, “Landscape-level spread of beetle infestations from windthrown- and beetle-killed trees in the non-intervention zone of the Tatra National Park, Slovakia (Central Europe),” *Forest Ecology and Management*, vol. 432, pp. 489–500, 2019, doi: 10.1016/j.foreco.2018.09.050.
- [5] M. I. Kučera and R. Adolt, “Zastoupení dřevin,” in *Národní inventarizace lesů v České republice – výsledky druhého cyklu 2011–2015*, vol. 1, Brandýs nad Labem, ČR: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, 2019, pp. 83–102.
- [6] P. Surový and K. Kuželka, “Acquisition of Forest Attributes for Decision Support at the Forest Enterprise Level Using Remote-Sensing Techniques—A Review,” *Forests*, vol. 10, no. 3, p. 273, doi: 10.3390/f10030273.
- [7] W. S. Udin and A. Ahmad, “Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Flying Altitude Using Unmanned Aerial Vehicle,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 18, p. 012027, 2014, doi: 10.1088/1755-1315/18/1/012027.
- [8] L. Tang and G. Shao, “Drone remote sensing for forestry research and practices,” *J. For. Res.*, vol. 26, no. 4, pp. 791–797, 2015, doi: 10.1007/s11676-015-0088-y.
- [9] J. Torres-Sánchez, F. López-Granados, A. I. De Castro, and J. M. Peña-Barragán, “Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management,” *PLoS ONE*, vol. 8, no. 3, doi: 10.1371/journal.pone.0058210.
- [10] B. Ivosevic, Y.-G. Han, and O. Kwon, “Calculating coniferous tree coverage using unmanned aerial vehicle photogrammetry,” *J. ecology environ*, vol. 41, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s41610-017-0029-0.
- [11] M. P. McClelland, J. van Aardt, and D. Hale, “Manned aircraft versus small unmanned aerial system—forestry remote sensing comparison utilizing lidar and structure-from-motion for forest carbon modeling and disturbance detection,” *J. Appl. Rem. Sens.*, vol. 14, no. 02, p. 1, 2019, doi: 10.1117/1.jrs.14.022202.
- [12] M. McClelland, J. van Aardt, and D. S. Hale, “A comparison of manned and unmanned aerial Lidar systems in the context of sustainable forest management,” 2018, doi: 10.1117/12.2304850.



- [13] Y. Xie, A. Savvaris, and A. Tsourdos, "Fuzzy logic based equivalent consumption optimization of a hybrid electric propulsion system for unmanned aerial vehicles," *Aerospace Science and Technology*, vol. 85, pp. 13–23, 2019, doi: 10.1016/j.ast.2018.12.001.
- [14] M. Hassanalian and A. Abdelkefi, "Classifications, applications, and design challenges of drones: A review," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 91, pp. 99–131, 2017, doi: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
- [15] J. Y. Hung and L. F. Gonzalez, "On parallel hybrid-electric propulsion system for unmanned aerial vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 51, pp. 1–17, 2012, doi: 10.1016/j.paerosci.2011.12.001.
- [16] J. Bernsteinová, C. Bässler, L. Zimmermann, J. Langhammer, and B. Beudert, "Changes in runoff in two neighbouring catchments in the Bohemian Forest related to climate and land cover changes," vol. 63, no. 4, pp. 342–352, 2015, doi: 10.1515/johh-2015-0037.
- [17] L. Pádua, T. Adão, N. Guimarães, A. Sousa, E. Peres, and J. J. Sousa, "Post-fire forestry recovery monitoring using high-resolution multispectral imagery from unmanned aerial vehicles," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLII-3/W8, pp. 301–305, doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-3-w8-301-2019.
- [18] S. Sudhakar, V. Vijayakumar, C. Sathiya Kumar, V. Priya, L. Ravi, and V. Subramaniaswamy, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires," *Computer Communications*, vol. 149, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2019.10.007.
