



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

**Identifikace optimálních podmínek pro výpočet indexů vegetační
plochy**
**Identification of Optimal Conditions for Calculating Vegetation Area
Indices**

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Kušmírek

Bc. Jan Machovič

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jan Machovič

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Identifikace optimálních podmínek pro výpočet indexů vegetační plochy**

Název tématu (anglicky): Identification of Optimal Conditions for Calculating Vegetation Area Indices

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je identifikovat vhodné podmínky atmosféry (teplota, tlak a vlhkost vzduchu, výška slunce nad horizontem a druh oblačnosti) pro výpočet indexů vegetační plochy za použití UAS vybaveného multispektrální kamerou.
- Vypracujte analýzu současného stavu, tj. jaký dopad má počasí na výsledky měření v oblasti lesnictví.
- Vyberte vhodnou referenční plochu s minimálním projevem poškození patogeny či abiotickými vlivy a realizujte experimentální lety nad referenční plochou při různých atmosférických podmínkách.
- Analyzujte snímky a letová data, vzájemně porovnejte zaznamenaná měření a vyhodnoťte vliv podmínek na výpočty indexů vegetačních ploch.
- Určete vhodné 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.
Thenkabail, P.S., Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**
(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: **15. května 2023**
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 letecké dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jan Machovič
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....15. července 2022



Abstrakt

V posledních letech se dálkový průzkum Země stal velmi často používanou metodou sběru dat o procesech na Zemi, zejména v oblasti zemědělství a lesnictví. Multispektrální snímkování je levný, rychlý a přesný způsob, jak získat informace o zdravotním stavu porostů, stresových faktorech, defoliaci a dalších škodách způsobených povodněmi, extrémními větry apod. Chybí však poznatky o tom, jak počasí a světelné podmínky ovlivňují výsledky z multispektrální kamery nesené většinou bezpilotními letouny. Pochopení tohoto vlivu na pořízené snímky je velmi důležité s ohledem na vyhodnocení dat. Proto byl proveden výzkum, jehož cílem bylo toto zjistit. Byla vybrána výzkumná plocha borovice kleče (*Pinus Mugo Turra*) a bylo provedeno několik experimentálních letů v jarním období. Výzkum se zaměřoval na určení vlivu světelných podmínek, jako je úhel slunce nad obzorem, oblačnost a osvětlenost povrchu, a na povětrnostních podmínkách, jako je teplota, vlhkost a atmosférický tlak. Pro všechny pořízené snímky z multispektrální kamery MicaSense RedEdge-MX byla vypočtena průměrná hodnota vegetačních indexů NDVI, GNDVI a NDRE. Možné závislosti byly vyhodnoceny pomocí Pearsonova a Spearmanova korelačního koeficientu. Výsledky odhalily vliv zejména světelných podmínek na hodnoty vegetačních indexů. Zdá se, že nejlepší podmínky pro provádění dálkového průzkumu jsou v době souvislé oblačnosti, která způsobuje rovnoměrné osvětlení povrchu.

Klíčová slova: atmosférické podmínky, bezpilotní systémy, dálkový průzkum Země, lesnictví, multispektrální snímkování, vegetační indexy, zemědělství



Abstract

In recent years, remote sensing has become a very frequently used method of collecting data about processes on the Earth, especially in the field of agriculture and forestry. Multispectral imaging is a cheap, fast, and precise way how to get information about health conditions of vegetations, stress factors, defoliation and other damages caused by floods, extreme winds etc. However, there is a lack of knowledge, how weather and light conditions affect the outcome from a multispectral camera carried mostly by UAV. Understanding this impact on captured frames is highly important. Therefore, a research has been carried out to find out. A research area of mountain pine (*Pinus Mugo Turra*) was selected, and some experimental flights in the spring season were conducted. The research focused on determining the effect of lighting conditions, such as a sun angle above horizon, cloud cover and surface illuminance and weather conditions such as temperature, humidity and atmospheric pressure. For all sample pictures from multispectral camera MicaSense RedEdge-MX the average value of NDVI, GNDVI and NDRE was calculated. Possible correlations were evaluated by Pearson's and Spearman's correlation coefficients. The results revealed the influence of light conditions on the vegetation index values. It seems that the best conditions for remote sensing are during periods of continuous cloud cover, which causes uniform illumination of the surface.

Keywords: agriculture, atmospheric conditions, forestry, multispectral imaging, remote sensing, unmanned aerial system, vegetation index



Poděkování

Děkuji panu Ing. Stanislavovi Kušmírkovi za trpělivost a vedení této práce a za zapůjčení měřicí techniky z fondu laboratoře lidského faktoru a automatizace letectví při FD ČVUT. Děkuji paní Ing. Lence Hanákové, Ph.D. za konzultace v oblasti statistického vyhodnocení dat.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci s názvem *Identifikace optimálních podmínek pro výpočet indexů vegetační plochy* 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 15. 5. 2023

.....
Podpis



Obsah

Úvod	12
1 Přehled současného stavu	13
1.1 Dálkový průzkum Země	13
1.1.1 Elektromagnetické záření	13
1.2 Druhy nosičů	16
1.3 Snímací zařízení	21
1.3.1 Rozlišení	21
1.3.2 Multispektrální kamery	22
1.3.3 Hyperspektrální kamery	28
1.3.4 Ostatní zařízení	30
1.4 Lesnictví, zemědělství, ochrana přírody	32
1.5 Vegetační indexy listových ploch	34
1.6 Současné poznatky o provádění multispektrálního snímkování pomocí UAV ..	38
1.7 Shrnutí poznatků	44
2 Metodika	46
2.1 Použitý hardware a software	46
2.1.1 UAV zařízení	46
2.1.2 Multispektrální kamera	46
2.1.3 Měření meteorologických a světelných podmínek	47
2.2 Výzkumná plocha	47
2.3 Provedení experimentálních letů	48
2.4 Záznam světelných a meteorologických podmínek	51
2.5 Výpočet vegetačních indexů	52
2.6 Statistické metody	56
2.7 Shrnutí metodiky	58
3 Výsledky	59
3.1 Naměřené hodnoty parametrů a vegetačních indexů	59
3.2 Korelační koeficienty	59
3.3 Vliv atmosférických podmínek na výpočet vegetačních indexů	62
Diskuse	70



Závěr	74
Zdroje	75
Přílohy	82

Seznam obrázků

Obrázek 1.1.1 - elektromagnetické spektrum s detailem viditelného spektra a se znázorněním nepřímé úměrnosti mezi frekvencí vlnění a vlnovou délkou [2]	14
Obrázek 1.2 – princip dálkového průzkumu Země – elektromagnetické záření, jehož zdrojem je Slunce, odražené od různých povrchů je zaznamenáván senzory a následně zpracováno a vyhodnoceno v podobě dat [6]	15
Obrázek 1.3 – kvadrokoptéra DJI Matrice 300 RTK [18]	18
Obrázek 1.4 – dron s pevným křídlem SenseFly eBee [20].....	19
Obrázek 1.5 – hybridní dron Atmos Marlyn [22].....	19
Obrázek 1.6 – odrazivost vegetace, vody a suché zeminy [32]	24
Obrázek 1.7 – míra odrazivosti v závislosti na vitalitě listu [35]	25
Obrázek 1.8 – absorpce a odrazivost vlnění vlivem chlorofylu, struktury listu a obsahem vody [34].....	26
Obrázek 1.9 – spektrální pásma (A – E) multispektrální kamery MicaSense RedEdge-MX..	27
Obrázek 1.10 – hyperspektrální kamera Specim FX10 o hmotnosti 1 400g se spektrálním rozlišením 400 – 1000 nm [38].....	28
Obrázek 1.11 – porovnání datového výstupu při použití multispektrální a hyperspektrální kamery [38]	29
Obrázek 1.12 – Porovnání záběrů z termokamery (A) a RGB kamery (B) při senosečích. Dvě žluté šipky na obrázku A znázorňují nálezy srnčat pomocí záběru z termokamery. [81].....	31
Obrázek 1.13 – vizualizace hodnot indexu NDVI dle zdravotního stavu rostliny [57]	35
Obrázek 1.14 – index NDVI vytvořený v programu Matlab z obrázku 1.9 [36]	35
Obrázek 1.15 – křivka průměrné hodnoty NDVI v průběhu roku pro různé druhy plodin [64]	38
Obrázek 1.16 – Schéma úhlu vůči referenční rovině tvořené zemským povrchem [66]	39



Obrázek 1.17 – Schéma trasy pro plánování letů s dronem. Vlevo (A) základní letový plán doplněný příčnými trajektoriemi letu, vpravo doplněný diagonálními přelety za účelem přesnějšího složení výsledného modelu povrchu. [71]	42
Obrázek 1.18 – Souvislost mezi úhlem slunce nad horizontem (A) a průměrnou hodnotou NDVI (B) na dvou výzkumných plochách [71]	43
Obrázek 2.1 – Pro vlastní měření této diplomové práce byla používána multispektrální kamera MicaSense RedEdge-MX	46
Obrázek 2.2 – výzkumná plocha borovice kleče v areálu lesních školek	48
Obrázek 2.3 – vlevo (A) záběr při rychlosti průletu 6km/h a vpravo (B) záběr při rychlosti průletu 21km/h při podmínkách nízké zatažené oblačnosti	49
Obrázek 2.4 – schéma průběhu experimentálního letu nad výzkumnou plochou – přilet z východní strany, zavisení nad plochou pro pořízení časosběrných záběrů a odlet západní stranou	51
Obrázek 2.5 – pokrytí oblačností [78]	52
Obrázek 2.6 – používaný dron DJI Phantom 3 Professional vybavený multispektrální kamerou MicaSense RedEdge-MX	54
Obrázek 2.7 (A) – index NDVI vytvořený v programu Matlab	55
Obrázek 3.1 – graf střední kladné závislosti indexu $NDVI > 0.5$ na vlhkosti vzduchu s korelačním koeficientem $R = 0.4346$	62
Obrázek 3.2 – graf slabé kladné závislosti indexu $NDVI > 0.5$ na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = 0.3855$	63
Obrázek 3.3 – graf slabé záporné závislosti indexu $NDVI > 0.5$ na míře osvětlení povrchu sluncem s korelačním koeficientem $R = -0.3145$	63
Obrázek 3.4 – graf střední kladné závislosti indexu $NDVI > 0.7$ na vlhkosti vzduchu s korelačním koeficientem $R = -0.4699$	64
Obrázek 3.5 – graf střední kladné závislosti indexu $NDVI > 0.7$ na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = 0.4551$	65



Obrázek 3.6 – graf střední záporné závislosti indexu NDVI>0.7 na míře osvětlení povrchu sluncem s korelačním koeficientem $R = - 0.4663$	65
Obrázek 3.7 – graf slabé kladné závislosti indexu GNDVI na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = 0.2471$	66
Obrázek 3.8 – graf silné kladné závislosti indexu GNDVI na rozdílu expozičních časů snímků ve spektrech NIR a Green s korelačním koeficientem $R = 0.6225$	67
Obrázek 3.9 – graf slabé kladné závislosti indexu GNDVI na úhlu slunce nad horizontem s korelačním koeficientem $R = 0.2831$	67
Obrázek 3.10 – graf slabé záporné závislosti indexu NDRE na atmosférickém tlaku s korelačním koeficientem $R = 0.2831$	68
Obrázek 3.11 – – graf slabé kladné závislosti indexu NDRE na míře osvětlení povrchu sluncem s korelačním koeficientem $R = 0.2826$	69
Obrázek 3.12 – graf slabé záporné závislosti indexu NDRE na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = - 0.3281$	69



Seznam tabulek

Tabulka 1.1 – srovnání parametrů různých typů dronů.....	20
Tabulka 1.2 – přehled spektrálních vlastností kamery MicaSense RedEdge-MX [30].....	23
Tabulka 2.1 – vybrané vegetační indexy, jejich vzorce a empiricky stanovené prahové hodnoty pro výpočet průměrné hodnoty indexu.....	54
Tabulka 2.2 – Tabulka s kódy oblačnosti pro kvalitativní klasifikaci světelných podmínek v závislosti na oblačnosti [71].....	56
Tabulka 2.3 – Tabulka s kódy srážek pro kvalitativní klasifikaci vlivu srážek na odrazivost vegetace [vlastní]	57
Tabulka 3.1 – výřez z výstupu měření – zaznamenané hodnoty sledovaných parametrů a vypočítané průměrné hodnoty vegetačních indexů s příslušnými prahovými hodnotami	59
Tabulka 3.2 – p-hodnoty hladiny významnosti pro ověření normality dat	60
Tabulka 3.3 – výsledné korelační koeficienty R s p-hodnotami	61



Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický název	Český název
ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index	
BRDF	bidirection reflectance distribution function	obousměrná distribuční funkce odrazu světla
DPZ		Dálkový průzkum Země
DVI	Difference Vegetation Index	
EV	Exposure Value	expoziční čas
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	
GNSS	Global Navigation Satellite System	
IR	Infrared	infračervené spektrum
NDRE	Normalized Difference Red Edge	
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	
NIR	Near Infrared	blízké infračerv. spektrum
RPA	Remotely Piloted Aircraft	dálkově pilotovaný letoun
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System	dálkově pilotovaný systém
SA	Sun Angle Above Horizon	úhel slunce nad horizontem
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	
SZA	Solar Zenith Angle	sluneční zenitový úhel
TVI	Transformed Vegetation Index	
UAS	Unmanned Aerial System	bezpilotní systém
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	bezpilotní letoun
UV	Ultraviolet	ultrafialové spektrum
VI	Vegetation Index	vegetační index



Úvod

Dálkový průzkum Země (v angličtině označovaný pojmem „remote sensing“) se stal technologickým odvětvím, které v posledních desetiletích otevřelo nové možnosti sběru dat pomocí speciálních snímačů a jeho pokrok a možnosti využití stále narůstají. Své uplatnění přináší na poli vědeckém výzkumu, mnoha průmyslových oborů ale i v běžném životě. Významný pokrok v tomto ohledu přináší dnes stále dostupnější bezpilotní letouny, které představují vhodnou platformu pro nesení a použití snímkovacích kamer (termokamery, multispektrální kamery, hyperspektrální kamery atd.).

Multispektrální kamera kromě viditelného spektra elektromagnetického záření dokáže zaznamenávat i část spektra infračerveného. Díky tomu lze získávat velmi užitečné informace o stavu zemského povrchu a předmětech na něm, které nejsou lidským okem, potažmo běžnými RGB kamerami zaznamenatelné. Zejména rostlinná vegetace odráží v závislosti na svém zdravotním stavu významnou část infračerveného elektromagnetického spektra. Ve spojení s moderními drony to v posledních letech otevřelo nové a naprosto zásadní možnosti v oblastech zemědělství, lesnictví a ochrany přírody a krajiny, které se musí přizpůsobovat měnícím se klimatickým podmínkám.

Informace o zdravotním stavu vegetace a s tím spojenými sledovanými parametry poskytují tzv. vegetační indexy, které se získávají softwarovým zpracováním nasbíraných dat, resp. snímků z použitých kamer. Výsledné indexy v podobě map nebo jednotlivých snímků odhalí v kontextu okolí to, co by člověk nebyl schopný zaznamenat vůbec nebo až s odstupem času, kdy se zhoršený stav vegetace projeví například odumíráním. Cílem této práce je zjistit, jak povětrnostní a světelné podmínky ovlivňují pořízené snímky z multispektrální kamery. Identifikace optimálních podmínek pro výpočet indexů vegetační plochy může přispět k pochopení problematiky využití dronů pro tento účel a ke sběru kvalitních dat pro jejich následné vyhodnocení.



1 Přehled současného stavu

1.1 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (někdy též zkráceně nazýván DPZ) představuje moderní způsob sběru dat o zemském povrchu pomocí snímacích technologií nesených na letounech nebo družicích. Získané letecké, případně družicové snímky jsou analyzovány a poskytují cenné informace, které mohou být využity v mnoha oblastech vědeckého bádání, ale i každodenního života.

1.1.1 Elektromagnetické záření

Pro pochopení fyzikální podstaty získávání dat na dálku bez nutnosti být přímo na povrchu Země je nutné alespoň zkráceně vysvětlit princip odrazivosti elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření je druh příčného vlnění, které kombinuje šíření elektrického a magnetického pole. Šíření těchto dvou polí je na sebe vzájemně kolmé. Parametry vlnění lze popsat vztahem

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

kde c je rychlost vlnění [m/s], λ vlnová délka [m] a f frekvence vlnění [Hz]. Pro potřeby DPZ lze v tomto vztahu rychlost vlnění uvažovat jako konstantní hodnotu rovnou rychlosti šíření světla ve vakuu. Podstatnou vlastností tohoto záření totiž je, že je schopné šířit se v jakémkoliv prostředí včetně vakua. [1]

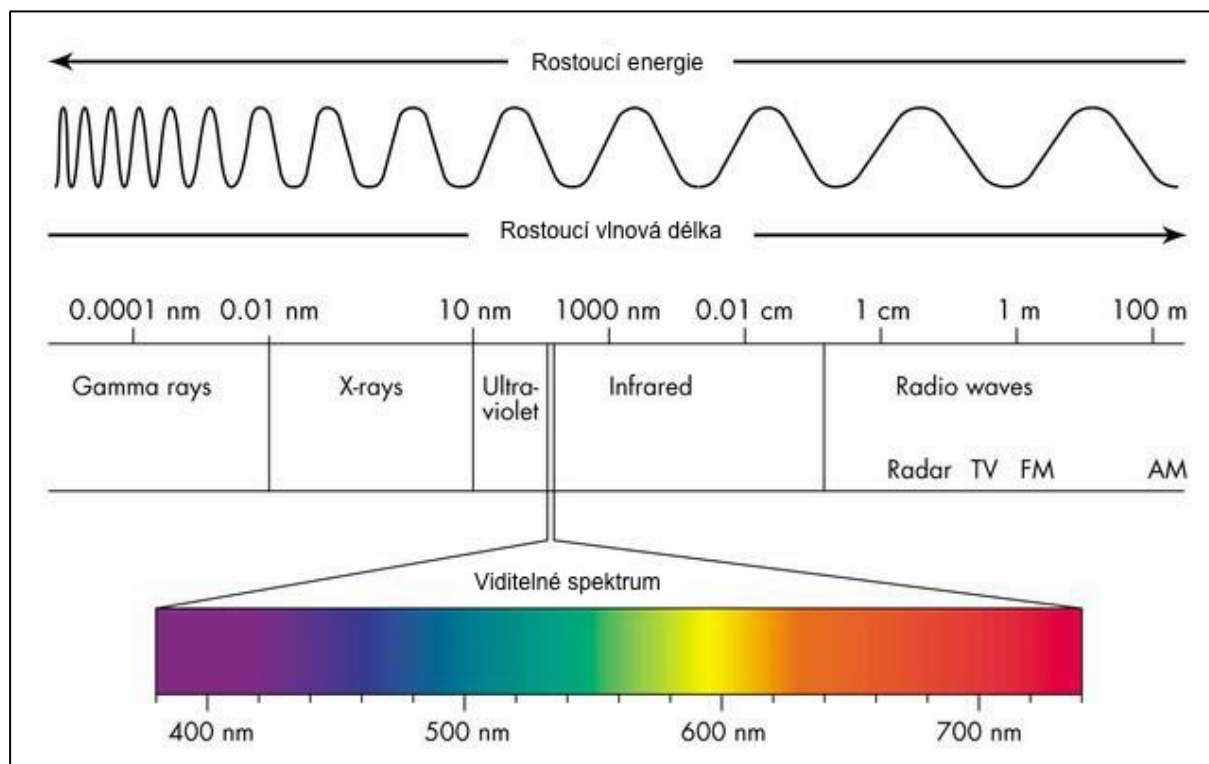
Elektromagnetické záření je charakterizováno vlnovou délkou a frekvencí vlnění, kde s ohledem na konstantní rychlost šíření platí nepřímá úměrnost mezi vlnovou délkou a frekvencí. Tedy čím vyšší je frekvence, tím kratší je vlnová délka (viz obr. 1). Frekvenci lze na základě částicové teorie převést na energii záření dle vztahu

$$E = h \cdot f \quad (2)$$

kde E je energie částice [eV] (v tomto případě fotonu), h je Planckova konstanta [$6.623 \cdot 10^{-34} J \cdot s$] a f je frekvence [Hz]. Energie záření klesá s rostoucí vlnovou délkou [2]

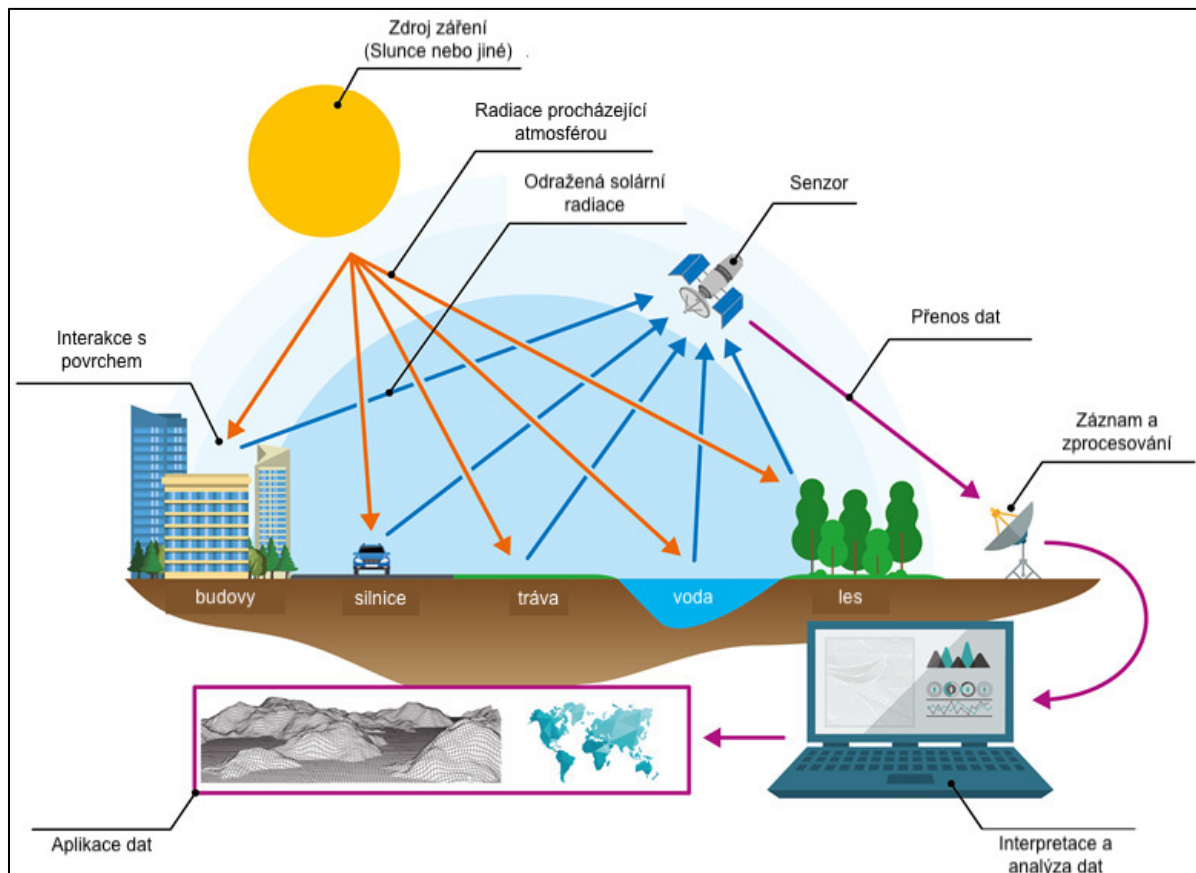
Obrázek 1.1 také znázorňuje lidským okem viditelnou část spektra, která tvoří pouze drobnou výšeř z celkového spektra elektromagnetického záření. Základní jednotkou vlnové délky jsou metry, ovšem v souvislosti s viditelným spektrem a dálkovým průzkumem je nejčastěji

používána jednotka nanometrů. Viditelné spektrum (neboli viditelné světlo pro lidské oko) je tedy definováno jako elektromagnetické vlnění v rozsahu 380 nm – 740 nm. Spektrum vlnových délek kratších než 380 nm je nazýváno ultrafialové záření (UV) a delších než 740 nm je nazýváno infračervené záření (IR). [3, 4, 5]



Obrázek 1.1.1 - elektromagnetické spektrum s detailem viditelného spektra a se znázorněním nepřímé úměrnosti mezi frekvencí vlnění a vlnovou délkou [2]

Po stručném popsání principu elektromagnetického záření lze popsat princip samotného snímkování v rámci DPZ. Nejvýznamnějším zdrojem elektromagnetického záření pro Zemi je Slunce. Tato energie prochází vakuem ve vesmíru a dále proniká přes atmosféru (plynný obal Země) až na povrch Země. Každý předmět, na které toto záření dopadá, určitou část absorbuje a část odrazí zpět do prostoru v závislosti na svých fyzikálních vlastnostech. Toto odražené záření zaznamenávají speciální snímače v podobě různých druhů kamer v závislosti na tom, jaká data je potřeba zkoumat. (viz obr. 1.2). Tento princip je základem oboru DPZ. Díky odlišným fyzikálním vlastnostem různých povrchů a materiálů lze sbírat obrovské množství dat, které je pak moderními metodami zpracováváno a vyhodnocováno. [5]



Obrázek 1.2 – princip dálkového průzkumu Země – elektromagnetické záření, jehož zdrojem je Slunce, odražené od různých povrchů je zaznamenáváno senzory a následně zpracováno a vyhodnoceno v podobě dat [6]

Mohlo by se zdát, že dálkový průzkum je vázán pouze na denní světlo, ovšem je nutné dodat, že v závislosti na použití snímače lze provádět sběr dat i v nočních hodinách. Zdrojem elektromagnetického záření totiž mohou být také umělé zdroje osvětlení. Studie zkoumající optimalizaci výkonnostních parametrů pro multispektrální snímání v noci uvádí, že do budoucna se bude zvyšovat potřeba využití DPZ pro zjištění a analýzu demografických dat zejména v urbanistických oblastech, k čemuž s ohledem na zhoršené světelné podmínky bude nutné používat dostatečně senzitivní techniku. [7] Vedle umělých zdrojů osvětlení lze také nejen v noci snímat objekty, které samy od sebe elektromagnetické vlnění vyzařují. Konkrétním případem je použití termokamery, která zaznamenává lidským okem neviditelnou radiaci energie ve formě infračerveného záření. Tu může objekt produkovat sám (živé organismy, zdroje tepla) nebo ji naakumulovat v průběhu dne při dopadu slunečních paprsků (anorganické materiály jako horniny, vodní plochy atd). [5]



1.2 Druhy nosičů

Aby bylo možné provádět dálkový sběr dat, je zapotřebí zařízení, které je schopné nést požadovaný snímač daných parametrů a zajistit podmínky pro jeho správné fungování (napájení, vhodné umístění, dostatečná nosnost, výškový dosah atd). Tato zařízení jsou na následujících stránkách rozdělena podle vzdálenosti, ve které se pohybují od zkoumaného povrchu, do tří kategorií – satelitní snímkování, letecké snímkování a snímkování pomocí UAV.

