

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Marek Žaloudek

**VYUŽITÍ LETECKÉHO PRŮZKUMU PRO ÚČELY ANALÝZY
LÁTEK OBSAŽENÝCH V PŮDĚ**

Diplomová práce

2022



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Marek Žaloudek

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterské –PL– Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Využití leteckého průzkumu pro účely analýzy látek
obsažených v půdě**

Název tématu (anglicky): **Use of Aerial Survey for the Needs of the Soil
Substances Analysis**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je experimentálně určit optimální světelné podmínky pro letecké průzkumy UAS, vybaveným třemi typy multispektrálních kamer (v pásmu blízkého infračerveného a red-edge spektra), se zaměřením na analýzu kontaminace půdy komunálních skládek.
- Vypracujte analýzu současného stavu možností měření a kontroly v oblasti skládek tuhého komunálního odpadu. Analyzujte způsoby a metody leteckého průzkumu využívané bezpilotními systémy v kombinaci se spektrálními kamerami. Určete látky vyhodnocované leteckým průzkumem s konkrétními typy kamer.
- Navrhněte a realizujte experimentální lety nad oblastí při různých světelných podmínkách během jasného dne.
- Analyzujte snímky a letová data, vzájemně porovnejte provedené lety a zaznamenaná měření. Určete optimální světelné podmínky pro vykonání leteckého průzkumu se spektrální kamerou pracující v daném spektru.
- Formulujte závěry práce.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Watts, A. C.(2010). Small unmanned aircraft systems for low-altitude aerial surveys. The Journal of Wildlife Management, 74(7), 1614-1619.
Ben-Dor, E. (2009). Using imaging spectroscopy to study soil properties. Remote sensing of environment, 113, S38-S55.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Kušmírek**

Datum zadání diplomové práce: **16. září 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **16. května 2022**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu Ústav letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Marek Žaloudek
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....16. září 2021



Abstrakt

Diplomová práce řeší využití bezpilotních prostředků a spektrálních kamer k analýze kontaminace půdy a poskytuje komplexní pohled na vybranou oblast. Komerčně klíčovým faktorem využitelnosti takto vybavených UAV v oblasti je zvyšování efektivity samotného průzkumu při zachování co nejvyšší přesnosti výstupů spektrálních kamer. Práce řeší využití leteckého průzkumu pro spektrální analýzu látek v půdě, a to konkrétně v oblasti skládky tuhého komunálního odpadu, přičemž si klade za cíl experimentálně určit optimální denní světelné podmínky pro co nejpřesnější zachycení reality. V práci jsou analyzovány metodiky současného bezpilotního leteckého průzkumu a zároveň popsáno využití při praktickém měření na konkrétní skládce. Výsledné snímky jsou dále analyzovány a porovnávány v rozličných denních hodinách a světelných podmínkách. Na základě naměřených dat je stanovena optimální světelnost pro vybavené multispektrální kamery.

Klíčová slova

Bezpilotní prostředek, UAV, UAS, multispektrální kamera, světelné podmínky, skládkování odpadu



Abstract

The diploma thesis deal with the use of drones with multispectral cameras to analyze soil contamination and provides a comprehensive view of the selected area. A commercially key factor in the usability of such equipped UAVs in this area is to increase the efficiency of the survey itself while maintaining the highest possible accuracy of multispectral camera outputs. The work deal with the use of aerial research for spectral analysis of substances in the soil, specifically in the field of municipal solid waste landfill, with the aim of experimentally determining the optimal daylight conditions for the most accurate capture of reality. The work analyzes the methodologies of current unmanned aerial reconnaissance and also describes the use in practical measurements at a specific landfill. The resulting images are further analyzed and compared at different times of day and lighting conditions. Based on the measured data, the optimal brightness for equipped multispectral cameras is determined.

Key words

Unmanned aerial vehicle, UAV, UAS, multispectral camera, lighting conditions, landfill



Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomohli s vytvořením této diplomové práce. Zvláště bych rád poděkoval Ing. Stanislavu Kušmírkovi za poskytnutí odborných konzultací a vedení práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Danielu Urbanovi za podnětné konzultace. V další řadě bych chtěl poděkovat společnosti DronPro za spolupráci, konzultace a poskytnutí techniky pro měření. V neposlední řadě patří velké poděkování mé rodině za morální a materiální podporu během celého mého studia.

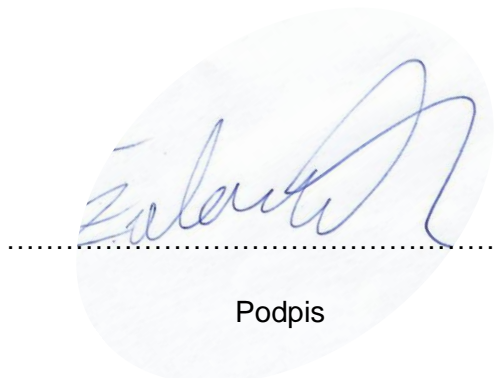


Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Využití leteckého průzkumu pro účely analýzy látek obsažených v půdě vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 12. května 2022



Podpis



Obsah

Seznam použitých zkratk	7
Úvod	9
1 Analýza současného stavu	10
1.1 Skládkování komunálního odpadu	10
1.1.1 Způsob skládkování komunálního odpadu	11
1.1.2 Rekultivace skládky	13
1.1.3 Typy skládek dle zabezpečení	14
1.1.4 Etapy skládek	14
1.1.5 Vliv na životní prostředí	15
1.1.6 Současný způsob měření	15
1.2 Letecký průzkum	16
1.2.1 UAS pro letecký průzkum	17
1.2.2 Využití leteckého průzkumu	18
1.2.3 Aktuální metodiky leteckého průzkumu	19
1.2.4 Letecké snímkování	20
1.3 Bezpilotní legislativa pro letecký průzkum	23
1.3.1 Provoz v otevřené kategorii	24
1.3.2 Přechodné období	25
1.3.3 Provoz ve specifické kategorii	26
1.3.4 Legislativní předletová příprava	27
1.4 Letecký průzkum multispektrální kamerou	28
1.4.1 Princip dálkového průzkumu země	29
1.4.2 Rozdíl multispektrálního a hyperspektrálního snímání	31
1.4.3 Data z multispektrální kamery	32
1.4.4 Aktuální nabídka multispektrálních kamer	34
1.4.5 Srovnání vybraných kamer	37
2 Používaná technika a metodika měření	39
2.1 Parametry použitých dronů	39



2.1.1	DJI Phantom 4.....	39
2.1.2	DJI Matrice 300	39
2.2	Výběr lokality	40
2.3	Legislativní předletová příprava pro měření	41
2.4	Provedení měření	42
2.5	Zpracování dat.....	45
3	Výsledky	53
3.1	Aplikace pro porovnání	53
3.1.1	Postup práce s aplikací.....	53
3.1.2	Princip fungování aplikace	56
3.2	Porovnání senzorů.....	56
3.3	Optimální světelné podmínky.....	58
	Diskuse.....	61
	Závěr	63
	Zdroje	65
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek.....	73
	Seznam příloh.....	74



Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický název	Český název
AGL	Above Ground Level	Nad úrovní terénu
AIP	Aeronautical Information Publication	Letecká informační příručka
ARP	Aerodrome Reference Point	Vztažný bod letiště
CRP	Calibrated Reflectance Panel	Kalibrační panel
CVI	Chlorophyll Vegetation Index	
ConOps	Concept of Operations	Provozní koncepce
CTR	Control Zone	Řízený okresek
FIR	Far-Infrared	Vzdálené infračervené pásmo
GNSS	Global navigation satellite system	Globální navigační satelitní systém
GPS	Global Positioning System	Globální polohový systém
HOP		Hustě osídlený prostor
LUC	Light UAS Operator Certificate	Průkaz provozovatele lehkých bezpilotních letadel
MCTR	Military control zone	Vojenský řízený okresek
MIR	Mid-Infrared	Střední infračervené pásmo
NDRE	Normalized Difference Red Edge	
NDVI	Normalized difference vegetation index	
NIR	Near-Infrared	Blízké infračervené pásmo
OKP		Oprávnění k provozu
OOP		Opatření obecné povahy
OSAVI	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	
RE	Red Edge	
RGB	Red Green Blue	Červená zelená modrá
RPA	Remotely Piloted Aircraft	Dálkově řízené letadlo
RPS	Remote Pilot Station	Dálkově řídicí stanice
RTK	Real-time Kinematic	Kinematika v reálném čase
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	
STS	Standard Scenario	Standardní scénář
UAS	Unmanned Aerial System	Bezpilotní systém
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Bezpilotní letadlo
ÚCL		Úřad pro civilní letectví



UV	Ultra Violet	Ultrafialové záření
VLOS	Visual Line of Sight	Na dohled pilota
VTOL	Vertical Take-off and Landing	Vertikální vzlet a přistání



Úvod

V posledních letech je stále větší snaha nakládat s odpadem co nejefektivněji a nejekologičtěji, přesto je skládkování stále velmi častý způsob likvidace. Pro skládky jsou samozřejmě pečlivě vybírána místa a je přesně stanovené množství odpadu, které se zde bude skladovat. Díky tomu je pak jednodušší skládku rekultivovat a začlenit ji do krajiny. Pro rekultivaci jsou přísně daná pravidla, jak má být uložený odpad zaizolován. Ač by se mělo jednat o spolehlivý a bezpečný způsob uložení odpadu, vždy může dojít k nějaké chybě, ať už vadou materiálu nebo pochybením lidského faktoru. Proto je dobré uzavřené skládky měřit způsobem, který je schopný takovou závadu lokalizovat a daný problém vyřešit, aby nedošlo k průsaku škodlivých látek do okolní krajiny.

V dnešní době rapidně narůstá popularita bezpilotních systémů a s ní se také zvyšuje možnost jejich uplatnění. Bepilotní letadla už dávno nejsou pouze součástí armádní výbavy. Jejich využití pro dálkový průzkum země získává čím dál tím větší oblibu napříč všemi možnými obory. Drony vybavené multispektrální kamerou jsou čím dál víc používány v zemědělství pro analýzu rostlin a následně k individuálnímu lokálnímu hnojení.

Tato práce se zabývá využitím bezpilotního prostředku vybaveného multispektrální kamerou v oblasti skládky komunálního odpadu. V první části je nastíněné současné měření v oblasti skládek a následně možnosti využití a metodiky při používání bezpilotních systémů pro dálkový průzkum země. Během praktické části bylo provedeno několik letů v oblasti skládky k určení optimálních světelných podmínek pro měření s dronem vybaveným multispektrální kamerou.



1 Analýza současného stavu

Před zahájení praktického měření je potřeba provést důkladnou rešerši současného stavu. V následujících podkapitolách je rozebráno, jakým způsobem probíhá skládkování a kontrolování odpadu dnes, rozdělení a využití bezpilotních systémů a legislativní omezení bezpilotních systémů

1.1 Skládkování komunálního odpadu

Pro rozebrání samotného skládkování komunálního odpadu je třeba nejprve definovat, co se rozumí pojmem komunální odpad. Můžeme ho definovat jako veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. [1] Jedná se tedy o směsný odpad a odděleně sbíraný odpad z domácností, včetně papíru a lepenky, skla, kovů, plastů, biologického odpadu, dřeva, textilu, obalů, elektrického odpadu a zařízení, použitých baterií nebo objemného odpadu (například matrace, nábytek atd.). Za komunální odpad se považuje i směsný odpad a odděleně sbíraný odpad z ostatních zdrojů, pokud je povahou a složením podobný odpadu z domácností. Komunální odpad nezahrnuje například odpad z výroby, zemědělství, lesnictví, rybolovu, septiků a čistíren odpadních vod, nebo stavební a demoliční odpad. [2]

Odpad z domácností a odpady podobné povahy a složení jsou zahrnuty do komunálního odpadu bez ohledu na to, kdo tento odpad sbírá. Komunální odpad zahrnuje odpad pocházející z domácností, obchodů, malých podniků, kancelářských budov a institucí (např. školy, nemocnice, vládní budovy), a to za předpokladu, že je druhem a složením podobný odpadu z domácností a nepochází z výroby. [2]

Množství vyprodukovaného komunálního odpadu během posledních let má mírně vzestupnou tendenci. V tabulce 1 je uvedeno množství vyprodukovaného komunálního odpadu v tunách pro jednotlivé kraje České republiky během let 2018–2020. [2]

Z množství vyprodukovaného komunálního odpadu je zřejmé, že je třeba jeho skladování řešit efektivně. Zároveň je důležité dbát na způsob, jakým je komunální odpad uchováván dlouhodobě, protože při špatném skládkování hrozí nebezpečí znečištění okolního prostředí skládek a ohrožení života v jejich blízkosti.



Tabulka 1. Produkce komunálních odpadů podle krajů (v tunách) [2]

ČR, kraj	2018	2019	2020
Celá ČR	5 247 951	5 337 690	5 418 774
Hl. m. Praha	663 024	670 776	619 529
Středočeský kraj	722 097	746 539	820 906
Jihočeský kraj	332 441	336 777	360 972
Plzeňský kraj	268 738	264 292	273 295
Karlovarský kraj	127 572	127 968	126 537
Ústecký kraj	391 770	405 294	399 137
Liberecký kraj	205 092	206 351	203 372
Královéhradecký kraj	283 124	288 681	290 382
Pardubický kraj	248 075	257 559	266 632
Kraj Vysočina	265 413	271 049	273 924
Jihomoravský kraj	530 790	544 882	553 271
Olomoucký kraj	334 330	337 519	341 143
Zlínský kraj	258 038	267 923	269 470
Moravskoslezský kraj	617 446	612 082	620 204

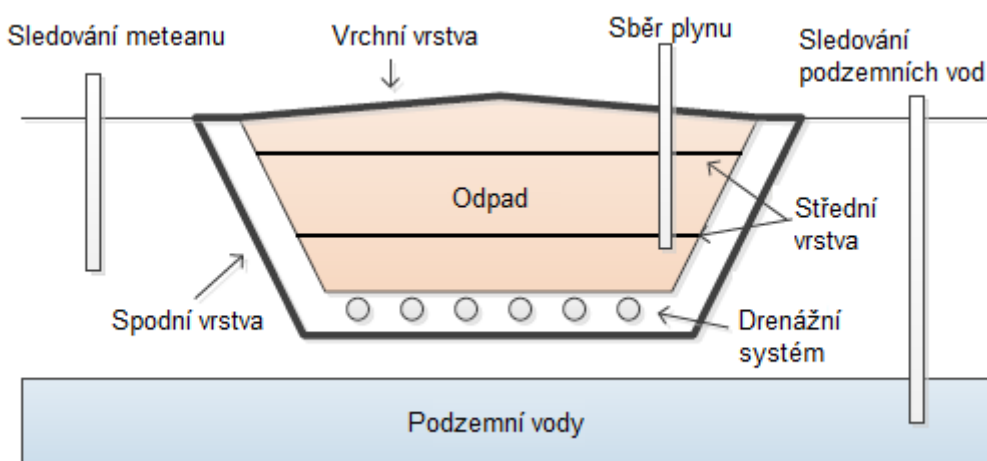
1.1.1 Způsob skládkování komunálního odpadu

Skládkování odpadu funguje na principu jeho ukládání na místech k tomu určených, tedy na skládkách. Jedná se o jeden z nejméně efektivních a šetrných způsobů nakládání s odpadem. I přes to je ho takto v České republice skladováno velké množství. Skládky jsou povinny řídit se různými standardy a normami, které snižují rizikovost skladování. Odpady na skládkách nesmí mít negativní vliv na okolní prostředí, a to jak na povrch, tak i na podzemní vody. Toto je kontrolováno a hlídáno nejen na fungujících skládkách, ale také na zavřených. [3]

Při skladování odpadu je vždy třeba splnit několik důležitých podmínek. V první řadě je třeba zvolit vhodné umístění skládky na pozemky s přesně definovanými hydrogeologickými, hydrologickými a geotechnickými podmínkami. Každá skládka je pak speciálně izolována, podle typu odpadu, který na ní bude skladován. Výstavby skládky podléhají procesům definovaným zákonem Sb. 541/2020 Sb. o odpadech. [3]

Nejčastější typ skládky je tzv sanitární skládka. Jedná se o takový typ skládky, kde jsou vrstvy zhutněného odpadu pokryty návozem zeminy. V minulosti se termín sanitární skládka používal k označení skládky, na které byl odpad zasypán na konci každého denního provozu. Dnes se

sanitární skládkou rozumí technické zařízení pro likvidaci odpadu navržené a provozované tak, aby se minimalizovaly dopady na veřejné zdraví a životní prostředí. Na skládce probíhají biologické, chemické a fyzikální procesy, které podporují degradaci odpadu a vedou k produkci výluhů a plynů. Návrh a konstrukce skládky musí zahrnovat prvky, které umožňují kontrolu průsakové vody a plynu. Mezi hlavní konstrukční součásti skládky, jak je znázorněno na obrázku 1, patří spodní vrstva, drenážní systém pro řízení průsakové vody, zařízení pro hospodaření s plynem, hospodaření s dešťovou vodou, střední kryty a vrchní překrytí. [4]



Obrázek 1. Schéma a hlavní části sanitární skládky [4]

Systém spodní vložky slouží k zamezení migrace výluhu ze skládky a k usnadnění jeho odstraňování. Obvykle se skládá z více vrstev přírodních materiálů a/nebo geomembrán s nízkou propustností. Skládky jsou navrženy s jednoduchými, kompozitními nebo dvojitými vložkami v závislosti na místní geologii a ekologických požadavcích místa skládky. Například v místech, kde nedochází k přímému kontaktu s podzemní vodou, postačí pouze jedna ztuhlá jílová vložka. Oproti tomu v místech, kde musí být kontrolována migrace průsakových vod i plynů, je nezbytné použití kompozitní vložky složené z jílové vložky a geosyntetické vložky s vhodnou drenážní a půdní ochrannou vrstvou. Shromažďování výluhu, který se hromadí na dně skládky, se obvykle provádí pomocí řady šikmých teras a systému sběrných potrubí. [4]

Způsob řízení skládkového plynu zahrnuje systém jeho sběru, který slouží k využití plynu. Tento systém propojuje sběrné studny s potrubím a odsává plyn pod vakuem vytvořeným centrálním dmychadlem. Skládkový plyn lze pak využít na výrobu elektřiny nebo tepla, případně ho lze využít jako palivo. [4]

Jakmile skládka dosáhne projektované výšky, umístí se konečná vrstva, aby se minimalizoval průsak dešťové vody, rozptylování odpadů a usnadnila se dlouhodobá údržba skládky.

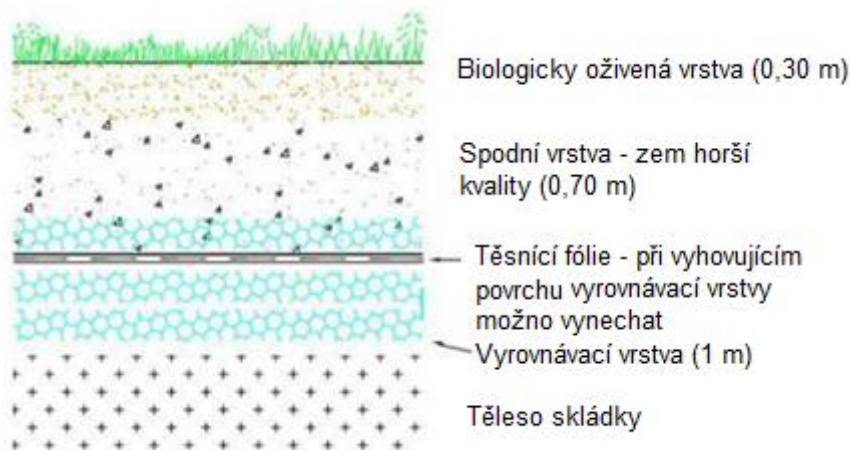


Moderní konečná vrstva skládky je tvořena řadou vrstev, z nichž každá má speciální funkci. Finální kryt sestává odshora dolů z vegetace a podpůrné zeminy, výplňové a drenážní vrstvy, hydrologické bariéry, základu pro hydrologickou bariéru a vrstvy regulace plynu. Jakmile je skládka uzavřena, může být půda znovu použita k mnoha účelům, jako jsou přírodní oblasti, rekreační parky, golfové hřiště, parkoviště atd. [4]

Z pohledu úrovně terénu jsou rozlišovány skládky podúrovňové (v otevřených terénních prohlubních do úrovně terénu), nadúrovňové (zakládáné na úrovni terénu) a kombinované (se základem pod úrovní terénu a převýšením nad jeho úroveň). Zvláštním druhem jsou skládky podzemní, kde se využívají přirozené nebo uměle vytvořené dutiny pod povrchem země. Jak již bylo naznačeno, tak z hlediska stavebního provedení lze na základě zajištění těsnění skládky rozlišovat skládky netěsněné a skládky těsněné přírodním materiálem (nejčastěji jílem) nebo syntetickým materiálem (např. folie z PVC nebo polyethylenu) či jejich kombinací. Tam záleží na tom, jak moc hrozí znečištění okolního prostředí a podzemních vod. Podle časového průběhu skládkové činnosti jsou skládky děleny na připravované, provozované a skládky s přerušenou či ukončenou činností. [5]

1.1.2 Rekultivace skládky

Již při samotném vybírání místa skládky a následně i při jejím provozu je plánováno, jak dlouho bude skládka aktivní a jakým způsobem bude probíhat rekultivace. Pojem rekultivace označuje proces, který určitému místu (v tomto případě skládce odpadu) navrácí takový vzhled, aby tato oblast byla v souladu s okolím. Zároveň je snaha obnovit základní ekologické funkce krajiny. Obecně lze rekultivaci chápat jako činnost, při které je prostředí obnovováno a dále využíváno. Na obrázku 2 jsou znázorněny jednotlivé vrstvy skládky komunálního odpadu. Na samotné těleso skládky je aplikována vyrovnávací vrstva a následně těsnící fólie, která uzavírá skládku před účinkem srážkových a povrchových vod. Následně je umístěna další vrstva, která skládku chrání před biologickými a povětrnostními vlivy. Velikost této vrstvy je předepsána na 1 m, přičemž na horní část (přibližně 30–50 cm) je využívána kvalitnější půda. Zde často bývá i odvodňovací systém. [6]



