



Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

POROVNÁNÍ VYBRANÝCH VEGETAČNÍCH INDEXŮ A URČENÍ JEJICH VHODNOSTI PRO POPIS VARIABILITY VÝNOSU NA ZEMĚDĚLSKÉM POZEMKU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Mgr. Jitka KUMHÁLOVÁ, Ph.D.

Diplomant: Bc. Kateřina KŘÍŽOVÁ

2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kateřina Křížová

Aplikovaná ekologie

Název práce

Porovnání vybraných vegetačních indexů a určení jejich vhodnosti pro popis variability výnosu na zemědělském pozemku

Název anglicky

Comparison of selected vegetation indices and determination of suitability for yield description on agricultural field

Cíle práce

- zpracovat rešerši k problematice určení vhodnosti vegetačních indexů pro popis variability výnosu na zemědělském pozemku
- spočítat vhodné vegetační indexy
- porovnat vybrané vegetační indexy s výnosovými a topografickými mapami
- zhodnotit jejich využití v dané problematice
- formulace závěru

Metodika

Nejprve se autorka seznámí s problematikou výběru a aplikace vegetačních indexů pro popis variability výnosu na zemědělském pozemku a zpracuje na toto téma literární rešerši. V praktické části vybrané vegetační indexy spočítá a namodeluje je společně na experimentálním pozemku s vybranými topografickými atributy a výnosem v daných letech s ohledem na meteorologické podmínky. Na základě porovnání a statistické analýzy zhodnotí možnosti využití vybraných vegetačních indexů pro určení variability výsledného výnosu. Výsledky práce by měly zdůvodnit variabilitu výnosu plodin ve sledovaných letech. V diskuzi autorka zhodnotí a porovná výsledky své práce s odbornou literaturou. Řešení praktické části diplomové práce počítá s využitím geografických informačních systémů, především SW ArcGIS a ENVI.

Doporučený rozsah práce

40 – 80 stran

Klíčová slova

vegetační indexy, výnos, topografie, dálkový průzkum Země

Doporučené zdroje informací

- BÉGUÉ, A., TODOROFF, P. & PATER, J. (2008). Multi-time scale analysis of sugarcane within-field variability: improved crop diagnosis using satellite time series? *Precision Agriculture*, 9, 161-171.
- HUNT JR., E. R., DORAISWAMY, P. C., MCMURTREY, J. E., DAUGHTRY, C., S., T., PERRY, E. M. & AKHMEDOV, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103-112.
- JONES, H. G. & VAUGHAN, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press, Oxford, New York.
- KUMHÁLOVÁ, J., KUMHÁLA, F., KROULÍK, M. & MATĚJKOVÁ, Š. (2011). The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 12(6), 813-830.
- KUMHÁLOVÁ, J., ZEMEK, F., NOVÁK, P., BROVKINA, O. & MAYEROVÁ, M. (2014). Use of Landsat images for yield evaluation within a small plot. *Plant Soil Environment*, 60(11), 501-506.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

Vedoucí práce

Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 24. 3. 2016

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2016

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně, pod vedením vedoucí práce a s použitím uvedených zdrojů.

V Praze, dne 19.4.2016

.....

Poděkování

Za laskavé vedení a cenné rady děkuji vedoucí práce Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D.. Za konzultaci výsledků pak děkuji Ing. Petru Novákovi, Ph.D.. V neposlední řadě patří poděkování také kolegům Bc. Markétě Ladmanové za konzultace věcných náležitostí práce a Bc. Rostislavu Lindovi za konzultace v oblasti statistického zpracování dat.

V Praze , dne 19.4.2016

.....

Abstrakt

Výpočet vegetačních indexů (VI) je jednou z metod, jak efektivně hodnotit stav sledované vegetace. Jedná se o nedestruktivní a nízkonákladový přístup, jehož výsledky zásadně napomáhají při plánování agronomického managementu zemědělského pozemku.

Předkládaná práce se zabývá určením vhodnosti vybraných VI pro popis variability výnosu zemědělských plodin s přihlédnutím k topografickým atributům území a meteorologickým podmínkám. Studijním územím byl pozemek o rozloze 11.5 ha, přičemž k výpočtu VI byly využity družicové snímky systému LANDSAT 5 s prostorovým rozlišením 30 m. Analýza byla prováděna pro roky 2005 a 2011, kdy byla pěstována *pšenice ozimá*, a roky 2006 a 2010, kdy byl pěstován *oves*. S využitím SW ENVI a ArcGIS byly získány hodnoty jednotlivých VI, které umožnily provedení statistické analýzy. Výsledky této analýzy ukazují na silnou míru korelace mezi všemi vybranými VI a výnosem, respektive topografickým faktorem. Lze tedy říci, že vybrané VI jsou vhodné k popisu variability výnosu na zemědělském pozemku.

