

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



**Analýza plošného zastoupení vegetace na zemědělském pozemku s využitím
družicových dat a dat RPAS**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bakalářský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

Praha, 2019

Tomáš Najman



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Najman</u>	Jméno: <u>Tomáš</u>	Osobní číslo: <u>458863</u>
Zadávací katedra: <u>K143 - Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Analýza plošného zastoupení vegetace na zemědělském pozemku s využitím družicových dat a dat RPAS

Název bakalářské práce anglicky: Analysis of spatial distribution of vegetation in the agricultural field using satellite data, and RPAS

Pokyny pro vypracování:
Stručná rešerše využití dat RPAS (zejména senzorů REDEGE-M a Parrot Sequoia) pro stanovení iniciálních fází vegetačního pokryvu na ZPF. Vytvoření postupu zpracování a vyhodnocení multispektrálních dat v prostředí Agisoft a ArcGIS. Určení vegetačních indexů z testovacích dat Rededge-M a družicových scén odpovídajícího období, porovnání, výpočet prostorové distribuce pokrývnosti na daném pozemku, porovnání družicových dat, REDEGE-M a RGB dat z RPAS.

Seznam doporučené literatury:
Středa, L., 2017. Využití dat RPAS pro hodnocení stavu zemědělských pozemků. CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering.
Žížala, D., Krása, J., Báčová, M., Zelenková, K., Laburda, T., Novotný, I., 2016. Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha, CZ.
Studentské práce a recenzované články dle rešerše

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2019 Termín odevzdání bakalářské práce: 26.5.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

28.2.2019 Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza plošného zastoupení vegetace na zemědělském pozemku s využitím družicových dat a dat RPAS“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Krásky, Ph.D. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Josefu Krásovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a připomínky při zpracování mé bakalářské práce.

Práce vznikla v rámci projektu EIP „Implementace nových a inovovaných technologií precizního zemědělství do pěstebních systémů“ s registračním číslem 16/003/1611a/120/000095.

Abstrakt

Práce se zabývá využitelností družicových a *RPAS* dat v oblasti stanovení prostorové distribuce pokryvnosti vegetace. Za tímto účelem byly nad zemědělským pozemkem osetým řepkou ozimou provedeny dva nálety (podzimní a jarní) pomocí technologie bezpilotních systémů. Pro snímání byla na nosiči (hornoplošník *Raptor*) využita multispektrální kamera *RedEdge-M*. První část se zabývá stručným úvodem do problematiky spektrální odrazivosti rostlin a popisem využití technologie pro snímání multispektrálních dat. Byly porovnány vlnové délky jednotlivých spektrálních pásem pro data *Sentinel 2*, *Landsat 8* a *Rededge-M*. Další část práce se věnuje popisu postupu zpracování surových dat softwaru *Agisoft Photoscan Pro* a *ArcMap*. V následující pasáži je zpracována podrobná analýza zpracovaných dat kamery *RedEdge-M* a družice *Sentinel 2*. K samotné detekci vegetace byl využit vegetační index *NDVI* stanovený z dat kamery *RedEdge-M*, dle kterého byla určena reálná plošná pokryvnost. Analýza proběhla na základě vztahu hodnot *NDVI* v jednotlivých pixelech mezi daty družice *Sentinel 2* a daty kamery *RedEdge-M*.

Z prezentovaných výstupů lze jednoznačně potvrdit využitelnost dat snímaných multispektrální kamerou *RedEdge-M* pro stanovení reálného pokryvu. Ať už přesného na základě podrobnější analýzy, tak i hrubého – po převzorkování dat do rozlišení 1, 2, 5 nebo 10 m s chybou do 10 % pro hrubší analýzy. Při podzimním náletu je relativně průkazná shoda trendu dat *RedEdge-M* a *Sentinel 2* v nízkých a středních hodnotách *NDVI*, ačkoliv data *Sentinel 2* mají skoro dvojnásobný rozptyl oproti *RedEdge-M* v identických místech pozemku. Ovšem v případě jarních dat družicová data *Sentinelu 2*, i za předpokladu ignorace hraničních bodů, udávají plošné zastoupení vegetace pro hodnoty *NDVI* s rozptylem téměř 40 % oproti *Rededge-M*.

Klíčová slova

RPAS, *RedEdge-M*, *Sentinel 2*, multispektrální pásma, *NDVI*, pokryvnost vegetace

Abstract

This thesis deals with the utility of the satellite and *RPAS* data in the area of setting the space distribution of the vegetation cover. In order to do this there were carried out two observations from the air (in autumn and in spring) by the technology of pilotless systems over an agricultural piece of land sowed by rapeseed. On the carrier (high-wing monoplane *Raptor*) the camera *RedEdge-M* was used for scanning. The first part deals with a brief introduction into the topic of the spectral plants reflectivity and the description of the used technology for scanning of multispectral data. The wavelengths of the individual spectral bands for the data from *Sentinel 2*, *Landsat 8* and *RedEdge-M* were compared. The next part deals with the description of the raw data processing by the softwares *Agisoft Photoscan Pro* and *ArcMap*. In the next part there is processed a detailed analysis of the processed data from the camera *RedEdge-M* and the satellite *Sentinel 2*. For the vegetation detection itself there was used the vegetation index *NDVI* which was based on the data from the camera *RedEdge-M*. According to the index there was determined the real area cover. The analysis was carried out on the basis of the relationship of the *NDVI* values in individual pixels between the data from the satellite *Sentinel 2* and the camera *RedEdge-M*.

Following the presented outcome it is possible to confirm unambiguously the utility of the data from the multispectral camera *RedEdge-M* to determine the real cover. It is valid for both – the accurate one, which is based on a more detailed analysis and the raw one – after resampling of the data to the adjustment 1, 2, 5 or 10 m including an error up to 10% for the rawer analysis. During the air observation in the autumn there is an evident unity of the tendency of the data from *RedEdge-M* and *Sentinel 2* in the low and medial *NDVI* values although the dispersion of the *Sentinel 2* data is almost twice bigger in contrast to *RedEdge-M* in the identical places of the ground. In case of the spring data even if you ignore the end points, the data from *Sentinel 2* give the area vegetation cover for the *NDVI* values with the dispersion almost 40% in contrast to *Rededge-M*.

Keywords

RPAS, *RedEdge-M*, *Sentinel 2*, multispectral bands, *NDVI*, cover of vegetation

Obsah

1	Úvod	9
2	Testovací území.....	9
3	Reflektance rostlin.....	11
3.1	Vegetační indexy.....	12
3.1.1	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	12
3.1.2	CVI (Chlorophyll Vegetation Index)	13
3.1.3	SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	14
3.1.4	GLI (Green Leaf Index).....	14
4	Zdrojová data	14
4.1	RPAS.....	14
4.1.1	DJI Mavic Pro 2	15
4.1.2	Raptor + kamery	16
4.1.2.1	RGB kamera Sony R10C + objektiv SEL-16F28	17
4.1.2.2	RedEdge-M.....	17
4.1.2.3	Parrot Sequoia	19
4.2	Družicová data	20
4.2.1	Landsat 8	20
4.2.2	Sentinel 2 L2A.....	21
5	Příprava zdrojových dat RPAS	23
5.1	Zpracování dat pomocí softwaru Agisoft	23
5.2	Zpracování dat pomocí softwaru ArcMap.....	32
5.3	Výběr nejvhodnějších zdrojových dat	34
5.4	Podzimní nálet – RedEdge-M, Mavic 2 Pro	36
5.5	Jarní nálet – RedEdge M, SONY R10C.....	38
6	Příprava družicových dat.....	39
6.1	Podzimní nálet – družicová data	39
6.2	Jarní nálet – družicová data.....	39
6.3	Porovnání vlnových délek pásem poskytovaných Sentinelem 2 a RedEdge M	40
7	Analýza zpracovaných dat.....	41
7.1	Testovací pole.....	41
7.1.1	Tvorba pole.....	41
7.2	Plošné zastoupení.....	41

7.3	Převzorkování se snappingem	42
7.4	Porovnání poskytovaných a vypočtených hodnot NDVI družice Sentinel 2.....	43
8	Porovnání výstupů družicových dat, RedEdge-M a RGB dat.....	48
8.1	Variabilita dat z RedEdge-M v závislosti na rozlišení.....	48
8.1.1	Porovnání – podzimní nálet	48
8.1.1.1	Testovací čtverec.....	48
8.1.1.2	Celé území ZPF	50
8.1.2	Porovnání – jarní nálet	52
8.1.2.1	Testovací čtverec.....	52
8.1.2.2	Celé území ZPF	54
8.1.3	Porovnání podzimního a jarního náletu.....	57
8.2	Diferenciace hodnot NDVI vůči procentuálnímu zastoupení vegetace.....	59
9	Hodnocení kvality náletu.....	61
10	Závěr.....	62
11	Seznam použité literatury	64
12	Seznam obrázků	66
13	Seznam tabulek	68
14	Seznam grafů.....	68

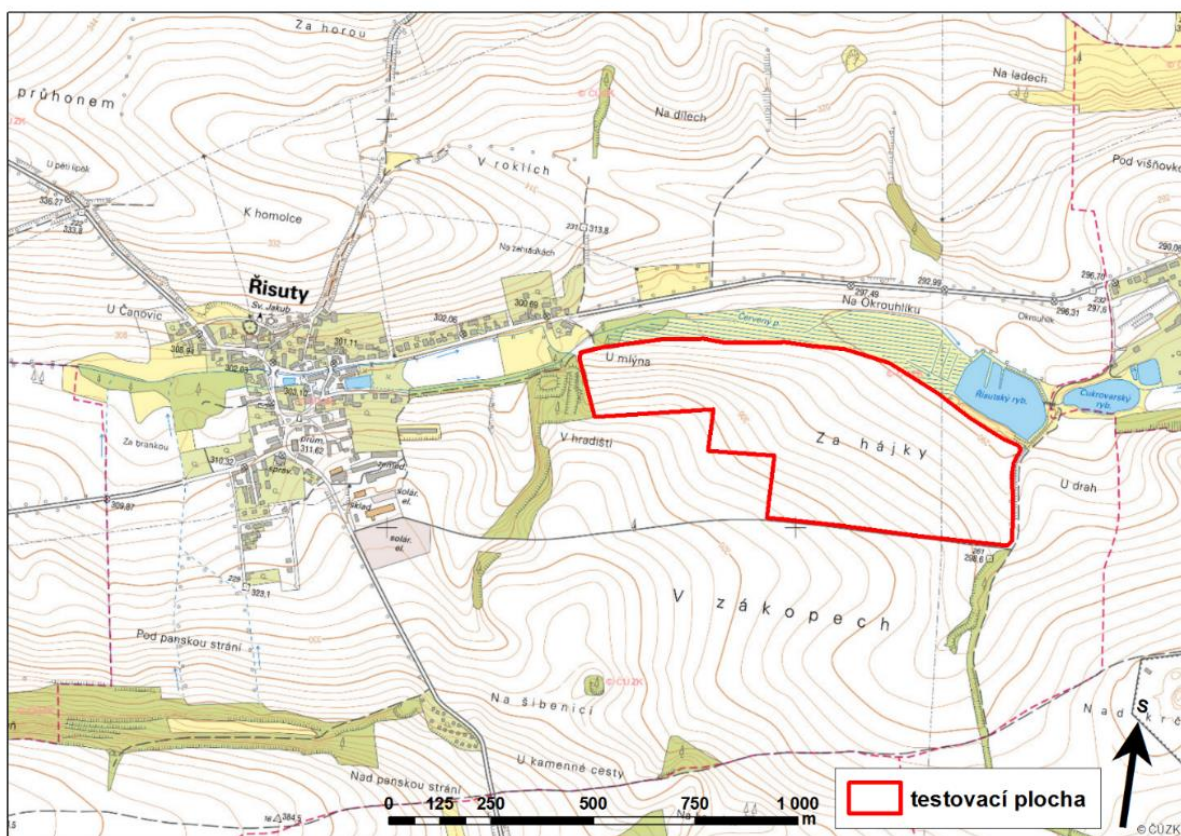
1 Úvod

S rozvojem dálkového průzkumu země přichází nové možnosti získávání informací o zemském povrchu, jako například geometrický model terénu nebo krajinný pokryv. Zejména vývoj v oblasti multispektrálních senzorů přináší lepší rozlišení a kvalitu snímků. Nárůst snímaných spektrálních pásem, především v blízkém infračerveném spektru, umožňuje čím dál přesnější monitoring vegetace, díky kterému je možné aplikovat precizní zemědělství.

Cílem této bakalářské práce je porovnání využitelnosti družicových dat vůči datům získaným technologií bezpilotních systémů *RPAS* v určení prostorové distribuce pokryvnosti vegetace. Pro určení procentuálního plošného zastoupení je využíváno rozdílné reflektance, neboli odrazivosti povrchu rostlin v určitých spektrálních pásmech. K dosažení těchto potřebných dat k analýze byly na zájmové lokalitě uskutečněny dva nálety (podzimní 16. října 2018 a jarní 11. dubna 2019). V rámci náletů byla na nosiči *Raptor* využita multispektrální kamera *RedEdge-M*. Jako termínově nejbližší a podmínkami nejvhodnější družicová data byly zvoleny snímky družice *Sentinel 2*. Obsahem analýzy je popis zpracování surových dat kamery *RedEdge-M* softwarem *Agisoft Photoscan Pro* a následně aplikací *ArcMap*. Příprava družicových dat proběhla pouze za pomoci aplikace *ArcMap*, ve které byl dále zpracován společný rozbor připravených dat. Analýza proběhla na testovacím území v blízkosti obce Řisuty. V této práci jde zejména o zpracování údajů o reflektanci v 2D rovině XY. Přesný 3D geometrický model zemského povrchu není předmětem zpracování, a tedy výškové souřadnice Z pro výstup nehrají žádnou roli.

2 Testovací území

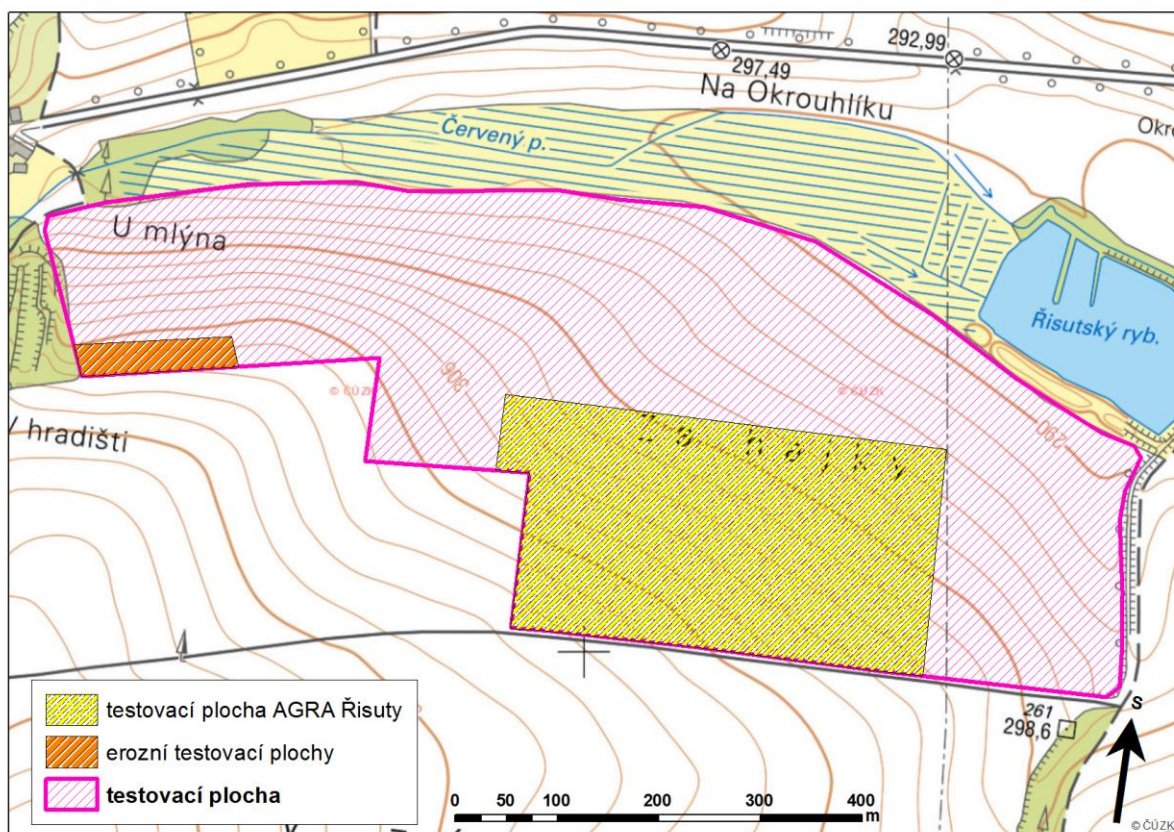
Testovací plocha o rozloze 318 000 m² s průměrnou sklonitostí 10,3 % se nachází 800 metrů východně od již zmiňované obce Řisuty v katastrálním území Řisuty u Slaného (745782), v okrese Kladno (Středočeský kraj). Celé území je vedeno jako zemědělský půdní fond s číslem půdního bloku 9501-0 (760-1020) (eAGRI, 2019). Severní hranici pozemku tvoří Červený potok s hustou lesní a křovištní vegetací, který ústí do rybníční soustavy v pořadí Řisutský a Cukrovarský rybník. Západní hranicí je lesní porost ve vlastnictví obce. Jižní hranice je definována polní cestou, opět ve vlastnictví obce. Východní hranici tvoří polní cesta lemovaná solitérní vegetací, opět obecní pozemky. Na řešené ploše hospodaří AGRA Řisuty s.r.o., která má přibližně polovinu území ve svém vlastnictví (ČÚZK, 2019).



Obrázek 1 Mapa širších vztahů (zdroj ZM10: ČÚZK)

V rámci zájmové plochy probíhají pokusy a měření několika projektů. Do konce roku 2018 probíhalo testování C faktoru QJ1530181 „Stanovení aktuálních hodnot ochranného účinku vegetace za účelem kvantifikace a zefektivnění protierozní ochrany zemědělské půdy v České republice“, v jehož návaznosti na začátku roku 2019 začal projekt týkající se glyfosátu QK1920224 s názvem „Možnosti řešení protierozní ochrany v zemědělských podnicích při vyloučení používání glyfosátu“. Dalším žadáním produktem testování v zájmovém území je výstup projektu EIP „Implementace nových a inovovaných technologií precizního zemědělství do pěstebních systémů“ s registračním číslem 16/003/1611a/120/000095. Na zemědělském pozemku jsou mimo testování zmiňovaných projektů prováděny pokusy osevních postupů přímo podnikem AGRA Řisuty.

Z toho důvodu není území homogenní, nachází se zde několik dílčích testovacích ploch. Zkušební erozní plochy pro testování C faktoru, EIP a glyfosátů se rozkládají na 4 700 m² v západní části území (spolupráce s VÚMOP, v.v.i a ČVUT). K této ploše vede při hranici pozemku polní cesta, která je dalším z heterogenních prvků testovacího území. Testování osevních postupů AGROU Řisuty probíhá v jižní části území a zabírá značnou část povrchu, respektive 42 000 m².



Obrázek 2 Mapa testovací plochy (zdroj ZM10: ČÚZK)

3 Reflektance rostlin

Pokryv vegetací nás zajímá především z důvodu ekonomiky zemědělského hospodaření. Můžeme sledovat vývoj plodin v prostorovém měřítku jako celek nebo dokonce v jednotlivých částech. Dle aktuální situace můžeme hodnotit stav plodin a řešit jejich nedostatek živin či vláhy lokálně. Ovšem hospodářské výnosy nejsou jediným zájmem. Plošné zastoupení vegetace může být ukazatelem potenciálně ohrožených míst ke vzniku půdní eroze způsobené kinetickou energií dopadajících dešťových kapek, proudící vodou povrchového odtoku nebo větrem v období sucha. Pro softwarové určování plošného zastoupení a distribuce vegetace je reflektance rostlin zásadní.

Nejen rostliny, ale každý povrch má své odrazové vlastnosti, které se odvíjí od fyzikálního charakteru látek. Reflektance jako taková, vyjadřuje poměr odražené energie vůči množství dopadové energie na objekt. Základní princip stanovování vegetačního indexu, jakožto ukazatelem jejich výskytu, vychází z rozdílné spektrální odrazivosti vegetace v blízkém infračerveném pásmu ($\lambda = 700-1300 \text{ nm}$) a ve viditelné červené oblasti ($\lambda = 550-700 \text{ nm}$) elektromagnetického spektra. Odrazivost rostlin v modré a červené části spektra je velice nízká, a to z důvodu absorpce chlorofylu, odrazivost v zeleném pásmu je mírně vyšší. Tato skutečnost je důvodem, proč pro lidské oko je barva rostlin vnímána jako zelená (Govaerts & Verhulst, 2010).

Záření v blízkém infračerveném pásmu je od povrchu vegetace silně odráženo. Kvantifikace této odrazivosti je dána aktuálním stavem rostlinných tkání, které jsou dále ovlivněny faktory prostředí, jako jsou půdní vlhkost, množství živin nebo fenologická fáze plodiny. Pro detekci rostlin, k určení pokryvnosti, je zásadní kontrast mezi vegetací a půdou. Ten je maximální v červeném a blízkém infračerveném pásmu. (Govaerts & Verhulst, 2010)

3.1 Vegetační indexy

Specifická spektrální odrazivost rostlin umožňuje jejich detekci, tedy i hodnocení plošného zastoupení vegetací, nebo dokonce hodnocení biofyzikálních vlastností vegetace, respektive jejího zdravotního stavu. Pro lepší citlivost zjištění biomasy jsou kombinována jednotlivá spektrální pásma, která samostatně nejsou mnohdy použitelná. Vyhodnocování vegetačních indexů bývá často spjato s tzv. *LAI (Leaf area index – index listové plochy)*. Tento index vyjadřuje poměr celkové plochy listů na jednotku plochy země (Dratva, 2018).

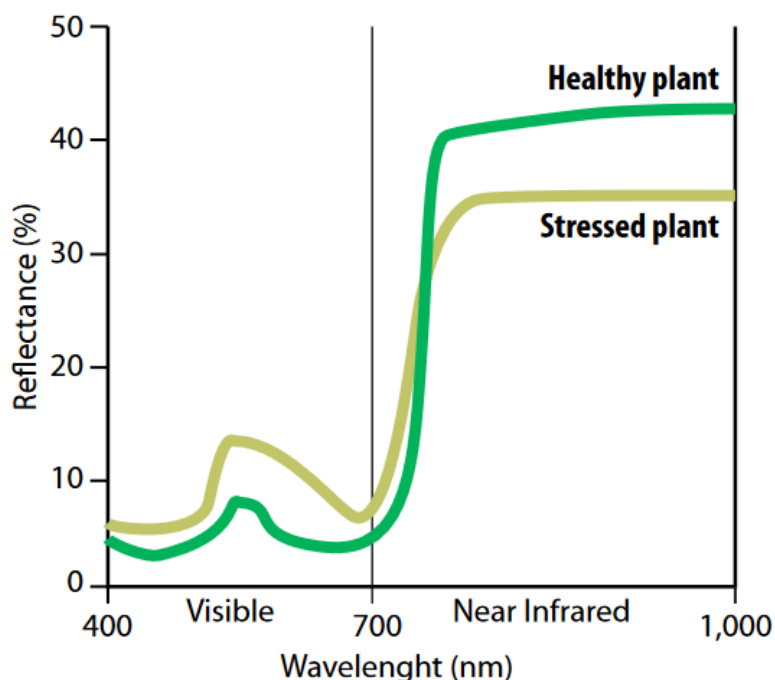
Indexů, které na základě reflektance specificky popisují vlastnosti povrchů, tedy umožňují rozpoznávat druh, případně kondici objektu, je celá řada.

3.1.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Pro účely této práce, tedy pro stanovení plošného zastoupení vegetace na ZPF, byl vybrán právě tento index, který je jedním ze základních používaných vegetačních indexů. Kvantifikuje stav vegetace měřením rozdílu mezi blízkým infračerveným zářením (dále NIR), které, jak už bylo zmíněno, vegetace silně odráží, a červeným světlem (dále Red), které je vegetací pohlcováno.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Hodnoty indexu se pohybují v rozmezí od -1 do 1. Výskyt vegetace typicky ukazují hodnoty od 0,5 do 1. Vysoké hodnoty blíží se 1 dokazují zdravé zelené listoví. Tato skutečnost je dána obsahem chlorofylu (VIZ kapitola 3). Naproti tomu hodnoty blíží se 0 ukazují na holý, či kamenitý půdní substrát. V případě záporných hodnot, které se pohybují maximálně do -1, se zpravidla jedná o vodní plochy, sníh nebo led. (Dratva, 2018)



Obrázek 3 Typické spektrum odrazivosti zdravé a stresované rostliny (Govaerts & Verhulst, 2010)

Obecně je *NDVI* standardizovaným způsobem měření zdravé vegetace. Pokud jsou hodnoty indexu vysoké, vegetace prosperuje. Případ nízkých hodnot ukazuje, že v daném území vegetace strádá, nebo není vůbec.

NDVI je dnes hojně využíván k analýze stavu plodin zemědělských ploch. Například se používá pro měření množství biomasy, nebo identifikaci strádajících ploch pro přesné zemědělství (distribuce a množství hnojiv). Dále je možné využít vegetační index *NDVI* jako ukazatel sucha (nižší hodnoty *NDVI* a hustota vegetace může signalizovat nedostatek vody) (Govaerts & Verhulst, 2010).

3.1.2 CVI (Chlorophyll Vegetation Index)

Index, který původně vzešel z jiného vegetačního indexu *Green SR (Simple Ratio)*, je velice efektivní v hodnocení vegetace při nízkém plošném zastoupení, tedy při nízkém *LAI*. Tato skutečnost je dána vysokou citlivostí na hustotu chlorofylu v rostlinné tkáni. Číselně je vyjádřen jako součin pásem *NIR* s podílem *RED* a *GREEN*, které je ve druhé mocnině (Dratva, 2018).

$$CVI = \frac{Red}{Green^2}$$

3.1.3 SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)

Další z vegetačních indexů je *SAVI*, který vznikl jako optimalizace *NDVI*. Jeho výhoda spočívá v minimalizaci reflexe půdního substrátu, která výsledky vegetační odrazivosti negativně ovlivňuje. Toho je dosaženo použitím tzv. *L faktoru*, jehož hodnoty se pohybují od 0 do 1. Pro nízkou vegetaci se uvažuje hodnota faktoru $L = 1$, pozdější fenologické fáze pak uvažují hodnoty faktoru $L = 0,5$ a pro vysokou hustou vegetaci jsou hodnoty faktoru $L = 0$. Nejčastěji je dosazována hodnota $L = 0,5$, která by měla být majoritně využitelná (Dratva, 2018).

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - Red)}{NIR + Red + L}$$

3.1.4 GLI (Green Leaf Index)

Vegetační index *GLI* předpokládá rozdílné hodnoty spektrální odrazivosti rostlin v zeleném pásmu (předpoklad vyšších hodnot) vůči hodnotám v modrém a červeném pásmu (předpoklad nižších hodnot). Naproti tomu u půdního substrátu nebo odumřelé tkáně rostlin je to naopak (vyšší hodnoty v červeném a modrém pásmu, nižší hodnoty v pásmu zeleném). Na základě toho index pracuje s rozdílem průměrů, respektive průměr hodnot modrého a červeného spektra je větší nebo menší než hodnoty zeleného spektra. Pro holý půdní substrát jsou hodnoty záporné a dosahují maximálně -1 . Zelené listové vegetace je dokazováno kladnými hodnotami indexu, které dosahují maximálně 1 . Uvažované pomezí je nula, ovšem v důsledku proměnlivých vnějších podmínek, jako je světlo apod., se tato hranice může v rámci osy pohybovat (Dratva, 2018).

$$GLI = \frac{2 \times Green - Red - Blue}{2 \times Green + Red + Blue}$$

4 Zdrojová data

Pro požadovanou analýzu byla využita data získána pomocí technologie *RPAS* a data družicová.

4.1 RPAS

Zkratka *RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)* je jedním z mnoha variant označení pro letadla bez posádky, řízená dálkově, nebo která jsou schopna samostatného letu dle předem naprogramovaného letového plánu (Colomina & Molina, 2014). Tento termín byl v roce 2011 zaveden Mezinárodní organizací pro civilní letectví (*ICAO, International Civil Aviation Organization*) jako dílčí třída *UAS (Unmanned Aircraft System)*, který je zaveden Ministerstvem obrany Spojených států amerických a Úřadem pro civilní letectví Spojeného království. Pouze označení *RPAS* je dle *ICAO* možné začlenit do mezinárodního systému civilního letectví. Dalším často užívaným označení je například *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)* nebo také dron (Báčová, 2018).

O rozvoj těchto zařízení se zasloužila především armáda, která vyvíjela bezpilotní systémy jako průzkumný, nebo dokonce útočný aparát. Ovšem v dnešní době se objevuje využití i v civilním sektoru. Uspodňuje získávání informací o zemském povrchu ve vysokém rozlišení, ve kterém není možné využít družicových dat.

