



ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

---

# DETAILNÍ MONITORING POROSTŮ PODÉL DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY POMOCÍ BEZPILOTNÍCH LETECKÝCH PROSTŘEDKŮ

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

---

Tomáš Klouček

Jakub Jaroš

Petr Klápště

Kristýna Štěpánová

Jan Komárek

Ondřej Lagner

Jiří Rous

Barbora Maletínská







# **Detailní monitoring porostů podél dopravní infrastruktury pomocí bezpilotních leteckých prostředků**

*Certifikovaná metodika*

## **Autorský kolektiv**

Mgr. Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

Ing. Jan Komárek, Ph.D.

Mgr. Jakub Jaroš

Mgr. Ing. Ondřej Lagner, Ph.D.

Ing. Petr Klápště, Ph.D.

Ing. Jiří Rous

Bc. Kristýna Štěpánová

Bc. Barbora Maletínská

Katedra prostorových věd,

Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze,

Kamýcká 129, Praha – Suchbátka, 165 00

ISBN 978-80-213-3368-0 (tištěná verze)

ISBN 978-80-213-3369-7 (elektronická verze)

## **Odborní recenzenti**

Mgr. Eliška Vilímková<sup>1</sup>

Mgr. Martin Dolejš, Ph.D.<sup>2</sup>

Ing. Petr Masařík<sup>3</sup>

Ing. Tomáš Hájek<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ředitelství silnic a dálnic s. p., Samostatné oddělení technické podpory provozu  
Čerčanská 2053/18, 140 00 Praha 4 – Krč

<sup>2</sup> Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Pff, Katedra geografie  
Pasteurova 3632/15, 400 96 Ústí nad Labem

<sup>3</sup> Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a. s.  
Veletržní 1623/24, 170 00 Praha 7 – Holešovice

<sup>4</sup> T-Mapy spol., s. r. o.  
Brabcova 1159/2, 147 00 Praha



**DOPRAVA BEZPEČNĚ**

doprava.fzp.czu.cz

### **Poděkování**

Metodika vznikla díky podpoře Technologické agentury České republiky (TA ČR) projekt DOPRAVA 2020+ č. CK02000203 – Monitoring a vyhodnocení rizikových jevů v okolí dopravní infrastruktury s využitím DPZ. Děkujeme našim kolegům z partnerských institucí Gisat, Unicorn a Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy za společné úsilí při řešení projektu, obzvláště pak Janu Kolomazníkovi, Václavu Wiesnerovi, Janu Jermanovi a Janu Langrovi.

### **Uplatnění a uložení**

Smlouva o uplatnění metodiky byla uzavřena mezi poskytovatelem metodiky Katedrou prostorových věd Fakulty životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze a uživateli metodiky Ředitelstvím silnic a dálnic ČR, státním podnikem a Správou železnic, státní organizací.

Metodika je uložena na České zemědělské univerzitě v Praze, Ředitelství silnic a dálnic ČR, Správě železnic, u poskytovatele dotace Technologické agentury ČR a u povinných odběratelů.

### **Doporučená citace**

Klouček, T., Komárek, J., Jaroš, J., Lagner, O., Klápště, P., Rous, J., Štěpánová, K. et Maletínská, B., 2024: Detailní monitoring porostů podél dopravní infrastruktury pomocí bezpilotních leteckých prostředků. Certifikovaná metodika. Praha. 48 s.

# Obsah

1. Cíle metodiky .....	9
2. Vlastní popis metodiky .....	10
2.1 Legislativní rámec provozu UAV.....	11
2.2 Typy UAV a plánování letové mise .....	12
2.3 Zpracování UAV dat.....	14
2.4 Monitoring porostu .....	16
2.4.1 Detekce vrcholků stromů .....	17
2.4.2 Vymezení korun stromů .....	20
2.4.3 Odvození dílčích atributů .....	22
2.4.4 Komplexní multikriteriální atributy .....	28
2.4.5 Výsledná databáze .....	29
2.4.6 Software požadavky.....	29
2.5 Praktická ukázka pilotní lokality .....	30
3. Srovnání novosti postupů .....	36
4. Popis uplatnění metodiky .....	38
5. Ekonomické aspekty .....	39
6. Budoucnost UAV v monitoringu .....	41
7. Seznam použité literatury .....	42
8. Seznam publikací předcházejících metodice.....	45
Seznam obrázků .....	46
Seznam tabulek .....	47



## 1. Cíle metodiky

Cílem metodiky je vytvořit ucelený postup umožňující detailní monitoring porostu podél dopravní infrastruktury pomocí bezpilotních leteckých prostředků (UAV). Na základě metodiky bude možné provádět opakovaný monitoring vegetace podél liniové dopravní infrastruktury a získávat aktuální informace o poloze a výšce stromu, jeho vzdálenosti od dopravní infrastruktury, zdravotním stavu, svahu okolního terénu, koruně a případného přesahu do komunikace či jejího průjezdního profilu. Data budou moci rovněž sloužit jako podklad pro dlouhodobou evidenci zeleně a případné vypisování výběrových řízení zaměřených na údržbu zeleně apod. Dále bude dle uvedeného postupu možné detekovat stromy, které vyžadují kontrolu dendrologem či odborný zásah. Takové stromy by potencionálně mohly svým pádem ohrozit účastníky dopravního provozu či poškodit samotnou dopravní infrastrukturu. V současnosti jsou informace o porostu získávány pozemním terénním šetřením, což je z časového, personálního i ekonomického hlediska neefektivní a často i nedostatečně přesný způsob pořizování dat. Vytvoření metodického standardu umožní mapování porostu a následnou výměnu dat mezi jednotlivými lokálními správami dopravní infrastruktury. Využitelnost standardu roste s potřebou správců dopravních infrastruktur měření provádět opakovaně a výstupy archivovat v podobě, která by umožnila porovnání různých období.

Metodika popisuje všechny kroky vedoucí k úspěšnému monitoringu zeleně, tj. pořízení dat pomocí vhodné kamery (senzoru) umístěné na bezpilotním leteckém prostředku, základní zpracování nasnímaných UAV dat, detekci na úrovni jednotlivých stromů a získání požadovaných atributů o každém detekovaném stromě.

## 2. Vlastní popis metodiky

Problematika porostu v blízkosti dopravní infrastruktury je v současnosti velmi probírané téma. Výsadba dřevin podél komunikací může zlepšit podmínky provozu, neboť zmírňuje nežádoucí účinky klimatických vlivů, především účinky větru, závějí a slunce (předchází oslnění řidičů a přehřívání vozovky). Tyto porosty mohou však představovat bezpečnostní riziko, například při střetu vozidla se stromem či při pádu částí či celých stromů do samotné komunikace. V roce 2022 došlo na území České republiky dle statistických údajů Ředitelství služby dopravní policie Policejního prezidia ČR k celkem 98 460 nehodám. Pětinu z nich tvořily srážky s pevnou překážkou, jako je sloup, sloupek dopravní značky, patník, zeď, strom a svodidlo. Nízký podíl na celkovém počtu nehod mají srážky se stromy (2,5 %). Avšak tyto srážky jsou v kategorii pevných překážek dle počtu usmrcených osob nejzávažnější. V loňském roce přišlo o život při střetu se stromem 86 osob.

Předkládaná metodika si klade za cíl zmapovat vegetaci podél komunikací, a to za pomoci bezpilotních leteckých prostředků, které patří mezi rychle se rozvíjející odvětví dálkového průzkumu Země. Bepilotní letecké prostředky (familiárně též někdy označované jako drony) jsou účinným nástrojem pro sběr dat, které konkurují satelitům a letadlům díky své vysoké provozní flexibilitě a vysokému prostorovému rozlišení snímků (Matese et al., 2015). Bepilotní letecké prostředky tak nachází uplatnění mimo jiné i v oblasti lesnictví, kde dálkové snímání může efektivně poskytovat prostorově reprezentativní charakteristiky zkoumaných lesních porostů, a tím i doplňovat stávající pozemní měření (Wallace et al., 2016). Komplexní řešení využití bezpilotních leteckých prostředků v lesnictví pak poskytuje např. kolektiv autorů Dainelli, Toscano, Di Gennaro, et al. (2021, 2021).

Publikace je rozdělena do šesti hlavních podkapitol, ve kterých (I) jsou popsány obecné cíle metodiky, (II) jsou vlastní metodické postupy zpracování dat s následnou ukázkou výsledků na pilotní lokalitě, (III) naleznete srovnání novosti navrženého přístupu dalšími známými metodami, (IV) popisujeme způsoby uplatnění tohoto metodického návodu, (V) uvádíme ekonomické aspekty plynoucí z navrženého postupu a srovnání s alternativami, a (VI) nastiňujeme nové možnosti pasportizace vegetace v blízké budoucnosti. Podmínkou využití metodiky v praxi je nutná základní znalost v oblasti dálkového průzkumu Země a geografických informačních systémů, zpracování UAV dat a know-how vhodného software k získání požadovaných prostorových informací.

## 2.1 Legislativní rámec provozu UAV

Let UAV je nutné realizovat v souladu s platnou legislativou ČR a EU. Provoz UAV je regulován leteckými předpisy Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO), zakotvenými ve sbírce zákona č. 431/2022 (účinným od 1.1.2023), kterým se mění zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví. V květnu 2019 byla přijata nová společná evropská legislativa týkající se provozu bezpilotních prostředků, více také v Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2018/1139 a Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945. Stěžejním dokumentem je pak Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947, které vstoupilo v platnost dvacátým dnem po uveřejnění v Úředním věstníku Evropské unie a je dostupné na stránkách Evropské agentury pro bezpečnost a letectví (<https://www.easa.europa.eu>). V České republice podléhá provoz bezpilotních systémů Úřadu pro civilní letectví (<https://www.caa.cz>), který dále podle článku 15 prováděcího nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel, v platném znění se s účinností od 31. 12. 2020 zřizuje pomocí veřejné vyhlášky – opatřením obecné povahy v České republice omezený prostor **LKR10**. Nově vyhlášený prostor reguluje a blíže specifikuje podmínky provozu UAV v České republice. Od 1. 1. 2024 se též po odkladu (původně 1. 7. 2022) dle nařízení 2019/945 zavádí povinnost provozovatele UAV v kategorii Otevřená a Specifická opatřit prostředky těžší než 250 g systémem dálkové identifikace (tzv. Remote ID) umožňující bezdrátový dálkový přístup k registračnímu číslu provozovatele UAV.

Pro kontrolu některých omezení vyplývajících z výše zmíněných dokumentů (především vyhlášeného omezeného prostoru LKR10) je možné využít webový nástroj DroneView (<https://dronview.rlp.cz/>), který poskytuje službu Řízení letového provozu České republiky, s. p. V mapové aplikaci lze nad konkrétním místem zjistit případné omezení provozu UAV, především pak prostory řízených a neřízených letišť. V řízených prostorech lze pak zjistit informaci o maximální povolené letové výšce pomocí tzv. gridů – číslo v buňce značí maximální letovou hladinu v metrech nad terénem. Jedná se však o zjednodušenou aplikaci a po získání základní orientace je vhodné využít službu AisView (<https://aisview.rlp.cz>), která nabízí komplexní rozdělení vzdušného prostoru. Ve službě AisView je tak možné najít veškerá omezení a vyhlášené prostory včetně jejich případné aktivace. Aplikace AisView je využívána i pro klasické pilotované letectví. Mimo webové rozhraní je výhodné využít pro kontrolu přímo v terénu také mobilní aplikace, snadno dostupné jsou např. ty od vydavatele Foxtrot Technologies, s. r. o., jak pro **Android** tak pro **iOS**.

## 2.2 Typy UAV a plánování letové mise

Pořízení dat bezpilotními leteckými prostředky může být obecně provedeno s využitím dvou typů UAV osazených víceméně libovolnými senzory. Nejpopulárnějšími jsou tzv. multi-koptéry (rotary-wing), se kterými se lze setkat v nespočtu provedení. Druhým typem jsou pevná křídla (fixed-wing). Vícerotorové prostředky (koptéry) udržuje ve vzduchu tahová síla díky točivému momentu, který generují motory. Multi-koptéry nabízí vyšší prostorové rozlišení na úkor pokrytí. Naopak časová výdrž v letu a letová rychlost koptér je zpravidla nižší než u křídlových typů. Pro pohyb křidel je využito principu odlišné rychlosti proudění vzduchu nad a pod profilem křídla, čímž dochází k poklesu tlaku nad křídlem a zároveň k nárůstu (vz)tlaku pod křídlem. Pevná křídla umožňují nasnímání území o větších rozlohách, často ale na úkor redukováného prostorového rozlišení. Možností v kategorii pevných křidel jsou tzv. VTOL (Vertical Take-Off and Landing) umožňující vertikální vzlet a přistání.

Pro potřeby mapování doprovodné zeleně a vzrostlých stromů jsou vhodné oba typy prostředků. Pro území o rozloze několik hektarů či vzdáleností o stovkách metrů lze zvolit vícerotorové prostředky. Naopak pro větší celky či vyšší vzdálenosti je vhodnější použít bezpilotní letecký prostředek typu křídla. Volba prostředku je závislá na stanovištních podmínkách, topografii, legislativním omezení a možnostech uživatele. Dále je na uživateli výběr komerčního či volně dostupného systému. Využití komerčního řešení je ideální pro nezkušené uživatele, protože ovládací systém i přístroj je připraven k okamžitému použití. Oproti tomu volné systémy nabízí větší rozmanitost v používání, zároveň ale vyžadují jistou míru odbornosti. Konkrétní porovnání komerčního a uživatelem vyrobeného systému nabízí ve své studii např. kolektiv autorů Moudrý et al. (2019).