Obrázek 2. Skladba rekultivační vrstvy skládky [7]

1.1.3 Typy skládek dle zabezpečení

Dle normy ČSN 83 8030 o skládkování odpadů z roku 2018, která nahrazuje starší normu z roku 2002, jsou rozlišovány podle technického zabezpečení tři skupiny skládek. První z nich je skupina S-inertní odpad. Ta je určena pro inertní odpady dle příslušného právního předpisu (vyhláška č. 294/2005 Sb.). Tento typ skládky se eviduje pod označením S-IO. Inertní odpad je odpad, který nemá nebezpečné vlastnosti, a u něhož za normálních klimatických podmínek nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám. Inertní odpad nehoří ani jinak chemicky či fyzikálně nereaguje, nepodléhá biologickému rozkladu ani nezpůsobuje rozklad jiných látek, s nimiž přichází do styku, a to způsobem ohrožujícím lidské zdraví a ohrožujícím nebo poškozujícím životní prostředí nebo vedoucím k překročení limitů znečišťování stanovených zvláštními právními předpisy. Směsné odpady se nepovažují za inertní odpad. [8]

Skupina S-ostatní odpad je, jak název napovídá, určena pro ostatní odpad. Takový typ skládky je evidován pod označením S-OO. Tato skupina je dále rozdělena na S-OO1, S-OO2 a S-OO3. Na první dvě z těchto podkategorií smí být ukládán pouze odpad s nízkým obsahem organických biologicky rozložitelných látek. Třetí z těchto podkategorií už toto umožňuje. Celkově vše podléhá výše zmíněné vyhlášce č. 294/2005 Sb. Poslední skupina skládek je pro nebezpečný odpad. Pro účely evidence jsou označovány S-NO. Tato práce se bude dále zabývat skupinou skládek S-OO. [8]

1.1.4 Etapy skládek

Provoz skládek je rozdělen do několika fází nazývaných etapy. Tyto etapy jsou vždy dopředu rozvrženy a je stanoveno, kdy budou v provozu. Každá etapa postupně projde třemi fázemi: přípravou, ukládáním a uzavřením. Poté, co se v rámci přípravné fáze vybere a uzpůsobí místo

a určí se množství odpadu, které zde bude skladováno, může být zahájen provoz etapy. Po naplnění dojde k uzavření a zahájení rekultivace. Etapy jsou označovány číselně od nejstarší po nejnovější. Zobrazení etap na skládce je na obrázku 3. [9]



Obrázek 3. Znárodnění etap na skládce [10]

1.1.5 Vliv na životní prostředí

Jak vyplývá z předchozích informací, při skládkování dochází k nekontrolovatelným chemickým, biologickým a fyzikálním reakcím. Jejich intenzita a postup jsou ovlivňovány množstvím biologicky rozložitelných podílů, vlhkostí a taky dosaženým stupněm anaerobních podmínek. Obecně lze říct, že záleží na hloubce závažky, rychlosti závažení a stupni hutnění. [11]

Jedním z nejrizikovějších zdrojů znečištění v oblasti skládek jsou vznikající výluhy, u kterých hrozí prosáknutí do okolí a následné znečištění podzemních vod a přilehlého prostředí. U částečně zasypaných skládek zeminou (případně zcela uzavřených skládek) je třeba také sledovat i prvky nacházející se v půdě. Důležité parametry pro kontrolu kvality půdy jsou hodnota pH, elektrická vodivost, biologická a chemická spotřeba kyslíku, celkový organický uhlík a obsah kationtů (např. Na, K, Ca, Fe a NH_4^+) a aniontů (zejména Cl^- a SO_4^-). Mezi další nebezpečné látky vyskytující se v oblasti skládek patří těžké kovy (např. As, Cr, Cu, Pb a Ni). [8]

1.1.6 Současný způsob měření

Aktuálně se v oblasti aktivních skládek ve většině případů majitelé zaměřují především na kontrolu průsaku a sledování výluhů. V případě uzavřených nebo částečně zasypaných



skládek probíhají kontroly v oblasti pomocí odebrání vzorku zeminy, vysušením a následným rozborem v laboratoři. Pro takový typ měření je třeba odebrat vzorky zeminy z různých vrstev. V případě, že by se jednalo o větší plochu, by bylo pro přesné měření potřeba tyto vzorky znásobit počtem různých odběrových míst. Všechny vzorky se odebírají do plastových sáčků a následně probíhá jejich sušení při teplotě 60 °C po dobu alespoň dvou dnů. Větší nečistoty musí být ručně odstraněny společně s kameny a zbytky rostlin. Hrudky hlíny jsou pak rozmělněny hmoždířem. Všechny vzorky se musí postupně přesívat nejdříve přes hrubé, později pak jemnější síto. Následně jsou vzorky doplněny mineralizačními činidly a je využita metoda atomové absorpční spektrofotometrie na speciálním přístroji. [12]

Výhody takového typu měření jsou, že poměrně přesně určí těžké kovy, které půda obsahuje. Nevýhodou je časově zdlouhavá a relativně náročná příprava vzorků pro samotnou realizaci laboratorního měření. Zároveň je výstupem procento zastoupení různých látek, které se ale vzhledem k různorodosti odpadu může diametrálně lišit v závislosti na místě měření, respektive odběru vzorku. [12] Jako kompenzace těchto nevýhod by bylo vhodné použít metodu, která by umožňovala zjistit obsah škodlivých látek na celé ploše skládky, a to ideálně za časově kratší dobu. Jako vhodná metoda se nabízí využití leteckého průzkumu. To bude dále rozebráno v následujících podkapitolách.

1.2 Letecký průzkum

V dnešní době je stále více populární využívání bezpilotních letadel. Jejich uplatnění je široké a často práci zlevní, zrychlí a ulehčí. V následující podkapitole jsou rozebrány základní pojmy týkající se bezpilotních systémů a je dále popsán aktuální způsob využití dronů při leteckém průzkumu.

První a nejdůležitější pojem pro označení dronů je *bezpilotní letadlo* (UAV – Unmanned Aerial Vehicle nebo UA – Unmanned Aircraft) Jedná se o letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. [13] V případě, že je popisován jak dron, tak i řídicí stanice či jiné vybavení používané k provozu UAV, jedná se o *bezpilotní systém* (UAS – Unmanned Aircraft System). UAS se skládá z jednoho nebo více bezpilotních letadel, řídicích stanic a čehokoli dalšího, co je nezbytné pro umožnění letu. Pokud je provoz řízen automaticky jedná se buď o *autonomní letadlo* neboli bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu. [13] V případě, že je zásah pilotovi do předdefinovaného letu umožněn, jedná se o automatický let. Pro letadlo řízené na dálku ze země lze použít označení *dálkově řízené letadlo* (RPA – Remotely Piloted Aircraft). To je pak bezpilotní letadlo, které je řízeno z dálkové řídicí stanice. [13] Dálkově řídicí stanice (RPS – Remote Pilot Station) je pak součástí systému dálkově řízeného letadla obsahující vybavení k řízení dálkově řízeného letadla. [13]



1.2.1 UAS pro letecký průzkum

Bezpilotní letadla se používají v široké škále případů: od chytrého zemědělství a fotogrammetrii, přes zvládnání živelných katastrof a civilní bezpečnost, po dozor nad stavbou nebo kontrolu elektrického vedení. Každý UAS se vždy skládá ze samotného letadla a většinou z pozemní řídicí stanice. Semiautonomní drony jsou pak buď zcela nebo částečně řízeny ze země. Často zvládají operovat i samostatně, ale pilot nad nimi může kdykoli převzít kontrolu (například během krizové situace). Oproti tomu autonomní lety lze provádět pomocí inteligentních systémů spojených s palubními senzory. Při leteckém průzkumu, ve kterém je nutné nasnímat větší oblast, se používají autonomní nebo automatické lety. Při takové misi je důležité, aby UAS prozkoumal každé místo v dané lokalitě. [14]

UAS lze rozdělit do dvou hlavních konfigurací podle toho, kde vzniká vztlak, na křídle nebo na rotoru. Oba typy mají specifické výhody a nevýhody. UAS s pevným křídlem a s nosným profilem umožňuje létat na základě vztlaku na křídle vytvořeného dopřednou rychlostí dronu. Ovládání je zajištěno pomocí řídicích ploch na křídlech a ocasních plochách (křídélka, výškovka a směrovka). Díky aerodynamickým vlastnostem jsou takové drony schopny vydržet ve vzduchu delší dobu a pohybují se zpravidla rychleji. Kromě toho mohou tato letadla nést těžší užitečné zatížení ve srovnání s drony se vztlakem na rotoru. Křídla ovšem potřebují dráhu ke vzletu (případně lze startovat hodem z ruky) a přistání. Nejsou také schopny vznášet se na jednom místě, protože pro vztlak potřebují neustálý dopředný pohyb. [14]

Drony se vztlakem na rotoru mají výhodu lepší manévrovatelnosti. Jsou schopny provádět vertikální vzlet a přistání (VTOL – Vertical Take-off and Landing), lety v malých výškách a jsou schopné vznášet se na jednom místě. Použití rotoru vytváří aerodynamické tahové síly a nevyžaduje relativní rychlost. Tento typ UAS lze rozdělit na jednorotorové (helikoptéry) a vícerotorové (kvadrokoptéry, hexakoptéry atd.). [14]

Označení jednorotorový dron může být trochu zavádějící, protože z pravidla má dva rotory, hlavní pro vytvoření vztlaku a ocasní pro ovládání kurzu. Lopatky hlavního rotoru vytvářejí potřebný vztlak a zároveň pomocí jejich naklánění dochází k řízení dronu. Takový typ dronu může nést relativně velké užitečné zatížení, jako jsou různé senzory a aktuátory. Tyto UAS jsou však poměrně technicky složité, což často vede i k větším pořizovacím nákladům. [14]

Vícerotorové drony (multikoptéry) lze rozdělit do podtříd podle počtu rotorů. Nejběžnější jsou kvadrokoptéry a hexakoptéry, ale byly vyvinuty i trikoptéry a oktokoptéry. Vícerotorové UAS jsou rychlé a obratné a umožňují provádět náročné manévry. Jsou také schopny vznášet se, nebo se pohybovat blízko cíle s velkou přesností. Mají ovšem nejnižší nosnost a letovou výdrž.



Mechanická a elektrická složitost je poměrně nízká, ale narůstá složitost při řízení motoru, protože pomocí změny rychlosti otáčení jednotlivých rotorů je celá multikoptéra řízená. [14]

Existuje také hybridní UAS, což je specifický typ dronu zahrnující výhody předchozích dvou kategorií, tedy schopnosti VTOL, vysoké rychlosti letu a delší doby letu. Takový typ dronu je ovšem technicky složitý a je také citlivější na meteorologické podmínky, obzvláště na vítr. I tato kategorie lze dělit. Za prvé na drony, které vertikálně vzlétnou a následně buď otočením pohonné jednotky nebo jejím přepnutím změni směr letu na horizontální. Druhý typ je dron schopný vertikálně vzlétnout a přistát na ocasu a ve vzduchu se pouze naklonit dopředu za účelem dosažení horizontálního letu. [14]

1.2.2 Využití leteckého průzkumu

Jak bylo naznačeno dříve, možností k využití UAS je spousta. Jedním z nich je měření stavu dusíku v zemědělství s využitím UAS. V roce 2011 byla ve Španělsku provedena studie, která srovnávala měření pomocí UAS a pozemní stanicí. Jiná studie zkoumá vhodnost bezpilotního letounu pro hodnocení polí a plodin. Další se zase zabývá mapováním plevele v kukuřičných polích. Ve všech těchto studiích byly využity multispektrální kamery, pomocí kterých se nasnímalá daná oblast a snímky byly nadále vyhodnoceny. [15]

Multispektrální kamera v kombinaci s bezpilotním prostředkem byla použita i v dalších případech. Už v roce 2014 byla tato kombinace aplikována pro sledování a analýzu vzdušné mykoflóry. Další příklad je využití dálkového průzkumu Země a UAS pro řízení degradovaných ekosystémů (při nadměrné pastvě). V zemědělství může letecký průzkum sloužit například ke sledování plísni rostlin, posouzení vodního stresu plodin nebo detekci a monitoringu cizích druhů rostlin. [15]

Kromě zemědělství může být průzkum krajiny pomocí UAS použit pro archeologii. O tom pojednává studie z roku 2016, která popisuje monitorování v západním Grónsku. Tam bylo měření zacíleno na dokumentaci existujících cenných archeologických nalezišť a pro sledování pohybujícího se ledovce. [16]

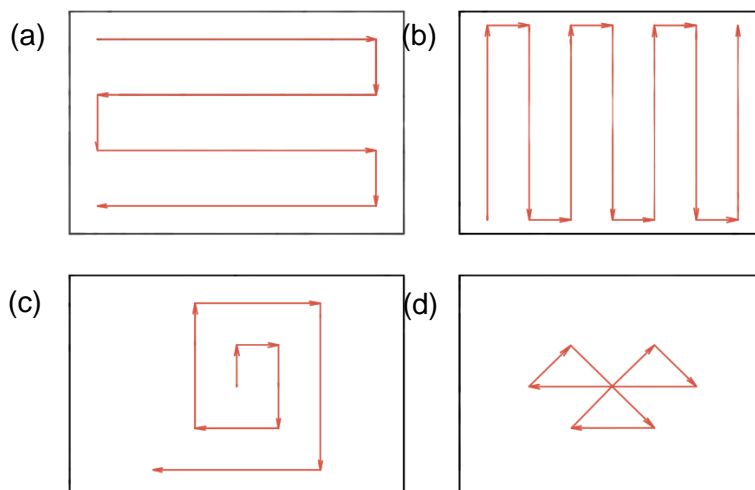
Využití leteckého průzkumu nemusí sloužit pouze ke sledování plochy. UAS může být požit například ke snímání budov a tvorby jejich 3D modelů, nebo hledání prasklin ve zdech budovy. Výhodou je, že dron je schopný zachytit objekt z různých úhlů a prakticky v libovolné výšce. [17]

1.2.3 Aktuální metodiky leteckého průzkumu

Pro provádění leteckého průzkumu existuje několik metod. Rozdělit je můžeme podle toho, jaký tvar má trasa, po které dron letí. Příklady různých typů tras k provedení leteckého průzkumu jsou zobrazeny na obrázku 4. Trasy jsou označeny jako (a) Paralelní; (b) Creeping Line; (c) Čtvercová; (d) Sektorová. [17]

Rozdíl mezi prvními dvěma je v orientaci vyhledávacích ramen. Buď jsou vyhledávací ramena rovnoběžná s dlouhými stranami (hlavní osou) nebo krátkými stranami (vedlejší osou) v určené oblasti vyhledávání. [18]

Volba trasy záleží na typu leteckého průzkumu. Například při detekci prasklin ve stěnách budov je vhodné použít trasu (a) nebo (b) z obrázku 4, protože se vyplatí, když je budova rozdělena na pravouhlé oblasti, které UAS prozkoumá ve více letech. Obecně lze říct, že pokud máme zkoumanou oblast rozdělenou do čtvercové sítě, je vhodné použít trasu (a), (b) nebo (c). [17]



Obrázek 4. Možnosti trasy při leteckém průzkumu [17]

Pokud bude cílem najít v oblasti konkrétní bod, je trasa (a) vhodná, když je snímáný prostor velký a umístění cíle není přesně stanoveno. Vyhledávací ramena jsou rovnoběžná s hlavní osou hledané oblasti. Vzor může být proveden jedním nebo více UAS. Podobná varianta (b) se také používá, když je snímáná oblast velká, ale umístění hledaného cíle je pravděpodobnější na jednom konci prohledávané oblasti. Vyhledávací ramena jsou kolmo na hlavní osu oblasti. I tato trasa může být provedena více drony najednou. [19] V případě, že je cílem zaznamenat celou oblast a nejedná se o využití leteckého průzkumu k nalezení cíle, jsou tyto dvě varianty prakticky zaměnitelné. Rozhodující pro konečnou volbu může být tvar oblasti,



případně volba UAV. V případě letu s dronem typu křídlo je totiž třeba brát ohled na to, že dron nebude schopný proletět zatáčku přesně po vyznačené křivce. [20]

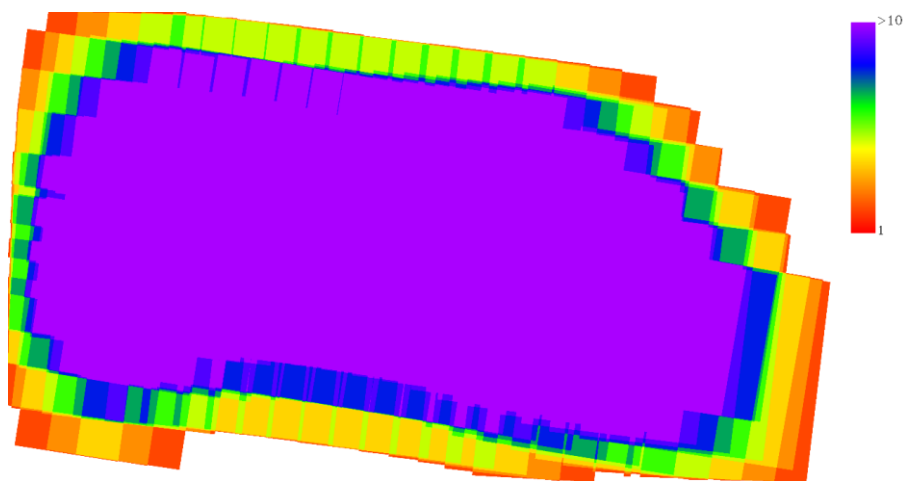
Trasa (c) je efektivní v případě, že je známá přibližná poloha hledaného cíle. Potom začátek trasy je v této poloze a postupuje do spirály dál od tohoto bodu. Dvě po sobě jdoucí vyhledávací ramena mají vždy stejnou délku. Následující dvě pak dvojnásobnou, další dvě pak trojnásobnou atd. Pro nasnímání oblasti jako celku není tato trasa příliš použitelná. [20]

Poslední z vyobrazených tras (d) je vhodná v případě, že poloha hledaného objektu je přesně známá a oblast hledání je malá. Ideální použití je pro kruhovou oblast. Využívá se v ní zpravidla pouze jeden dron. Pro dálkový průzkum země se takový typ trasy nepoužívá. [20]

Další možné dělení je podle používaného druhu senzoru. Při zkoumání objektů na dálku dochází k přenosu energie pomocí elektromagnetického záření. Jako jeho zdroj může být buď použito sluneční záření, nebo záření vypouštěné senzorem, které pak přijímá zpátky. Na základě toho se dají metody leteckého snímání rozdělit na aktivní a pasivní. Příkladem pasivní metody je fotografický snímek, oproti tomu aktivní je například radar. [21]

1.2.4 Letecké snímkování

Jedním z možností využití leteckého průzkumu je letecké snímkování. V takovém případě je dron vybavený kamerou (ať už RGB, multispektrální nebo jinou) a snímá cílený objekt z určité výšky. Pokud je snímána větší oblast, je třeba nad danou lokalitou provést let takovým způsobem, aby bylo vytvořeno potřebné množství snímků s dostatečným překryvem. Snímky je pak potřeba zpracovat a pomocí speciálního softwaru z nich vytvořit jednu ortofoto mapu, která bude zobrazovat celou oblast. Překrytí snímků záleží na typu kamery a požadovaném výstupu. U leteckého průzkumu pomocí UAS se doporučuje nastavit překrytí 70 % pro přední a 50 % pro boční přesahy. V případě využívání multispektrální kamery je dobré přesahy ještě zvětšit až na 80 % pro přední a 60 % pro boční přesahy. [22] S překryvem je třeba počítat a let nad snímanou oblastí naplánovat tak, aby místo zájmu mělo vždy dostatečný překryv. Obrázek 5 znázorňuje překrytí na snímané oblasti, kde fialová barva značí pro dané místo deset a více dostupných snímků. Naopak červená barva zobrazuje místo, kde je k dispozici pouze jeden snímek.



Obrázek 5. Znázornění překryvů na snímané ploše [autor]

Při leteckém snímání je kromě překrytí důležitým parametrem rozlišení, které je závislé na typu kamery a na výšce letu. Rozlišení, kterého je možné dosáhnout s UAS, je v porovnání se snímáním z běžných letadel případně ze satelitů mnohem lepší. Snímky z UAS létající v malých výškách (50–120 m AGL – above ground level) s pohledem kamery kolmo k zemi poskytují vynikající prostorové rozlišení řádově 1 cm/pixel. Oproti tomu rozlišení leteckého snímání z pilotovaných letadel z větších výšek se pohybuje okolo 25 cm/pixel. Je třeba pro každou misi vždy určit, s jakou přesností má být oblast nasnímána. Pro oblasti do přibližně 5 ha lze poměrně jednoduše využít bezpilotní kvadrokoptéry. Pro oblasti do 30 ha lze stále využít UAS, ale vhodnější by bylo použití křídla. U větších ploch už zpravidla není potřeba tak velká přesnost (rozlišení), takže z hlediska množství dat a doby snímání je vhodné využít letecký průzkum z větších výšek pilotovanými letadly. [23]

Lety s UAS lze provádět buď v konstantní výšce nad zemí, nebo v konstantní výšce nad hladinou moře. Pokud bude let prováděn v konstantní výšce nad zemí, zachová se také konstantní rozlišení. Při zachování stejné hladiny letu je třeba myslet na to, že rozlišení se bude v závislosti na výšce letu měnit. Při stálé výšce dronu je vhodné určit si minimální rozlišení, které je pro danou misi požadováno, a na základě toho určit výšku letu nad zemí v nejnižším bodě sledované oblasti. Potom při nasnímání bude výstup vždy s minimálním rozlišením nebo lepším. Lety v konstantní výšce je vhodné provádět v oblastech, kde se výška terénu nějak rapidně nemění. Pro naplánování takových letů se využívá aplikace určená pro konkrétní dron. Aplikací na plánování letů je celá řada a je třeba vždy zjistit, kterou aplikaci je vhodné použít pro vybraný dron. [22]

Pro následné vytvoření mozaiky a složení snímků v jednu ortofoto mapu je třeba znát co nejpřesnější polohu dronu při pořízení jednotlivých snímků, nebo mít přesně zaměřené body na povrchu země (tzv. vlíčovací body). Pro přesnou polohu dronu nestačí pouze využití GPS,

ale musí být zpřesněna pomocí RTK (Real-time Kinematic). Pokud by k využití jedné z těchto metod nedošlo, přesnost a kvalita měření by se snížila. [24] Jednotlivé metody budou popsány dále.