Rychlé, přesné a relativně levné snímkování zemském povrchu otevírá řadu možností monitoringu porostů, dokumentace škod, inspekce průmyslových objektů, nebo dokonce detekce drenáží, melioračních kanálů a mnoho dalších, jako například nabízí firma SURVIA (SURVIA, 2019). Jedním z často zmiňovaných využití, které RPAS nabízí, je monitoring zemědělských ploch, na jehož základě může být uskutečněno tzv. přesné zemědělství. Znalost prostorové variability pozemků je základní vstupní informací pro diferencovanou aplikaci variabilního hnojení (Lukas & Ryant, 2011).

Nejčastější zpracování dat získaných pomocí RPAS pro tvorbu digitálních modelů terénu ve velmi vysokém rozlišení je tzv. *Structure-from-motion* (SfM) fotogrammetrií, popsanou dále v kapitole 5.

4.1.1 DJI Mavic Pro 2

Tento dron je dlouho očekávaným nástupcem veleúspěšného *DJI Mavicu Pro*. *DJI Mavic 2 Pro* obsahuje všesměrové Vision a infračervené snímací systémy a plně stabilizovaný 3-osý gimbal s 1-palcovým CMOS senzorem (společně vyvinutý DJI a Hasselblad), který pořizuje 4K video a 20-ti megapixelové fotografie s ohromující barevnou věrností. *Mavic 2 Pro* se může pochlubit maximální rychlostí letu 72,7 km/h a maximální dobou letu 31 minut. (DJI, 2018)



Obrázek 4 DJI Mavic 2 Pro (RobotWorld, 2019)

4.1.2 Raptor + kamery

Pro snímání větších oblastí je vhodnější oproti klasickému vrtulovému dronu použít bezpilotní letadlo. V tomto případě bylo využito na zakázku vyrobené pevné křídlo *Raptor* s rozpětím 1,8 m a celkovou hmotností včetně kamer přibližně 4 kg. Letadlo nese společně fixně umístěné kamery *RedEdge-M* a *SONY R10C*. Snímky pořizuje v synchronním režimu, s cílem dosáhnout požadovaných překryvů ve směru i napříč směru letu (75% pro *RedEdge-M*). Jako ovládací software využívá *Mission Planner*. Průměrná rychlost letu se pohybuje kolem 18 m/s s maximální dobou letu 45 minut.



Obrázek 5 pevné křídlo Raptor (autor: Ing. Tomáš Laburda)

4.1.2.1 RGB kamera Sony R10C + objektiv SEL-16F28

Sony R10C je určena pro snímání RGB pásem, které slouží k tvorbě klasického ortofota. Kamera je vybavena senzorem APS-C o velikosti 23,2 x 15,4 mm s maximálním rozlišením 5456 x 3632 (20,1 MP). Hmotnost aparátu bez objektivu je 72 g (Applied Aeronautics, 2019). Na kameře byl využit širokoúhlý, krátký objektiv SONY SEL s pevnou ohniskovou vzdáleností 16 mm a světelností F 2,8. Tento typ objektivu je kompatibilní pro všechny fotoaparáty s koncovým bajonetem E. Celková hmotnost objektivu činí 67 g (MEGAPIXEL, 2019).



Obrázek 6 vlevo RGB kamera Sony R10C (Applied Aeronautics, 2019),
vpravo objektiv SEL-16F28 (MEGAPIXEL, 2019)

4.1.2.2 RedEdge-M

Profesionální multispektrální kamera *RedEdge-M* od *MicaSense* je určena pro snímání terénu bezpilotními systémy. Její konstrukce je navržena pro flexibilní a jednoduchou integraci na velké množství dronů či dalších bezpilotních létajících prostředků, v tomto případě na *Raptor*. Je schopna simultánního snímání pěti diskretních spektrálních pásem k vytvoření přesných a kvantitativních informací o síle a zdraví plodin. Kamera je vybavena modulem snímače Downwelling (DLS) a modulem GPS (MicaSense, 2017).

Parametry:

Hmotnost: 170 g (včetně DLS a kabelů)

Rozměry: 94 mm x 63 mm x 46 mm

Napájení: 4,2 V DC – 15,6 V DC

Rozsah spektra: Blue, green, red, red edge, near-IR (globální závěrka, úzkopásmový)

RGB výstup: Globální závěrka, ve všech pásmech

Ground Sample Distance (GDS): 8 cm na pixel (na pásmo) při letové výšce 120 m

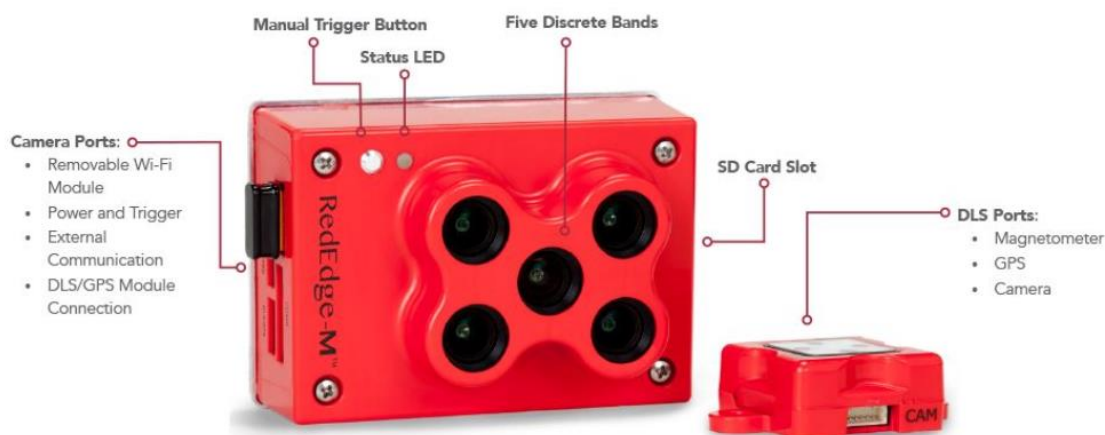
Rychlost snímání: 1 snímek/s (všechny pásma), 12-bit RAW

Rozhraní: Serial, 10/100/1000 ethernet, odstranitelná wifi, externí spoušť, GPS, SDHC

Rozsah pohledu: 47,2° HFOV

Možnost spouštění: Režim časovače, režim překrytí, režim externího spouštění, režim ručního snímání

(MicaSense, 2017)



Obrázek 7 Funkce a připojení kamery RedEdge M (MicaSense, 2017)

Tabulka 1 Spektrální pásma snímané kamerou RedEdge M (Sa et al., 2018)

Blue (Center wavelength, bandwidth)	475, 20	nm
Green	560, 20	nm
Red	668, 10	nm
Red Edge	717, 10	nm
Near Infrared	840, 40	nm

4.1.2.3 Parrot Sequoia

Další multispektrální kamerou na trhu je *Sequoia* od skupiny *Parrot*, která je určena speciálně pro zemědělství. Je vhodná pro integraci na všechny typy bezpilotních letounů. Hlavním rozdílem oproti *RedEdge-M* jsou rozdílně aplikované snímače. Je vybavena 4 spektrálními senzory, jednou RGB kamerou a externím slunečním senzorem. *Sequoia* splňuje kritéria vynikající přesnosti a minimální velikosti. Velkou výhodou je její hmotnost pouhých 72 gramů (107 g včetně slunečního senzoru), což jí činí nejlehčí kamerou tohoto typu.

Spektrální čidla snímají zelené (vlnová délka 550 nm, šířka pásma 40 nm), červené (vlnová délka 660 nm, šířka pásma 40 nm), Red Edge (vlnová délka 735 nm, 10 nm šířka pásma) a Near Infrared (vlnová délka 790 nm, 40 nm šířka pásma) spektrální pásma, které lze použít pro vytváření indexovaných map (*NDVI*, *NDRE*, atd.), na základě kterých může být doporučeno hnojení dusíkem apod. (Parrot, 2016).

Parametry:

Rozměry: 59 mm x 41 mm x 28 mm

Hmotnost: 72 g

Vnitřní paměť: 64 Gb

16 Mpx RGB kamera

Rozlišení: 4608 x 3456 px

4 x 1,2 Mpx spektrální čidla

Rozlišení: 1280 x 960 px

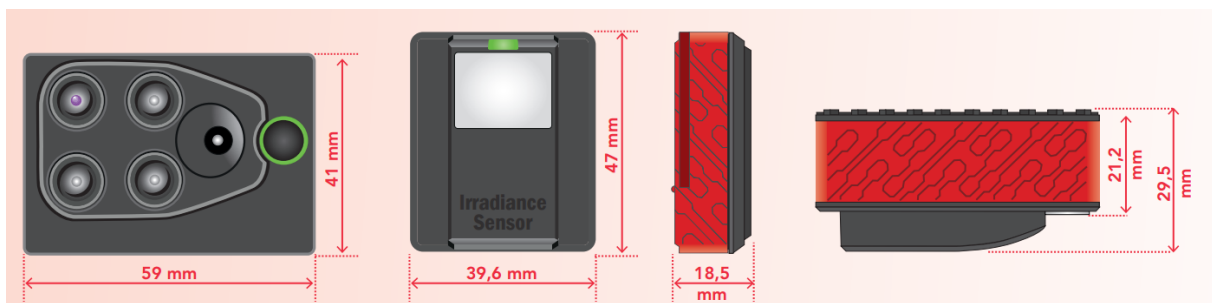
Snímaná pásma: Red, Green, Red Edge, NIR

GPS: Ano

Slot na kartu: SD karta

Sluneční sensor

Hmotnost: 35 g



Obrázek 8 Rozměry kamery Sequoia a jejího slunečního senzoru (MicaSense, 2019)

4.2 Družicová data

Přesun využívání družicových dat z výzkumné a vojenské činnosti do komerční oblasti, umožňuje zpracování informací o zemském povrchu pro velká území i veřejnosti. Zpřístupnění satelitních snímků vedlo k výraznému zjednodušení a zrychlení provádění analýz pro soukromé účely, a tedy je jedním z nejvyužívanějších zdrojů geografické informace. Hlavní příčina exponenciálně se zvyšujícího rozmachu využívání družicových dat je výrazný posun v oblasti prostorového rozlišení, které dosahuje přesnosti vyšší než 1 metr. Výhodou je i nepřetržité snímkování zemského povrchu a se zvyšujícím se počtem družic je k dispozici čím dál častěji aktuální geografická situace (Gisat, 2019a).

Díky tomu je dnes možné provádět různé analýzy vývoje zemského povrchu, jako například morfologické změny nebo plošný rozvoj/úpadek vegetace, což je i cílem této práce.

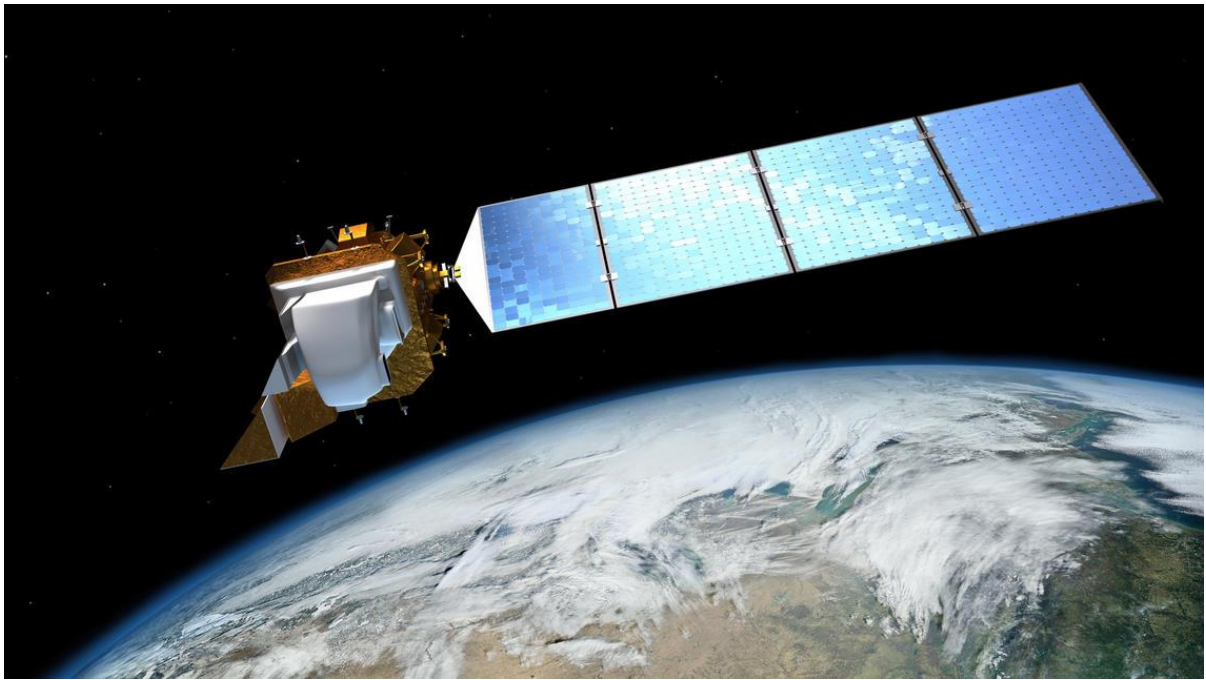
Počty družicových misí, které jsou k dispozici, se v dnešní době pohybují v řádu desítek a v následujících letech je i nadále plánováno zvyšování jejich počtu. Mezi nejpoužívanější družice v evropském měřítku patří jednoznačně *Landsat 8* a *Sentinel 2*.

4.2.1 Landsat 8

Americký program *Landsat* (USGS) je jeden z nejdéle trvajících projektů vesmírného snímání zemského povrchu. První družice byla vypuštěna už v roce 1972. *Landsat 8* se pohybuje na oběžné dráze od 11. února 2013 s periodou obletu 16 dní. Družice je vybavena senzory *OLI* (*Operational Land Imager*), které pořizují panchromatická (rozlišení 15 metrů) a multispektrální data (rozlišení 30 metrů), a *TIRS* (*Thermal Infrared Sensor*), který pořizuje tepelná data (rozlišení 100 metrů) (Gisat, 2019b).

Tabulka 2 Spektrální pásma a rozlišení družice *Landsat 8* (USGS, 2019)

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100



Obrázek 9 Vizualizace družice Landsat 8 (USGS, 2017)

4.2.2 Sentinel 2 L2A

Sentinel 2 je označení pro misi programu *Copernicus*, vybavenou optickým senzorem *MSI* (*MultiSpectral Instrument*), který snímá zemský povrch ve 13 pásmech. Pořízené multispektrální snímky zabírají nebývale široké území 290 km s vysokým prostorovým rozlišením. Čtyři kanály snímají v pixelovém rozlišení 10x10 metrů, šest kanálů v rozlišení 20x20 metrů a tři kanály v rozlišení 60x60 metrů. Misi *Sentinel 2* tvoří dvě družice na stejné oběžné dráze s posunem 180° s dobou jednoho oběhu 10 dní (časové rozlišení je tedy 5 dní). První ze dvou družic *Sentinel 2A* byla vynesena na oběžnou dráhu do výšky 786 km 23. června 2015, druhá družice *Sentinel 2B* o necelé dva roky později 7. března 2017 (Žubrietovský, Švábová, & Šváb, 2017).

Tabulka 3 Spektrální pásma a rozlišení senzoru *MSI Sentinelu 2* (Qiong, Wenjiang, Ximin, & Linyi, 2018)

	Spectral Band	Centre Wavelength (nm)	Band Width (nm)	Spatial Resolution (nm)
B1	Coastal aerosol	443	20	60
B2	Blue (B)	490	65	10
B3	Green (G) ¹	560	35	10
B4	Red (R) ¹	665	30	10
B5	Red-edge 1 (Re1) ¹	705	15	20
B6	Red-edge 2 (Re2) ¹	740	15	20
B7	Red-edge 3 (Re3) ¹	783	20	20
B8	Near infrared (NIR) ¹	842	115	10
B8a	Near infrared narrow (NIRn) ¹	865	20	20
B9	Water vapor	945	20	60
B10	Shortwave infrared/Cirrus	1380	30	60
B11	Shortwave infrared 1 (SWIR1)	1910	90	20
B12	Shortwave infrared 2 (SWIR2)	2190	180	20

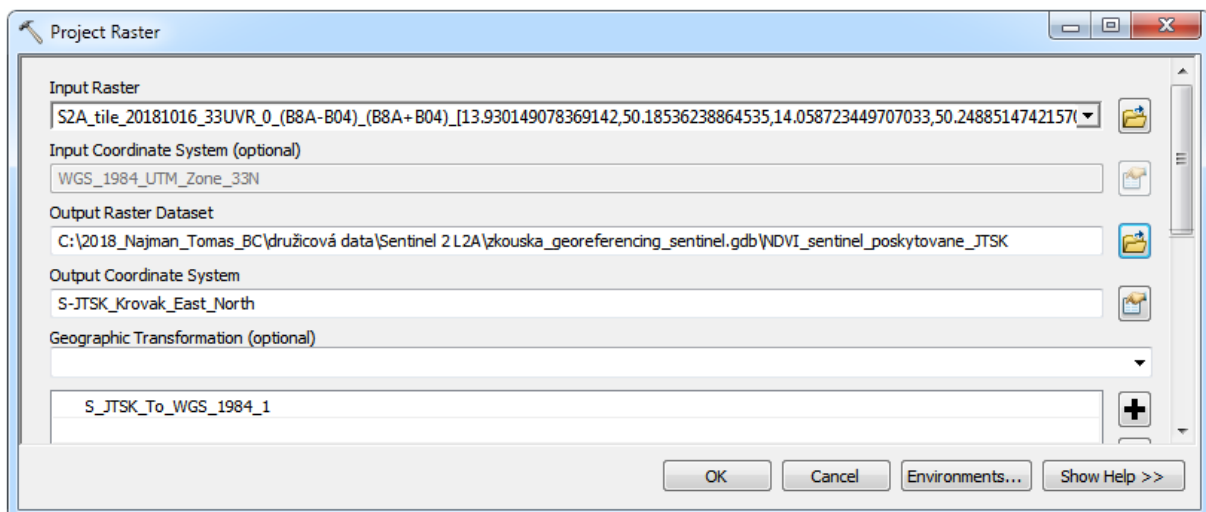
¹ indicates *p*-value < 0.001.



Obrázek 10 Start (vlevo) a vizualizace (vpravo) Sentinelu 2A (Žubrietovský et al., 2017)

Zkratka **L2A**, neboli *Level-2A* značí úroveň zpracování dat, přesněji tyto snímky obsahují atmosférickou korelaci. (Žubrietovský et al., 2017)

Problém nastává u projekčního systému. Veškerá družicová data jsou zobrazována v koordinačním systému *WGS*, konkrétně použitá data ve *WGS_1984_UTM_Zone_33N*. Pro další analýzy bylo zapotřebí zobrazovat data v českém projekčním systému *S-JTSK Křovák*. Převod jednotlivých rastrových vrstev na nový souřadný systém je možný pomocí nástroje *Project Raster*.



Obrázek 11 Dialogové okno *Project Rasteru* pro změnu souřadného systému

5 Příprava zdrojových dat RPAS

V rámci této bakalářské práce proběhla dvě snímkování pomocí RPAS. V prvním náletu, uskutečněném na podzim dne 16. října 2018, byla provedena snímkování multispektrální kamerou *RedEdge-M* na nosiči *Raptor* a RGB snímkování zařízením *Mavic 2 Pro* (pouze na části testovacího území). Pořizování multispektrálních a RGB dat při druhém náletu, uskutečněném na jaře dne 11. dubna 2019, probíhalo již v synchronním režimu pouze na nosiči *Raptor*. Multispektrální data byla opět snímána kamerou *RedEdge-M*. RGB data byla pořizena pomocí kamery *SONY R10C* s objektivem *SEL-16F28*. Pro výpočet vegetačního indexu *NDVI* bylo zapotřebí nejprve zpracovat surová data, tedy jednotlivé snímky v pěti různých spektrálních pásmech, pořizené kamerou *RedEdge-M*. Snímky RGB kamer byly zpracovány identickým způsobem. Jako jeden z nejpoužívanějších softwarů v oblasti stereofotogrametrie byl pro výpočet zvolen **Agisoft Photoscan pro**, využívající metodu **Structure-from-motion** (SfM).

„**Agisoft Photoscan pro** je pokročilé řešení 3D modelování založené na obrazech, které je zaměřeno na vytváření kvalitního 3D obsahu z profesionálního obrazu. Na základě nejnovějších MultiView technologií 3D rekonstrukce pracuje se svévolným obrázkem a je účinný v ovládaných i neřízených podmínkách. Fotografie lze fotografovat z libovolné pozice za předpokladu, že objekt, který má být rekonstruován, je viditelný nejméně na dvou fotografiích. Jak zarovnání obrazu, tak rekonstrukce 3D modelu jsou plně automatizované.“
Převzato z manuálu (Agisoft, 2018).

Structure-from-motion (SfM) je fotogrametrická metoda, která je založená na snímkování objektů tak, aby charakteristické body objektu bylo možné detekovat na několika snímcích současně. Princip této metody je nalezení významných bodů v překryvech jednotlivých snímků na základě lokálních extrémů, které jsou určeny pomocí algoritmu *SIFT – The scale Invariant Feature Transform*. Pokud tyto body software úspěšně nalezne, vypočte automaticky pozici a parametry kamery. Správný výpočet pozice a orientace snímků je podmíněna co největším překryvem a uspokojivou kvalitou. Samotný georeferencing je možné provést až následně pomocí několika vlíčovacích bodů (minimálně 3) (Báčová, 2018).

Žádaným výstupem softwaru *Agisoft* byla ortomozaika řešeného území ve formátu tif, která byla následovně zpracována softwarem *ArcGIS*, přesněji jeho aplikací *ArcMap*.

ArcMap je jednou z aplikací v *ArcGIS Desktop*, která je používána pro úkoly týkající se tvorby map, prostorových analýz nebo editace stávajících dat.

5.1 Zpracování dat pomocí softwaru Agisoft

Postup zpracování dat pro data z *Parrot Sequoia* a *MicaSense RedEdge-M* je identický a je následující:

1. Import snímků (Agisoft, 2018)

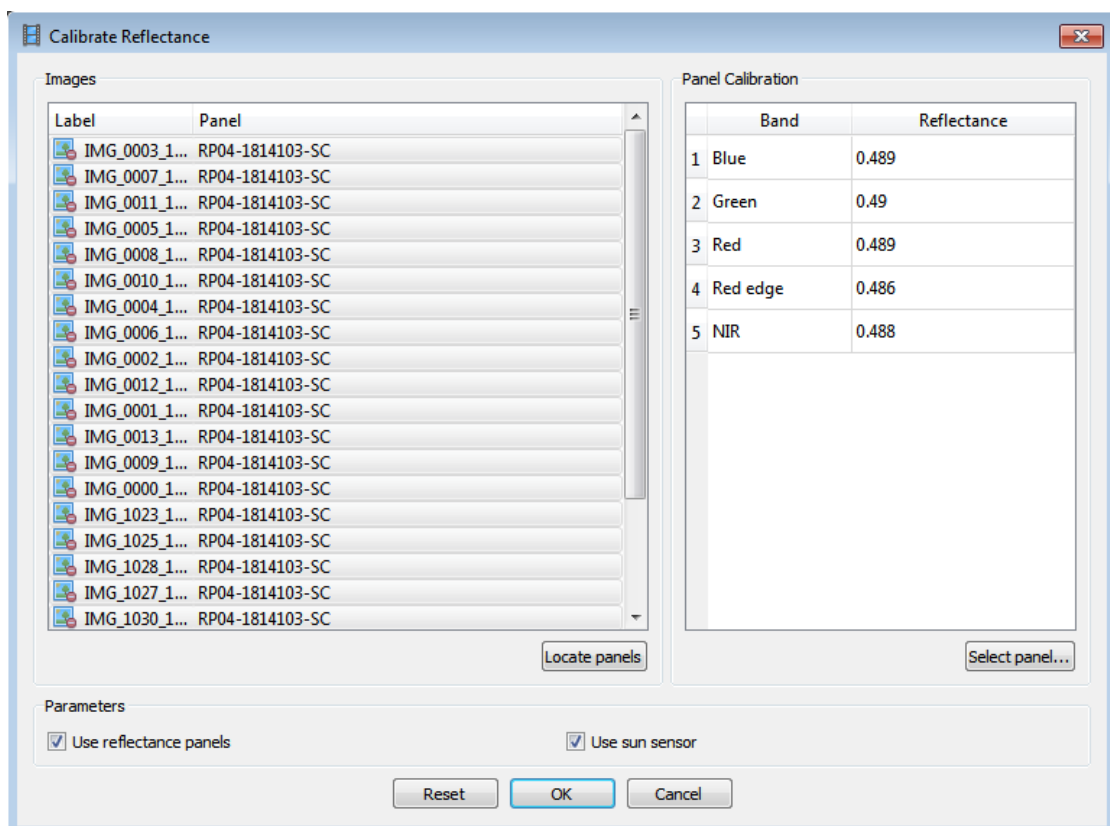
V panelu *Workspace* se nachází možnost *Add Photos*. Je nutné vybrat všechny snímky včetně kalibračních snímků (reflectance calibration images). Pro zachování dat v multispektrální formě je v následujícím dialogu *Add Photos* nutné vybrat možnost *Create Multispectral Cameras*.

2. Kalibrace reflektance (MicaSense, 2017)

Jako další krok je vhodné, pro účel této práce nezbytné, provést kalibraci reflektance snímků.

Po nahrání snímků je ve *Workspace* panelu vytvořena složka *Cameras* obsahující veškeré snímky. Zde je automaticky vytvořena podsložka *Calibration images* obsahující snímky, na kterých se nachází kalibrační panel. Ovšem automatické rozřídění proběhne pouze za předpokladu, že meta-data snímku hlásí, že jsou určena pro kalibraci. V tomto případě na to *Agisoft* upozorní dialogovým oknem: *Calibration images were moved to separate folder*. Pokud takovou informací snímky nedisponují, je třeba kalibrační panely detekovat manuálně.

V panelu *Tools* se nachází možnost *Calibrate Reflectance*. Pro detekci kalibračních panelů je v dialogu *Calibrate Reflectance* možnost *Locate panels*. V pravé části okna jsou parametry kalibračního panelu, respektive hodnoty šedi konkrétního panelu, který byl použit při snímkování. V tomto případě byl využit panel RP04-1814103-SC s hodnotami (VIZ Obrázek 12 Dialogové okno pro kalibraci reflektance snímků Obrázek 12). Pokud panel používáte poprvé a jeho kalibrace nebyla přidána do interní databáze *Fotoscan*, budete vyzváni k načtení kalibrace ze souboru CSV, nebo lze hodnoty upravit ručně.



Obrázek 12 Dialogové okno pro kalibraci reflektance snímků

Následně budou snímky s panelem přesunuty do samostatné složky s tzv. maskami, které zakryjí vše kromě samotného kalibračního panelu (VIZ Obrázek 13). Nejsou-li panely detekovány automaticky a složka *Calibration images* nebyla vytvořena, je nutné vytvořit tuto složku ve *Workspace* ručně se stejným pojmenováním a vložit zde manuálně vybrané snímky s kalibračním panelem. Dále je nezbytné na jednotlivé kalibrační obrazy aplikovat masky, respektive maskovat vše, co nesouvisí s kalibrační destičkou. Pro vložení masky je třeba otevřít jednotlivé snímky a nástrojem *Rectangle selection*, který se nachází na horní liště, vybrat oblast kalibračního panelu. Následně invertovat danou oblast a potvrdit výběr *Add selection*.



Obrázek 13 Správně detekovaný reflektanční panel

Nyní je možné provést samotnou kalibraci. Před spuštěním je třeba zkontrolovat, jestli jsou vybrány pole *Use reflectance panels* (použít odrazové panely) a *Use sun sensor* (použít sluneční čidlo) pro provedení kalibrace na základě metainformací obrazu nebo dat panelu. Tlačítkem OK je zahájena kalibrace.

Po dokončení kalibrace může dojít ke zčernání jednotlivých snímků. Tato skutečnost je pouze vizuálním zobrazením, na hodnoty nemá vliv.

3. Řídké mračno bodů (Agisoft, 2018)

V panelu *Workflow* vybrat možnost *Align Photos* pro tvorbu řídkého mračna bodů. V předprocesovém dialogovém okně je možné nastavit několik základních parametrů (VIZ Obrázek 14). *Accuracy*, neboli přesnost s jakou mají být prvky vnější orientace odhadnuty. *Generic Preselection* odhaduje sousedící páry snímků a zrychluje tím celý proces výpočtu. *Key point limit* znázorňuje maximální množství klíčových bodů snímku. A poslední *Tie point limit* definuje maximální počet spojovacích bodů na snímku.