- [19] A. Ostapenko, V. Morkovin, V. Manmareva, and D. Manmarev, "Risk analysis in the management of forest fire in Russia," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 392, p. 012074, doi: 10.1088/1755-1315/392/1/012074.
- [20] A. Al-Kaff, Á. Madridano, S. Campos, F. García, D. Martín, and A. de la Escalera, "Emergency Support Unmanned Aerial Vehicle for Forest Fire Surveillance," *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 260, doi: 10.3390/electronics9020260.
- [21] M. Smigaj, R. Gaulton, J. C. Suárez, and S. L. Barr, "Canopy temperature from an Unmanned Aerial Vehicle as an indicator of tree stress associated with red band needle blight severity," *Forest Ecology and Management*, vol. 433, pp. 699–708, 2019, doi: 10.1016/j.foreco.2018.11.032.
- [22] R. Drenkhan, K. Adamson, and M. Hanso, "Fraxinus sogdiana, a Central Asian ash species, is susceptible to Hymenoscyphus fraxineus," *Plant Protect. Sci.*, vol. 51, no. No. 3, pp. 150–152, 2016, doi: 10.17221/89/2014-pps.
- [23] M. J. Wingfield, E. G. Brockerhoff, B. D. Wingfield, and B. Slippers, "Planted forest health: The need for a global strategy," *Science*, vol. 349, no. 6250, pp. 832–836, 2015, doi: 10.1126/science.aac6674.

- [24] M. Hais *et al.*, “Landsat Imagery Spectral Trajectories—Important Variables for Spatially Predicting the Risks of Bark Beetle Disturbance,” *Remote Sensing*, vol. 8, no. 8, p. 687, doi: 10.3390/rs8080687.
- [25] T. Klouček, J. Komárek, P. Surový, K. Hrach, P. Janata, and B. Vašíček, “The Use of UAV Mounted Sensors for Precise Detection of Bark Beetle Infestation,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 13, p. 1561, doi: 10.3390/rs11131561.
- [26] T. Mikita, P. Janata, and P. Surový, “Forest Stand Inventory Based on Combined Aerial and Terrestrial Close-Range Photogrammetry,” *Forests*, vol. 7, no. 12, p. 165, doi: 10.3390/f7080165.
- [27] Národní park Šumava, “Přírodní Poměry | Národní Park Šumava,” Národní Park Šumava. [Online]. Available: <https://www.npsumava.cz/priroda/prirodni-pomery/>. [Accessed: 21-Mar-2020].
- [28] DJI Technology Co., “DJI P4 Pro – Specifikationen, FAQ, Tutorials Und Guides – DJI,” DJI Official. [Online]. Available: <https://www.dji.com/cz/phantom-4-pro/info#specs>. [Accessed: 21-Mar-2020].
- [29] Trimble Inc., “Trimble R2 GNSS receiver,” Trimble Inc. [Online]. Available: [https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2020-02/022516-200K\\_R2%20GNSS%20Receiver\\_DS\\_A4\\_0220\\_LRsec.pdf](https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2020-02/022516-200K_R2%20GNSS%20Receiver_DS_A4_0220_LRsec.pdf). [Accessed: 21-Mar-2020].
- [30] M. A. Boon, A. P. Drijfhout, and S. Tesfamichael, “Comparison of a fixed-wing and multi-rotor uav for environmental mapping applications: a case study,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. XLII-2/W6, pp. 47–54, doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w6-47-2017.
- [31] G. M. Díaz, D. Mohr-Bell, M. Garrett, L. Muñoz, and J. D. Lencinas, “Customizing unmanned aircraft systems to reduce forest inventory costs: can oblique images substantially improve the 3D reconstruction of the canopy?,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 41, no. 9, pp. 3480–3510, 2020, doi: 10.1080/01431161.2019.1706200.