Před plánováním letové mise je vhodné nejprve zkontrolovat případná omezení v aplikaci DroneView, resp. AisView. Během přípravy vlastní letové mise (tj. trajektorie letu bezpilotního prostředku) je třeba zvolit vhodný překryv snímků. Pro dosažení dobrých výsledků by měl nálet probíhat ve výšce 70-90 m nad povrchem (tj. nad korunami stromů) se 70-80 % podélnými i příčnými překryvy snímků (Komárek et al., 2022). Vyšší překryv snímků představuje vyšší nároky na spotřebu letového času a později i na výpočetní kapacitu. Při plánování letové hladiny je nutné uvažovat o objektech na povrchu a jejich výšce při náletu přičítat. Pro dosažení dostatečné ostrosti snímků je důležité zvolit vhodnou horizontální rychlost prostředku (typicky 4-8 m.s<sup>-1</sup> u koptér a 10-12 m.s<sup>-1</sup> u křidel), dostatečné světelné podmínky snímané scény a jednotnou intenzitu světla – vhodné je difúzní nikoli ostré světlo, tedy takříkajíc konstantně zataženo. Důležitými faktory, které mohou negativně ovlivnit letovou misi, jsou povětrnostní podmínky, námraza i mlha. Pro dosažení optimální ostrosti by neměla rychlost větru v nárazech překročit hodnotu 5 m.s<sup>-1</sup>, resp. 8 m.s<sup>-1</sup>. Plánovat misi je třeba též s ohledem na všechny výškové překážky a možný, resp. předpokládány okolní letový provoz. K plánování letové mise lze využít mnoho vybraných aplikací, například [DJI Pilot](#) (Android a iOS) nebo [DJI GS Pro](#) (iOS), které jsou vhodné pro využití komerčních *ready-to-deploy* řešení od čínské technologické společnosti DJI. Využit lze ale také volné a otevřené řešení jakým je univerzální plánovací nástroj [Mission Planner](#) (Windows). Také lze využít zdarma na mobilních zařízeních aplikaci [Pix4Dcapture Pro](#) (Android a iOS), která je kompatibilní s mnoha typy dronů i mimo DJI. Obdobně tomu je i u dalších, jako je komerční multiplatformní [UgCS](#) (Windows, Mac OS, Linux) nebo mobilní [Litchi](#) (Android) pro stroje DJI.

Existuje celá řada senzorů, které lze využít v součinnosti s bezpilotními leteckými prostředky. Stran monitorování a mapování vegetace se využívají dvě velké skupiny – senzory aktivní a pasivní. Mezi aktivní senzory vhodnými pro pasportizaci vegetace se řadí tzv. LiDAR (Ligh Detection and Ranging), který vysílá světelné paprsky (obvykle ~905 nebo ~1550 nm) a měří dobu šíření laserového paprsku a intenzitu odrazu od cílového objektu. Výstupem z takového měření je bodové mračno, tedy změřené odrazy od povrchu. Jedná se o poměrně přesná měření založené na fyzikální podstatě, vyžadován je však zkušený operátor i zpracovatel dat. Pořizovací náklady LiDARových senzorů jsou obvykle vyšší stovky tisíc až jednotky milionů korun. Druhou velkou skupinou jsou pasivní senzory, které zaznamenávají přirozeně odražené záření. Mezi pasivní senzory patří běžné fotoaparáty, které zaznamenávají v pásmu RGB (red-green-blue, tedy červená-zelená-modrá). Jedná se o barvy přirozené lidskému oku (resp. vlnové délky, ca 400-700 nm), proto jsou označovány také jako viditelné nebo pravé barvy. Mimo RGB lze relativně běžně zaznamenávat také záření ve vyšších vlnových délkách jako např. červený kraj a část blízkého infračerveného pásma (ca 700-1000 nm), které jsou využívány pro svoji zvýšenou citlivost detekce vitality a stresu vegetace. Takové senzory se pak běžně označují jako multispektrální – každá část spektra je (ideálně) zaznamenávána na vlastní čip a optickou soustavu. Pasivních senzorů dostupných na UAV je celá řada, a zatímco u RGB se zpravidla řeší pouze rozlišení senzoru (hodnota MPx), u multispektrálních se řeší i konkrétní vlnová délka, světelnost apod. Specifickou kategorií multispektrálních senzorů jsou navíc hyperspektrální UAV kamery snímající v desítkách až stovkách úzkých na sebe navazujících spektrálních pásmech především viditelného a blízkého infračerveného záření, které však nachází svoje využití zatím spíše v experimentálních vědeckých studiích, než v praktickém mapování vegetace. Porovnání několika (v praxi často využívaných, s jejichž využitím mají autoři textu osobní zkušenosti) pasivních UAV senzorů je uvedeno níže (Tabulka 1). Další dostupné UAV senzory spolu s jejich podrobnými specifikacemi lze nalézt například ve studiích publikovaných Deng et al., (2018), Komárek et al. (2022), Lu et al. (2020) a Yao et al. (2019).

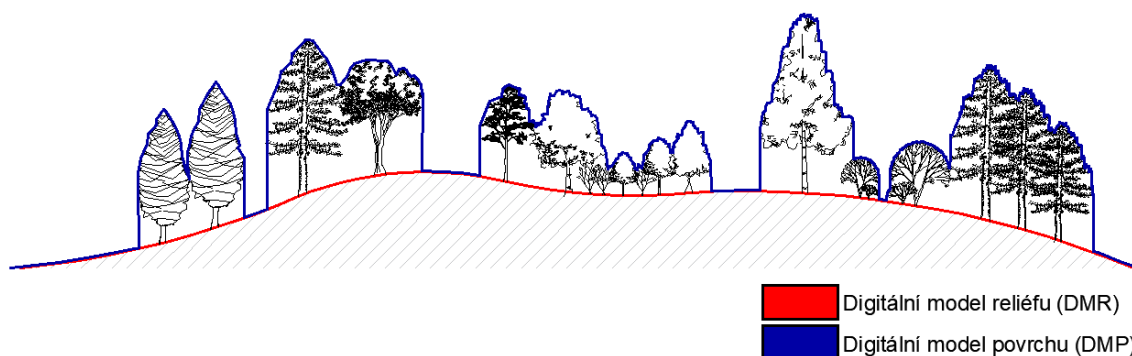
*Tabulka 1. Porovnání parametrů vybraných UAV pasivních senzorů.*

	Zenmuse X5S	Phantom 4	RedEdge-P	Sequoia
<b>Výrobce</b>	SZ DJI Technology Co., Ltd.		MicaSense Inc.	Parrot SA
<b>Rozlišení (MPx)</b>	20.8	19.8	1.6	1.2
<b>FOV (°)</b>	72	84	50	49
<b>Spektrální pásma</b>	RGB	RGB	B, G, R, RE, NIR	G, R, RE, NIR
	broadband	broadband	narrowband	narrowband
<b>Spektrální rozsah (nm)</b>	n/a	n/a	475-842	530-810
<b>Velikost snímků (pixel)</b>	5280×3956	5472×3628	1456×1088	1280×960
<b>Formát snímků</b>	JPG	JPG	TIF	TIF
<b>Bitová hloubka</b>	8	8	12	16
<b>Váha (g)</b>	461	1388	350	72

## 2.3 Zpracování UAV dat

K získání požadovaných informací z fotografií je vhodná kvazi-fotogrammetrická metoda Structure from Motion (SfM) spolu s algoritmy Multi-View Stereo (MVS). Předpokladem úspěšného výpočtu je pořízení mnoha překrývajících se snímků zájmové lokality, viz výše. Dle Lisein et al. (2013) lze při využití fotogrammetrické metody v oblasti precizního lesnictví sledovat strukturu porostu a při opakovaném náletu i jeho vývoj. Metoda vychází ze stereo-fotogrammetrie, tzn. získávání trojrozměrných informací z dvojrozměrných snímků. Je založena na hledání identických bodů na základě lokálních extrémů na snímcích s centrální projekcí. Identické body se nachází v překrývajících se snímcích, ze kterých je posléze získávána informace o prostorové orientaci. Postupně dochází k rekonstrukci obrazu a k vytvoření 3D bodového mračna na základě algoritmů Multi View Stereo. Každý bod takového bodového mračna obsahuje informaci o X, Y a Z souřadnicích (tedy polohu a výšku). Následně je nalezen vztah mezi souřadnicemi bodů a souřadnicemi objektu. Na základě obrazové korelace je bodové mračno zhuštěno a je tak možné provést 2,5D, resp. 3D rekonstrukci objektů. Existuje celá řada software využívajících metod SfM a MVS, z komerčních řešení je to např. multiplatformní [Agisoft Metashape](#) (Windows, macOS, Linux), [Pix4Dmapper](#) (Windows) nebo [RealityCapture](#) (Windows), z volně dostupných pak např. [MicMac](#) (Windows, macOS, Linux). Existují také další otevřená nebo volná minimalistická řešení ([VisualSFM](#), [SfMtoolkit](#) aj.), jejichž vývoj a podpora ale zpravidla nemívá dlouhého trvání.

Dle výsledků výzkumu autorů Wallace et al. (2016) lze v oblastech s relativně nízkým zapojením vegetace využít kvazi-fotogrammetrickou techniku SfM k popisu nejen vegetace ale i terénu. Z klasifikovaného bodového mračna lze vygenerovat digitální model reliéfu (DMR), reprezentující terén zemského povrchu, a digitální model povrchu (DMP) znázorňující veškeré přírodní i umělé prvky, které jsou spojeny s terénem (např. stromy, budovy a vegetaci). Názorný rozdíl mezi modely reliéfu a povrchu na příkladu vegetace je znázorněn níže (Obrázek 1).



Obrázek 1. Znázornění digitálních modelů povrchu a reliéfu.

Při tvorbě DMR skrze fotogrammetrické metody z dat získaných z náletu je nutné, aby byl terén na snímcích alespoň částečně viditelný na pořízených snímcích. V případech zakrytého terénu je na území ČR vhodnější tento model nahradit digitálním modelem reliéfu 5. generace (DMR 5G), který byl vytvořen pro celé území České republiky. Model DMR 5G vznikl z dat pořízených leteckým laserovým skenováním a je poskytován Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). Bližší informace lze nalézt na oficiálních webových stránkách ČÚZK (<https://geoportal.cuzk.cz>). Informace listech DMR 5G jsou součástí 5. kapitoly Ekonomické aspekty. Od 1. 7. 2023 jsou tato data však distribuována ČÚZK na základě novely zákona č. 200/1994 Sb., o zeměměřictví všem uživatelům zdarma k volnému využití v rámci režimu „open-access“. Význam využití modelů reliéfu třetích stran pro detekci vegetace hodnotí ve své odborné studii kolektiv autorů Klouček et al. (2022).

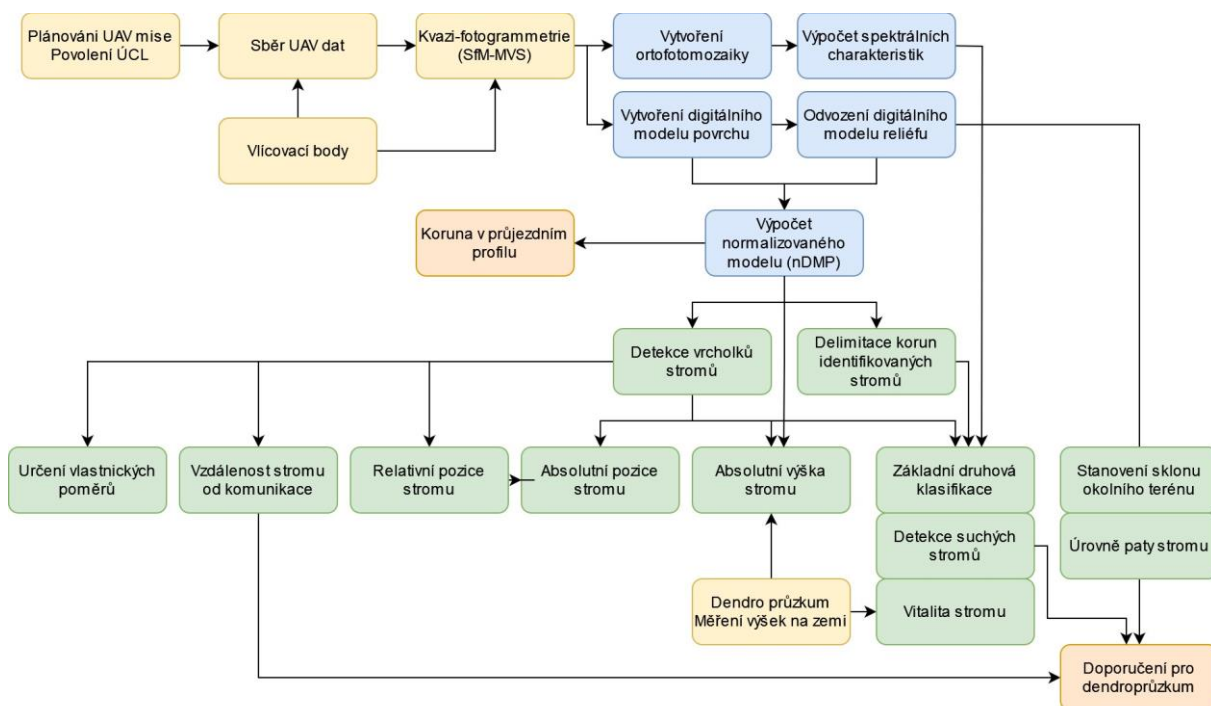
Dalším z výstupů získaných z fotografií je ortorektifikovaná georeferencovaná bezešvá mozaika, která vzniká převedením snímků s ortogonální projekcí do mapového zobrazení, čímž dojde k odstranění geometrického zkreslení za pomoci digitálního modelu povrchu. Tvorba mozaiky je v rámci metodického postupu důležitá pro optické posouzení správnosti detekce jednotlivých vrcholů vegetace a k výpočtu vegetačních indexů pro posouzení zdravotního stavu. Vizuální kontrola podkladu je vhodná i s ohledem na opadavý porost (viz Obrázek 2), který může být v zimním období obtížněji identifikovatelný automatickými metodami.



Obrázek 2. Ukázka šikmého UAV snímku pořízeného 24. 10. 2021 poblíž obce Kácov (trať 516A v úseku Soběšín-Kácov).