První kategorií jsou satelity vysílané na oběžné dráhy Země, které vůbec umožnily vznik odvětví dálkového průzkumu Země. Dodnes jsou používanou platformou, která umožňuje nést velmi výkonné kamery schopné pořídit záznam téměř celého povrchu planety v relativně krátkém časovém úseku. [9, 10, 11]

Pro účely DPZ založila v roce 2014 Evropská unie (EU) ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou (ESA) program Copernicus, jehož cílem je získávat informace o přírodních procesech na Zemi. V rámci tohoto programu bylo uvedeno do provozu několik řad družic se společným označením Sentinel. Každá řada Sentinel nese své specifické číslo (ke konci roku 2022 v provozu celkem 8 družic) a je vybavena specifickými měřicími přístroji dle požadovaného účelu. Družice Sentinel umí získávat data například o stavu a teplotě oceánů, znečištění vod a zemské atmosféry, dopadech přírodních katastrof (záplavy, sopečné erupce, zemětřesení atd.) a v neposlední řadě také snímat odražené elektromagnetické záření ve spektru 442 – 2202 nm. To umožňuje sledování zdravotního stavu vegetace a zemědělských plodin, o čem pojednává kapitola 1.5 „Vegetační indexy listových ploch“. Družice většinou fungují ve dvojici s fázovým posunem 180° a obíhají po stejné dráze. V budoucnu se očekává rozšíření programu o další satelity. [9, 10, 11]

Webový portál „Sentinel Hub“ umožňuje přístup k nejaktuálnějším pořízeným snímkům ze všech provozovaných družic. Tato data jsou tak k dispozici veřejnosti. Vedle toho jsou využívána především orgány veřejné správy a vědeckými institucemi. [8] Na programu se podílí mimo členských států a agentur Evropské unie také Evropská organizace pro využívání meteorologických satelitů (EUMETSAT), Evropské středisko pro střednědobé předpovědi počasí (ECMWF) a nezisková organizace Mercator Ocean. [9, 10, 11]

Vedle evropského programu Copernicus jsou v provozu i další podobné programy za účelem dálkového průzkumu Země, například program Landsat, s kterým započal Národní úřad pro letectví a vesmír (NASA) již v roce 1972. [12, 13]



Družicové snímkování může být použito pro místní, národní i mezinárodní prostorové potřeby. Zároveň lze opakovat sběr dat na stejném místě v různých intervalech (řády dnů až let) a studovat tak různé trendy ve změnách zejména přírodních procesů. Ovšem limitaci pak může představovat kromě rozlišení záběrů také oblačnost. V případě, že se jedná zejména o střední a vysokou, druhou kategorií zařízení pro pořízení dat může být letecké snímkování, které lze provádět v různých letových hladinách. To přináší zejména vyšší rozlišení, které ovšem závisí na letové hladině, rychlosti letu, překryvu jednotlivých snímků a také frekvenci pořizování snímků. Letecké snímkování je vhodné k průzkumu území o velikosti tisíců hektarů a větší. [5, 14] V dnešní době tato metoda hraje mimo vojenské účely hlavní roli při vytváření ortofotomap. Nejčastěji jsou za tímto účelem používány menší letouny s rychlostmi letu 120 – 350 km/h. Snímkování může probíhat během celého roku bez ohledu na vegetační období. [15, 16]

Poslední, „nejmladší“ a pro tuto práci nejvýznamnější skupinou zařízení jsou tzv. bezpilotní systémy (angl. Unmanned Aerial Systems, zkr. UAS) nebo bezpilotní letouny (angl. Unmanned Aerial Vehicle, zkr. UAV) široké veřejnosti známé jako drony. Bepilotní systém (UAS) označuje skupinu prvků, kde samotné UAV je jedním z nich. Charakteristikou této technologie je, že UAV jsou ovládána pilotem na dálku, aniž by byla nutná jeho přítomnost na palubě letounu. Existuje i alternativní označení RPA (angl. Remotely Piloted Aircraft), přeloženo jako „dálkově řízený letoun“, nebo RPA systém (RPAS). [5]

Ty během posledních let velice významným způsobem rozšířili a zpřístupnili možnosti využití dálkového průzkumu a umožnili zcela nové možnosti zkoumání procesů na Zemi. Dnešní trh s UAV nabízí nepřehledné množství variant, ze kterých může spotřebitel vybírat dle účelu, kterému má zařízení sloužit nebo jaký úkol má plnit. Mezi klíčové vlastnosti UAV patří především jeho hmotnost, nosnost (schopnost nést snímací zařízení), výdrž baterie, odolnost proti povětrnostním podmínkám (teplota, vítr) a dosah signálu dálkového ovladače.

Důležitým rozlišovacím znakem je také samotná konstrukce, která určuje charakter úkolu, ke kterému je možné UAV – dron využít. Rozlišujeme totiž vícerotorové drony (angl. multi rotor drone) a drony s tzv. pevným křídlem (angl. fixed wing drone). První zmíněná skupina jsou zařízení, jejichž základní vlastností je vertikální vzlet i přistání a schopnost zavisení ve vzduchu a následného libovolného horizontálního pohybu. Dle počtu rotorů je používáno označení x – koptéra (např. dron se čtyřmi rotory se nazývá kvadrokoptéra, se šesti hexakoptéra atd). Menší počet rotorů zajišťuje větší svižnost a obratnost (minimálně tři rotory), vyšší počet zajišťuje lepší stabilitu a zvyšuje nosnost zařízení. [17] Výhodou těchto strojů je jejich snazší ovladatelnost, což ocení zejména méně zkušení piloti. Zcela zásadní je výše zmíněná

schopnost setrvat na jednom místě ve vzduchu a provádět snímkování nebo pozorování bez pohybu. Nevýhodou je pak vyšší spotřeba energie, což se projevuje zejména na kratší době letu a s tím spojené schopnosti zaznamenat menší plochu. Příkladem kvadrokoptéry – s těmi je možné se setkat v běžném provozu nejčastěji, protože nabízí nejlepší poměr ceny a výkonu, zejména pro amatérské využití s běžnou RGB kamerou – jsou drony od čínského výrobce DJI z řad Phantom, Mavic nebo Matrice. (viz obr. 1.3)



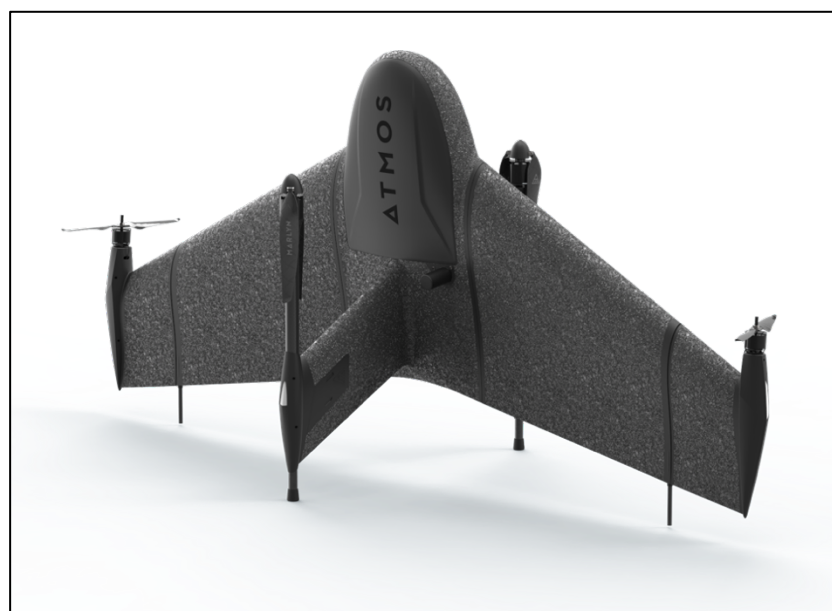
Obrázek 1.3 – kvadrokoptéra DJI Matrice 300 RTK [18]

Drony s pevným křídlem využívají ke svému letu vztlak vytvořený právě díky křídlu. Ten významně snižuje energetickou náročnost na let, a proto vydrží ve vzduchu podstatně déle. Jsou ovšem závislé na dopředném pohybu a nejsou schopny provádět vertikální vzlet a přistání. Proto perimetr pro tyto činnosti musí být podstatně větší než u vícerotorových dronů. Tyto stroje jsou vhodné pro snímání velkých ploch, mají tišší provoz v porovnání s předchozí skupinou, ovšem jejich nosnost a obratnost je limitovaná a ovládání vyžaduje více zkušeností. [19] Příkladem dronu s pevným křídlem je produkt eBee od švýcarské společnosti SenseFly (viz obr. 1.4).



Obrázek 1.4 – dron s pevným křídlem SenseFly eBee [20]

Kombinací těchto dvou konstrukčních přístupů vznikly i tzv. hybridní drony. Tyto stroje jsou schopny vzlétnout a přistát jako multikoptéry a při dosažení požadované letové hladiny kontinuálně přejdou do horizontálního letu. Tím je dosaženo kombinace výhod obou zmiňovaných skupin. Příkladem hybridního dronu je zařízení od nizozemské firmy Atmos s označením Marlyn s hmotností přibližně 5 900 g, nosností nákladu nebo kamery 700 g a pořizovací cenou od 400 000,- Kč (viz obr. 1.5) [21]



Obrázek 1.5 – hybridní dron Atmos Marlyn [22]

Porovnání klíčových vlastností konkrétních strojů uvádí tabulka 1.1:

Tabulka 1.1 – srovnání parametrů různých typů dronů

Název	Typ konstrukce*	Hmotnost [g]	MTOW [g]	Výdrž [min]	Snímaná plocha [ha/let]	Orientační cena [CZK]	Zdroj
DJI Phantom 4 Multispectral	K	1 478	2 300	27	47	165 000	[23]
DJI Mavic 3 Thermal Enterprise	K	920	1 050	45	200	140 000	[23]
DJI Matrice 300 RTK	K	6 300	9 000	55	300	290 000**	[23]
SenseFly eBee X	P	800	1 600	90	500	285 000**	[24]
Atmos Marlyn	H	5 700	6 700	50	320	430 000**	[25]
DJI Phantom 3 Professional	K	1 280	2 000	23	40	22 000	[23]

*Pozn.: * K – kvadrokoptéra; P – pevné křídlo; H – hybridní; ** cena bez kamery*

Na tomto přehledu lze vidět několik faktorů, které vstupují do rozhodování o využití dronů pro potřeby DPZ. První trend lze vidět v poměru mezi cenou a výkonností dronu. Drony s vyšší hmotností, ale i schopností nést těžší zatížení jsou dražší, ovšem je možné na ně umístit výkonnější kamery pro sběr dat s lepším rozlišením, případně využít možnosti uchycení více kamer najednou a získat tak data z několika zařízení v rámci jednoho letu. Dalším faktorem je cenové rozpětí, které poukazuje na to, že tato technologie je dnes již velmi dostupná a může být využita nejen k výzkumným potřebám, ale především k zjišťování informací v reálném provozu napříč různými obory podnikání, zejména pak v zemědělství a lesnictví, a to i pro soukromé nebo komerční účely. V souvislosti s tím je nutno doplnit, že na ceně zařízení se podílí nejen samotná technologie dronu, ale také cena použité kamery.

Výzkumy ohledně využití dronů se v počátku zaměřovali na použití jednoho dronu, což lze využít pro drtivou většinu výzkumných záměrů. V posledních letech se ovšem zkoumají možnosti využití roje dronů, který je složen z několika UAV, jež spolu vzájemně komunikují. To otevírá další možnosti snímání a použití. Jedním z benefitů může být snímání ploch, kde se nachází pohybující se objekty, ať už se jedná o živočichy nebo například vegetaci v pohybu vlivem větru. Roj dronů pořídí několik snímků ve stejném čase z různých úhlu



pohledu, a je tak možné při vyhodnocení z těchto dat vytvářet 3D modely snímané plochy. Dalším výhodou roje může být schopnost vzájemně se navádět ve složitém terénu nebo prostředí bez použití GNSS systému, a to zejména při letu nikoliv nad korunami stromů, ale pod nimi. Drony si vzájemně sdělují informace o překážkách a svých polohách. [26, 27, 28, 29]

1.3 Snímací zařízení

Jak již bylo popsáno v úvodu předchozí kapitoly, podstatou dálkového průzkumu Země je odražené elektromagnetické záření. Pro jeho zaznamenávání dnes slouží celá řada snímacích zařízení (kamery, lasery), která jsou schopna změřit spektrum vlnových délek tohoto vlnění a informace o něm zpracovat. Mezi ty nejběžněji používané patří kamery digitální (RGB), multispektrální, hyperspektrální a termokamery. Dále lze využít radiometrů nebo zařízení pro měření vzdálenosti, například LIDAR (angl. Light Detection and Ranging). Podrobněji je tato problematika popsána v následujících kapitolách.

1.3.1 Rozlišení

Podle knihy „Aplikace dálkového průzkumu Země“ od Petera Surového jsou uvedené čtyři různé typy rozlišení, které lze vyhodnocovat v rámci zpracování získaných snímků. Jedná se o prostorové, spektrální, časové a radiometrické.

Prostorové rozlišení lze definovat jako velikost pixelu snímku k minimální ploše na povrchu, tedy jaká plocha zkoumaného povrchu je obsažena v jednom pixelu na fotografii. Obecně platí, že z čím vyšší výšky je snímkování prováděno, tím nižší je rozlišení a fotografie obsahuje méně detailů. Například rozlišení družicových snímků se pohybuje v řádu jednotek až desítek metrů čtverečních na jeden pixel. Oproti tomu rozlišení fotografií pořízených z dronu může dosahovat až jednotek centimetrů čtverečních. V rámci zpracování dat lze ovšem pomocí procesu zaostření zkombinovat multispektrální snímky nízkého rozlišení s tzv. panchromatickými, které obsahují informace pouze v jednom širokém spektrálním pásmu s vysokým rozlišením. Výsledkem je pak jedna barevná fotografie s rozlišením výchozí panchromatické.

Spektrální rozlišení popisuje schopnost zařízení snímat elektromagnetické vlnění v závislosti na vlnové délce. Toto rozlišení je definováno na základě šířky jednotlivých pásem, jejich středech a celkovém počtu pásem, které jsou při snímání pořízeny. Tento typ rozlišení hraje velmi zásadní roli v problematice multispektrálních a hyperspektrálních kamer, o kterých je



pojednáno v následujících kapitolách. Obecně lze konstatovat, že čím užší spektrální pásma jsou, tím vyšší je spektrální rozlišení, protože poskytuje informace ve velmi úzkém segmentu vlnových délek.

Třetím typem rozlišení je časové, které je zásadní pro pozorování změn na sledovaném povrchu, ať už se jedná o procesy přírodní či nikoliv. Toto rozlišení je závislé na frekvenci snímkování. Kratší časové intervaly v řádu hodin až do jednotek dnů jsou označovány jako vysoké časové rozlišení. Střední rozlišení pak představuje interval více dnů až dvou týdnů a nad tento časový úsek lze hovořit nízkém časovém rozlišení. Krátké intervaly snímkování je vhodné použít v případě například zakrytí části povrchu oblačností, případně pro zkoumání krátce trvajících jevů nebo přírodních vlivů (požáry, povodně). Naopak delší časové rozmezí mezi prováděním jednotlivých měření stačí pro sledování dlouhodobých jevů (změny klimatu, oteplování oceánů, šíření chorob na lesních porostech, odlesňování, defoliace, vlivy sucha, lidská činnost apod.)

Posledním je radiometrické rozlišení, které se odkazuje na přesnost záznamu elektromagnetického vlnění a je závislé na citlivosti detektoru. Citlivější senzory poskytují vyšší radiometrické rozlišení, které je dáno počtem bitů na pixel. Například při datové kvalitě jednoho bitu je informace pixelu v hodnotách 0 nebo 1 (černá/bílá). Při kvalitě dvou bitů už ale hodnota pixelu může nabývat čtyř hodnot, tedy čtyř různých stupňů intenzity. 8 bitů pak představuje škálu od 256 hodnot, atd. To je spojeno i s datovou velikostí výsledného snímku. [5] uvádí příklad, kdy 2-bitový snímek města Tokio z družice Sentinel bude mít velikost 12 MB. Při rozlišení 4-bitů bude mít stejný záznam velikost 46 MB a 8-bitová varianta přibližně 355 MB. [5]

1.3.2 Multispektrální kamery

Multispektrální kamera je snímací zařízení, které je schopno zaznamenávat více pásem spektra elektromagnetického záření. Většina zařízení měří jednotky pásem s šířkou pásma v řádu desítek nanometrů, přičemž se jedná o tzv. pasivní senzor, což znamená, že kamera pouze snímá odražené nebo vyzařované elektromagnetické záření (pozn. aktivní senzory samy vysílají záření a čekají na jeho návrat po odrazu od zkoumaného povrchu). Záznamu jednotlivých spektrálních pásem je docíleno buď pomocí filtrů, které odstraní všechno vlnění nežádoucích vlnových délek, nebo pomocí snímačů, které jsou senzitivní pouze na vymezené spektrum. Pořizovací ceny těchto kamer se pohybují v rozmezí od 70 000,- do 300 000,- Kč. [30]

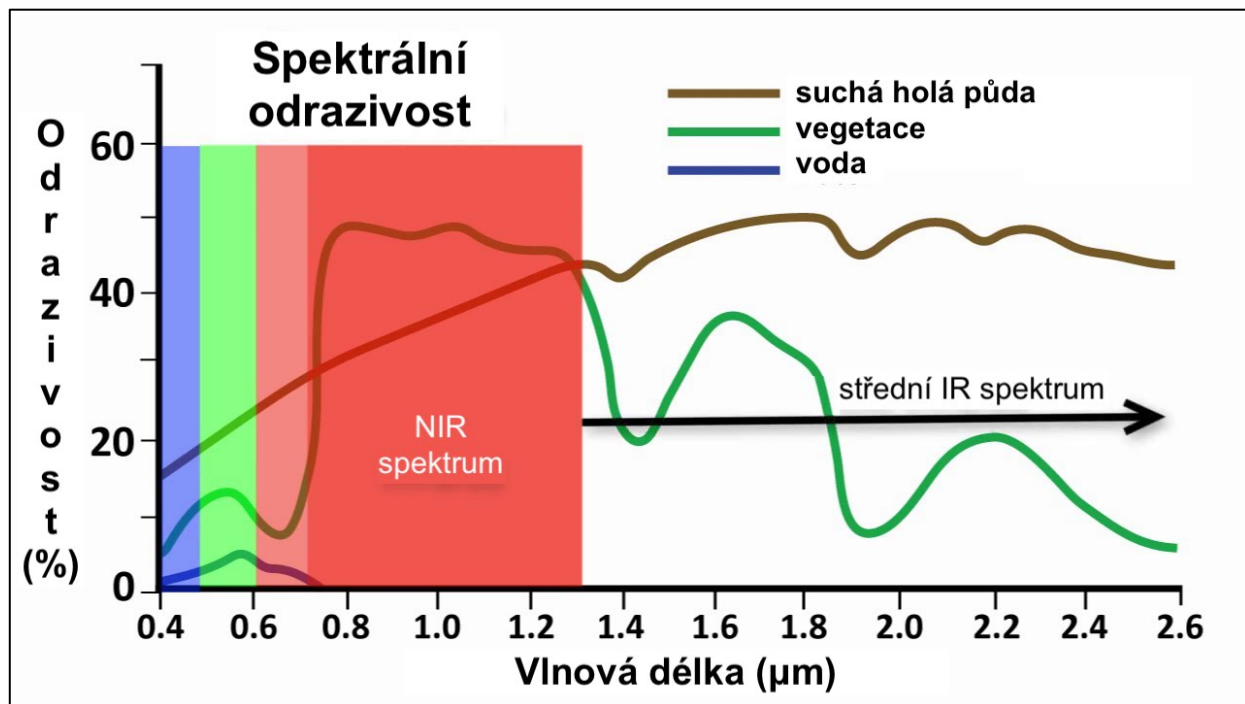


Konkrétním zařízením, které bylo použito v rámci výzkumu této práce je multispektrální kamera s označením RedEdge-MX od výrobce MicaSense. Pořizovací cena této kamery je zhruba 140 000,- Kč. Zařízení má pět optických senzorů, které zaznamenávají pět spektrálních pásem elektromagnetického vlnění (viz tabulka 1.2).

Tabulka 1.2 – přehled spektrálních vlastností kamery MicaSense RedEdge-MX [30]

Název pásma	Střed pásma	Šířka pásma
Blue	475 nm	20 nm
Green	560 nm	20 nm
Red	668 nm	10 nm
Red Edge	717 nm	10 nm
Near Infrared (NIR)	840 nm	40 nm

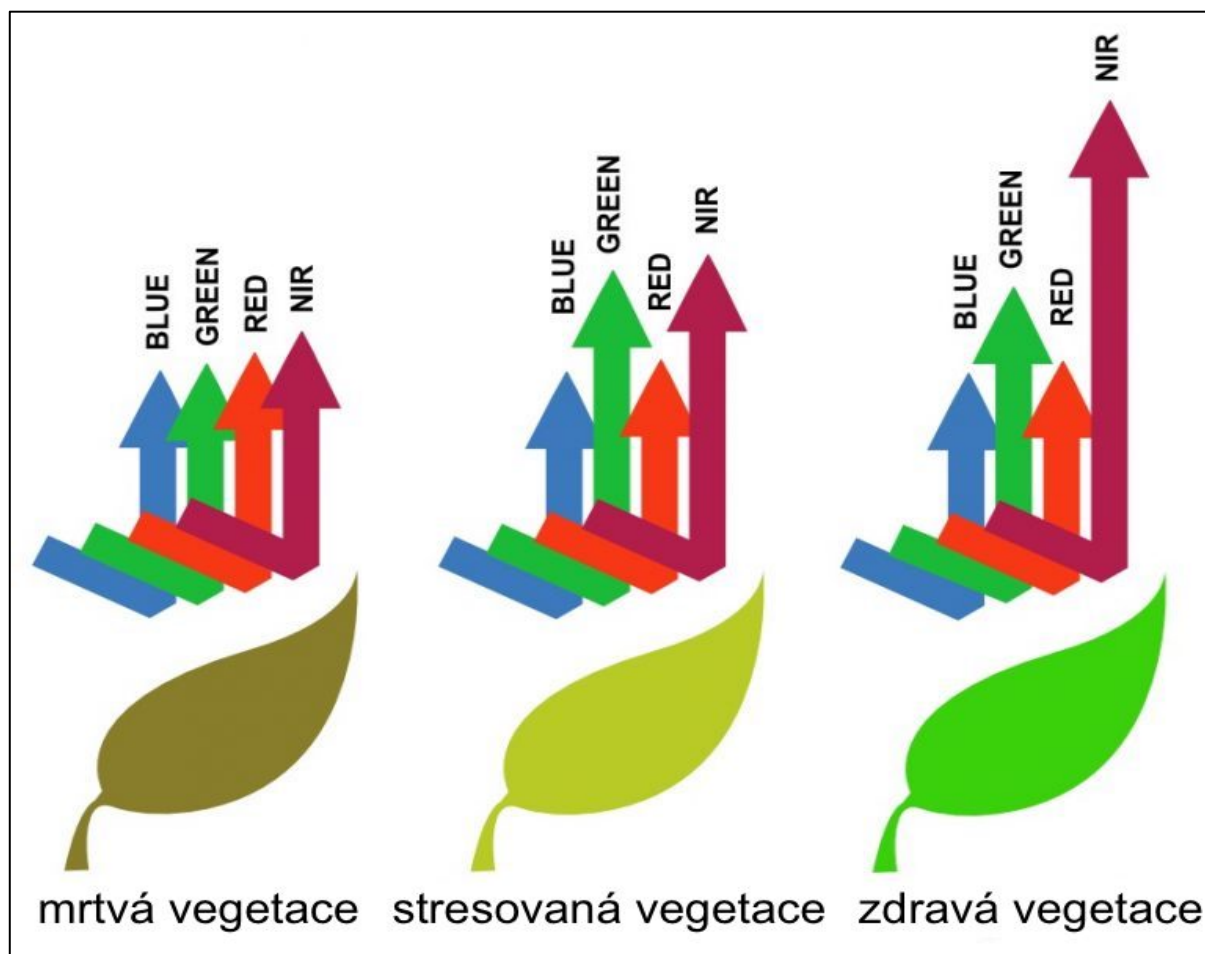
Schopnost snímání okraje infračerveného spektra elektromagnetického záření je tou nejvýznamnější vlastností multispektrálních kamer. Díky tomu totiž lze zkoumat stav vegetace a přírodní procesy s ní spojené. Důvodem je to, že vegetace obecně odráží vysoké procento právě okraje infračerveného záření (spektra „Red Edge“ a „Near Infrared“) ve vlnových délkách od 700 nm do 1300 nm. To je znázorněno na následujícím obrázku č. 1.6, kde je pro porovnání zobrazena i odrazivost povrchu vody a suché zeminy:



Obrázek 1.6 – odrazivost vegetace, vody a suché zeminy [32]

Lze si všimnout, že ve viditelném spektru rozdíly v odrazivosti jednotlivých povrchů nejsou příliš signifikantní, což může působit problémy v jejich odlišení na výsledných fotografiích. Právě spektrum NIR, které je pro lidské oko nezaznamatelné, umožňuje identifikaci vegetace od ostatních ploch. Jedná se zejména o zdravou vegetace, neboť ta odráží nejvyšší procento právě ve spektru NIR. Oproti tomu stresované nebo mrtvé listové plochy neboli tzv. asimilační aparáty (listů, jehličí) mají jiné vlastnosti odrazivosti, což je dáno narušením procesu fotosyntézy nebo snížením obsahu chlorofylu.

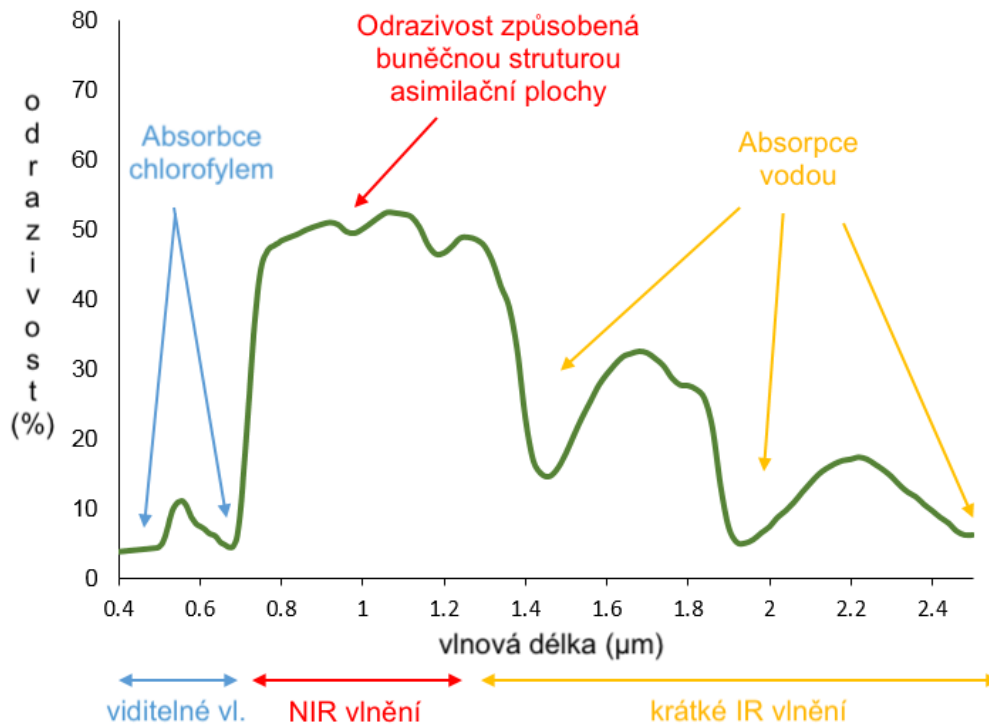
Zdravá vegetace pohlcuje vlnové délky odpovídající modré a červené složce spektra. Tato pohlcená energie slouží jako palivo pro uskutečnění fotosyntézy, tedy zásadní biochemický proces důležitý pro život rostliny. Spektrum zelené barvy je od listů odraženo, proto se vegetace lidskému oku jeví jako zelená. To je způsobeno pigmentem – chlorofylem. Jeho struktura pak způsobuje odrazení i infračervené složky spektra. Z toho důvodu je míra odrazivosti NIR spektra dána především obsahem chlorofylu. Čím lepší je zdravotní kondice rostliny, tím více chlorofylu její asimilační aparáty obsahují a tím více NIR záření odrazí. Díky tomuto principu lze multispektrální kamery využít právě k posouzení zdravotního stavu a odhalit mrtvé nebo stresované části vegetace, ať už na úrovni jednotlivých rostlin, tak rozsáhlých vegetačních ploch v podobě komplexů hospodářských plodin nebo lesních dřevin. [5, 27, 33, 34] Obrázek 1.7 zjednodušeně znázorňuje míru odrazivosti jednotlivých spekter v závislosti na kondici listu.