Vlícovací body

Vlícovací bod je jasně identifikovatelné místo za snímku, kde jsou známé přesné geoprostorové souřadnice. Takový bod pak umístí snímek do projekce (do správného souřadného systému). Poloha takového bodu musí být přesně zaměřená pozemním měřením pomocí speciální GPS. Vlícovací bod může být buď uměle vytvořený, nebo lze použít dostatečně kontrastní bod v krajině. Důležité je, aby se jednalo o dobře identifikovatelné objekty vzhledem k rozlišení snímku. [25] Příklad, jak může vypadat vlícovací bod, je zobrazen na obrázku 6.



Obrázek 6. Uměle vytvořený vlícovací bod [autor]

Vlícovací bod by měl vždy ležet na úrovni terénu (nemělo by se jednat o výškové budovy atd.) a ideálně by neměl být zaměnitelný. Z hlediska zaměnitelnosti není vhodné zvolit jako vlícovací bod opakující se prvky, jako jsou například čáry na parkovišti, pruhy silnice apod. Při volbě umístění vlícovacích bodů je dobré sledovat stíny, které by mohly na místě bodu vzniknout, a změnit tak barevnost daného bodu na různých snímcích. Počet vlícovacích bodů závisí na tom, jestli se jedná o 2D nebo 3D zpracování snímků. Pro 2D je potřeba zaměřit minimálně dva body, pro 3D tři a více bodů. Použití více bodů dává možnost kontroly, vyloučení chybných bodů apod. Body by pak měly být rovnoměrně rozmístěny po celém snímku a v případě větších výškových rozdílů terénu v těchto extrémech. [25]

RTK

RTK se používá ke zlepšení přesnosti samostatného GNSS (Global Navigation Satellite System) přijímače. Běžné GNSS přijímače, které se používají v telefonech nebo dronech, dokážou určit polohu pouze s přesností na dva až čtyři metry. Oproti tomu GNSS přijímače s RTK poskytují přesnost v řádech centimetrů. Zpřesnění pomocí RTK funguje na principu určení polohy pomocí klasické GPS a opravy chyby v reálném čase. Informace, o kolik je třeba chybu opravit, se dostane do dronu ze sítě pozemních stanic. Tyto stanice jsou rozmístěné po celé České republice a jejich poloha je nezávisle přesně změřena. Díky tomu je tak dron schopen dosáhnout centimetrové přesnosti, kterou lze využít u leteckého snímání. [26]

RTK se používá hlavně pro aplikace, které vyžadují vyšší přesnost, jako je právě navigace dronů. Využití RTK šetří čas, energii a náklady, při zachování srovnatelné přesnosti, jakou dávají vlčovací body. V České republice jsou tři takové sítě, a to CZEPOS, který provozuje Český úřad zeměměřický a katastrální (rozmístění stanic je zobrazeno na obrázku 7), Trimble VRS Now Czech, který provozuje firma Geotronics Praha, s. r. o. a TopNET, který provozuje GB-geodezie, spol. s r.o. [27]



Obrázek 7. Rozmístění pozemních stanic firmy CZEPOS [28]

1.3 Bezpilotní legislativa pro letecký průzkum

Při jakémkoliv měření je třeba dodržovat legislativní rámec a u měření pomocí bezpilotních systémů to platí dvojnásob. Velký rozmach bezpilotních letadel přišel relativně nedávno a bezpilotní legislativa se s ním snaží držet krok. I vzhledem k rostoucí popularitě dronů byla na konci roku 2020 (konkrétně 31. prosince) zavedena nová bezpilotní legislativa, která má za



úkol sjednotit pravidla prakticky pro celou Evropu (ve 27 členských státech EU, v Norsku, Lichtenštejnsku, Spojeném království a na Islandu). Hlavní rozdíl oproti staré legislativě je takový, že už se nerozlišuje provoz mezi komerčním a hobby letem, ale posuzuje se míra rizika provozu dronu. Další novinkou je označení dronů štítky C0 – C6. Podle těchto štítků, které udává výrobce dronu, se budou drony dále dělit do jednotlivých kategorií. V současné době ovšem je štítkování dronů ve fázi implementace a momentálně se drony označené štítkem třídy „C“ na trhu nevyskytují. Proto se UAV zařazují do jednotlivých kategorií podle vzletové hmotnosti. [29]

Jak již bylo naznačeno, všechny drony jsou rozděleny do tří kategorií: OPEN, SPECIFIC a CERTIFIED. Provoz v rámci poslední (certifikované) kategorie zatím neexistuje. Tato kategorie je zamýšlena do budoucna pro přepravu osob, přelety nad shromážděním lidí nebo přepravu nebezpečného zboží. [29] Zbylé dvě kategorie budou rozebrány v následujících podkapitolách.

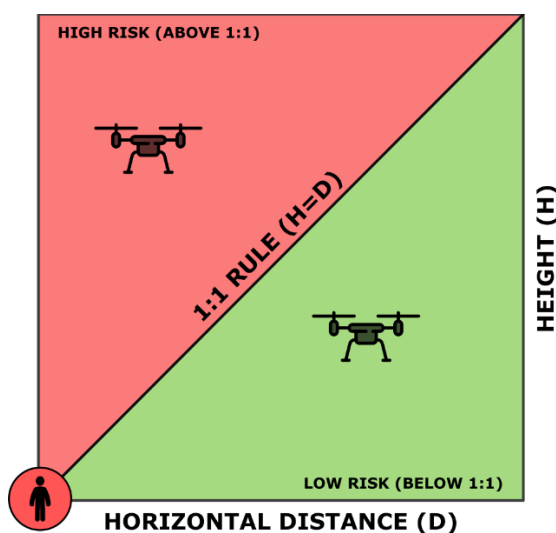
1.3.1 Provoz v otevřené kategorii

Tato kategorie slouží pro provoz s nejnižším rizikem. Je dále rozdělena na tři podkategorie nesoucí označení A1, A2 a A3. Pro každou z podkategorií platí různá pravidla a spadají do ní různě velké drony. Obecně platí, že v otevřené kategorii je maximální výška letu 120 m AGL a provoz musí být VLOS (Visual Line of Sight) neboli na dohled pilota. V otevřené kategorii je zakázáno létat nad zásahy IZS (integrovaných záchranných složek) a shromážděním lidí. Dále pak záleží, do jaké podkategorie dron spadá. [29]

Nová legislativa zavádí taky nový druh registrace. První registrace se týká provozovatelů (zjednodušeně řečeno majitelů) dronů. Každý, kdo vlastní dron (ať se jedná o fyzickou nebo právnickou osobu), musí být registrován jako provozovatel. Registrace probíhá online na stránkách Úřadu pro civilní letectví (ÚCL), kde registrovaný získá unikátní číslo, kterým označí všechny drony, které provozuje. Pro samotný let s dronem je pak potřeba být registrovaný jako pilot. Tato druhá registrace probíhá také online, přičemž každý pilot musí projít testem, po jehož úspěšném splnění získá oprávnění pro provoz v podkategoriích OPEN A1/A3.

Do podkategorie OPEN A1 budou v budoucnu spadat drony se štítkem C0 a C1. Aktuálně je možné provozovat drony v této podkategorii, pokud jejich vzletová hmotnost nepřesáhne 500 g. Vzhledem k tomu, že se jedná o provoz nejmenších dronů, je zde v případě dronů lehčích jak 250 g dovoleno přeletět nezapojené osoby bez jejich souhlasu. Pilot by se však měl těmito přeletům vyhýbat a minimalizovat čas strávený nad lidmi. Drony v rozmezí od 250 g do 500 g pak mohou nezapojené osoby přeletět pouze s jejich svolením. Bez jejich souhlasu je minimální vzdálenost od lidí 15 m. [29]

Podkategorie OPEN A2 je určena pro drony nesoucí štítek C2. Aktuálně do této podkategorie spadají UAS se vzletovou hmotností do 2 kg. Pro provoz v A2 je zapotřebí udělat dodatečnou zkoušku, která se skládá z praktického výcviku a teoretického testu. Zatímco praktický výcvik probíhá formou samostudia, teoretická zkouška se koná přímo v prostorách ÚCL. Po splnění těchto požadavků může pak pilot provozovat drony spadající do této podkategorie blíže k nezapojeným osobám, a to až na 30 m při letu s dronem označeným štítkem C2. Pro drony bez štítku je tato vzdálenost stanovena na 50 m. V případě, kdy je UAS vybaven funkcí nízkorychlostního režimu je tato vzdálenost zmenšena na 5 m. Nízkorychlostní režim je taková funkce dronu, která omezuje maximální dopřednou rychlost na 3 m/s. Nadřazené pravidlo pro stanovení bezpečné vzdálenosti od nezapojených osob je pravidlo 1:1 (viz obrázek 8). To říká, že vzdálenost od nezapojených osob musí být vždy větší nebo rovna výšce dronu AGL. [29]



Obrázek 8. Znárodnění pravidla 1:1 [30]

Poslední z podkategorií je OPEN A3. Ta je určena pro provoz dronů se štítky C2, C3 a C4. Aktuálně sem tak spadají drony se vzletovou hmotností 500 g–25 kg. V rámci této kategorie musí být provoz prováděn v oblasti, kde se nepředpokládá výskyt nezapojených osob, a musí být v bezpečné horizontální vzdálenosti minimálně 150 m od obytných, obchodních, průmyslových a rekreačních oblastí. Minimální vzdálenost od osob je zde stanovena na 30 m, ne méně než výška (pravidlo 1:1) a ne méně, než je vzdálenost, kterou by UAV uletěl za 2 sekundy při maximální rychlosti. [29]

1.3.2 Přejchodné období

Vzhledem k tomu, že nelze implementovat novou legislativu ze dne na den, provoz dronů aktuálně funguje v rámci přechodného období. Během něj (konec je v plánu na 31. 12. 2023) je legislativa upravena pomocí opatření obecné povahy (OOP). To je vydáno ÚCL a stanovuje



několik dalších nadřazených pravidel pro provoz UAS. [31] V této podkapitole budou rozebrány ty nejdůležitější pro provádění leteckého průzkumu.

Prvním důležitým pravidlem je provoz v řízeném okrsku (CTR) a vojenském řízeném okrsku (MCTR). Pro něj je snižena maximální výška provozu na 100 m AGL. V případě, že se bude jednat o provoz v horizontální vzdálenosti 5 500 m od vztažného bodu letiště (ARP) s dronem s hmotností do 0,91 kg, může být let dronu prováděn bez koordinace s letištěm, pokud se bude pohybovat mimo ochranná pásma s výškovým omezením staveb. Jestliže se bude jednat o provoz dronu těžších než 0,91 kg, který bude vykonáván v prostoru horizontální vzdálenosti 5 500 m od ARP, musí být provoz koordinován s příslušným letištěm a případně proveden dle požadavků leteckého předpisu L11 a letecké informační příručky (AIP). [31]

Další z důležitých pravidel je pro provoz v letištní provozní zóně (ATZ) neřízeného letiště. Tento provoz je shodný s provozem v CTR v prostoru horizontální vzdálenosti 5 500 m od ARP. Tedy v případě provozu mimo ochranná pásma s výškovým omezením staveb dron lehčí než 0,91 kg nemusí koordinovat s letištěm, těžší už ano. Maximální výška je v ATZ taky omezena na 100 m AGL. [31]

Další z bodů OOP zakazuje provoz bez dalšího povolení ÚCL v omezeném, nebezpečném a zakázaném prostoru. V případě, že jsou aktivní dočasně vyhrazené nebo rezervované prostory, musí být provoz UAS taktéž schválen ÚCL. Speciální povolení vyžaduje také provoz v ochranných pásmech liniových staveb, telekomunikačních sítích, uvnitř zvláště chráněných území, v okolí vodních zdrojů a objektů důležitých pro obranu státu. [31]

Posledním z důležitých bodů OOP pro letecký průzkum je definice hustě osídleného prostoru (HOP). *Hustě osídleným prostorem se rozumí prostor, který je ve městě nebo jiné obci používán převážně k bydlení, obchodním činnostem nebo rekreaci.* [31] Za hustě osídlený prostor tedy nejsou považovány parky, louky, pole, zkrátka prostory bez staveb, bez infrastruktury (silnice, chodníky, koleje) a bez nezapojených osob, které by mohly být provozem dronu ohroženy. [31]

1.3.3 Provoz ve specifické kategorii

V případě, že požadavky na provoz při leteckém průzkumu překročí nějaký z výše stanovených limitů otevřené kategorie nebo bude kvůli OOP třeba schválit provoz ze strany ÚCL, je potřeba zajistit provoz dle specifické kategorie. Způsoby pro provoz v této kategorii jsou aktuálně zamýšleny tři. Jedna z možností je Osvědčení provozovatele lehkých UAS (LUC). To by mělo sloužit k tomu, že ÚCL udělí provozovatelům dronů práva a umožní



organizaci, aby si sama schvalovala provoz. Jedná se ovšem o postup, který je v plánu implementovat až v pozdějších fázích. [29]

Další možnost provozu ve specifické kategorii jsou standardní scénáře (STS). Zde se bude jednat o předdefinované postupy, jejichž splnění provozovatel deklaruje na ÚCL. Jejich využití je ovšem limitováno aktuálními UAS, které nesplňují požadavky, jež STS udávají. [29]

Jedinou možností, jak dnes provozovat dron ve specifické kategorii, je podáním žádosti o oprávnění k provozu (OkP). Jedná se o sérii dokumentů zaslanych na ÚCL. Konkrétně se žádost skládá z Žádosti o vydání oprávnění k provozu, Přílohy k žádosti o vydání oprávnění k provozu dle bodu 3.5, Přílohy k žádosti o vydání oprávnění k provozu dle bodu 3.6, Deklarace ochrany osobních údajů a dokumentu ConOps. V prvních dvou uvedených dokumentech provozovatel popíše zamýšlený provoz, vzniklá rizika a zváží využití zmírňujících opatření identifikovaných rizik. Třetím dokumentem provozovatel UAS deklaruje naplnění příslušných cílů provozní bezpečnosti. Čtvrtý dokument, jak název napovídá, slouží k deklaraci ochrany osobních údajů. V něm provozovatel popisuje postupy k zajištění provozu UAS v souladu s evropským nařízením o ochraně fyzických osob v souvislosti se zpracováním osobních údajů. Poslední dokument je provozní koncepce (ConOps), která poskytuje kvalitativní a kvantitativní podrobnosti o tom, jak by měl být systém používán a jak by se měl chovat. [29]

Kromě zmíněných dokumentů může ÚCL vyžadovat i zvláštní přílohy nebo podmínky, které musí být splněny při žádosti o OkP. Například při provozu v HOP musí být v OkP uveden pilot s certifikací pro podkategorii OPEN A2. Jiný příklad je souhlas Drážního úřadu v případě provozu nad železnicí nebo v jejím ochranném pásmu. V případě nutnosti takových dokumentů musejí být zaslány na ÚCL společně s žádostí o OkP. [29]

1.3.4 Legislativní předletová příprava

Vzhledem k rozdělení provozu do různých kategorií je třeba před každým letem zjistit, které skupiny se zamýšlený provoz týká, a tím pádem jaké pro provozovatele a piloty platí povinnosti a omezení. Proto by před každým letem měla proběhnout důkladná předletová příprava. Existují různé letecké nástroje, kterými lze identifikovat rizika provozu. V následujících podkapitolách jsou jejich příklady společně s využitím.

Mapový podklad

Prvním z nástrojů pro předletovou přípravu je klasický mapový podklad. Ten může sloužit k jednoduchému a rychlému zhodnocení oblasti provozu bezpilotního systému. Příkladem může být využití stránky mapy.cz. Zde je důležité vymezit si dopadovou oblast, ve které bude



let probíhat, a zkontrolovat vzdálenosti od dopravní infrastruktury, budov, elektrického vedení atd.

Letecká mapa

Důležité je také zjistit, v jakém vzdušném prostoru bude provoz probíhat. K takové informaci je ideální nástroj Dronview zpracovaný od Řízení letového provozu. Jedná se o mapu, která je přímo určená pro předletovou přípravu UAS. Podstatné je nastavit správný termín, kdy bude let uskutečněn, a prohlédnout, jestli se během té doby nenachází v oblasti provozu nějaký aktivní vzdušný prostor, který by provoz omezoval. Tato mapa je ideální k lokalizaci CTR a MCTR, ATZ nebo omezených, nebezpečných a zakázaných prostor. Zároveň je zde možné zjistit, jestli jsou aktivní dočasně vyhrazené nebo rezervované prostory. [32]

Chráněná území

OOP zakazuje provoz bez povolení ÚCL v území dle zákona č. 114/1992 Sb. zákon o ochraně přírody a krajiny. Konkrétně se jedná o národní parky, chráněné krajinné oblasti (CHKO), národní přírodní rezervace, přírodní rezervace, národní přírodní památky a přírodní památky. Výjimku z povinnosti povolení ÚCL tvoří provoz v CHKO IV. zóny. [29] K lokalizaci těchto míst je vhodná mapa Drusop, zpracovaná Agenturou ochrany přírody a krajiny ČR. Jedná se o digitální registr ústředního seznamu ochrany přírody. Z této webové aplikace je dobře patrné, v jakém typu chráněného území se oblast provozu nachází.

Katastr nemovitostí

V případě, že by provoz dronu probíhal v rámci specifické kategorie, je potřeba mít povolení od vlastníků všech majitelů pozemků, nad kterými UAV létá. Výjimkou je provoz na rurálními oblastmi. Pro zjištění majitele pozemku je vhodné použít ikatastr.cz. V něm se dá jednoduše dohledat majitel pozemku, nad kterým je provoz prováděn, a usnadňuje to tak navázání spojení a získání povolení pro provoz dronu. V případě, že provoz probíhá v rámci otevřené kategorie, stačí získat povolení pouze od majitele pozemku, ze kterého dron startuje a na který přistává. [29]

1.4 Letecký průzkum multispektrální kamerou

Jak již bylo zmíněno v podkapitole o využití leteckého průzkumu, jednou z možností je průzkum multispektrální kamerou. V následující podkapitole je popsán princip jejího fungování a práce s daty, která je schopna naměřit.