## 2.4 Monitoring porostu

Hlavní náplní kapitoly je popsání metodických kroků vedoucích k monitoringu porostů na úrovni jednotlivých stromů využívajících produktů vytvořených z dat pořízených optickými senzory nesenými bezpilotními leteckými prostředky. Ač je tato problematika na vědecké úrovni velmi podrobně prozkoumána, tak je překvapivě zatím dostupné jen minimální množství odborných publikací zabývajících se podrobnou (reprodukovatelnou) metodikou jejich zpracování a analytického vyhodnocení ve vztahu k dopravní infrastruktuře. Cílem navrhovaného metodického řešení je tak tento nedostatek napravit a zacelit relativně prázdný prostor mezi teoretickou a praktickou aplikací UAV v dané problematice. Vytvořený metodický návod (Obrázek 3) je složen z těchto jednotlivých kroků (a) Detekce vrcholů stromů; (b) Vymezení korun stromů; (c) Odvození dílčích atributů; (d) Odvození komplexních multikriteriálních atributů; (e) Tvorba výsledné databáze a (f) Software požadavky. Všechny potřebné metodické kroky jsou v kapitole 2.4 teoreticky vysvětleny a v následující kapitole 2.5 prakticky aplikovány na vybrané pilotní území (silnice I. třídy ve Středočeském kraji).



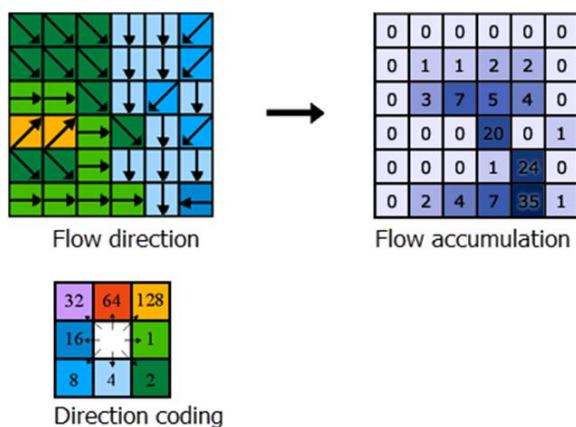
Obrázek 3. Zjednodušené schéma představující dílčí rámcové kroky metodického postupu pro monitoring porostů a stanovení jejich parametrů.



### 2.4.1 Detekce vrcholků stromů

Pro komplexní monitoring stromů je nejprve nutné určení polohy jejich jednotlivých vrcholků, kterého lze docílit analýzou normalizovaného digitálního modelu povrchu (nDMP). Normalizovaný model vzniká odečtením digitálního modelu reliéfu (DMR) od digitálního modelu povrchu (DMP). Výsledkem je digitální model reprezentující v každém obrazovém prvku (pixelu) výšku objektů na zemském povrchu, tedy i výšku stromů. Odečtení dvou rastrů lze provést v jakémkoliv GIS či DPZ softwaru pomocí nástrojů mapové (rastrové) algebry.

Cílem první části metodického postupu je proto vytvoření bodové vrstvy reprezentující jednotlivé vrcholky stromů, a to pomocí hydrologických GIS nástrojů běžně používaných v hydrologii pro modelování proudění vody po zemském povrchu. Díky nim lze například pomocí standardních hydrologických analýz pro každý pixel (typicky) digitálního modelu terénu v povodí určit směr proudění toku (*Flow direction*), a na základě této informace poté i místa s největší akumulací vody (nejhlubší místa modelu, do kterých proudí nejvíce pixelů; *Flow accumulation*), viz Obrázek 4. Právě hydrologické nástroje hrají v metodice detekce vrcholků jednotlivých stromů velmi významnou roli. V rámci detekční analýzy však není použit jako vstup digitální model reliéfu jako je tomu u běžných hydrologických analýz, ale dříve zmíněný normalizovaný digitální model povrchu reprezentující absolutní výšku vegetace, který byl navíc invertován, tedy převrácen tak, aby jednotlivého koruny stromů (nDSM) představovaly imaginární digitální model terénu a jejich vrcholky místa s největší akumulací vody.



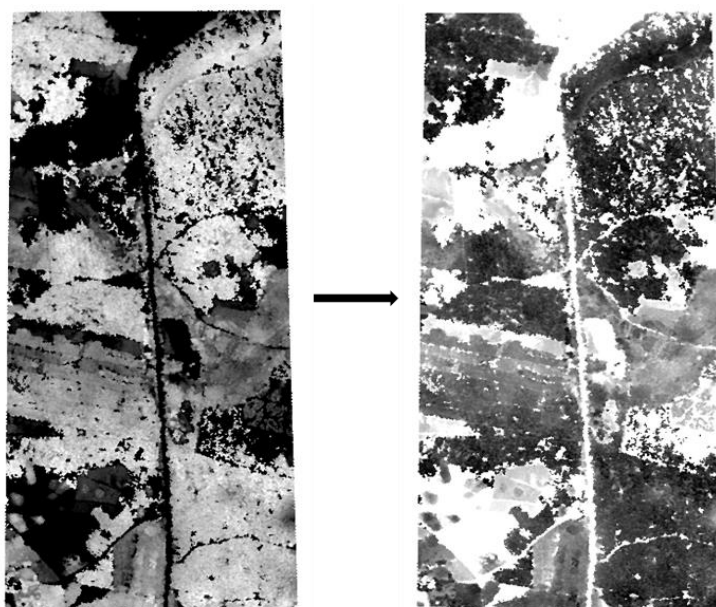
Obrázek 4. Znázornění principu určení směru toku (*Flow direction*) a akumulační hodnoty (*Flow accumulation*), zdroj: <https://pro.arcgis.com>.

Prvním krokem k vytvoření detekčního algoritmu byla tedy inverze (převrácení) nDMP, kterou je prakticky možné provést hned několika způsoby například (a) jednoduše jeho vynásobením hodnotou (-1), případně (b) sofistikovaněji prostřednictvím vzorce uvedeného níže (Obrázek 5), a to v obou případech opět běžnými GIS a DPZ nástroji mapové algebry. Takto převrácený (invertovaný) normalizovaný digitální model povrchu slouží jako vstupní výškový model pro následnou aplikaci hydrologických nástrojů umožňujících nalezení míst s největší hodnotou akumulace, které tak díky použití převráceného modelu představují právě požadované vrcholky stromů.

$$(("RasterLayer" - Max\_value) * -1) + Min\_value$$

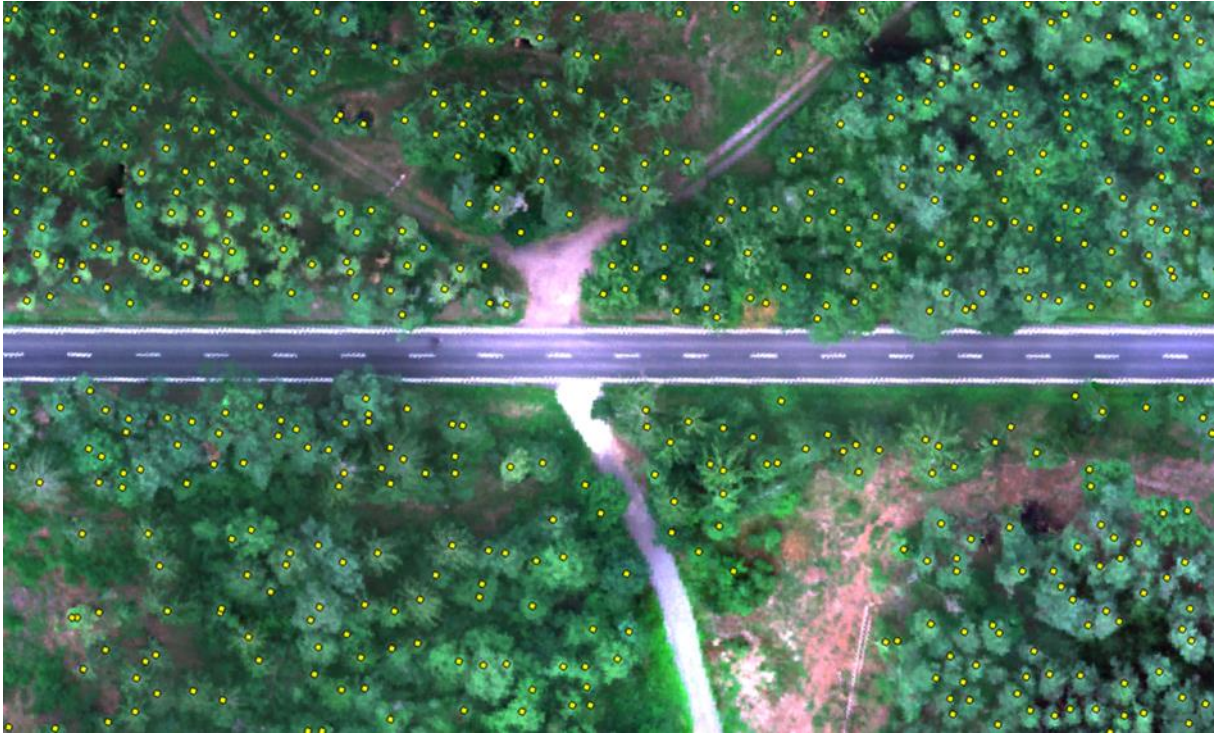
Obrázek 5. Vzorec pro invertování normovaného digitálního modelu povrchu, kde parametr „RasterLayer“ představuje rastr nDMP a parametry Max\_value/Min\_value jeho maximální/minimální

Základním předpokladem dosažení věrohodných detekčních výsledků je kvalitní a podrobný nDMP. V případě dat velmi vysokého rozlišení (<5 cm) obsahujících po odečtení DMR od DMP množství šumu lze přesnost detekce zvýšit dodatečnou aplikací vhodného nízkofrekvenčního filtru (průměrového apod.) na převrácený nDMP před aplikací hydrologických funkcí. Vzhledem k účelu této metodiky byly pro další analýzy navíc vyjmuty objekty (pixely) s výškou nižší než 3 m, které se vyskytují dále než 50 m od kraje dotčené infrastruktury. U takových je předpokládána jen velmi nízká, resp. zanedbatelná pravděpodobnost ohrožení dopravní infrastruktury. Pokud jsou taková data správcům infrastruktury dostupná, tak by bylo navíc vhodné odmaskovat i případné umělé objekty jakými jsou například budovy apod., které by mohly být teoreticky nesprávně detekovány a zaměněny za stromy. Jak je vidět na obrázku níže (Obrázek 6), nejvyšší hodnoty výšky původního vstupního rastru nDSM představují na invertovaném modelu ty nejnižší (předpokládané vrcholky stromů) a naopak.



Obrázek 6. Normalizovaný digitální model povrchu (nDMP) před (vlevo) a po inverzi (vpravo).





Obrázek 8. UAV ortofotomozaika s výslednou bodovou vrstvou vrcholků stromů.

#### 2.4.2 Vymezení korun stromů

Algoritmus pro tvorbu reálných a z nich vycházejících (kruhem) aproximovaných korun navazuje na předchozí využití hydrologických analýz u detekce vrcholků stromů. Metodický postup je založen na předpokladu, že stejně jako v případě hydrologické analýzy *Watershed* vymezující povodí toků, je možné na stejném principu pomocí invertovaného nDMP vymezit koruny jednotlivých stromů. Hlavním vstupem pro vymezení korun byl tak vytvořený invertovaný normalizovaný digitální model povrchu s odmaskovanými pixely (výška <3 m a vzdálenost od infrastruktury >50 m). Na tomto rastru byly nejprve pomocí nástroje *Focal flow* nalezeny pixely s maximálními odtoky. *Focal flow* funguje na principu pohybujícího se okna (3x3 pixely), pro jehož středový pixel určuje počet sousedních buněk, které do něj proudí. Pixely s nejvyššími odtoky, tzn. do kterých proudí všechny sousední buňky, mají hodnotu 255 (vychází ze součtu hodnot všech bitových pozic od 1 do 128, viz Obrázek 4). Buňky s hodnotou 255 (s nejvyššími odtoky) sloužily spolu s rastrem reprezentujícím směry toků (*Flow direction*) jako vstupní data pro vymezení povodí, resp. korun stromů hydrologickým nástrojem *Watershed*. Díky povaze výškových dat pořízených z UAV snímků zpracovaných metodou SfM-MVS nastává v řadě případů to, že jedna skutečná koruna stromu byla tvořena více povodími vymeznými nástrojem *Watershed*. Na každý detekovaný strom v předchozím metodickém kroku tak připadlo několik malých povodí. Tato povodí pak byla sloučena (spojena) GIS nástroji prostorového překrývání na základě nejbližší vzdálenosti k detekovanému vršku stromu do jedné koruny (Obrázek 9). Posledním krokem delinace bylo eliminování korun s nereálnou rozlohou, tedy příliš malých anebo naopak příliš velkých. Například nereálně velké koruny se často nachází především na okrajích vstupních dat řešeného území, kde je nižší kvalita vstupního výškového modelu.



Obrázek 9. Vymezení reálných korun stromů.

Jelikož pro řadu prezentačních (kartografických) úloh je často vhodnější nahradit reálnou korunu stromu přibližnou aproximací kružnicí kopírující její skutečný tvar. Byl kolem každého detekovaného vrcholku stromů vytvoření bufferu (kruhu) s poloměrem dopočítaným ze známé plochy skutečné koruny (viz Obrázek 10) dle základního vzorce  $S = \pi r^2$ .



Obrázek 10. Vymezení korun stromů kruhem.

### 2.4.3 Odvození dílčích atributů

Precizně detekované vrcholky stromů společně s jejich vymezenými korunami byly základními prostorovými jednotkami pro následné odečtení všech parametrů stromů využitých v rámci vytvořeného metodického postupu pro monitoring vegetace a vyhodnocení potencionálního bezpečnostního rizika podél dopravní infrastruktury. Pro každý strom tak bylo automaticky vypočteno deset dílčích atributů.