Obrázek 1.7 – míra odrazivosti v závislosti na vitalitě listu [35]

V souvislosti s odrazivostí jednotlivých spekter uvádí Jacquemond and Baret (1990), že absorpce energie v oblasti vlnových délek 400 – 700 nm je dána především pigmenty v listech, kdežto absorpce oblasti NIR (800 – 1300 nm) je dána především strukturou listu a absorpce navazujícího středního infračerveného spektra (1400 – 2500 nm) je ovlivněna vodou obsaženou v listech (viz obr. 1.8). [34]

Poslední zmíněné oblasti elektromagnetického záření už jsou ovšem mimo problematiku multispektrálních kamer. Odrazivost delších vlnových délek je předmětem zkoumání z pohledu tzv. hyperspektrálních kamer, kterými se zabývá následující kapitola.



Obrázek 1.8 – absorpce a odrazivost vlnění vlivem chlorofylu, struktury listu a obsahem vody [34]

Datový výstup poskytnutý multispektrální kamera RedEdge-MX jsou znázorněny na obrázcích č. 1.9 (A – E), kde lze vidět kukuřičná pole s travnatými souvratěmi a vodní plochou. Obrázky č. 1.9 (A a C) zobrazují odrazivost vlnových délek modré a červené barvy. Jak bylo popsáno výše, tato energie je plně absorbována rostlinou, tudíž vegetace na těchto snímcích se jeví jako tmavá (pixely mají nízký jas). Naopak obrázek č. 1.9 (B), který reprezentuje spektrum zelené barvy, je zřetelně světlejší (pixely znázorňují vyšší jas právě vlivem odraženého záření). Podobně to platí i pro obrázky č. 1.9 (D a E) ve spektrech RedEdge a NIR. Na těchto snímcích si lze také všimnout, že vodní plocha v horním pravém rohu je tvořena téměř černými pixely, neboť infračervené spektrum je vodou zcela pohlceno a nedochází k žádnému odrazu (viz obr. 1.6). Tyto snímky se pak následně využívají pro výpočet tzv. indexů listových ploch, které jsou popsány v kapitole 1.5 „Vegetační indexy listových ploch“.



A – pásmo „Blue“ v rozsahu 465–485 nm
[36]



B – pásmo „Green“ v rozsahu 550–570 nm
[36]



C – pásmo „Red“ v rozsahu 663–673 nm
[36]



D – pásmo „Red edge“ v rozsahu 712–
522 nm [36]



E – pásmo „NIR“ v rozsahu 820–860 nm
[36]

Obrázek 1.9 – spektrální pásma (A – E)
multispektrální kamery MicaSense
RedEdge-MX

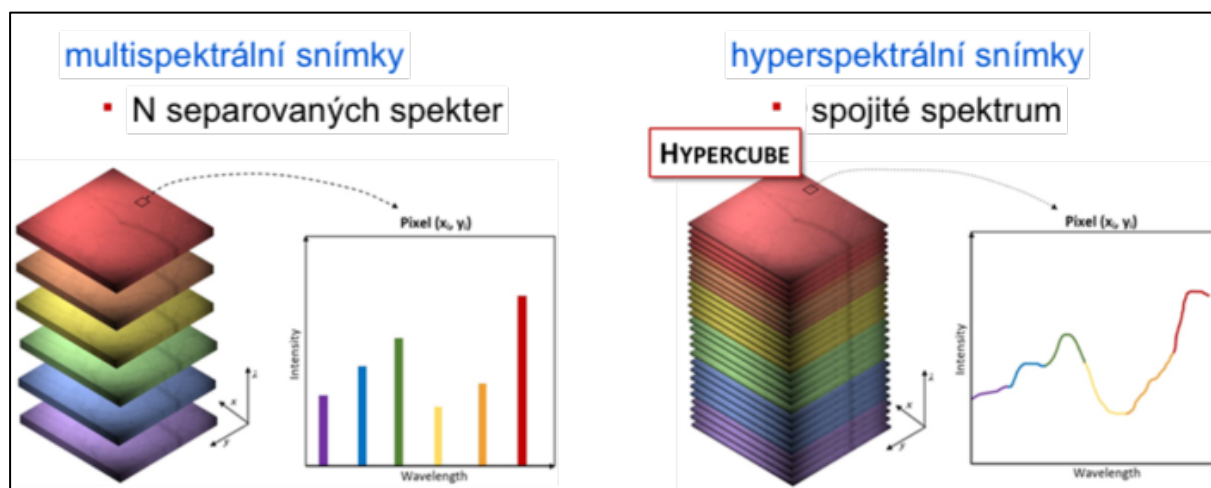
1.3.3 Hyperspektrální kamery

Obdobným zařízením k multispektrálním kamerám jsou kamery hyperspektrální. Fungují na stejném principu, jako bylo popsáno výše, tedy na principu pasivních senzorů zaznamenávajících odražené elektromagnetické záření. Jejich klíčovou vlastností, respektive odlišností je schopnost snímat daleko širší rozsah vlnových délek ve více užších pásmech pouze jedním optickým senzorem (viz obr. 1.10). Zpravidla se jedná o desítky až stovky spektrálních pásem (oproti pěti pásmům u multispektrální kamery) s šířkou pásma v jednotkách nanometrů, které jsou schopny snímat až do vlnových délek okolo 2 500 nm, výjimečně až přes 5 000 nm. Jedná se pokrytí celé oblasti blízkého infračerveného spektra (800 – 2 500 nm), případně částečně zasahuje i do střední infračervené oblasti (nad 2 500 nm). [37] S ohledem na lepší schopnosti se pořizovací cena hyperspektrálních kamer pohybuje přibližně v rozmezí od 300 000,- Kč do 1 100 000,- Kč. Zajímavostí je, že kamery ve většině případů nejsou schopny snímat viditelné spektrum, jejich schopnost záznamu začíná právě v oblasti 800 nm.



Obrázek 1.10 – hyperspektrální kamera Specim FX10 o hmotnosti 1 400g se spektrálním rozlišením 400 – 1000 nm [38]

Následující obrázek č. 1.11 znázorňuje porovnání výstupu mezi multispektrální kamery s jednotkami pásem a hyperspektrální kamery s desítkami pásem. Hyperspektrální snímkování poskytuje kontinuální křivku odrazivosti napříč celým spektrem vlnových délek. [38]



Obrázek 1.11 – porovnání datového výstupu při použití multispektrální a hyperspektrální kamery [38]

Hyperspektrální kamery jsou schopny poskytnout mnohem více dat, která mohou odhalit podstatně více informací o přírodních procesech. Díky tomu lze odhalit stresové faktory a jiné negativní vlivy u vegetace ještě dříve, než se projeví na datech z multispektrální kamery, neboť se projeví změnou odrazivosti delších vlnových délek. Vedle toho dokážou také detekovat například obsahy různých látek nejen u vegetace, přitom se jedná o bezkontaktní metodu, kdy není nutné odebírat vzorky a laboratorně je zkoumat. Příkladem může být studie Zhao et. al (2014) zaměřená na zjištění důležitých vlnových délek, které nejvíce odhalují prostorové rozložení dusíku v listech a kořenovém systému. Výsledky určily za nejvhodnější vlnové délky v oblasti 757 a 916 nm a zároveň ukázaly, že nejvyšší koncentrace dusíku, který je v rostlinách obsažen ve formě dusičnanů a je přijímán vodou z půdy přes kořenový systém, je právě v nejmladších listech. To zároveň ukázalo, že koncentrace dusíku přímo souvisí s tvorbou chlorofylu, tudíž obsah chlorofylu lze považovat za indikátor stavu dusíku. [39, 40] Následující studie Ansari et al (2016) byly provedeny za účelem zkoumání obsahu dalších stavebních látek rostlin jako je fosfor a draslík. Ty odhalily, že je částečně možné zkoumat odrazivost těchto prvků i pomocí multispektrálních kamer, ale tyto možnosti jsou velmi omezené a záleží zejména na vegetativním stádiu rostliny. [41]



Obdobně lze sledovat obsah dalších látek jako jsou organické sloučeniny obsahující uhlík, určité druhy hydroxidů a kyselin, dále proteiny, lipidy, karbohydráty, ale také například obsah kofein nebo vodu. Pro zkoumání těchto látek je nezbytné právě spektrum od 700 do 2 500 nm. Informace o stavu a koncentracích látek jsou využívány například ke kontrole potravin, při recyklaci plastů apod. [42]

Hyperspektrální kamery jsou pro potřeby dálkového průzkumu Země využívány především v rámci družicového snímání. V komerční a soukromé sféře nejsou s ohledem na jejich cenu a náročnost vyhodnocení velkého objemu dat příliš rozšířené, i přestože drony jsou také použitelnou platformou pro jejich nesení. Výhodou jejich použití pro potřeby zemědělství a lesnictví může být detekce konkrétního stresového faktoru nebo konkrétního napadení nebo nákazy rostlin, případně odhalení jiných abiotických činitelů na základě přesnější specifikace odraženého spektra. Multispektrální kamery kvůli svému spektrálnímu omezení dokážou určit zpravidla pouze obecný zdravotní stav vegetace. [43, 44]

1.3.4 Ostatní zařízení

Mimo výše popsaných kamer existují i další druhy záznamových zařízení, které jsou v odvětví DPZ využívány. Tím zcela běžně využívaným, zejména v kombinaci s cenově dostupnými drony, jsou klasické RGB kamery nebo fotoaparáty. Ty vytvářejí většinou barevné snímky ve viditelném spektru elektromagnetického záření. Data pak mohou sloužit k celé řadě účelů v každodenním životě, ale i ve specializovaných odvětvích, neboť dnešní technologie nabízí záznam s velmi vysokým prostorovým rozlišením. Toho lze využít opět v zemědělství a lesnictví, i když ostatní průmyslová odvětví také nejsou vyloučena. Analýza dat RGB kamery dokáže v dnešní době poskytnout informace o množství biomasy nebo zásob dřeva v lesních porostech, dále na jejím základě lze provádět inventarizaci produkce, sledovat růst plodin, heterogenitu zavlažování a hnojení, optimalizovat sklizeň a podobně. Pro potřeby myslivosti je možné touto metodou také sledovat míru poškozování lesních kultur a hospodářských plodin zvěří a monitorovat jejich návyky a chování (ochozy, stávaní, atd).

V souvislosti s volně žijící zvěří jsou velmi často využívány i termokamery. Ty fungují na principu snímání infračerveného záření v rozsahu 1 000 až 14 000 nm, které sledované předměty vyzařují v různé intenzitě v závislosti na jejich teplotě. Protože není tato technologie závislá na odraženém elektromagnetickém záření zejména ze Slunce, je použitelná i v noci. Zaznamenané infračervené záření je pak převedeno do viditelného obrazu, který může být černobílý nebo barevný a kde různé úrovně šedi nebo barevnosti znázorňují rozdílné úrovně

vyzařování mezi sledovaným objektem a okolím. Klíčovou vlastností těchto kamer je, že je lze použít i při zhoršených atmosférických podmínkách jako je výskyt mlhy, aerosolu, smogu nebo kouře. Bezpilotní letouny vybavené termokamerou mají svůj obrovský význam zejména v období senosečí (květen – červenec), neboť v této době jsou kladena mláďata zejména srnce obecného právě do vysoké trávy. Pomocí těchto systémů je lze efektivně vyhledávat (viz obr. 1.12) i na velkých plochách a ochránit je tak před usmrcením. Tato technologie může být samozřejmě použita i pro zjišťování početních stavů zvěře, zejména v nočních hodinách, kdy je zvěř aktivní, a na základě toho přijímat opatření pro vyvážené lesní hospodaření. Dalším způsobem využití je sledování vlhkosti půdy nebo schopnosti absorpce a kumulace tepla různými povrchy a následnou prostorovou a časovou distribuci této energie. Dále mohou být termokamery využity pro vojenské účely, při pátracích akcích, v energetice nebo v mnoha dalších průmyslových odvětvích. [45, 46]



Obrázek 1.12 – Porovnání záběrů z termokamery (A) a RGB kamery (B) při senosečích. Dvě žluté šipky na obrázku A znázorňují nálezy srnčat pomocí záběru z termokamery. [81]

Jedním ze zástupců aktivních senzorů je technologie zvaná LiDAR (angl. Light Detection and Ranging), přeloženo jako „světelná detekce a zaměřování“. Jedná se laserový skener, který funguje na principu vysílání aktivních světelných pulsů a měření doby jejich návratu po odrazu od zemského povrchu nebo předmětu. To umožňuje vytvářet 3D modely terénu a objektů. Existují dva typy tohoto senzoru: topografický a batymetrický. Topografické senzory emitují pulsy s vlnovými délkami ve spektru NIR, které postačují pro vytváření modelů většiny objektů. Pokud je zapotřebí získat ale informace o reliéfu pod vodní hladinou, jsou využity batymetrické senzory, které využívají vlnové délky v rozsahu 530 nm (viditelné spektrum zelené barvy), které dokáže proniknout skrz vodu. [47] Princip fungování technologie LiDAR využívají například parkovací senzory na automobilech k určení vzdálenosti k překážce. V sofistikovanějším pojetí lze pomocí této metody vytvářet trojrozměrné modely lesa a



zjišťovat například výšku porostu nebo objem lesní hmoty na základě vyhodnocení bodového mračka, které je výstupem z laserového měření a představuje soubor velkého množství jednotlivých bodů, které je následně zpracováno pomocí dostupných softwarových řešení. Senzory LiDAR mohou být použity v kombinaci s UAV nebo ve variantě ručního snímače, který se dostal už i do moderních mobilních telefonů. [27, 48, 49]

Nevizuálním zástupcem senzorů kompatibilních s UAV je tzv. chemický nos. Jedná se o zařízení využívající technologii hmotnostní spektrometrie plynů, která pomocí elektrického náboje ionizuje zkoumané molekuly látek. Na základě jejich magnetických a elektrických polí se následně určí jejich hmotnost. Počátky zkoumání plynů sahají do 90. let minulého století a tato technologie byla vyvinuta za účelem zkoumání koncentrace látek ve volném vesmíru. Vývoj tuto metodu zdokonalil a dnes je schopna detekovat přítomnost látky i v extrémně malé koncentraci. Toho lze využít například k rozpoznání onemocnění z lidského dechu.

V oboru lesnictví je tato technologie v kombinaci s drony využívána opět k monitorování zdravotního stavu. Stromy napadené škůdci totiž vylučují specifické chemické látky. Principem této „chemické“ obrany je, že vylučované vůně lákají ptactvo, které pak škůdce likviduje. Dále lze technologii hmotnostní spektrometrie využít v potravinářství ke zjišťování kvality potravin, ve farmaceutickém průmyslu ke sledování čistoty přípravků používaných při přípravě léčiv, v průmyslu ke kontrole unikání nežádoucích látek do ovzduší nebo při celních kontrolách k detekci přepravy nebezpečných látek například v lodních kontejnerech. [27, 50, 51]

1.4 Lesnictví, zemědělství, ochrana přírody

Jak naznačily předchozí kapitoly, pro obor lesnictví jsou metody a technologie používané v rámci DPZ velkým přínosem a otevírají zcela nové možnosti efektivního lesního hospodaření. Dokládá to i exponenciální nárůst počtu provedených výzkumů. Obdobná situace platí i pro odvětví zemědělství, které má s lesnictvím mnoho společného.

Pro pochopení přínosu využití multispektrálních kamer v kombinaci s bezpilotními letouny je vhodné stručně popsat princip lesního a zemědělského hospodaření. V lesnictví přípravou sadebního materiálu v lesních školkách. Vypěstované sazenice jsou pak následně vysázeny na plochu určenou k zalesnění. Následující roky probíhá tzv. zajištění kultury, kdy je potřeba zajistit, aby sazenice vyrostly do určité výšky, kdy nejsou náchylné k poškození zvěří nebo nejsou utlačeny růstem buřeneš, tedy nežádoucí přizemní vegetace. Po zhruba 15 – 20 letech následuje první tzv. výchovný zásah, kdy je potřeba hustý porost prosvětlit vyřezáním části



stromů. Tyto procesy zvané „probírka“ se pravidelně opakují, dokud porost nedosáhne tzv. mýtního věku, kdy je určen ke kompletnímu vytěžení. Poté následuje opět výsadba nových sazenic a celý cyklus se opakuje. Je zapotřebí si uvědomit, že takový cyklus od výsadby po poslední těžbu může trvat v průměru 100 let. Během této doby se mohou ale vyskytnout důvody, proč celý porost vytěžit dříve – například kůrovcová kalamita, polomy způsobené větrem apod.

Procesy zemědělství probíhají ve výrazně kratším časovém úseku, a to zpravidla do jednoho roku. Celý proces začíná přípravou půdy, následují setí nebo sadba (podzim pro ozimé odrůdy nebo na jaře). V průběhu jara a léta probíhá růst plodin a v létě, případně začátkem podzimu je prováděna sklizeň úrody. V průběhu růstu jsou aplikovány postřiky pro škůdcům a k likvidaci plevelů, zároveň probíhá aplikace hnojiv.

Ve všech fázích jak lesnických, tak zemědělských vegetačních cyklů má využití multispektrálních kamer svůj význam a může poskytnout cenné informace, díky nimž lze včas zasáhnout. V lesním hospodářství lze například detekovat místa se zhoršujícím se zdravotním stavem, a tak odhalit ohnisko napadení kůrovcem. Tyto stromy musí být co nejdříve odstraněny, aby nedošlo k dalšímu šíření. Výhodou UAV s multispektrální kamerou je tedy především schopnost prozkoumat během jednoho letu plochy v řádech jednotek a desítek hektarů a napadení dřevin detekovat ještě dříve, než se objeví první viditelné známky chřadnutí. V zemědělství tato technologie umožňuje sledovat problematická místa v rámci půdních celků (ohniska s nižší úrodností nebo nižším obsahem vody, napadení škůdci atd.) a efektivně tak aplikovat postřiky a hnojiva pouze v místě problému, nikoliv na celou osetou plochu. To výrazně snižuje finanční náklady na hospodaření. [14]

Dalším přínosem multispektrálních kamer je usnadnění nebo dokonce automatizace inventarizace hospodářských plodin. Díky schopnosti odlišit živou vegetaci od ostatních povrchů, dokáží snímky posloužit k vyhodnocení klíčivosti a spočítání, kolik rostlin na dané ploše roste, i když s od určitého stupně kompaktnosti vegetační plochy se tato schopnost může snižovat. V případě lesních porostů pak díky vytváření 3D modelů lze pomocí algoritmů a strojového učení vyhodnocovat druhy a počty jednotlivých stromů v porostu. [27, 52]

Strojové učení může být využito při zpracování dat i k rozpoznání plísně na listech rostlin, pokud snímkování probíhá z dostatečně krátké vzdálenosti (v řádu jednotek metrů). Nedávné výzkumy dokazují spolehlivost této metody na úrovni 80 %. [53]



V rámci ochrany přírody se zkoumají způsoby využití týkající se nejen vegetace, ale také vodního hospodářství. Pro potřeby studie z roku 2021 byla využita běžně dostupná multispektrální kamera a cílem bylo hodnocení úspěšnosti odfiltrování odraženého záření a určení odrazivosti od vodní hladiny za účelem zjišťování kvality vody na pobřeží a ve vnitrozemí z tohoto zdroje dat. Úspěšnost multispektrální kamery byla porovnána s hyperspektrální kamerou. Výsledky ukázaly, že i tento způsob využití multispektrální kamery je využitelný, i přesto že vykazoval vyšší chybovost než data z hyperspektrálních kamer. I tak lze tuto metodu efektivně využít v případě malých vodních zdrojů k odhalování zdrojů znečištění a jiných potenciálních nebezpečí pro lidské zdraví. [54]

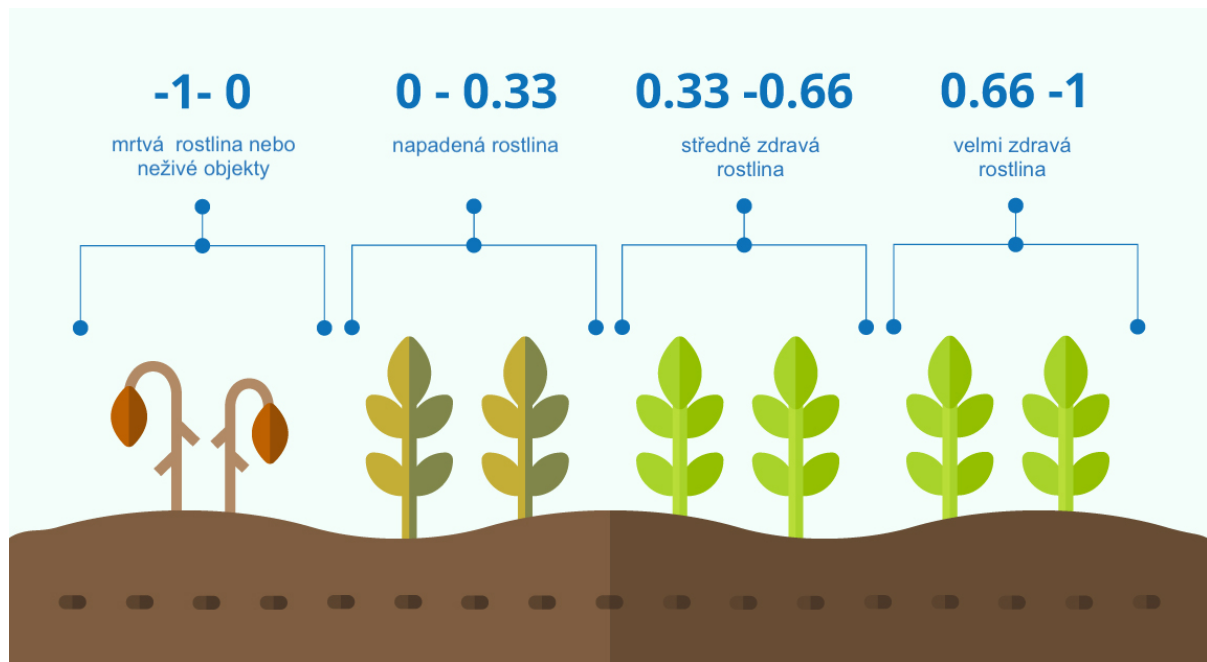
1.5 Vegetační indexy listových ploch

Vyhodnocování dat z multispektrálního snímkování probíhá vytváření tzv. vegetačních indexů (zkráceně VI, anglicky „vegetation indices“), jejichž cílem je vhodně vizualizovat danou situaci dle záměru, který je zkoumán. Proto existuje indexů celá řada a každý má svůj význam pro jinou oblast sledování stavu životního prostředí. Hodnoty všech indexů jsou bezrozměrnými veličinami. Dodnes používané indexy začali vznikat v 70. letech minulého století právě se začátkem prvních satelitních programů pro DPZ. [55]

Tím nejčastěji používaným je index **NDVI** (angl. Normalized Difference Vegetation Index; přeloženo jako „normalizovaný diferenční vegetační index“). Principem toho indexu je kombinace dvou snímků, a to ve spektru Red a NIR dle následujícího vzorce:

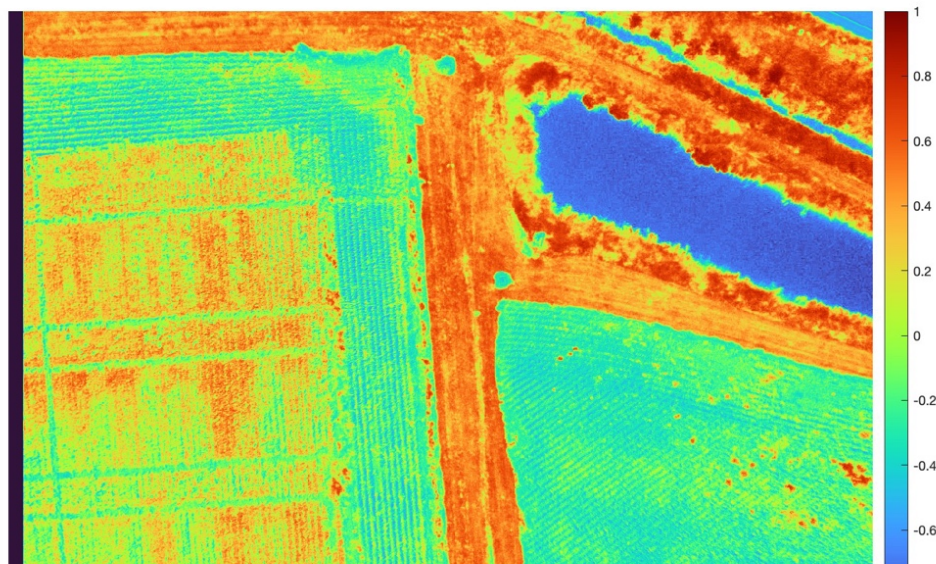
$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

Princip tohoto indexu je znázorněn na obrázku 1.13, kdy může dosahovat hodnot od -1 do 1. Čím zdravější rostlina nebo obecně listová plocha je, zvyšuje se míra odrazivosti ve spektru NIR, jak bylo popsáno v kapitole 1.3.2 „Multispektrální kamery“. Pixely zdravých rostlin pak nabývají hodnot od 1 do 0.33, nezdravé pak od 0.33 do 0. Hodnoty 0 až -1 pak odpovídají mrtvým částem vegetace, vodním plochám nebo dalším neživým povrchům. Definice hranic těchto hodnot se mohou drobně lišit v závislosti na interpretaci různých výrobců multispektrální kamery. Tento index tedy slouží k vizualizaci obecného zdravotního stavu vegetace a také k efektivnímu oddělení vegetace a zeminy. Proto je nejvíce účinný v ranných a středních fázích vegetativního stavu rostlin, ovšem při vysoké úrovni hustoty vegetace se jeho citlivost může snižovat. [56]



Obrázek 1.13 – vizualizace hodnot indexu NDVI dle zdravotního stavu rostliny [57]

Obrázek 1.14 znázorňuje index NDVI pro vzorové snímky, které byly použity v kapitole 1.3.2, kde si lze všimnout vodní plochy s nízkými hodnotami pixelů, dále kukuřičného pole s prosvítající zeminou se středními hodnotami a zatravněných souvratí a vegetace okolo vodní plochy s nejvyššími hodnotami:



Obrázek 1.14 – index NDVI vytvořený v programu Matlab z obrázku 1.9 [36]



Indexu NDVI předcházel index **DVI** (angl. Difference Vegetation Index; přeloženo jako „diferenční vegetační index“, pro který platí vzorec $DVI = NIR - RED$. Plní podobnou funkci jako NDVI, ovšem nenabízí tak výrazný kontrast mezi vegetací a půdou. [58]

Dalším často používaným indexem je **NDRE** (angl. Normalized Difference Red Edge), který má obdobný vzorec jako NDVI, ovšem spektrum Red je zde nahrazeno spektrem Red Edge.

$$NDRE = \frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge} \quad (4)$$

Tento index slouží také k odhalení obecného zdravotního stavu vegetace, ovšem je vhodnější pro použití ve středních a pozdějších vegetačních fázích růstu rostlin. Spektru Red Edge totiž oproti spektru Red není tak výrazně pohlcováno buňkami listů (viz obr. 7), takže při vysoké hustotě biomasy stále poskytuje dostatek informací o odrazivosti. [56]

Dalším obdobou NDVI je **GNDVI** (angl. Green NDVI) s následujícím vzorcem:

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \quad (5)$$

Tento index je též nazýván indexem „zelenosti“ nebo fotosyntetické aktivity. Může být použit v pokročilých vegetativních fázích nebo při mapování hustých vegetací a na základě jeho citlivosti je možné určovat rozdíly v obsahu chlorofylu a s tím spojený obsah dusíku, jak bylo popsáno v kapitole 1.3.3. [58]

Při mapování strukturně rozmanitějšího terénu, kde se nachází velké množství různých druhů povrchů, tedy zejména u družicových snímků zabírajících rozsáhlé plochy, se využívá index **EVI** (angl. Enhanced Vegetation Index; přeloženo jako „vylepšený vegetační index“) se vzorcem

$$EVI = \frac{2,5 \cdot (NIR - Red)}{(NIR + 6 \cdot Red - 7,5 \cdot Blue) + 1} \quad (6)$$

Při jeho použití dochází k redukci šumu, eliminaci atmosférických podmínek a snižování rozdílů v sytostech jednotlivých druhů povrchu. To umožňuje mnohem lépe vizualizovat oblasti s vegetací a bez ní než při pohledu na NDVI nebo GNDVI. [59, 60, 61]