1.4.1 Princip dálkového průzkumu země

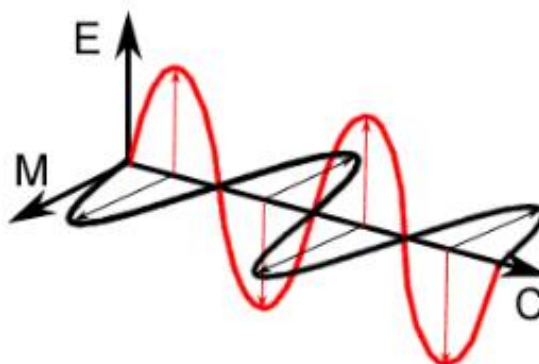
Snímkování povrchu země při leteckém průzkumu patří mezi pasivní metody. To znamená, že kamera pouze přijímá elektromagnetické záření, jehož zdrojem je sluneční svit. Hlavním požadavkem je tedy dostupnost zdroje energie, který ozařuje zkoumaný předmět nebo oblast. Sluneční záření je ovlivňováno při průchodu atmosférou a dále reaguje při dopadu na zkoumaný objekt. Následně záleží na tom, jakým způsobem senzor zaznamenává elektromagnetické záření. [21]

Na sluneční záření lze také nahlížet taky jako na částicové. Potom ho popisuje rovnice 1.1, kde h je Planckova konstanta a f je frekvence. Jedná se o tok energie částic (fotonů) šířící se rychlostí světla.

$$E = h \cdot f \quad (1.1)$$

Elektromagnetické záření

Jak bylo řečeno, elektromagnetické záření je hlavním požadavkem při dálkovém průzkumu země. Elektromagnetické záření se skládá z elektrického (E) a magnetického (M) pole (viz obrázek 9). [21]

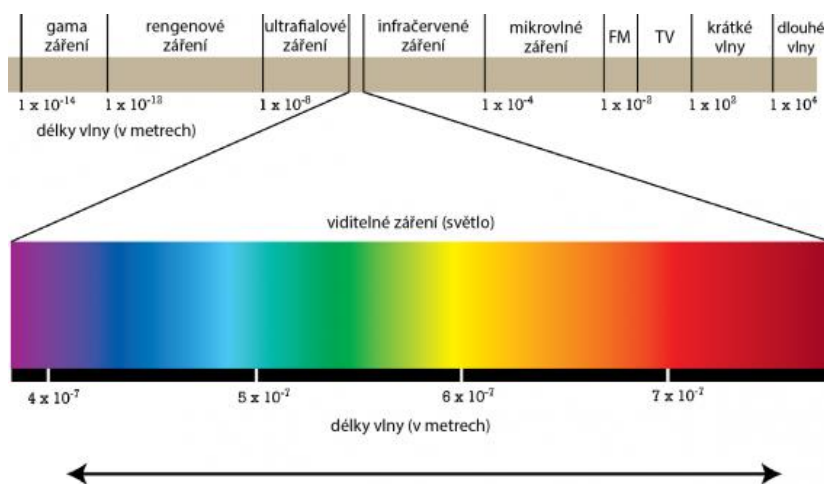


Obrázek 9. Znázornění elektromagnetického záření [21]

Tato dvě pole mají maximální amplitudu na sebe kolmou a zároveň taky kolmou na směr šíření záření. Důležité dva parametry elektromagnetického záření jsou vlnová délka a frekvence. Vlnová délka se značí λ a měří se v metrech, nebo v jednotkách z nich odvozených. Frekvence značená písmenem f je měřená v Hertzech (Hz) a její vztah s vlnovou délkou (viz rovnice 1.2) je takový, že čím kratší vlnová délka, tím větší frekvence a naopak. Písmen c značí rychlost světla ve vakuu. [21]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

Elektromagnetické spektrum sahá od krátkých vlnových délek v hodnotách od $\lambda=10^{-16}$ m až po dlouhé vlnové délky v řádech tisíců kilometrů. Obecně lze spektrum rozdělit na rádiové vlny, mikrovlnné vlny, infračervené vlny, viditelné světlo, ultrafialové záření, rentgenové záření a gama záření (seřazeno od nejdelších vlnových délek po nejkratší). Pro dálkový průzkum země multispektrální kamerou se využívá část viditelného spektra a infračervené záření. Zobrazení elektromagnetického spektra je vykresleno na obrázku 10. [33]



Obrázek 10. Zobrazení elektromagnetického spektra [34]

Viditelná část spektra se nachází v rozmezí vlnové délky od 380 do 770 nm. Infračervené záření navazuje přímo na světlo a pokračuje až do vlnové délky 1 mm. Infračervená část spektra se dělí na blízké infračervené (Near-Infrared) zkráceně NIR s vlnovou délkou od 0,78 do 3 μm , střední infračervené (Mid-Infrared) zkráceně MIR s vlnovou délkou od 3 do 50 μm a na vzdálené infračervené (Far-Infrared) zkráceně FIR s vlnovou délkou od 50 do 1000 μm . [21]

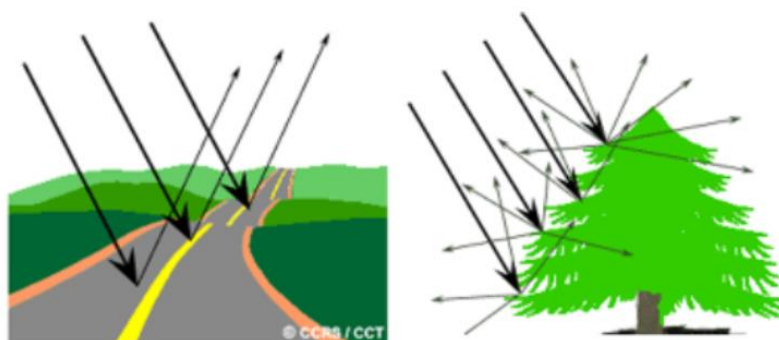
Interakce s atmosférou

Dříve než se záření dostane ke zkoumanému objektu, je ovlivněno průchodem atmosférou. Různé částice a plyny v atmosféře mohou působit rozptýl nebo pohlcování záření. Jedním z vlivů, viditelných pouhým okem, je molekulární rozptýl záření, který způsobuje modrou barvu oblohy. Příkladem pohlcení části záření je vliv ozonové vrstvy, která pohlcuje UV záření. [21]

Interakce s objektem

Záření, které projde atmosférou až na zem, následně reaguje při dopadu na objekt. Existují tři možnosti, co se se zářením stane, když dopadne na těleso. Jedná se o absorpci, průchod nebo odraz záření. Celkově bude záření reagovat kombinací těchto tří interakcí. Poměr bude záležet na vlnové délce záření, materiálu a stavu objektu. [21]

Při dálkovém průzkumu země je důležité zejména odražené záření. Existují dva způsoby, jak se může záření odrážet. V případě, že se jedná o hladký povrch, dochází k odrazu zrcadlovému. Při něm je většina energie odražená jedním směrem. V případě, že se energie odrazí do více směrů, jedná se o odraz difuzní, ke kterému dochází u objektů s hrubým povrchem. Rozdíl těchto odrazů znázorňuje obrázek 11. Pro určení hrubosti povrchu je třeba vzít v úvahu i vlnovou délku záření. Pokud je vlnová délka násobně menší než změny povrchu, bude odraz více zrcadlový. Například povrch, na kterém je jemný písek, se bude chovat jako hladký při zkoumání odrazu dlouhovlnného záření, a naopak jako hrubý při zkoumání viditelného spektra. Zemský povrch tak nelze rozdělit na perfektně zrcadlový a perfektně difuzní, ale bude se vždy nacházet na rozmezí mezi těmito extrémy. [21]



Obrázek 11. Znázornění zrcadlového (vlevo) a difuzního (vpravo) odrazu [21]

1.4.2 Rozdíl multispektrálního a hyperspektrálního snímání

Před definicí multispektrálního snímání je zapotřebí definovat hyperspektrální snímání a poukázat na rozdíly mezi nimi. Zatímco multispektrální kamery pracují v nespojitých spektrálních pásmech na různých vlnových délkách, hyperspektrální snímání využívá spektrálních pásem mnohem více a jejich šířka se pohybuje od 1 do 15 nm. Jednotlivá pásma jsou u hyperspektrálních systémů přilehlá a tvoří souvislé spektrum. S tím souvisí pořizovací cena hyperspektrálních kamer, která je několikanásobně vyšší. [35]

Důležité je si stanovit požadavky na samotné měření. Různé druhy kamer mají odlišné výhody a nevýhody. Tabulka 2 ukazuje, jaké informace lze získat z různých způsobů snímání. Z černobílého snímku lze získat pouze prostorovou informaci za použití jednoho spektrálního pásma, u hyperspektrálních systémů lze s využitím desítek až stovek spektrálních pásem zjistit konkrétní složení v dané části prostoru. Multispektrální snímání nabízí omezenou spektrální informaci a zároveň ji zvládne prostorově zařadit. V tabulce níže je poukázáno i na využití spektroskopie, což je věda zkoumající právě interakci světla a sledovaného vzorku. Při



spektrometrii lze získat reakci na určité spektrum v konkrétním bodě, ale bez další prostorové informace. [35]

Tabulka 2. Porovnání jednotlivých snímaní [35]

	B&W	RGB	Spektroskopie	Multispektrální	Hyperspektrální
Prostorová informace	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano
Spektrální informace	Ne	Ne	Ano	Omezeně	Ano
Počet spektrálních pásem	1	2	desítky až stovky	3-10	desítky až stovky

Multispektrální kamery fungují nejpřesněji, když je slunce vysoko nad horizontem, určitá hraniční výška slunce je 30° nad obzorem. V případě, že bude měření probíhat pod touto hodnotou, může docházet ke zkreslování naměřených dat. Výsledky některých studií tvrdí, že současné senzory jsou již schopny měřit i s nižší výškou slunce. [36] Multispektrální kamery jsou ideální pro použití v zemědělství, při kontrolách vodních zdrojů nebo při hodnocení kvality půdy. Ač ve srovnání s hyperspektrální kamerou není schopna identifikovat konkrétní problém, zvládne na něj kamera upozornit a lokalizovat ho. Multispektrální kamera v jednom okamžiku snímá odděleně záření pro určitý počet pásem. Výsledkem je pak několik snímků, které jsou pořízeny v jeden okamžik. Pro následnou práci s naměřenými daty slouží pak vegetační indexy. [37]

1.4.3 Data z multispektrální kamery

Po nasnímání dat multispektrální kamerou je potřeba materiál správně zpracovat. V případě, že je pořízeno více snímků při mapování oblasti, je nutné za pomoci speciálního softwaru vytvořit jejich složením jednu ortofoto mapu, se kterou je možné dále pracovat. Podmínky pro skládání snímků jsou popsány v kapitole 1.2.4.

Při práci s daty z multispektrálních kamer se využívají vegetační indexy. Jedná se o metodu, u které za pomoci relativně jednoduchých výpočtů lze získat biofyzikální vlastnosti snímaného povrchu. Princip fungování indexů je založený na kombinaci odrazivosti různých nasnímaných spekter. Odrazivost je udávána v procentech a jedná se o schopnost povrchu odrážet určitou část elektromagnetického spektra. [38] Indexů je prakticky nekonečný počet, protože záleží na tom, jak se budou různá spektra kombinovat. [37] Nejpoužívanější indexy jsou uvedeny níže.



NDVI

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) je často používaný index. Používá se k hodnocení zdravotního stavu rostlin. Čím jsou rostliny zdravější, tím se intenzita odrazivosti v NIR zvyšuje a snižuje se v červeném pásmu. To znamená, že zdravá rostlina (rostlina s velkým množstvím chlorofylu a buněčných struktur) aktivně absorbuje červené světlo a odráží blízké infračervené (NIR). Nezdravá rostlina pak udělá pravý opak. Tento vztah mezi světlem a chlorofylem je způsob, jak lze pomocí NDVI rozlišit zdravou rostlinu od nemocné. [39]

Vzorec NDVI (viz rovnice 1.3) kombinuje informace dostupné v červeném a NIR pásmu do jediné hodnoty. Dělá to odečtením odrazivosti v červeném spektrálním pásmu od odrazivosti v NIR a následným vydělením jejich součtem.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1.3)$$

Hodnota NDVI bude vždy ležet mezi -1 a +1. Hodnoty mezi -1 a 0 označují mrtvé rostliny nebo anorganické předměty, jako jsou kameny, cesty a domy. Hodnoty NDVI pro živé rostliny se pohybují mezi 0 až 1, přičemž 1 je nejzdravější a 0 je nejméně zdravá. Zjednodušeně lze rozdělit rostliny dle hodnoty NDVI na zdravé (NDVI od 1 do 0,6), středně zdravé (NDVI od 0,6 do 0,3) a nezdravé (NDVI od 0,3 do 0). Pro každý pixel na nasnímaném obrázku lze určit konkrétní hodnotu indexu. NDVI je indikátorem zdraví rostliny, ale není to způsob, jak diagnostikovat konkrétní stav. Slouží tak k lokalizaci problému a je třeba provést pak další širší analýzu. [40]

CVI

CVI (Chlorophyll Vegetation Index) má zvýšenou citlivost na obsah chlorofylu. Jeho výpočet je znázorněn rovnicí 1.4. Je vhodný při hodnocení vegetace v nízkém plošném zastoupení. Poměr červená/zelená je použit k odhadu vývoje listů. U půdy nabývá zpravidla hodnot vyšších než jedna.

$$CVI = \frac{NIR}{GREEN} \cdot \frac{RED}{GREEN} \quad (1.4)$$

Oproti tomu poměr červená/zelená je u vegetace kvůli maximální absorpci červené a minimální absorpci zelené části spektra menší než jedna. [41]

NDRE index

NDRE (Normalized Difference Red Edge) je také metoda měření množství chlorofylu v rostlinách. Nejlepší čas pro využití NDRE je střední až pozdní vegetační období, kdy jsou



rostliny zralé a připravené ke sklizni. V tomto okamžiku by bylo použití jiných indexů méně efektivní. Tento index využívá red edge (RE) pásmo a jeho výpočet je znázorněn rovnicí 1.5. Toto pásmo se nachází mezi pásmy NIR a RED a má vlnovou délku v rozmezí od 705 do 745 nm.

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE} \quad (1.5)$$

Standardně se používá v hodnotách od -1 do 1 a jeho interpretace je podobná jako u NDVI. -1 až 0,2 označuje holou půdu nebo vyvíjející se plodinu, 0,2 až 0,6 lze interpretovat buď jako nezdravou rostlinu, nebo jako plodinu, která ještě není zralá, a 0,6 až 1 jsou dobré hodnoty indikující zdravé, zralé a dozrávající plodiny. [42]

OSAVI

OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index) mapuje hustoty vegetace. Je odolný vůči proměnlivému jasů půdy a má zvýšenou citlivost na vegetaci. Tento index se nejlépe používá v oblastech s relativně řídkou vegetací. OSAVI je speciální případ Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). Využívá stejně jako NDVI odrazivost v blízkém infračerveném (NIR) a červeném (RED) pásmu s tím, že je zde přidán optimalizovaným koeficientem úpravy půdy (Y). Jeho výpočet je zobrazen rovnicí 1.6.

$$OSAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + Y} \quad (1.6)$$

Ideální koeficient úpravy půdy byl zvolen na hodnotu 0,16. Jako každý normalizovaný rozdílový index se hodnoty OSAVI mohou pohybovat od -1 do 1. Vysoké hodnoty OSAVI znamenají hustší a zdravější vegetaci, zatímco nižší hodnoty znamenají menší vitalitu. [43]

1.4.4 Aktuální nabídka multispektrálních kamer

V současné době existuje několik různých multispektrálních kamer od různých výrobců. Následující odstavce se budou zabývat aktuální nabídkou a rozdíly mezi jednotlivými druhy multispektrálních kamer.

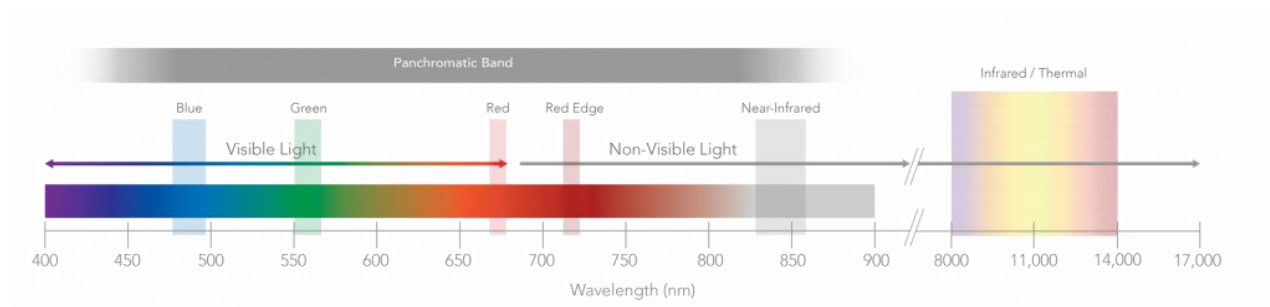
Altum-PT

Tato kamera je vyráběna společností MicaSense. Jedná se o firmu zabývající se dálkovým průzkumem země pomocí dronů už od roku 2014. Za tu dobu vznikly různé druhy multispektrálních kamer jako jsou RedEdge-MX nebo RedEdge-P. Jejich nejnovější multispektrální kamera je Altum-PT. Její parametry jsou uvedeny v tabulce 3. [44]

Tabulka 3. Specifikace kamery Altum-PT [44]

Parametry	
Váha	577 g
Rozměry	110 x 80 x 69 mm
Spektrální pásma	Modrá 475(32) nm, Zelená 560(27) nm, Červená 668(14) nm, Red Edge 717(12) nm, NIR 842(57) nm, Termovize 7.5-13.5 μ m
RGB výstup	12.4 MP
Rozlišovací schopnost pro multispektrální kameru	5.28 cm na pixel ve 120 m
Rychlost snímání	2 snímky za vteřinu
Cena	360 000 Kč

Kamera Altum využívá ke zkvalitnění snímků kalibrační panel (CRP – Calibrated Reflectance Panel). Jedná se o malou destičku s QR kódem, kterou je třeba nasnímat vždy před a po zahájení měření, a to ideálně z výšky jednoho metru v otevřeném prostoru tak, aby na ni dopadalo světlo. Tato destička je unikátní ke každému senzoru a slouží ke kalibraci naměřených dat. Rozsah jednotlivých spektrálních pásem pro Altum je znázorněn na obrázku 12. [44]



Obrázek 12. Zobrazení pásem senzoru Altum-PT [44]

Phantom 4 Multispectral

Mezi hlavní společnosti na trhu v oblasti dronů patří bezpochyby firma DJI. Tato společnost nabízí k multispektrálnímu snímání set dronu a kamery. Jedná se o Phantom 4 RTK vybavený multispektrální kamerou snímající pět pásem. Parametry tohoto setu jsou uvedeny v tabulce 4. [45]



Tabulka 4. Specifikace setu Phantom 4 Multispectral [45]

Parametry	
Váha	1487 g
Rozměry	350 mm (dron diagonálně)
Spektrální pásma	Modrá 450(16) nm; Zelená 560(16) nm; Červená 650(16) nm; Red edge 730(16) nm; NIR 840(26) nm
Rozlišovací schopnost pro multispektrální kameru	6,35 cm na pixel ve 120 m
Rychlost snímání	1 snímek za vteřinu
Cena	165 000 Kč

Tento senzor má zabudovaný sluneční senzor přímo na dronu a na základě informací z něj kalibruje naměřená data. Zároveň je dron vybavený možností příjmu RTK pro zpřesnění informací z GPS. [45] Tento způsob byl popsán v podkapitole 1.2.4.

Parrot Sequoia

Jedná se o samostatný senzor, který nabízí snímání ve čtyřech pásmech. Parametry tohoto senzoru jsou uvedeny v tabulce 5. Kromě samotné kamery je třeba na dron upevnit i sluneční senzor, který váží 35 g a má rozměry 39,6 x 18,8 x 47 mm. Tento senzor musí být upevněn na horní straně dronu. [46]

Tabulka 5. Specifikace kamery Parrot Sequoia [46]

Parametry	
Váha	72 g
Rozměry	59 x 29,5 x 41 mm
Spektrální pásma	Zelená 550(40) nm; Červená 660(40) nm; Red edge 735(10) nm; NIR 790(40) nm
RGB výstup	16 MP
Rozlišovací schopnost pro multispektrální kameru	14,8 cm na pixel ve 120 m
Rychlost snímání	1 snímek za vteřinu (interní paměť) 1 snímku za 1,5 vteřiny (na SD kartu)
Cena	94 000 Kč



LaQuinta

Jedná se o hybridní kameru společnosti DB2 Vision, která zaznamenává čtyři pásma pomocí jedné čočky. Stejně jako u předchozí kamery i tady je zapotřebí připojit a připevnit na dron kalibrační sluneční senzor. Jedná se o levnou variantu multispektrální kamery, která je ale víceméně kompatibilní pouze s drony Yuneec H520/H520E. Parametry této kamery jsou uvedené v tabulce 6. [47]

Tabulka 6. Specifikace kamery LaQuinta [47]

Parametry	
Váha	159 g
Rozměry	78 x 58 x 56 mm
Spektrální pásma	Modrá 430(40) nm; Zelená 570(30) nm; Červená 660(30) nm; NIR 860(20) nm
RGB výstup	4,1 MP
Rozlišovací schopnost pro multispektrální kameru	Neuvádí se
Rychlost snímání	1,5 snímku za vteřinu
Cena	75 000 Kč

1.4.5 Srovnání vybraných kamer

Určení nejlepší kamery není až tak jednoduché. Vždy je důležité zvolit, na co se bude kamera používat. Jakožto nejrobustnější řešení se jeví kamera Altum-PT od společnosti MicaSense. Tato kamera má jako jediná k dispozici měření pomocí termovize v infračerveném pásmu. Oproti tomu set Phantom 4 Multispectral jako jediný nabízí kompletní řešení dron a senzor. Při využití Phantomu se není potřeba starat o pořízování dronu, upevňování senzoru, případně přidělování slunečního senzoru. Společnost DJI toto nabízí již v hotové variantě. Pro praktickou část této diplomové práce byl vybrán Phantom 4 Multispectral a senzor Altum-PT. Celkové srovnání jednotlivých kamer je ukázáno v tabulce 7.



Tabulka 7. Srovnání vybraných multispektrálních kamer [autor]

	Altum PT	Phantom 4 Multispectral	Parrot Sequoia	LaQuinta
Počet sledovaných pásem	6	5	4	4
Nutnost zakoupení dronu	Ano	Ne	Ano	Ano
Možnost umístění na různé drony	Ano	Ne	Ano	Omezená
Sluneční senzor	Pozemní	Zabudovaný v dronu	Externí na dron	Externí na dron
Oblast použití	Velká	Střední	Malá	Malá
Rychlost snímání	2 snímky/s	1 snímek/s	0,66 snímku/s	1,5 snímku/s
Cena	360 000 Kč	165 000 Kč	94 000 Kč	75 000 Kč



2 Používaná technika a metodika měření

2.1 Parametry použitých dronů

Pro potřeby práce byly použity senzory Altum-PT od společnosti MicaSense a Phantom 4 Multispectral. Kvůli problémům s globálními dodavatelskými řetězci nebylo nakonec možné provést měření se zamýšleným třetím senzorem Parrot Sequoia, a tak se práce dále zabývá měřením pouze s uvedenými dvěma. V kapitole 1.4.4 byly ukázány parametry vybraných multispektrálních kamer. V následujících podkapitolách jsou rozebrány parametry dronů využitých při praktickém měření.

2.1.1 DJI Phantom 4

Phantom 4 Multispectral je speciální variantou dronu Phantom 4. Jedná se o kvadrokoptéru, která je poměrně lehká a snadno použitelná. Její parametry jsou uvedené v tabulce 8. Dron má v sobě integrovaný sluneční senzor, který umožní zvýšení přesnosti snímaných multispektrálních dat. Tento dron také poskytuje připojení k RTK pro zpřesnění zaznamenaných dat. [48]

Tabulka 8. Parametry dronu Phantom 4 Multispektral [48]

Parametry	
Váha	1 487 g
Rozměry	Diagonálně bez vrtulí: 350 mm
Dosah (CE)	5 000 m
Maximální rychlost	50 km/h
Maximální čas letu	27 min
Maximální síla větru	10 m/s
Rozsah provozní teploty	0° - 40 °C
Aplikace pro ovládání	DJI GS PRO
Cena	165 000 Kč ¹

2.1.2 DJI Matrice 300

Pro použití vybraného senzoru Altum-PT byl zvolen dron Matrice 300 od firmy DJI. Jedná se o dron se širokou škálou uplatnění. Díky jeho vyšší hmotnosti (v porovnání s Phantomem 4),

¹ Cena platí pro model Phantom 4 Multispektral a jedná se tak o cenu dronu včetně multispektrálního senzoru



nosnosti až 2,7 kg a různým možnostem uchycení je možné na tento dron upevnit různé senzorové vybavení. I tento dron poskytuje připojení k RTK. Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 9. [49] Tento dron byl využitý v kombinaci se senzorem Altum-PT.