#### Poloha stromu

Data pořízená bezpilotními leteckými prostředky jsou již v dnešní době víceméně vždy geolokalizovaná v prostoru (viz předchozí kapitoly zaměřené na pořizování UAV dat). Proto lze pro každý jednotlivých strom reprezentovaný jako vrcholkem velmi přesně definovat jako polohu, a to dle požadavků uživatele jak v národním (například S-JTSK; XY), tak globálním souřadnicovém systému (například WGS 1984; zeměpisná šířka a délka [°]). Díky dostupnosti řady transformačních rovnic navíc není problém souřadnice stromů transformovat do víceméně jakéhokoliv požadovaného souřadnicového systému. V případě dodržení všech zásad správného pořizování UAV dat a jejich doplnění o vlíčovací body s přesně zaměřenou polohou přímo v terénu (tzv. Ground Control Points; GCP) je možné dosáhnout polohové přesnosti v řádu jednotek až nižších desítek centimetrů.

#### Stanovení pozice stromu vůči internímu značení

Stejně jako v případě určení absolutní polohy každého stromu v prostoru, je možné určit i jeho relativní polohu k jakémukoliv vztažnému bodu, kterým může být například tzv. kilometrovník. Pro provedení takové analýzy je nutné disponovat vektorovou vrstvou obsahující alespoň jeden bod reprezentující konkrétní kilometrovník a dále s osou analyzované dopravní infrastruktury (silnice, železnice apod.). Pro nejhrubší lokalizaci stromů vzhledem ke kilometrovníkům, tedy určení, na jakém konkrétním kilometru strom leží, stačí využít GIS nástroje blízkosti (*Proximity*), které umožňují pro každý strom lokalizovat nejbližší kilometrovník a tuto informaci zapsat do příslušného sloupce v atributové tabulce dané vrstvy. V některých případech by však informace v řádech kilometrů nemusela být dostatečná, a tak se nabízí druhá sofistikovanější možnost, kterou je určit polohu stromu přesněji než na celé kilometry. Toho lze technicky dosáhnout rozdělením linie na základě kilometrovníků na drobnější úseky (nebo body) a následně opět nástroji blízkosti pro každý strom identifikovat nejbližší úsek linie a odečíst jeho atribut s příslušným sub kilometrovým označením.

Pokud je navíc osa komunikace vytvořená od nultého kilometru (tedy začátek je v bodě 0) je možné definovat i na jaké straně se konkrétní strom nachází (vlevo nebo vpravo od osy komunikace), k čemuž je možné využít standardních GIS nástrojů překrývání, tedy vytvořit jednostrannou obalovou zónu (o velikosti dle rozsahu zkoumaného území; například 50 m) a následně vybrat pouze stromy, které se s touto vrstvou překrývají a doplnit je příslušným stranovým atributem. Technicky je tak možné parametr uvádějící stranu určit na základě osy komunikace, pro kterou se vytvoří dva buffery (obalové zóny) – levý a pravý. Výsledkem analýzy jsou polygony zahrnující oblasti v zadané vzdálenosti od osy komunikace pro pravou a levou stranu. Díky prostorové shodě těchto polygonů s vrstvou vrcholků stromů je ve výsledku pro každý strom známá strana, na které se vůči komunikaci nachází.

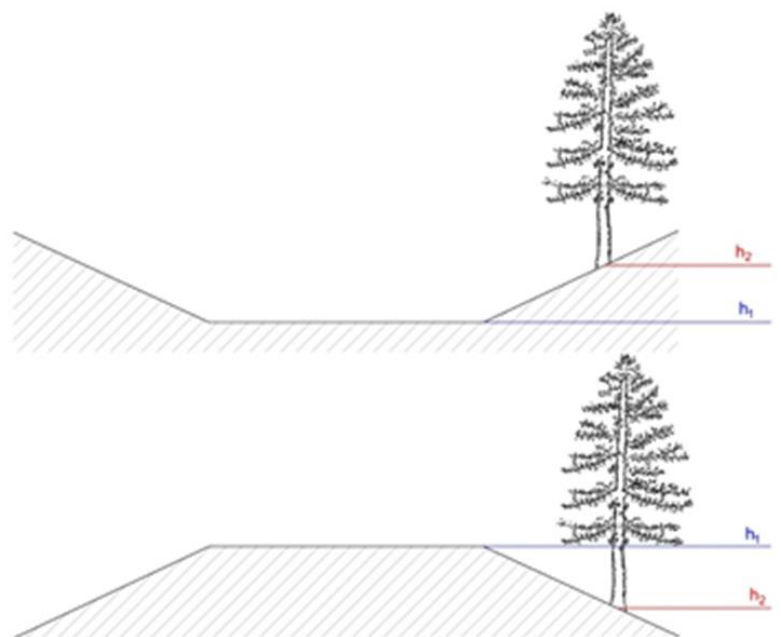
## Výška stromu

Pro odečtení výšek identifikovaných stromů je využíván dříve zmiňovaný normalizovaný model povrchu (nDMP). Výška stromů je tak získána díky extrahování hodnot pixelů z rastru nDMP pro detekované vrcholky stromů. Za předpokladu, že byly modely reliéfu a povrchu vytvořeny bezchybně, normalizovaný model představuje výšku objektů nad reliéfem a každému bodu tak lze přiřadit absolutní výšku. Z podstaty sběru a zpracování UAV dat je však vhodné vzít v úvahu širší okolí identifikovaného bodu, aby nedošlo k podhodnocení nebo naopak nadhodnocení stanovené výšky stromu. Toho lze docílit vytvořením uživatelem definované obalové zóny (např. průměr 0,5 m), ve které se nástroji zonální statistiky provede analýza všech příslušných hodnot (pixelů) z nDMP. S přihlédnutím k povaze vstupních UAV dat a potřebám prováděné analýzy lze za vrcholek stromu považovat nejvyšší hodnotu v takto definované zóně. Nejvyšší hodnota nDMP tak teoreticky představuje absolutní výšku identifikovaného stromu.

Pasivní senzory UAV (typicky běžné RGB nebo multispektrální kamery) oproti aktivním sensorům (jakým je např. LiDAR) povrch neměří ale spíše modelují. Z toho plynou potenciační chyby v dosažených hodnotách. Pro ověření dosažených výsledků proto důrazně doporučujeme změření několika vzorků přímo v terénu. K tomu lze využít nejrůznější lesnické pomůcky pro měření výšek stromů nepřímou metodou. Jedná se o přístroje, které využívají podobnosti trojúhelníků a na základě několika (typicky 2-3) naměřených hodnot vzdálenosti k objektu a úhlů měření odvodí výšku stromu. Využít lze celou řadu přístrojů od jednoduchých, které lze pořídit za jednotky tisíc, až po profesionální, jejichž pořízení se pohybuje spíše v desítkách tisíc korun. Konkrétně se může jednat z obou skupin např. o Nikon Laser Forestry Pro nebo Haglöf Vertex Laser Geo.

## Úroveň paty stromu

Vzhledem k úpravě terénu při stavbě komunikace bývá okolní terén v rozdílné nadmořské výšce než samotné těleso dopravní infrastruktury, které může být vedeno v zářezu či násypu (Obrázek 11). V případě, kdy se porost v těsné blízkosti komunikace nachází ve svahu, je možné na základě rozdílu výšek mezi patou stromu a nejbližším vztahným bodem na komunikaci určit, zda se strom nachází nad, nebo pod ní ( $h_1-h_2$ ), a to odečtením jejich hodnot digitálního modelu reliéfu. Nicméně obecně vhodnější je z našeho pohledu neodečítat přímo hodnotu v konkrétním bodě, ale vypočítat průměrnou výškovou hodnotu v jeho bezprostředním okolí definovaným například kružnicí s 1 m poloměrem apod. Díky tomuto kroku do analýzy vstupují i hodnoty okolního terénu a jeho konfigurace, a navíc dochází k zohlednění možného šumu výškových UAV dat. Jelikož jsou všechny výpočty založené na použití dat pořízených pasivními optickými senzory, které nemohou snímat terén pod vegetací, tak v případě určení paty stromu dochází k zjednodušení, kdy předpokládáme, že vrcholek stromu leží kolmo nad jeho patou.



Obrázek 11. Znázornění rozdílu nadmořské výšky reliéfu komunikace a okolního terénu.

#### Sklon svahu mezi stromem a komunikací

Nástroje v běžných GIS software počítají sklonitost reliéfu pro každý pixel vstupního výškového rastru na základě jeho okolních hodnot (například v okně definovaném 3x3 okolními pixely), tento sklon tak reprezentuje pouze lokální charakter reliéfu, ale nereflexuje jeho vztah k dopravní infrastruktuře a potenciální dopadové vzdálenosti. Proto se jako vhodnější řešení nabízí přímo výpočet sklonu reliéfu mezi nejbližším vztažným bodem ležícím na dopravní infrastruktuře. Tento atribut tak vyjadřuje odvozený průměrný sklon terénu vypočtený pomocí základních goniometrických funkcí mezi stromem a komunikací. Vyšší sklon [°] navíc značí vyšší potenciální dopadovou vzdálenost padajícího stromu. Pro tento výpočet je nutné získat pro patu stromu a dopravní infrastrukturu hodnoty digitálního modelu reliéfu (viz předchozí výpočet atributu Úroveň paty stromu) a jejich vzdálenost (viz atribut Vzdálenost stromu od dopravní infrastruktury).

#### Vzdálenost stromu od dopravní infrastruktury

Vzdálenost stromu od dopravní infrastruktury lze jednoduše spočítat pomocí určení nejbližší Eukleidovské vzdálenosti stromu od okraje komunikace (silnice, železnice) GIS nástroji blízkosti (Proximity), například nástrojem *Near* v ArcGIS Pro. Z metodického pohledu je pro výpočet jedinou podmínkou, že bude tento okraj reprezentován vektorovou vrstvou a záleží tak pouze na potřebách správců dopravní infrastruktury, zda bude představovat okraj zpevněné části komunikace, navazujícího příkopu apod. Na základě přesných informací o poloze (X, Y) a výšce (Z) jednotlivých stromů lze navíc určit, zda by stromy svým pádem mohly zasáhnout do komunikace. Za strom potenciálně nebezpečný lze uvažovat každý vrcholek, jehož výška převyšuje jeho vzdálenost od hranice komunikace. Výběr je možné provést ze stávající bodové vrstvy vrcholů doplněné o atribut jejich vzdálenosti od dopravní infrastruktury výběrovými GIS nástroji umožňujícími práci s atributy v atributových tabulkách, např. nástroj *Select* v software prostředí ArcGIS Pro.



Pokud nedojde při tvorbě normalizovaného modelu povrchu (nDMP) v zájmové lokalitě k odmaskování umělých objektů, tak může při detekci vrcholů stromů dojít i k identifikaci technických objektů komunikace, které jsou vyšší než minimální zadaná výška, např. mýtné brány a vysoké dopravní cedule či stožáry. Na druhou stranu jsou tyto objekty zpravidla součástí obalové zóny komunikace, například výše zmíněný nástroj *Near* jim proto přiřadí nulovou hodnotu. Je vhodné výběr potenciálně nebezpečných stromů dále doplnit o podmínku, aby byla také samotná hodnota vzdálenosti vyšší než nula, čímž dojde k vyřazení technických objektů z výsledné databáze.

Pro optimalizaci výpočtu potenciale rizikových dopadových vzdáleností je dále možné využít v předchozí kapitole vypočtený absolutní rozdíl nadmořské výšky (reprezentován DMR) mezi nejbližším vztažným bodem u komunikace a samotným vrcholkem stromu. Díky započtení vlivu reliéfu (rozdílu nadmořských výšek na kraji komunikace a v místě stromu) do výšky každého konkrétního stromu dochází k ponížení nebo naopak navýšení jeho výšky, která přímo ovlivňuje dopadovou vzdálenost. Tento postup tak může přinášet v řadě případů mnohem relevantnější výsledky než pouhé porovnání absolutní výšky stromu s jeho vzdáleností od dopravní infrastruktury.

#### Vitalita stromu

Pro každý strom byl dále zjištěn i jeho zdravotní stav, a to pomocí přístupu využívajícího spektrálních (vegetačních) indexů. Vegetační indexy tvoří rozsáhlou podkategorii tzv. spektrálních indexů, které se běžně používají jako podklad pro hodnocení zdravotního stavu vegetace. Vegetační indexy jsou nejčastěji založeny na informacích ze senzorů snímajících ve čtyřech rozličných intervalech elektromagnetického spektra, jedná se o modré záření 400–500 nm, zelené 500–600 nm, červené 600–760 nm a blízké infračervené 760–900 nm. V případě profesionálních kamer s větším spektrálním rozlišením lze pracovat i s vegetačními indexy využívajícími další části elektromagnetického spektra, např. pásmo Red Edge (700–750 nm) apod. Většina vegetačních indexů vychází ze stejných spektrálních pásem, proto vzájemně úzce korelují (Klouček et al., 2018). Z tohoto důvodu lze v rámci metodiky doporučit (a) Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) pro RGB kamery a (b) Normovaný Diferenční Vegetační Index (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) pro multispektrální kamery. Oba shodně představují kompromis mezi náročností výpočtu, interpretovatelností dosažených výsledků a zároveň jsou zažitým ukazatelem zdravotního stavu vegetace i mimo DPZ komunitu. Vegetační index NDVI pracuje s pásmem Red (červené pásmo) a NIR (blízké infračervené pásmo). Index VARI je na rozdíl od NDVI kombinací pouze pásem z viditelné části spektra (tedy červené, zelené a modré pásmo). Dvojici doporučených vegetačních indexů, spolu s výpočetními rovnicemi, představuje tabulka níže (Tabulka 2).

Tabulka 2. Seznam potenciálně využitelných indexů pro rozlišení zdravotního stavu stromu. Označení GREEN, RED a NIR představují příslušná spektrální pásma.