Index **TVI** (angl. Transformed Vegetation Index; přeloženo jako „transformovaný vegetační index“) modifikuje index NDVI v tom smyslu, že pixely s hodnotou vyšší než 0,71 označuje



jako vegetaci a pixely pod tuto prahovou hodnotu vnímá jako nevegetativní povrch. Lze ho tedy opět použít pro odlišení druhů povrchů, ovšem nedokáže převést NDVI hodnoty pixelů menší než -0,5. To vychází ze vzorce:

$$TVI = \sqrt{\frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)}} + 0,5 \quad (7)$$

Mezi jeho benefity ovšem patří schopnost transformovat hodnoty NDVI do normálního rozdělení a snížit chybu způsobenou záznamem snímků v pohybu za letu. Existuje i jeho normalizovaná varianta se zkratkou TDVI. [62, 63]

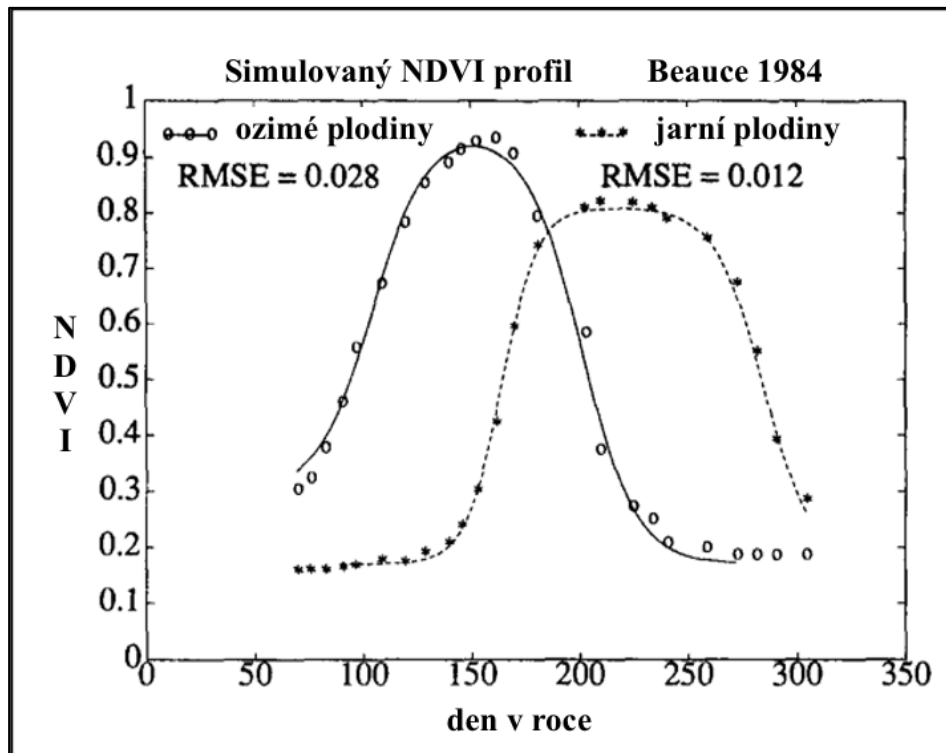
Posledním zmíněným indexem je SAVI (angl. Soil Adjusted Vegetation Index; přeloženo jako „půdní vegetační index“), který využívá korekční konstantu podle míry pokryvu snímku vegetací. Nejčastěji je používána konstanta $L = 0,5$ odpovídající střední míře pokryvu vegetací. Pokud je poměr rostlinné plochy vysoký, konstanta má hodnotu zpravidla $L = 0,25$. V případě nízké pokrývnosti je konstanta $L = 1$. Vzorec indexu SAVI je následující:

$$SAVI = \frac{NIR-Red}{NIR+R+L} \cdot (1 + L) \quad (8)$$

Tento index je určen k hodnocení zdravotního stavu vegetace zejména v sušších oblastech, kde je vysoké procento holé půdy, který by u indexu NDVI výrazně ovlivňovala svou intenzitou odrazivosti ve spektru NIR kvantifikaci živé vegetace. [59, 63]

Přestože vegetačních indexů existuje nepřeberné množství, každý má svůj význam pro svou specifickou oblast dat a nelze určit, který je nejlepší pro určitý typ situace. To potvrzuje mimo jiné i studie Torres (2015) zkoumající metodu dynamického posunu prahové hodnoty indexů na rostlinách rýže, pšenice a kukuřice, která ukázala, že v různých fenologických fázích mohou být nejvhodnější odlišné indexy. Prahové hodnoty mohou sloužit k tomu, že z výsledných indexů se odfiltrují pixely s nežádoucími hodnotami, které představují například neživé předměty apod. Tyto hodnoty se ovšem v průběhu vegetačního období mohou lišit, a proto se za účelem extrakce stěžejních fenologických parametrů z časové řady dat stanovují flexibilní prahové hodnoty. Pro představu je na obrázku 1.15 zobrazena křivka toho, jak se mění

hodnota indexu NDVI v průběhu roku. Tuto křivku vytvořil a popsal v roce 1984 Albert Fischer. [64]

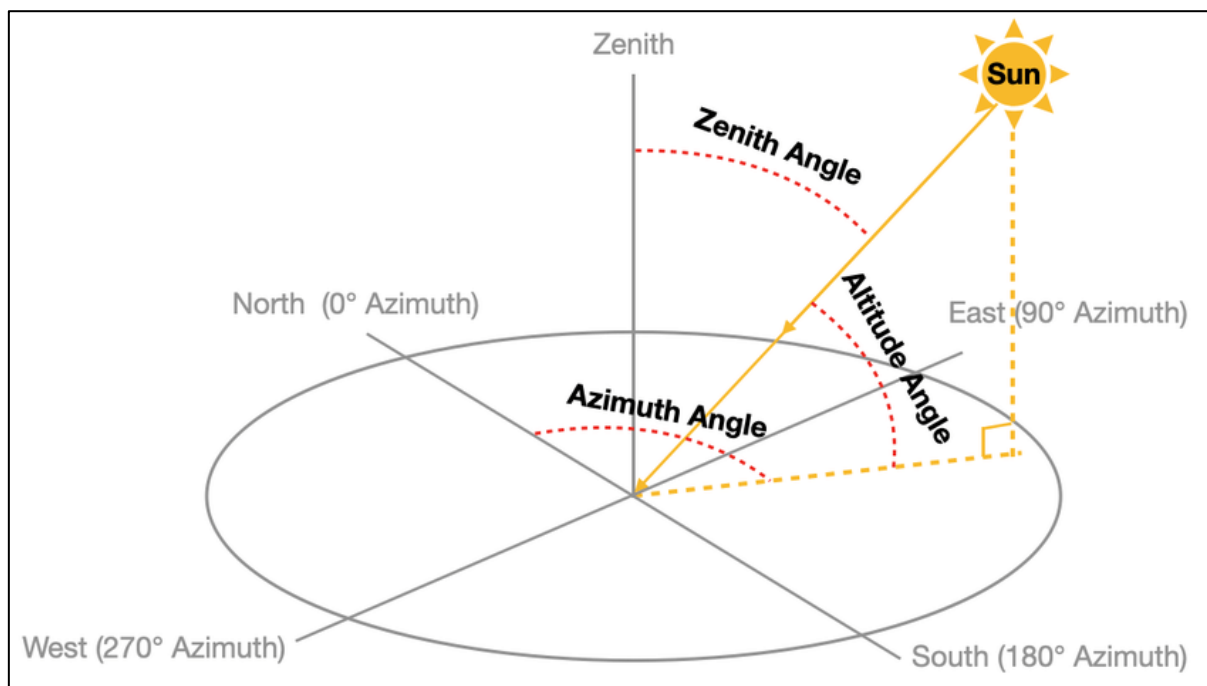


Obrázek 1.15 – křivka průměrné hodnoty NDVI v průběhu roku pro různé druhy plodin [64]

1.6 Současné poznatky o provádění multispektrálního snímkování pomocí UAV

Už v 90. letech minulého století, tedy relativně krátce po začátku používání prvních vegetačních indexů byla pozornost směřována k provádění samotného sběru dat a zjišťování, jaké faktory vstupují do těchto procesů a mohou mít zásadní vliv na výsledky zkoumání. Studie z let 1989 až 1990 zkoumala rozdíly výstupu z radiometrů (měřeno ve spektru Red a NIR) při porovnání zdravé a sušené vegetace a její hmotnosti (v různých stádiích usychání) a částečně se zaměřila i na atmosférické podmínky. Bylo zjištěno, že pokud není vegetace dostatečně hustá, odrazivost odkryté půdy a podíl mrtvých rostlin může způsobit ve výsledném indexu obrovské změny a velmi ovlivnit výzkum. Pokud se podmínky během periody zkoumání velmi liší, nemusí být výstup spolehlivý. Studie Liu et al (2019) uvádí s odkazem na Holbena (1986), že ozonová vrstva pohlcuje Red spektrum a vodní pára NIR spektrum, což snižuje hodnotu NDVI. Bedard (1987) také uvádí, že atmosférická mlha nebo aerosol může také změnit světelné podmínky v porovnání s normálními podmínkami nesnížené viditelnosti. Holben

(1986) také zjistil, že pokud sluneční záření dopadá pod úhlem menším než 30° v rámci zenitového úhlu (angl. Solar Zenith Angle; zkr. SZA; viz obr. 1.16), nemá to významný vliv na výpočet vegetačních indexů (platí zejména pro rovníkové oblasti). Naopak pokud sluneční záření přichází z nižších úhlů nad horizontem, může docházet k tzv. efektu slunečního terminátoru, což popisuje situaci, kdy záření prochází velkou částí atmosféry. K tomu dochází při východu a západu Slunce. V takovém případě jsou hodnoty NDVI vyšší než v průběhu dne. Holben (1986) proto navrhoval, aby SZA nepřekročil 10° , tedy aby Slunce bylo co nejvýše nad zkoumaným povrchem. Obdobně Tucker (1979) navrhoval, aby měření probíhalo na přímém slunci v rámci 1 – 3 hodin od pravého poledne. Co se týká optických podmínek, Gallo (1988) uvedl, že úhel kamery (ve spojení s orbity satelitů), pod kterým snímání povrchu probíhá, nehraje roli při výsledku měření, neboť se jedná o malé odchylky od snímání z tzv. „nadir“ bodu, kdy je sledovaný objekt nebo povrch přímo pod pozorovacím zařízením. Jinými slovy, snímání probíhá kolmo k povrchu. [65]



Obrázek 1.16 – Schéma úhlu vůči referenční rovině tvořené zemským povrchem [66]

Výzkum v oblasti tvoření vegetačních indexů probíhal zejména empiricky. Metaanalýza z roku 1996 provedla zhodnocení možnosti použití tehdy existujících vegetačních indexů. O problematice atmosférických podmínek je v práci zmíněno, že tyto jevy mohou mít vliv především na detekci dynamiky vegetace, tedy sledování fenologie rostlin. K projevu vlivu atmosféry na výsledných datech přispívá zejména vzdálenost mezi sledovanou plochou a snímačem, neboť odražené záření musí projít silnější vrstvou plynů. Tento jev se projevuje především na družicových snímcích. Metaanalýza uvádí, že vliv vodní páry v ovzduší a vliv



Rayleighova rozptylu může způsobit odchylku indexu až o 5,5% s ohledem na to, že absorpce vody ve spektru NIR je schopna snížit obsah informací, v případě této publikace se uvádí hodnota až 20%. Kaufman a Tanré (1992) s ohledem na tuto skutečnost vytvořili index ARVI (angl. Atmospherically Resistant Vegetation Index; přeloženo jako „atmosféricky resistantní vegetační index“). Ten je založený na automatické korekci v červeném spektru pomocí spektra modrého. Dynamický rozsah indexu je podobný jako u NDVI, ale je až čtyřikrát méně senzitivní k projevům vlivu atmosféry, zejména rozptylu vodních par a aerosolu, což v tehdejší době bylo vnímáno jako nejvýznamnější ovlivňující faktory při dálkovém snímání. [67]

Výzkumy prováděné v posledních letech se zaměřují na zkoumání daleko širšího spektra faktorů, které mohou mít vliv na použití multispektrálních senzorů, ať už se jedná o meteorologické podmínky nebo podmínky světelné. Veškeré poznatky v této oblasti lze aplikovat do praxe za účelem sběru kvalitních dat, i když některé výzkumy označují samotný sběr dat za relativně snadný proces a apelují spíše na proces následného zpracování a vyhodnocení dat.

Studie z roku 2018 zabývající se problematikou spektrálních senzorů od teorie až po aplikaci zmiňuje, že jsou významné rozdíly mezi daty sbíranými pomocí kamer umístěných na UAV a pomocí ručních měřicích přístrojů. Tyto rozdíly závisí především na struktuře vegetace, osvětlenosti a geometrii měření. Cílem studie bylo dozvědět se více o vlastnostech multi- a hyperspektrálních dat používaných pro vytváření 2D modelů povrchu. Výzkum probíhal v delším časovém úseku na poli ječmene. Výsledky ukázaly, že zásadní odlišnosti způsobují úhlové vlastnosti fotek, především její okrajové části. Rozdíl „hodnot“ mezi středovými a okrajovými pixely může být až 10 %. Rozdíl až 14 % dokonce vykazují hodnoty porovnávané s daty z pozemních spektrometrů. Obzvláště citlivé jsou v tomto ohledu snímky v Red spektru.

Aplikace těchto poznatků do praxe také odhalila, že vegetační indexy nejsou schopny tyto rozdíly normalizovat, a proto například informace o obsahu chlorofylu mohou být zkreslené v řádu procent uvedených výše. Pro běžné komerční využití není tato odchylka příliš zásadní.

V souvislosti s vegetačními indexy práce také upozornila, že při pohledu kamery svisle dolů se zvyšuje efekt odraženého záření od půdy například mezi řádky s plodinami na polích. Proto je zapotřebí s ohledem na situaci volit vhodný vegetační index, který tuto skutečnost reflektuje. Dalším faktorem, který práce zohledňovala, byl průběh letu ve vztahu k úhlu dopadu světla. Pokud byla letová trajektorie rovnoběžná s paprsky slunce, v zásadě snímky vykazovaly vyšší odrazivost než při létání napříč. [68]



Dalším příkladem na vliv atmosférických podmínek je studie prováděná ve Finsku, která zkoumala na porostu ječmene, jaký vliv mají „field conditions“, tedy přírodní podmínky na výzkumné ploše, na kvalitu dat a výpočty nejčastěji používaných vegetačních indexů. Mezi sledované podmínky patřily intenzita solární radiace, celkový úhrn srážek v průběhu vegetačního období a teplota v době měření. Snímkování probíhalo čtyřikrát denně, a to během tří dnů v roce 2019 a dvou dnů v roce 2020. Výsledky ukázaly, že index NDVI byl nejméně ovlivněn podmínkami na výzkumné ploše. Zároveň se projevilo, že vegetační indexy vykazují odlišnosti i během jednoho dne, přičemž tato variabilita byla do 5 % u indexů NDVI a TVI. U indexu GNDVI se projevila variabilita kolem 10n% v rámci jednoho dne. Závěrem bylo konstatováno, že indexy obsahující NIR spektrum jsou méně ovlivněny světelnými a meteorologickými podmínkami. [69]

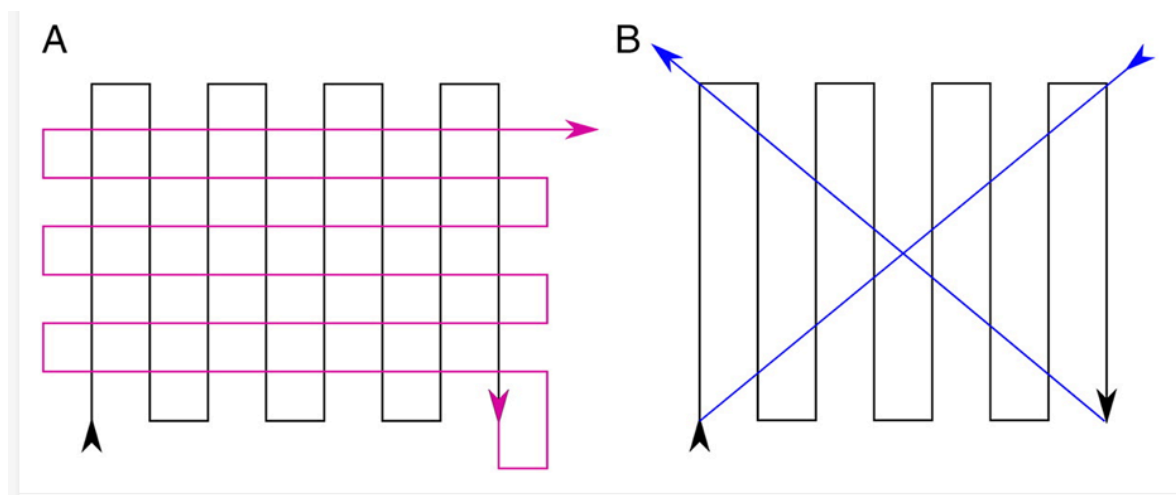
Samotnou kvalitou dat se zabýval výzkum zaměřující se na praktické použití UAV technologie ve vyšších zeměpisných šířkách, neboť rychlý rozvoj těchto technologií způsobil rapidně zvýšenou poptávku po dronech vybavených multispektrálními kamerami. V úvodu je zmíněno, že v soukromém sektoru lze využít především schopnosti této technologie pro stanovení produkce a klasifikace vegetace. Proto vznikají požadavky na standardizovanou metodiku, aby data byla relevantní. Práce se zaměřila na zásadní chyby v oblasti úhlu slunce nad horizontem (angl. „Sun Angle Above Horizon“ nebo pouze „Sun Angle“; zkr. SA), počasí, geolokace a použití vličovacích bodů a radiometrické kalibrace, které v součtu mohou tvořit přibližně 10% v hlavní vegetační sezóně na výzkumné ploše v tundře. Výsledky ukázaly, že chyby mohou být částečně eliminovány zlepšením plánování letů, sběrem metadat, použitím vhodných vličovacích bodů a kontrolou kvality v rámci předzpracování dat.

Při většině leteckých průzkumů za použití dronů je zapotřebí nasnímat plochu v řádech minimálně několika arů, proto je nutné složit výsledný index zkoumané plochy z několika desítek až stovek jednotlivých snímků. Aby spojení a vytvoření modelu proběhlo správně, fotky se musí vzájemně překrývat. To souvisí s problematikou nadir pohledu a kvalitou dat v okrajových částech snímku, která byla popsána na předchozích stránkách. První zásadou, kterou práce uvádí, je nutnost překryvu snímků o 80 % ve všech směrech. Pro porovnání, výrobce multispektrálních kamer ve své metodice sběru dat uvádí minimální hodnotu překryvu alespoň 75 %. [70] Avšak je nutné zmínit, že větší překryv nad 80 % nemusí být vždy přínosný s ohledem na objem dat a potřebný procesní výpočetní výkon. [71]

Plánování letů a volba letové trasy je poměrně složitá záležitost. Vegetace nevyzařuje totiž ve všech směrech stejně, naopak jedná se o funkci úhlu dopadu světla a úhlu, ze kterého kamera

snímá. Tento jev je popisován jako „bidirectional reflectance distribution function“ (zkr. BRDF, přeloženo jako „obousměrná distribuční funkce odrazu světla“). Při nehomogenním osvětlení povrchu představuje tato distribuční funkce výzvu v porovnání stejných pixelů z různých úhlů pohledu, jak uvádí Aasen a Bolten (2018). Proto jsou z toho pohledu vhodnější podmínky difuzního osvětlení způsobené souvislou oblačností. [68]

Pokud nelze dosáhnout v nějakém směru vhodného překryvu (vysoká rychlost, široké otočky pro drony s pevným křídlem), pak je vhodné provést příčné letové linky nebo provést stejný letový plán s mírným posuvem. Pokud se nedaří vytvořit rekonstruovaný povrch (zejména v náročném terénu), pak pro lepší složení výsledného modelu poslouží dva diagonální přelety. Možnosti letových tras jsou na obrázku 1.17:



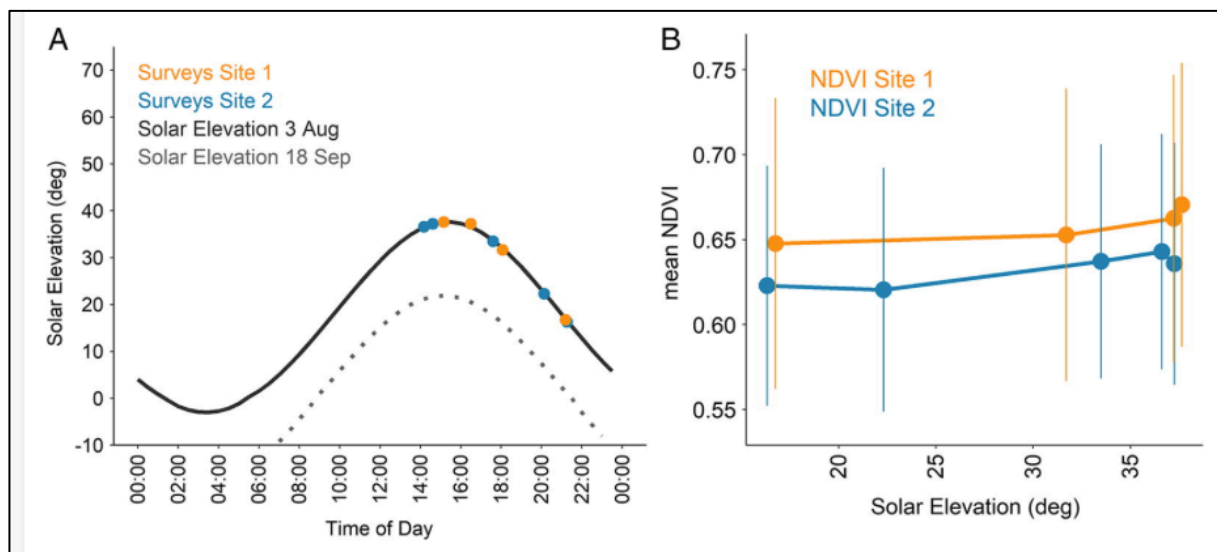
Obrázek 1.17 – Schéma trasy pro plánování letů s dronem. Vlevo (A) základní letový plán doplněný příčnými trajektoriemi letu, vpravo doplněný diagonálními přelety za účelem přesnějšího složení výsledného modelu povrchu. [71]

Počasí a slunce jsou dalšími přispívajícími faktory, které ovlivňují kvalitu dat. Většina dronů není schopna snímat za silného větru i deště. Vliv větru se může projevit především na pohybu vegetace, tuto problematiku je ale schopný řešit roj dronů. [27]

Právě s ohledem na problematiku BRDF, pokrytí oblačností a pozice slunce má vliv na charakter ambientního osvětlení a tvorbu stínu. Variance v úhlu slunce nad horizontem (SA) může způsobit odlišnost v průměrných hodnotách vegetačních indexů. Proto se uvádí, že aby byl tento efekt co nejmenší, měly by lety být prováděny v době, kdy slunce dosahuje co nejvyššího úhlu. Doporučuje se 2 – 3h před a po dosažení maximálního úhlu. Ve vyšších zeměpisných šířkách se tento úhel bude lišit v průběhu roku daleko více než v oblastech blíže

u rovníku, naopak větší rozdíly v rámci jednoho dne budou vykazovat oblasti blíže k rovníku (tzv. diurnal angle – na rovníku dosáhne až 90°, což odpovídá pohledu „nadir“). Za jasného dne do problematiky vstupují také stíny, které mohou hrát významnou roli v hornatém terénu nebo v případě různých výšek porostu. Byly provedeny studie, které zkoumaly možnosti mitigace pomocí postprocesingu. [72]

Vliv této problematiky na výsledný vegetační index znázorňuje následující schéma – obrázek 1.18. Na dvou výzkumných plochách se projeví změny v SA změnou průměrné hodnoty NDVI. Nebyl ovšem odhalen jednotný vzorec chování.



Obrázek 1.18 – Souvislost mezi úhlem slunce nad horizontem (A) a průměrnou hodnotou NDVI (B) na dvou výzkumných plochách [71]

Dalším problematickým faktorem je oblačnost, a to především nízká a střední kupovitá oblačnost, která tvoří výrazné ostré stíny na zkoumané ploše. Pokud je to možné, je vhodné se těmito podmínkám vyhnout, i když i dnes existují možnosti, jak rozdíl v osvětlenosti povrchu alespoň částečně eliminovat. Nejčastěji se k tomu používají kalibrační panely ve spojení se CRP panely umístěnými na dronech. Senzory slouží k záznamu světelných podmínek v průběhu provádění letu. Před provedením letu a po jeho ukončení je ještě datová řada snímků doplněna o snímek kalibračního panelu umístěného na zemi. Pomocí těchto informací je v rámci následného zpracování možné eliminovat rozdíly v osvětlenosti jednotlivých částí zkoumané plochy, ale i tak zde mohou vznikat významné odchylky.



Assmann (2019) na závěr zmiňuje, že záznam teploty a přítomnost mlhy, sněhu nebo námrazy mohou být dodatečným zdrojem informací pro variace při stanovování odrazivosti povrchu. [71]

Kalibrace snímků je často opomíjen, protože se jedná o relativně složitý proces, i když jde o velmi důležitou součást kvalitativního zkoumání, která bere v potaz atmosférické a světelné vlivy. Studie z roku 2019 ukázala, že kalibrace snímků na základě lineární regrese je velmi efektivní pro snímky pořízené během jakéhokoliv počasí. Zároveň se prokázalo, že vlivy atmosféry se navyšují s rostoucí výškou letu, ale pro běžné potřeby v rámci UAV průzkumů tato chyba nepředstavuje zásadní ovlivnění výsledků. [73]

Přestože je dnes známo mnohem více o popsáních atmosférických a světelných vlivech, než se vědělo před několika dekádami, stále se zkoumají nové faktory, které vstupují do problematiky multispektrálního snímkování a vegetačních indexů. [58, 68, 69, 71]

1.7 Shrnutí poznatků

Dálkový průzkum Země (DPZ) je moderní metodou sběru dat, která jsou využívána především ke zkoumání přírodních procesů a k posuzování vlastností různých objektů a druhů povrchu na Zemi. Podstatou je snímání odraženého nebo vyzařovaného elektromagnetického záření speciálním snímačem nebo kamerou. V souvislosti s neaktuálnějšími potřebami využití DPZ jsou používány multispektrální a hyperspektrální kamery, které jsou schopny kromě viditelného spektra elektromagnetického záření (380 – 740 nm) zaznamenat i část infračerveného spektra, konkrétně tzv. blízkou infračervenou oblast (zkr. NIR; 800 – 2500 nm). Multispektrální snímkování probíhá v rozsahu viditelného spektra a části NIR spektra do vlnových délek 900 nm. Tato oblast NIR spektra je zásadní pro zjišťování informací o zdravotním stavu rostlin, neboť se mění množství odraženého elektromagnetického záření. Na základě snímků z multispektrálních kamer jsou pak vytvářeny vegetační indexy, které slouží k určení a vizualizaci kondice vegetace a odhalení případných problematických místech, kde na vegetaci působí různé stresové faktory (nedostatek vody nebo živin, napadení škůdci atd). Významné uplatnění našla tato technologie v zemědělství, lesnictví a ochraně přírody. Mimo výše zmíněných kamer lze v rámci DPZ využít i běžných RGB kamer, termokamer nebo jiných radiometrických zařízení (laserový skener atd).

K měření dat je kromě senzoru zapotřebí nosné zařízení. Nejčastěji se využívá družicové snímkování, letecké snímkování a také snímkování pomocí UAV (bezpilotní letouny). Oblast bezpilotních systémů je poměrně nová a pro její cenovou dostupnost a vysoké rozlišení velmi



žádaná. Mezi běžně využívané UAV zařízení patří rotorové letouny se schopností zavíšení ve vzduchu a letouny s pevným křídlem, které pro změnu dokážou nasnímat větší plochu v rámci úspornějšího chodu.