Tabulka 9. Parametry dronu Matrice 300 [49]

Parametry	
Váha	6 300 g
Rozměry	810 x 670 x 430 mm (rozložený)
Dosah (CE)	8 000 m
Maximální rychlost	83 km/h
Maximální čas letu	55 min
Maximální síla větru	15 m/s
Rozsah provozní teploty	-20° - 50 °C
Aplikace pro ovládání	DJI Pilot
Cena	290 000 Kč

2.2 Výběr lokality

Pro praktickou část této diplomové práce byla vybrána skládka komunálního odpadu provozovaná společností EKOSO Trhový Štěpánov, s.r.o. Tato společnost se zabývá aktivitami odpadového hospodářství už od roku 1995. Samotná skládka je provozována asi kilometr na severovýchod od obce Trhový Štěpánov, které se nachází asi 60 km na jihovýchod od Prahy. Společnost zde zajišťuje mimo skládky odpadů i mezisklad nebezpečného odpadu, kompostárnu nebo sběrný dvůr vyřazených elektrozařízení. [50]

Skládka je aktivní od roku 1996 a aktuálně je v plánu provoz až pěti etap. V současné době probíhá třetí etapa skládky, přičemž u předchozích dvou již byla provedena jejich rekultivace (první etapa v roce 2010 a druhé v roce 2020). Rozmístění etap je zobrazeno na obrázku 13. Proces rekultivace na skládce byl realizován tak, že poslední vrstva odpadu byla překryta zeminou, izolována od okolního prostředí ochrannou a nepropustnou fólií a potom opět překryta zeminou ve vrstvě 1 m. Následně byla pak skládka osázena zelení a odplyněna. [50]

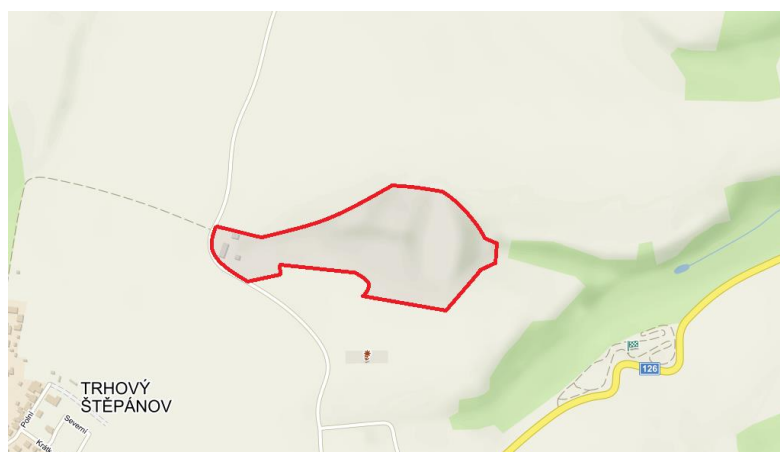


Obrázek 13. Rozložení etap skládky v měřené oblasti [autor]

Tato skládka byla vybrána z důvodu dobré lokality pro provoz dronu a zároveň vhodného stavu skládky z hlediska průběhu její rekultivace. Vzhledem k umístění a rozložení jejích etap je pro měření ideální.

2.3 Legislativní předletová příprava pro měření

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.3.4, před každým letem s bezpilotním prostředkem je potřeba provést důkladnou předletovou přípravu, aby provoz probíhal legálně a nedocházelo ke vzniku jakéhokoliv nebezpečí. V rámci této přípravy byly využity popsané nástroje používané pro předletovou přípravu. Oblast skládky je znázorněna červeně na obrázku 14.



Obrázek 14. Oblast skládky u Trhového Štěpánova [51]

Při kontrole mapového podkladu v okolí vybraného místa měření se nenachází žádné objekty, které by mohly být ohroženy nebo by provoz dronu jakkoliv narušily. Nejbližší se nachází Motokrosová trať Trhový Štěpánov a fotovoltaická elektrárna. Oba objekty jsou však



v bezpečné vzdálenosti několik stovek metrů. Vzhledem k přilehlé elektrárně je zde umístěno i vedení vysokého napětí, které je ovšem také v bezpečné vzdálenosti od místa měření.

Další z leteckých nástrojů využitých během předletové přípravy byla letecká mapa Dronview. Na ní bylo zjištěno, že oblast měření se nachází v dočasně vyhrazeném prostoru LKTS26 Pravoniny, který byl v období měření (29. 3. 2022) aktivní, konkrétně od 14 do 18 hodin. Vertikální hranice tohoto prostoru je ovšem od 300 ft do 1000 ft, což umožňuje provoz v této oblasti do výšky okolo 90 m. Provoz nad hranici 90 m AGL (tedy v tomto dočasně vyhrazeném prostoru) je zakázán. Žádný další speciální vzdušný prostor už se v oblasti měření nevyskytuje.

Pomocí mapy Drusop bylo prozkoumáno místo měření i jeho přilehlé okolí a bylo zjištěno, že se zde nenachází žádné chráněné krajinné území. Z hlediska zajištění bezpečnosti provozu v areálu skládky a získání samotnému povolení od správce objektu byl kontaktován jednatel společnosti a provozní ředitel Ing. Roman Farion, s kterým byl prodiskutován zamýšlený provoz.

Po provedení výše uvedených kroků legislativní předletové přípravy bylo vyhodnoceno, že provoz dronu v oblasti skládky u obce Trhový Štěpánov spadá do otevřené kategorie. Omezení pro provoz v této kategorii nejsou pro provedení měření limitující. V závislosti na hmotnosti používaného dronu bude pak provoz spadat do konkrétní kategorie, kde i pravidla „nejpřísnější“ podkategorie OPEN A3 neomezují průběh samotného měření. Zároveň je pro provoz dostačující doklad o absolvování online výcviku dálkově řídicího pilota.

2.4 Provedení měření

Samotné měření bylo na vybraném místě provedeno dne 29. 3. 2022. Původním plánem bylo provést sérii letů, při kterých by během hodiny byla provedena tři měření pokaždé s jiným senzorem. Vzhledem k problémům při dodávce jednoho ze senzorů byl nakonec postup upraven na měření každou půlhodinu, přičemž se střídal let s Phantomem 4 Multispectral a DJI M300 vybaveným senzorem Altum-PT. Tímto způsobem bylo prováděno měření během jednoho dne a to od 12:00 do 18:00. Jako oblast zájmu byla vybrána část skládky, která zahrnuje její první, druhou i třetí etapu. Jednalo se o oblast velikosti přibližně 1,1 ha. Parametry pro výstupní data byly nastaveny pro oba senzory stejně. Na jejich základě pak byly upraveny parametry daného letu. Před zahájením jednotlivých letů byly ve vybrané oblasti zaměřeny čtyři vlíčovací body. Jejich poloha je vyznačená na obrázku 15. Tyto body byly přesně lokalizovány pomocí GNSS přijímače SOUTH GALAXY G1 plus IMU.



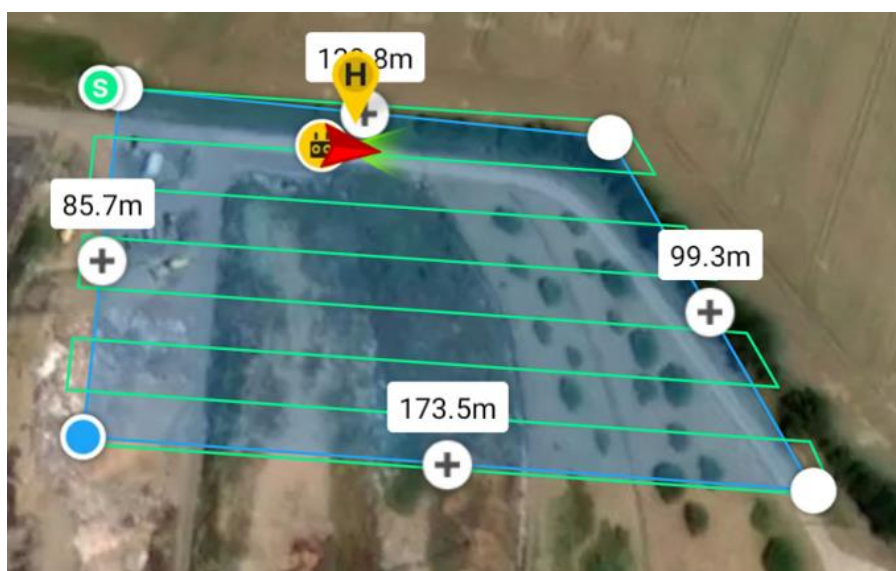
Obrázek 15. Poloha vlíčovacích bodů [autor]

Pro Phantom 4 Multispectral byl automatický let vytvořen pomocí aplikace DJI GS PRO. Trasa pro snímání byla nastavena jako paralelní k hlavní ose oblasti. Režim snímání byl nastaven na Hover&Capture at Point, což znamená, že dron vždy při focení snímku bude viset na místě bez dopředného pohybu. Režim letového kurzu byl nastaven tak, že dron byl po celou dobu snímání orientován stejně. Rychlost dopředného pohybu dronu byla nastavena na 6 m/s a výška na 57,5 m AGL od místa startu. Touto výškou bylo pro tento senzor dosaženo rozlišení výsledných snímků 3 cm/pixel. Dle aplikace byl čas letu stanoven na 8 minut 59 sekund, na což je dostatečná pouze jedna baterie. Překrytí jednotlivých snímků bylo nastaveno na 80 % jak pro boční, tak i přední přesahy. Celkově se jednalo o 142 snímků. Zobrazení mise je na obrázku 16.



Obrázek 16. Plán letu pro Phantom 4 Multispectral v aplikaci DJI GS PRO [autor]

Pro dron DJI M300 vybavený senzorem Altum-PT byl let naplánovaný v aplikaci DJI Pilot. Zde byla trasa nastavena stejně, tedy paralelně k hlavní ose oblasti. Byl použit režim kontinuálního snímání, tedy bez zastavování dronu při pořízení snímku. Rychlost dopředného pohybu dronu byla nastavena na 3 m/s. Díky kvalitnějšímu senzoru byla výška letu vypočtena na 70 m, což odpovídalo stejnému rozlišení nasnímaných fotek tedy 3 cm/pixel. Předpokládaný počet snímků byl rovněž 144, přičemž odhadovaná doba snímání podle aplikace byla určena na 8 minut. Zobrazení naplánované mise je na obrázku 17. V případě měření se senzorem Altum-PT je vždy potřeba před zahájením a po skončení letu vyfotit kalibrační panel. Vyfocení tohoto panelu musí být provedeno z výšky přibližně jednoho metru, přičemž panel nesmí být nijak zastíněn. Kalibrační panel by se měl nacházet v otevřeném prostoru. Při pořizování těchto kalibračních snímků je vhodné držet dron v ruce a stát zády ke slunci tak, aby sluneční záření dopadalo na panel, ale světlo se neodráželo od oblečení nebo od jakýchkoli okolních předmětů.



Obrázek 17. Plán letu pro DJI M300 se senzorem Altum-PT v aplikaci DJI Pilot [autor]

V průběhu celého měření byly zaznamenávány okolní podmínky, aby mohl být případně určen jejich vliv na jednotlivá měření. Informace o provedených letech a okolních podmínkách jsou uvedeny v tabulce 10. Během měření vše probíhalo podle plánu. Jediné komplikace způsobovalo krátké přerušení mise prováděné s Phantomem 4 Multispectral, ke kterému došlo vždy při pořízení 99. snímku. V ten moment bylo pouze nutné ručně zadat pokračování mise. Z toho důvodu je i doba letu více kolísavá ve srovnání s Altumem.

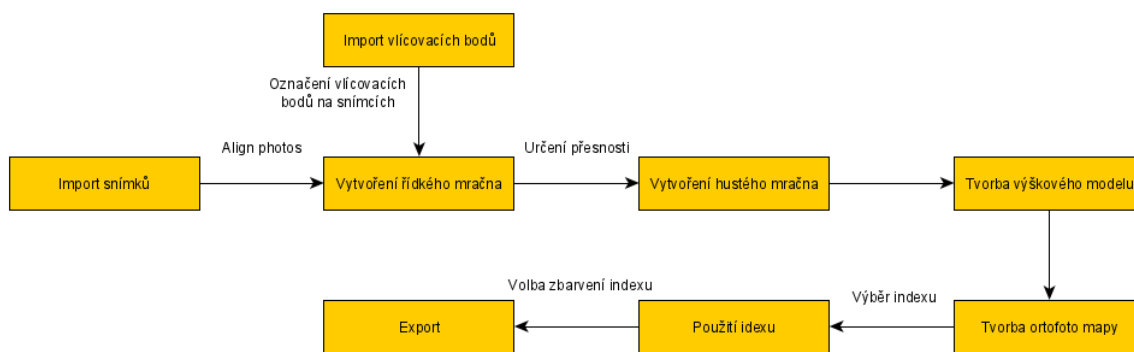


Tabulka 10. Informace o provedených letech a okolních podmínkách [autor]

Let číslo	Dron	Čas startu	Doba letu	Výška slunce	Počasí	Teplota	Vítr (na zemi)	Kp-index
1	P4M	12:00	11:13	42°	Zataženo	13 °C	2 m/s	1
2	M300	12:30	07:57	43°	Zataženo	13 °C	2 m/s	1
3	P4M	13:00	11:10	44°	Zataženo	14 °C	3 m/s	1
4	M300	13:30	07:58	43°	Zataženo	14 °C	3 m/s	1
5	P4M	14:00	11:27	42°	Zataženo	14 °C	3 m/s	1
6	M300	14:30	07:59	40°	Zataženo	14 °C	3 m/s	1
7	P4M	15:00	11:29	38°	Zataženo	15 °C	3 m/s	1
8	M300	15:30	07:59	34°	Zataženo	15 °C	3 m/s	1
9	P4M	16:00	11:29	31°	Zataženo	15 °C	3 m/s	1
10	M300	16:30	08:00	26°	Zataženo	15 °C	3 m/s	1
11	P4M	17:00	11:19	22°	Zataženo	14 °C	3 m/s	1
12	M300	17:30	07:57	17°	Zataženo	14 °C	4 m/s	1
13	P4M	18:00	11:15	13°	Zataženo	13 °C	4 m/s	1

2.5 Zpracování dat

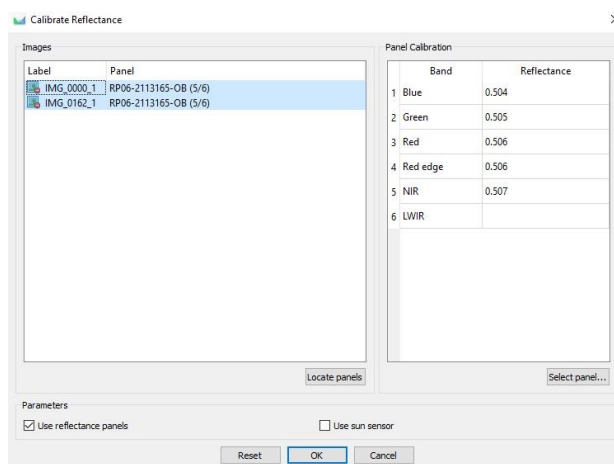
Postup při zpracování dat z obou senzorů byl identický a byl proveden za pomoci softwaru Agisoft. Schéma zpracování dat je uvedeno na obrázku 18.



Obrázek 18. Schéma pro zpracování snímků v softwaru Agisoft [autor]

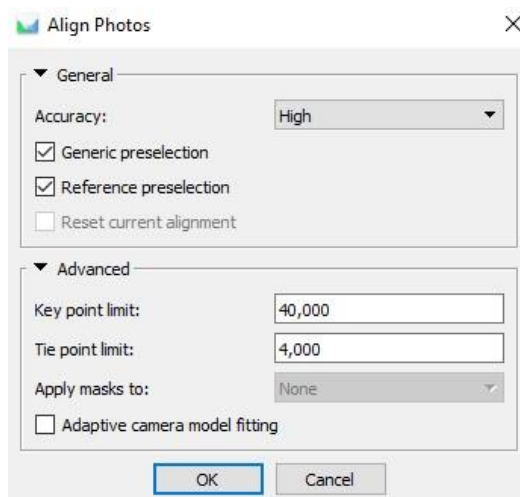
Prvním krokem při zpracování dat bylo jejich nahrání do softwaru. Vždy bylo potřeba vybrat všechny snímky pro daný let. Při importu multispektrálních dat bylo potřeba vybrat možnost Create Multispectral Cameras, aby data zůstala ve své multispektrální formě. V případě dat ze senzoru Altum-PT byl vždy na prvním a posledním snímku zachycen kalibrační panel. Software ho automaticky rozpozná a nabídne možnost kalibrace. V případě že ne, bylo třeba tyto snímky vybrat ručně a data zkalibrovat. [52]

Po nahrání snímků byla automaticky vytvořena složka s veškerými snímky. Zároveň byla taky vytvořena podsložka „Calibration images“ obsahující snímky s kalibračním panelem. K tomuto rozřídění dojde tehdy, když meta-data snímku uvádí, že snímek obsahuje kalibrační panel a je tak určen ke kalibraci. V takovém případě se zobrazí dialogové okno „Calibration images were moved to separate folder“ a snímky jsou přemístěny do podsložky. Pokud tak nestalo, bylo třeba kalibrační panely detekovat manuálně. To bylo možné provést v panelu „Tools“ pomocí možnosti „Calibrate Reflectance“. Toto okno je zobrazeno na obrázku 19 a ukazuje kalibrační snímky a hodnoty kalibrace jednotlivých pásem. [52]



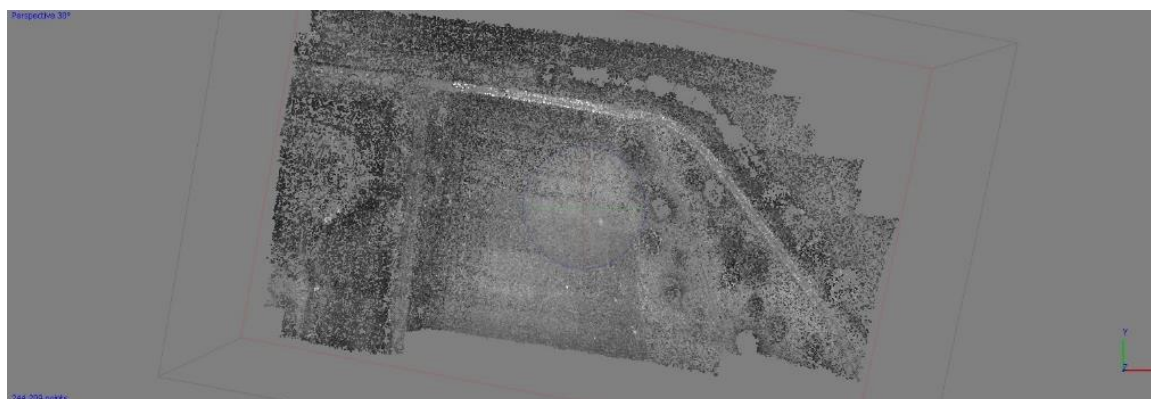
Obrázek 19. Okno „Calibrate Reflectance“ při využití kalibračního panelu pro kalibraci snímků [autor]

Po načtení a zkalibrování snímků se pomocí funkce „Align Photos“ orientují snímky na základě vnitřní orientace. Tím bylo vytvořeno řídké mračno bodů. V dialogovém okně (viz obrázek 20) bylo možné nastavit parametry tohoto kroku. „Accuracy“ určuje přesnost, s jakou mají být prvky vnější orientace odhadnuty. „Generic Preselection“ odhaduje sousedící páry snímků a zrychluje tak celý proces výpočtu. „Key point limit“ nastavuje maximální množství klíčových bodů na snímku a „Tie point limit“ definuje maximální počet spojovacích bodů na snímku. [52]

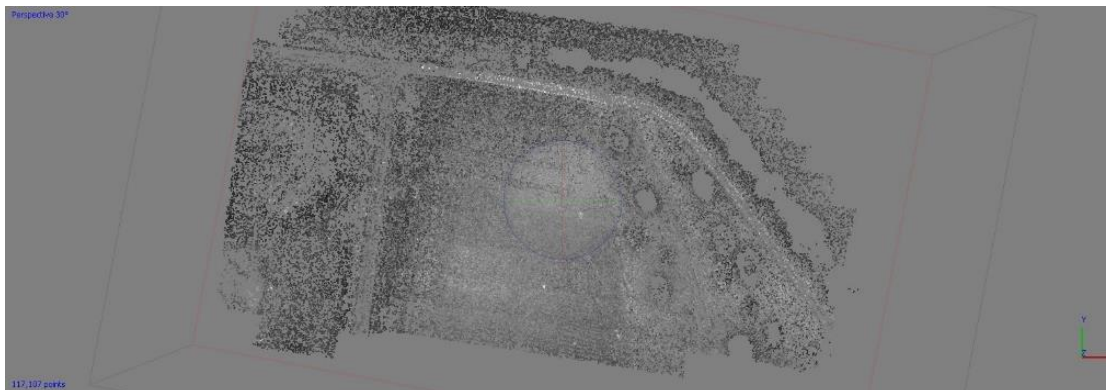


Obrázek 20. Dialogové okno „Align Photos“ se zadanými parametry pro tvorbu řídkého mračna bodů [autor]

Po vytvoření řídkého mračna bylo zapotřebí provést vyčištění obrazu pomocí funkce „Gradual Selection“, která pomůže odstranit přebytečné a chybně vypočtené body. [52] Porovnání mračna před použitím a po použití této funkce je znázorněno na obrázku 21 a 22.