Vegetační index	Vzorec
Visible Atmospherically Resistent Index	$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}$
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$

Technicky je hodnocení zdravotního stavu založeno na objektovém přístupu využívající vegetační indexy vypočtené z detailních RGB a multispektrálních UAV snímků v kombinaci s detekovanými vrcholky stromů. Za tímto účelem je vhodné nejprve z identifikovaných stromů (bodové objekty) vytvořit plošné objekty reprezentující jejich koruny, a to například vytvořením obalové zóny (nástroj *Buffer*). V takto definovaných zónách lze následně vypočítat průměrnou hodnotu vegetačního indexu (nástroje *Zonal statistics*) reprezentující zdravotní stav jednotlivých stromů. Exaktní velikost obalové zóny nelze jednoznačně definovat, neboť přímo závisí na průměrné velikost korun stromů v zájmové území. Doporučit lze hodnoty od 0,5–1 m. Oba vegetační indexy nabývají hodnot v intervalu od (-1, 1), kdy hodnoty vyšší než 0 reprezentují vegetační pokryv. Navíc čím je hodnota obou indexu vyšší (blíže hodnotě 1), tak se jedná o zdravější vegetaci (v případě této metodiky strom).

### Suchý strom

Pro určení suchých stromů byla použita objektová klasifikace založená na metodě prahování (*thresholding*), do které vstupují v předchozí kapitole zmíněné průměrné hodnoty předem vypočtených vegetačních indexů (NDVI nebo VARI) v obalových zónách kolem detekovaných vrcholků stromů. Prahování vegetačního indexu lze provést v libovolném GIS či DPZ software. Tento klasifikační přístup vyniká svojí jednoduchostí a snadnou interpretovatelností, avšak je třeba dbát na správné zvolení prahové hodnoty. Metoda je založená na hledání prahové hodnoty či hodnot odlišujících různá stadia zdravotního stavu vegetace. Je tak možné rozlišit individuálně detekované stromy do předem stanového počtu kategorií zdravotního stavu (od zdravých stromů, přes stresované, až po suché stromy). Počet kategorií a jejich klasifikační stupnice (legenda) je přímo závislá na potřebách a zadání konkrétní analýzy. V tomto konkrétním případě bylo zvolena pouze klasifikace do dvou kategorií, a to suchý a zdravý strom. V případě obou kategorií tedy nebylo v tomto metodickém kroku rozlišováno, zda se jedná o (suchý) jehličnatý či listnatý strom. Prahování lze provést manuálně, kdy uživatel ručně najde požadovanou hodnotu situovanou mezi dvěma vrcholy histogramu NDVI snímku, anebo automaticky pomocí implementovaných algoritmů, např. nástrojem *Natural breaks (Jenks)* v ArcGIS Pro apod. Všechny stromy, jejichž hodnota NDVI byla nižší než prahová hodnota, byly zařazeny mezi suché stromy a stromy s vyšší hodnotou NDVI mezi stromy zdravé.

### Základní druhová klasifikace porostu

Na základě znalosti zdravotního stavu byly nejprve vybrány suché stromy. Ostatní (zdravé) stromy dále vstupovaly do procesu klasifikace, který je založený na neřízené objektové klasifikaci pomocí klasifikačního algoritmu ISODATA (*ISODATA Clustering algorithm*). Cílem tohoto metodického kroku je tedy automatická klasifikace surové UAV mozaiky do kategorií listnatý a jehličnatý strom, při které nejsou klasifikovány jeho jednotlivé pixely, ale stejně jako v případě zdravotního stavu (NDVI) obalové zóny vytvořené kolem detekovaných vrcholů stromů (poloměr 1–2 m) s průměrnou hodnotou spektrální odrazivosti každého jednotlivého spektrálního pásma. Výhodou neřízené klasifikace, oproti jiným přístupům, je její nezávislost na vstupních trénovacích datech. Pro zcela automatickou klasifikaci doporučujeme UAV snímek na základě spektrální odezvy jednotlivých stromů rozřadit do 10 spektrálních tříd. Pro každou třídu byla na základě spektrální odezvy následně spočtena hodnota průměrného vegetačního indexu (NDVI/VARI). Těchto 10 tříd bylo poté rozděleno na dvě skupiny po pěti. Pěti třídám s nejvyšší hodnotou vegetačního indexu byl přiřazen příznak *listnatý*. Skupině pěti tříd s nižšími hodnotami vegetačního indexu byl přiřazen příznak *jehličnatý*. V případě, že by se na sledované lokalitě nacházely z naprosté většiny listnaté/jehličnaté stromy, bylo by třeba tuto část algoritmu přenastavit, a to buď změnou počtu klasifikovaných tříd či změnou rozřazení těchto tříd do skupin listnatých/jehličnatých stromů. Nutné je také podotknout, že výsledek klasifikace na základě vegetačního indexu velmi záleží na použitém senzoru, a tak se prahové hodnoty pro jednotlivé skupiny druhů stromů mohou na základě použitého senzoru (RGB, multispektrální) měnit. Další možností, v případě dostupnosti podrobných a aktuálních referenčních dat o výskytu jednotlivých druhů, by bylo nahradit neřízenou klasifikaci klasifikací řízenou (velmi dobrou a robustní volbou je např. algoritmus strojového učení *Random forest*), což s sebou ale přináší nutnost zapojení operátora a výpočet tak nebude zcela automatizovaný.

### Vlastnické určení

Pokud je známá vlastnická struktura, tak je díky přesnému určení polohy každého detekovaného stromu možné GIS nástroji překryvání přiřadit každému stromu konkrétního vlastníka, který je zodpovědný za jeho případnou údržbu. K tomu je zapotřebí do výpočtu přidat mimo vrstvy detekovaných vrcholů stromů i další vstupní vektorová/rastrová data prostorově zobrazující pozemky jednotlivých vlastníků (například od správců dopravní infrastruktury, ČÚZK apod.). Výstupem je tak nový atribut zobrazující pro každý strom dle jeho polohy aktuální vlastnické poměry v zájmovém území.

## 2.4.4 Komplexní multikriteriální atributy

Na základě detekovaných vršků a korun stromů a devíti vypočtených dílčích atributech byly definovány dva souhrnné multikriteriální parametry, které je možné využít pro komplexní monitoring porostů kolem dopravní infrastruktury. Konkrétně se jedná o doporučení pro dendrologický průzkum, jehož cílem je identifikovat potencionálně rizikové stromy, které by bylo z důvodu bezpečnosti vhodné nechat zkontrolovat pozemním průzkumem vyškoleným pracovníkem či dendrologem. A dále se jedná o vymezení korun stromů, které svými větvemi zasahují do průjezdního profilu dané silnice či železnice, které by bylo rovněž vhodné zkontrolovat, případně provést odborný zásah.

### Doporučení pro dendrologický průzkum

Doporučení pro dendrologický průzkum lze označit za souhrnné kritérium určující stromy, které mohou být svými vlastnosti potencionálně nebezpečné pro přilehlou dopravní infrastrukturu, a u kterých je tak vhodné provést pozemní kontrolu. Na základě komunikace se správci dopravní infrastruktury (zejména ŘSD, s. p.) byly z výše uvedených dílčích parametrů vytipovány 3 základní parametry multikriteriální analýzy (pomocí GIS nástrojů pro práci s atributovými tabulkami). Aby byl strom doporučen pro dendrologický průzkum musí splňovat:

- **Suchý strom:** strom musí být označen jako suchý
- **Vzdálenost stromu od dopravní infrastruktury:** výška stromu musí být vyšší než jeho vzdálenost od infrastruktury
- **Úroveň paty stromu:** pata stromu musí ležet nad úrovní komunikací

### Koruna zasahující do průjezdního profilu

Za stromy zasahující do průjezdního profilu jsou považováni takové, jejichž větve přesahují do komunikace a zároveň se ony větve vyskytují níže, než 5 m a mohou tak být potencionálně nebezpečnou dopravní překážkou (Kolařík et al., 2020). Vstupem pro tuto analýzu je vrstva vymezených korun stromů, vrstva představující plochu zájmové dopravní infrastruktury a normalizovaný digitální model povrchu (nDMP). Metodicky je detekce založena na prvotní analýze překrytí korun s vrstvou komunikace, odečtení výškové informace z nDMP pro přesahující částí korun a následném výběru korun s výškou nižší než 5 m.

Zde bychom samozřejmě měli zmínit významný nedostatek optických UAV dat, pomocí nichž není možné vidět pod koruny stromů, takže se teoreticky může stát, že mohou být některé koruny se zakrytými větvemi nižšími než 5 m v detekci opomenuty. Tento nedostatek by šlo vyřešit použitím dat pořízených aktivními UAV senzory (například LiDAR). Jejich využití ale není předmětem řešeného projektu, na jehož základě byla tato metodika vytvořena. Na druhou stranu lehkou modifikací předkládaného řešení by bylo možné velmi efektivně použít vytvořený metodický postup i pro analýzu výškových modelů vytvořených pomocí aktivního senzoru.

#### 2.4.5 Výsledná databáze

Výsledným výstupem metodiky je tak databáze obsahující informaci o lokaci jednotlivých stromů a jejich korun v prostoru, která je doplněná o devět dílčích a dva komplexní atributy. Takto vytvořenou databázi je možné jednoduše dle potřeb uživatele vizualizovat, a to jak do podoby klasické či online interaktivní mapy. Ukázkou možné vizualizace představuje jeden z dalších výstupů projektu „Soubor map detailního monitoringu území podél liniové dopravní infrastruktury pomocí bezpilotních leteckých prostředků“ (CK02000203-V11), který je dostupný na [webu projektu](#).

#### 2.4.6 Software požadavky

Části metodiky zpracování UAV dat a samotnou detekci stromů je možné zpracovat jak v komerčních software balících (např. [ESRI ArcGIS Pro](#), [NV5 Geospatial software ENVI](#), [ERDAS IMAGINE](#), [PCI Geomatics](#) aj.), tak i ve volně dostupných programech ([QGIS](#), [GRASS GIS](#), [ESA SNAP](#), [R](#) aj.). Uvedené software se s výjimkou R příliš neliší grafickým rozhraním a s jejich využitím lze dosáhnout srovnatelných výsledků. Prostředí R vyžaduje pokročilejší znalost tvoření příkazů a jejich skriptování dle pravidel programovacího jazyka. Před využitím jakéhokoliv software je vždy vhodné podrobně prostudovat jeho uživatelskou příručku, a především doporučené parametry využívaných nástrojů.

## 2.5 Praktická ukázka pilotní lokality

Níže je uvedena konkrétní ukázka aplikace navrženého metodického postupu na vybrané zájmové lokalitě spolu se souhrnným schématem vedoucím k popsáním výsledkům. Zájmová oblast se nachází podél silnice 1. třídy číslo 18 mezi jejím 26,8 až 28 km. Jedná se o přímý úsek silnice se zvlněným reliéfem. Nadmořská výška se pohybuje mezi 420 a 500 metry nad mořem s průměrným sklonem 13,4°. Hustota vegetace v zájmovém území je proměnlivá. Zpravidla se jedná o neopadavý vzrostlý les s převahou smrků a borovic. V zájmovém území nedochází k žádnému křížení s zpevněnými jinými komunikacemi (Obrázek 12), viz také pohled z vozidla (Obrázek 13).

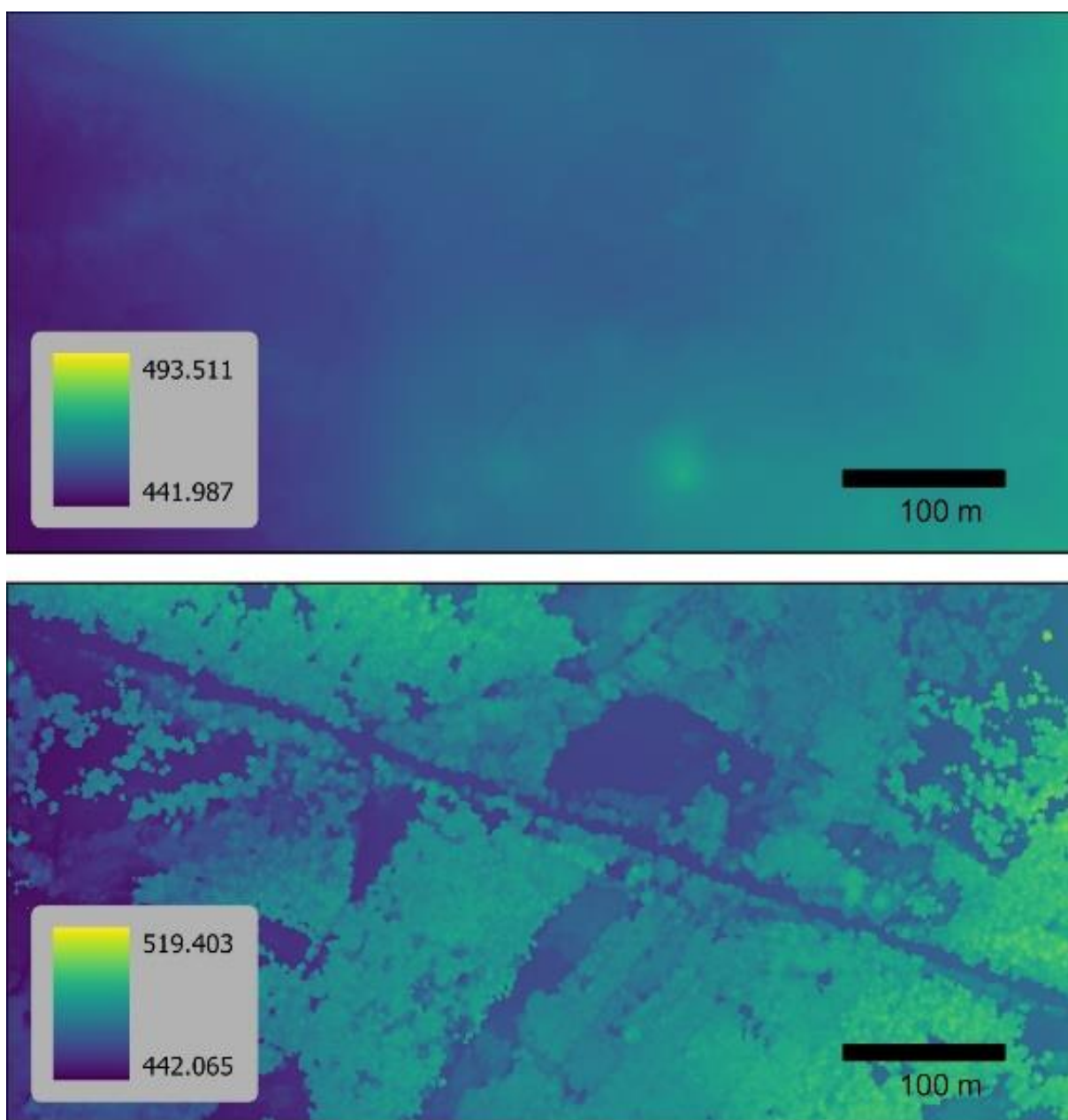


Obrázek 12. Ortofotomozaika pilotní lokality, RGB kompozit.