Sběr dat pomocí UAV je oblastí, kde probíhá řada výzkumů. Stále se objevují nové způsoby využití a tato platforma se tak stala využitelnou i pro komerční a soukromé účely. Aby měla svůj přínos, je nezbytné zaměřit se na způsoby sběru kvalitních dat a jejich následné zpracování. Touto problematikou se zabývají studie publikované zejména v poslední dekádě. Některé z nich zkoumají vliv atmosférických podmínek na výsledky měření, ale jsou zaměřeny spíše na světelné vlivy (úhel slunce nad horizontem, oblačnost) a otázka dalších meteorologických parametrů, jako jsou teplota a tlak vzduchu nebo atmosférický tlak, je opomíjena. Dalšími zmiňovanými problematickými oblastmi, které se mohou významně podílet na chybách při sběru dat, jsou kalibrace snímků a geometrie snímání.

V posledních letech bylo odhaleno mnoho poznatků o tom, jaké vlivy působí na odražené elektromagnetické záření, ale stále chybí shoda na jednotné metodice, která by určila postupy plánování letů UAV, provádění sběru dat a jeho následné zpracování a vyhodnocování.

2 Metodika

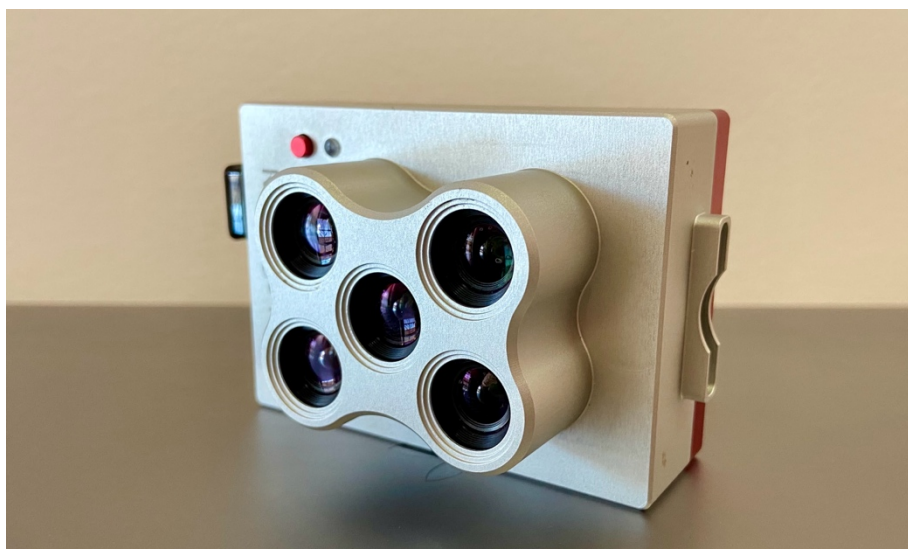
2.1 Použitý hardware a software

2.1.1 UAV zařízení

Pro provádění experimentálních letů byl použit dron DJI Phantom 3 Professional. Ten je standardně vybaven integrovanou 4K kamerou schopnou snímat pouze viditelné spektrum elektromagnetického vlnění, ale díky jeho schopnosti nést přes 700g dodatečného zatížení byl vybaven ještě multispektrální kamerou. Dron DJI byl ovládán pomocí bezdrátového ovladače, který byl propojen s mobilním telefonem. Díky aplikaci DJI GO bylo možné na obrazovce mobilního telefonu vidět aktuální záběr z integrované kamery dronu. Aplikace představuje kompletní rozhraní pro ovládání a nastavení dronu, plánování letů apod.

2.1.2 Multispektrální kamera

Používaná multispektrální kamera MicaSense RedEdge-MX (viz obr. 2.1) snímá elektromagnetické vlnění v pěti spektrech (viz tabulka 1.2 – Blue, Green, Red, Red Edge, NIR). Včetně příslušenství (napájecí kabel, zdroj napájení, příslušenství pro uchycení na dron) vážila 368g. Rozměry kamery jsou 83 x 59 x 45,4 mm, rozlišení všech pěti snímků je 1280 x 960 s kvalitou 1,2 MP. Záběr je v horizontálním směru 47,2° a ve směru vertikálním 35,4°. Pro představu při snímání z výšky 60 metrů nad povrchem představuje jeden pixel zhruba 4 cm ve skutečnosti.



Obrázek 2.1 – Pro vlastní měření této diplomové práce byla používána multispektrální kamera MicaSense RedEdge-MX



Kamera je ovládána a spouštěna přes webové rozhraní pomocí Wi - Fi spojení, kde probíhá veškeré ovládání a nastavování kamery. Pro potřeby této práce byla zásadní funkce živého náhledu aktuálního záběru a také nastavení časosběru včetně frekvence snímkování.

2.1.3 Měření meteorologických a světelných podmínek

K záznamu informací o počasí sloužila bezdrátová meteostanice Garni 291 Line, která snímá teplotu, vlhkost vzduchu a atmosférický tlak. Pro zjištění Kp-indexu, který popisuje geomagnetickou aktivitu kolem Země, byla použit webový portál NOAA – Národního úřadu pro oceán a atmosféru, který je vládní agenturou Ministerstva obchodu Spojených států amerických. [74] Pro výpočet úhlu slunce nad horizontem byla použita kalkulačka dostupná na webovém portálu Omniculator. [75]

2.2 Výzkumná plocha

Základní hypotézou, jak zkoumat vliv atmosférických podmínek na vegetačních indexů, bylo snímání stále stejné výzkumné vegetační plochy v období vegetačního klidu. Důvodem tohoto předpokladu bylo, že fenologická aktivita rostlin nebude ovlivňovat výsledky měření. Zároveň bylo ale zapotřebí zkoumat plochu, která nebude ovlivněna opadem asimilačních aparátů v tomto období. Dalšími předpoklady bylo, aby vegetace byla dostatečně hustá, dosahovala stejné výšky a nacházela se v rovinném terénu z důvodu eliminace nadbytečných stínů způsobených reliéfem nebo odlišnostmi ve výšce částí vegetace. Tyto předpoklady vedly k výběru výzkumné plochy v podobě stejnověkého porostu smrku ztepilého (*Picea Abies L.*) ve stáří 50 let s výškou přibližně 35 m. Konkrétně byl zvolen porost v katastrálním území obce Nové Město pod Smrkem v podhůří Jizerských hor.

Jelikož ale zvolená oblast svým georeliéfem způsobuje časté intenzivní proudění vzduchu, první provedené lety odhalily problémy s výkonností používaného dronu. Stáří baterií a tím způsobené nízké napětí ve spojení se silným větrem a nízkými teplotami neumožnily bezpečné provedení experimentálních letů nad zvoleným porostem. Z toho důvodu byla výzkumná plocha změněna na takovou, která bude v závětří a bude tak bezpečnější s ohledem na provoz dronu. Pro tyto účely posloužily sazenice borovice kleče (*Pinus Mugo Turra*) určené do devátého vegetačního stupně, tedy pro vysokohorské oblasti typické pro kosodřeviny. Výhodou těchto rostlin pro účely diplomové práce bylo, že jejich období vegetačního klidu trvá v závislosti na podmínkách (především teplotě) zhruba do konce dubna, což umožnilo sběr dat až do tohoto období. [76]

Z těchto sazenic ve stáří čtyř let umístěných v plastových přepravkách byla vytvořena výzkumná plocha o velikosti 3 x 6 m (viz obr. 2.2) v areálu lesních školek nacházejících se také v katastrálním území obce Nové Město pod Smrkem. Do výzkumné plochy byl umístěn jeden vlíčovací bod pro vizuální kontrolu, zda složení indexu z různých fotografií proběhlo správně.

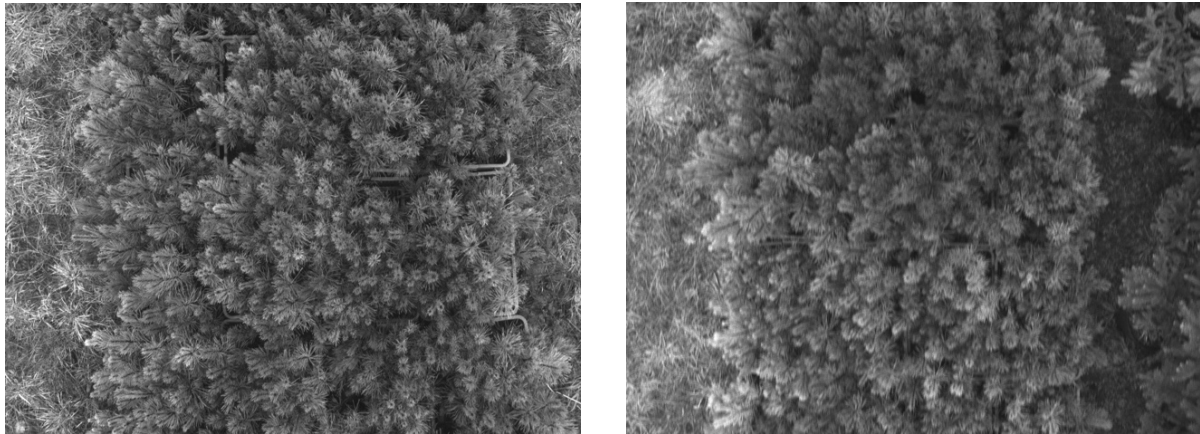


Obrázek 2.2 – výzkumná plocha borovice kleče v areálu lesních školek

2.3 Provedení experimentálních letů

V rámci výzkumu bylo nejprve zapotřebí určit, jakým způsobem budou prováděny experimentální lety dronem. Při snímání plochy totiž existují dvě možnosti pohybu dronu. Tou první je situace, kdy dron letí konstantní rychlostí ve stanovené výšce a focení tedy probíhá v pohybu. Druhou variantou je situace, kdy dron vždy před pořízením snímku zastaví, následně zaznamená fotografii a opět se posune na další pozici. Každá metoda má své výhody i nevýhody. U první popsané lze dosáhnout nasnímání větší plochy s ohledem na výdrž baterie, ovšem kvalita snímků může být ovlivněna pohybem.

Pro vytvoření alespoň hrubé představy bylo provedeno několik přeletů nad referenční plochou při různých rychlostech letu ve výšce přibližně tří metrů nad zemí při zhoršených světelných podmínkách způsobených zataženou oblohou, což má vliv na expoziční čas kamery. Empiricky bylo zjištěno, že do rychlostí okolo 6 km/h kamera spolehlivě zvládá zaznamenat snímaný povrch, aniž by bylo sníženo rozlišení snímků (viz obr. 2.3 (A)). Při vyšších rychlostech už se kvalita snímků významně zhoršuje (viz obr. 2.3 (B)).



Obrázek 2.3 – vlevo (A) záběr při rychlosti průletu 6km/h a vpravo (B) záběr při rychlosti průletu 21km/h při podmínkách nízké zatažené oblačnosti

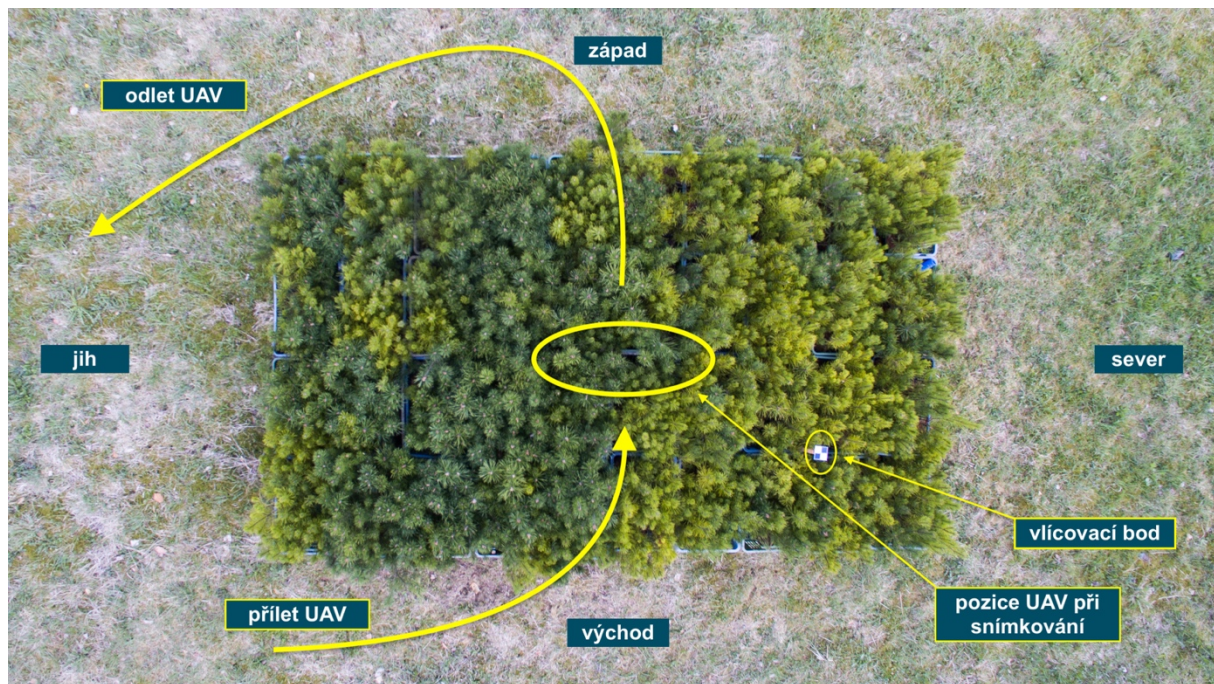
Multispektrální kamera byla nastaven interval pořizování snímku na 0,25 s. Experiment probíhal v době, kdy bylo zataženo s nízkou oblačností, tudíž expoziční čas jednotlivých fotografií byl nižší, než by tomu bylo v případě jasného dne. Na základě toho byl odhalen problém se snímkováním, protože kamera občas vynechala fotografii ve spektru Red Edge, tudíž datový záznam nebyl kompletní. Obdobné problémy kamera vykazovala i při pořizovací sekvenci 0,4 a 0,7 s. Z toho důvodu byl interval upraven na 1 vteřinu, kde už se tento problém nevyskytl za žádných podmínek, a proto byl používán během všech dalších experimentálních letů.

Po zjištění rychlostního omezení byla zkoumána varianta záznamu fotografií v pohybu. Za tímto účelem byl v aplikaci DJI GO naplánován let nad referenční plochou, kdy jsou dronu určeny požadované trajektorie letu dle přesných souřadnic a parametry letu jako je letová rychlost a letová hladina. Cílem bylo takto předdefinovaný let uložit a využívat ho po celou dobu měření, aby byl eliminován lidský faktor při provádění letu. Ukázalo se ovšem, že s ohledem na přesnost GNSS systémů není dron schopen provést identický let s dostatečnou přesností. Jednotlivé trajektorie byly vzájemně posunuty až o 80 cm jak v horizontálním, tak vertikálním směru.



Na základě všech těchto zjištění bylo zvolen způsob, kdy pořizování snímků bylo prováděno při zavisení dronu nad výzkumnou plochou, neboť bylo možné celou referenční plochu zaznamenat v rámci jednoho snímku z výšky přibližně 3,5 metrů. Nepřesnosti v rámci pozice dle GNSS a chyby ve fungování vizuálního pozičního systému, kterým je dron vybaven, neumožnily, aby byla jednotlivá měření provedena z naprosto stejné výšky, ale pro potřeby výzkumu tato skutečnost není příliš zásadní.

Experimentální snímkování probíhalo v období od 16. 3. 2023 do 28. 4. 2023 za různých meteorologických i světelných podmínek a v různých částech dne. Experimentální let započal zapnutím multispektrální kamery a spuštěním časosběrné sekvence s intervalem 1 s. Následně byl zapnut ovladač dronu a dron samotný a proběhlo připojení k mobilnímu telefonu. První průzkumné lety ukázaly, že pokud se nejprve zapnul dron s ovladačem a následně až multispektrální kamera, připojení kamery přes Wi-Fi s mobilním telefonem často vypadávalo a bylo obtížné spustit webové rozhraní a spustit časosběrnou sekvenci. Po zdárném spuštění všech zařízení dron vzletl do požadované výšky přibližně 3,5 metrů a pomocí živého náhledu integrované kamery byl proveden přelet přímo nad výzkumnou plochu. (viz obr. 2.4) Ručním ovládáním byly korigovány výchyly způsobené větrem. Po zavisení v délce cca 30 vteřin, kdy byla pořizena sekvence snímků, proběhl návrat na místo vzletu ve vzdálenosti cca 10 metrů východně od výzkumné plochy a přistání. I přesto, že pro potřeby práce by stačil jeden záznam v pěti spektrech, doba zavisení byla poměrně dlouhá. Bylo totiž nutné sledovat na displeji telefonu informace z aplikace DJI GO o průběhu letu a stavu dronu, takže nemohl být využit živý náhled z multispektrální kamery. Navíc docházelo k problémům Wi-Fi připojením k multispektrální kameře, tudíž by živý náhled nefungoval spolehlivě. Proto bylo během zavisení pořizeno přibližně 30 záznamů, ze kterých v následném zpracování dat byl vybrán ten nejvhodnější. Zároveň tento přístup posloužil k redundanci dat. Všechny snímky byly orientovány tak, že jejich horní okraj směřoval na západ. Průměrná doba provedení letu včetně zapnutí všech systémů činila zhruba 5 minut a celkem bylo uskutečněno 52 měření.



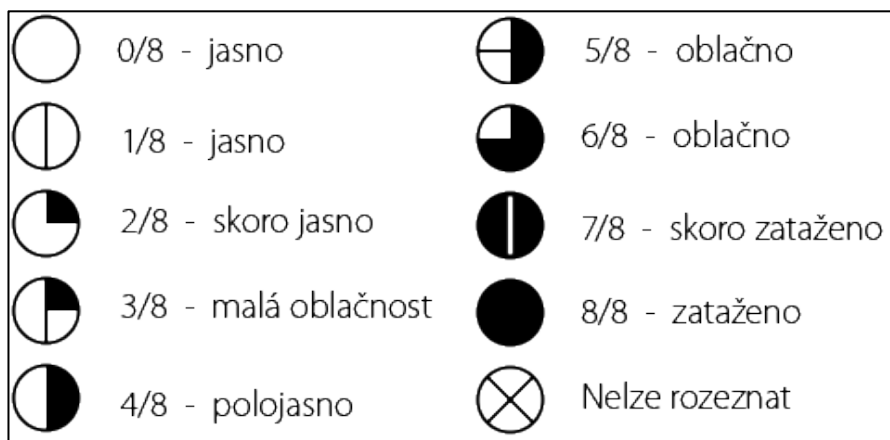
Obrázek 2.4 – schéma průběhu experimentálního letu nad výzkumnou plochou – přilet z východní strany, zavisení nad plochou pro pořízení časosběrných záběrů a odlet západní stranou

2.4 Záznam světelných a meteorologických podmínek

Po přistání a vypnutí všech systémů byly zapsán datum a čas, kdy let proběhl, a veškeré informace o aktuálním počasí. Jednalo se o teplotu a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, celkové pokrytí oblohy oblačností, druh oblačnosti, tlumení slunečního svitu vlivem oblačnosti, procentuální vyjádření množství osvětlené výzkumné plochy sluncem a na závěr informace o srážkách.

Teplota, vlhkost a atmosférický tlak byly změřeny meteostanicí umístěnou přímo pod nadzemní částí jedné ze sazenic borovice kleče. Důvodem tohoto umístění bylo, aby teplota nebyla ovlivněna přímým slunečním svitem, tudíž naměřené hodnoty představují teplotu ve stínu. Zároveň bylo čidlo umístěno pod plastovým krytem, aby do něj nenatekla voda a nebylo tak zkresleno určování vzdušné vlhkosti. Informace o oblačnosti byly zapsány v běžně používané devítidílné stupnici pokrytí oblohy (viz obr. 2.5), kdy 0/8 znamená zcela jasno a 8/8 pak zcela zataženo. 9/8 označuje situaci, kdy druh ani výšku oblačnost nelze vůbec rozeznat.

K míře pokryvu oblohy byly doplněny informace o druhu oblačnosti rozdělené do kategorií „nízká“, „střední“ a „vysoká“ oblačnost. [77]



Obrázek 2.5 – pokrytí oblačností [78]

Dodatečně pak byly zaznamenány informace úhlu slunce nad horizontem, které byly vypočteny pomocí online dostupné kalkulačky po zadání data a času měření a souřadnic místa, kde měření probíhalo. Stejně tak byla zpětně dohledána hodnota K_p – indexu pro specifický den a čas měření. K_p – index je ukazatelem geomagnetické aktivity a popisuje intenzitu elektromagnetického záření, které dopadá na povrch Země. Nakonec byl mezi sledované parametry zapsán i expoziční čas (zkr. EV, angl. Exposure Value) snímků v jednotlivých používaných spektrech, který udává, jak dlouho dopadá světlo na snímač kamery a tedy určuje výsledný jas fotografie.

2.5 Výpočet vegetačních indexů

V rámci každého experimentálního letu s dronem vybaveným multispektrální kamerou (viz obr. 2.6) byla pořízena sekvence několika záznamů ve spektrech Blue, Green, Red, Red Edge a NIR s rozlišením přibližně 2,4 mm na jeden pixel. Všechny snímky byly pořizovány ve formátu TIFF. Z této sekvence byl vybrán vždy jeden nejvodnější záběr, který byl použit pro další zpracování. Po výběru bylo v programu Matlab provedeno složení záběru a vytvoření vegetačních indexů. Pro účely této diplomové práce byly vytvořeny tři často používané indexy – NDVI, GNDVI, NDRE. Důvodem výběru indexu NDVI je, že se jedná o nejvíce používaný index pro zjišťování obecného zdravotního stavu v ranné a střední fázi vegetačního vývoje. Index NDRE byl vybrán, protože je vhodný pro použití ve střední až pozdní vegetační fázi a zvládne analyzovat velmi hustou vegetaci. Posledním indexem byl GNDVI, který je zaměřen také na hustou vegetaci a především na obsah chlorofylu a s tím spojený obsah dusíku v listech rostlin.



Vytváření indexů probíhalo tím způsobem, že fotografie musely být nejdříve slícovány, neboť standardním výstup z kamery MicaSense je pět snímků, které jsou vůči sobě posunuty. To je způsobeno tím, že kamera má pět odlišných čoček umístěných vedle sebe a není schopna slícovat všechny snímky mechanicky s dostatečnou přesností. Dalším důvodem je, že vibrace a pohyb kamery by tento proces mohl také narušit. Proto je slícování potřeba provést manuálně v rámci postprodukce, aby jednotlivé pixely snímku jednoho spektra odpovídaly pixelům na snímcích ostatních spekter. Pro vizuální kontrolu, zda byl proces proveden správně a úspěšně, sloužil vlíčovací bod umístěný v severovýchodním rohu výzkumné plochy.

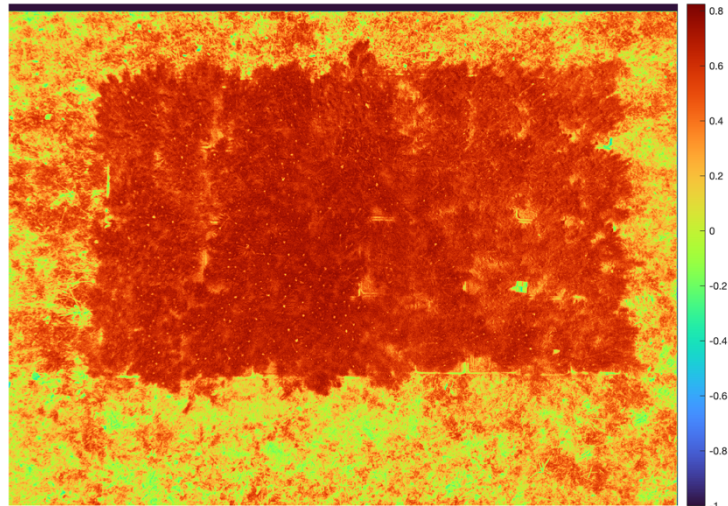
Po provedení procesu slícování proběhl samotný výpočet indexů, který probíhá na základě složení dvou nebo více snímků a výpočetní vzorec je aplikován na všechny pixely záběru. Výsledkem je, že ve složeném záběru, respektive vytvořeném indexu, každý pixel odpovídá určité hodnotě daného indexu. V případě NDVI indexu mají všechny pixely hodnotu v rozmezí od -1 do 1. Následovalo obarvení snímku, aby hodnoty byly vizuálně snadno rozpoznatelné. Na závěr byla ještě vypočítána průměrná hodnota všech pixelů na snímku (po vzoru Lingxiao et al., (2021)) s tím, že do výpočtu byly zahrnuty jen hodnoty přesahující stanovenou prahovou hodnotu (viz tabulka 2.1), aby se výpočet týkal pouze živé vegetace a nebyl ovlivněn odrazivostí okolních nežádoucích materiálů, jako jsou suchá tráva, štěrk nebo plastové přepravky, ve kterých byly umístěny sazenice. [79] Tato prahová hodnota byla zvolena na základě empirického posouzení po vytvoření prvních indexů (viz obr. 2.7) – NDVI (A), GNDVI (B), NDRE (C). Průměrná hodnota pak byla přiřazena k ostatním příslušným informacím o jednotlivých měřeních. Prahová hodnota pro index NDVI byla stanovena ve dvou hodnotách, a to 0,5 a 0,7, aby bylo možné posoudit, jestli odchylky v průměrných hodnotách NDVI u prahové hodnoty 0,5 jsou přibližně stejné jako u prahové hodnoty 0,7 nebo zda vyšší prahová hodnota dokáže odfiltrvat ještě více nežádoucí odrazivosti.

Tabulka 2.1 – vybrané vegetační indexy, jejich vzorce a empiricky stanovené prahové hodnoty pro výpočet průměrné hodnoty indexu

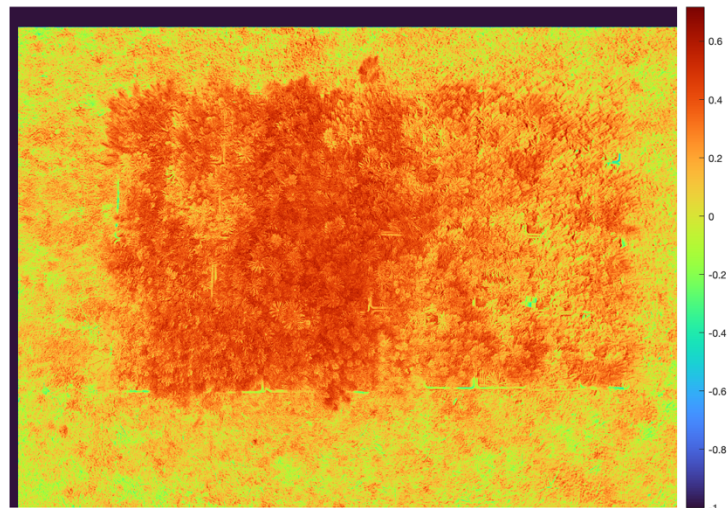
Vegetační index	Vzorec	Prahová hodnota
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	NDVI > 0,5
		NDVI > 0,7
GNDVI	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	GNDVI > 0,3
NDRE	$NDRE = \frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$	NDRE > 0



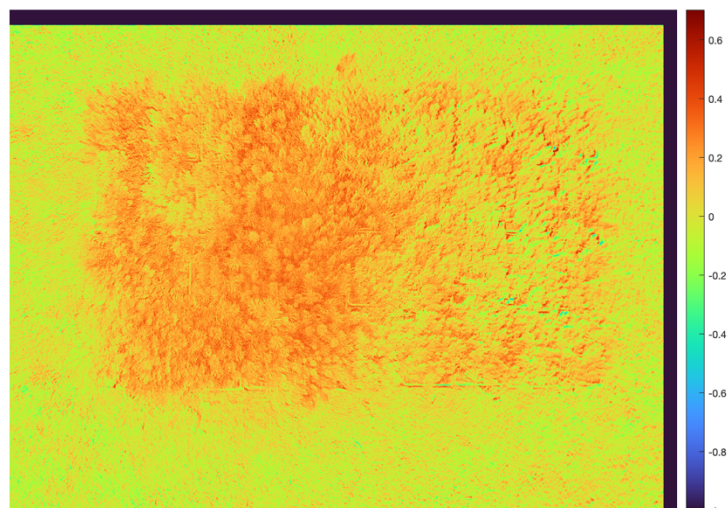
Obrázek 2.6 – používaný dron DJI Phantom 3 Professional vybavený multispektrální kamerou MicaSense RedEdge-MX



Obrázek 2.7 (A) – index NDVI vytvořený v programu Matlab



Obrázek 2.7 (B) – index GNDVI vytvořený v programu Matlab



Obrázek 2.7 (C) – index NDRE vytvořený v programu Matlab



2.6 Statistické metody

Statistické metody posloužili pro vyhodnocení, zda průměrné hodnoty vypočítaných indexů závisí na nějakém z parametrů sledovaných meteorologických a světelných podmínek. Před zjišťováním samotné závislosti bylo nutné klasifikovat nečíselných hodnot spojené s oblačností a srážkami. K tomu byla využita tabulka dle Assmann (2019) (viz tab. 2.2), která kombinuje výšku oblačnosti a míru pokrytí oblohy oblačností a těmto podmínkám přiřazuje tzv. kódy oblačnosti od 0 do 9.