- [32] N. S. Zawodny and D. D. Boyd, “Investigation of Rotor–Airframe Interaction Noise Associated with Small-Scale Rotary-Wing Unmanned Aircraft Systems,” *J Am Helicopter Soc*, vol. 65, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.4050/jahs.65.012007.
- [33] S. Voigt, T. Kemper, T. Riedlinger, R. Kiefl, K. Scholte, and H. Mehl, “Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 45, no. 6, pp. 1520–1528, 2007, doi: 10.1109/tgrs.2007.895830.
- [34] *DOPLNĚK X – Bezpilotní systémy*. AIM | Air Navigation Services Of The CR, 2017.
- [35] Řízení letového provozu České republiky, s. p, “Vše O Létání S Drony Na Jednom Místě | LétejteZodpovědně.cz,” LétejteZodpovědně.cz. [Online]. Available: [https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/co\\_nas\\_ceká](https://letejtezodpovedne.cz/legislativa/co_nas_ceká). [Accessed: 22-Mar-2020].

- [36] Úřad pro civilní letectví, “Letadla Bez Pilota Na Palubě - Úřad Pro Civilní Letectví,” Úřad Pro Civilní Letectví. [Online]. Available: <https://www.caa.cz/provoz/letadla-bez-pilota-na-palube/>. [Accessed: 22-Mar-2020].
- [37] European Union Aviation Safety Agency, “Civil Drones (Unmanned Aircraft) | EASA,” EASA. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones-rpas>. [Accessed: 22-Mar-2020].
- [38] Řízení letového provozu České republiky, s. p., “Vše O Létání S Drony Na Jednom Místě | LétejteZodpovědně.cz,” LétejteZodpovědně.cz. [Online]. Available: [https://letejtezodpovedne.cz/aplikace/letejte\\_zodpovedne](https://letejtezodpovedne.cz/aplikace/letejte_zodpovedne). [Accessed: 22-Mar-2020].
- [39] J. Yang, A. G. Thomas, S. Singh, S. Baldi, and X. Wang, “A Semi-Physical Platform for Guidance and Formations of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles,” *Sensors*, vol. 20, no. 4, p. 1136, doi: 10.3390/s20041136.
- [40] D. E. Kislov and K. A. Korznikov, “Automatic Windthrow Detection Using Very-High-Resolution Satellite Imagery and Deep Learning,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 7, p. 1145, doi: 10.3390/rs12071145.
- [41] K. I. Paul, J. S. Larmour, S. H. Roxburgh, J. R. England, M. J. Davies, and H. D. Luck, “Measurements of stem diameter: implications for individual- and stand-level errors,” *Environ Monit Assess*, vol. 189, no. 8, 2017, doi: 10.1007/s10661-017-6109-x.
- [42] J. Kalliovirta, J. Laasasenaho, and A. Kangas, “Evaluation of the Laser-relascope,” *Forest Ecology and Management*, vol. 204, no. 2–3, pp. 181–194, 2005, doi: 10.1016/j.foreco.2004.09.020.
- [43] M. Müller, “How natural disturbance triggers political conflict: Bark beetles and the meaning of landscape in the Bavarian Forest,” *Global Environmental Change*, vol. 21, no. 3, pp. 935–946, 2011, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.05.004.
- [44] K.-W. Lee and J.-K. Park, “Evaluation of drone economics for monitoring forest pests,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Technology Society*, vol. 20, no. 1, pp. 440–446, Jan. 2019.
- [45] S. Bhandari et al., “Comparing the effectiveness of hyperspectral and multispectral data in detecting citrus nitrogen and water stresses,” 2019, doi: 10.1117/12.2518822.
- [46] R. Kachelriess, “ArcGIS for desktop,” *GIS Mapping Software, Location Intelligence & Spatial Analytics | Esri*. Environmental Systems Research Institute, 2018.
- [47] “Microsoft® Excel: versions 2020 et Office 365,” *Microsoft Excel, tabulkový software*. Microsoft Corporation, 2020.