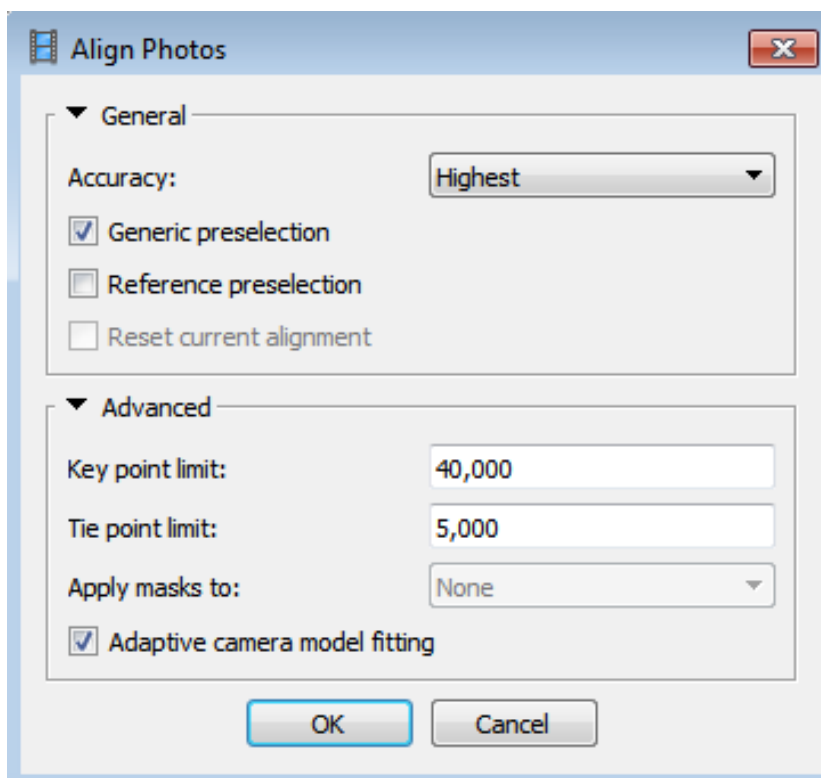
V případě této práce byly zvoleny hodnoty:

Accuracy – *Highest* (nejvyšší přesnost)

Generic Preselection

Key point limit – 40 000

Tie point limit – 5 000



Obrázek 14 Dialogové okno pro tvorbu řídkého mračna bodů

4. Georeferencování (Báčová, 2018)

Pro referenci zpracovaných dat je možné využít předem na plochu aplikované vlíčovací body (VB), které lze následně po vytvoření řídkého mračka bodů automaticky detekovat (záložka *Tools – Markers – Detect Markers*). Použité terče musí být zaměřené. Import souřadnic zjištěných VB je prováděn vložením textového souboru obsahující výčet souřadnic. V případě neúspěšné detekce je nutné VB umístit ručně. K provedení manuálního vložení VB je třeba otevřít snímek, kde se terč nachází, pravým klikem do středu terče otevřít nabídku a zvolit možnost *Create Marker*, poté otevřít jiný snímek, kde se nachází ten samý terč, a opět pravým klikem do středu terče otevřít nabídku, zvolit možnost *Place Marker* a vybrat číslo odpovídajícího bodu. Ve zbytku snímků by se měl editovaný VB doplnit automaticky.

5. Výběr hranic prováděcího procesu

Pro zrychlení procesu lze definovat hranice výpočtu pouze pro zájmovou oblast. V nabídce horní lišty se nachází možnost *Resize region*, kterou je možné definovat oblast. Tu je možné potočit volbou *Rotate region*. Software nadále počítá pouze s ořezaným řídkým mračkem.

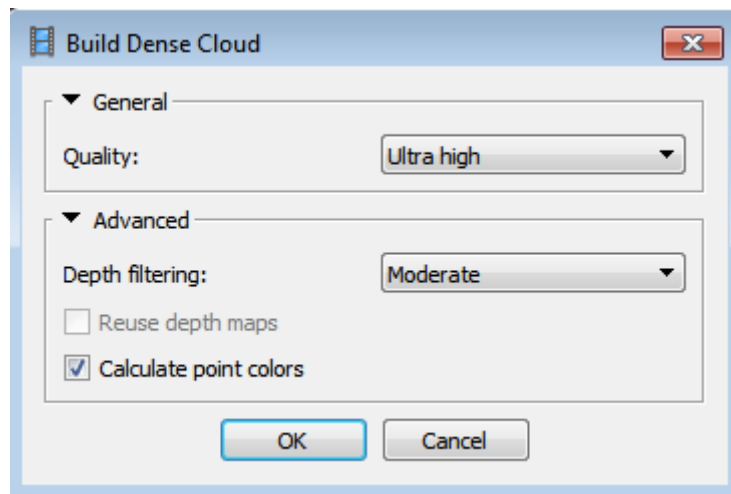
6. Husté mračko bodů (Agisoft, 2018)

Husté mračko bodů je možné vytvořit pomocí funkce *Build Dense Cloud* v panelu *Workflow*. Zde je možné zvolit kvalitu hloubkových map *Quality*. Nejnáročnější na výpočetní výkon je parametr *Ultra High*, který pracuje s plným rozlišením snímku. S každým nižším zvoleným parametrem klesá rozlišení snímku pro zpracování o jednu úroveň. *Depth filtering* filtruje mračko o odlehlé body. *Mild* je využíván pro členité objekty, *Aggressive* pro hladké objekty a *Moderate* je jejich kompromisem.

Pro účel této práce byly použity parametry:

*Quality – **Ultra High***

*Depth filtering – **Moderate***



Obrázek 15 Dialogové okno pro vytvoření hustého mračna bodů

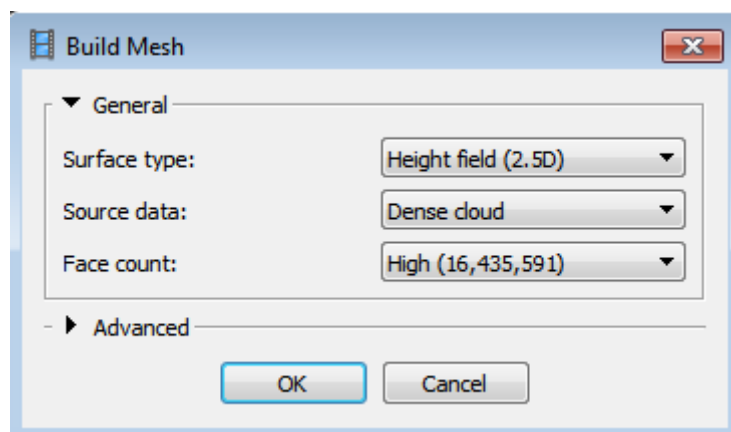
7. Polygonová síť (Agisoft, 2018)

Polygonovou síť je možné vytvořit pomocí funkce *Build Mesh* v panelu *Workflow*. Dle typu rekonstruovaného povrchu (*Surface type*) je zde možnost nastavit *Arbitrary* (pro uzavřené objekty), nebo *Height field* (pro letecké snímky).

Pro zpracování dat této práce byly nastaveny parametry:

*Surface type – **Height field***

Ostatní ponecháno defaultně nastavené.

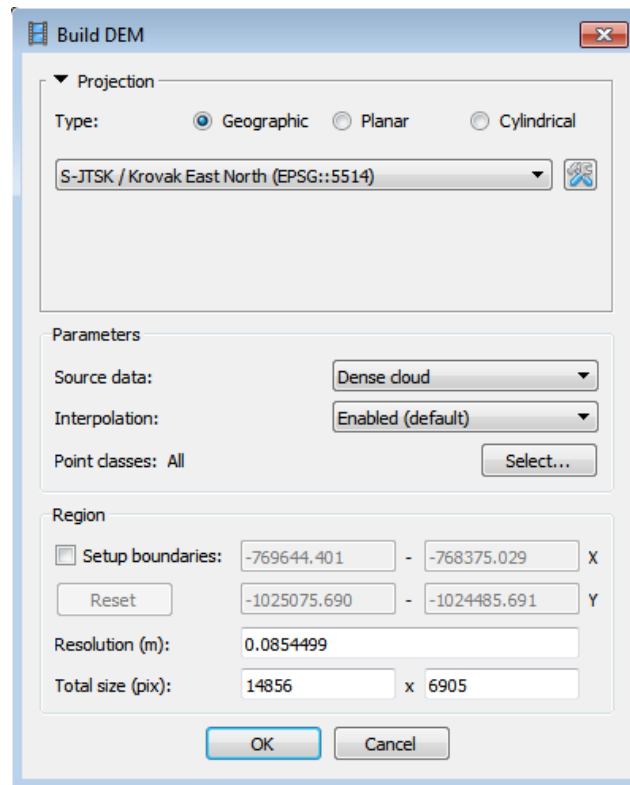


Obrázek 16 Dialogové okno pro vytvoření polygonové sítě

8. Digitální model terénu (Báčová, 2018)

Digitální model je možné vytvořit pomocí funkce *Build DEM* v panelu *Workflow*. Nejprve je třeba vybrat souřadný systém, ve kterém bylo mračno referencováno. Dalším krokem je nastavení parametrů zdrojových dat (*Source data*) a interpolace (*Interpolation*).

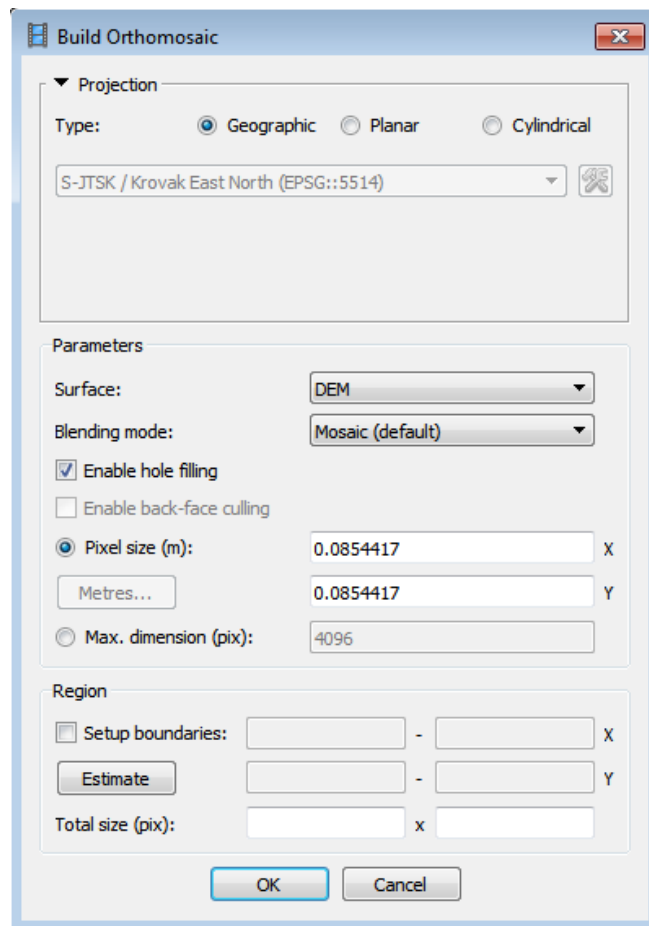
V tomto případě bylo ponecháno defaultní nastavení.



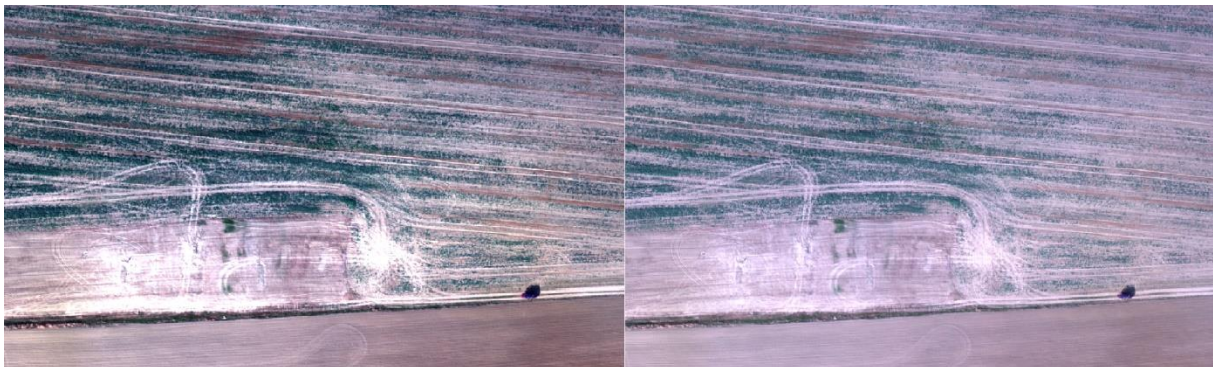
Obrázek 17 Dialogové okno pro vytvoření digitálního modelu terénu

9. Ortofoto (Agisoft, 2018)

Pro vytvoření ortofota je nutné mít již vygenerovaný digitální model terénu (*DEM*), nebo polygonovou síť (*Mesh*). Následně opět v panelu *Workflow* zvolit možnost *Build Orthomosaic*. Nyní je třeba vybrat data, na základě kterých bude provedeno vytvoření. Pro *RPAS* data je doporučeno využít *DEM*.



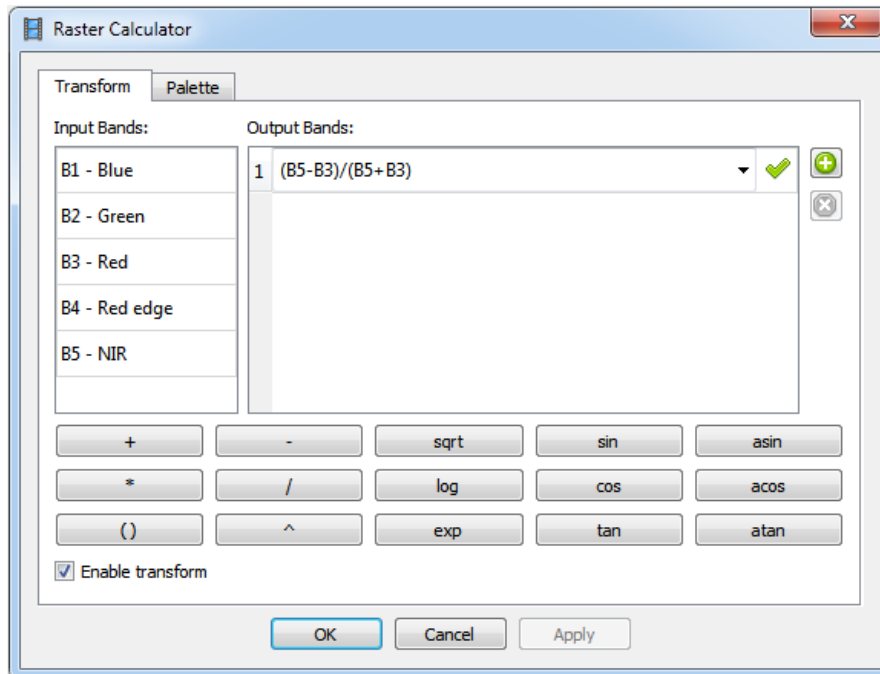
Obrázek 18 Dialogové okno pro vytvoření ortofota



Obrázek 19 Rozdíl výsledného ortofota dle zdrojových dat (vlevo dle DEM, vpravo dle Mesh)

10. Výpočet NDVI

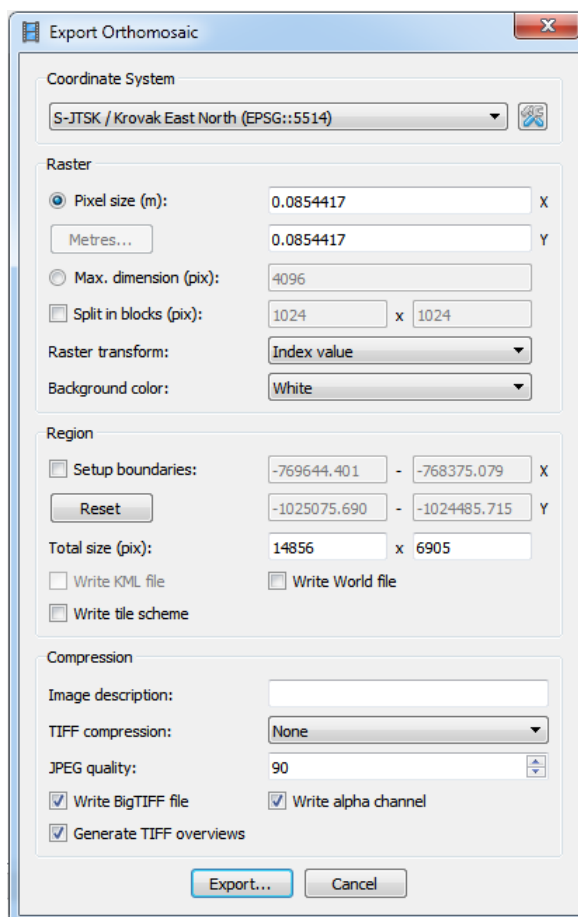
Pro základní výpočet vegetačního indexu je možné využít přímo *Agisoft*. V záložce *Tools* zvolíme možnost *Set Raster Transform*. Následně v otevřeném dialogovém okně *Raster Calculator* můžeme nadefinovat příslušnou rovnici, v tomto případě rovnici *NDVI*.



Obrázek 20 Výpočet vegetačního indexu NDVI v Raster Calculator

Vypočtený vegetační index je vizualizován na ortomozaice. Symbologie hodnot je možné nastavit před spuštěním výpočtu v dialogovém okně *Raster Calculator* v záložce *Palette*.

V případě potřeby exportu pravým klikem na ortomozaiku ve *Workspace*, *Export Orthomosaic*, *Export JPEG/TIFF/PNG*. V otevřeném dialogovém okně *Export Orthomosaic* je nutné nastavit *Raster transform* na **Index value** pro zachování číselných hodnot jednotlivých pixelů. Další nastavení je obdobné, jako při klasickém exportu ortomozaiky, tedy volba koordinačního systému, *TIFF* komprese apod.



Obrázek 21 Dialogové okno exportu ortomozaiky s vypočteným NDVI

5.2 Zpracování dat pomocí softwaru ArcMap

Pro získání požadovaných výstupů z aplikace GIS je nutné disponovat daty zpracovanými softwarem *Agisoft* (VIZ předchozí kapitola 5.1). Respektive jedná se o ortomozaiky ve formátu tif, které obsahují jednotlivá spektrální pásma.

1. Import ortomozaiky

V levé boční záložce Catalog lze vyhledávat příslušná data, následně vložit do projektu, případně i do domovské geodatabáze.

2. Georeferencování

Pokud nemají data určený souřadný systém, respektive pokud neproběhlo referencování v předchozím zpracování v softwaru *Agisoft*, je vhodné datový podklad zgeoreferencovat nyní. Pro samotný výpočet jednotlivých ploch není tento krok nutný, ovšem pro porovnání dat zjištěných na různých zdrojích je georeferencing nezbytný.

V panelu *Customize*, záložce *Toolbars*, je možnost *Georeferencing*. V tomto nástroji je nejprve nutné vybrat data, na kterých chceme provádět referencování. V nástroji *Georeferencing* se zvolením možnosti *Viewer* otevře okno zobrazující zvolený datový podklad určený k referencování. Volbou *Add control points* můžeme vložit body do vizuálně zjištěných vlíčovacích bodů.

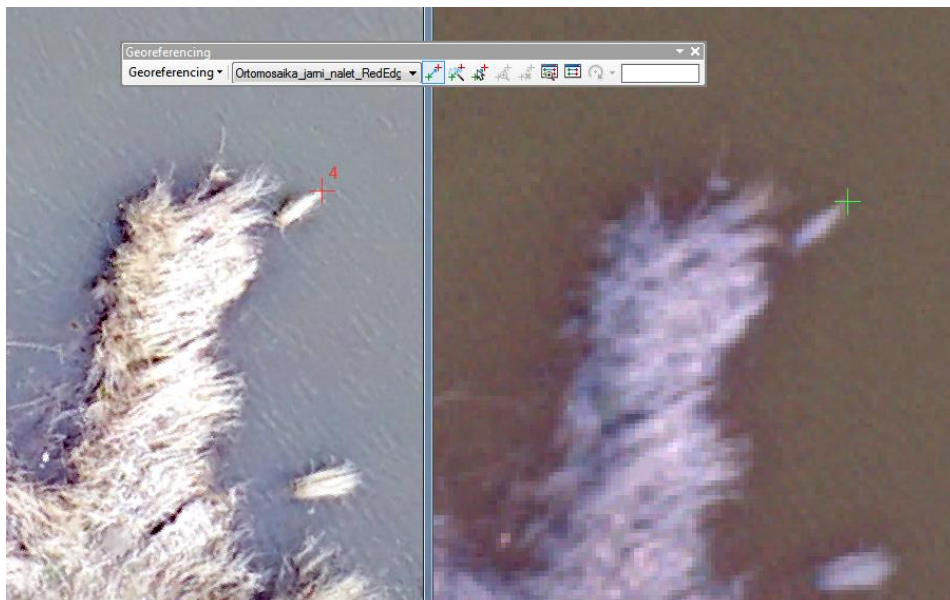
Volbou *View link table* otevřeme tabulku pro vložení souřadnic. Hodnoty souřadnic lze ručně editovat, nebo vložit jako textový soubor. Ovšem v druhém případě je nezbytné zkontrolovat souhlasné označení bodů v ortomozaice a v textovém souboru.

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/> 1	14.018392	50.217215	-769318.187000	-1024713.996...	-0.0517426	0.0184923	0.0549478
<input checked="" type="checkbox"/> 2	14.017774	50.217126	-769366.042000	-1024716.927...	0.0786522	0.00629344	0.0789036
<input checked="" type="checkbox"/> 3	14.017749	50.217251	-769365.862000	-1024701.237...	-0.0516309	0.000759109	0.0516365
<input checked="" type="checkbox"/> 4	14.018096	50.217294	-769338.991000	-1024700.513...	-0.00181737	-0.0567276	0.0567567
<input checked="" type="checkbox"/> 5	14.018372	50.217332	-769317.598000	-1024699.356...	-0.00859266	0.0116242	0.0144553
<input checked="" type="checkbox"/> 6	14.018351	50.217449	-769317.060000	-1024684.689...	0.0586823	0.0187701	0.0616111
<input checked="" type="checkbox"/> 7	14.018089	50.217418	-769337.340000	-1024685.148...	0.00415676	-0.030549	0.0308305
<input checked="" type="checkbox"/> 8	14.017730	50.217382	-769364.972000	-1024684.851...	-0.0277077	0.0313374	0.04183

Auto Adjust Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)
 Degrees Minutes Seconds Forward Residual Unit : Unknown

Obrázek 22 Tabulka vložených souřadnic

Další variantou je ruční referencování na zgeoreferencovaná data. Možností *Viewer*, opět v nástroji *Georeferencing*, je otevřeno okno zobrazující zvolený datový podklad určený k referencování. Volbou *Add control points* můžeme označit libovolný bod v nezgeoreferencované ortomozaice a následně stejný bod zvolit v již zgeoreferencovaném datovém podkladu. Software tyto dva body překryje. Takto opakujeme pro více bodů. Je vhodné volit okrajové body pro zabránění nežádoucí deformace, spojené se vzniklou chybou při ručním vkládání.

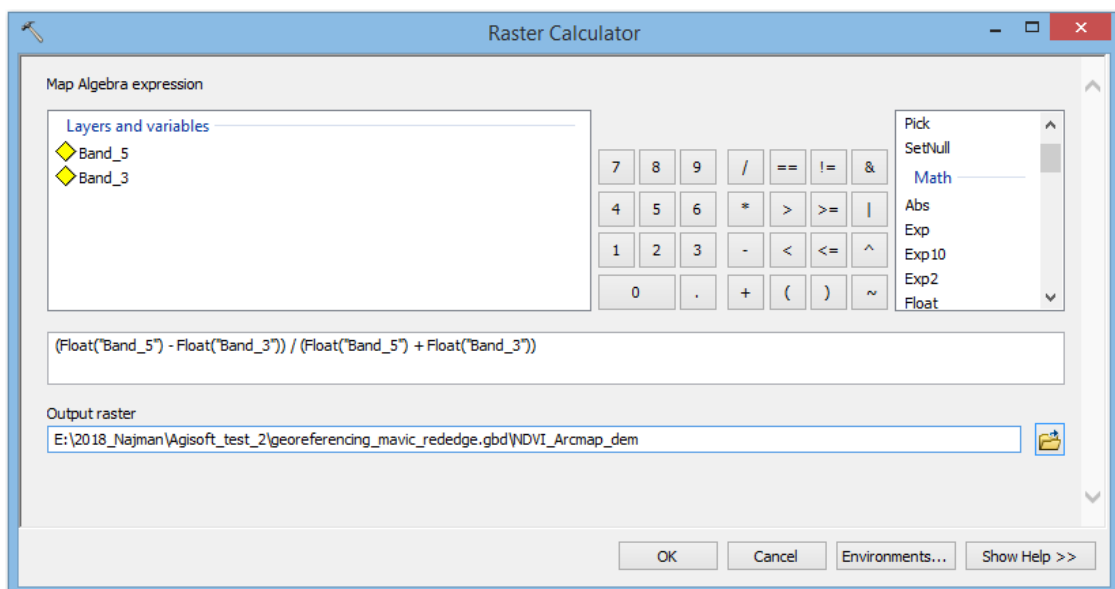


Obrázek 23 Ruční georeferencování (oblast překryvu, Řisutský rybník)

V případě této práce byla pro podzimní nálet nejprve georeferencována data z *DJI Mavic 2 pro*, pro která byly známy vlíčovací body se zaměřenými souřadnicemi. Pro jarní nálet byla nejprve obdobným způsobem referencována RGB mosaika z kamery *SONY*. Následně bylo možné georeferencovat ortomozaiky z *RedEdge-M*, pro které nebyly zaměřeny vlíčovací body, na již zgeoreferencované data *Mavicu* (podzimní nálet) a *SONY* (jarní nálet).

3. Výpočet NDVI

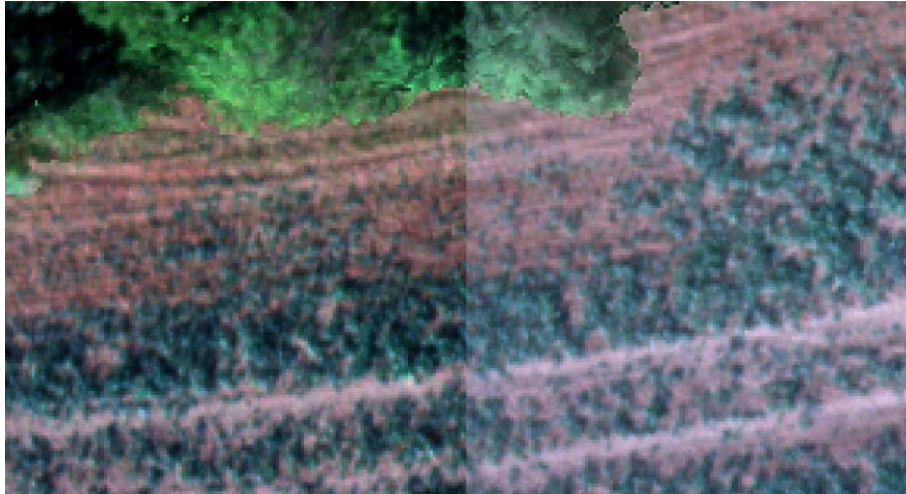
Před samotným výpočtem je vhodné pro snazší práci vložit do projektu samostatná potřebná spektrální pásma, tedy červené *Red* a blízké infračervené *NIR*. V tomto případě jsou označena jako *Band_3 – Red* a *Band_5 – NIR* (dle klasického řazení: Blue, green, red, red edge, near-IR). Následně v levém bočním panelu pomocí *Search* vyhledáme nástroj *Raster Calculator*, za jehož pomoci proběhne výpočet. Do definovaného vzorce (Viz kapitola 3.1.1) je třeba dosadit jednotlivá spektrální pásma.