Tabulka 2.2 – Tabulka s kódy oblačnosti pro kvalitativní klasifikaci světelných podmínek v závislosti na oblačnosti [71]

Kód oblačnosti	Popis podmínek
0	Bez oblačnosti
1	Opar nebo slabá mlha
2	Slabý cirrus, slunce není zastíněno
3	Slabý cirrus, slunce je zastíněno
4	Rozptýlený cumulus, slunce není zastíněno
5	Cumulus na většině oblohy, slunce není zastíněno
6	Cumulus, slunce je zastíněno
7	Kompletní zakrytí oblačností typu cumulus
8	Stratus, slunce je zastíněno
9	Mrholení



Podobně byly klasifikovány i informace o srážkách dle tabulky č. 5, které popisují především přítomnost vody na povrchu vegetace. Ta totiž může pohlcovat záření v NIR spektru a měnit optické vlastnosti. [80] Protože výzkum probíhal v období bez úhrnu sněhových srážek, nebylo nutné v tabulce zahrnout i možnost pokrytí výzkumné plochy sněhem.

Tabulka 2.3 – Tabulka s kódy srážek pro kvalitativní klasifikaci vlivu srážek na odrazivost vegetace [vlastní]

Kód srážek	Popis podmínek
0	Beze srážek, povrchu
1	Povrch částečně moký (déle po dešti)
2	Povrch kompletně moký (krátce po dešti)
3	Námraza

Po převedení všech naměřených údajů na číselné hodnoty byla celá tabulka se všemi daty, která je k nahlédnutí v příloze, importována do Matlabu. Nejprve byla vyhodnocena normalita dat pomocí funkce Anderson – Darlingova testu, tedy jestli data pocházejí z normálního rozdělení na hladině významnosti $p = 0,05$. Informace o normalitě dat byla důležitá k výběru správného korelačního koeficientu, jehož výpočtem bylo posouzeno, zda průměrné hodnoty vegetačních indexů závisí na nějakém z testovaných parametrů (teplota, vlhkost, tlak, oblačnost, svit, srážky, úhel slunce nad horizontem a Kp-index).

Pokud data daného parametru pocházela z normálního rozdělení, pomocí Matlabu byl proveden výpočet Pearsonova korelačního koeficientu, jehož výstupem byla hodnota korelačního koeficientu a p-hodnota. Korelační koeficient vyjadřuje míru závislosti mezi dvěma posuzovanými veličinami, tedy mezi parametrem atmosférických podmínek a průměrnou hodnotou vegetačního indexu. P-hodnota pak vyjadřuje, jakou oporu má zkoumaná závislost v testovaných datech. V případě dat nesplňující podmínku normálního rozdělení byl pro výpočet korelačního koeficientu a p-hodnoty použit Spearmanův korelační koeficient.

Závislost byla posouzena podle rozdělení Evansova rozdělení. To označuje korelační koeficient 0 – 0,19 jako velmi slabou, 0,2 – 0,39 jako slabou, 0,4 – 0,59 jako střední, 0,6 – 0,79 jako silnou a 0,8 – 1 jako velmi silnou korelaci. Kladné hodnoty představují kladnou korelaci,



tedy když roste jedna veličina, roste i druhá. Záporná korelace označuje situaci, kdy růst jedné veličiny způsobuje pokles veličiny druhé. [82]

2.7 Shrnutí metodiky

V rámci výzkumu této diplomové práce byly realizovány experimentální lety nad výzkumnou vegetační plochou, která byla tvořena sazenicemi borovice kleče. Plocha se nacházela v areálu lesních školek v katastrálním území obce Nové Město pod Smrkem v Jizerských horách. Cílem letů bylo snímkování vegetační plochy multispektrální kamerou za odlišných atmosférických podmínek. Za tímto účelem byl využit dron DJI Phantom 3 Professional, na který byla umístěna multispektrální kamera MicaSense RedEdge-MX. Po provedení letu, kdy bylo pořízeno několik záběrů v pěti spektrech časosběrnou metodou s intervalem 1 s, byly zapsány informace o aktuální stavu počasí. Dodatečně byly zjištěny další informace o světelných podmínkách. Celkem bylo v rámci 52 provedených letů zkoumáno 9 parametrů – teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, druh oblačnosti, osvětlení povrchu výzkumné plochy sluncem, srážky, úhel slunce nad horizontem, Kp-index a expoziční čas snímků.

Všechna zaznamenaná data pro konkrétní datum a čas byla zapsána do tabulky, která je v celém rozsahu uvedena v příloze. Následoval výpočet tří vegetačních indexů (NDVI, GNDVI, NDRE) z pořízených snímků. Z indexů byly pak vypočítány průměrné hodnoty pixelů daného indexu podle Lingxiao (2021), přičemž do výpočtu byly zahrnuty pouze pixely nad prahovou hodnotou. Tato prahová hodnota byla určena empiricky z prvních snímků za účelem odstranění odrazivosti nežádoucích okolních materiálů. Pro vytváření vegetačních indexů byl použit program Matlab. Zároveň využíván pro vyhodnocení statistické závislosti, zda průměrné hodnoty indexů jsou ovlivněny některým ze sledovaných parametrů. Za tímto účelem byla prověřena normalita dat a následně byly vypočítány korelační koeficienty (Pearsonův koeficient pro data z normálního rozdělení a Spearmanův koeficient pro data mimo normální rozdělení).



3 Výsledky

3.1 Naměřené hodnoty parametrů a vegetačních indexů

Celkem bylo na výzkumné ploše provedeno 52 měření a k nim vypočítány průměrné hodnoty zvolených vegetačních indexů – dva výpočty indexu NDVI s rozdílnými prahovými hodnotami a dále indexy GNDVI a NDRE. Všechna data byla zapsána do tabulky, jejíž kompletní rozsah je uveden v příloze této práce. Ukázková část naměřených dat je v tabulce 3.1. Při zpracovávání snímku a výpočtu vegetačních indexů v programu Matlab nebyl software schopen provést správné slícování ve všech případech složení fotografií. V případě indexu NDVI složeného ze snímků ve spektrech NIR a Red byla úspěšnost 100 %. Pro index GNDVI, který se skládá ze snímků ve spektrech NIR a Green, bylo úspěšně vytvořeno pouze 36 indexů z 52 dvou předpokládaných. Index NDRE složený ze snímků ve spektru NIR a Red Edge se podařilo úspěšně slícovat a vypočítat ve 44 případech.

Tabulka 3.1 – výřez z výstupu měření – zaznamenané hodnoty sledovaných parametrů a vypočítané průměrné hodnoty vegetačních indexů s příslušnými prahovými hodnotami

Datum	Čas UTC	Teplota [°C]	Vlhkost [%]	Tlak [hPa]	Oblačnost	Svit Slunce	Sun Angle [°]	Kp Index	Srážky
20.4.	12:44	11,0	66%	963	2	100%	45.42	0,67	0
20.4.	13:25	11,3	70%	956	2	100%	39.94	0,67	0
21.4.	14:16	15,0	48%	955	0	100%	34.04	1,67	0
21.4.	15:22	14,2	48%	954	0	100%	23.02	1,67	0
22.4.	15:30	16,2	50%	958	8	0%	23.25	1,33	0
23.4.	15:28	14,8	65%	956	7	0%	23.47	5,00	0
24.4.	6:40	12,2	81%	952	7	0%	25.48	6,67	0
24.4.	16:20	9,1	98%	945	8	0%	15.31	3,00	2
25.4.	8:19	9,0	56%	953	4	100%	41.95	1,33	0

Datum	EV v Red [1/s]	EV v NIR [1/s]	EV v Green [1/s]	EV v Red Edge [1/s]	NDVI>0.5	NDVI>0.7	GNDVI>0.3	NDRE>0
20.4.	601	585	741	780	0.6080	0.7139	0.4140	0.1726
20.4.	663	673	889	823	0.5871	0.7170	0.3931	0.1487
21.4.	549	535	570	601	0.5925	0.7137	0.4066	0.1388
21.4.	766	839	823	535	0.5830	0.7153	0.3987	0.1667
22.4.	317	644	766	350	0.6035	0.7180	0.4017	0.1183
23.4.	292	644	766	296	0.5992	0.7190	0.4032	0.1162
24.4.	617	601	729	654	0.6156	0.7200	0.4071	0.1180
24.4.	327	229	808	214	0.6109	0.7223	-	0.1844
25.4.	529	593	673	705	0.5993	0.7228	0.3870	0.1312

3.2 Korelační koeficienty

Při zpracování dat v programu Matlab byla nejprve ověřena normalita dat. Přehled normality dat s příslušnou p-hodnotou je uveden v tabulce č. 3.2. Předpoklad normality, tedy jestli data



pocházela z normálního rozdělení, byl splněn tehdy, byla-li tzv. p-hodnota vyšší než stanovená hladina významnosti, která byla pro potřeby práce uvažována na úrovni 0,05.

Tabulka 3.2 – p-hodnoty hladiny významnosti pro ověření normality dat

Sledovaný parametr nebo index	p – hodnota	Sledovaný parametr nebo index	p – hodnota
Teplota vzduchu	0.1951	Expoziční čas ve spektru Red	0.0112
Vlhkost vzduchu	0.2156	Expoziční čas ve spektru NIR	0.0017
Atmosférický tlak	0.4861	Expoziční čas ve spektru Green	0.0148
Oblačnost	< 0.0005	Expoziční čas ve spektru Red Edge	0.0080
Osvícení povrchu sluncem	< 0.0005	NDVI > 0.5	0.2252
Úhel slunce nad horizontem	0.0617	NDVI > 0.7	0.1130
Kp – index	< 0.0005	GNDVI	0.8747
Srážky	< 0.0005	NDRE	0.3668

Podle výsledku testu na normalitu dat byly určeny korelační koeficienty mezi sledovanými parametry a zjištěnými hodnotami vegetačních indexů (viz tab. 3.3). Pro data z normálního rozdělení byl vypočítán Pearsonův korelační koeficient a pro data nepocházející z normálního rozdělení byl vypočítán Spearmanův korelační koeficient. Závislost byla posouzena podle tzv. Evansova rozdělení (Evans (1996)). To označuje korelační koeficient 0 – 0,19 jako velmi slabou, 0,2 – 0,39 jako slabou, 0,4 – 0,59 jako střední, 0,6 – 0,79 jako silnou a 0,8 – 1 jako velmi silnou korelaci. Kladné hodnoty představují kladnou korelaci, tedy když roste jedna veličina, roste s ní i druhá. Záporná korelace označuje situaci, kdy růst jedné veličiny způsobuje pokles veličiny druhé. [82]



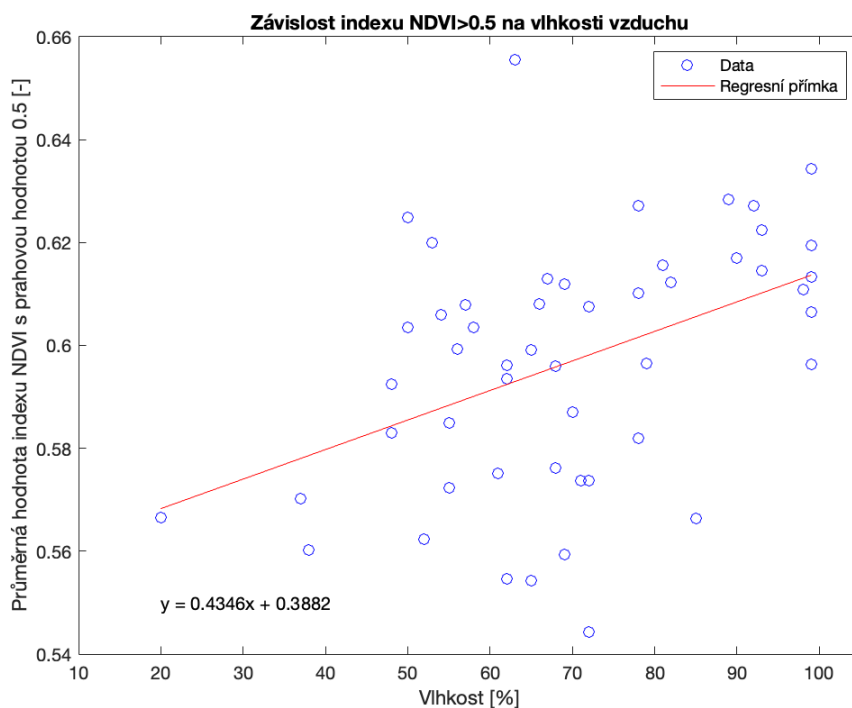
Tabulka 3.3 – výsledné korelační koeficienty R s p-hodnotami

Vztah závislosti	Korelační koeficient R	p-hodnota	Vztah závislosti	Korelační koeficient R	p-hodnota
Teplota vzduchu / NDVI>0.5	-0.1794	0.2032	Teplota / GNDVI	-0.0341	0.8433
Vlhkost vzduchu / NDVI>0.5	0.4346	0.0013	Vlhkost / GNDVI	0.2348	0.1681
Atm. tlak / NDVI>0.5	0.0397	0.7798	Tlak / GNDVI	-0.0001	0.9944
Oblačnost / NDVI>0.5	0.3855	0.0048	Oblačnost / GNDVI	0.2471	0.1463
Osvícení plochy sluncem / NDVI>0.5	-0.3145	0.0232	Svit / GNDVI	-0.1063	0.5371
Úhel slunce nad horizontem/ NDVI>0.5	0.1420	0.3154	Úhel slunce / GNDVI	0.2831	0.0943
Kp – index / NDVI>0.5	-0.1116	0.4356	Kp – index / GNDVI	-0.0717	0.6776
Srážky / NDVI>0.5	0.0973	0.4924	Srážky / GNDVI	0.0493	0.7750
Expoziční čas ve spektru Red / NDVI>0.5	0.0381	0.7905	EV ve spektru Green / GNDVI	0.0201	0.9073
Expoziční čas ve spektru NIR / NDVI>0.5	-0.1571	0.2709	EV ve spektru NIR / GNDVI	-0.3190	0.0579
Expoziční rozdíl NIR a Red / NDVI>0.5	0.1405	0.3253	Expoziční rozdíl NIR a Green / GNDVI	0.6225	5.036 · 10 ⁻⁶
Teplota / NDVI>0.7	-0.2672	0.0580	Teplota / NDRE	0.0714	0.6453
Vlhkost / NDVI>0.7	0.4699	0.0005	Vlhkost / NDRE	-0.0722	0.6415
Tlak / NDVI>0.7	0.0091	0.9493	Tlak / NDRE	-0.3427	0.0228
Oblačnost / NDVI>0.7	0.4511	0.0008	Oblačnost / NDRE	-0.3281	0.0297
Svit / NDVI>0.7	-0.4663	0.0006	Svit / NDRE	0.2826	0.0631
Úhel slunce / NDVI>0.7	-0.2263	0.0589	Úhel slunce / NDRE	-0.1210	0.4340
Kp – index / NDVI>0.7	0.0261	0.8556	Kp – index / NDRE	-0.2150	0.1610
Srážky / NDVI>0.7	0.1810	0.2037	Srážky / NDRE	0.2243	0.1433
EV ve spektru RED / NDVI>0.7	-0.1795	0.2074	EV ve spektru Red Edge / NDRE	-0.0403	0.7950
EV ve spektru NIR / NDVI>0.7	-0.1456	0.3081	EV ve spektru NIR / NDRE	0.0701	0.6514
Expoziční rozdíl NIR a Red / NDVI>0.7	0.1832	0.2675	Expoziční rozdíl NIR a Red Edge / NDRE	0.0619	0.6869
Korelace:	velmi slabá	slabá	střední	silná	

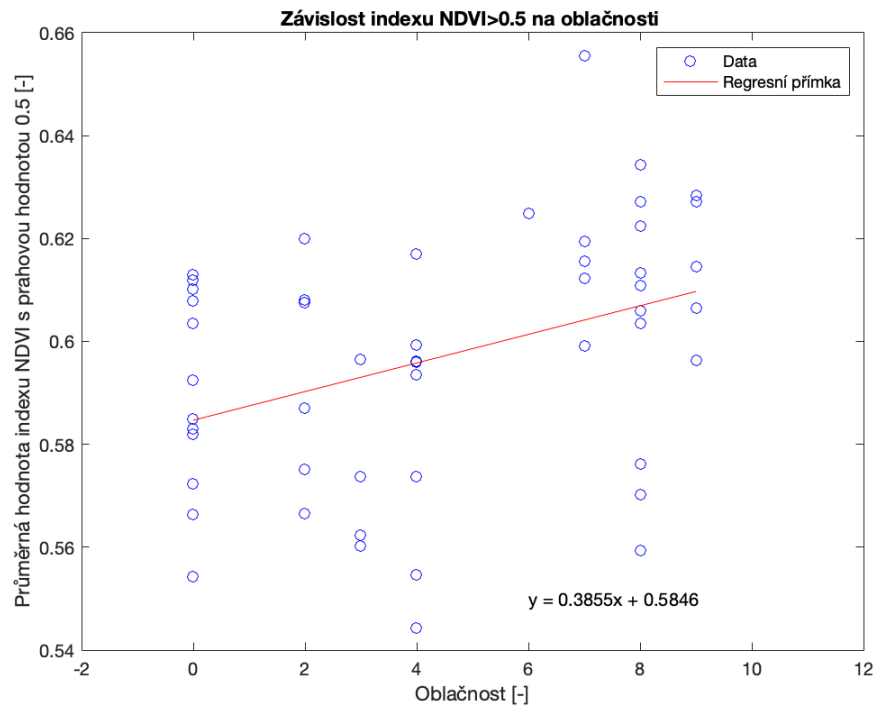
Výsledky ukazují, že ve většině případů vyšla velmi slabá korelace. Přesto se ale u některých vztahů našly slabé a střední závislosti, které mohou do určité míry korespondovat s očekáváním zjištěným na základě rešerše současných poznatků. V jednom případě vyšla silná korelace. K tučně zvýrazněným korelačním koeficientům v tabulce č. 3.3 byly vytvořeny v programu Matlab grafy znázorňující rozložení dat proložené regresní přímkou, která vizualizuje míru korelace.

3.3 Vliv atmosférických podmínek na výpočet vegetačních indexů

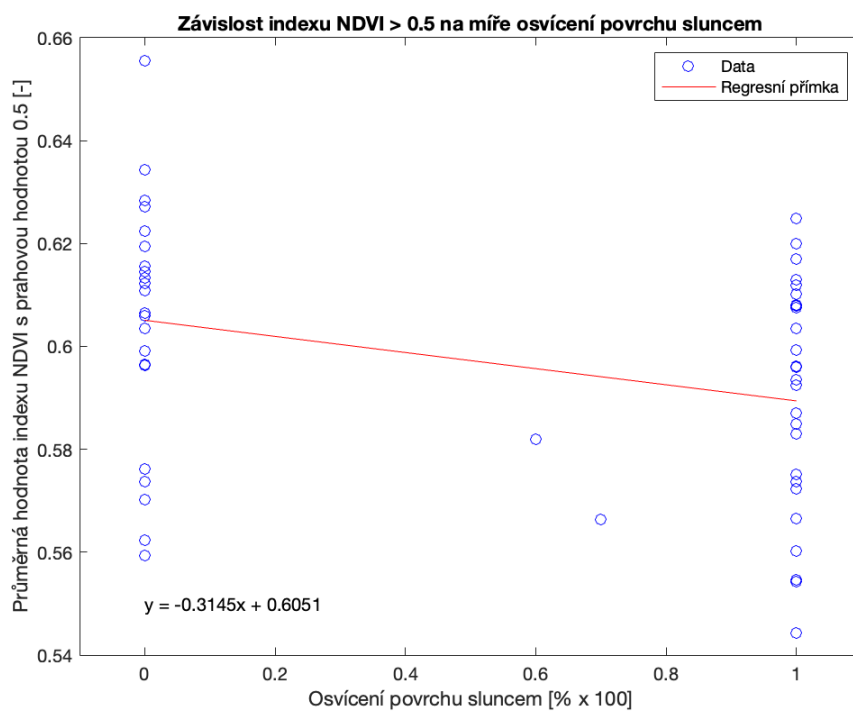
Pro index NDVI s prahovou hodnotou 0.5 se projeví dvě slabé a jedna střední závislost (viz obr. 3.1 – 3.3). Na základě výsledků je zřejmé, že střední korelace s koeficientem $R = 0.4346$ platí mezi vlhkostí a hodnotou NDVI. Další dvě slabé korelace vyšly najevo pro závislost oblačnosti ($R = 0.3885$) a osvětlení plochy sluncem ($R = -0.3145$).



Obrázek 3.1 – graf střední kladné závislosti indexu NDVI>0.5 na vlhkosti vzduchu s korelačním koeficientem $R = 0.4346$

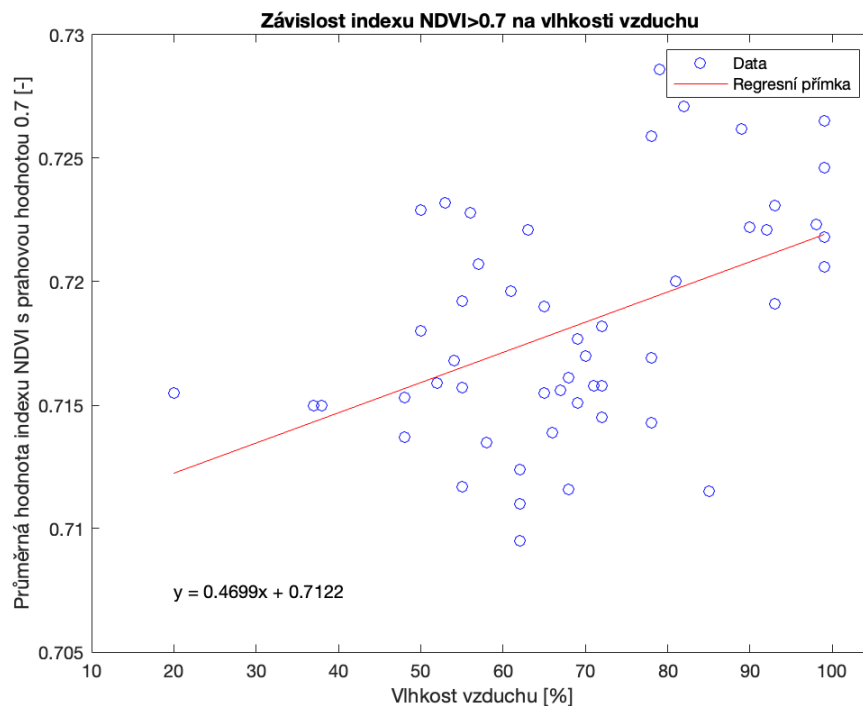


Obrázek 3.3 – graf slabé záporné závislosti indexu NDVI>0.5 na míře osvětlení povrchu sluncem s korelačním koeficientem $R = -0.3145$

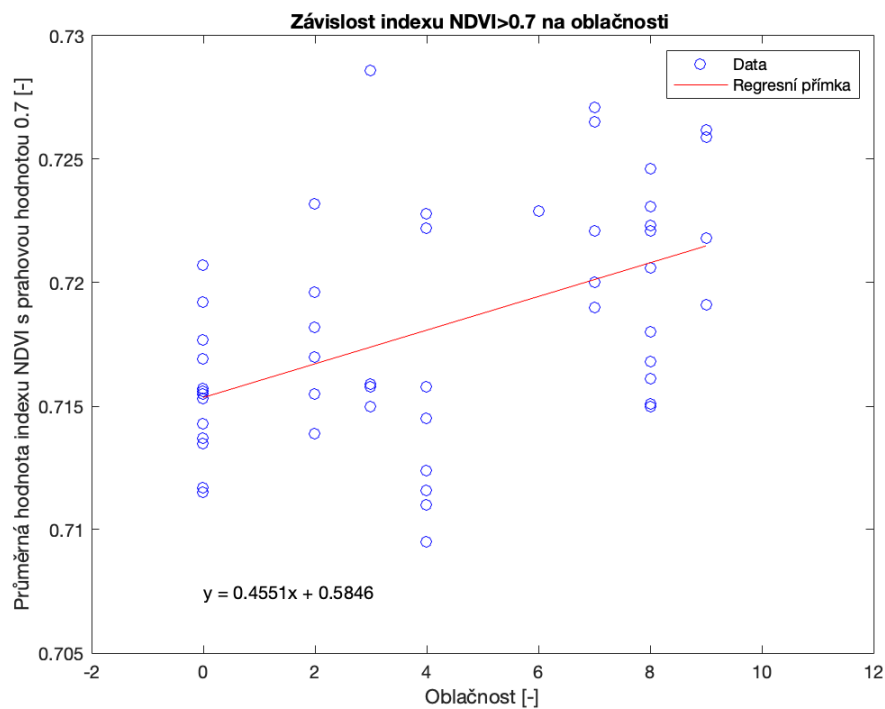


Obrázek 3.2 – graf slabé kladné závislosti indexu NDVI>0.5 na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = 0.3855$

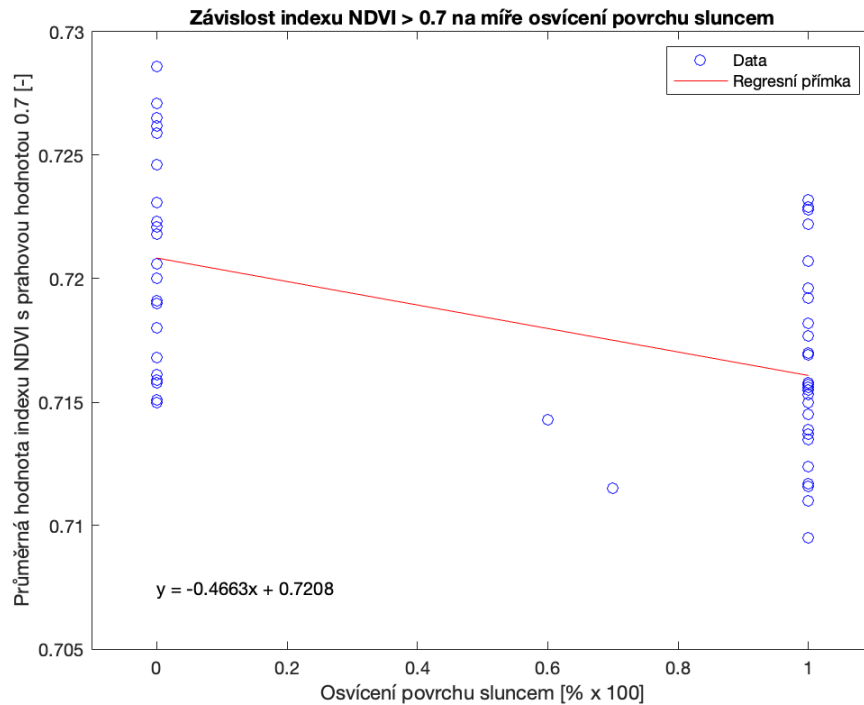
Korelace pro index NDVI s prahovou hodnotou 0.7 byly o něco vyšší než v případě nižší prahové hodnoty. Nejvýznamnější parametry zůstaly stejné, ale všechny tři koeficienty vyšly v intervalu střední korelace. (viz obr. 3.4 – 3.6). V případě závislosti indexu NDVI na vlhkosti vyšel korelační koeficient $R = 0.4699$. Oblačnost ovlivnila výsledky $NDVI > 0.7$ koeficientem $R = 0.411$. Míra osvětlení povrchu sluncem byla vyhodnocena s koeficientem $R = -0.4663$. K těmto se do intervalu slabé korelaci přidaly ještě korelace s $R = -0.2672$ mezi teplotou vzduchu a hodnotou NDVI a korelace s $R = -0.2263$ popisující závislost indexu na úhlu slunce nad horizontem.