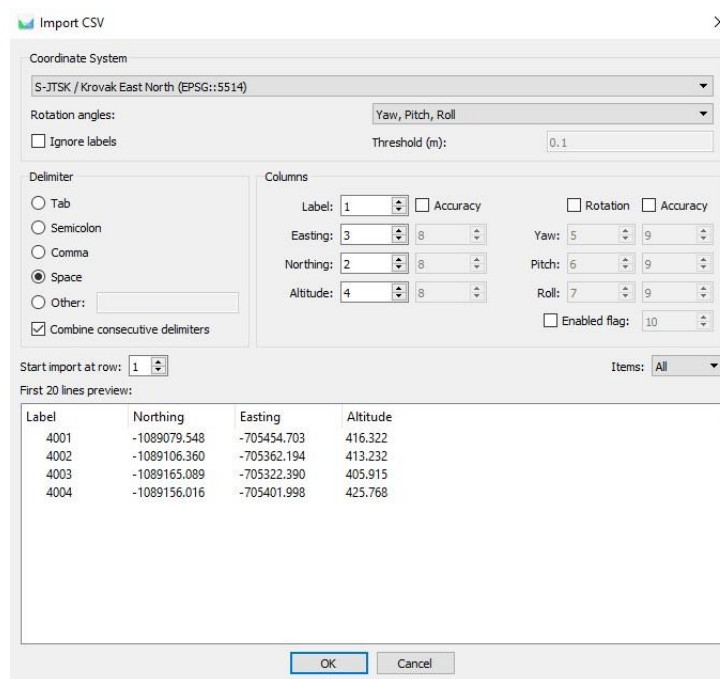


Obrázek 21. Porovnání mračna před použitím funkce „Gradual Selection“ [autor]



Obrázek 22. Porovnání mračna po použití funkce „Gradual Selection“ [autor]

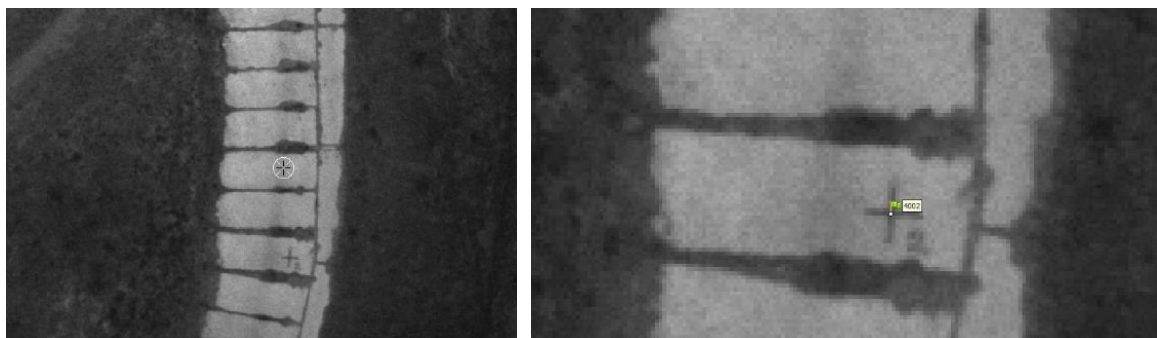
Když bylo připraveno řídké mračno bodů, bylo potřeba importovat vlčovací body. To bylo provedeno nahráním textového dokumentu se souřadnicemi se všemi předem zaměřenými vlčovacími body. Vždy bylo potřeba dávat pozor, aby souřadný systém, ve kterém byly zapsány souřadnice vlčovacích bodů, odpovídal souřadnému systému, který je použit v řídkém mračnu bodů. [52] Dialogové okno pro import vlčovacích bodů je zobrazeno na obrázku 23.



Obrázek 23. Dialogové okno pro import vlčovacích bodů [autor]

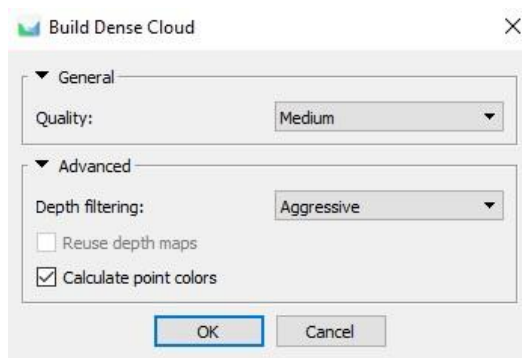
Umístěné vlčovací body bylo potřeba srovnat do místa, kde byly zaměřeny. To bylo provedeno pomocí odfiltrování snímků, kde se nachází jeden z vlčovacích bodů. Ten byl ručně přesunut do místa, kde byl zaměřen. Rozdíl v umístění před a po ruční korekci je zobrazen na obrázku 24. Toto bylo potřeba provést pro všechny vlčovací body, a to pro každý minimálně

na dvou snímcích, kde se daný bod vyskytuje. Díky tomu byly pak body přesně umístěny na zaměřená místa. [52]



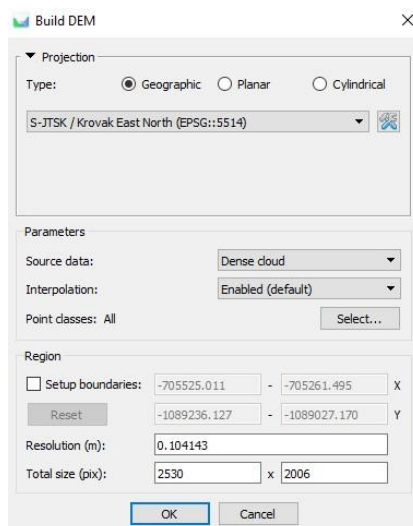
Obrázek 24. Umístění vlíčovacího bodu před (vlevo) a po (vpravo) korekci [autor]

Po přesné korekci všech vlíčovacích bodů a nastavení preference přesnosti pro vlíčovací body došlo ke zmenšení chyby a zpřesnění snímků. Následně bylo vypočítané husté mračno bodů. Husté mračno bodů bylo vytvořeno funkcí „Build Dense Cloud“. V dialogovém okně je možnost zvolit kvalitu hloubkových map „Quality“. „Ultra High“ pracuje s plným rozlišením snímku, ale zpracování je pak velmi náročné na výpočetní výkon. Každý snížený zvolený parametr v možnosti „Quality“ znamená o jednu úroveň nižší rozlišení snímku pro zpracování. Funkcí „Depth filtering“ bylo filtrováno mračno o odlehlé body. „Mild“ je využíván, pokud se jedná o členité objekty, „Aggressive“ pro hladké objekty a „Moderate“ je jejich určitým kompromisem. [52] Použité parametry při zpracování jsou znázorněny na obrázku 25.



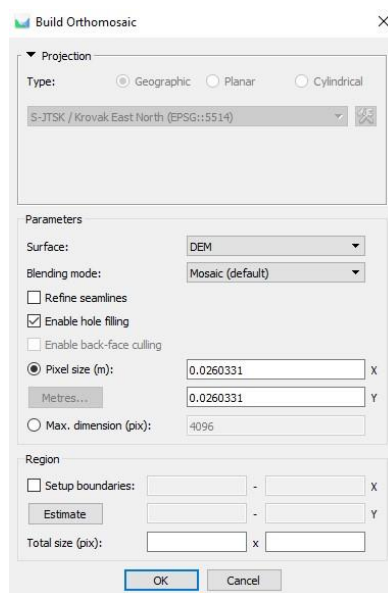
Obrázek 25. Dialogové okno pro vytvoření hustého mračna bodů [autor]

Dalším krokem bylo vytvoření výškového modelu. Agisoft umožňuje generovat a vizualizovat digitální výškový model, který představuje model povrchu jako pravidelnou mřížku s hodnotami výšky. Tento model lze rastrovat z hustého mračna bodů, řídkého mračna bodů nebo z polygonových sítí. Tvoří se pomocí funkce „Build DEM“ v panelu „Workflow“. V dialogovém okně pak bylo třeba zvolit správný souřadný systém a nastavit parametry. Zde bylo nutné vybrat správný zdroj pro výsledný digitální výškový model a zvolit interpolaci. [52] Nastavení parametrů pro tuto práci je zobrazeno na obrázku 26.



Obrázek 26. Dialogové okno pro vytvoření digitálního výškového modelu [autor]

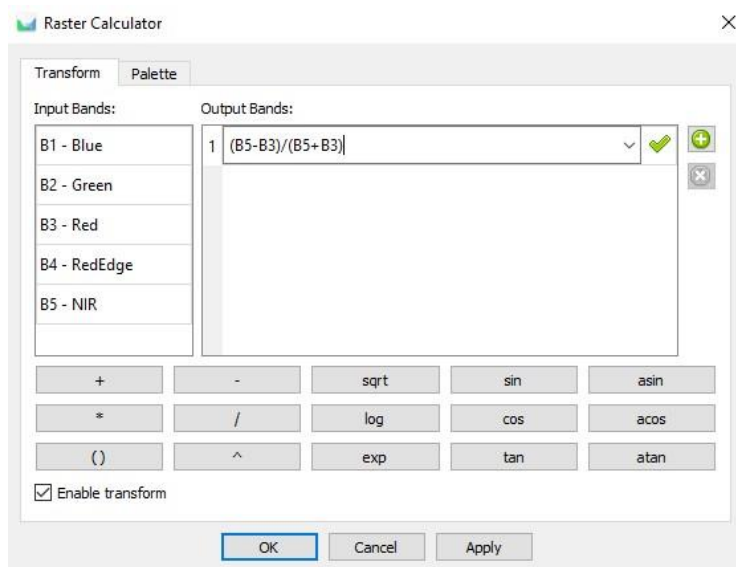
Pro vytvoření výsledné ortofoto mapy bylo třeba mít připravený digitální výškový model nebo polygonovou síť. Pro data pořízená z UAV je vhodnější použít právě vytvořený digitální výškový model. Výsledná ortofoto mapa se získává ortorektifikací původních snímků. Jedná se o převedení do zvoleného kartografického zobrazení, kde se s použitím geometrické korekce odstraní chyby vzniklé při pořízení snímku, případně způsobené nerovnostmi terénu. [52] Parametry pro vytvoření použité při zpracování dat jsou zobrazeny na obrázku 27.



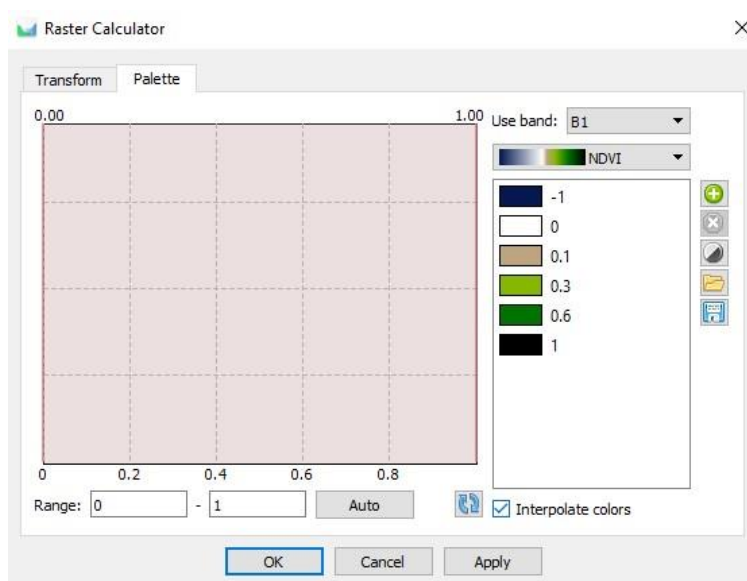
Obrázek 27. Dialogové okno pro vytvoření ortofoto mapy [autor]

Po vytvoření ortofoto mapy přišel na řadu poslední krok, tedy aplikace vegetačního indexu. Pro práci byl vybrán základní index NDVI, který dokáže určit zdraví vegetace, a tudíž je pak možné lokalizovat místo, kde dochází k průniku škodlivých látek do půdy. Pro úpravu ortofoto mapy pomocí tohoto indexu bylo třeba v záložce „Tools“ zvolit možnost „Set Raster

Transform“. Následně v dialogovém okně „Raster Calculator“ lze nadefinovat příslušnou rovnici pro konkrétní index, v tomto případě rovnici pro NDVI. [52] Tento index včetně rovnice byl popsán v podkapitole 1.4.3. Nastavení pro obarvení pomocí NDVI indexu je zobrazeno na obrázku 28 a 29.



Obrázek 28. Nastavení rovnice indexu [autor]



Obrázek 29. Nastavení obarvení NDVI indexu [autor]

Export výsledné obarvené ortofoto mapy byl vykonaný ve „Workspace“ tlačítkem „Export Orthomosaic“. Exportovat lze v různých formátech jako je jpg, png, tif atd. [52] Pro všechny lety byl proveden stejný popsáný postup ke zpracování dat. Jediným rozdílem bylo provedení kalibrace snímků pomocí kalibračního panelu při zpracování snímku z Altumu, které



u zpracování dat z Phantomu 4 Multispectral nemohlo být provedeno, protože jím dron není vybaven.

Časová výpočetní náročnost zpracování snímků z různých senzorů je velice podobná. Obecně výpočet softwaru trval průměrně 11 minut a 4 sekundy. Výpočetní čas u dat z Phantomu 4 Multispectral byl v průměru 10 minut a 4 sekundy a u Altumu 12 minut a 15 sekund. Tento relativně nepatrný rozdíl v délce výpočtů je daný tím, že množství fotografií pořízených senzorem Altum-PT při jednom měření bylo větší. Doba zpracovávání konkrétních dat záleží na hardwarovém vybavení konkrétního počítače, na kterém vypracování snímků probíhá.

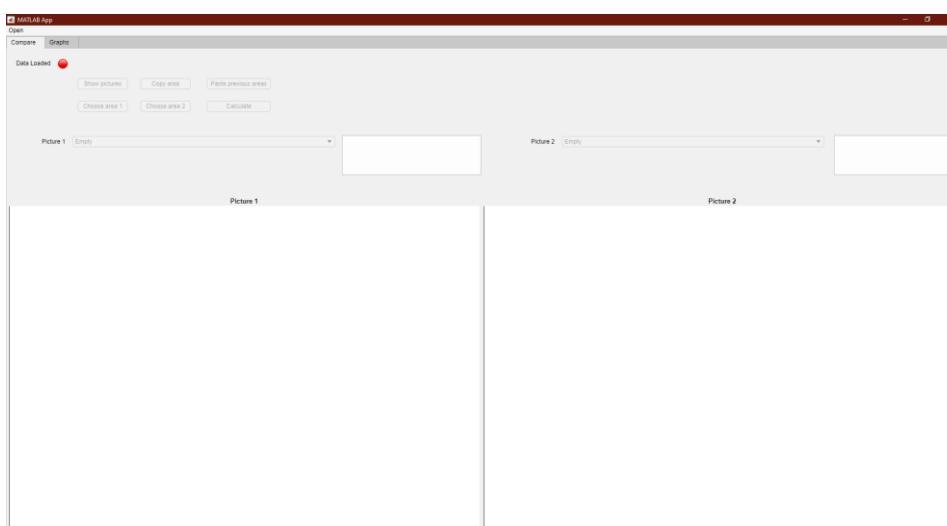
3 Výsledky

3.1 Aplikace pro porovnání

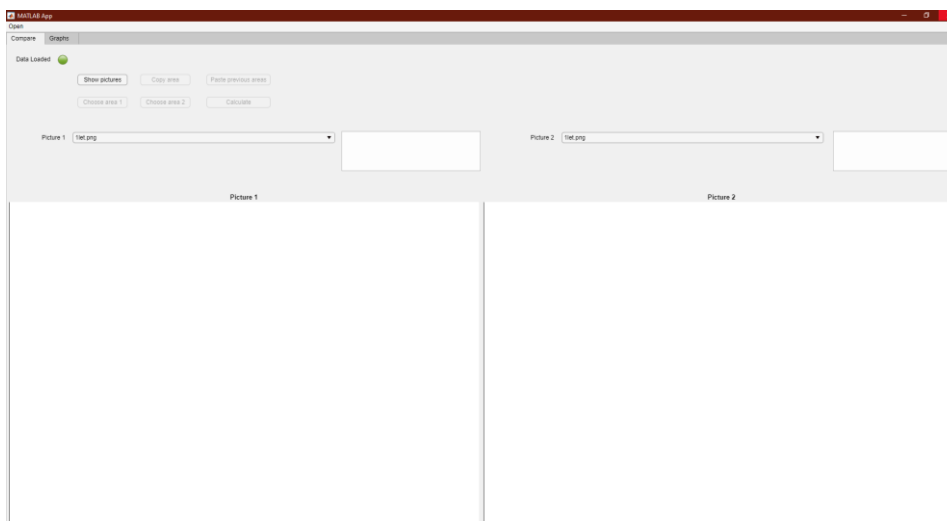
Pro dosažení cílů práce bylo třeba data patřičně vyhodnotit. Z tohoto důvodu byla autorem práce vytvořena aplikace v programu Matlab. Aplikace pracuje se zpracovanými snímky z programu Agisoft. Tyto snímky byly dále s využitím známého souřadného systému oříznuty a zarovnány. Tedy všechny snímky pořízené jedním senzorem jsou stejného rozlišení a poloha v prostoru na jednom snímku odpovídá poloze na druhém snímku. Aplikace vyhodnocuje snímky tak, že určí procento zastoupení zdravé, středně zdravé a nezdravé vegetace ve vybrané oblasti.

3.1.1 Postup práce s aplikací

Postup práce s aplikací je následující. Nejdříve je nutné nahrát všechny snímky, které mají být porovnávány. Po kliknutí na tlačítko open, které se nachází v levém horním rohu aplikace, je umožněno vybrat snímky k porovnání. Po potvrzení vybraných snímků se data začnou nahrávat do aplikace. Po načtení dat se červený puntík u nápisu „Data Loaded“ přemění na zelený. Tato indikace se nachází v levém horním rohu pod záložkami „Compare“ a „Graphs“. Kromě indikace načtení dat se ve dvou rolovacích menu zobrazí názvy všech vybraných snímků k porovnání. Rozdíl vzhledu aplikace před a po nahrání snímku je zobrazen na obrázku 30 a 31.

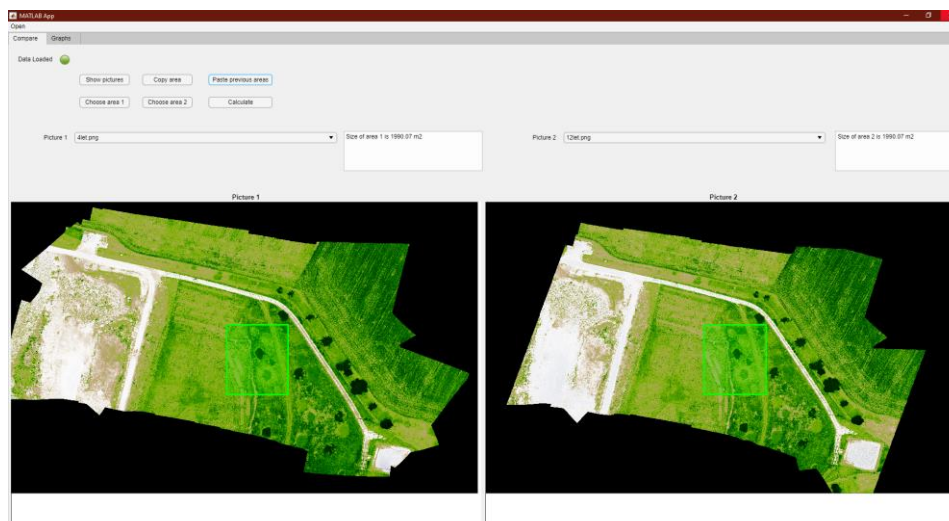


Obrázek 30. Vzhled aplikace po spuštění před nahráním dat [autor]



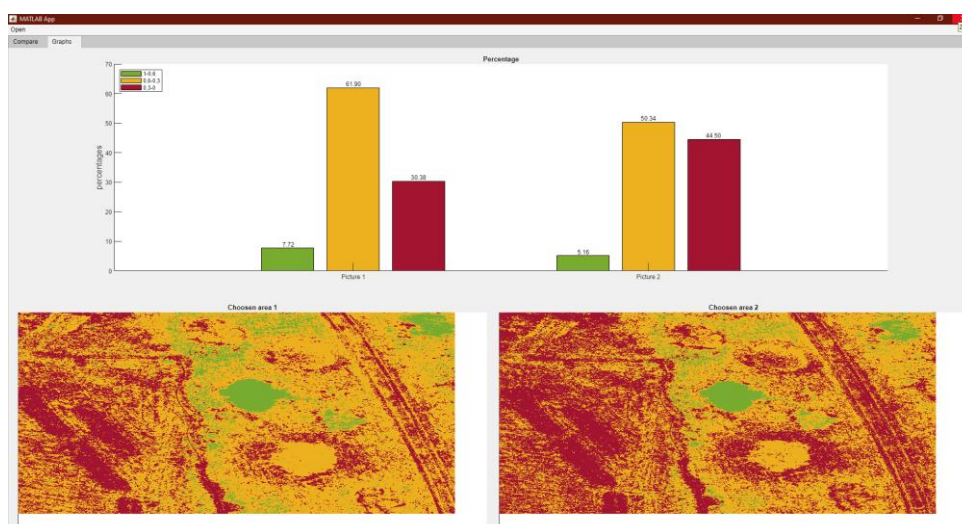
Obrázek 31. Vzhled aplikace po nahrání dat [autor]

Z rolovacích menu lze vybrat, které dva obrázky mají být porovnány, a pomocí tlačítka „Show pictures“ se zobrazí v prostoru „Picture 1“ a „Picture 2“ pod rolovacím menu. Po zobrazení obrázků aplikace umožní vybrat oblast zájmu v prvním obrázku. Po zmáčknutí tlačítka „Choose area 1“ lze pomocí myši zvolit obdélníkovou oblast zájmu v prvním obrázku. Při výběru oblasti bude obdélník modrý a po umístění do obrázku zezelená. Po vybrání oblasti v prvním obrázku se zaktivují další tlačítka, konkrétně tlačítko „Choose area 2“ a „Copy area“. Tato tlačítka slouží k umístění oblasti zájmu do druhého obrázku. Pokud se jedná o obrázky se stejným rozlišením a souřadnicově stejně umístěné, lze využít tlačítka „Copy area“ pro vložení oblasti zájmu do druhého obrázku na stejné místo jako v prvním obrázku. V případě, že se jedná o data různého rozlišení a umístění, lze vložit oblast do druhého obrázku ručně. To lze provést pomocí tlačítka „Choose area 2“, přičemž postup je stejný jako u vkládání první oblasti. Jako kontrola při ručním vkládání obou oblastí slouží textové pole nad oběma obrázky, které zobrazuje rozlohu vybrané oblasti. Rozloha je uváděna v metrech čtverečných a počítá s daty vytvořenými pro tuto práci, tedy s obrázky s rozlišením 3 cm/pixel. Pokud jsou v obou obrázcích vybrané lokace zájmu, zaktivují se tlačítka „Calculate“ a „Paste previous areas“. Situace po vybrání lokací je zobrazena na obrázku 32. Tlačítko „Calculate“ vypočítá a porovná vybrané oblasti. Tlačítko „Paste previous areas“ umožňuje po zobrazení jiných obrázků vložit oblasti zájmu z předchozího zobrazení.