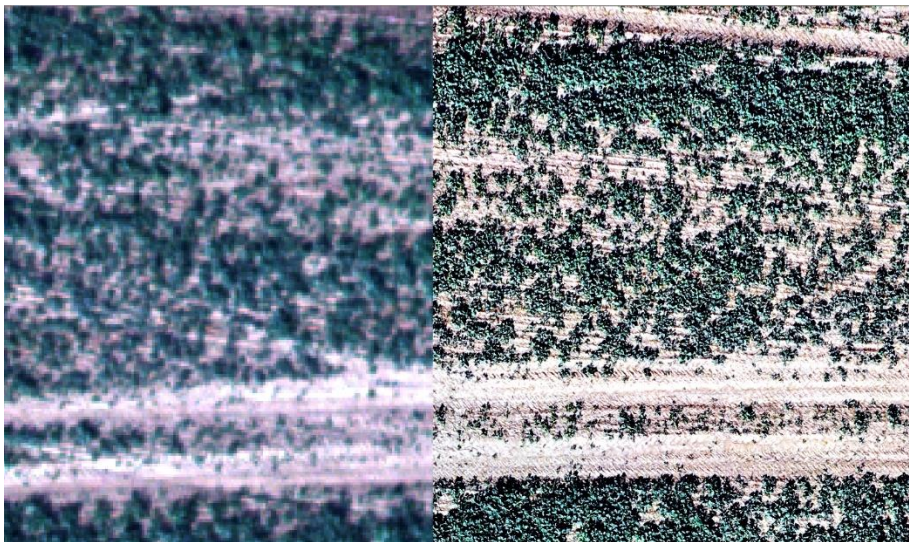
Obrázek 24 Výpočet vegetačního indexu pomocí Raster Calculatoru (zdrojová data: dem)

5.3 Výběr nejvhodnějších zdrojových dat

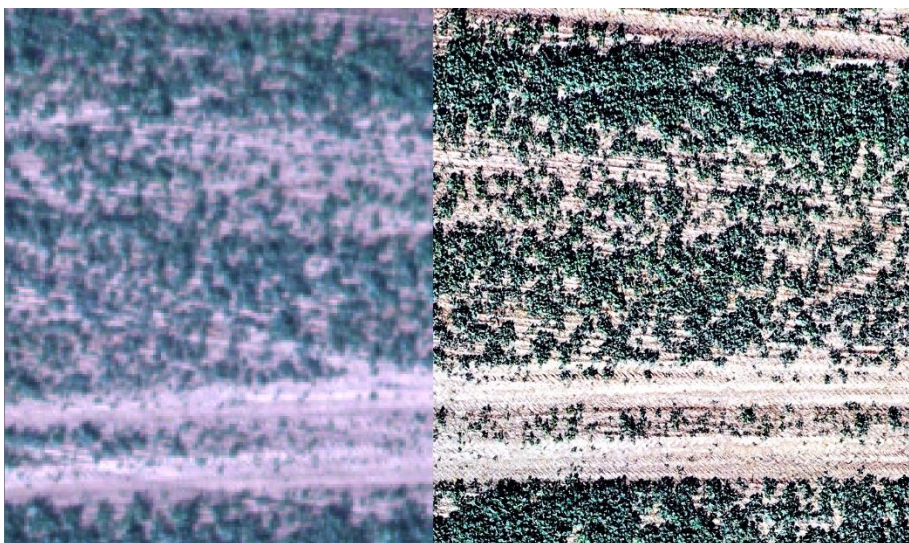
Po vizuální kontrole výstupů, dle různých zdrojových dat nad ortomozaikou z *Mavicu* a *SONY*, které disponují výrazně vyšším rozlišením, byly jako vhodnější a reprezentativnější výstup zvoleny ortomozaiky vypočítané na základě digitálního modelu (dem).



Obrázek 25 Rozdíl ortomozaik vytvořených dle různých zdrojových dat (vlevo dle dem, vpravo dle mesh)



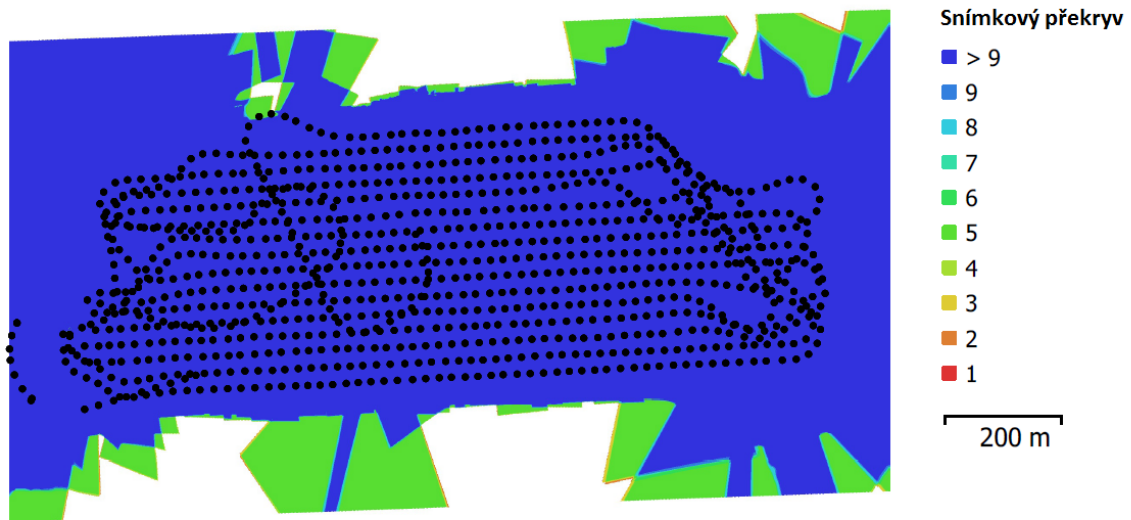
Obrázek 26 Srovnání ortomozaiky z RedEdge vůči ortomozaice z Mavic (vlevo ortomozaika dle dem, vpravo Mavic)



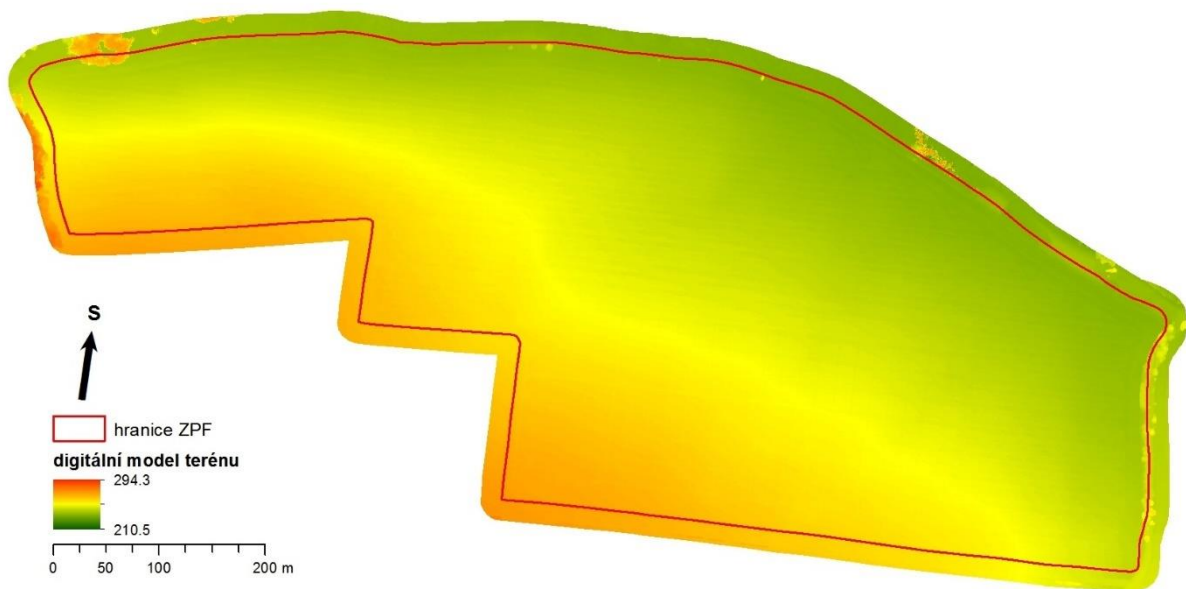
Obrázek 27 Srovnání ortomozaiky z RedEdge vůči ortomozaice z Mavic (vlevo ortomozaika dle mesh, vpravo Mavic)

5.4 Podzimní nálet – RedEdge-M, Mavic 2 Pro

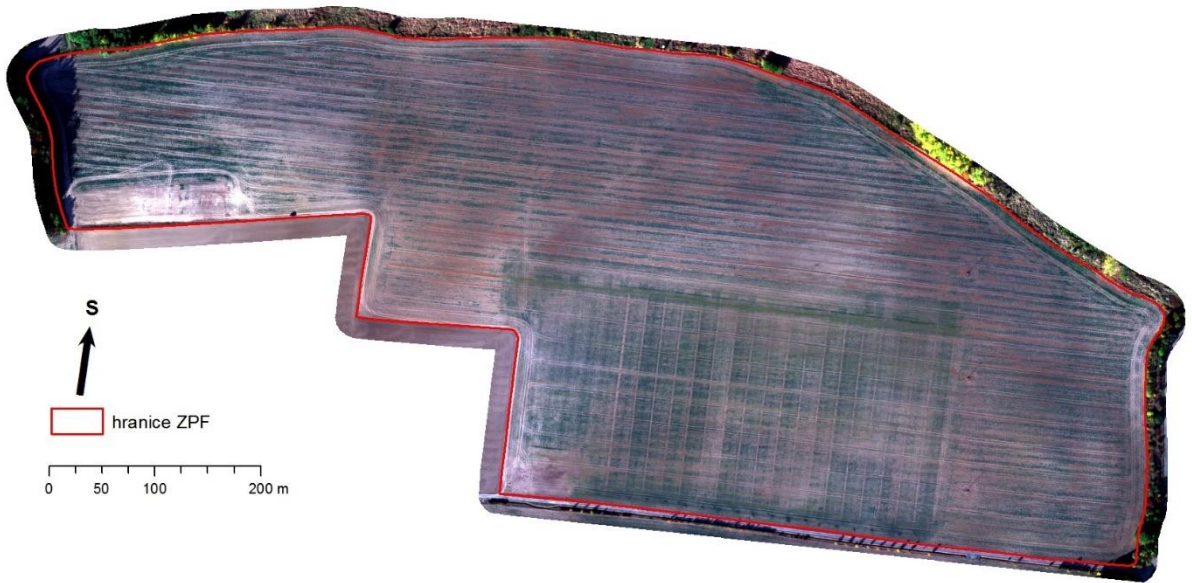
V případě podzimního náletu proběhlo snímkování kamery *RedEdge-M* v průměrné letové výšce 128 metrů s perfektním překryvem (VIZ obrázek 28). Pixelové rozlišení (GSD) v závislosti na letové výšce činí 8,54 cm/pixel. Letová výška zařízení *Mavic 2 Pro* při tomto konkrétním snímkování byla v průměru 53 metrů s GSD 1,24 cm/pixel.



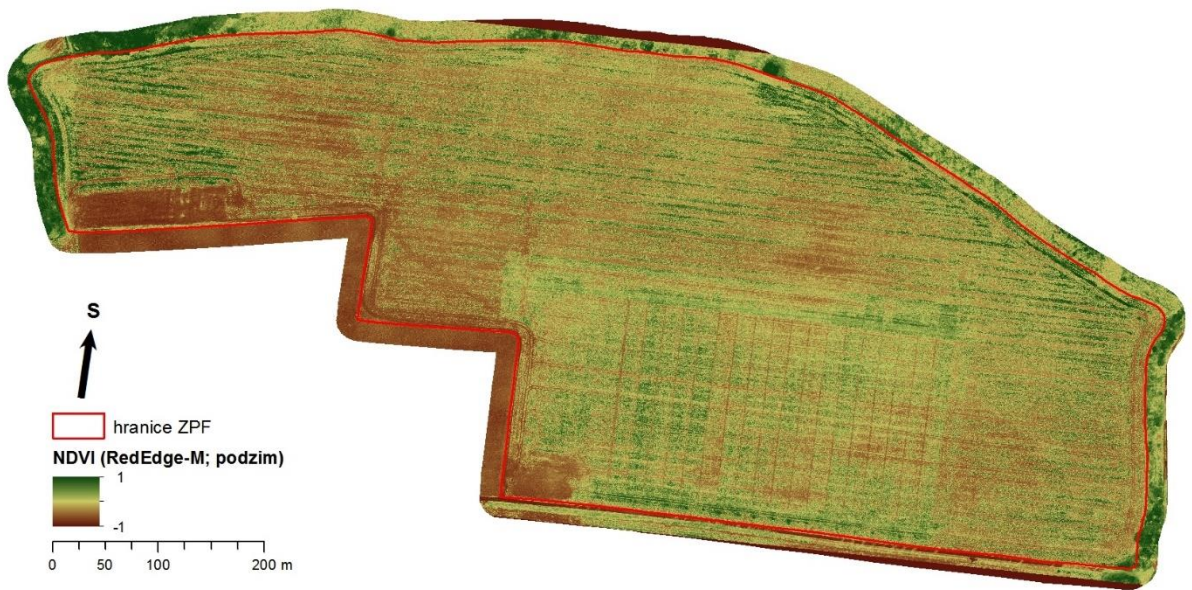
Obrázek 28 Lokace kamery RedEdge-M a snímkové překrytí (podzimní nálet)



Obrázek 29 Digitální model terénu



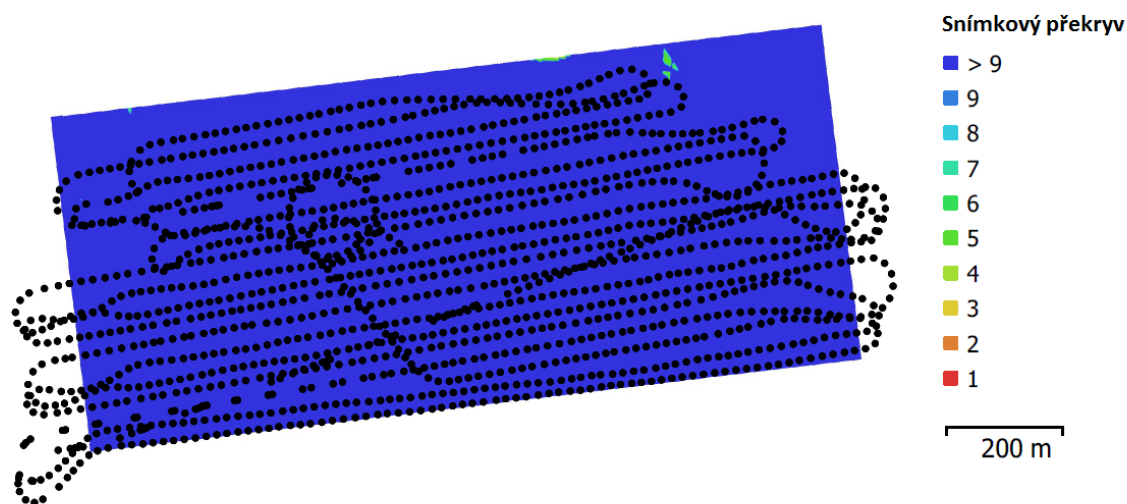
Obrázek 30 Zpracovaná data kamery RedEdge-M (podzimní nálet)



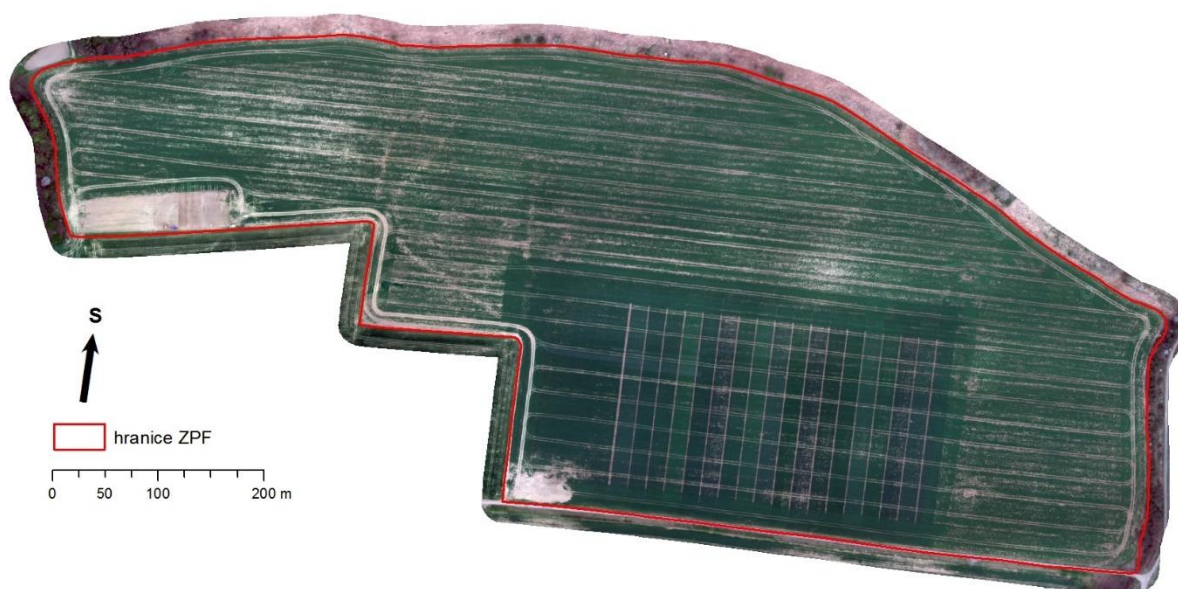
Obrázek 31 Vypočítané NDVI z dat kamery RedEdge-M (podzimní nálet)

5.5 Jarní nálet – RedEdge M, SONY R10C

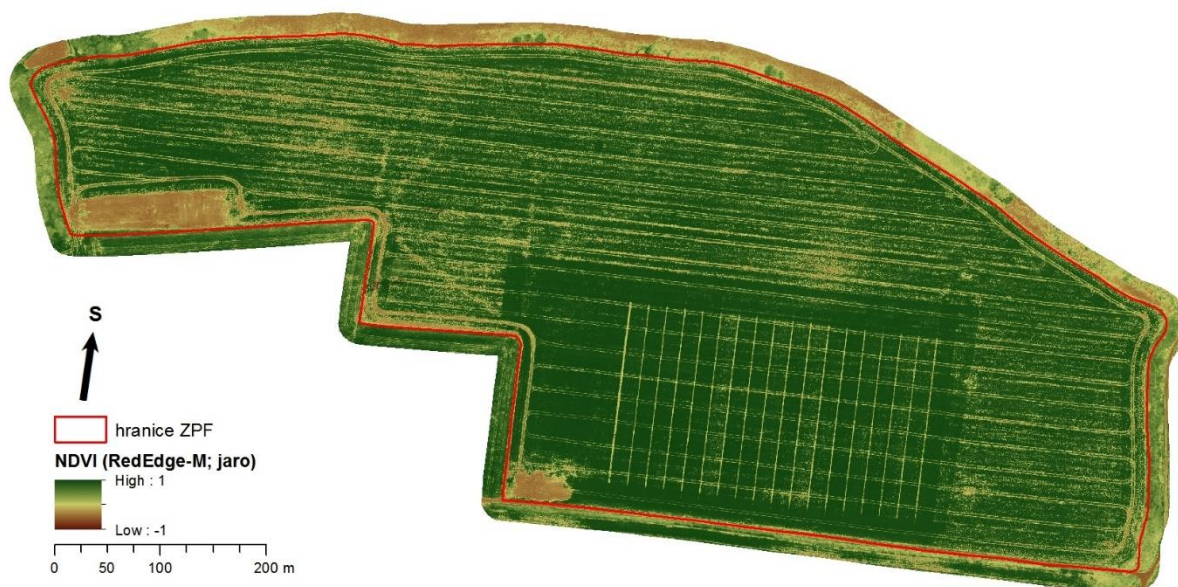
V období jarního náletu jsou překryvy snímkování opětovně vyšší než 9. Nálet byl proveden se synchronním snímáním kamery *RedEdge-M* a *SONY R10C*, tedy i ve stejné letové výšce 148 metrů. Velikost pixelu (GSD) kamery *RedEdge-M* činí 9,56 cm/pixel a kamery *SONY R10C* 6,14 cm/pixel.



Obrázek 32 Lokace kamery RedEdge-M a snímkové překrytí (jarní nálet)



Obrázek 33 Zpracovaná data kamery RedEdge-M (jarní nálet)



Obrázek 34 Vypočítané NDVI z dat kamery RedEdge-M (jarní nálet)

6 Příprava družicových dat

Pro účely analýzy byla získána data pomocí webové aplikace *Land Viewer*, na které bohužel nejsou data volně ke stažení. Data byla stažena přes univerzitní licenci ČVUT. Volný přístup k datům pro běžného uživatele umožňuje program *Copernicus* po jednoduché registraci.

6.1 Podzimní nálet – družicová data

Pro zvolený filtr (16.10.2018, Řisuty) byla jako nejvhodnější data vybrány snímky pořízené 16. října 2018, tedy ve stejný den kdy probíhalo snímkování pomocí *RPAS*, družicí *Sentinel 2* s úrovní zpracování *L2A*. Řešená oblast nebyla zasažena oblačností, slunce dopadalo na zemský povrch ve sklonu $30,61^\circ$. Družice nabízí nepřeberné množství vrstev, hovořící o zemském povrchu. Pro záměr této práce byly staženy vrstvy **B04** (spektrální pásmo *RED* s pixelovým rozlišením 10×10 metrů), **B08** (spektrální pásmo *NIR* s pixelovým rozlišením 10×10 metrů) a **(B8A-B04)/(B8A+B04)** (hotové poskytované *NDVI* s pixelovým rozlišením 20×20 metrů). *B8A*, které je využíváno pro výpočet poskytovaných dat *NDVI*, je vrstva s užším spektrálním pásmem *NIR* (tzv. *NIR narrow*) s pixelový rozlišením 20×20 metrů (VIZ kapitola 6.3).

6.2 Jarní nálet – družicová data

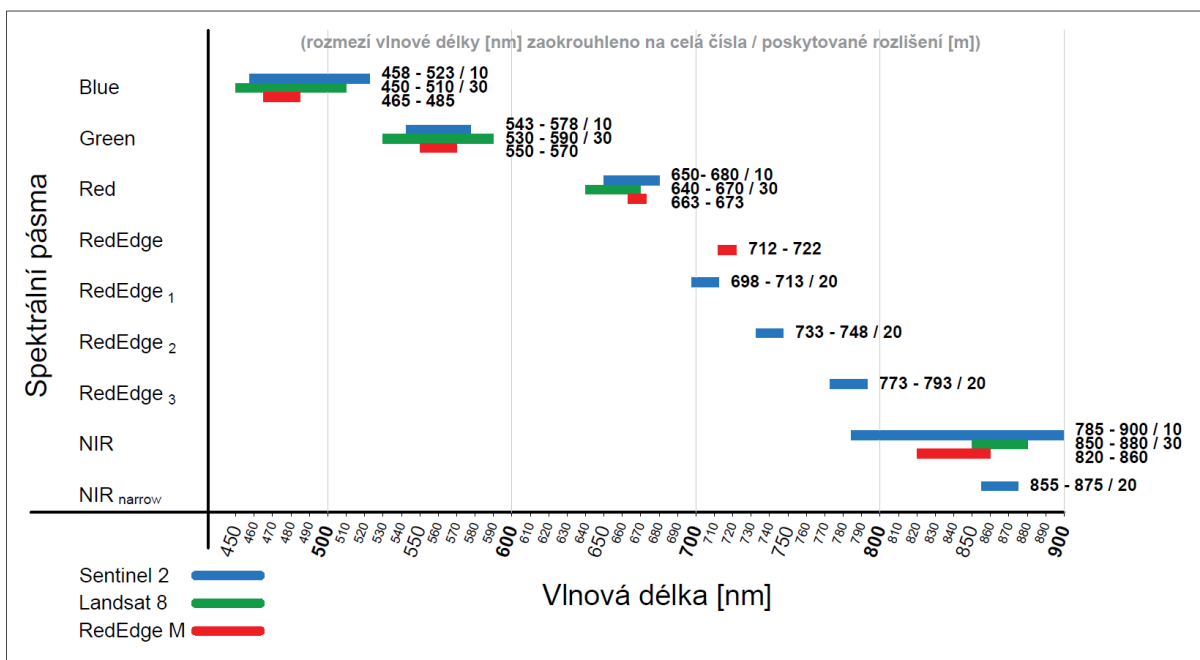
Při jarním náletu, uskutečněném dne 11. dubna 2019, byla bohužel nad testovacím územím souvislá neprostupná oblačnost, tedy družicová data pro tento den nejsou použitelná. Termínově nejbližší použitelné družicové snímky *Sentinel 2* byly k dispozici ze dne 19. dubna 2019, kdy bylo jasno. V tomto časovém rozmezí snímkování nebyl zaznamenán žádný srážkový úhrn, tedy je předpokládáno, že neproběhly žádné prostorové změny vegetace, a proto je možné použít družicové snímky pořízené o 8 dní později.

6.3 Porovnání vlnových délek pásem poskytovaných Sentinelem 2 a RedEdge M

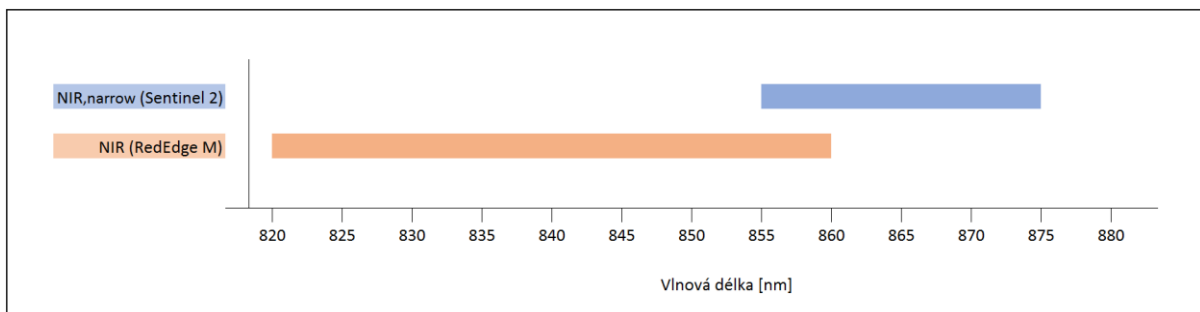
Jak už bylo zmíněno, poskytovaná vrstva *NDVI* družice *Sentinel 2* využívá pro výpočet pásmo *B8a (NIR narrow)* v rozlišení 20x20 metrů, které je výrazně užší oproti klasickému pásmu *NIR* v rozlišení 10x10 metrů. Rozdíl v rozlišení je dán právě díky šířce spektrálního pásma. Pro užší pásmo je signál výrazně slabší, tedy rozlišení bude nižší. Zatímco u širokých pásem bude signál silnější, snímač detekuje širší spektrum jako jedno pásmo, a tedy je možné vyšší rozlišení. Klasické *NIR* má rozsah vlnové délky 784,5 – 899,5 nm (centrum vlnové délky: 842 nm), užší *NIR narrow* pouze 855 – 875 nm (centrum vlnové délky: 865 nm) (Qiong et al., 2018).

V případě multispektrální kamery *RedEdge-M* je rozsah spektrálních pásem rozdílný. Pásmo *NIR* má sice téměř identické centrum vlnové délky (840 nm), ale rozsah je výrazně nižší (820 – 860 nm)

Z toho vyplývá, že hotové *NDVI*, které poskytuje *Sentinel 2*, kalkuluje s pásmem *NIR*, které je celé osově posunuté do vyšších hodnot vlnových délek.



Graf 1 Porovnání šířky spektrálních pásem Sentinelu 2, Landsat 8 a kamery RedEdge-M



Graf 2 Porovnání šířky pásem NIR snímaných kamerou RedEdge-M a Sentinelem 2

7 Analýza zpracovaných dat

7.1 Testovací pole

Jako testovací pole bylo bráno celé území ZPF, na kterém byl zvolen rastr s velikostí pixelu 10x10 metrů, který odpovídá velikosti pixelu rozlišení poskytovaných družicových dat. Dále byl zpracováván nejvíce reprezentativní výsek 150x150 metrů pro analýzu variability (VIZ kapitola 8.1).

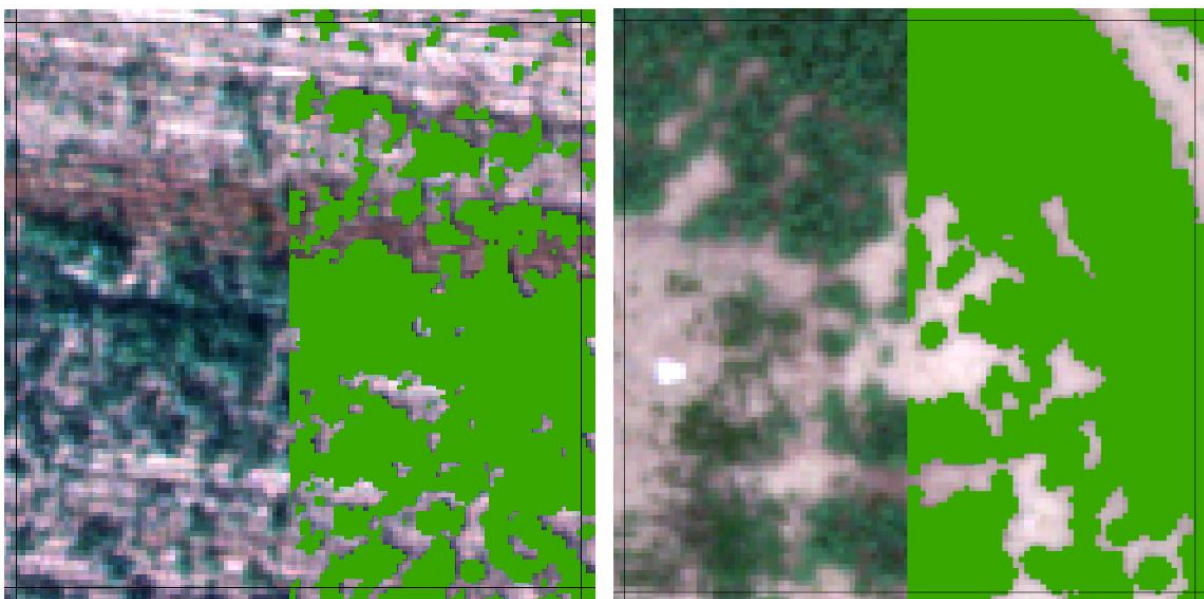
7.1.1 Tvorba pole

Testovací pole lze vytvořit pomocí nástroje *Create Fishnet*. Dle zvoleného rastru družicových dat bylo testovací pole referencováno na jednotlivé pixely. Vzniklé chyby dosahovaly maximálního posunu 5 cm. Tento fakt byl eliminován, pomocí nástroje *Resample*, převzorkováním všech vrstev se snappingem na vzniklou polygonovou síť (VIZ kapitola 7.3).