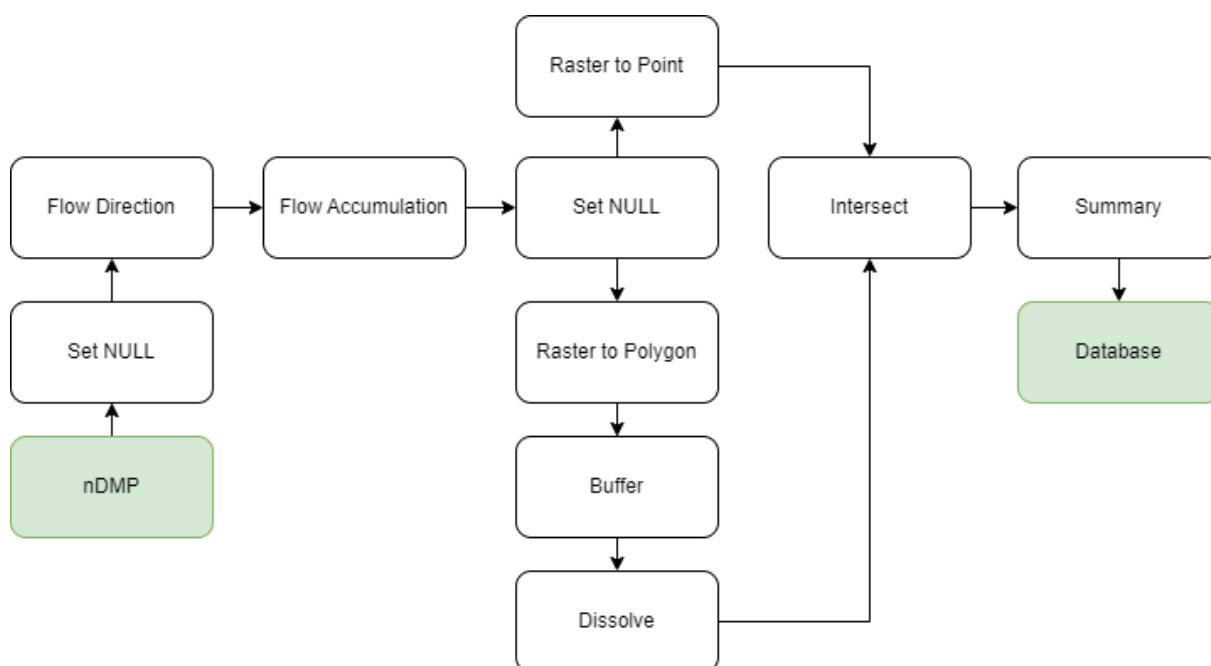


Obrázek 13. Pohled na komunikaci I/18 z vozidla, zdroj: Mapy.cz, Panorama.

Nálet bezpilotním leteckým prostředkem proběhl v létě roku 2022 a 2023. Zájmová lokalita byla nasnímána „běžným“ digitálním fotoaparátem (senseFly S.O.D.A.) ve viditelném spektru (RGB) a multispektrálním pěti kanálovým senzorem (MicaSense RedEdge-MX) nesených v obou případech bezpilotním leteckým prostředkem senseFly eBee X. Ze získaných dat byla fotogrammetrickým zpracováním v software Agisoft Metashape vytvořena ortofotomozaika a digitální modely povrchu a reliéfu (Obrázek 14). Na podkladě digitálních modelů byl následně ověřen uvedený metodický postup. Pro získání samotné výšky objektů byl od digitálního modelu povrchu odečten digitální model reliéfu a tím vznikl normalizovaný digitální model povrchu, který byl dále zpracován v software ArcGIS Pro, viz (Obrázek 15).



Obrázek 14. Výškové modely DMR (nahore) a DMP (dole) zájmové lokality.



Obrázek 15. Workflow použitých funkcí v software ArcGIS Pro.

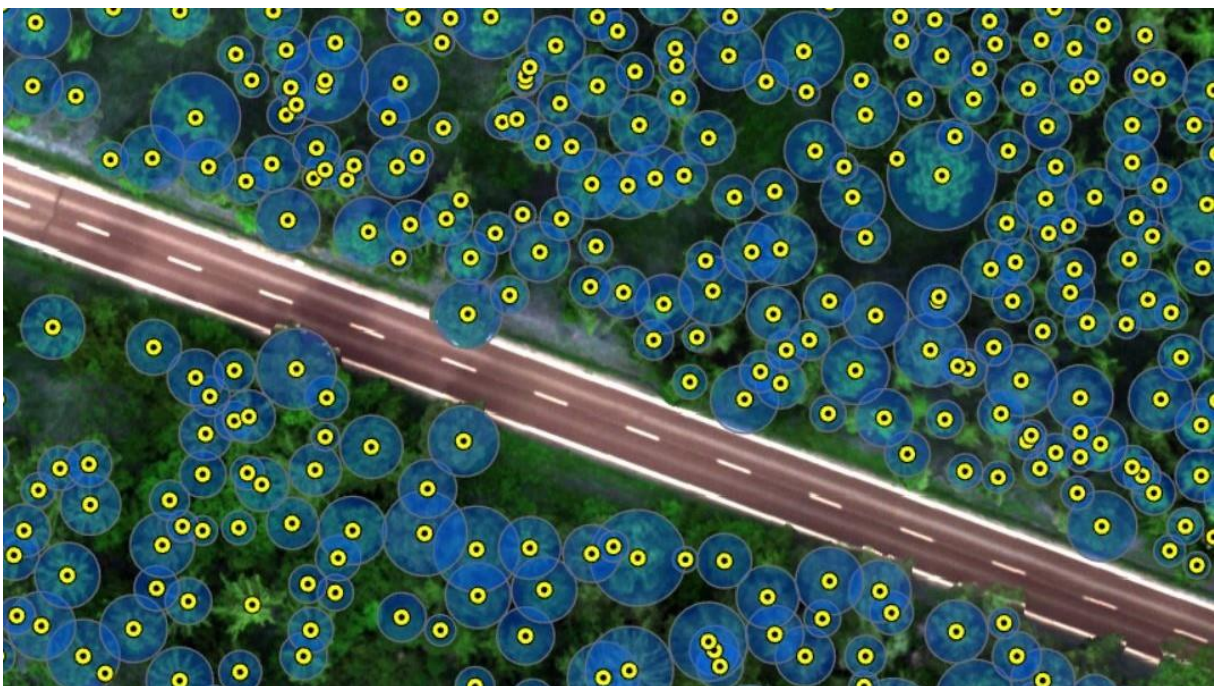
Před samotnou detekcí vrcholů byl normalizovaný model povrchu upraven. Hodnoty nDMP menší nebo rovny 3 byly nahrazeny hodnotou 0, neboť stromy o nižší výšce než 3 metry nejsou dle terénního šetření považované za nebezpečné. Hodnota ovšem záleží na zpracovateli a lokalitě. Poté byl upravený nDMP přenásoben hodnotou (-1) a tím získán model vhodný pro hydrologické analýzy. Funkcemi *Flow direction* a *Flow accumulation* byl vytvořen odtokový model. Buňka s nejvyšší akumulací je považována za vrchol koruny stromu. Nastavení prahové hodnoty podléhá individuálnímu přizpůsobení, nicméně na testovaných lokalitách se osvědčila hodnota 200. Z takto vybraných buněk byly vytvořeny body (*Raster to Point*), kterým byly přiřazeny výšky dle vyhlazeného nDMP (*Extract Values to Points*). Výstupem je databáze stromů s údaji o umístění vrcholku porostu (souřadnice X a Y), která dále vstupuje do následujících kroků. Do této databáze jsou dále doplněny parametry jako vzdálenost od komunikace, sklon, vitalita či typ stromu. Na podkladu ortofotomozaiky je zobrazen výsledek detekčního přístupu vrcholků stromů (Obrázek 16).





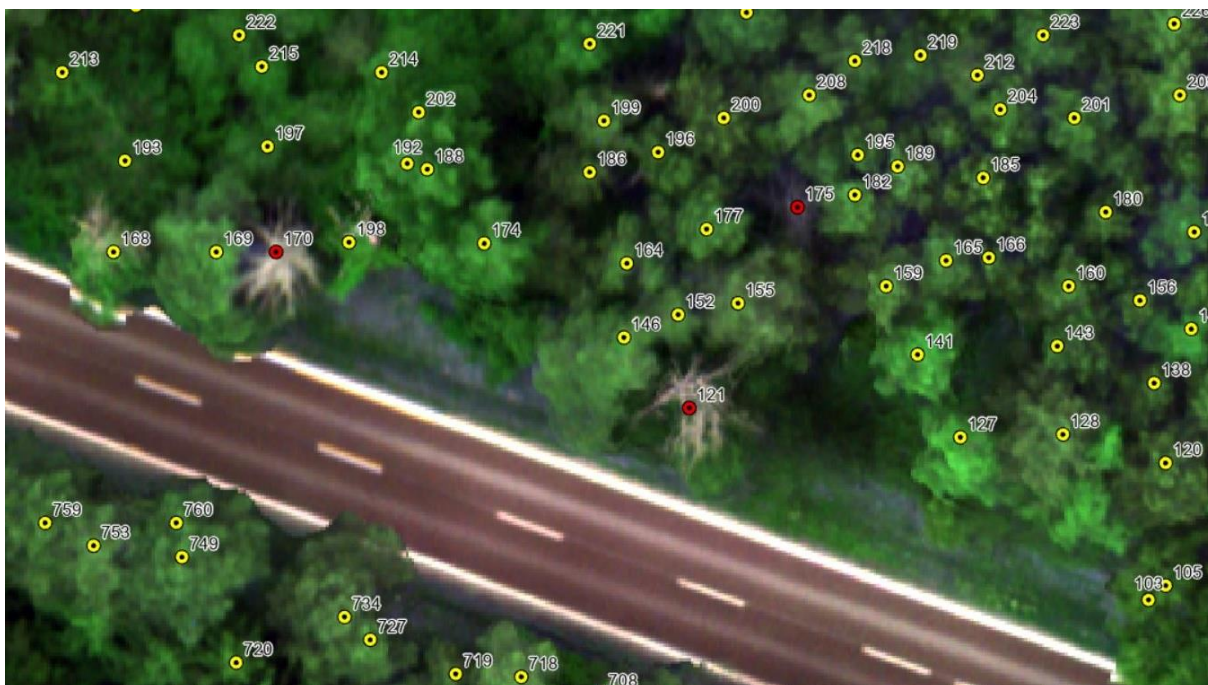
Obrázek 16. Detekované vrcholky stromů na zájmové lokalitě.

Dále byly detekovány koruny jednotlivých stromů. K tomu byla využita další z hydrologických funkcí *Watershed*, která vytváří na základě nDMP povodí. Vzniklá povodí byla přiřazena nejbližším vrcholům stromů. Poté byl jednoduchým přepočtem z plochy zjištěn radius, který se použil jako proměnná pro velikost bufferu koruny. Rozdílná velikost korun odvozená pomocí funkce *Watershed* je k vidění na obrázku níže (Obrázek 17). Vzdálenost jednotlivých stromů od hrany komunikace byla vypočítána pomocí funkce *Near*. Vzdálenost je zaznamenána v databázi pro další vymezení detekce potenciálně nebezpečných stromů založené na porovnání výšky a vzdálenosti od komunikace.



Obrázek 17. Detekované vrcholy a koruny stromů.

Zdravotní stav vegetace byl v zájmovém území hodnocen na základě vegetačního indexu NDVI (v případě RGB snímků je možné využít například index VARI). Pro každý strom byla vypočítána průměrná hodnota indexu v oblasti jeho koruny. Na základě vypočtených hodnot pak byly stromy pomocí prahování klasifikovány do dvou kategorií – na živé a suché. Suché stromy je možno vidět zvýrazněné červenou barvou, viz Obrázek 18.



Obrázek 18. Klasifikace suchých (červeně) a zdravých stromů (žlutě) Popisek odpovídá unikátnímu identifikátoru stromu OBJECTID.