Obrázek 32. Vzhled aplikace po zobrazení obrázků a výběru lokalit [autor]

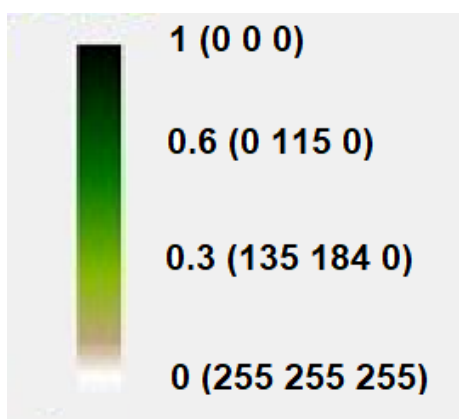
Po stisknutí tlačítka „Calculate“ budou porovnány vybrané lokality v obou obrázcích. Výsledek tohoto porovnání je zobrazen v druhé kartě „Graphs“, do které je možné překliknout v levém horním rohu. V této kartě je zobrazený graf a detaily obou vybraných lokalit. Graf se nachází v horní části a zobrazuje procentuální zastoupení pixelů dle jejich umístění do jednotlivých intervalů podle hodnoty indexu (1-0,6; 0,6-0,3 a 0,3-0). V grafu je tak zobrazení procentuálního zastoupení zdravé, středně zdravé a nezdravé vegetace pro první i druhou vybranou oblast. Na obrázcích pod tímto grafem je zobrazeno umístění těchto pixelů ve vybrané oblasti, přičemž barva pixelů odpovídá barevnému rozdělení v grafu. Zobrazení výsledků porovnání dvou lokalit je ukázáno na obrázku 33.



Obrázek 33. Vzhled aplikace v kartě „Graphs“ po porovnání vybraných oblastí [autor]

3.1.2 Princip fungování aplikace

Samotná aplikace je naprogramovaná v programu Matlab pomocí rozhraní, které nabízí App Designer. Pomocí funkce „uigetfile“ a funkce „imread“ jsou do aplikace nahrány vybrané soubory. Funkcí „drawrectangle“ jsou pak vymezeny oblasti zájmu. Určení procentuálního zastoupení jednotlivých pixelů funguje tak, že pomocí dvou „for“ cyklů je prozkoumána hodnota RGB každého pixelu a porovnána se známými hodnotami barevného spektra, kterým jsou ortofoto mapy obarveny. Program Agisoft umožňuje export RGB barev hraničních částí intervalů. Když jsou známy hodnoty barev v těchto hraničních oblastech intervalů a zároveň i průběh jednotlivých barev v rámci intervalů, jde pak pomocí jednoduchých podmínek určit, v jakém intervalu spektra se barva nachází. Pokud se v pixelu hodnota modré nerovná nule, pak pixel značí zkaženou část vegetace (NDVI 0-0,3). Pokud se červená část rovná nule, pak pixel patří do zdravé vegetace (NDVI 0,6-1). Pokud neplatí jedna z těchto podmínek, pixel označuje místo se středně zdravou vegetací (NDVI 0,3-0,6). Tato podmínka je platná pro všechna multispektrální data, na které byl použit NDVI obarvený podle postupů z podkapitoly 2.5. Průběh barev a hodnoty RGB (uvedeny v závorce) v hraničních částech intervalů jsou zobrazeny na obrázku 34.

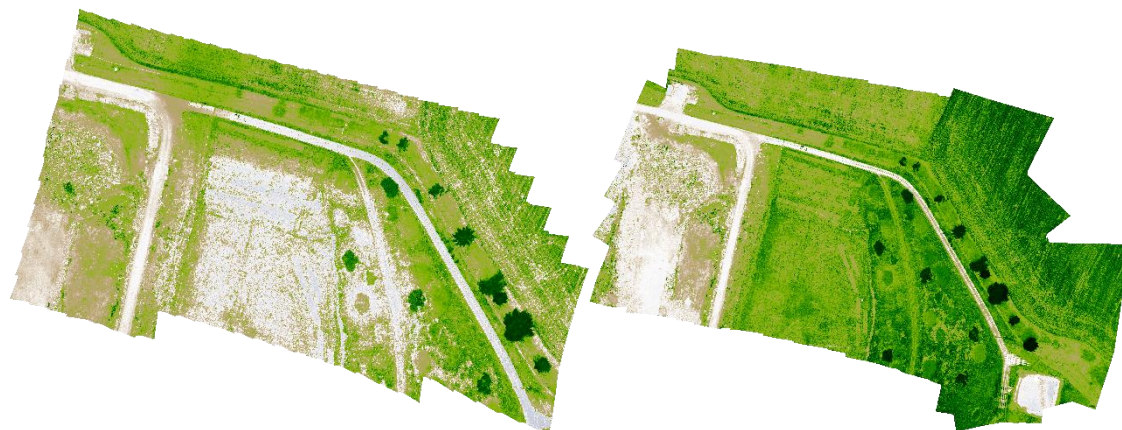


Obrázek 34. Zobrazení zbarvení NDVI s hodnotami RGB hraničních částí intervalů [autor]

Tímto způsobem je každý pixel zařazen do jednoho ze tří intervalů a následně je pak vypočítáno procentuální zastoupení jednotlivých intervalů v porovnávané oblasti.

3.2 Porovnání senzorů

Praktické měření bylo provedeno dvěma různými senzory. První byla levnější a dostupnější varianta Phantom 4 Multispectral. Druhý senzor byl dražší a profesionálnější Altum-PT. Rozdíly ve výstupech z těchto senzorů jsou viditelné už pouhým pohledem na snímky naměřené za stejných podmínek. První lety s oběma senzory jsou zobrazeny na obrázku 35.



Obrázek 35. Snímek z Phantimu 4 Multispectral (vlevo)
a ze senzoru Altum-PT (vpravo) [autor]

Zejména v oblasti první a druhé etapy skládky (zakryté části) je vizuálně patrný barevný rozdíl těchto oblastí. Zatímco Phantom 4 Multispectral zobrazuje oblast se zkaženou vegetací případně bez vegetace, Altum v té samé části nasnímané za stejných podmínek zobrazuje vegetaci zdravou až středně zdravou. Vzhledem k tomu, že se jedná o skládku, jejíž provoz probíhá v souladu se zákonem o skladování odpadu a veškeré stanovené postupy při uzavírání jednotlivých etap byly dodrženy, dá se předpokládat, že hodnoty ze senzoru Altum-PT jsou přesnější a pravdivější. Vzhledem k výstupům ze senzoru Altum-PT v oblasti třetí etapy (otevřené skládky) je zřejmé, že je senzor schopný zaznamenat oblast bez vegetace případně s nezdravou vegetací. Proto lze očekávat, že v případě průsaku škodlivých látek ze skládky do půdy, by byl Altum-PT schopný lokalizovat toto místo na základě zhoršení kvality půdy a vegetace v oblasti průsaku.

Výsledné vyhodnocení v autorské aplikaci bylo provedeno tak, že pro každý let byla zkoumána každá etapa zvlášť. Na každém obrázku byla vybrána stejná oblast a bylo určeno procentuální zastoupení pixelů pro jednotlivé intervaly zdravé, středně zdravé a nezdravé vegetace. Hodnoty z tohoto vyhodnocení jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11. Procentuální zastoupení intervalů NDVI v jednotlivých etapách pro měřené lety [autor]

	1. etapa			2. etapa			3. etapa		
	<i>Dobrá</i>	<i>Střední</i>	<i>Špatná</i>	<i>Dobrá</i>	<i>Střední</i>	<i>Špatná</i>	<i>Dobrá</i>	<i>Střední</i>	<i>Špatná</i>
1.	0,97	7,69	91,34	0,01	2,00	97,99	0,65	6,56	92,79
2.	14,75	73,75	11,50	1,22	54,25	44,53	0,53	3,30	96,17
3.	0,49	8,47	91,04	0,01	1,52	98,47	0,45	5,01	94,54
4.	13,84	72,65	13,51	1,07	49,82	49,11	0,25	1,96	97,79
5.	0,31	7,22	92,47	0,01	2,06	97,93	0,42	4,65	94,93
6.	12,98	71,31	15,71	0,97	47,91	51,12	0,22	2,28	97,50
7.	0,47	7,50	92,03	0,01	2,09	97,90	0,27	4,39	95,34
8.	9,17	63,37	27,46	0,57	32,53	66,90	0,14	1,60	98,26
9.	0,67	6,97	92,36	0,01	2,47	97,52	0,31	4,72	94,97
10.	10,66	66,08	23,26	0,66	37,73	61,61	0,15	1,64	98,21
11.	0,42	6,37	93,21	0,01	2,05	97,94	0,30	4,11	95,59
12.	9,19	62,15	28,66	0,54	31,22	68,24	0,11	1,44	98,45
13.	0,33	7,26	92,41	0,01	2,00	97,99	0,31	4,72	94,97

Řádky označují jednotlivé lety, kde liché lety byly provedeny s Phantomem 4 Multispectral a sudé lety byly uskutečněny s dronem DJI M300 vybaveným senzorem Altum-PT. Ve sloupcích je pak uvedeno procentuální zastoupení indexů v jednotlivých intervalech pro všechny tři etapy. Porovnávané oblasti byly na všech snímcích stejné a pro všechny etapy podobně velké, konkrétně zhruba 0,15 ha.

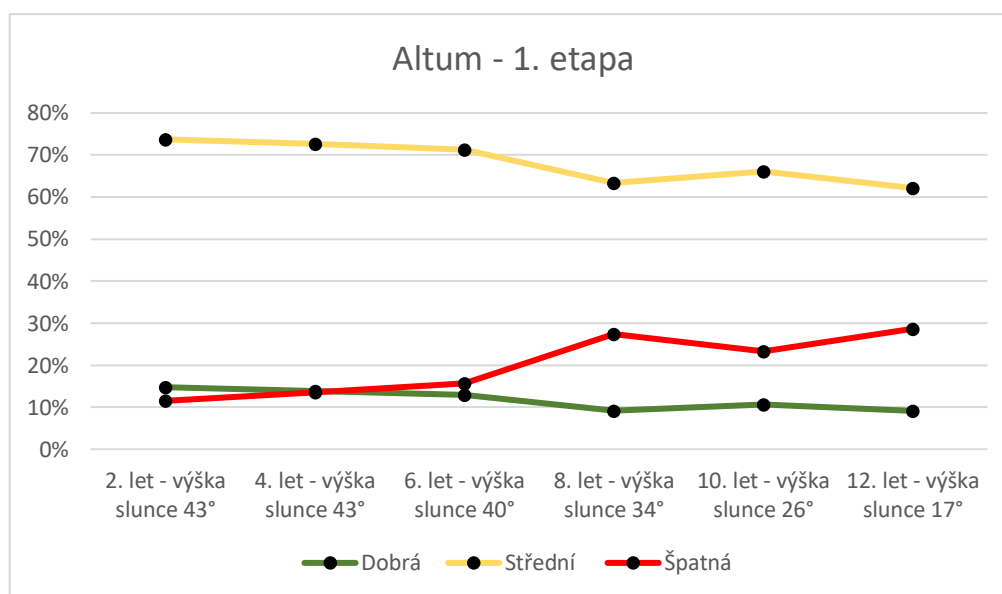
Oproti senzoru Altum-PT set Phantom 4 Multispectral vykazuje značně nepřesná data. Pomocí tohoto senzoru je problematické rozeznat zakrytou a nezakrytou část skládky. Zatímco v první etapě byl tento senzor schopný zaznamenat vegetaci alespoň částečně, v oblasti druhé etapy už senzor zobrazuje hodnoty, jako by se jednalo o odkrytou skládku. Změny ve výstupu měření v závislosti na denní době budou pro oba senzory pospány v následující podkapitole. Obecně lze říct, že Altum v určitý čas začne zobrazovat nepřesnější data, která jsou ovšem pořád kvalitnější v porovnání s Phantomem.

3.3 Optimální světelné podmínky

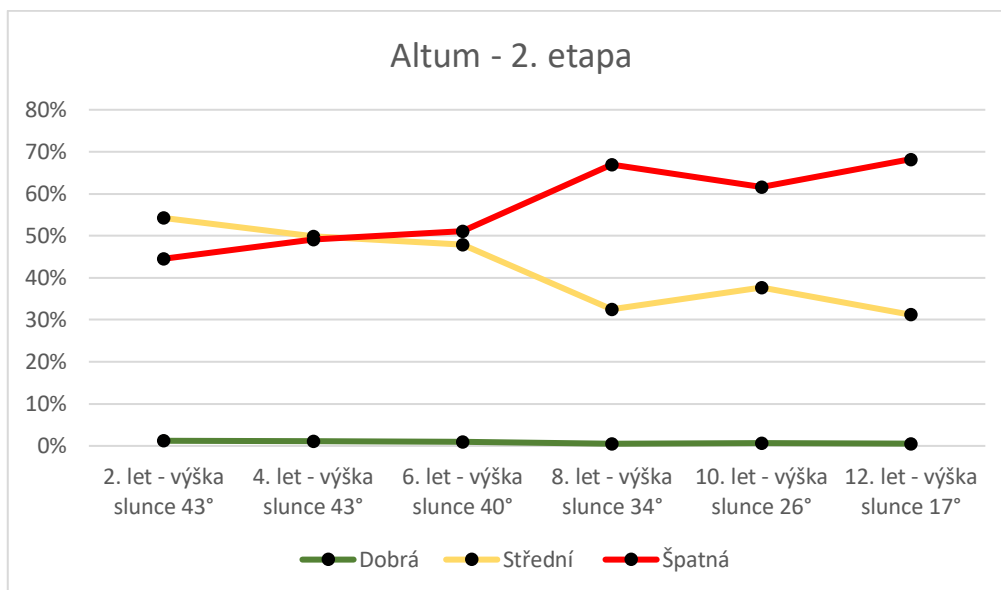
Podle teorie by optimální světelné podmínky měly být v případě, kdy je slunce výš než 30° nad horizontem. V rámci měření byly sledovány různé okolní podmínky a jsou uvedeny v tabulce 10 v kapitole 2.4.

Z naměřených dat je patrné, že v průběhu měření u Phantomu 4 Multispectral kolísají výstupní hodnoty jen lehce. Tedy tento senzor měří prakticky konstantně během celého dne. Příkladem může být porovnání hodnot pro druhou etapu v prvním a posledním letu. Výška slunce nad horizontem se zde lišila o 29° (při prvním letu byla 42° a při posledním 13°) a zastoupení zdravé, středně zdravé a nezdravé vegetace senzor popisuje pořád stejné. Ovšem jak bylo řečeno v předchozí podkapitole, výstupy ze senzoru nemají příliš velkou informační hodnotu a jsou jen obtížně dále použitelné.

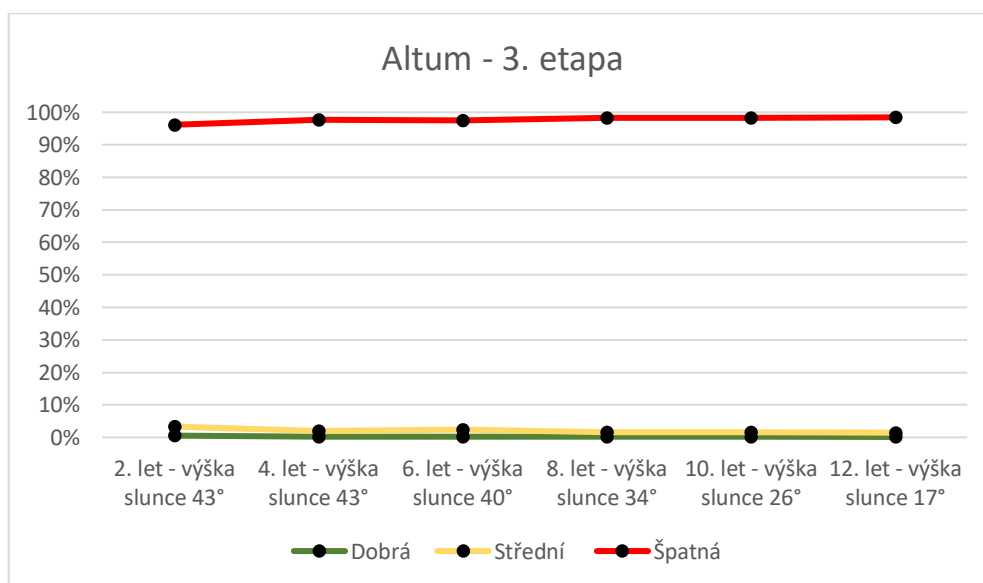
Oproti tomu data získaná pomocí senzoru Altum-PT vykazují jiný průběh, a na jejich základě byly dále stanoveny optimální světelné podmínky pro měření s multispektrální kamerou. Při prvních třech letech s tímto senzorem jsou výsledné naměřené hodnoty hodně podobné. K výraznější změně dochází mezi třetím a čtvrtým letem s tímto senzorem, tedy mezi šestým a osmým letem celkově. Toto je vidět zejména na průběhu dat z první (viz obrázek 36) a druhé etapy (viz obrázek 37). Data ze třetí etapy (viz obrázek 38) zůstávají prakticky konstantní, neboť je zde minimální výskyt vegetace.



Obrázek 36. Vývoj NDVI indexu získaného pomocí senzor Altum-PT v jednotlivých letech pro první etapu skládky [autor]



Obrázek 37. Vývoj NDVI indexu získaného pomocí senzor Altum-PT v jednotlivých letech pro druhou etapu skládky [autor]



Obrázek 38. Vývoj NDVI indexu získaného pomocí senzor Altum-PT v jednotlivých letech pro třetí etapu skládky [autor]

Vyhodnocená data ze senzoru Altum částečně korespondují s tím, co říká teorie. Tedy že vypovídající výsledky měření je senzor schopný zaznamenat, pokud je slunce vysoko nad obzorem. Konkrétně se jedná o výšku slunce větší než 40° nad horizontem. To pro období, ve kterém proběhlo praktické měření, znamená čas od 11:00 do 15:00. Je tak důležité před měřeními vždy zkontrolovat polohu slunce nad zkoumanou lokací během doby provádění letu.



Diskuse

Výsledky a postup použitý v této práci lze využít pro zjištění místa průsaku škodlivých látek na rekultivovaných částech skládky. Po nalezení takového místa je pak možné provést další pozemní měření, kterým lze určit stav půdy v lokalizovaném místě. V práci uvedený postup lze uplatnit jak na oficiálních skládkách, kde ukládání odpadu a provoz skládky probíhá dle zákona o skladování odpadů, tak i na černých skládkách, kde byl odpad přikryt zeminou nedbale. Tento způsob lokalizace krizových míst představuje rychlou a levnou variantu. Vyšší finanční náklady jsou spojeny pouze s pořizovací cenou vybavení, nicméně následný provoz a použití už je finančně dostupný.

Při porovnání výsledků práce s jinými studii [36] [38] [39] došlo k menší odlišnosti. Některé z těchto studií říkají, že funkčnost multispektrální kamery se může snižovat při poloze slunce pod 30° nad horizontem a výsledky studie (Honkavaara et al., 2012) naznačují, že měření jsou odpovídající a použitelná jak při vyšších výškách slunce nad horizontem (44–48°), tak i v nižších (25–28°). Výsledky této práce ukazují, že ke zhoršení výstupů z vybraného senzoru dochází už při výšce slunce okolo 35°. K rozdílným výsledkům mohlo dojít kvůli použití jiného sensorického vybavení, odlišným parametrům letu, nebo kvůli jiným meteorologickým podmínkám při měření.

Výsledky porovnání vybraných dvou senzorů poukazují, že cenově dostupnější set DJI Phantom 4 Multispectral nedosahuje takových kvalit, jako nabízí dražší senzor Altum-PT od společnosti MicaSense. Kamera Altum-PT je schopna pořídit kvalitnější snímky za horších světelných podmínek, než jaké pořídí Phantom 4 Multispectral za ideálních světelných podmínek. To poukazuje na to, že pro praxi je Altum-PT vhodnější a pro práci se senzorem umístěným na setu Phantom 4 Multispectral by bylo zapotřebí zvolit jinou metodiku měření, případně navolit jiné parametry letu. Další z možností zpřesnění dat naměřených Phantomem 4 Multispectral by bylo vylepšení kalibrace zaznamenaných snímků. Jako vhodný způsob se nabízí vytvoření podobného kalibračního panelu, jako využívá Altum. V takovém případě by ovšem bylo nutné prozkoumat více software i hardware, který Phantom 4 Multispectral používá.