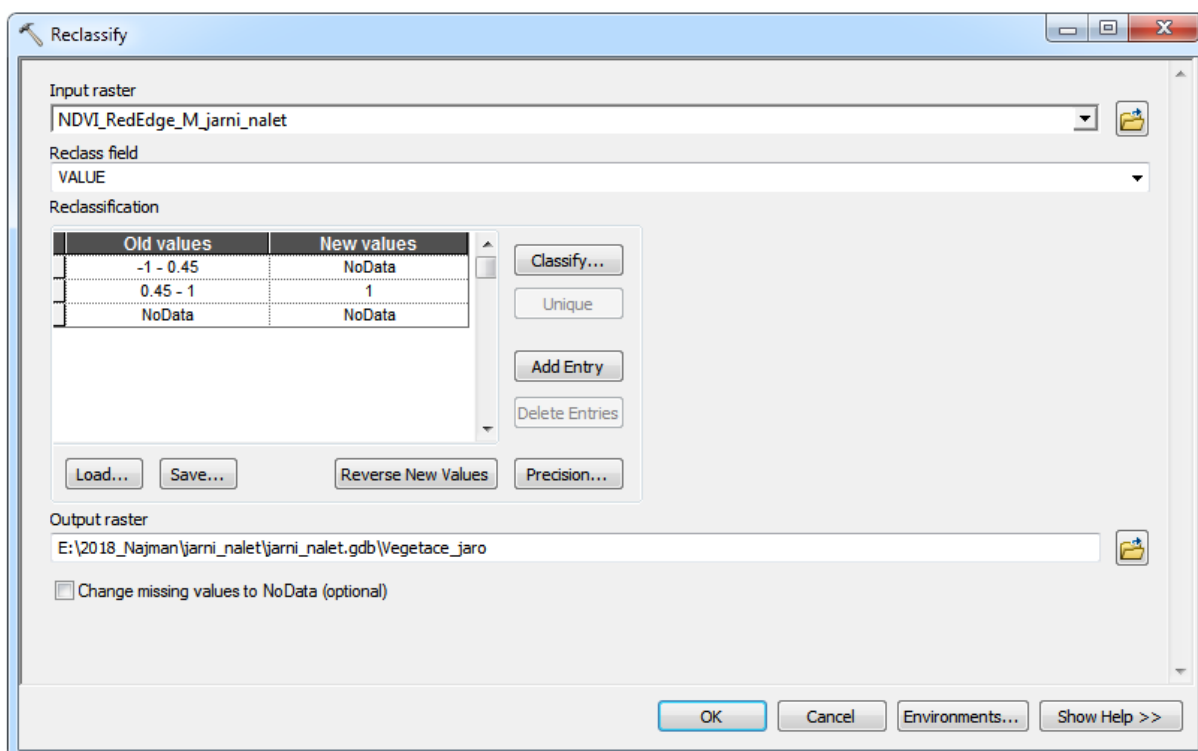
7.2 Plošné zastoupení

(Místecký, 2015) uvádí ve své bakalářské práci, že pro pixely reprezentující zeleň, nabývají hodnoty *NDVI* již od 0,2. Ovšem hodnoty indexu jsou během roku značně nestálé. Zejména se mění v průběhu vegetačního období.

V této práci byla dle vizuálního porovnání vypočteného vegetačního indexu *NDVI* s RGB daty vysokého rozlišení jako nejnižší hraniční hodnota *NDVI*, pro kterou je možné považovat pixel jako listová plocha, stanovena na 0,45 [-] pro podzimní nálet a hodnota 0,55 [-] pro nálet jarní. Na základě toho bylo možné reklasifikovat rastr *NDVI* pouze na samostatnou vrstvu *vegetace*, kde pixelové hodnoty pro plochu vegetace jsou rovny 1 a pro ostatní plochy jsou vedeny jako *NoData*. Toto je možné provést pomocí nástroje *Reclassify* (VIZ Obrázek 36). Následně je možné pomocí zonální statistiky spočítat plošné zastoupení vegetace v jednotlivých pixelech/čtvercích polygonové sítě.



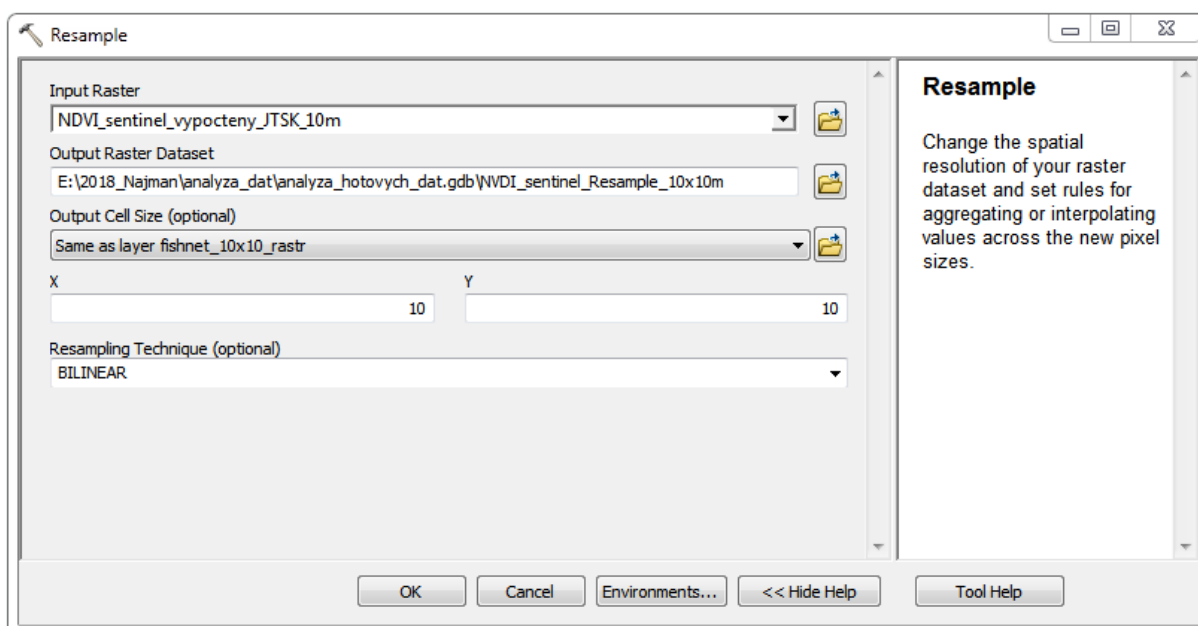
Obrázek 35 Plošné zastoupení vegetace v závislosti na hodnotě *NDVI* (vlevo podzim 0,45 / vpravo jaro 0,55)



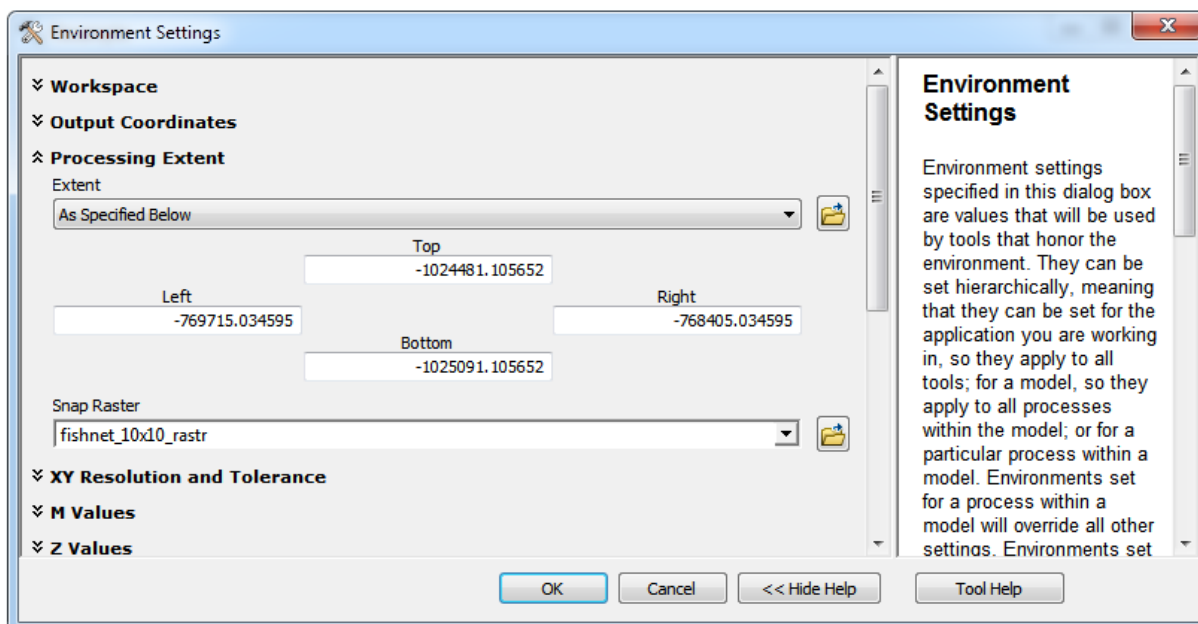
Obrázek 36 Dialogové okno reklasifikace rastrových dat

7.3 Převzorkování se snappingem

Pro lepší provádění a reprezentativnější výsledky analýz je dobré převzorkovat rastrová data, aby spolu kolidovala s přesným překryvem. Samotné převzorkování rastrových dat je možné pomocí nástroje *Resample*, kde zvolíme velikost pixelu pro vrstvu, kterou chceme převzorkovat, a techniku převzorkování, neboli *Resampling Technique*. V možnosti *Environments* je nutné nastavit tzv. *Snap Raster* v záložce *Processing Extent* na vrstvu, na kterou klademe požadavek přesného překrytí s převzorkovanými daty.



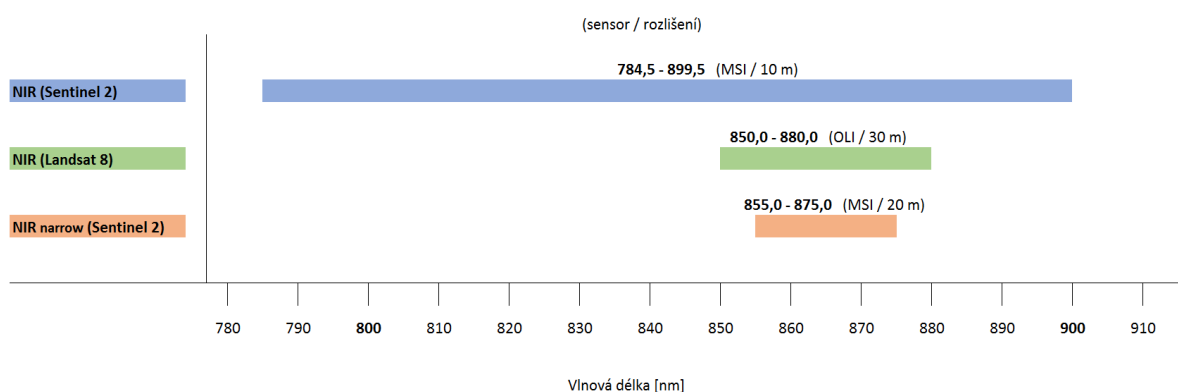
Obrázek 37 Dialogové okno pro převzorkování rastrových dat



Obrázek 38 Dialogové okno pro převzorkování dat - nastavení snappingu na specifickou vrstvu

7.4 Porovnání poskytovaných a vypočtených hodnot NDVI družice Sentinel 2

V případě poskytovaného NDVI (družicová data Sentinel 2) je využíváno užšího pásma NIR, tzv. NIR narrow. Důvodem je možnost vhodně a lépe srovnávat data s jinými misemi. Tato skutečnost je zřejmá i z porovnání šířky pásem NIR družicí Sentinel 2, která využívá senzor MSI, a Landsat 8, využívající senzor OLI. (Zhang et al., 2018)



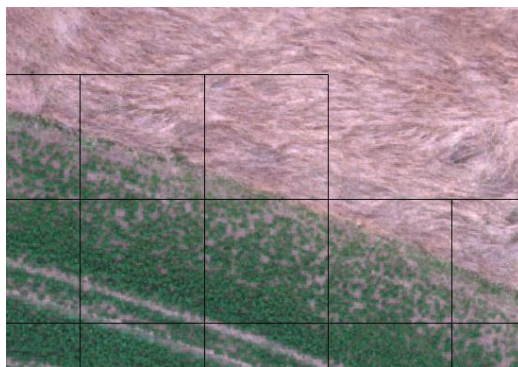
Graf 3 Porovnání šířky pásem NIR snímané družicemi Sentinel 2 a Landsat 8

Co se týká pixelového rozlišení, to je dáno citlivostí sensoru pro šířku pásma (VIZ kapitola 6.3).

Pro demonstraci rozdílu mezi poskytovaným a vypočteným *NDVI* bylo zapotřebí sjednotit pixelovou distribuci jednotlivých vrstev, opět využitím nástroje *Resample*. V prvním kroku bylo vytvořeno *NDVI* výpočtem využívajícím pásma *B04 – Red* a klasickým *B08 – NIR* poskytovaných vrstev *Sentinel 2*. Jelikož jsou tato data k dispozici v rozlišení 10x10 metrů, bylo tedy nutné vzniklé *NDVI* převzorkovat na potřebnou velikost pixelu 20x20 metrů. Dalším krokem byl výpočet *NDVI* z poskytnuté vrstvy *B8A – NIR narrow*, která je využívána ve výpočtu poskytovaného *NDVI*. Pro tuto část bylo nezbytné převzorkovat pásmo *B04 – Red*, které je distribuováno v rozlišení 10x10 metrů. Výsledkem k porovnání jsou tři vrstvy vegetačního indexu *NDVI* v rozlišení 20x20 metrů (poskytované *NDVI*, vypočítané *NDVI* pro výpočet využívající klasické *NIR* a vypočítané *NDVI* pro výpočet využívající *NIR narrow*).

Po prvním vizuálním zkoumání podzimních dat je vypočtená hodnota *NDVI* s využitím různých pásem *NIR* až na výjimky téměř identická. V nejčtetnějších rozmezích od 0,35 do 0,5 se hodnoty liší jen minimálně. U extrémních hodnot jsou pak rozdíly znatelné. To může být dáno například převzorkováním původního rozlišení dat. Pokud plocha pixelu reprezentuje homogenní část povrchu, například pole, posun pixelu nevytváří výraznou změnu a rozdíl hodnot je v řádu jednotek setin. Ovšem pokud se v ploše pixelu objevuje heterogenita, například přechod pole v les a jiné přechodové oblasti, jsou hodnoty *NDVI* již viditelně odlišné v řádu jednotek desetin. Obecně jsou hodnoty poskytovaného *NDVI* mírně vyšší oproti vypočítané vrstvě využívající klasické pásmo *NIR*. Vypočítané hodnoty využívající pásmo *NIR narrow* se pohybují, mimo extrémní hodnoty, v podobné rovině jako poskytovaná data.

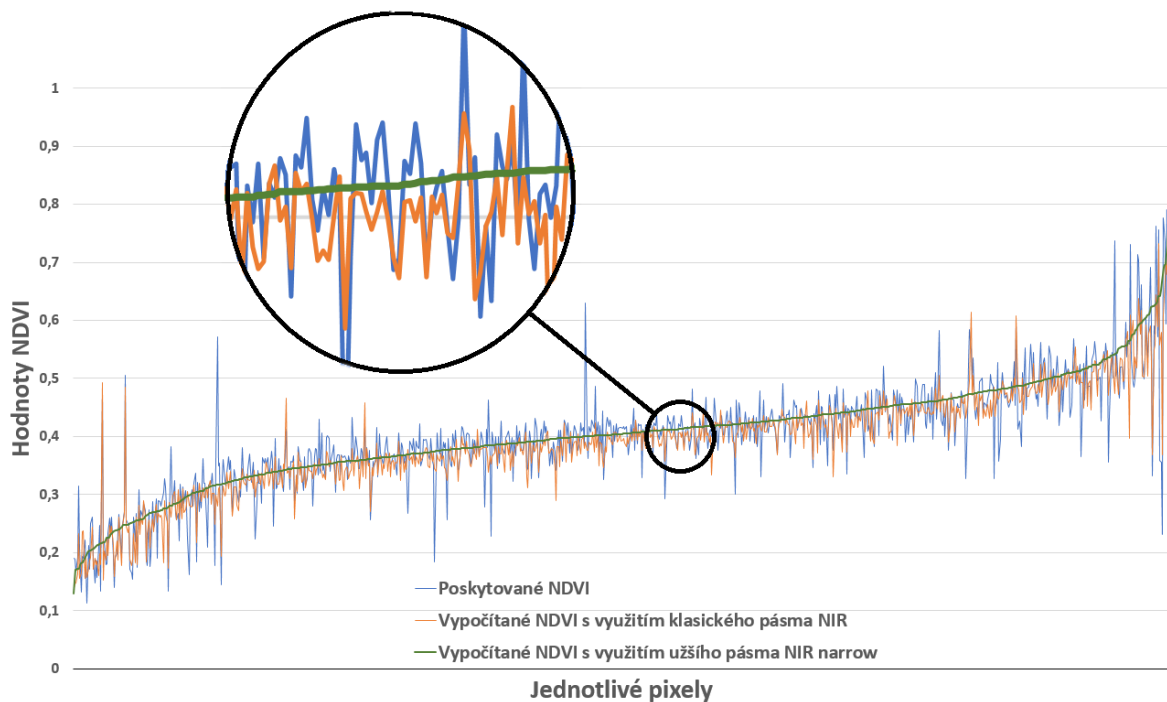
Po srovnání dat z jarního náletu je patrné, že pro homogenní plochy opět platí pravidlo výrazné shody. Náhlé poklesy hodnot *NDVI* jsou dány hraničními pixely, které reprezentují nehomogenní povrch, tedy přechodové fáze jako například pole – tráva. Travnaté oblasti mají v tomto jarním období ještě nízký obsah chlorofylu, tedy i hodnoty *NDVI* jsou výrazně nižší než u vysazené plodiny. Obecně se hodnoty všech zkoumaných vrstev shodují více než při podzimním náletu. To je dáno skutečností, že v pixelech s vyšším plošným zastoupením vegetace je shoda mimořádně dobrá. Pixely, které vykazují výraznější rozdíl, jsou opět výhradně hraniční pixely. Důkazem je koncentrace velkých rozdílů v pixelech s nižším plošným zastoupením, které v tomto období reprezentují především vysoký podíl jarní trávy.



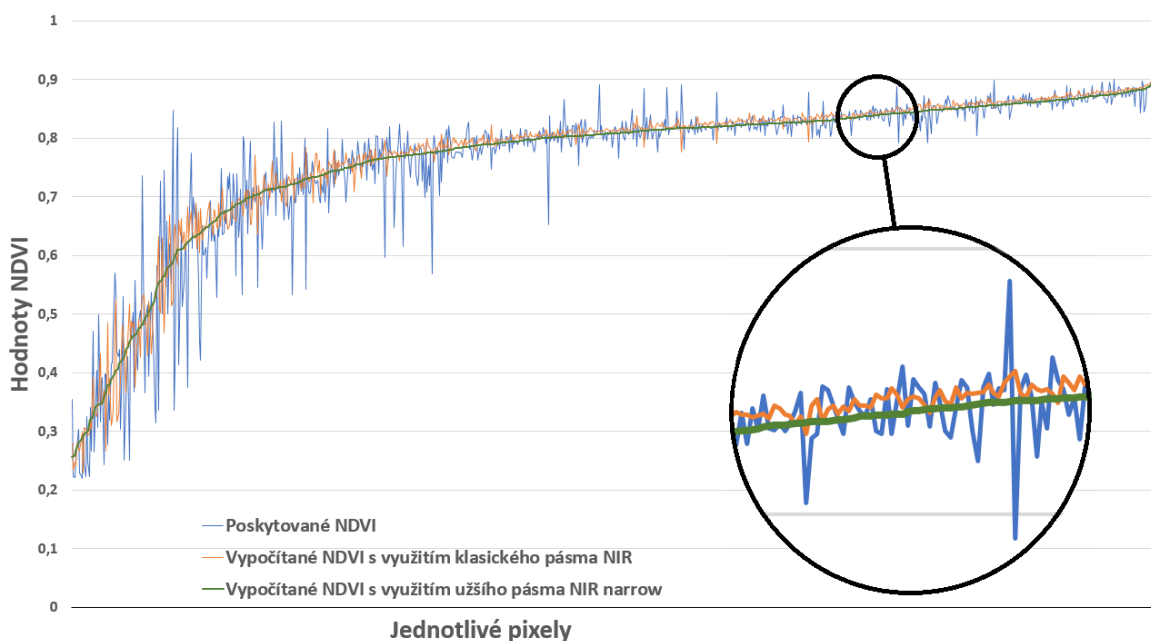
Obrázek 39 Hraniční pixely s nehomogenní plochou (jarní nálet)

Z toho vyplývá, že pro analýzy spojené pro relativně homogenní plochy velké oblasti, tedy převážně pro zemědělské účely, jsou všechny formy *NDVI* na bázi družicových dat *Sentinel 2* použitelné. V případě využití poskytovaných dat *NDVI* je třeba brát na zřetel fakt nižšího rozlišení.

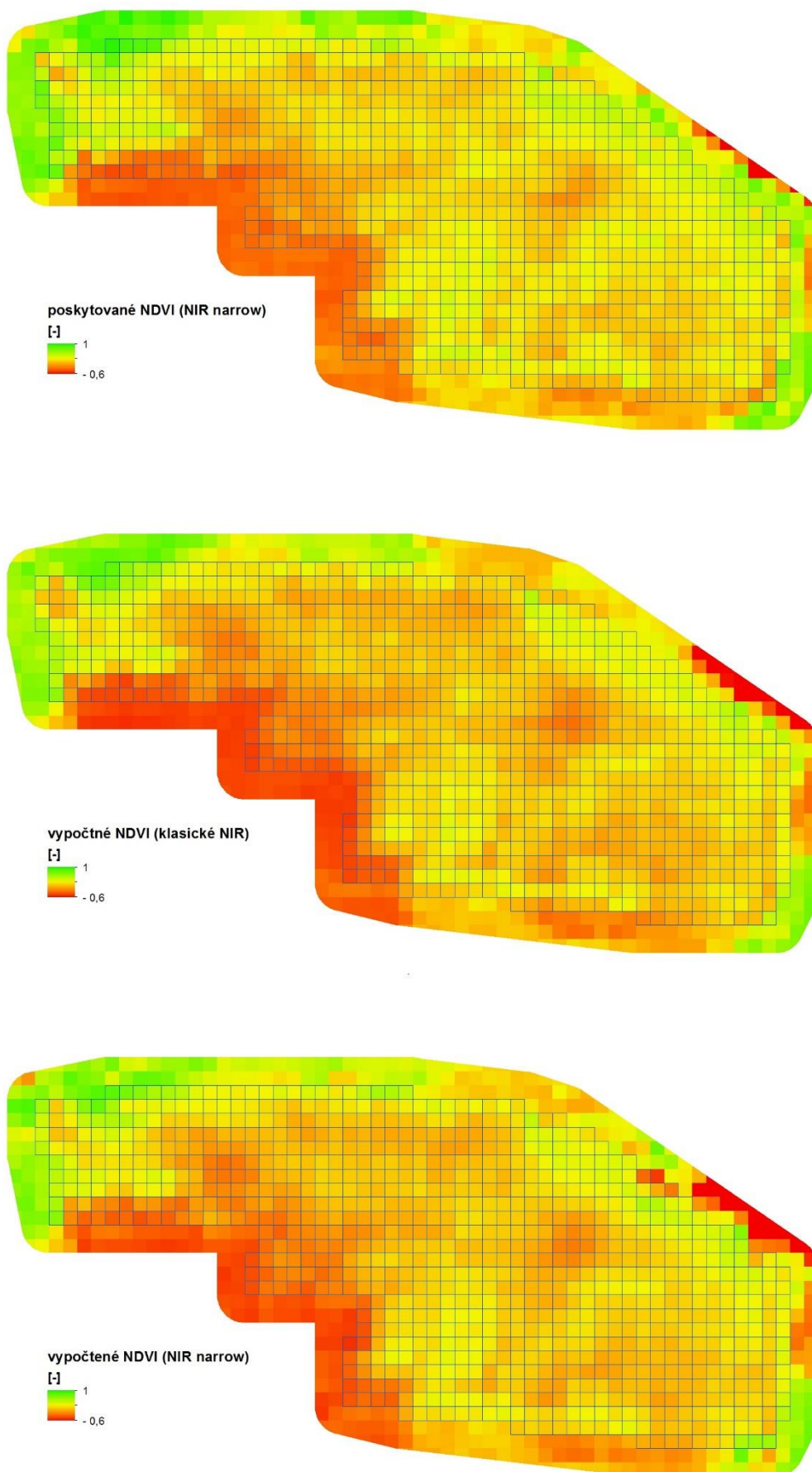
Pro účely této práce bylo vzhledem k šířce pásma kamery *RedEdge-M* (820 – 860 nm) využito pásmo klasického *NIR* (785 – 900 nm). Tyto pásma mají téměř identické centrum (840/842 nm) s úplným překryvem. Zatímco užší pásmo *NIR_{narrow}* (855 – 875 nm) má vůči *RedEdge-M* celé rozmezí posunuté do delších vlnových délek a k překryvu pásem dochází jen částečně (VIZ graf 2).



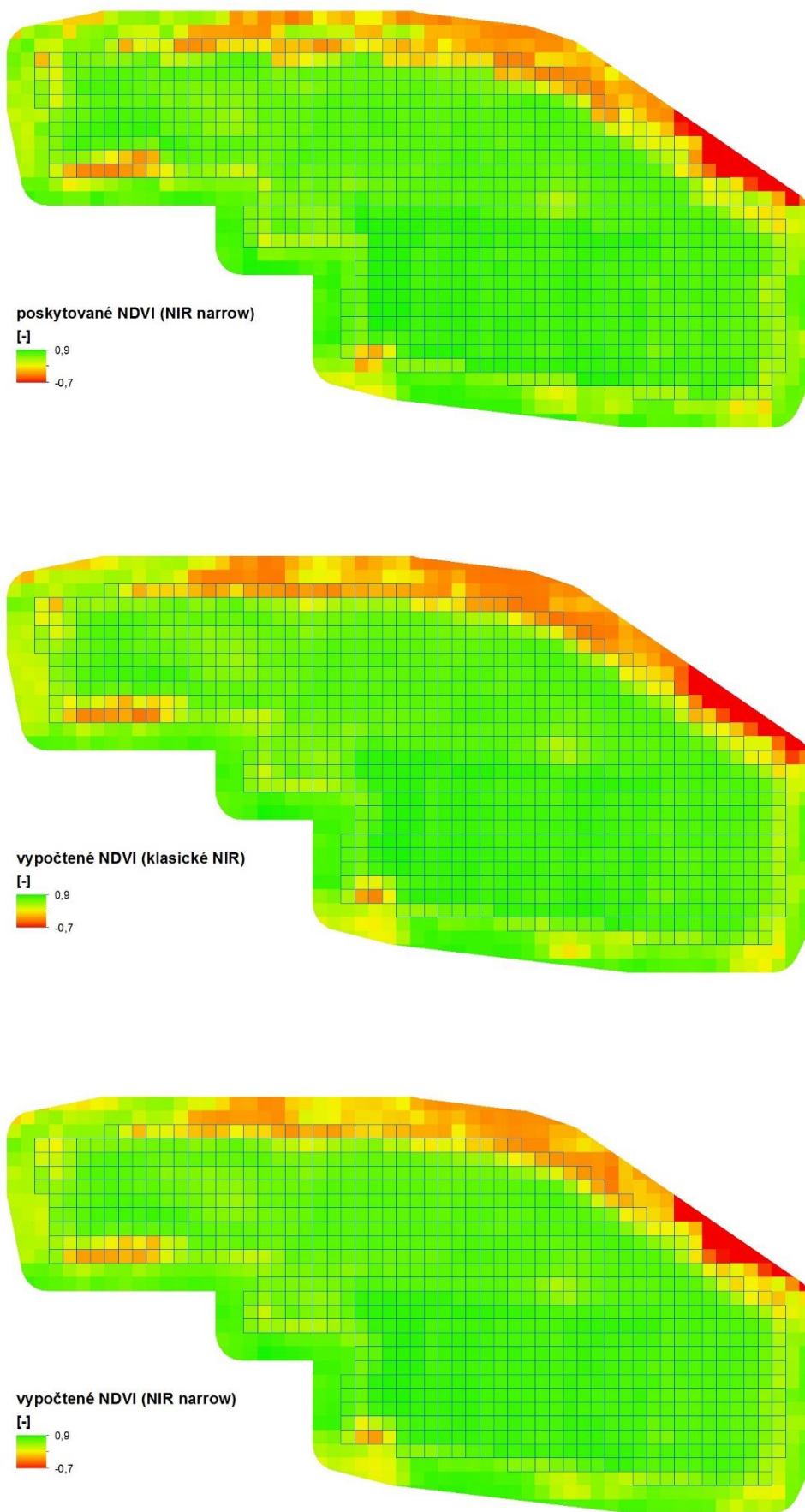
Graf 4 Porovnání hodnot NDVI v jednotlivých pixelech z družicových dat Sentinel 2 (podzimní nálet)



Graf 5 Porovnání hodnot NDVI v jednotlivých pixelech z družicových dat Sentinel 2 (jarní nálet)



Obrázek 40 Rozdíl v poskytnutém a vypočteném NDVI z družice Sentinel 2 (podzimní nálet)



Obrázek 41 Rozdíl v poskytovaném a vypočteném NDVI z družice Sentinel 2 (jarní nálet)

8 Porovnání výstupů družicových dat, RedEdge-M a RGB dat

Pro určení využitelnosti družicových dat pro základní analýzy plošného zastoupení vegetací na zemědělských plochách je nezbytné porovnání jednotlivých výstupů.