Prezentovaná ukázka dokládá využitelnost předkládané metodiky pro mapování porostu i pro detekci stromů potenciálně nebezpečných pro provoz dopravní infrastruktury. Náhled do databáze detekovaných stromů a odvozených parametrů demonstruje Tabulka 3. Níže je uveden popis atributů v ukázkové databázi:

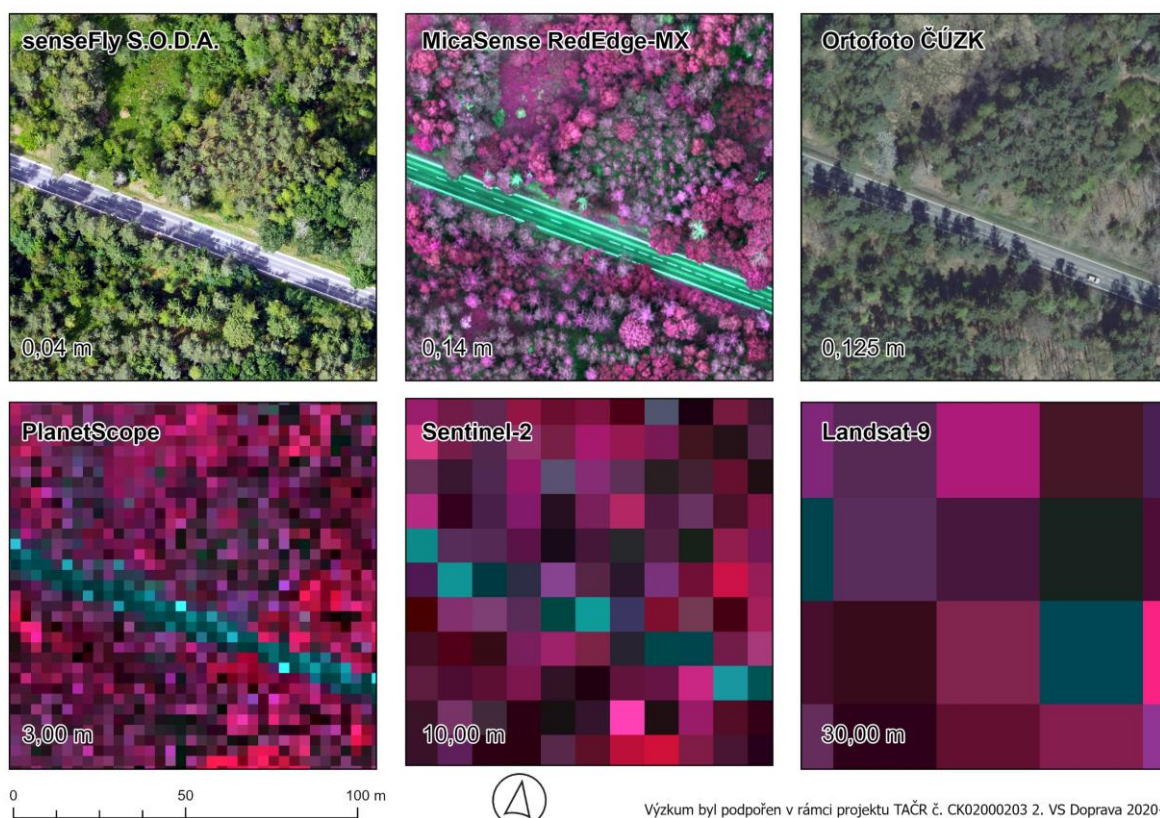
- OBJECTID – unikátní identifikátor detekovaného stromu,
- POZICE – kartézské souřadnice stromu ve formátu XY (m; S-JTSK Krovak East North),
- VÝŠKA – absolutní vzdálenost terénu a detekovaného vrcholu stromu v metrech,
- VZDÁLENOST – absolutní vzdálenost stromu a hranice komunikace v metrech,
- SKLON – sklon terénu mezi stromem a komunikací ve stupních,
- SVAH – úroveň terénu u paty stromu vůči komunikaci, viz také Obrázek 11,
- VLASTNÍK – logická hodnota, strom ve vymezeném polygonu vlastníka (ano, ne),
- KORUNA – logická hodnota, je dotčen průjezdní profil (0, 1), viz také kapitola 2.4.4,
- VITALITA – hodnota daného vegetačního indexu (0-1),
- DRUH – základní druhová klasifikace stromu (jehličnatý, listnatý, suchý),
- SUCHÝ – logická hodnota, strom je detekován jako suchý (0, 1),
- DENDRO – logická hodnota, strom naplňuje podmínky pro dendrologický průzkumu,
- KILOMETR – relativní pozice stromu vůči lokálnímu systému komunikace.

OBJECTID	POZICE	VÝŠKA	VZDÁLENOST	SKLON	SVAH	VLASTNÍK	KORUNA	VITALITA	DRUH	SUCHÝ	DENDRO	KILOMETR
165	-766101,69 -1083840,28	20,2	14,5	1,1	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,62
166	-766099,71 -1083840,15	19,2	15,3	1,1	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,62
167	-766080,64 -1083840,02	20,4	22,1	1,6	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,64
168	-766140,10 -1083839,89	9,9	1,6	3,9	POD	ANO	0	0,6	JEH	0	0	27,58
169	-766135,36 -1083839,89	16,7	3,2	4,0	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,59
170	-766132,60 -1083839,89	16,0	4,2	0,3	POD	NE	0	0,2	SUCHÝ	1	0	27,59
171	-766088,93 -1083839,89	20,8	19,3	1,5	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,63
172	-766084,06 -1083839,89	19,9	21,0	1,9	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,63
173	-766037,50 -1083839,89	10,5	37,3	0,7	POD	NE	0	0,5	SUCHÝ	1	0	27,68
174	-766123,00 -1083839,49	20,7	7,8	0,8	POD	NE	0	0,7	LIST	0	0	27,60
175	-766108,54 -1083837,82	16,9	14,4	2,3	POD	NE	0	0,2	SUCHÝ	1	0	27,61
176	-766090,24 -1083838,96	21,4	19,7	1,6	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,63
177	-766112,74 -1083838,83	20,1	12,0	2,4	POD	NE	0	0,7	JEH	0	0	27,61
178	-766074,59 -1083838,70	17,8	25,4	1,7	POD	NE	0	0,7	LIST	0	0	27,64
179	-766078,14 -1083838,44	20,3	24,4	1,6	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,64
180	-766094,32 -1083838,04	19,4	19,1	1,3	POD	NE	0	0,6	JEH	0	0	27,62

Tabulka 3. Ukázka výstupní databáze detekovaných stromů a jejich parametrů.

### 3. Srovnání novosti postupů

Předkládaná metodika kombinuje oblasti GIS, DPZ a lesnictví čímž umožňuje pomocí jejich spojení dosáhnout efektivního monitoringu porostu podél dopravní infrastruktury. Metodika založená na využití bezpilotních systémů přináší inovativní řešení, které umožňuje celý proces automatizovat a aplikovat ho komplexně na větší územní celky. Předností využití metodického postupu je především aplikace moderních postupů a zařízení v podobě bezpilotních leteckých prostředků, které se vyznačují rychlostí získání dat na rozsáhlé ploše území, volitelností časového rozlišení a v neposlední řadě také velmi vysokým prostorovým rozlišením (Obrázek 19), které umožňuje individuální detekci jednotlivých vrcholků stromů a jejich korun (Obrázek 9).



Obrázek 19. Ukázka rozdílného prostorového rozlišení běžných DPZ dat použitelných pro monitoring porostů podél dopravní infrastruktury.

Vědecká literatura zahrnuje studie zaměřené na využití bezpilotních leteckých prostředků v různých lesnických aplikacích, a to jak na základě dat zpracovaných pomocí kvazi-fotogrammetrie (SfM) s využitím běžných i profesionálních digitálních kamer (Lisein et al., 2013; Onishi & Ise, 2021; Zarco-Tejada et al., 2014), tak dat pořízených metodou laserového skenování (Lin et al., 2011; Rodríguez-Puerta et al., 2022; Wallace et al., 2014) či kombinací a porovnáním obou přístupů (Guimarães et al., 2020; Panagiotidis et al., 2016; Wallace et al., 2016). Další zajímavou studii představuje práce Ganz et al. (2019), která porovnává fotogrammetrickou metodu a metodu laserového skenování na základě dat získaných z bezpilotních leteckých prostředků a letadel společně s měřením v terénu, které bylo jak nepřímé (laserovým dálkoměrem), tak i přímé po skácení stromu pomocí přiložení pásma na kmenu stromů. Nedávno publikované studie potvrzují využitelnost bezpilotních prostředků pro detekci vrcholů vegetace, výpočet její výšky, identifikaci koruny a dalších odvozených atributů (Klouček et al., 2022; Komárek et al., 2022; Surový & Kuželka, 2019).

Metodický postup představuje souhrnný prakticky aplikovatelný postup pro aktuální monitoring a opakovaná mapování porostu podél dopravní infrastruktury. Předložená metodika navazuje na výstup projektu Technologické Agentury České republiky (TA ČR) v programu Zéta 2 (TJ02000283 – Bezpečnostní mapování porostu podél dopravní infrastruktury). Současná metodika je však významně rozšířena o odvozování konkrétních parametrů, které vzešly po diskusích s aplikačními garanty projektu (Ředitelstvím silnic a dálnic, Správou železnic) jako v praxi potřebné. Díky četným konzultacím s aplikačními garanty tak vznikla metodika, která má vysoký potenciál uplatnění v praxi. Dosažené výsledky a výstupy byly představeny aplikačním garantům a jejich zpětná vazba je reflektována v předkládaném dokumentu. Popsaný metodický postup je tak schopen dosáhnout dostatečně přesných a v praxi využitelných výsledků při detekci stromů a odvození jejich atributů v okolí dopravní infrastruktury.

#### 4. Popis uplatnění metodiky

Metodický postup detekce stromů a určení jejich odvozených atributů byl průběžně konzultován s aplikačními garanty projektu (ŘSD, SŽ). Vyvozené atributy stromů vznikly též jako důsledek potřeby ze strany správců komunikací, proto má předložený metodický postup vysoký potenciál praktického uplatnění. Důkazem toho je aktivní zájem aplikačních garantů o výstupy projektu a jejich další požadavky na úpravy a doplnění současných metodických postupů a dalších výstupů projektu. Plánována je tak pokračující spolupráce stran odvozování dalších pro praxi uplatnitelných atributů i řešení pro automatizaci navržených postupů, snižování náročnosti na výpočetní výkon apod.

Limitem využití bezpilotních leteckých prostředků je v současnosti dle společné evropské legislativy mj. nutnost létání v režimu VLOS (nepřetržitý vizuální kontakt) a nemožnost přelétávat osoby nezapojené do provozu. To limituje praktickou implementaci postupů v širším měřítku na delších úsecích liniové dopravní infrastruktury. Existují však mechanismy, jak provozovat bezpilotní systém v režimu BVLOS (tedy mimo vizuální kontakt) a legislativa počítá v blízké budoucnosti se zavedením nového typu vzdušného prostoru (tzv. U-space) a provozu bezpilotních letadel v certifikované kategorii, viz také kapitola 2.1 metodiky a legislativní dokumenty (EU) [2019/945](#) a především (EU) [2019/947](#).

Popsaná metodika detekce stromů a odvození jejich atributů je určena zejména pro vlastníky a správce komunikací, resp. liniové dopravní infrastruktury. Je vhodná pro získávání mj. informací o výšce stromu, velikosti jeho koruny, vzdálenosti od komunikace, svahu okolního terénu, zjištění druhu a zdravotního stavu na rozsáhlých územních celcích, a to jak jednorázově, tak opakovaně. Uvedený metodický postup je využitelný i pro další obdobné aplikace, např. u mapování vegetace u technické infrastruktury (typicky u přenosové a distribuční soustavy) apod. Je využitelný i za hranicemi a je možné ho prakticky aplikovat i v ostatních zemích s lokálním přizpůsobením dle místní vegetace.

V rámci projektu TAČR DOPRAVA 2020+ č. CK02000203 – Monitoring a vyhodnocení rizikových jevů v okolí dopravní infrastruktury s využitím DPZ je navržena metodika certifikovaná oprávněným orgánem (CK02000203-V12) použita jako podklad pro tvorbu Specializovaných map s odborným obsahem (CK02000203-V11), kde jsou demonstrovány výsledky z pěti pilotních lokalit pro každého aplikačního garanta (tj. 5 silnic I. třídy/dálnice a 5 železnic).

## 5. Ekonomické aspekty

Předložený metodický postup umožní vlastníkům či správcům komunikací efektivně mapovat porost podél dopravní infrastruktury a v případě zájmu detekovat potenciálně nebezpečnou vegetaci. Na základě zjištění zdravotního stavu, výšek jednotlivých stromů a jejich vzdálenosti od komunikací pomocí bezpilotních leteckých prostředků nabízí metodika rychlý a efektivní způsob získání informací o stavu porostu a poskytuje údaje nutné pro jeho pravidelný monitoring. Současně umožňuje získat podrobných informací pro vypisování potenciálních výběrových řízení za účelem údržby porostu.

Finanční náročnost náletu bezpilotním systémem s náležitým senzorem závisí na velikosti zájmového území. Při rozloze lokality od 1 do 10 ha se obecně pohybuje cena v rozmezí 10 až 30 tis. Kč. Rozlohu je v případě liniových staveb možné stanovit dle délky zájmového úseku a předpokládané šířky záběru senzoru, nicméně je vhodné počítat s navýšením vypočtené plochy z důvodu nutnosti dostatečného příčného i podélného překryvu snímků, viz kapitola 2.1. Uvedená cena je vždy předmětem tržní nabídky a obvykle zahrnuje zaměření vlíčovacích bodů geodetickým přístrojem v okolí předmětu zájmu, a také zpracování zaznamenaných snímků do podoby ortofotomozaiky a digitálních modelů povrchu, případně terénu. V případě nutnosti či zájmu lze použít již vyhotovené digitální modely reliéfu a povrchu například prostřednictvím zpracovaných a volně dostupných datových sad od Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního.

Český úřad zeměměřičský a katastrální od 1. 7. 2023 poskytuje některá prostorová data zdarma v rámci takzvaných [otevřených dat](#). K dispozici je mimo jiné lidarový Digitální model reliéfu 5. generace a Digitální model povrchu 1. generace. Tato data mají relativně dostačující rozlišení potřebné pro monitoring vegetace, avšak stáří těchto produktů je 10 až 14 let. Tato skutečnost tak vnáší do výpočtu určitou míru odlišnosti oproti aktuálnímu stavu vegetace na zájmové lokalitě.

Alternativním řešením je pořízení vlastních dat včetně zakoupení bezpilotního leteckého prostředku a software na zpracování pořízených snímků. Zde můžeme uvažovat o ceně začínající na 20-60 tisíc Kč v závislosti na generaci a výkonu stroje. Předpoklad snímání zemského povrchu v okem neviditelném spektru znamená znatelné zvýšení ceny asi o 100-200 tisíc Kč. Běžně používaný program na zpracování leteckých fotografií, vytvoření digitálního modelu terénu či multispektrálního snímku stojí od 6 tisíc a výše za jeden měsíc používání. Možností může být půjčení stroje, kdy se ceny za půjčení odpovídajícího dronu pohybují kolem 5 tisíc Kč za den. Zálohy jsou však v řádech desítek tisíc a uživatel se nevyhne pořízení si programu na zpracování snímků. Při plánování tohoto řešení je rovněž důležité vzít v úvahu zabezpečení rizik. Pojištění dronů a technologie proti možným škodám nebo ztrátám představuje další, nezanedbatelnou nákladovou položku. Výše uvedená alternativa se soustředí čistě na technologii pořízení snímků a nezabývá se zaměřením vlíčovacích bodů v terénu. K přesnému stanovení těchto bodů je nezbytné další geodetické vybavení a přístroje v hodnotě stovek tisíc korun.