Aplikace vytvořená pro porovnání pořízených snímků umožňuje rychlou analýzu dat. Při analýze multispektrálních snímků používajících NDVI dochází často k vyhodnocování podle střední hodnoty indexu v určité oblasti. Další možností je tvorba histogramů zobrazující zastoupení pixelů pro konkrétní hodnoty indexu. V práci vytvořená aplikace zrychluje a zjednodušuje způsob vyhodnocování, protože přeskakuje krok tvorby histogramu, který by



pak musel být dále zpracováván. Aplikace rovnou rozděljuje naměřená data do tří základních intervalů pro vyhodnocení zdraví vegetace a tím tak zrychluje analýzu dat.

Jednou z limitací práce je využití dvou senzorů namísto plánovaných tří. Původní plán tak musel být upraven, protože se vyskytl problém s dodáním senzoru, a během měření třetí senzor nebyl k dispozici. Byl tak zachován plán pro provedení měření jednou kamerou v průběhu každé hodiny od 12:00 do 18:00. Starty byly upraveny z původních odletů jednou za dvacet minut na zahájení měření každých třicet minut. Tato úprava neměla vliv na výsledné vyhodnocování naměřených dat. Výsledky práce by mohly být rozšířeny o provedení dalších měření a porovnání funkčnosti jednotlivých senzorů za různých podmínek. Příkladem může být zjištění efektivnosti provedeného měření za různých jiných parametrů letu, jako je menší nebo větší rozlišení snímků, rozdílný typ dronu nesoucí senzor nebo jinak velké překrytí jednotlivých snímků. Přínosné by určitě bylo otestovat i jiné na trhu dostupné multispektrální kamery. Zajímavým rozšířením práce by také bylo provedení měření během rozdílné roční doby, případně za odlišných meteorologických podmínek.



Závěr

V této práci bylo provedeno letecké měření s bezpilotními prostředky vybavenými dvěma různými multispektrálními kamerami. Měření probíhalo v oblasti skládky tuhého komunálního odpadu u obce Trhový Štěpánov. K zpracování dat byl využit software Agisoft, pomocí kterého byly jednotlivé multispektrální snímky sjednoceny do ortofoto mapy, která byla následně obarvena pomocí vybraného indexu NDVI. Zpracované snímky pak byly analyzovány a porovnávány v autorem navrženém softwaru. V této práci byla také zpracována současná bezpilotní legislativa a byly stanoveny podmínky, za kterých je možné provozovat bezpilotní prostředek v oblasti skládky tuhého komunálního odpadu.

Hlavním cílem této práce bylo určení optimálních světelných podmínek pro měření s multispektrální kamerou. Vzhledem k tomu, že dle teorie má velký podíl na přesnosti měření výška slunce nad horizontem, bylo měření prováděno od dvanácti hodin odpoledne až do šesti hodin večer. Po zpracování dat do ortofoto map byly tyto mapy vyhodnoceny pomocí autorské aplikace v programu Matlab, kde byl určen poměr zastoupení tří stavů vegetace, a to zdravé, středně zdravé a nezdravé.

Na základě vývoje dat byly pak stanoveny optimální světelné podmínky pro měření s multispektrální kamerou. Výsledky práce vypovídají o tom, že měření multispektrální kamerou podává odpovídající výstupy v případě, že je poloha slunce nad horizontem vyšší než 35° . Pro měření provedená za takových podmínek vycházejí hodnoty prakticky srovnatelné. Oproti tomu měření při nižších polohách slunce vykazují pokles informační hodnoty, kterou lze z naměřených dat získat.

V rámci této práce došlo také k porovnání dvou multispektrálních senzorů. Konkrétně se jednalo o set Phantom 4 Multispectral a senzor Altum-PT od společnosti MicaSense, který byl umístěn na dron DJI Matrice 300. V této práci bylo ze získaných dat zjištěno, že Phantom 4 Multispectral není schopný pořídit snímky na takové úrovni jako Altum. Při měření za stejných podmínek mají data pořízená Phantomem 4 Multispectral několikanásobně menší informační hodnotu. Oproti tomu bylo prokázáno, že senzor Altum může být dobře využit v reálném provozu na skládkách při lokalizaci míst, kde by docházelo k průsaku škodlivých látek.

Využití poznatků této práce a použité metodiky měření je vhodné v praxi uplatnit při lokalizaci průsaků na skládce. V případě, že dochází k úniku škodlivých látek do půdy, dochází také k degradaci vegetace na rekultivované ploše. Aplikace poznatků umožní lokalizovat taková místa, kde lze pak následně provést pozemní měření a rozbor půdy v dané oblasti. Příkladem lokality, která by mohla být takto prozkoumána, je skládka v Motole na Praze 5. Jedná se



o skládku, která nebyla správně zakryta a rekultivována a dá se tak očekávat průsak škodlivých látek na povrch země. Zaměřením této lokality s pomocí bezpilotního letadla vybaveného multispektrální kamerou by bylo možné tato místa nalézt a následně pak učinit patřičná opatření, která zabrání dalšímu šíření škodlivých látek do okolí. Pro měření v této oblasti je třeba provést důkladnou legislativní předletovou přípravu a lety patřičně naplánovat. Vzhledem k tomu, že se jedná o oblast v blízkosti nemocnice Motol, na které je umístěný heliport, je třeba dbát zvýšené opatrnosti při provozu bezpilotního letadla kvůli pohybu záchranářských vrtulníků. Další omezení této lokality je její umístění v ose dráhy 12/30 Letiště Václava Havla.



Zdroje

- [1] KURAŠ, Mečislav. *Odpadové hospodářství*. Chrudim: Ekomonitor, 2008. ISBN 978-80-86832-34-0.
- [2] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *PRODUKCE, VYUŽITÍ A ODSTRANĚNÍ ODPADŮ: za období 2020* [online]. 40 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/143330119/28002021.pdf/41f799e9-3ffb-4702-a517-0c2dc1525144?version=1.3>
- [3] *Zákon č. 541/2020 Sb.: Zákon o odpadech* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=E4044163A66CAA76C1258655002DE3C9&action=openDocument>
- [4] DANTHUREBANDARA, Maheshi. *Environmental and Economic Performance of Enhanced Landfill Mining* [online]. Heverlee Belgium, 2015 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304015502_Environmental_and_Economic_Performance_of_Enhanced_Landfill_Mining. University of Peradeniya.
- [5] KAFKA, Zdeněk. *ZÁKLADY OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ: část odpady* [online]. Praha [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://uchop.vscht.cz/files/uzel/0011054/skriptaZOP.doc>. Skripta. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [6] ZISCHKA, Daniel. *Návrh rekultivace skládky komunálního odpadu Vrbička* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86457/F1-DP-2020-Zischka-Daniel-Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STAVEBNÍ. Vedoucí práce Ing. Martin Dočkal, Ph.D.
- [7] ŠPIČÁK, Petr. *SKLÁDKOVÁNÍ ODPADŮ BIODEGRADACE STABILIZACE* [online]. Brno: MUNI [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/ENV009/um/Skladkovani_odpadu__biodegradace__stabilizace.pdf
- [8] ČSN 83 8030. *Skládkování odpadů: Základní podmínky pro navrhování, výstavbu a provoz skládek*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.



- [9] KODA, Eugeniusz, Kinga PACHUTA a Piotr OSINSK. Potential of Plant Applications in the Initial Stage of the Landfill Reclamation Process. *Pol. J. Environ. Stud.* [online]. 2013, **22**(6), 1731-1739 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1230-1485. Dostupné z: <http://www.pjoes.com/pdf-89141-23000?filename=Potential%20of%20Plant.pdf>
- [10] DOČKAL Martin, *Odpady a recyklace: Přednáška č.4 - Skládky* [online]. Praha [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://storm.fsv.cvut.cz/data/files/předměty/ODKO/Přednášky/04-Skladka.pdf>
- [11] KURÁŠ, Mečislav a Vojtech DIRNER. *Modul 6: Odpadové hospodářství* [online]. In: . s. 76 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://www.hgf.vsb.cz/export/sites/hgf/546/.content/galerie-souboru/Studijni-materialy/EV-modul6.pdf>
- [12] BAZIENE, Kristina, Ina TETSMAN a Ramune ALBREKTIENE. Level of Pollution on Surrounding Environment from Landfill Aftercare. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2020, **17**(6) [cit. 2022-03-01]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph17062007
- [13] KELLER, Ladislav. *Učební texty pro piloty UAS*. 3. Praha: Dronim, 2019.
- [14] CABREIRA, Tauã, Lisane BRISOLARA a Paulo R. FERREIRA JR. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones* [online]. 2019, **3**(1) [cit. 2022-03-03]. ISSN 2504-446X. Dostupné z: doi:10.3390/drones3010004
- [15] BERÁNKOVÁ, Eliška. *Possibilities of using multispectral data from RPAS* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/69991>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STAVEBNÍ. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.
- [16] PAVELKA, K., J. ŠEDINA, E. MATOUŠKOVÁ, M. FALTÝNOVÁ a I. HLAVÁČOVÁ. USING REMOTE SENSING AND RPAS FOR ARCHAEOLOGY AND MONITORING IN WESTERN GREENLAND. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2016, **-1**, 979-983 [cit. 2022-03-15]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-979-2016
- [17] KO, Pi, Samuel Antonio PRIETO a Borja GARCÍA DE SOTO. *ABECIS: an Automated Building Exterior Crack Inspection System using UAVs, Open-Source Deep Learning and Photogrammetry* [online]. - [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: doi:10.22260/ISARC2021/0086



- [18] CHOUTRI, Kheireddine, Mohand LAGHA a Laurent DALA. A Fully Autonomous Search and Rescue System Using Quadrotor UAV. *International Journal of Computing and Digital Systems* [online]. 2021, **10**(1), 403-414 [cit. 2022-03-16]. ISSN 2210-142X. Dostupné z: doi:10.12785/ijcds/100140
- [19] *CRV Crew Training Manual: SEARCH TECHNIQUES* [online]. Nový Zéland: Royal New Zealand Coastguard Inc, 2010, [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://coastguardmarlborough.org.nz/download/training-modules/CoC%20CRV%20Crew%20Training%20Manual.pdf>
- [20] ICAO a IMO. *IAMSAR MANUAL: International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual* [online]. 3. Kanada: ICAO, 2016 [cit. 2022-03-16]. ISBN 978-92-9258-059-9. Dostupné z: <http://www.icscc.org.cn/upload/file/20190102/Doc.9731-EN%20IAMSAR%20Manual%20-%20International%20Aeronautical%20and%20Maritime%20Search%20and%20Rescue%20Manual%20Volume%20III%20-%20Mobile%20Facilities.pdf>
- [21] ORŠULÁK, Tomáš a Jan PACINA. *Dálkový průzkum země* [online]. Ústí nad Labem, 18 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9891155-Dalkovy-pruzkum-zeme.html>
- [22] FLORINSKY, Igor V., Vladimir M. KURKOV a Dmitrii P. BLIAKHARSKII. Geomorphometry from unmanned aerial surveys. *Transactions in GIS* [online]. 2018, **22**(1), 58-81 [cit. 2022-04-06]. ISSN 13611682. Dostupné z: doi:10.1111/tgis.12296
- [23] TURNER, Darren, Arko LUCIEER a Luke WALLACE. Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2014, **52**(5), 2738-2745 [cit. 2022-04-06]. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2013.2265295
- [24] MIAN, O., J. LUTES, G. LIPA, J. J. HUTTON, E. GAVELLE a S. BORGHINI. DIRECT GEOREFERENCING ON SMALL UNMANNED AERIAL PLATFORMS FOR IMPROVED RELIABILITY AND ACCURACY OF MAPPING WITHOUT THE NEED FOR GROUND CONTROL POINTS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2015, **-14**, 397-402 [cit. 2022-04-06]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-397-2015
- [25] MARTÍNEZ-CARRICONDO, Patricio, Francisco AGÜERA-VEGA, Fernando CARVAJAL-RAMÍREZ, Francisco-Javier MESAS-CARRASCOSA, Alfonso GARCÍA-FERRER a



- Fernando-Juan PÉREZ-PORRAS. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2018, **72**, 1-10 [cit. 2022-04-06]. ISSN 03032434. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2018.05.015
- [26] TADDIA, Y., F. STECCHI a A. PELLEGRINELLI. USING DJI PHANTOM 4 RTK DRONE FOR TOPOGRAPHIC MAPPING OF COASTAL AREAS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2019, **-213**, 625-630 [cit. 2022-04-06]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-2-W13-625-2019
- [27] REINDL, Tomáš. *Testování přesnosti dronu DJI Phantom 4 RTK* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/83575/F1-DP-2019-Reindl-Tomas-testovani-Phantom-4-RTK.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STAVEBNÍ. Vedoucí práce Doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.
- [28] CZEPOS: *Síť permanentních stanic GNSS České Republiky* [online]. Zeměměřičský úřad, 2022 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <http://czeupos.cuzk.cz>
- [29] EUROPEAN UNION. ERules pro bezpilotní systémy (UAS). *Úřad pro civilní letectví* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2022/04/eRules_UAS_CS_04-04-2022_v4-0.pdf?cb=d848e6655aec204923f5cd54d6808f14
- [30] Drone Laws - 1:1 Rule. In: *Infratec* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.infratec-drones.com/post/drone-laws-1-1-rule>
- [31] ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. *Opatření obecné povahy: veřejná vyhláška* [online]. In: . [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2020/11/20201230162623731.pdf>
- [32] *AisView: Dronview* [online]. Praha: Řízení letového provozu, 2022 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://dronview.rlp.cz>
- [33] LANDGREBE, David A. *Signal Theory Methods in Multispectral Remote Sensing* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: doi:10.1002/0471723800



- [34] *Fotovoltaika, fototermika* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/01.html>
- [35] LI, Qingli, Xiaofu HE, Yiting WANG, Hongying LIU, Dongrong XU a Fangmin GUO. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: achievements and challenges. *Journal of Biomedical Optics* [online]. 2013, **18**(10) [cit. 2022-04-09]. ISSN 1083-3668. Dostupné z: doi:10.1117/1.JBO.18.10.100901
- [36] HONKAVAARA, Eija, Lauri MARKELIN, Tomi ROSNELL a Kimmo NURMINEN. Influence of solar elevation in radiometric and geometric performance of multispectral photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2012, **67**, 13-26 [cit. 2022-04-11]. ISSN 09242716. Dostupné z: doi:10.1016/j.isprsjprs.2011.10.001
- [37] HORÁK, Jiří. *Dálkový průzkum země* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~hor10/Vyuka/DPZ%20prednasky/DPZ%202014.pdf>. E-learningová podpora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [38] LAURI, Markelin. *Radiometric calibration, validation and correction of multispectral photogrammetric imagery* [online]. Finsko, 2013 [cit. 2022-04-11]. ISBN 978-951-711-294-9. ISSN 0085-6932. Dostupné z: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/10948/isbn9789517112956.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [39] CUBERO-CASTAN, M., K. SCHNEIDER-ZAPP, M. BELLOMO, D. SHI, M REHAK a C. STRECHA. Assessment Of The Radiometric Accuracy In A Target Less Work Flow Using Pix4D Software. *2018 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)* [online]. IEEE, 2018, 1-4 [cit. 2022-04-11]. ISBN 978-1-7281-1581-8. Dostupné z: doi:10.1109/WHISPERS.2018.8746910
- [40] CARLSON, Toby N. a David A. RIPLEY. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* [online]. 1997, **62**(3), 241-252 [cit. 2022-04-10]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(97)00104-1
- [41] VINCINI, M., E. FRAZZI a P. D'ALESSIO. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture* [online]. 2008, **9**(5), 303-319 [cit. 2022-04-10]. ISSN 1385-2256. Dostupné z: doi:10.1007/s11119-008-9075-z



- [42] BOIARSKII, Boris. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *JOURNAL OF MECHANICS OF CONTINUA AND MATHEMATICAL SCIENCES* [online]. 2019, 1(4) [cit. 2022-04-10]. ISSN 09738975. Dostupné z: doi:10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003
- [43] STEVEN, Michael D. The Sensitivity of the OSAVI Vegetation Index to Observational Parameters. *Remote Sensing of Environment* [online]. 1998, 63(1), 49-60 [cit. 2022-04-10]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(97)00114-4
- [44] *MicaSense: oficiální web* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://micasense.com>
- [45] *DJI: oficiální web* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/p4-multispectral>
- [46] *User guide: Parrot Sequoia* [online]. 2017 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/sequoia-userguide-en-fr-es-de-it-pt-ar-zh-zh-jp-ko_0.pdf
- [47] *DB2 Vision: oficiální web* [online]. Nizozemsko [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.crop-sensors.com/products/>
- [48] *DJI official: P4 Multispectral* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/p4-multispectral/specs>
- [49] *DJI official: Matrice 300* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/matrice-300>
- [50] *Zpravodaj Štěpánovska* [online]. Trhový Štěpánov: Město Trhový Štěpánov, 2018, [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjB8bW1trT3AhWERvEDHedEAVY4HhAWegQIFhAB&url=https%3A%2F%2Fadoc.tips%2Fdownload%2Fzpravodaj-tespanovskabe941791c3ae36ab0251dd7bc63f6c3714609.html&usg=AOvVaw07bSuA01flnoeJEYIWqWw0>
- [51] *Mapy CZ* [online]. Seznam.cz [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: [mapy.cz](https://www.seznam.cz)
- [52] *Agisoft oficial web: Support* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.agisoft.com/support/tutorials/beginner-level/>

Seznam obrázků

- Obrázek 1. Schéma a hlavní části sanitární skládky [4]
- Obrázek 2. Skladba rekultivační vrstvy skládky [7]
- Obrázek 3. Znázornění etap na skládce [10]
- Obrázek 4. Možnosti trasy při leteckém průzkumu [17]
- Obrázek 5. Znázornění překryvů na snímané ploše [autor]
- Obrázek 6. Uměle vytvořený vlíčovací bod [autor]
- Obrázek 7. Rozmístění pozemních stanic firmy CZEPOS [28]
- Obrázek 8. Znázornění pravidla 1:1 [30]
- Obrázek 9. Znázornění elektromagnetického záření [21]
- Obrázek 10. Zobrazení elektromagnetického spektra [34]
- Obrázek 11. Znázornění zrcadlového (vlevo) a difuzního (vpravo) odrazu [21]
- Obrázek 12. Zobrazení pásem senzoru Altum-PT [44]
- Obrázek 13. Rozložení etap skládky v měřené oblasti [autor]
- Obrázek 14. Oblast skládky u Trhového Štěpánova [51]
- Obrázek 15. Poloha vlíčovacích bodů [autor]
- Obrázek 16. Plán letu pro Phantom 4 Multispectral v aplikaci DJI GS PRO [autor]
- Obrázek 17. Plán letu pro DJI M300 se senzorem Altum-PT v aplikaci DJI Pilot [autor]
- Obrázek 18. Schéma pro zpracování snímků v softwaru Agisoft [autor]
- Obrázek 19. Okno „Calibrate Reflectance“ při využití kalibračního panelu pro kalibraci snímků [autor]
- Obrázek 20. Dialogové okno „Align Photos“ se zadanými parametry pro tvorbu řídkého mračna bodů [autor]
- Obrázek 21. Porovnání mračna před použitím funkce „Gradual Selection“ [autor]
- Obrázek 22. Porovnání mračna po použití funkce „Gradual Selection“ [autor]
- Obrázek 23. Dialogové okno pro import vlíčovacích bodů [autor]
- Obrázek 24. Umístění vlíčovacího bodu před (vlevo) a po (vpravo) korekci [autor]
- Obrázek 25. Dialogové okno pro vytvoření hustého mračna bodů [autor]
- Obrázek 26. Dialogové okno pro vytvoření digitálního výškového modelu [autor]
- Obrázek 27. Dialogové okno pro vytvoření ortofoto mapy [autor]
- Obrázek 28. Nastavení rovnice indexu [autor]
- Obrázek 29. Nastavení obarvení NDVI indexu [autor]
- Obrázek 30. Vzhled aplikace po spuštění před nahráním dat [autor]
- Obrázek 31. Vzhled aplikace po nahrání dat [autor]
- Obrázek 32. Vzhled aplikace po zobrazení obrázků a výběru lokalit [autor]



Obrázek 33. Vzhled aplikace v kartě „Graphs“ po porovnání vybraných oblastí [autor]

Obrázek 34. Zobrazení zbarvení NDVI s hodnotami RGB hraničních částí intervalů [autor]

Obrázek 35. Snímek z Phantimu 4 Multispectral (vlevo) a ze senzoru Altum-PT (vpravo) [autor]

Obrázek 36. Vývoj NDVI indexu získaného pomocí senzor Altum-PT v jednotlivých letech pro první etapu skládky [autor]

Obrázek 37. Vývoj NDVI indexu získaného pomocí senzor Altum-PT v jednotlivých letech pro druhou etapu skládky [autor]

Obrázek 38. Vývoj NDVI indexu získaného pomocí senzor Altum-PT v jednotlivých letech pro třetí etapu skládky [autor]



Seznam tabulek

- Tabulka 1. Produkce komunálních odpadů podle krajů (v tunách) [2]
- Tabulka 2. Porovnání jednotlivých snímáních [35]
- Tabulka 3. Specifikace kamery Altum-PT [44]
- Tabulka 4. Specifikace setu Phantom 4 Multispectral [45]
- Tabulka 5. Specifikace kamery Parrot Sequoia [46]
- Tabulka 6. Specifikace kamery LaQuinta [47]
- Tabulka 7. Srovnání vybraných multispektrálních kamer [autor]
- Tabulka 8. Parametry dronu Phantom 4 Multispektral [48]
- Tabulka 9. Parametry dronu Matrice 300 [49]
- Tabulka 10. Informace o provedených letech a okolních podmínkách [autor]
- Tabulka 11. Procentuální zastoupení intervalů NDVI v jednotlivých etapách pro měřené lety [autor]



Seznam příloh

Příloha A – Matlab aplikace

- Softwarový prostředek pro analýzu dat