8.1 Variabilita dat z RedEdge-M v závislosti na rozlišení

Pro účely porovnání variability hodnot *NDVI* ve vztahu k plošnému zastoupení se snižujícím se rozlišením, byl vybrán nejvíce charakteristický testovací čtverec o rozměrech 150x150 metrů. V rámci čtverce byly vytvořeny sítě s pixelovým rozlišením (velikost čtverečků) 1x1, 2x2, 5x5 a 10x10 metrů. Pro všechna rozlišení byla provedena zonální statistika průměrných hodnot *NDVI* a plochy vegetace.

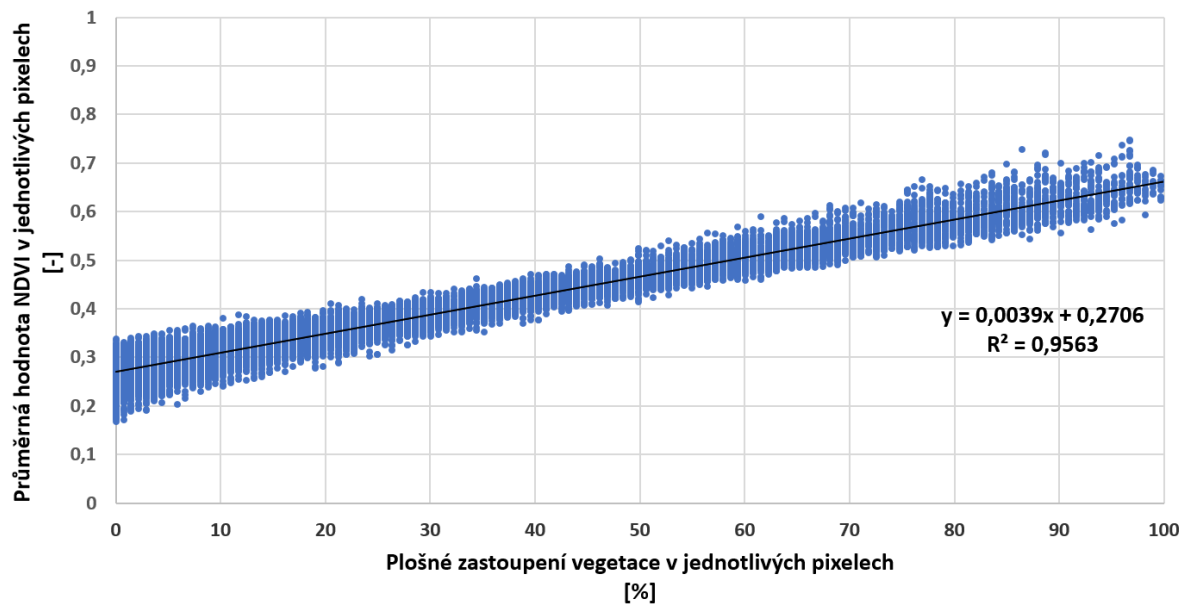


Obrázek 42 Umístění testovacího čtverce v rámci území (ukázka na podzimním náletu)

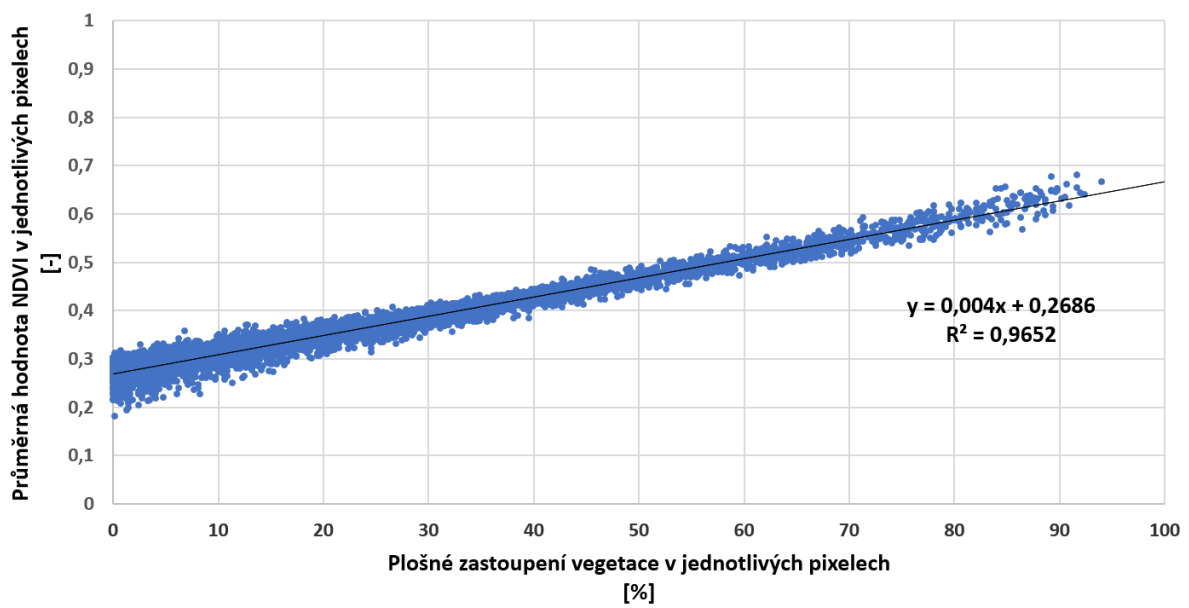
8.1.1 Porovnání – podzimní nálet

8.1.1.1 Testovací čtverec

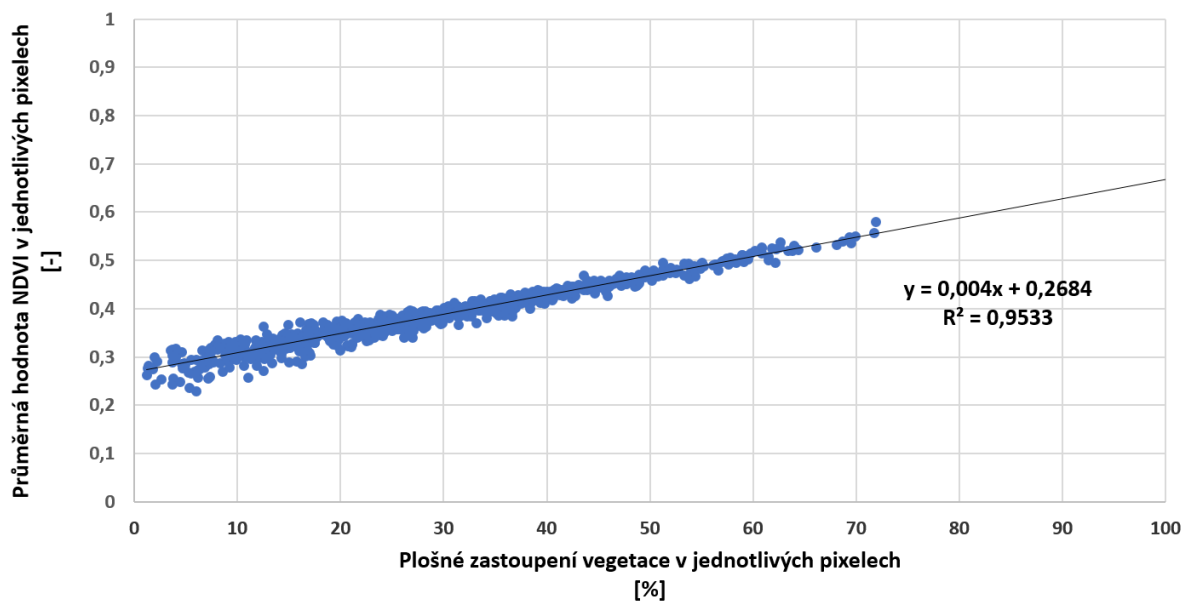
Při testování variability vztahu průměrných hodnot *NDVI* a plošného zastoupení vegetace se pro data z kamery *RedEdge-M* při podzimním náletu potvrdila významná korelace. Jak je vidět z grafů 6 – 9, při proložení dat lineární přímkou trendu dosahuje hodnota spolehlivosti ve všech případech pixelového rozlišení téměř 1. Ovšem pokud bychom chtěli tento vztah využít, výrazně záleží na požadavcích výstupu. Rozsah procentuálního zastoupení při vysokém rozlišení 1x1 a 2x2 metrů pro hodnotu *NDVI* je v průměru 20 %. To platí především pro střední hodnoty. Je tedy zřejmé, že pro analýzy malých území se může výpočet od reality značně lišit. Pro nižší rozlišení 5x5 a 10x10 metrů jsou oproti vyššímu rozlišení rozptyly proměnlivější, ale výrazně menší. Při hodnotách *NDVI* nad 0,4 již můžeme bezpečně počítat s rozsahem maximálně 10 %. Je tedy vidět, že na základě hodnocení podzimních dat *RedEdge-M* je vhodnější využívat spíše nižší rozlišení 10x10, maximálně 5x5 metrů, kde je rozsah chyby v hodnotách *NDVI* od 0,4 o polovinu menší.



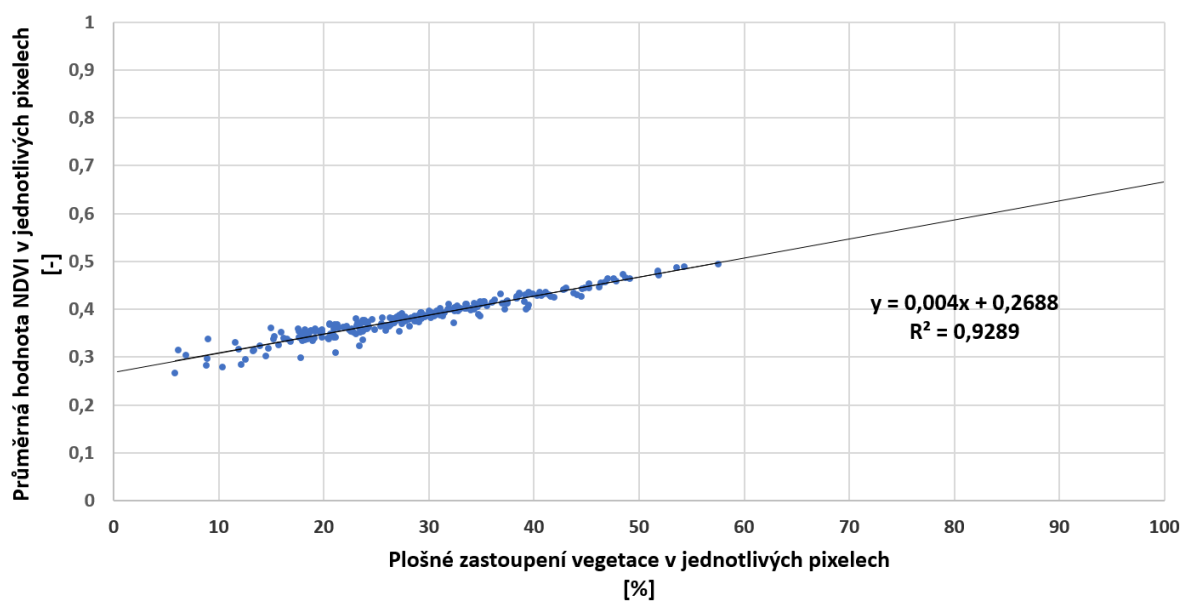
Graf 6 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 1 m (RedEdge-M, podzim)



Graf 7 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 2 m (RedEdge-M, podzim)



Graf 8 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 5 m (RedEdge-M, podzim)

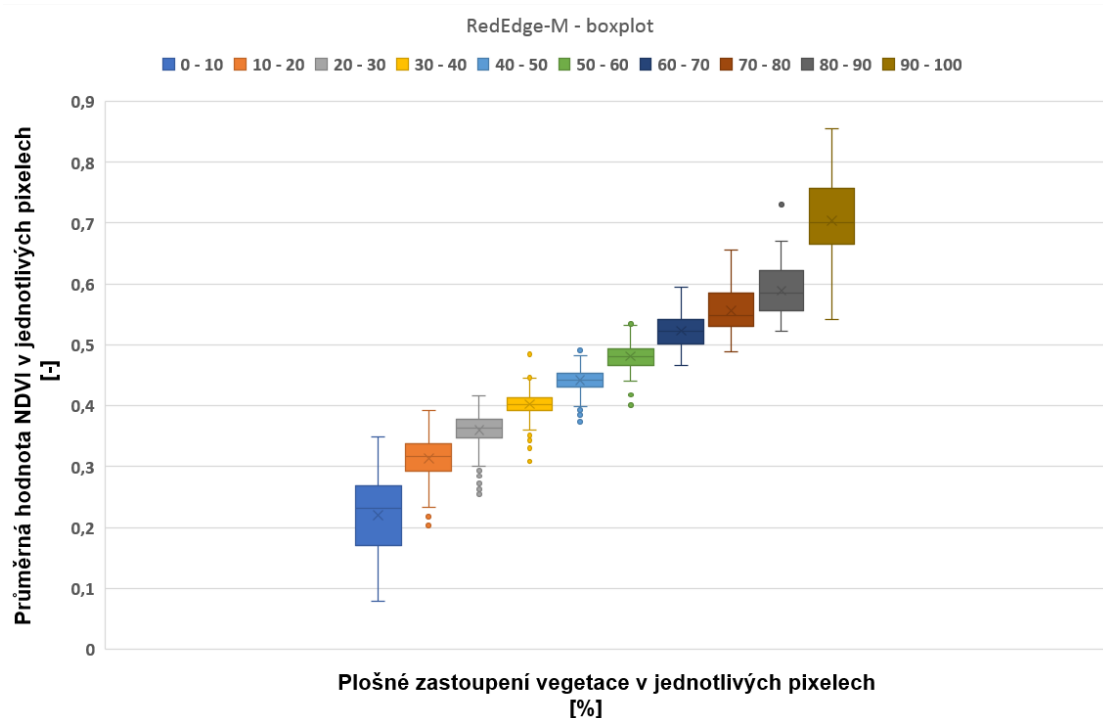


Graf 9 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 10 m (RedEdge-M, podzim)

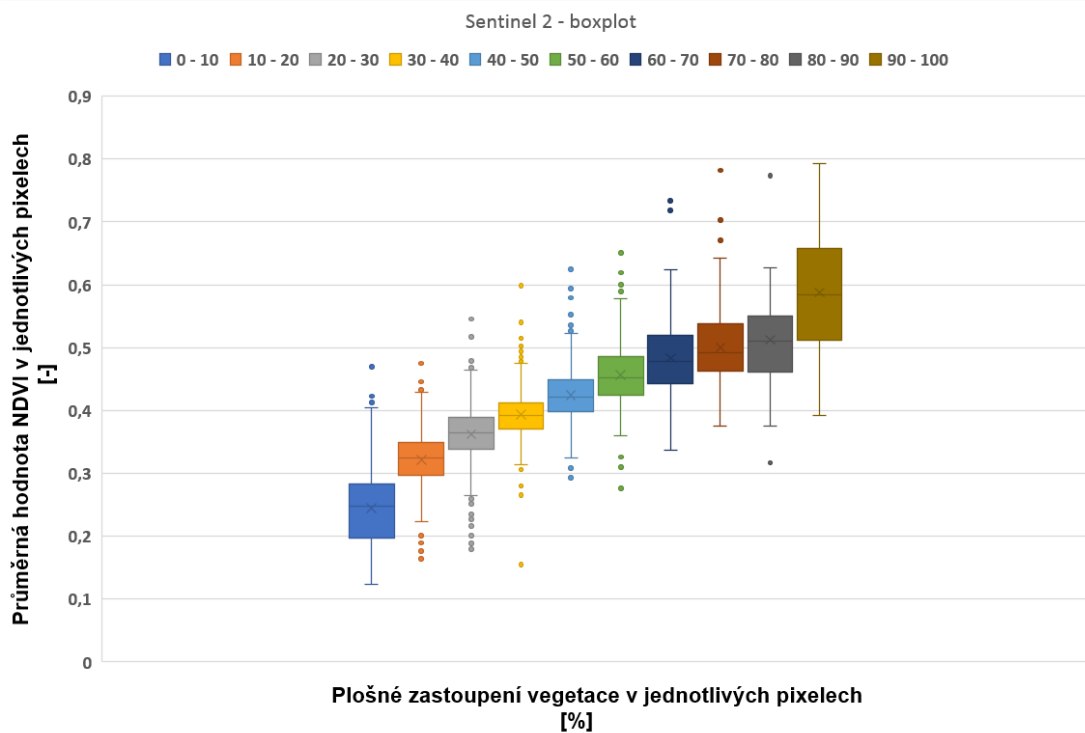
8.1.1.2 Celé území ZPF

Pro celé území, řešené v pixelovém rozlišení 10x10 metrů, byly jednotlivé pixely rozřazeny do skupin po 10 % plošného zastoupení (včetně dat *Sentinelu 2*). Z následujícího krabicového grafu 7 je patrné, že pro podzimní nálet je potvrzena výrazněji shodná korelace zejména u středních hodnot *NDVI*, ale ani hodnoty blízké se extrémům nevykazují výrazný rozptyl, respektive mimo hodnoty pohybující se v rozmezí do 10 % a nad 90% plošného zastoupení je rozptyl vyhovující pro případné analýzy pokryvu. Dále je ve všech uváděných krabicových grafech možné pozorovat tzv. vnější body, které reprezentují hodnoty vzdálené od hranice „krabice“ o více než 1,5 násobek rozdílu horního a dolního kvartilu.

U následujícího grafu 8, reprezentující data Sentinelu 2 téhož náletu, je vidět uspokojivá shoda vůči datům kamery *RedEdge-M*, pouze s větším rozptylem a čtenějším počtem vnějších bodů. Tyto odlehlé hodnoty jsou zpravidla hraniční pixely s přechodem z plochy vegetace zemědělského pozemku na ostatní plochy (například polní cesta, jiná vegetace apod.).

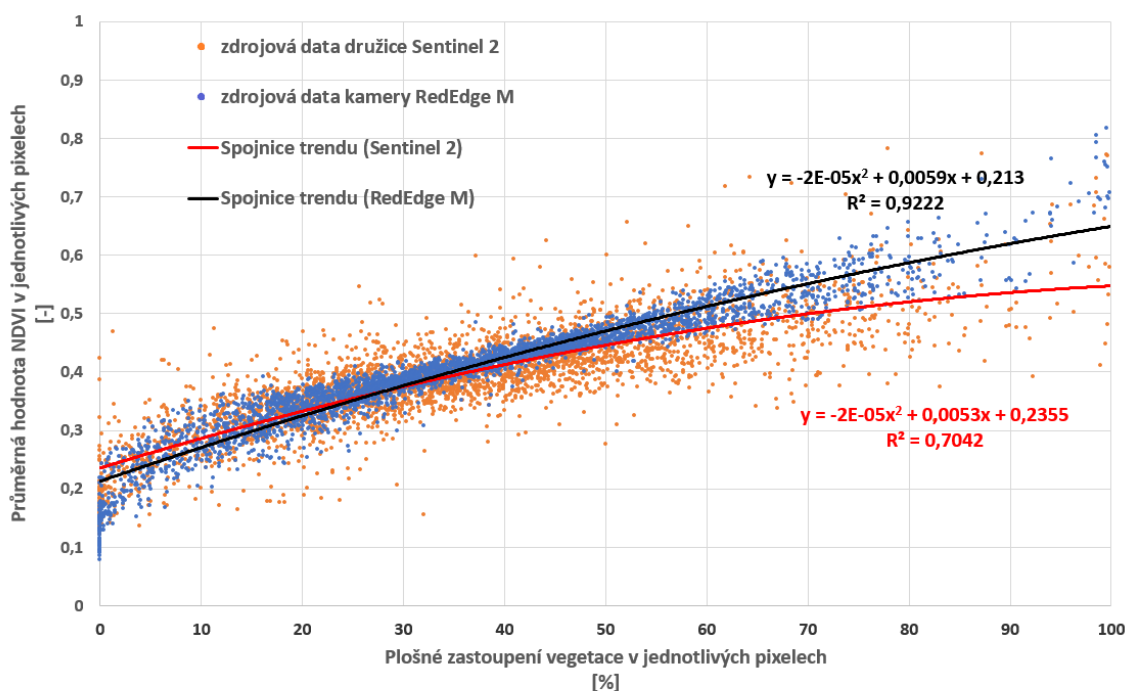


Graf 10 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, RedEdge-M, podzim)



Graf 11 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, Sentinel 2, podzim)

Pokud zobrazíme korelaci hodnot jednotlivých pixelů celého pozemku (data *RedEdge-M* včetně *Sentinelu 2*), potvrdíme předcházející teorii. Pokud opomeneme vyšší rozptyl *Sentinelu 2*, je vzájemná korelace do hodnoty *NDVI* 0,45 velice dobrá. Ovšem data kamery *RedEdge-M* vykazují neopomenutelně vyšší hodnotu spolehlivosti ($R^2 = 0,92$) oproti hodnotám *Sentinelu 2* ($R^2 = 0,70$). Pravděpodobnou příčinou rozchodu spojnic trendu ve vyšších hodnotách *NDVI* je v první řadě malá četnost pixelů s větší pokrývností vegetace a za druhé se téměř ve všech případech jedná o body hraniční. Jak už bylo zmíněno, výpočet probíhal s přesahem a v době podzimního náletu byla vegetace mimo ZPF vzrostlá a v dobrém stavu. Je tedy jasné, že pixely podzimního náletu s vyšší pokrývností reprezentují hraniční pixely a jejich rozptyl je pravděpodobně dán chybou, vzniklou zejména při převzorkování do jiného rozlišení.

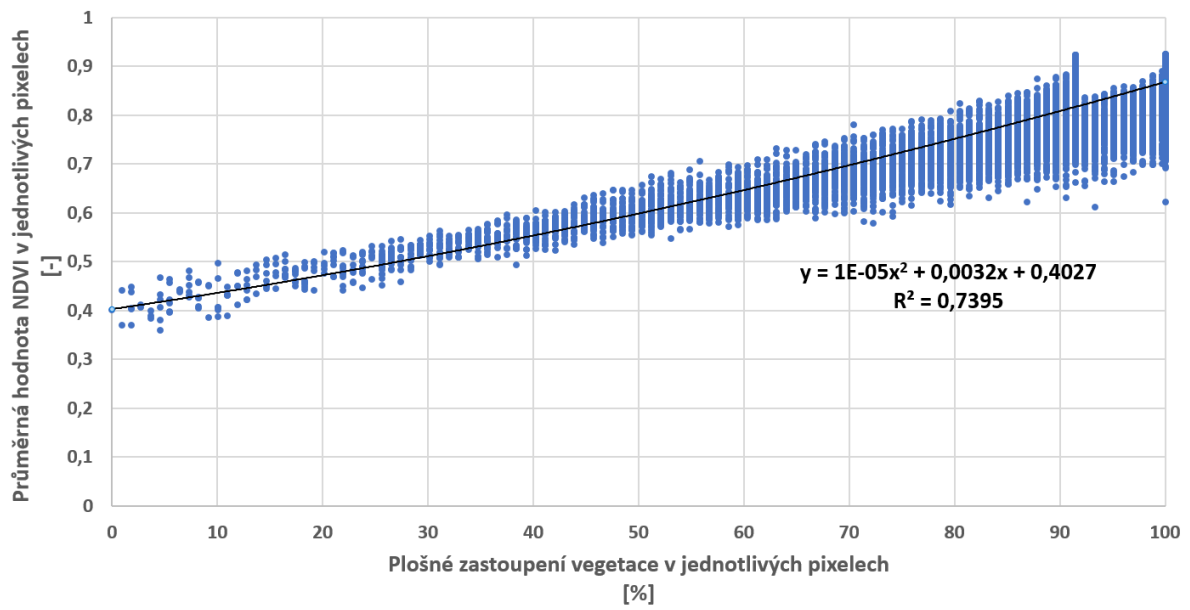


Graf 12 Porovnání vztahu hodnoty *NDVI* s procentuálním plošným zastoupením vegetace (celé území, pixelové rozlišení 10 m, podzimní nálet)

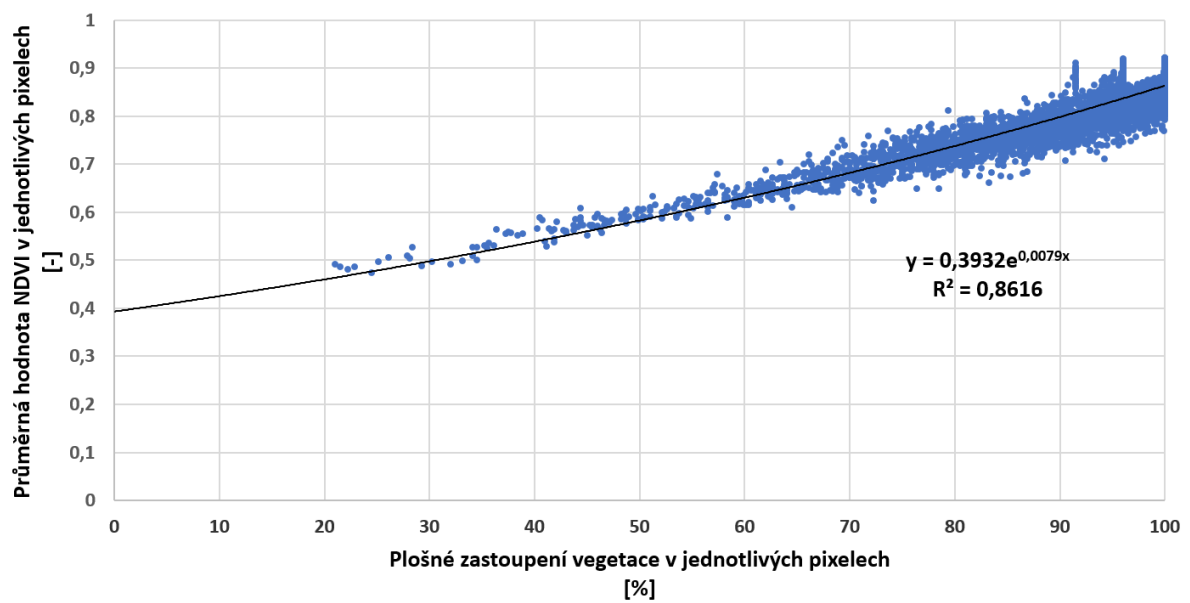
8.1.2 Porovnání – jarní nálet

8.1.2.1 Testovací čtverec

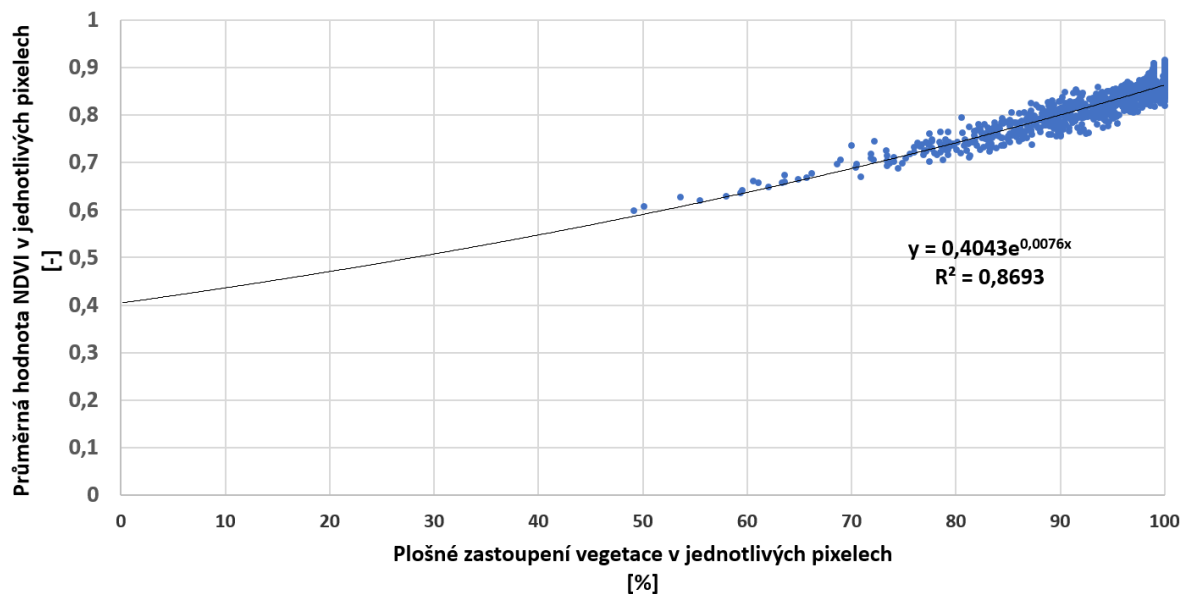
Na testovacím čtverci se pro jarní nálet opětovně potvrdila téměř identická korelace dat *RedEdge-M* při rozdílném rozlišení. U podzimního náletu bylo pravidlem menší rozptyl při nižším rozlišení, zde tomu není jinak. Ačkoli se pohybujeme ve výrazně vyšších hodnotách *NDVI*, a tedy i ve vyšších hodnotách pokryvu, a hodnoty spolehlivosti jsou o řád nižší, rozptyl je definován dle stejného pravidla. U rozlišení 1x1 a 2x2 metru se rozptyl hodnot pohybuje do 20 %, zatímco pro rozlišení 5x5 a 10x10 metru dosahuje maximálně 10 %. Nižší hodnoty spolehlivosti jsou pravděpodobně zapříčiněny větší koncentrací vysokých hodnot spojené s výrazně vyšším pokryvem oproti podzimnímu stavu, ve kterém jsou hodnoty rozprostřeny v téměř celé škále procentuálního zastoupení.