Pokud bychom hledali způsob, který nevyžaduje využití bezpilotní techniky, lze pro oblast zájmu zadat podrobný dendrologický průzkum. Cena pracovníka se znalostmi hodnocení stavu vegetace podle pravidel dendrologického průzkumu odpovídá částce začínající na 200 Kč za strom v přehledném a jednoduchém terénu. Se složitým průběhem terénu, neprostupností vegetace a množstvím stromů cena za jednotku strmě roste. Pro přesná data by však celé území mělo být geodeticky zaměřeno a měl by být znám polohopis a výškopis. V tomto případě je možné výslednou částku vynásobit dvěma. Nevýhodou tohoto způsobu hodnocení je obrovská pracnost a dlouhá časová náročnost procesu získávání informací v území. Těžko se také zajišťuje zjišťování a porovnávání změn v čase.

Nejefektivnější a nejekonomičtější variantou je tak nechat si celé území naskenovat externí odbornou firmou, která zajistí zpracování dat včetně vyhodnocení možných rizikových stromů. Firmy cenové kalkulace nezveřejňují, avšak jeden den leteckých prací a zpracování dat stojí zpravidla 15-40 tis. Kč. Za zmíněnou časovou jednotku lze nalétnout nižší desítky hektarů lokality. Výhodou tohoto řešení je, že pořizovatel hodnocení nemusí řešit software na zpracování snímků, pojištění strojů a odpovědnosti. Dále není potřeba odborných znalostí na programování bezpilotního leteckého prostředku, jeho ovládání a zpracování pořízených snímků. Profesionální firmy často také disponují geodetickými prostředky k zaměření vřícovacích bodů a zajištění odpovídající přesnosti výsledků. Jedná se však pouze o pořízení obrazových dat a vytvoření ortofotomazaik, digitálních modelů povrchu a terénu, které jsou pouze bezpodmínečně nutným datovým vstupem pro provedení samotného monitoringu vegetace.



## 6. Budoucnost UAV v monitoringu

S technologickým vývojem je nyní již možné uvažovat o brzkém nasazení autonomních dronů pro nejrůznější kritické, ale i další např. environmentální aplikace. Autonomní dron je takový, jehož řízení a chování během letu má na starost jeho vlastní řídicí jednotka, resp. soubor řídicích prvků na zemi i ve vzduchu. Provoz takových strojů nově připouští i společná evropská legislativa, která též přichází se zavedením nového typu vzdušného prostoru, tzv. U-space. Ač by se mohl zdát provoz autonomních dronů jako vzdálená budoucnost, již nyní je na trhu k dispozici nejedno řešení. Nejznámějším bude pravděpodobně to, od čínského výrobce DJI, tedy současně známý dron T30 s dokovací stanicí. Princip takového dronu spočívá v umístění dokovací stanice na trvalou plochu, připojení k síti (napájení i vysokorychlostní data), naprogramování předpokládaného chování a zahájení autonomního provozu. DJI T30 Dock má vlastní meteorologickou stanici, která slouží k vyhodnocování srážkových, a především povětrnostních podmínek. Chování stroje je teoreticky nezávislé na operátorovi. Jeho vzlet, let i přistání by měly regulovat nejrůznější čidla, a především sada přeprogramovaných algoritmů. Tyto systémy by měly vykonat samostatně zadaný úkol, ale také reagovat na aktuální provozně-technické podmínky v zájmovém území včetně náhlých potencionálních rizik na zemi i ve vzduchu.

Dalším krokem blízké budoucnosti je implementace učících se navigačních algoritmů včetně těch s umělou inteligencí (AI). Vhodnost a potřebnost těchto nástrojů je s přibývajícím počtem dronů nutností i s ohledem na předpokládaný provoz ve zmíněném U-space vzdušném prostoru. Principem takových navigací je založen na možnosti vyhodnocování překážek a rizik v reálném čase. Bylo by tak možné provozovat množství dronů současně pro různé úlohy, aniž by došlo k omezení letového provozu či dokonce kolizi. Umělá inteligence by měla sloužit k optimalizaci provozu a jeho vyšší efektivitě. Je tu však samozřejmě ono diskutované etické a morální hledisko. V současnosti se počítá se zabudovanými opatřeními, které by vždy umožnily případný zásah operátora mimo AI.

Ruku v ruce s chytrou navigací je na stole i otázka vyhodnocování sbíraných dat v blízkém reálném čase. Jisté pokusy tu již v současnosti jsou, nicméně žádné řešení není zatím natolik spolehlivé, jako zpracování dat operátorem po sběru dat. Vyhodnocování v reálném čase by umožnilo získávání informací o sledovaném fenoménu prakticky ihned a byl by tak umožněn i okamžitý akutní zásah (např. aplikace nějaké látky). Též je vhodné zmínit implementaci umělé inteligence i do algoritmů zpracování a vyhodnocování dat. To by mělo za následek (pravděpodobně) vyšší rychlost i přesnost dodaných informací uživateli.

## 7. Seznam použité literatury

### Odborná literatura

- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., & Matese, A. (2021a). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicle Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part I: A General Framework. *Forests*, 12(3), 327. <https://doi.org/10.3390/f12030327>
- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., & Matese, A. (2021b). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests*, 12(4), 397. <https://doi.org/10.3390/f12040397>
- Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., & Yan, Y. (2018). UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>
- Ganz, S., Käber, Y., & Adler, P. (2019). Measuring tree height with remote sensing—a comparison of photogrammetric and LiDAR data with different field measurements. *Forests*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/f10080694>
- Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Forestry remote sensing from unmanned aerial vehicles: A review focusing on the data, processing and potentialities. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12061046>
- Klouček, T., Klápšte, P., Marešová, J., & Komárek, J. (2022). UAV-Borne Imagery Can Supplement Airborne Lidar in the Precise Description of Dynamically Changing Shrubland Woody Vegetation. *Remote Sensing*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/rs14092287>
- Kolařík, J., Grábner, J., & Kozák, O. (2020). *Kontroly stavu stromů při prohlídkách silničních komunikací* (1. vydání). Základní organizace Českého svazu ochránců přírody Arboristická akademie.
- Komárek, J., Klápště, P., Hrach, K., & Klouček, T. (2022). The Potential of Widespread UAV Cameras in the Identification of Conifers and the Delineation of Their Crowns. *Forests*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/f13050710>
- Lin, Y., Hyypä, J., & Jaakkola, A. (2011). Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3), 426–430. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2079913>
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4(4), 922–944. <https://doi.org/10.3390/f4040922>
- Lu, H., Fan, T., Ghimire, P., & Deng, L. (2020). Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/RS12162542>

- Matase, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. *Remote Sensing*, 7(3), 2971–2990. <https://doi.org/10.3390/rs70302971>
- Moudrý, V., Urban, R., Štroner, M., Komárek, J., Brouček, J., & Prošek, J. (2019). Comparison of a commercial and home-assembled fixed-wing UAV for terrain mapping of a post-mining site under leaf-off conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2), 555–572. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1516311>
- Onishi, M., & Ise, T. (2021). Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79653-9>
- Panagiotidis, D., Surový, P., & Kuželka, K. (2016). Accuracy of Structure from Motion models in comparison with terrestrial laser scanner for the analysis of DBH and height influence on error behaviour. *Journal of Forest Science*, 62(8), 357–365. <https://doi.org/10.17221/92/2015-JFS>
- Rodríguez-Puerta, F., Gómez-García, E., Martín-García, S., Pérez-Rodríguez, F., & Prada, E. (2022). UAV-Based LiDAR Scanning for Individual Tree Detection and Height Measurement in Young Forest Permanent Trials. *Remote Sensing*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/rs14010170>
- Surový, P., & Kuželka, K. (2019). Acquisition of Forest Attributes for Decision Support at the Forest Enterprise Level Using Remote-Sensing Techniques—A Review. *Forests*, 10(3), 273. <https://doi.org/10.3390/f10030273>
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- Wallace, L., Musk, R., & Lucieer, A. (2014). An assessment of the repeatability of automatic forest inventory metrics derived from UAV-borne laser scanning data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11), 7160–7169. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2308208>
- Yao, H., Qin, R., & Chen, X. (2019). Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications - A review. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs11121443>
- Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>

## **Legislativa**

Zákon č. 13/1997 Sb. Zákon o pozemních komunikacích

Zákon č. 431/2022 Sb. Zákon o civilním letectví, kterým se mění zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů, ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony

Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1139 ze dne 4. července 2018 o společných pravidlech v oblasti civilního letectví a o zřízení Agentury Evropské unie pro bezpečnost letectví, kterým se mění nařízení (ES) č. 2111/2005, (ES) č. 1008/2008, (EU) č. 996/2010, (EU) č. 376/2014 a směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/30/EU a 2014/53/EU a kterým se zrušuje nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 552/2004 a (ES) č. 216/2008 a nařízení Rady (EHS) č. 3922/91

Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945 ze dne 12. března 2019 o bezpilotních systémech a o provozovatelích bezpilotních systémů ze třetích zemí

Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel

## 8. Seznam publikací předcházejících metodice

Komárek, J., Klouček, T., Holleschová, I., Beková, A. & Barták, V. (2020): Mapování porostu podél dopravní infrastruktury. Certifikovaná metodika. Praha. 30 s.

Komárek, J., Klápště, P., Hrach, K., & Klouček, T. (2022). The Potential of Widespread UAV Cameras in the Identification of Conifers and the Delineation of Their Crowns. *Forests*, 13(5), 710.

Klouček, T., Klápště, P., Marešová, J., & Komárek, J. (2022). UAV-Borne Imagery Can Supplement Airborne Lidar in the Precise Description of Dynamically Changing Shrubland Woody Vegetation. *Remote Sensing*, 14(9), 2287.

Klouček, T., Komárek, J., Jaroš, J., Lagner, O., Klápště, P. (2023): Bezpilotní letecké prostředky: efektivní nástroj pro pasportizaci porostů v okolí dopravní infrastruktury. GIS Esri, Praha.

Klouček, T., Komárek, J., Jaroš, J., Lagner, O., Klápště, P. (2023): Drony v praxi: detailní monitoring porostů podél dopravní infrastruktury. Copernicus Fórum, Brno.

Komárek, J., Lagner, O. & Klouček, T. (2024): UAV leaf-on, leaf-off and ALS-aided tree height: A case of roads vicinity. *Urban Forestry & Urban Greening* (in press).

## Seznam obrázků

Obrázek 1. Znázornění digitálních modelů povrchu a reliéfu. ....	14
Obrázek 2. Schéma představující jednotlivé rámcové kroky metodického postupu pro monitoring porostů. ....	16
Obrázek 3. Znázornění principu určení směru toku (Flow direction) a akumulární hodnoty (Flow accumulation), zdroj: <a href="https://pro.arcgis.com">https://pro.arcgis.com</a> . ....	17
Obrázek 4. Podrobný vzorec pro invertování normovaného digitálního modelu povrchu, kde parametr „RasterLayer“ představuje rastr nDSM a parametry Max_value/Min_value jeho maximální/minimální ....	18
Obrázek 5. Normalizovaný digitální model povrchu (nDMP) před a po inverzi. ....	18
Obrázek 6. Detail akumulárního rastru: zelené části představují nízké akumulární hodnoty na krajích větví, vrcholek je reprezentován vysokou hodnotou akumulace ve středu koruny. ....	19
Obrázek 7. UAV ortofotomozaika s výslednou bodovou vrstvou vrcholků stromů. ....	20
Obrázek 8. Vymezení reálných korun stromů. ....	21
Obrázek 9. Vymezení korun stromů kruhem. ....	21
Obrázek 10. Znázornění rozdílu nadmořské výšky reliéfu komunikace a okolního terénu. ....	24
Obrázek 11. Ortofotomozaika pilotní lokality, RGB kompozit. ....	30
Obrázek 12. Pohled na komunikaci I/18 z vozidla, zdroj: Mapy.cz, Panorama. ....	30
Obrázek 13. Výškový model DMR (nahore) a DMP (dole) zájmové lokality. ....	31
Obrázek 14. Workflow použitých funkcí v software ArcGIS Pro. ....	32
Obrázek 15. Detekované vrcholky stromů na zájmové lokalitě. ....	33
Obrázek 16. Detekované vrcholy a koruny stromů. ....	33
Obrázek 17. Klasifikace suchých (červeně) a zdravých stromů (žlutě). ....	34
Obrázek 18. Ukázka rozdílného prostorového rozlišení běžných DPZ dat použitelných pro monitoring porostů podél dopravní infrastruktury. ....	36

## Seznam tabulek

Tabulka 1. Porovnání parametrů vybraných UAV pasivních senzorů. ....	13
Tabulka 2. Seznam potenciálně využitelných indexů pro rozlišení zdravotního stavu stromu. Označení GREEN, RED a NIR představují příslušná spektrální pásma. ....	26
Tabulka 3. Ukázka výstupní databáze detekovaných stromů a jejich parametrů. ....	35

## **Detailní monitoring porostů podél dopravní infrastruktury pomocí bezpilotních leteckých prostředků**

Certifikovaná metodika

Autoři: Tomáš Klouček, Jan Komárek, Jakub Jaroš, Ondřej Lagner, Petr Klápště, Jiří Rous, Kristýna Štěpánová, Barbora Maletínská

Vydavatel: Česká zemědělská univerzita v Praze

Adresa vydavatele: Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, Praha – Suchdol, 165 00

Počet stran: 48

Pořadí vydání: 1.

Rok vydání: 2024

Typ publikace: monografie – metodika

ISBN 978-80-213-3368-0 (tištěná verze)

ISBN 978-80-213-3369-7 (elektronická verze)