Obrázek 3.4 – graf střední kladné závislosti indexu $NDVI > 0.7$ na vlhkosti vzduchu s korelačním koeficientem $R = 0.4699$



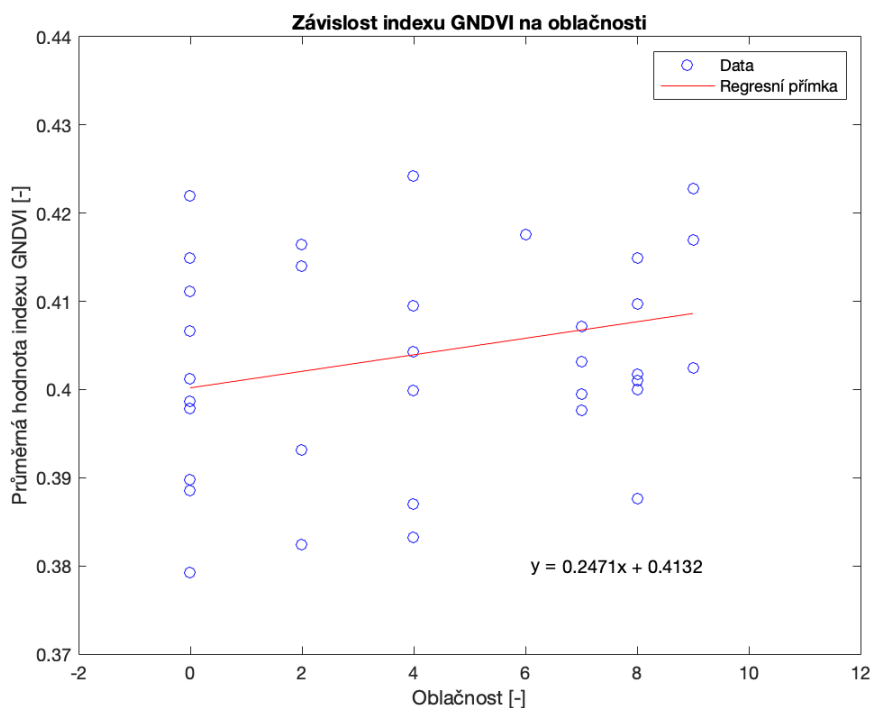
Obrázek 3.5 – graf střední kladné závislosti indexu NDVI>0.7 na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = 0.4551$



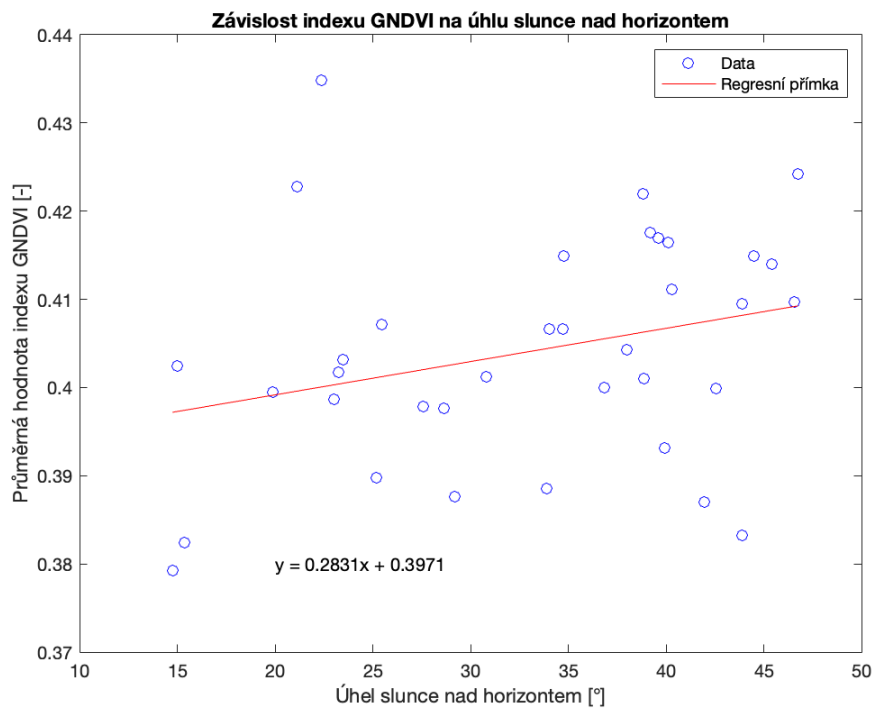
Obrázek 3.6 – graf střední záporné závislosti indexu NDVI>0.7 na míře osvětlení povrchu sluncem s korelačním koeficientem $R = -0.4663$



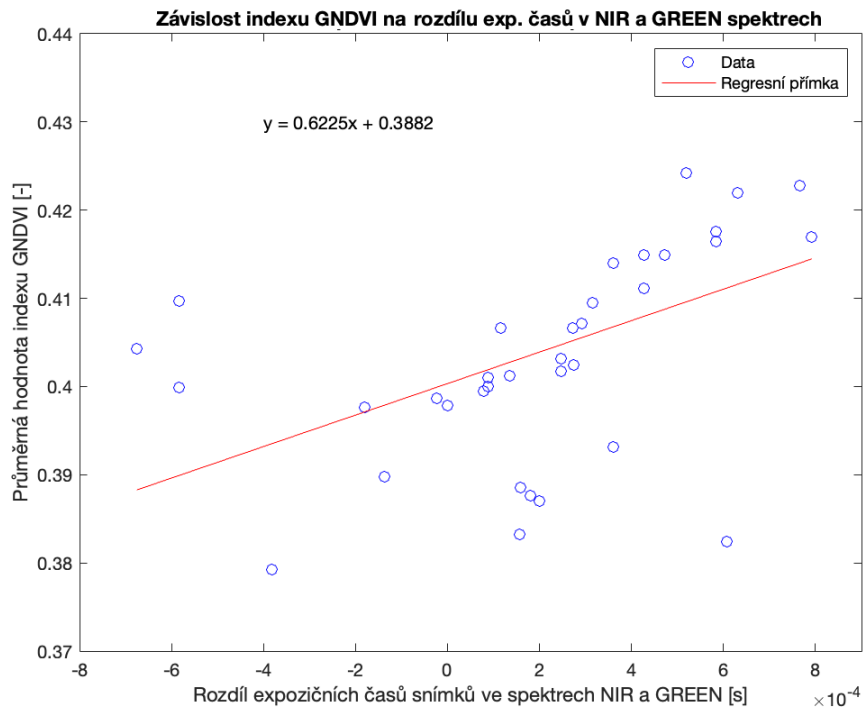
Pro index GNDVI, kde byla zvolena prahová hodnota 0.3 za účelem odstranění odrazivosti nežádoucích pixelů, se projeví čtyři slabé a jedna silná korelace (z toho 3 grafy – viz obr. 3.7 – 3.9). Slabé korelace se projeví opět ve vlivu vlhkosti vzduchu ($R = 0.2348$) a oblačnosti ($R = 0.2471$) na výslednou hodnotu indexu. Úhel slunce nad horizontem vykázal v testu korelaci s hodnotou $R = 0.2831$ vůči výslednému indexu. Další korelační koeficient s hodnotou $R = -0.3190$ byl zjištěn mezi expozičním časem snímků ve spektru NIR a indexem GNDVI. V případě GNDVI statistické testy také odhalily silnou závislost mezi výslednou hodnotou indexu a rozdílem expozičních časů snímků ve spektrech NIR a Green, které se k vytvoření indexu používají. Tato silná korelace dosáhla hodnoty koeficientu $R = 0.6225$.



Obrázek 3.7 – graf slabé kladné závislosti indexu GNDVI na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = 0.2471$

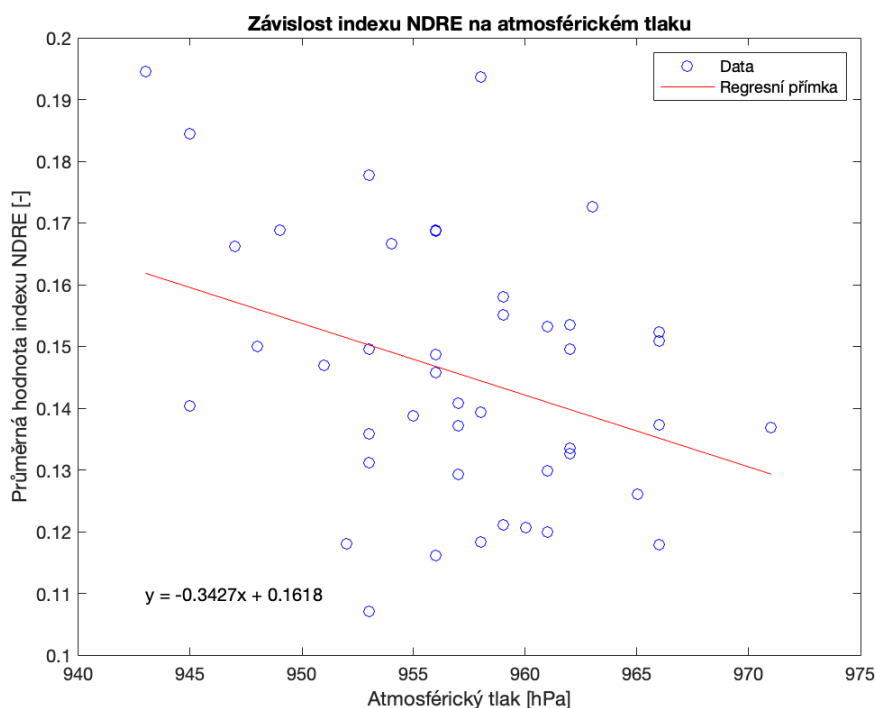


Obrázek 3.9 – graf slabé kladné závislosti indexu GNDVI na úhlu slunce nad horizontem s korelačním koeficientem $R = 0.2831$

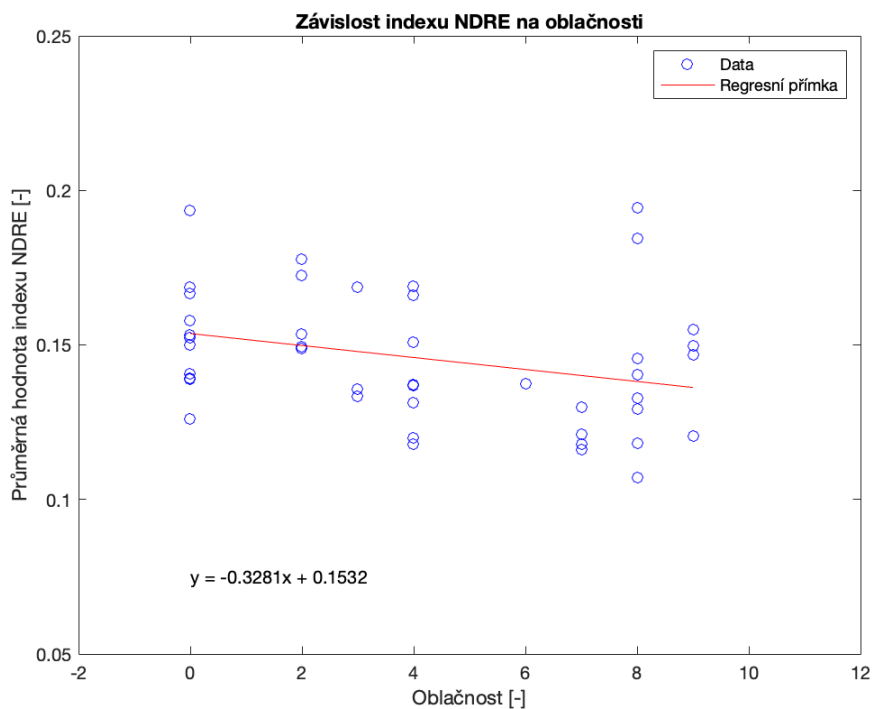


Obrázek 3.8 – graf silné kladné závislosti indexu GNDVI na rozdílu expozičních časů snímků ve spektrech NIR a Green s korelačním koeficientem $R = 0.6225$

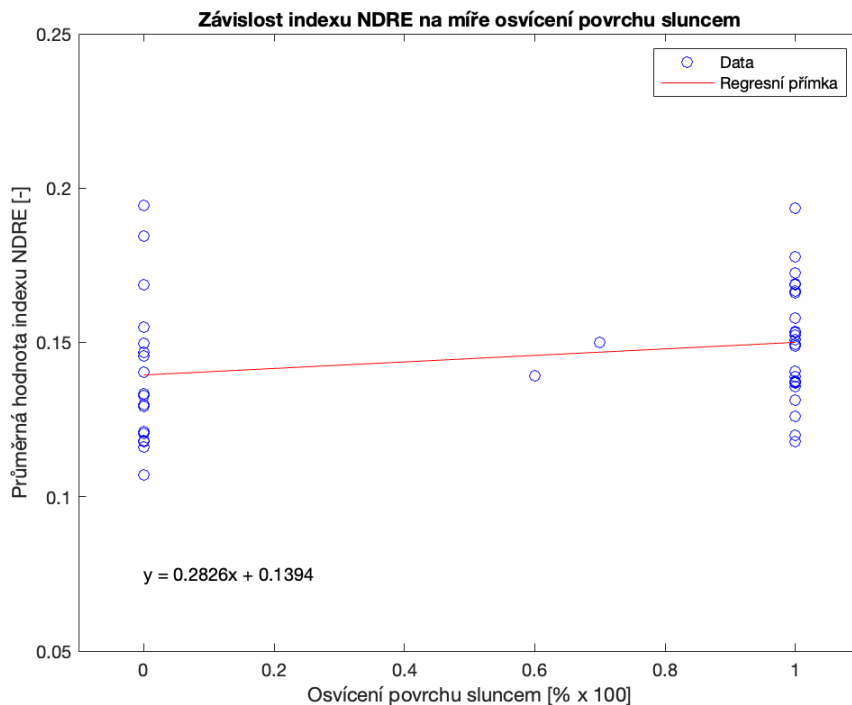
Posledním posuzovaným indexem byl NDRE index se stanovenou prahovou hodnotu 0. Zde se na základě statistického zpracování objevilo pět slabých korelací (z toho 3 grafy – viz obr. 3.10 – 3.12). Závislosti mezi tlakem vzduchu a indexem NDRE dosáhla korelace s hodnotou $R = -0.3427$. Vliv oblačnosti byl ohodnocen koeficientem $R = -0.3281$. Míra osvětlení povrhu sluncem ovlivňuje výslednou hodnotu indexu s korelací $R = 0.2826$. Výsledky, který budí pozornost, jsou pak korelační koeficient $R = -0.2150$ pro K_p – index jakožto ovlivňující faktor hodnotu indexu NDRE a dále koeficient $R = 0.2243$ pro závislost mezi srážkami a výslednou hodnotou NDRE.



Obrázek 3.10 – graf slabé záporné závislosti indexu NDRE na atmosférickém tlaku s korelačním koeficientem $R = 0.2831$



Obrázek 3.12 – graf slabé záporné závislosti indexu NDRE na oblačnosti s korelačním koeficientem $R = -0.3281$



Obrázek 3.11 – graf slabé kladné závislosti indexu NDRE na míře osvětlení povrchu sluncem s korelačním koeficientem $R = 0.2826$



Diskuse

Hlavním cílem statistického zpracování naměřených dat bylo zjistit, jestli lze najít závislost mezi sledovanými parametry a výslednými hodnotami vegetačních indexů listových ploch. Na základě provedené rešerše současných poznatků v této problematice bylo předpokládáno, že vegetační indexy budou ovlivněny zejména světelnými podmínkami, neboť ty mají přímý vliv na expozici multispektrální kamery. Meteorologickým podmínkám popisujícím stav atmosféry jako jsou teplota, vlhkost a jiné se provedené studie zabývaly pouze velmi okrajově [68, 69, 71], i přestože existuje řada výzkumů, které popisují vliv těchto faktorů na elektromagnetické záření. [83, 84, 85]

Výsledné korelační koeficienty se ve většině případů zkoumaných závislostí pohybovaly v intervalu „velmi slabé“ nebo „slabé“ korelace (dle Evansova rozdělení [82]). První zajímavý výsledek přinesl výpočet závislosti vegetačních indexů na vlhkosti vzduchu. Pro oba indexy NDVI byl tento korelační koeficient $R_{NDVI>0.5/vlhkost} = 0.4346$, respektive $R_{NDVI>0.7/vlhkost} = 0.4699$, což spadá do intervalu střední kladné korelace. S rostoucí vlhkostí tedy do určité míry roste průměrná hodnota indexu, což může být způsobeno tím, že index NDVI využívá spekter Red a NIR. Elektromagnetické záření ve spektru NIR je pohlcováno zcela vodou a nedochází k žádnému odrazu. U spektra Red dochází k částečnému odrazení vlnění. Ze vzorce NDVI vyplývá, že čím větší je rozdíl mezi hodnotami v odrazivosti Red a NIR, tím vyšší je výsledná hodnota indexu. Vyšší vlhkost může způsobovat alespoň částečně menší odrazivost ve spektru NIR, a z toho důvodu index NDVI roste přímo úměrně s vlhkostí. Tomu ovšem příliš nenapovídá korelační koeficient mezi indexem NDVI a rozdílem expozičních časů ($R_{NDVI>0.5/exp.roz.} = 0.1405$, respektive $R_{NDVI>0.7/exp.roz.} = 0.1832$). Podobné výsledky prokázala i studie [86], která sledovala mimo jiné vliv vlhkosti na vegetační index NDVI v suchých a polosuchých. Výzkum uvádí, že vliv na výslednou hodnotu indexu je od 32 % do 41 % v průběhu roku, přičemž tento vliv je nejvyšší v době vegetačního růstu, kdy rostliny potřebují dostatek vody. [86] Korelace vlhkosti s indexem GNDVI dosáhla slabé úrovně s koeficientem $R_{GNDVI/vlhkost} = 0.2348$, kde se místo spektra Red uplatňuje spektrum Green. V případě indexu NDRE složeného ze spekter NIR a Red Edge vyšel koeficient korelace ještě nižší – $R_{NDRE/vlhkost} = 0.0701$.

Jako další významně ovlivňující faktor se projevila oblačnost, která ovlivňuje světelné podmínky. Hodnoty korelačních koeficientů u indexu NDVI byly $R_{NDVI>0.5/oblačnost} = 0.3855$ a $R_{NDVI>0.7/oblačnost} = 0.4511$, což poukazuje na to, že s přibývajícím oblačností roste průměrná hodnota NDVI. O něco nižší korelace s koeficientem $R_{GNDVI/oblačnost} = 0.2471$ byla zjištěna mezi



oblačností a GNDVI indexem. Oproti rostoucí tendenci indexů NDVI a GNDVI se projevila záporná korelace u indexu NDRE ($R_{NDRE/oblačnost} = -0.3281$), která poukazuje na to, že s narůstající oblačností naopak hodnota indexu klesá.

V rámci světelných podmínek se projevila i korelace s parametrem osvětlení plochy sluncem (svit), které přímo souvisí s oblačností, dle nastavené klasifikace parametrů oblačnosti ovšem nepřímou úměrně (rostoucí hodnota oblačnosti znamená klesající hodnotu osvětlení). Z toho důvodu vyšly korelační koeficienty svitu s opačným znaménkem než koeficienty oblačnosti. Konkrétní hodnoty jsou následující: závislost indexu NDVI na osvětlení plochy sluncem má koeficienty $R_{NDVI>0.5/svit} = -0.3145$ a $R_{NDVI>0.7/svit} = -0.4663$ a závislost indexu NDRE má koeficient $R_{NDRE/svit} = 0.2826$. Zajímavostí je, že koeficient ve vztahu k GNDVI indexu vyšel pouze $R_{GNDVI/svit} = -0.1063$. Z toho vyplývá, že ačkoliv index GNDVI může být do určité míry ovlivněn charakterem světelných podmínek způsobených oblačností, působení přímého slunečního svitu nijak výrazně nemění hodnotu indexu. NDRE index se spektry NIR a Red Edge využívá okraje infračerveného záření. Určitá závislost, i když slabá, může naznačovat vliv světla na tuto oblast spektra. Mnohem významnější je korelace světelných podmínek s indexem NDVI, kde tento faktor jistě určitou roli hraje. Touto skutečností se zabývají i jiné studie, které se shodují na tom, aby snímkování multispektrální kamerou bylo prováděno ideálně za oblačných podmínek bez působení přímého slunečního svitu, které způsobuje rozdíly vlivem ostrých stínů apod. V tomto ohledu je proto vhodná zatažená obloha způsobující rovnoměrný rozptyl světla. [5, 68, 71] V souvislosti s indexem NDVI je potřeba uvést, že prahová hodnota 0.7 způsobuje daleko menší rozptyl průměrných hodnot výsledného indexu oproti prahové hodnotě 0.5. To může být důvodem, proč statistické testy ukazují vyšší korelaci v případě vyšší prahové hodnoty.

Další překvapivou korelací v intervalu „střední“ je závislost hodnoty indexu NDRE na atmosférickém tlaku s koeficientem korelace $R_{NDRE/tlak} = -0.3427$. V rámci porovnání výsledků se ovšem nepodařilo dohledat žádný výzkum, který by došel k podobným výsledkům u vegetačních indexů. Pouze jedna studie zkoumající dlouhodobý vliv sníženého tlaku na růst rostlin odhalila, že dlouhodobé snížení atmosférického tlaku na třetinovou hodnotu způsobí zpomalení růstu, což se projeví snížením objemu biomasy o 41 %. [87]

Po provedení statistických výpočtů a prvních náznacích, že by světelné podmínky mohly mít skutečně vliv na hodnoty vegetačních indexů, bylo ještě zjišťováno, zda rozdíl mezi expozičními časy jednotlivých snímků může také hrát roli ve výsledné hodnotě zkoumaných vegetačních indexů s ohledem na jejich vzorec, který představuje podíl rozdílu a součtu dvou



spekter. Pro indexy NDVI a NDRE se projevila velmi slabá korelace, ovšem korelační koeficient pro index GNDVI dosáhl silné korelace s hodnotou $R_{\text{GNDVI}/\text{roz.exp.}} = 0.6225$, tedy čím vyšší byl rozdíl v expozičních časech, tím vyšší byla hodnota indexu GNDVI. Zároveň je nutné připomenout, že u GNDVI se projevila jen velmi slabá závislost na osvětlení povrchu sluncem a slabá závislost na oblačnosti.

Také často zmiňovaný vliv úhlu slunce nad horizontem [67, 70, 71] dle výsledků práce nemá tak zásadní vliv na výsledné hodnoty, neboť korelační koeficienty se pohybovaly v mezích velmi slabé až slabé závislosti. V tomto ohledu by však bylo vhodné provedení výzkumu této závislosti jen ve dnech bez oblačnosti, aby se projevil efekt přímého slunečního svitu, který pak vytváří ostré stíny na výzkumné ploše. Pro nedostatek měření za podmínek jasné oblohy nebylo možné zkoumat vliv úhlu slunce v rámci této diplomové práce tak, aby byly výsledky dostatečně validní.

S ohledem na cíle práce bylo zjištěno, že určité parametry v rámci atmosférických podmínek mají zjevně vliv na výsledné hodnoty vegetačních indexů, přestože nelze stanovit platnost těchto zjištění pro všechny indexy obecně. I v rámci tří zkoumaných indexů (NDVI, GNDVI, NDRE) byly odhaleny významné odlišnosti, tudíž lze předpokládat, že každý index bude mít v tomto ohledu svá specifika a jeho hodnoty budou ovlivňovány jinými parametry nebo jejich kombinacemi. V tomto ohledu je potřeba zmínit, že všechny statistické testy byly postaveny na porovnávání závislostí individuálních parametrů s hodnotami vegetačních indexů, přestože je jasné, že meteorologické podmínky jsou vzájemně provázány. K posouzení komplexnějších závislostí by byla zapotřebí rozsáhlejší datová sada.

Na základě výsledků práce je složité stanovit optimální podmínky, neboť v rámci jednoho snímkování jsou provedeny záběry v různých spektrech, které jsou použity k výpočtu různých indexů. Pokud tedy není cílem DPZ zkoumat pouze jeden vegetační index, je potřeba myslet na to, jaké vlivy počasí na výsledky má obecně a neupínat se ke konkrétním parametrům. Přesto z pohledu optických podmínek je vhodné snímkování provádět v době souvislé oblačnosti, neboť vznikne rovnoměrné osvětlení zkoumané plochy. To je zásadní především pro index GNDVI, který je velmi ovlivněn rozdíly ve expozičních časech.

V tomto ohledu vzniká problém při použití multispektrální kamery, kde je standardně nastavena automatická expozice, která se mění v závislosti na podmínkách a její změna není stejná pro všechna spektra. Z tohoto pohledu může vzniknout problém při snímání plochy, kde se vlivem nehomogenní oblačnosti mění světelné podmínky. Snímky budou jinak exponovány a



výsledné hodnoty jednotlivých pixelů v rámci posuzovaného vegetačního indexu budou odlišné, přestože stav vegetace může být stejný. Případně hodnoty pixelů budou stejné, ale stav vegetace nikoliv.

Možností je použití manuální expozice, ale tato varianta je velmi složitá s ohledem na optimální prvotní nastavení kamery. Problematiku odlišností ve výsledném jasů snímků částečně řeší kalibrační senzor, který se umísťuje na horní stranu UAV a snímá aktuální intenzitu světla. Tato data jsou v procesu postprodukce zpracována, ovšem úspěšnost této metody není dokonalá, jak dokazují výsledky studie Mamahgani et al. (2019). Ty odhalily, že chybovost v rámci kalibrace kamery MicaSense dle postupů výrobce dosahují napříč všemi spektry nejvyšší procentuální chyby ve spektru NIR (32.81 %). Přitom právě toto spektrum je pro výpočet vegetačních indexů stěžejní. Chybovost u ostatních spekter se pohybovala v rozsahu 10 – 22 %. [88]

Co se týká ještě nejrozšířenějšího indexu NDVI, zjištěná závislost na vlhkosti vzduchu není nezanedbatelná. Proto je vhodné tuto korelaci zohlednit v případě porovnávání různých měření, které vznikly za odlišných podmínek vzdušné vlhkosti. Zdánlivá změna ve stavu vegeta může být způsobena právě odlišností ve vlhkosti.

Závěrem je vhodné doplnit, že existuje celá řada limitací tohoto výzkumu, které je třeba brát v potaz. V první řadě je to velmi krátké období, kdy bylo měření prováděno. Jeho délka byla limitována dlouho trvající přítomností sněhu na experimentální ploše. Otázkou tedy je, jak by se výsledky všech korelací lišily na základě vyššího počtu provedených měření. Dalším procesem pro validaci zjištěných výsledků by mohlo být porovnání s daty, které by byly pořizovány ze stacionární stanice. Eliminoval by se tak lidský faktor v manuálním pilotování UAV. Navíc by tento způsob sběru dat mohl být automatizován, tudíž by bylo možné nastavit interval pro pořizování snímků a záznam meteorologických podmínek. Vznikla by tak spojená datová řada hodnot, která by mapovala kontinuální průběh změn počasí.

V rámci tohoto výzkumu vznikl prostor pro další navazující experimenty, které by se mohly zaměřit na zkoumání vlivu atmosférických podmínek v období jiných fenologických fází vývoje vegetace. Dále by mohl být posuzován vliv podmínek na porosty jiných dřevin s různým stářím porostu, případně na komplexní lesní celky a jiné vegetační plochy například v rámci zemědělství. Obdobné zkoumání by mohlo být také provedeno na volně dostupných datech z družicového snímání, kde lze předpokládat, že by se více projevil vliv atmosféry, kterou musí elektromagnetické záření projít. [72]



Závěr

Cílem diplomové práce bylo identifikovat vhodné podmínky atmosféry pro výpočet indexů listové plochy za použití UAS vybaveného multispektrální kamerou. V úvodu proběhl analýza současného stavu, tedy rešerše aktuálních poznatků, jak světelné a meteorologické podmínky ovlivňují výpočty vegetačních indexů. Na základě této analýzy byly vybrány parametry, které byly následně sledovány a vyhodnocovány. Vedle toho byla také vytvořena výzkumná plocha borovice kleče, nad kterou byly prováděny experimentální lety. Během letů bylo prováděno snímkování referenční plochy multispektrální kamerou MicaSense RedEdge-MX. Nasbíraná data pak byla následně analyzována a vyhodnocena pomocí programu Matlab. Závislosti hodnot vegetačních indexů NDVI, GNDVI a NDRE na jednotlivých sledovaných parametrech byly posuzovány na základě výpočtu korelačních koeficientů.