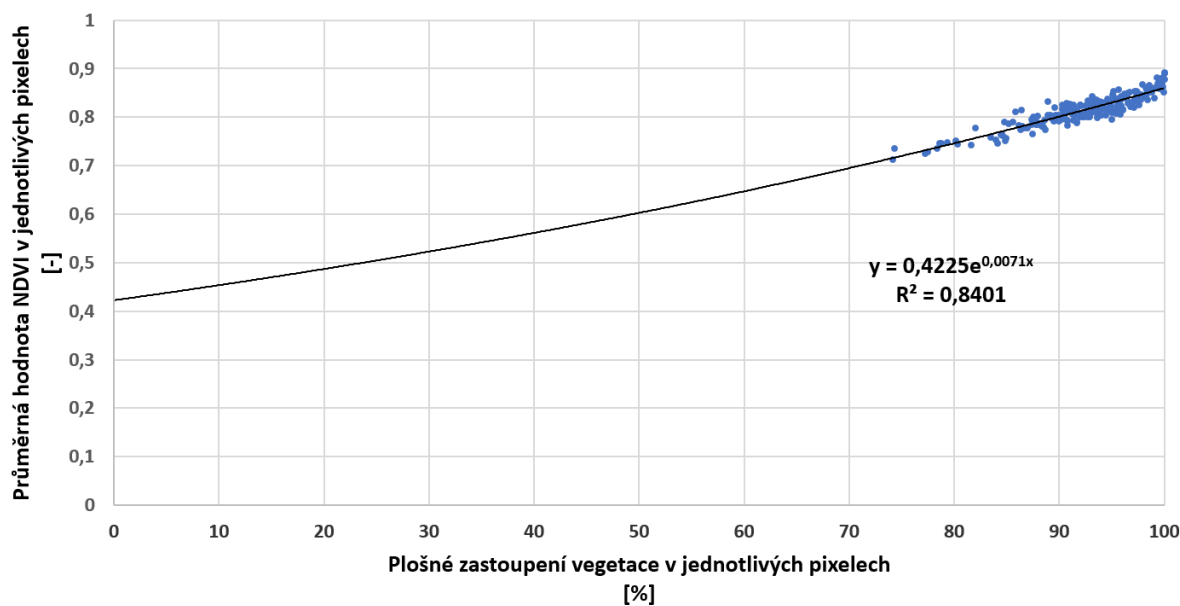
Graf 13 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 1 m (RedEdge-M, jaro)



Graf 14 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 2 m (RedEdge-M, jaro)



Graf 15 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 5 m (RedEdge-M, jaro)

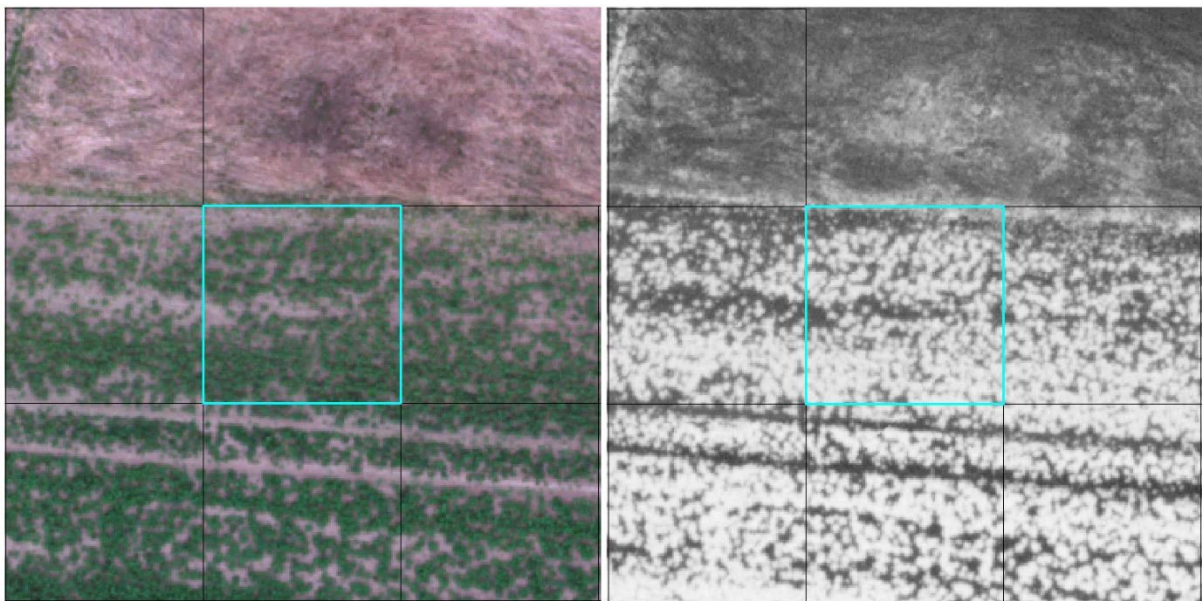


Graf 16 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 10 m (RedEdge-M, jaro)

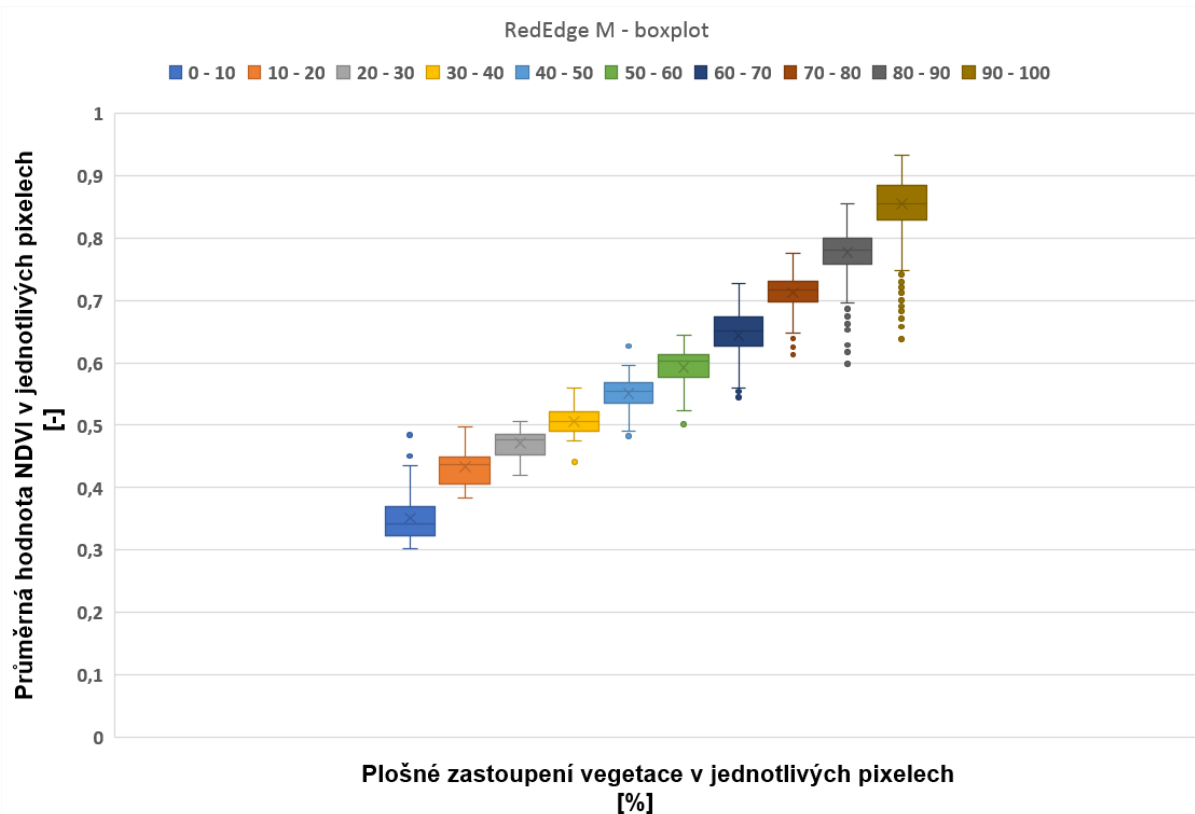
8.1.2.2 Celé území ZPF

Po identickém postupu rozřazení jednotlivých pixelů do skupin po 10 % pokryvu vegetací, jako u podzimního náletu, je viditelné, že pro data RedEdge-M (rozlišení 10x10 metrů) je potvrzena předpokládaná korelace. Dokonce v jarním náletu je rozptyl akceptovatelný i při extrémních hodnotách (VIZ Graf 17).

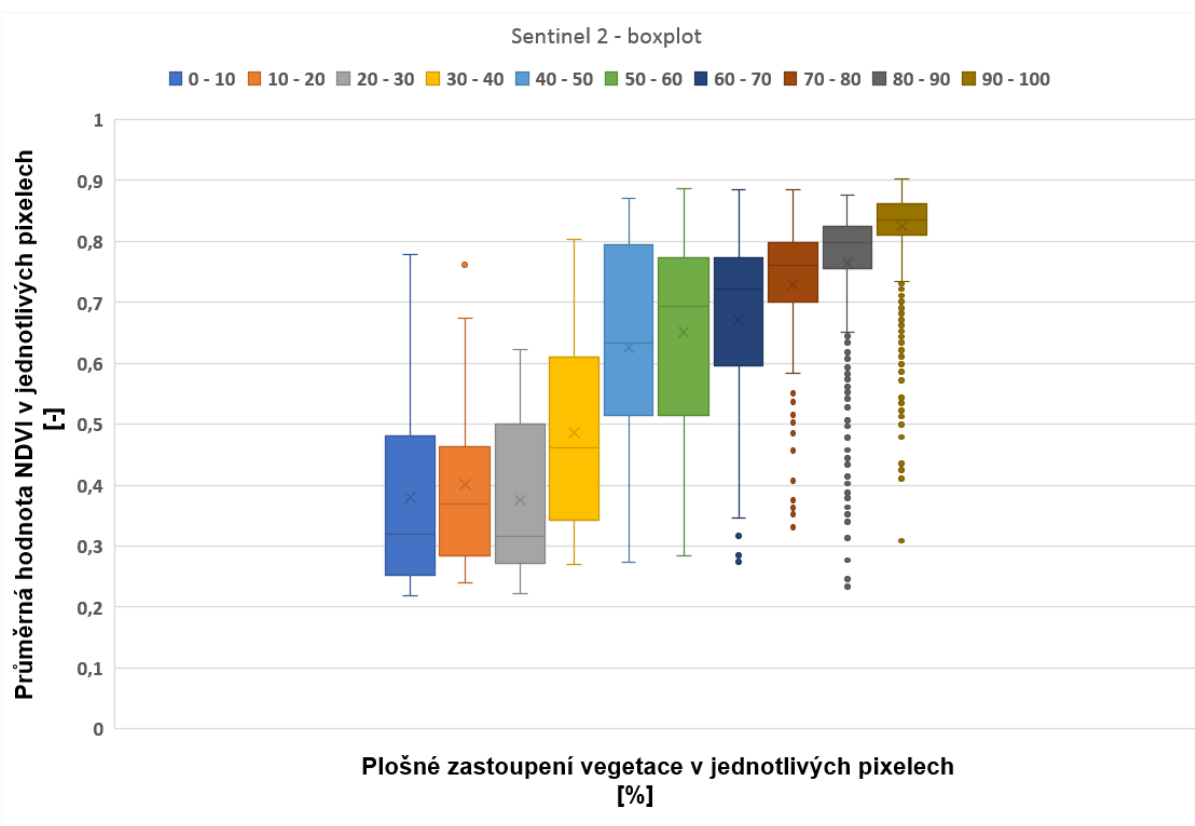
Sentinel 2 je ovšem v tomto období v porovnání s *RedEdge-M* nepřesný (VIZ Graf 18). Obrovský rozptyl hodnot *NDVI* v pixelech s nižší pokrývností než 70 % je převážně dán malou četností pixelů této charakteristiky. Ve vyšších hodnotách plošného zastoupení vegetace (nad 70%) je rozptyl kvartilů uspokojivý. Množství odlehlých bodů však dokazuje vysokou rozkolísanost nejen u nižšího pokryvu. Na základě bližšího zkoumání těchto odlehlých pixelů napříč celé stupnici vegetační pokrývnosti, je pravděpodobnou příčinou, nebo alespoň jednou z možných variant, opět výskyt hraničních pixelů. Pro příklad je uveden jeden z hraničních pixelů s pokrývností 80 %. Průměrná hodnota *NDVI*, vypočítaná na základě dat *RedEdge-M*, je po zaokrouhlení na dvě desetinná místa 0,69. Ovšem průměrná hodnota *NDVI* dle výpočtu z poskytovaných pásem *Sentinel 2* je pouhých 0,36. Hodnota družice je s vysokou pravděpodobností ovlivněna mírným posunem mimo plochu ZPF, který mohl vzniknout při změně původního projekčního systému WGS na český projekční systém JTSK. Jelikož se chyby vyskytují téměř výhradně u hraničních pixelů, je tato teorie vysoce pravděpodobná. Důvod, proč se vyskytují výrazné chyby hraničních pixelů pouze u jarního náletu a nikoliv u náletu podzimního, je pravděpodobně dán vysoce rozdílným stavem vegetace na řešeném pozemku a jeho okolí. Oproti podzimnímu náletu, kdy hodnoty pro okrajovou vegetaci nebyly až tak rozdílné, se při jarním náletu za hranicemi pozemku vyskytuje jarní tráva s nízkým obsahem chlorofylu.



Obrázek 43 Příklad hraničního pixelu v pořadí zleva data kamery *RedEdge-M* a vypočítané *NDVI* z dat *RedEdge-M* (jarní nálet)

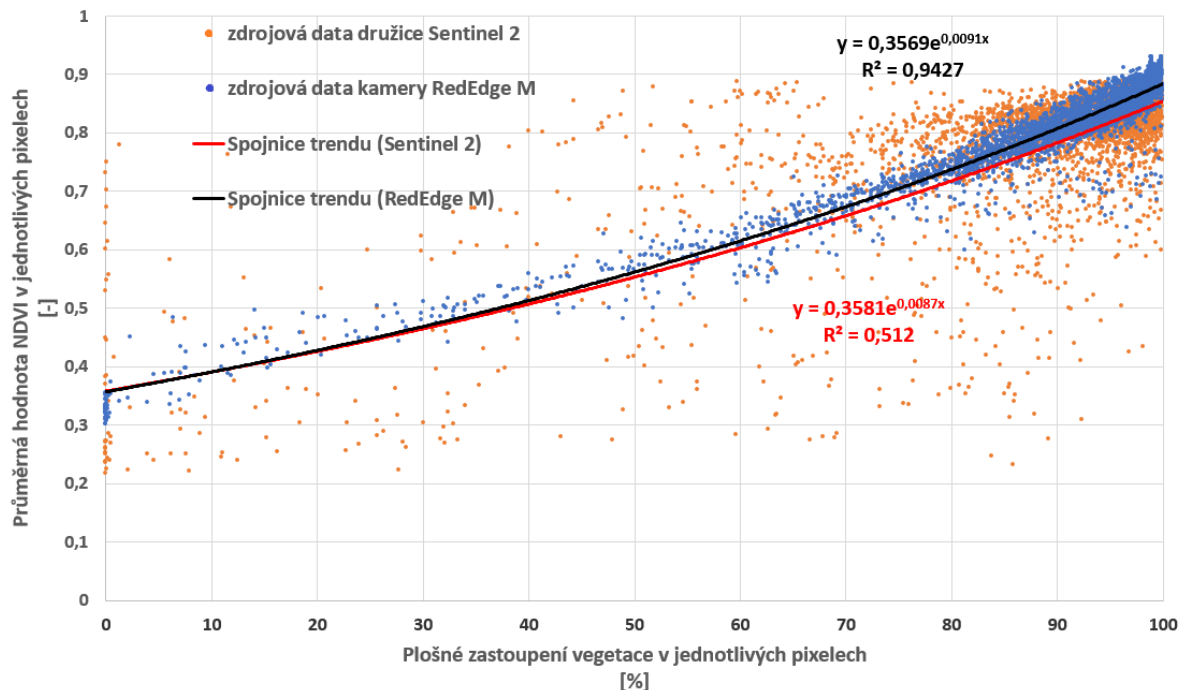


Graf 17 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, RedEdge-M, jaro)



Graf 18 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, Sentinel 2, jaro)

Při opětovném zobrazení korelace na celém pozemku (data *RedEdge-M* včetně *Sentinelu 2*) je sice viditelná výrazná shoda spojnic trendu, ovšem již zmiňovaný rozptyl družicových dat je příliš vysoký. Důkazem toho je zobrazená hodnota spolehlivosti družicových dat, která dosahuje pouze hodnoty $R^2 = 0,51$.



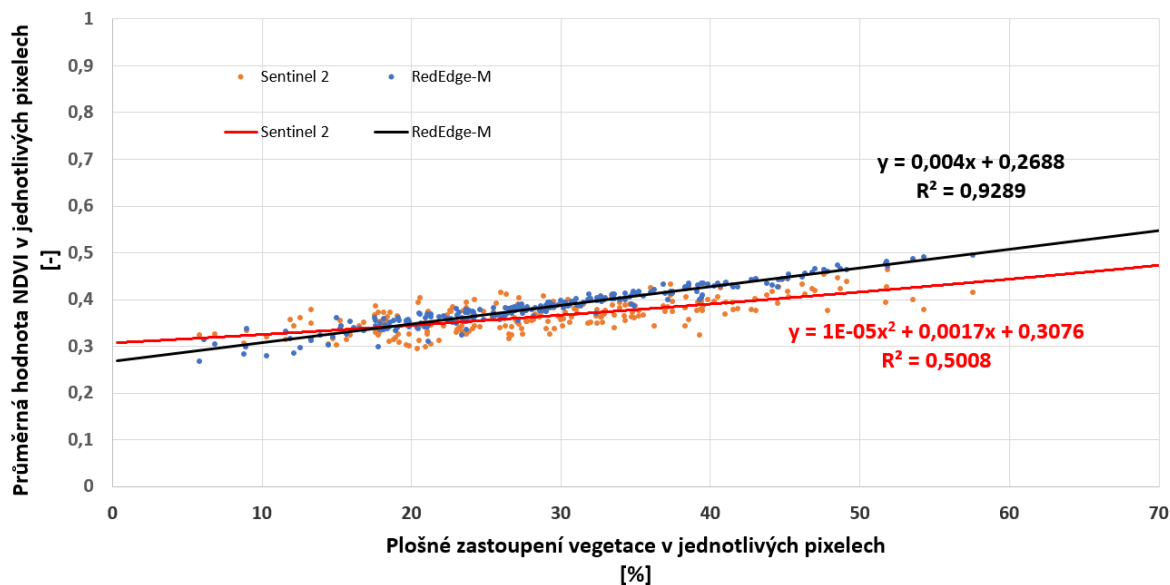
Graf 19 Porovnání vztahu hodnoty NDVI s procentuálním plošným zastoupením vegetace (celé území, pixelové rozlišení 10 m, jarní nálet)

8.1.3 Porovnání podzimního a jarního náletu

Z prezentovaných výstupů lze jednoznačně potvrdit využitelnost dat snímaných multispektrální kamerou *RedEdge-M* pro stanovení reálného pokryvu. Ať už přesného na základě podrobnější analýzy, tak i hrubého s chybou do 10 % pro hrubší analýzy.

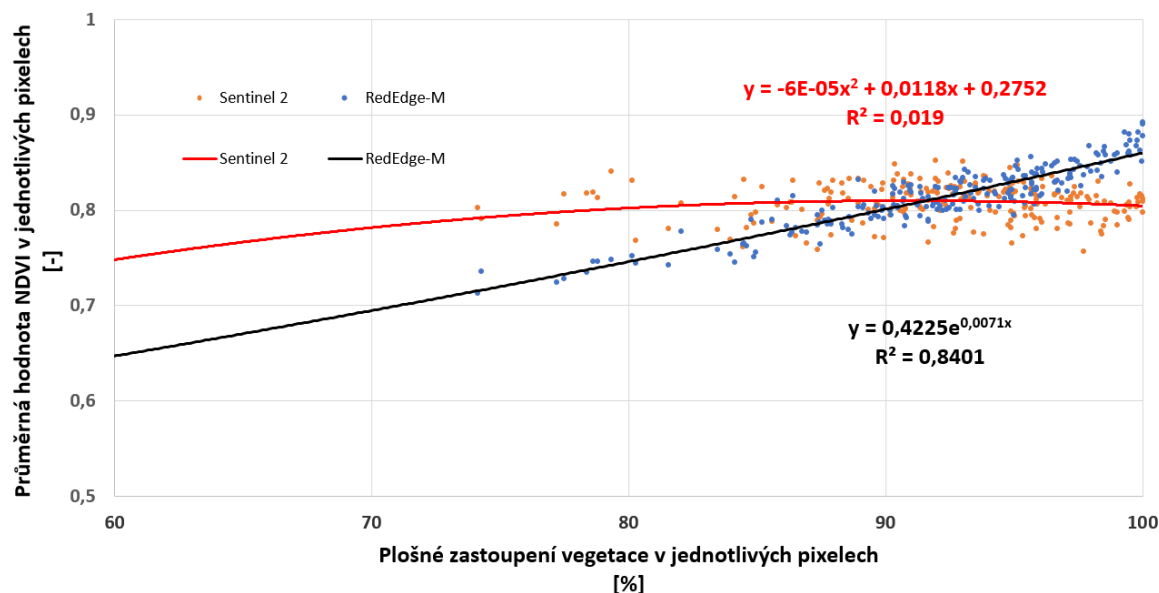
Při podzimním náletu je relativně průkazná shoda trendu dat *RedEdge-M* a *Sentinel 2* v nízkých a středních hodnotách, ačkoliv *Sentinel 2* má skoro dvojnásobný rozptyl. Pro analýzy velkých ploch by tedy mohla družicová data relativně dobře sloužit jako hrubý odhad. Ovšem v případě jarních dat udávají družicová data *Sentinelu 2*, i za předpokladu ignorace hraničních bodů, plošné zastoupení vegetace pro hodnoty *NDVI* s rozptylem téměř 40 %.

Pro lepší představu vztahu hodnot plošného zastoupení a *NDVI* z družice *Sentinel 2* byl využit k porovnání dat opět již zmiňovaný testovací čtverec 150x150 metrů, ve kterém se nenachází žádný z hraničních bodů, a tedy ani chyby s nimi spojené. V případě podzimních dat je opětovně potvrzeno pravidlo 20 % rozptylu plochy vegetace pro jednotlivé hodnoty *NDVI* z družicových dat. Obecně má rovnice trendu družice pomalejší nárůst.



Graf 20 Vztah hodnot NDVI a plošného zastoupení v testovacím čtverci 150m (podzim, rozlišení 10 m)

Při zkoumání jarního náletu na testovacím čtverci je rozptyl družicových dat oproti analýze celého území výrazně menší, maximálně 25 %. Ovšem pokud hodnotami proložíme křivky trendů, je vidět nápadný rozchod vůči datům kamery *RedEdge-M*. Hodnota spolehlivosti je dokonce pouhých 0,02. Z toho plyne, že pokud se jedná o pokryv vyšší než 70 %, hodnoty *NDVI* družice jsou již spíše konstantního trendu. Konkrétně zde je pokryvnost 70 – 100 % vyčíslena hodnotami *NDVI* 0,75 – 0,85.

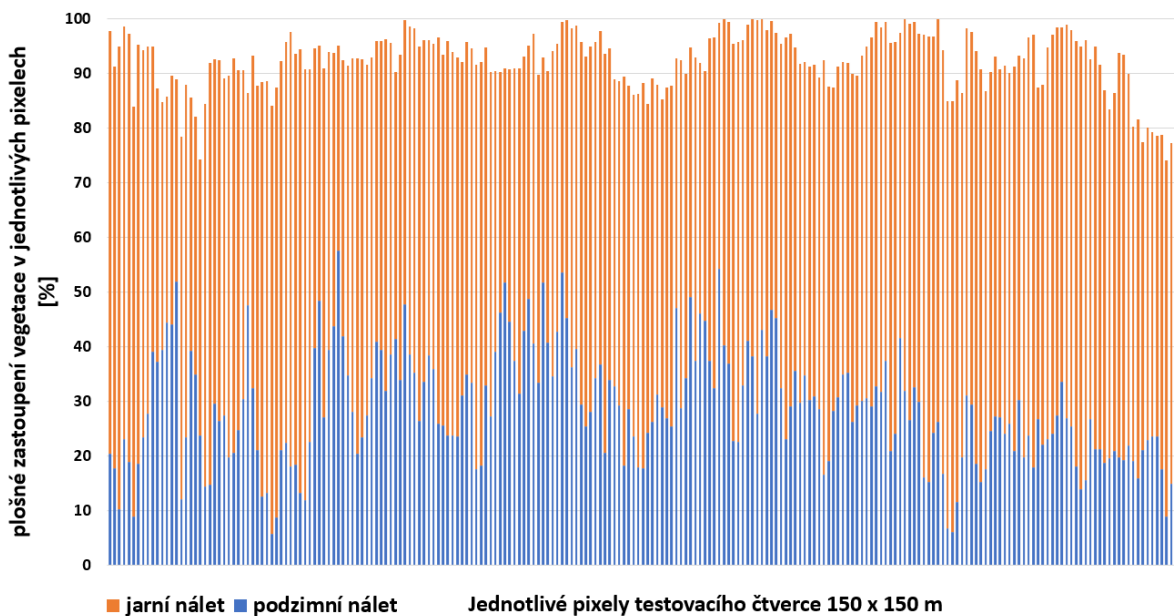


Graf 21 Vztah hodnot NDVI a plošného zastoupení v testovacím čtverci 150m (jaro, rozlišení 10 m)

Průměrná hodnota *NDVI* na celém pozemku pro podzimní nálet dosahuje 0,40 s průměrným vegetačním pokryvem 36,1 %. Pro jarní nálet činí průměrná hodnota *NDVI* 0,80 s průměrnou pokryvností 87,4 %. Z porovnání náletů je tedy zřejmý nárůst vegetačního krytu o 51,3 %, což přibližně odpovídá i nárůstu průměrné hodnoty *NDVI* (o 50 %).

V případě testovacího čtverce je pro podzimní nálet průměrná hodnota *NDVI* 0,38 s průměrnou pokryvností 28,8 %. Pro jarní nálet dosahuje průměrná hodnota *NDVI* 0,82 s průměrnou pokryvností 92,3 %. Procentuální nárůst vegetačního krytu v rámci testovacího čtverce je 63,5 % s procentuálním nárůstem průměrné hodnoty *NDVI* 53,7 %.

Pro doplnění je v následujícím grafu uveden procentuální nárůst vegetace (z podzimního na jarní období) opět pouze v testovacím čtverci 150x150 metrů, z důvodu lepší reprezentativnosti.

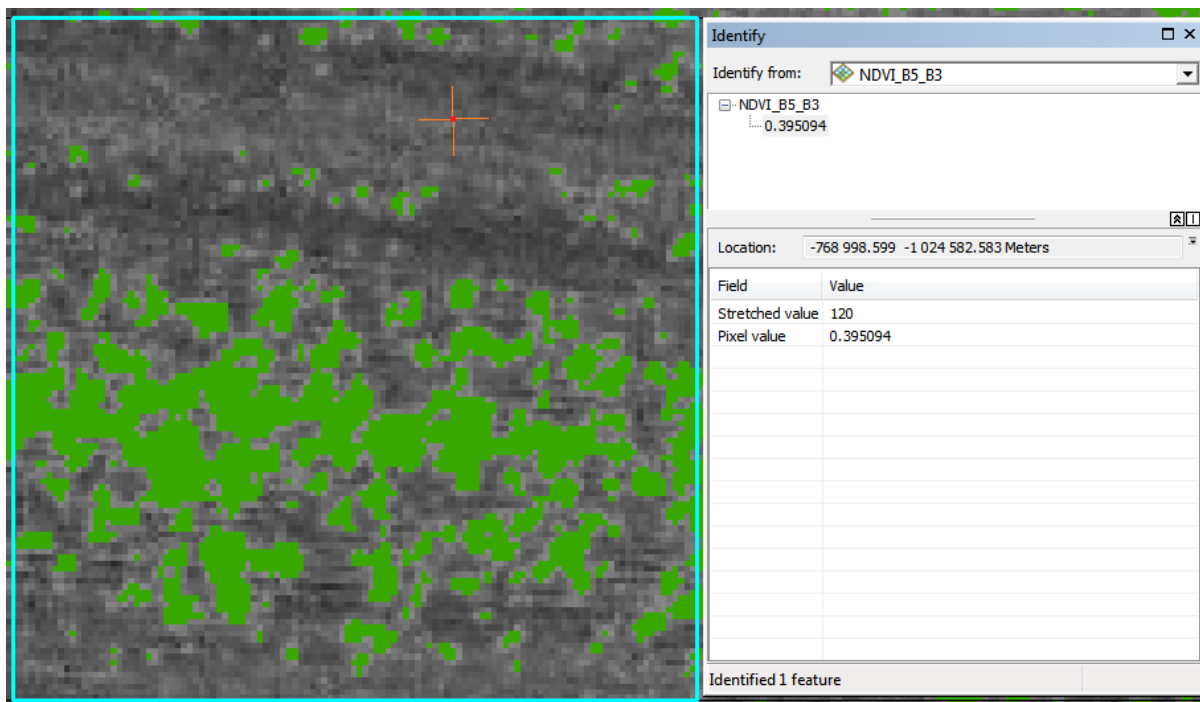


Graf 22 Procentuální nárůst vegetace z podzimního na jarní období (v rámci reprezentativního čtverce 150x150m, pixelové rozlišení 10 m)

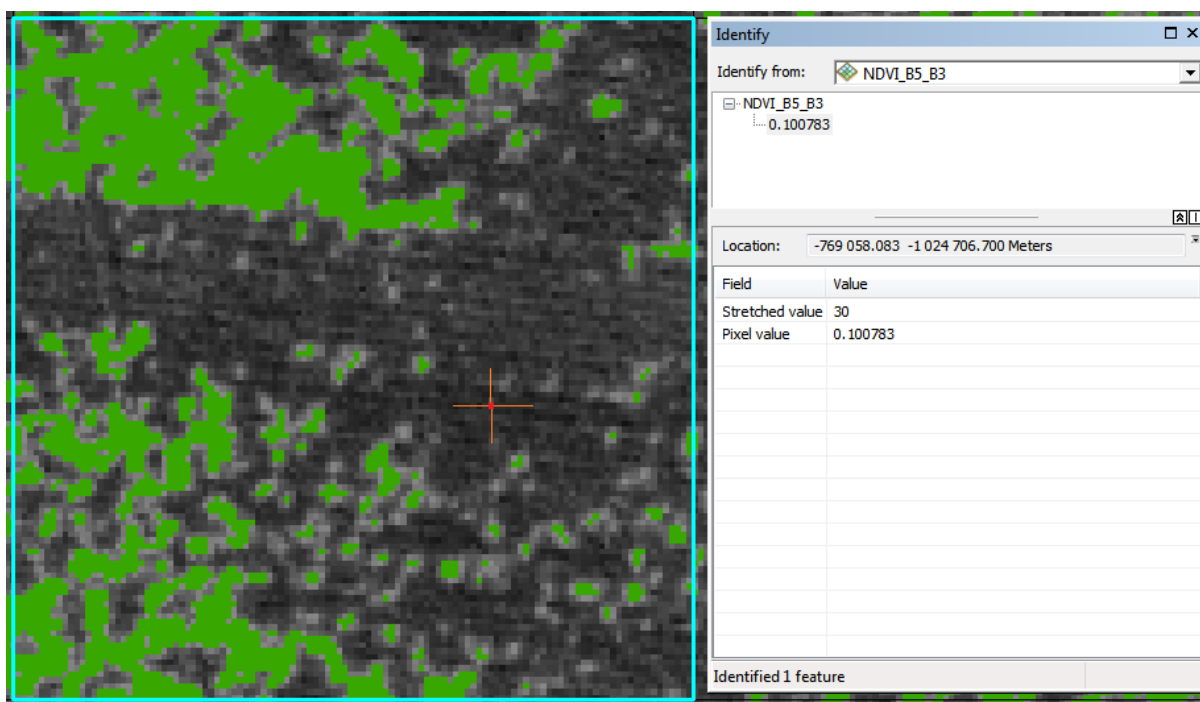
8.2 Diferenciace hodnot *NDVI* vůči procentuálnímu zastoupení vegetace

Pro podzimní i jarní nálet platí, že hodnoty *NDVI* z dat kamery *RedEdge-M* jsou pro stejné hodnoty plošného zastoupení různé. Důvodem je reklasifikace dat *NDVI*, která definuje výskyt vegetace a neřeší množství vysokých a nízkých hodnot nad či pod hraniční hodnotou. Z tohoto důvodu jsou hodnoty pro identické plošné zastoupení proměnlivé. Pod hraniční hodnotou může být například vlhčí substrát, který způsobí nižší hodnoty oproti sušší půdě. Tedy pro stejnou plochu, kterou hraniční hodnota *NDVI* definuje jako ostatní, má proměnlivé průměry hodnot. To samé platí pro plochu vegetace. V ploše vegetace jsou opět hodnoty vegetačního indexu proměnlivé v důsledku rozdílného stavu plodiny. Stejně pravidlo platí pro data *Sentinelu 2*, mnohdy i výrazněji.

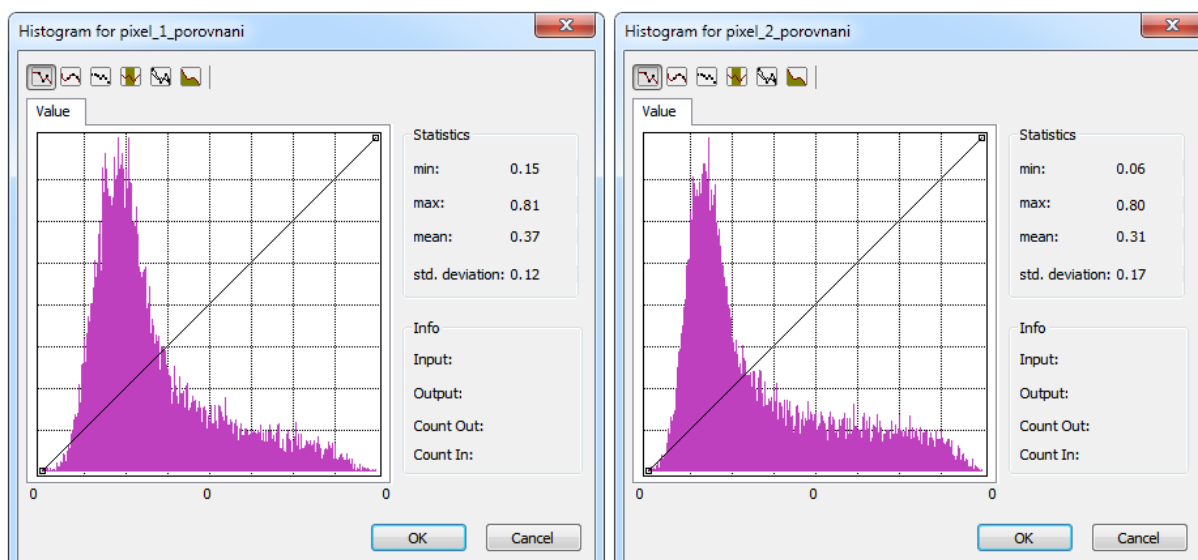
Pro ukázkou byly vybrány dva pixely 10x10 metrů s téměř identickým plošným zastoupením vegetace (pixel-1 s 21,10% zastoupením; pixel-2 s 21,14% zastoupením) a rozdílnou průměrnou hodnotou *NDVI* (pixel-1 0,37; pixel-2 0,31).



Obrázek 44 Demonstrace rozdílných hodnot pod hraniční hodnotou definující vegetaci (pixel-1)



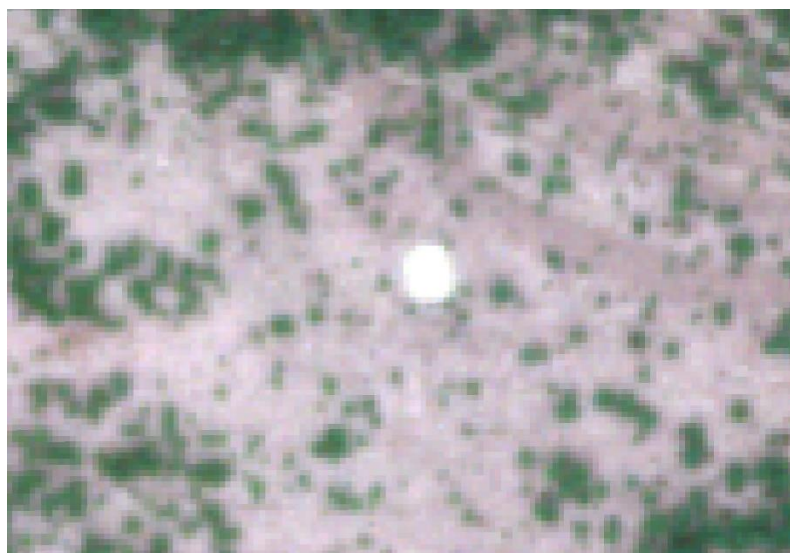
Obrázek 45 Demonstrace rozdílných hodnot pod hraniční hodnotou definující vegetaci (pixel-2)



Obrázek 46 Histogramy prezentovaných pixelů (vlevo pixel-1, vpravo pixel-2)

9 Hodnocení kvality náletu

V případě dat kamery *RedEdge-M* z jarního náletu (při podzimním nebyly aplikovány) lze terče vlíčovacích bodů pro referencování vizuálně dohledat, ale nejsou softwarově detekovatelné, jsou zobrazovány pouze jako bílé čtverce i přes kalibraci reflektance. Je tedy nutné umisťovat *markery* ručně do středu čtverců. Pro případné další nálety stejných letových parametrů by bylo vhodné využít vlíčovací body s terčí s minimální velikostí průměru alespoň 1 metr.



Obrázek 47 Nedetekovaný marker pro georeferencing

Ostrost a kvalita podzimního i jarního náletu je v celé ploše území konstantní. Deformované nebo rozmazané úseky se vyskytují pouze na snímaných překryvech v dostatečné vzdálenosti od hranice testovaného pozemku, kde dochází k obratu bezpilotního letounu.

10 Závěr

Bakalářská práce hodnotí využitelnost družicových dat ve stanovení plošného pokryvu vegetací pozemku zemědělského půdního fondu na základě vypočtených průměrných hodnot *NDVI* v jednotlivých pixelech z poskytovaných spektrálních pásem. Dále udává stručný postup zpracování dat pořízených technologií *RPAS*, nasnímaných multispektrální kamerou *RedEdge-M*, pro stanovení plošného zastoupení. Ke zpracování surových dat byly využity softwary *Agisoft PhotoScan Pro* a *ArcMap*. Pro tento účel byly provedeny dva nálety 16. října 2018 a 11. dubna 2019. Družicová data byla získána ve webové aplikaci *Land Viewer* přes univerzitní licenci ČVUT. Jako nejvhodnější data pro analýzu byly zvoleny snímky družice *Sentinel 2* se stupněm úpravy *L2A* (atmosférická korelace).

První část práce seznamuje s vybraným testovacím územím. Dále se zabývá úvodem do problematiky reflektance rostlin pro výpočet vegetačních indexů, které jsou základem pro stanovení plošného zastoupení. Další částí je stručná rešerše použité technologie pro snímání dat.

V následující pasáži práce byl vypracován postup zpracování surových dat kamery *RedEdge-M* softwarem *Agisoft Photoscan Pro*. Dle univerzálního návodu lze zpracovat veškerá multispektrální data v rovině 2D. Dále jsou uvedeny formou postupu základní úkony v aplikaci *ArcMap* nezbytné pro požadovanou analýzu multispektrálních dat kamery *RedEdge-M* a družice *Sentinel 2*. Testování bylo provedeno na celém vybraném území zemědělského půdního fondu. Na základě vizuálního zkoumání zpracovaných multispektrálních dat s *RGB* daty pořízenými *Mavicem 2 Pro* a kamerou *SONY R10C*, byly stanoveny hraniční hodnoty *NDVI*, pro které je možné považovat pixel za listovou plochu. Díky tomu bylo možné s vysokou přesností určit reálný pokryv vegetací. Pro podzimní data byla tato hraniční hodnota určena na 0,45. Pro jarní nálet byla hodnota stanovena na 0,55.

V poslední, zásadní části je vypracována podrobná analýza zpracovaných dat, respektive porovnání všech zpracovaných výstupů. V rámci testování variability hodnot ve vztahu k rozlišení byl vybrán v zájmové oblasti nejvíce reprezentativní čtverec o rozměrech 150x150 metrů, na kterém byly provedeny testy korelace hodnot *NDVI* z dat kamery *RedEdge-M* a plošného zastoupení vegetace v rozlišení 1x1, 2x2, 5x5 a 10x10 metrů. Pro podzimní i jarní data bylo dokázáno, že v případě nižšího rozlišení 5x5 a 10x10 metrů, byl rozptyl dvojnásobně nižší oproti vyššímu rozlišení 1x1 a 2x2 metrů a to pouhých 10 %. Obecně na celém území byla pro podzimní nálet dokázána v nízkých a středních hodnotách relativně uspokojivá shoda trendu dat *RedEdge-M* a *Sentinel 2*, přičemž družice vykazuje téměř dvojnásobný rozptyl 20 %. Tedy v této fázi je možné prohlásit, že pro analýzy velkých ploch, můžou družicová data relativně dobře, rychle a levně sloužit pro základní hrubé analýzy. Při hodnocení jarních dat v měřítku celého pozemku je ovšem výsledek odlišný. *NDVI* z tohoto období stanovené z družicových dat udává procentuální pokryvnost s rozptylem téměř 40 %. Při bližším rozboru na zmiňovaném testovacím čtverci 150x150 metrů, ve kterém se nenachází žádný z hraničních bodů, a tedy ani chyby s nimi spojené, je rozptyl družicových dat maximálně 25 %. Ovšem *NDVI* se pro rozmezí pokryvnosti 70 – 100 % pohybují kolem hodnoty 0,8 konstantním trendem. Je tedy zřejmé, že za předpokladu odfiltrování chybných hraničních pixelů, které vyžadují individuální rozbor, je dle těchto konkrétních analýz průkazná korelace hodnot *NDVI* a

plošného zastoupení pouze do pomyslné hranice 70 % pokryvu s průměrným rozptylem 20 %. Pro hodnoty pokrývnosti vyšší než 70 % jsou již hodnoty *NDVI* konstantního trendu v přibližném rozmezí 0,75 – 1,0. Na základě těchto předpokladů je možné tvrdit, že v případě vyšší hodnoty *NDVI* než 0,75 bude v daném pixelu více jak 70 % pokrývnost vegetací. Ovšem v tomto případě stanovit reálnou přesnější hodnotu plošného zastoupení je spíše nepravděpodobné.

Jak už bylo zmíněno, chyby v hraničních pixelech družicových dat mají pravděpodobný vznik v drobném posunu při změně souřadného systému či převzorkování do jiného rozlišení. Při této úvaze je zřejmé, že musí docházet k posunu i družicových dat v rámci testovací plochy. Chybovost zde ovšem není viditelná z důvodu homogenního charakteru plochy pole. Je tedy možné, že například vyšší rozptyl plošného zastoupení vegetace v jednotlivých pixelech pro hodnoty *NDVI* družicových dat je způsoben právě tímto faktorem.

Nárůst populace, tedy i potřeba vyšší produkce potravin, střídání období sucha a přívalových dešťů, dopady na životní prostředí a další faktory jsou důvodem, proč se čím dál častěji přechází k preciznímu zemědělství. Moderní technologie umožňují nejen přesné vedení zemědělských strojů, nýbrž i plošnou distribuci potřebné dávky hnojiv, závlahy apod. Zmiňované aspekty vedou k šetrnějšímu chování vůči životnímu prostředí nebo například ke snížení nákladů zemědělce. Tyto systémy využívají mapy obsahující informaci o heterogenitě pozemku, kterou je možné definovat právě pomocí dálkového průzkumu země. Proto je žádoucí věnovat této problematice patřičnou pozornost.

11 Seznam použité literatury

- Agisoft. (2018). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4. Dostupná z https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf
- Applied Aeronautics. (2019). Sony R10C Mapping Camera - Applied Aeronautics [online]. Získáno 6. května 2019, z <http://store.appliaeronautics.com/sony-r10c-mapping-camera/>
- Báčová, M. (2018). Monitoring projevů vodní eroze na zemědělských půdách. Praha, České vysoké učení technické v Praze. Dostupná z <http://hdl.handle.net/10467/78527>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. Dostupná z <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- ČÚZK. (2019). Nahlížení do katastru nemovitostí [online]. Získáno 6. května 2019, z <https://nahliznidokn.cuzk.cz/>
- DJI. (2018). Mavic 2 Pro, Quick Start Guide. Dostupná z https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2/20181229/Mavic_2_Pro_Quick_Start_Guide_EN.pdf
- Dratva, P. (2018). Časoprostorové analýzy typu a stavu zemědělských plodin z dat Sentinel-2. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci. Dostupná z <https://theses.cz/id/uaqin5>
- eAGRI. (2019). Veřejný registr půdy – LPIS [online]. Získáno 7. května 2019, z <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>
- Gisat. (2019a). Gisat / Družicová data [online]. Získáno 26. dubna 2019, z <http://www.gisat.cz/content/cz/druzicova-data>
- Gisat. (2019b). Gisat / Přehled družicových systémů / Landsat 8 [online]. Získáno 25. dubna 2019, z <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/satelite/landsat-8>
- Govaerts, B., & Verhulst, N. (2010). The normalized difference vegetation index (NDVI) Greenseeker (TM) handheld sensor: toward the integrated evaluation of crop management. Part A-Concepts and case studies. International Maize and Wheat Improvement Center. Dostupná z <http://plantstress.com/methods/Greenseeker.PDF>
- Lukas, V., Ryant, P., Dryšlová, T., & Gnip, P. (2011). Tvorba aplikačních map pro základní hnojení plodin v precizním zemědělství. Brno, Mendelova univerzita v Brně. ISBN: 978-80-7375-561-4
- MEGAPIXEL. (2019). Sony 16mm f/2,8 SEL Megapixel [online]. Získáno 6. května 2019, z <https://www.megapixel.cz/sony-16mm-f28-sel/recenze#product-sec-param>
- MicaSense. (2017). Multispectral Camera User Manual. Dostupná z http://www.leptron.com/manuals/RedEdge-M_User_Manual.pdf

- MicaSense. (2019). Sequoia weigh and dimensions – MicaSense Knowledge Base [online]. Získáno 6. května 2019, z <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/217116987-How-much-does-Sequoia-weigh-and-what-are-its-dimensions->
- Místecký, S. (2015). Hodnocení vývoje vybraných zemědělských plodin z dat multispektrální kamery Tetracam ADC. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci. Dostupná z <https://theses.cz/id/3v3i2i/>
- Parrot. (2016). User guide of Parrot Sequoia. Dostupná z <https://www.manualslib.com/manual/1321911/Parrot-Sequoia.html>
- Qiong, Z., Wenjiang, H., Ximin, C., & Linyi, L. (2018). New Spectral Index for Detecting Wheat Yellow Rust. Dostupná z <https://doi.org/10.3390/s18030868>
- RobotWorld. (2019). RobotWorld.cz [online]. Získáno 25. dubna 2019, z <https://www.robotworld.cz/dji-mavic-2-pro>
- Sa, I., Popović, M., Khanna, R., et al. (2018). WeedMap: A Large-Scale Semantic Weed Mapping Framework Using Aerial Multispectral Imaging and Deep Neural Network for Precision Farming. Remote Sensing. Dostupná z <https://doi.org/10.3390/rs10091423>
- SURVIA. (2019). SURVIA - drony ve službách zemědělství a průmyslu [online]. Získáno 22. února 2019, z <http://www.survia.cz/cz/o-survia-firma>
- USGS. (2017). Landsat 8 [online]. Získáno 25. dubna 2019, z https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- USGS. (2019). Landsat 8 band designations [online]. Získáno 25. dubna 2019, z <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-band-designations>
- Zhang, H. K., Roy, D. P., Yan, L., et al. (2018). Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. Remote Sensing of Environment. Dostupná z <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>
- Žubrietovský, L., Švábová, L., & Šváb, O. (2017). Sentinel 2 – datové specifikace. Dostupná z <http://collgs.czechspaceportal.cz/sentinel-2-datove-specifikace/>

12 Seznam obrázků

Obrázek 1 Mapa širších vztahů (zdroj ZM10: ČÚZK)	10
Obrázek 2 Mapa testovací plochy (zdroj ZM10: ČÚZK).....	11
Obrázek 3 Typické spektrum odrazivosti zdravé a stresované rostliny (Govaerts & Verhulst, 2010).....	13
Obrázek 4 DJI Mavic 2 Pro (RobotWorld, 2019).....	15
Obrázek 5 pevné křídlo Raptor (autor: Ing. Tomáš Laburda).....	16
Obrázek 6 vlevo RGB kamera Sony R10C (Applied Aeronautics, 2019), vpravo objektiv SEL-16F28 (MEGAPIXEL, 2019)	17
Obrázek 7 Funkce a připojení kamery RedEdge M (MicaSense, 2017).....	18
Obrázek 8 Rozměry kamery Sequoia a jejího slunečního sensoru (MicaSense, 2019).....	19
Obrázek 9 Vizualizace družice Landsat 8 (USGS, 2017).....	21
Obrázek 10 Start (vlevo) a vizualizace (vpravo) Sentinelu 2A (Žubrietovský et al., 2017).....	22
Obrázek 11 Dialogové okno Project Rasteru pro změnu souřadného systému	22
Obrázek 12 Dialogové okno pro kalibraci reflektance snímků.....	24
Obrázek 13 Správně detekovaný reflektanční panel	25
Obrázek 14 Dialogové okno pro tvorbu řídkého mračna bodů	26
Obrázek 15 Dialogové okno pro vytvoření hustého mračna bodů	28
Obrázek 16 Dialogové okno pro vytvoření polygonové sítě	28
Obrázek 17 Dialogové okno pro vytvoření digitálního modelu terénu	29
Obrázek 18 Dialogové okno pro vytvoření ortofota	30
Obrázek 19 Rozdíl výsledného ortofota dle zdrojových dat (vlevo dle DEM, vpravo dle Mesh)	30
Obrázek 20 Výpočet vegetačního indexu NDVI v Raster Calculator	31
Obrázek 21 Dialogové okno exportu ortomozaiky s vypočteným NDVI	32
Obrázek 22 Tabulka vložených souřadnic	33

Obrázek 23 Ruční georeferencování (oblast překryvu, Řisutský rybník)	33
Obrázek 24 Výpočet vegetačního indexu pomocí Raster Calculatoru (zdrojová data: dem) ..	34
Obrázek 25 Rozdíl ortomozaik vytvořených dle různých zdrojových dat (vlevo dle dem, vpravo dle mesh)	35
Obrázek 26 Srovnání ortomozaiky z RedEdge vůči ortomozaice z Mavic (vlevo ortomozaika dle dem, vpravo Mavic)	35
Obrázek 27 Srovnání ortomozaiky z RedEdge vůči ortomozaice z Mavic (vlevo ortomozaika dle mesh, vpravo Mavic)	35
Obrázek 28 Lokace kamery RedEdge-M a snímkové překrytí (podzimní nálet)	36
Obrázek 29 Digitální model terénu	36
Obrázek 30 Zpracovaná data kamery RedEdge-M (podzimní nálet)	37
Obrázek 31 Vypočítané NDVI z dat kamery RedEdge-M (podzimní nálet)	37
Obrázek 32 Lokace kamery RedEdge-M a snímkové překrytí (jarní nálet)	38
Obrázek 33 Zpracovaná data kamery RedEdge-M (jarní nálet)	38
Obrázek 34 Vypočítané NDVI z dat kamery RedEdge-M (jarní nálet)	39
Obrázek 35 Plošné zastoupení vegetace v závislosti na hodnotě NDVI (vlevo podzim 0,45 / vpravo jaro 0,55)	41
Obrázek 36 Dialogové okno reklasifikace rastrových dat	42
Obrázek 37 Dialogové okno pro převzorkování rastrových dat	42
Obrázek 38 Dialogové okno pro převzorkování dat - nastavení snappingu na specifickou vrstvu	43
Obrázek 39 Hraniční pixely s nehomogenní plochou (jarní nálet)	44
Obrázek 40 Rozdíl v poskytovaném a vypočteném NDVI z družice Sentinel 2 (podzimní nálet)	46
Obrázek 41 Rozdíl v poskytovaném a vypočteném NDVI z družice Sentinel 2 (jarní nálet)	47
Obrázek 42 Umístění testovacího čtverce v rámci území (ukázka na podzimním náletu)	48
Obrázek 43 Příklad hraničního pixelu v pořadí zleva data kamery RedEdge-M a vypočítané NDVI z dat RedEdge-M (jarní nálet)	55

Obrázek 44 Demontrace rozdílných hodnot pod hraniční hodnotou definující vegetaci (pixel-1).....	60
Obrázek 45 Demontrace rozdílných hodnot pod hraniční hodnotou definující vegetaci (pixel-2).....	60
Obrázek 46 Histogramy prezentovaných pixelů (vlevo pixel-1, vpravo pixel-2).....	61
Obrázek 47 Nedetekovaný marker pro georeferencing	61

13 Seznam tabulek

Tabulka 1 Spektrální pásma snímané kamerou RedEdge M (Sa et al., 2018).....	18
Tabulka 2 Spektrální pásma a rozlišení družice Landsat 8 (USGS, 2019).....	20
Tabulka 3 Spektrální pásma a rozlišení sensoru MSI Sentinelu 2 (Qiong, Wenjiang, Ximin, & Linyi, 2018)	21

14 Seznam grafů

Graf 1 Porovnání šířky spektrálních pásem Sentinelu 2, Landsat 8 a kamery RedEdge-M	40
Graf 2 Porovnání šířky pásem NIR snímaných kamerou RedEdge-M a Sentinelem 2	40
Graf 3 Porovnání šířky pásem NIR snímané družicemi Sentinel 2 a Landsat 8.....	43
Graf 4 Porovnání hodnot NDVI v jednotlivých pixelech z družicových dat Sentinel 2 (podzimní nálet)	45
Graf 5 Porovnání hodnot NDVI v jednotlivých pixelech z družicových dat Sentinel 2 (jarní nálet).....	45
Graf 6 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 1 m (RedEdge-M, podzim)	49
Graf 7 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 2 m (RedEdge-M, podzim)	49
Graf 8 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 5 m (RedEdge-M, podzim)	50
Graf 9 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 10 m (RedEdge-M, podzim)	50

Graf 10 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, RedEdge-M, podzim).....	51
Graf 11 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, Sentinel 2, podzim)	51
Graf 12 Porovnání vztahu hodnoty NDVI s procentuálním plošným zastoupením vegetace (celé území, pixelové rozlišení 10 m, podzimní nálet)	52
Graf 13 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 1 m (RedEdge-M, jaro)	53
Graf 14 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 2 m (RedEdge-M, jaro)	53
Graf 15 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 5 m (RedEdge-M, jaro)	54
Graf 16 Korelace průměrných hodnot NDVI a plošného zastoupení vegetace v pixelovém rozlišení 10 m (RedEdge-M, jaro)	54
Graf 17 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, RedEdge-M, jaro)	56
Graf 18 Krabicový graf porovnání hodnot NDVI v deseti procentních rozmezí vegetačního pokryvu (celé území, pixelové rozlišení 10 m, Sentinel 2, jaro)	56
Graf 19 Porovnání vztahu hodnoty NDVI s procentuálním plošným zastoupením vegetace (celé území, pixelové rozlišení 10 m, jarní nálet)	57
Graf 20 Vztah hodnot NDVI a plošného zastoupení v testovacím čtverci 150m (podzim, rozlišení 10 m)	58
Graf 21 Vztah hodnot NDVI a plošného zastoupení v testovacím čtverci 150m (jaro, rozlišení 10 m).....	58
Graf 22 Procentuální nárůst vegetace z podzimního na jarní období (v rámci reprezentativního čtverce 150x150m, pixelové rozlišení 10 m)	59