Výsledky práce ukázaly, že významnou roli při výpočtu vegetačních indexů hrají světelné podmínky, konkrétně druhy oblačnosti a případně přítomnost přímého slunečního svitu. S přibývajícím oblačností průměrné hodnoty indexu rostly, naopak při přímém působení slunce na výzkumnou plochu vykazovaly hodnoty indexů klesající tendenci. To platilo zejména pro indexy NDVI a NDRE. Index GNDVI byl tímto faktorem ovlivněn minimálně, ovšem oproti dvě zmíněným indexům jako jediný vykazoval silnou korelaci na základě rozdílu expozice snímků ve spektru Green a NIR. Index NDVI byl ještě ovlivněn vlhkostí vzduchu, kde se projevila střední korelace. Index NDRE vykazoval sice slabou, ale přesto určitou závislost na atmosférickém tlaku. Na základě toho je vidět, že se každý vegetační index v tomto ohledu chová odlišně, proto nelze obecně stanovit, které faktory ovlivňují výpočty indexů vegetačních ploch. Přesto v rámci identifikace optimálních podmínek se jeví jako nejvhodnější provádět snímkování multispektrální kamerou v době, kdy je obloha kompletně pokryta oblačností. Ta totiž způsobuje rovnoměrné osvětlení zkoumané plochy a zároveň eliminuje vznik ostrých stínů způsobených roztrhanou oblačností nebo charakterem terénu a výšky porostu.

Na závěr je vhodné upozornit na limitace výzkumu. Přestože se podařilo nasbírat dostatek dat pro validní statistické vyhodnocení, doba výzkumu byla časově omezena sněhovými podmínkami, kdy nebylo možné experimentální snímkování provádět. Zároveň výzkumná plocha je jiného charakteru než vzrostlá komplexní vegetace. Z toho důvodu je zde prostor pro další zkoumání, které by se zaměřilo na jiné druhy vegetačních ploch, v jiném období a případně i na jiné vegetační indexy. Porovnání výsledků s vyhodnocením satelitních snímků nebo snímků ze stacionární stanice by bylo také vhodné.



Zdroje

- [1] Vlnová délka. In: <https://www.wikiskripta.eu> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Vlnová_délka
- [2] Elektromagnetické záření. In: <https://www.cyberphysics.co.uk> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.cyberphysics.co.uk/topics/radioact/Radio/EMSpectrumcolor.jpg>
- [3] Viditelné světlo. In: <https://www.wikiskripta.eu> [online] [cit. 2023-05-15] https://www.wikiskripta.eu/w/Viditelné_světlo
- [4] HALOUNOVÁ, Lena. Dálkový průzkum Země. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1.
- [5] SUROVÝ, Peter. Aplikace dálkového průzkumu Země v lesnictví. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-3008-5.
- [6] Developments in Land Use and Land Cover Classification Techniques in Remote Sensing: A Review. SCIRP Open Access. In: <https://www.scirp.org> [online] [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=115238>
- [7] DE MEESTER, Jasper a Tobias STORCH. Optimized Performance Parameters for Nighttime Multispectral Satellite Imagery to Analyze Lightings in Urban Areas. Sensors [online]. 2020, 20(11) [cit. 2023-05-10]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20113313
- [8] Sentinel Hub. In: <https://www.sentinel-hub.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.sentinel-hub.com>
- [9] Program Copernicus. In: <https://copernicus.gov.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://copernicus.gov.cz/index.php/o-programu-copernicus/>
- [10] Program Sentinel. In: <https://www.szif.cz/cs/> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.szif.cz/cs/ams-sentinel>
- [11] Sentinel Satellites. In: <https://www.esa.int> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinels
- [12] Landsat Program. In: <https://www.nasa.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html
- [13] Multispectral imaging Landsat. In: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/multispectral-scanner-system/>
- [14] KUŽELKA, Karel. Měření lesa: moderní metody sběru a zpracování dat. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, 2014. ISBN 978-80-213-2498-5.
- [15] Remote Sensing from Google Earth. In: <https://support.google.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://support.google.com/earth/thread/23673683/are-google-earth-images-satellite-images-or-aircraft-images?hl=en>
- [16] Fotogrametrie. In: <https://is.muni.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://is.muni.cz/el/sci/podzim2009/Z8101/um/9030264/Fotogrammetrie_3.pdf



- [17] Multikoptéry. In: <https://dronpro.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://dronpro.cz/multikoptery-zaruci-vice-vrtuli-vice-zabavy>
- [18] Drony. In: <https://dronpro.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://dronpro.cz/drony>
- [19] Multirotor and Fixed Wing UAV. In: <https://www.linkedin.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/agriculture-multi-rotor-vs-fixed-wing-drones-which-use-avirtech>
- [20]] SenseFly eBee-X. In: <https://dronpro.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://dronpro.cz/sensefly-ebex-bez-kamery>
- [21]] Atmos Marlyn. In: <https://dronpro.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://dronpro.cz/atmos>
- [22] Atmos UAV. In: <https://www.atmosuav.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.atmosuav.com/product/mapping-drone-marlyn>
- [23] DJI. In: <https://www.dji.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.dji.com/cz>
- [24] Fixed Wing SenseFly eBee. In: <https://www.dronefly.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.dronefly.com/sensefly-ebex-fixed-wing-drone.html>
- [25] Atmos Marlyn Specs. In: <https://www.atmosuav.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.atmosuav.com/product/mapping-drone-marlyn#specifications>
- [26] UAS Terminology. In: <https://percepto.co> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://percepto.co/what-are-the-differences-between-uav-uas-and-autonomous-drones/>
- [27] ŠKOPKOVÁ, Jana. Lesy budoucnosti [dokument]. In: Česká televize [online]. Místo: Česká zemědělská univerzita, 2023. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.ceskatelevize.cz/porady/14934436907-lesy-budoucnosti/>
- [28] YAO, Huang, Rongjun QIN a Xiaoyu CHEN. Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications—A Review. *Remote Sensing* [online]. 2019, 11(12) [cit. 2023-05-10]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11121443
- [29] ZHOU, Xin, Xiangyong WEN, Zhepei WANG, et al. Swarm of micro flying robots in the wild. *Science Robotics* [online]. 2022, 7(66) [cit. 2023-05-15]. ISSN 2470-9476. Dostupné z: doi:10.1126/scirobotics.abm5954
- [30] Multispectral Imaging. In: <https://photographycourse.net> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://photographycourse.net/multispectral-imaging-used-for/>
- [31] MicaSense RedEdge-MX Integration Guide. In: <https://support.micasense.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/360011389334-RedEdge-MX-Integration-Guide>
- [32] Spectral Reflectance of Vegetation. In: YouTube [online] 13.12.2020 [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KF2j4sH7pkE>



- [33] NIR Spectrum. In: <https://science.nasa.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://science.nasa.gov/ems/08_nearinfraredwaves
- [34] Jacquemoud S, Baret F. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment* 34, 75–91. [Google Scholar]
- [35] NDVI index. In: <https://www.greenaerotech.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.greenaerotech.com/what-is-ndvi/>
- [36] Alignment of spectral images. In: <https://support.micasense.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/215173147-Why-are-the-images-from-the-camera-not-aligned-to-each-other>
- [37] Infrared Spectroscopy. In: <https://thechemistrynotes.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://thechemistrynotes.com/infrared-spectroscopy/>
- [38] Hyperspectral Imaging. In: <https://www.nireos.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.nireos.com/hyperspectral-imaging/>
- [39] Yu, Ke-Qiang & Zhao, Yanru & Li, Xiao-Li & Shao, Yong-Ni & Liu, Fei & He, Yong. (2014). Hyperspectral Imaging for Mapping of Total Nitrogen Spatial Distribution in Pepper Plant. *PLoS ONE*. 9. e116205. 10.1371/journal.pone.0116205.
- [40] Boussadia, Olfa & Steppe, Kathy & Zgallai, Hatem & Hadj, S. & Braham, Mohamed & Lemeur, Raoul & Van Labeke, Marie-Christine. (2010). Effects of nitrogen deficiency on leaf photosynthesis, carbohydrate status and biomass production in two olive cultivars 'Meski' and 'Koroneiki'. *Scientia Horticulturae*. 123. 336-342. 10.1016/j.scienta.2009.09.023.
- [41] Ansari, Mohammad & Young, Ken & Nicolas, Marc. (2016). Determining Wavelength for Nitrogen and Phosphorus Nutrients Through Hyperspectral Remote Sensing in Wheat (*Triticum aestivum* L.) *Plant*. 10.5958/0976-4038.2016.00125.1.
- [42] Comparison of Hyperspectral and Multispectral Imaging. In: <https://www.specim.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.specim.com/technology/hyperspectral-vs-multispectral-cameras/>
- [43] Lowe, A., Harrison, N. & French, A.P. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant Methods* 13, 80 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0233-z>
- [44] Hyperspectral Imaging in Agriculture. In: <https://gamaya.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://gamaya.com/en_us/2020/04/15/hyperspectral-imaging-in-agriculture-opportunities-benefits-and-future-perspectives/
- [45] Kirk J. Havens, Edward J. Sharp, in *Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild*, 2016, dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/thermal-imaging>
- [46] Prevence škod na lesních porostech způsobených zvěří. In: <https://www.cazv.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.cazv.cz/wp-content/uploads/2019/10/Prevence-a-snižován%C3%AD-škod-působených-zvěř%C3%AD-a-na-zvěři-při-zemědělském-hospodařen%C3%AD.pdf>



- [47] LiDAR. In: <https://www.gim-international.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.gim-international.com/content/article/technology-in-focus-bathymetric-lidar-2>
- [48] Use of LiDAR. In: <https://oceanservice.noaa.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- [49] LiDAR Applications. In: <https://opentopography.org> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://opentopography.org/blog/iphone-lidar-applications-geosciences>
- [50] Biologická ochrana. In: <https://www.avcr.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.avcr.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/Napadene-stromy-si-volaji-na-pomoc-ptaky-a-dravy-hmyz/>
- [51] Hmotnostní spektrometrie. In: <https://www.avcr.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/chemicke-vedy/Pristroj-odhali-latky-skryte-v-lidskem-dechu.-S-presnosti-na-molekulu/>
- [52] TORRES-SÁNCHEZ, J., F. LÓPEZ-GRANADOS a J.M. PEÑA. An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture* [online]. 2015, 114, 43-52 [cit. 2023-05-08]. ISSN 01681699. Dostupné z: doi:10.1016/j.compag.2015.03.019
- [53] FERNÁNDEZ, Claudio I., Brigitte LEBLON, Jinfei WANG, Ata HADDADI a Keri WANG. Detecting Infected Cucumber Plants with Close-Range Multispectral Imagery. *Remote Sensing* [online]. 2021, 13(15) [cit. 2023-05-08]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13152948
- [54] WINDLE, Anna E. a Greg M. SILSBE. Evaluation of Unoccupied Aircraft System (UAS) Remote Sensing Reflectance Retrievals for Water Quality Monitoring in Coastal Waters. *Frontiers in Environmental Science* [online]. 2021, 9 [cit. 2023-05-08]. ISSN 2296-665X. Dostupné z: doi:10.3389/fenvs.2021.674247
- [55] BANNARI, A., D. MORIN, F. BONN a A. R. HUETE. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* [online]. 1995, 13(1-2), 95-120 [cit. 2023-05-15]. ISSN 0275-7257. Dostupné z: doi:10.1080/02757259509532298
- [56] Overview of VIs. In: <https://support.micasense.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/227837307-Overview-of-Agricultural-Indices#ndvi>
- [57] Vegetation Indices. In: <https://www.auravant.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.auravant.com/en/articles/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/>
- [58] SALAS, Eric a Geoffrey HENEGBRY. A New Approach for the Analysis of Hyperspectral Data: Theory and Sensitivity Analysis of the Moment Distance Method. *Remote Sensing* [online]. 2014, 6(1), 20-41 [cit. 2023-05-15]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs6010020
- [59] Enhanced Vegetation Index. In: <https://www.usgs.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index>



- [60] Vegetation Index for Agriculture. In: <https://pages.cms.hu-berlin.de> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://pages.cms.hu-berlin.de/EOL/gcg_eo/03_vegetation_indices.html
- [61] Vegetation Index Problematics. In: <https://www.sciencedirect.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/vegetation-index>
- [62] BANNARI, A., H. ASALHI a P.M. TEILLET. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [online]. IEEE, 2002, s. 3053-3055 [cit. 2023-05-15]. ISBN 0-7803-7536-X. Dostupné z: doi:10.1109/IGARSS.2002.1026867
- [63] Comparison of Several Vegetation Indices. In: <http://uwm.edu.pl> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: http://uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/ts7_2004/4_7_2004.pdf
- [64] HUANG, LIU, ZHU, ATZBERGER a LIU. The Optimal Threshold and Vegetation Index Time Series for Retrieving Crop Phenology Based on a Modified Dynamic Threshold Method. Remote Sensing [online]. 2019, 11(23) [cit. 2023-05-07]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11232725
- [65] ANDERSON, G.L, J.D HANSON a R.H HAAS. Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. Remote Sensing of Environment [online]. 1993, 45(2), 165-175 [cit. 2023-05-08]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/0034-4257(93)90040-5
- [66] Solar Angles. In: <https://www.researchgate.net> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-depicting-the-solar-zenith-angle-solar-altitude-angle-and-solar-azimuth-angle_fig2_354755033
- [67] BANNARI, A., D. MORIN, F. BONN a A. R. HUETE. A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews [online]. 1995, 13(1-2), 95-120 [cit. 2023-05-08]. ISSN 0275-7257. Dostupné z: doi:10.1080/02757259509532298
- [68] AASEN, Helge a Andreas BOLTEN. Multi-temporal high-resolution imaging spectroscopy with hyperspectral 2D imagers – From theory to application. Remote Sensing of Environment [online]. 2018, 205, 374-389 [cit. 2023-05-07]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2017.10.043
- [69] ÄNÄKKÄLÄ, Mikael, Antti LAJUNEN, Mikko HAKOJÄRVI a Laura ALAKUKKU. Evaluation of the Influence of Field Conditions on Aerial Multispectral Images and Vegetation Indices. Remote Sensing [online]. 2022, 14(19) [cit. 2023-05-08]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14194792
- [70] Best Practices for Collecting Data. In: <https://support.micasense.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/224893167-Best-practices-Collecting-Data-with-MicaSense-Sensors>
- [71] ASSMANN, Jakob J., Jeffrey T. KERBY, Andrew M. CUNLIFFE a Isla H. MYERS-SMITH. Vegetation monitoring using multispectral sensors — best practices and lessons learned from high latitudes. Journal of Unmanned Vehicle Systems [online]. 2019, 7(1), 54-75 [cit. 2023-05-07]. ISSN 2291-3467. Dostupné z: doi:10.1139/juvs-2018-0018



- [72] ORTEGA-TEROL, Damian, David HERNANDEZ-LOPEZ, Rocio BALLESTEROS a Diego GONZALEZ-AGUILERA. Automatic Hotspot and Sun Glint Detection in UAV Multispectral Images. *Sensors* [online]. 2017, 17(10) [cit. 2023-05-15]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s17102352
- [73] GUO, Yahui, J. SENTHILNATH, Wenxiang WU, Xueqin ZHANG, Zhaoqi ZENG a Han HUANG. Radiometric Calibration for Multispectral Camera of Different Imaging Conditions Mounted on a UAV Platform. *Sustainability* [online]. 2019, 11(4) [cit. 2023-05-07]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su11040978
- [74] Kp-index. In: <https://www.swpc.noaa.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>
- [75] Sun Angle Calculator. In: <https://www.omnicalculator.com> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.omnicalculator.com/physics/sun-angle>
- [76] Vegetační stupně dřevin. In: <https://is.muni.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0005/18118868/index_VS.html
- [77] Meteorologie. In: <https://ucebnice.horskasluzba.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://ucebnice.horskasluzba.cz/cz/odborna-cast/zaklady-meteorologie/zakladni-pojmy>
- [78] Stupně oblačnosti. In: <https://www.in-pocasi.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/oblacnost/>
- [79] GU, Lingxiao, Yanmin SHUAI, Congying SHAO, Donghui XIE, Qingling ZHANG, Yaoming LI a Jian YANG. Angle Effect on Typical Optical Remote Sensing Indices in Vegetation Monitoring. *Remote Sensing*[online]. 2021, 13(9) [cit. 2023-05-10]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13091699
- [80] NIR Reflectance in Winter Conditions. In: <https://resources.eumetrain.org> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://resources.eumetrain.org/data/3/358/navmenu.php?tab=2&page=3.0.0>
- [81] Ochrana zvíře při senosečích. In: <https://www.djitelink.cz> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: <https://www.djitelink.cz/cs/Novinky-clanky/novinky-clanky/zachrana-srncat-dronem>
- [82] EVANS, Richard H. An Analysis of Criterion Variable Reliability in Conjoint Analysis. *Perceptual and Motor Skills* [online]. 1996, 82(3), 988-990 [cit. 2023-05-12]. ISSN 0031-5125. Dostupné z: doi:10.2466/pms.1996.82.3.988
- [83] Temperature and its effect on electromagnetic radiation. In: <https://earthobservatory.nasa.gov> [online] [cit. 2023-05-15] Dostupné z: https://earthobservatory.nasa.gov/features/RemoteSensing/remote_02.php
- [84] SEKERE, Jessy. Effects of atmospheric parameters on electromagnetic (EM) waves (radio wave & microwave) propagation [online]. 2019 ,[cit. 2023-05-13]. Dostupné z: doi: 10.13140/RG.2.2.36567.62885.
- [85] HOU, Jou-Ping a Shih-Chiao TSAI. Effects of atmospheric moisture on the radiation intensity of objects in millimeter-wave band. *Infrared Physics & Technology* [online]. 2019, **103** [cit. 2023-05-14]. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2019.103107



[86] ZHANG, Yu, Ke-cun ZHANG, Zhi-shan AN a Yan-ping YU. Quantification of driving factors on NDVI in oasis-desert ecotone using geographical detector method. *Journal of Mountain Science* [online]. 2019, **16**(11), 2615-2624 [cit. 2023-05-13]. ISSN 1672-6316. Dostupné z: doi:10.1007/s11629-018-5361-7

[87] STUTTE, Gary W., N.C. YORIO, S.L. EDNEY, J.T. RICHARDS, M.P. HUMMERICK, M. STASIAK, M. DIXON a R.M. WHEELER. Effect of reduced atmospheric pressure on growth and quality of two lettuce cultivars. *Life Sciences in Space Research* [online]. 2022, **34**, 37-44 [cit. 2023-05-13]. ISSN 22145524. Dostupné z: doi:10.1016/j.lssr.2022.06.001

[88] MAMAGHANI a SALVAGGIO. Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing. *Sensors* [online]. 2019, **19**(20) [cit. 2023-05-14]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19204453



Přílohy

Příloha 1 – kompletní seznam všech naměřených parametrů a vypočítaných průměrných hodnot vegetačních indexů

Datum	Čas UTC	Teplota	Vlhkost	Tlak	Oblačnost	Swift Sluice	Sum Angle	Kp Index	Srážky	NDVI>0.5	NDVI>0.7	GNDVI>0.3	NDRE>0	Exposure R	Exposure NIR	NIR-R	Green	NIR-Green	RedEdge	NIR-RE
16.3.	8:45	1.50	65%	958	0	100%	27.57	1.00	3	0.5542	0.7155	0.3978	0.1956	823	907	84	907	0	563	344
18.3.	11:34	14.70	20%	953	2	100%	37.91	2.30	0	0.5665	0.7155	-	0.1777	717	766	49	-	-	808	-42
19.3.	11:07	13.50	38%	953	3	100%	38.51	2.00	0	0.5602	0.7150	-	0.1358	478	517	39	-	-	926	-409
19.3.	14:06	12.80	37%	953	8	0%	26.88	1.67	0	0.5703	0.7150	-	-	230	926	696	-	-	-	-
20.3.	8:32	8.90	72%	956	4	100%	29.11	1.00	1	0.5737	0.7158	-	0.1689	412	794	382	-	-	823	-29
20.3.	13:33	10.70	69%	956	8	0%	30.62	3.67	1	0.5593	0.7151	-	0.1457	59	268	209	-	-	117	151
22.3.	7:52	9.10	71%	968	3	0%	29.98	3.67	1	0.5737	0.7158	-	-	226	926	700	-	-	-	-
22.3.	16:40	13.70	52%	949	3	0%	6.32	2.67	0	0.5624	0.7159	-	0.1688	31	149	118	-	-	74	75
23.3.	14:36	11.70	72%	947	4	100%	24.25	7.00	0	0.5443	0.7145	-	0.1662	320	517	197	-	-	988	-471
24.3.	6:36	12.10	68%	946	8	0%	14.27	6.00	0	0.5761	0.7161	-	-	204	794	590	-	-	-	-
1.4.	9:30	7.80	99%	950	9	0%	39.68	3.00	2	0.5963	0.7271	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.4.	11:34	5.60	53%	962	2	100%	40.12	3.00	0	0.6199	0.7232	0.4164	0.1495	753	585	-168	889	-304	855	-270
5.4.	15:51	4.50	61%	962	2	100%	15.35	3.00	0	0.5751	0.7196	0.3824	0.1535	839	601	-238	946	-345	717	-116
6.4.	9:00	1.90	78%	965	0	100%	38.84	2.00	0	0.6101	0.7169	0.4220	0.1260	694	505	-189	741	-236	673	-168
6.4.	12:00	4.30	62%	966	4	100%	43.90	3.00	0	0.5547	0.7124	0.3832	0.1509	729	609	-120	673	-64	780	-171
6.4.	12:00	4.30	62%	966	4	100%	43.90	3.00	0	0.5593	0.7095	0.4095	0.1179	729	617	-112	766	-149	717	-100
6.4.	13:00	4.50	50%	966	6	100%	39.20	2.00	0	0.6248	0.7229	0.4176	0.1373	780	585	-195	889	-304	855	-270
6.4.	16:00	3.20	55%	966	0	100%	14.76	1.00	0	0.5724	0.7192	0.3792	0.1523	839	626	-213	505	121	729	-103
7.4.	11:37	3.90	68%	961	4	100%	46.74	1.67	0	0.5960	0.7116	0.4242	0.1200	729	617	-112	907	-290	717	-100
7.4.	12:00	4.30	62%	966	4	100%	43.90	3.00	0	0.5593	0.7095	0.4095	0.1179	729	617	-112	766	-149	717	-100
7.4.	16:05	1.90	93%	960	9	0%	15.01	1.00	2	0.6146	0.7191	0.4024	0.1206	96	195	99	206	-11	102	93
8.4.	9:00	2.20	99%	959	9	0%	39.59	2.33	2	0.6064	0.7218	0.4170	0.1551	130	266	136	337	-71	166	100
8.4.	15:28	2.00	99%	959	7	0%	19.88	2.00	1	0.6194	0.7265	0.3995	0.1211	94	195	101	198	-3	102	93
9.4.	6:42	6.10	89%	953	9	0%	22.37	0.67	2	0.6284	0.7262	0.4348	0.1496	215	361	146	499	-138	203	158
9.4.	13:33	6.70	93%	957	8	0%	36.84	2.00	2	0.6225	0.7231	0.4000	0.1292	654	626	-28	663	-37	694	-68
10.4.	8:40	6.90	90%	971	4	100%	37.98	3.00	0	0.6170	0.7222	0.4043	0.1368	966	780	-186	511	269	907	-127
10.4.	10:28	10.80	92%	962	8	0%	46.55	3.00	0	0.6272	0.7221	0.4097	0.1327	966	753	-213	523	230	926	-173
11.4.	7:40	-0.30	78%	958	0	60%	30.80	1.00	3	0.5820	0.7143	0.4012	0.1393	794	871	77	988	-117	593	278
11.4.	10:31	7.10	69%	956	0	100%	46.92	0.67	0	0.6119	0.7177	-	-	926	644	-282	-	-	-	-
12.4.	8:05	0.00	85%	948	0	70%	33.89	1.67	3	0.5663	0.7115	0.3885	0.1500	794	511	-283	556	-45	673	-162
12.4.	10:55	6.60	67%	943	0	100%	47.75	0.67	0	0.6129	0.7156	-	-	926	644	-282	-	-	-	-
13.4.	6:35	6.80	78%	951	9	0%	21.14	1.00	1	0.6271	0.7259	0.4228	0.1469	215	361	146	499	-138	203	158
13.4.	13:25	7.20	99%	945	8	0%	38.85	2.00	2	0.6134	0.7206	0.4020	0.1403	585	626	41	663	-37	694	-68
13.4.	13:55	7.10	99%	943	8	0%	34.79	2.00	2	0.6343	0.7246	0.4149	0.1945	585	626	41	889	-263	505	121
14.4.	12:30	12.30	58%	959	0	100%	44.50	1.00	0	0.6035	0.7135	0.4149	0.1580	694	563	-131	741	-178	780	-217
14.4.	13:22	12.30	57%	961	0	100%	40.28	1.33	0	0.6078	0.7207	0.4111	0.1532	684	644	-40	889	-245	823	-179
15.4.	13:55	16.80	55%	957	0	100%	34.73	2.00	0	0.5849	0.7117	0.4066	0.1408	529	535	6	626	-91	617	-82
15.4.	15:06	16.30	55%	956	0	100%	25.17	2.00	0	0.5849	0.7157	0.3898	0.1687	780	839	59	753	86	529	310
20.4.	9:50	6.70	72%	956	2	100%	48.83	0.67	1	0.6076	0.7182	-	-	871	635	-236	-	-	-	-
20.4.	12:44	11.00	66%	963	2	100%	45.42	0.67	0	0.6080	0.7139	0.4140	0.1726	601	585	-16	741	-156	780	-195
20.4.	13:25	11.30	70%	956	2	100%	39.94	0.67	0	0.5871	0.7170	0.3931	0.1487	663	673	10	889	-216	823	-150
21.4.	14:16	15.00	48%	955	0	100%	34.04	1.67	0	0.5925	0.7137	0.4066	0.1888	549	535	-14	570	-35	601	-66
21.4.	15:22	14.20	48%	954	0	100%	23.02	1.67	0	0.5830	0.7153	0.3987	0.1667	766	839	73	663	16	535	304
22.4.	15:30	16.20	50%	958	8	0%	23.25	1.33	0	0.6035	0.7180	0.4017	0.1183	317	644	327	766	-122	350	294
23.4.	15:28	14.80	65%	956	7	0%	23.47	5.00	0	0.5992	0.7190	0.4032	0.1162	292	644	352	766	-122	296	348
24.4.	6:40	12.20	81%	952	7	0%	25.48	6.67	0	0.6156	0.7200	0.4071	0.1180	617	601	-16	729	-128	654	-53
24.4.	16:20	9.10	98%	945	8	0%	15.31	3.00	2	0.6109	0.7223	-	0.1844	327	229	-98	-	-	214	15
25.4.	8:19	9.00	56%	953	4	100%	41.95	1.33	0	0.5993	0.7228	0.3870	0.1312	529	593	64	673	-80	705	-112
26.4.	6:50	3.30	82%	961	7	0%	28.65	2.00	0	0.6123	0.7221	0.3976	0.1298	199	585	386	529	56	290	295
26.4.	16:15	6.50	63%	956	7	0%	17.10	3.00	0	0.6555	0.7221	-	-	535	808	273	-	-	-	-
27.4.	8:27	10.60	62%	957	4	100%	42.55	3.33	0	0.5961	0.7110	0.3959	0.1372	511	889	378	585	304	593	296
28.4.	6:15	4.70	79%	962	3	0%	22.30	2.67	0	0.5965	0.7286	-	-	276	705	429	-	-	380	325
28.4.	14:53	13.80	54%	953	8	0%	29.21	3.00	0	0.6059	0.7168	0.3876	0.1071	517	570	53	635	-65	570	0