Klíčová slova

Vegetační indexy, výnos, topografie, dálkový průzkum Země

Abstract

Calculation of vegetation indices (VI) is an effective method how to evaluate a condition of a monitored vegetation. It is a non-destructive and low-cost approach and its results are crucial for planning agronomic management within a monitored field.

Diploma thesis deals with the determination of suitability of selected VI to describe the yield variability related to topographic attributes and weather conditions. The study area was a 11.5 ha field. To derive selected VI LANDSAT 5 images with a spatial resolution of 30 m were used. These images were taken in years 2005 and 2011 for *winter wheat* and in years 2006 and 2010, when *oat* was grown. SW ENVI and ArcGIS were used to obtain specific values. Those were used for statistical analysis. The results indicated a strong relationship between all selected VI and yield, respectively topographic factor. Selected VI derived from LANDSAT 5 images can be used to describe yield variability over a monitored field.

Key words

Vegetation indices, yield, topography, remote sensing

OBSAH

1. ÚVOD	11
2. CÍLE.....	12
3. METODIKA	13
3.1 Zdroj a zpracování topografických dat.....	13
3.2 Zdroj a zpracování výnosových dat	13
3.3 Zdroj a zpracování družicových dat.....	14
3.4 Statistické zpracování dat	15
4. LITERÁRNÍ REŠERŠE	16
4.1 Dálkový průzkum Země.....	16
4.2 Historie DPZ	16
4.2 Fyzikální podstata DPZ	17
4.2.1 Elektromagnetická vlna.....	18
4.2.2 Elektromagnetické spektrum.....	18
4.2.3 Zdroje záření.....	20
4.2.4 Interakce elektromagnetického záření s prostředím	20
4.2.4.1 Interakce elektromagnetického záření s vegetačním povrchem	21
4.2.4.2 Interakce elektromagnetického záření s atmosférou	23
4.2.4.3 Atmosférické korekce	24
4.3 Možnosti snímání povrchu Země	24
4.3.1 Nosná zařízení operující ve vzduchu	25
4.3.2 Umělá vesmírná tělesa	25
4.3.3 Družicový systém LANDSAT	26
4.3.4 Multispektrální skener	27

4.3.5 Thematic Mapper	28
4.4 Zpracování dat DPZ	28
4.4.1 Analogová forma záznamu	29
4.4.2 Digitální forma záznamu	29
4.4.2.1 Vlastnosti digitálního záznamu	30
4.5 Vegetační indexy	31
4.5.1 Broadband Greenness	32
4.5.1.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	32
4.5.1.2 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	33
4.5.1.3 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	33
4.5.1.4 Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	33
4.5.1.5 Simple Ratio (SR)	34
4.5.1.6 Enhanced Vegetation Index (EVI)	34
4.5.1.7 Leaf Area Index (LAI)	34
4.5.1.8 Chlorophyll Vegetation Index (CVI)	35
4.5.2 Canopy Water Content	35
4.5.2.1 Moisture Stress Index (MSI)	35
4.6 Topography Wetness Index (TWI)	36
4.7 Software pro zpracování dat	36
4.8 Precizní zemědělství	38
5. Charakteristika studijního území	39
5.1 Lokalita	39
5.2 Půdní a meteorologické podmínky	39
5.3 Plodiny	39
6. Výsledky	40

7. Diskuse	42
8. Závěr.....	45
9. Přehled literatury a použitých zdrojů	46
9.1 Literární zdroje	46
9.2 Internetové zdroje.....	48
9.3 Software	49
10. Přílohy.....	50

1. ÚVOD

Fakt, že si vývoj světové populace stále udržuje vzrůstající tendenci, dokazují i nejnovější odhady OSN. V červenci roku 2015 dosahovala světová populace 7.3 mld obyvatel, přičemž odhady pro rok 2030 činí 8.5 mld, 11.2 mld pak pro rok 2100 (United Nations, 2015). S nárůstem světové populace úzce souvisí i otázka udržitelnosti zdrojů. Poptávka po kvalitních surovinách se zvyšuje, zatímco prostor pro jejich produkci zůstává prostorově omezený (Zhang, 2015). Otázku dostatku a udržitelnosti zdrojů je tak třeba řešit změnou přístupu a využitím nejnovějších poznatků a moderních technologií ke zvýšení efektivity především primární produkce. V posledních třech dekadách se této problematice věnuje tzv. *Přesná zemědělství* (PZ). Družicové snímky poskytují řadu cenných informací o snímaném území a moderní technologie a software umožňují s těmito informacemi pracovat ve prospěch dalšího rozvoje metod PZ. Výpočet vegetačních indexů je jednou z těchto možností. Ve vědecké literatuře již bylo popsáno cca 150 různých indexů, z nichž každý byl vyvinut tak, aby byl citlivý pro jinou charakteristiku vegetačního pokryvu (Harris, 2016a). Porovnání výsledných hodnot s topografickými a meteorologickými faktory pak umožňuje lépe rozvrhnout agronomický management, což s sebou nese snížení finanční náročnosti a environmentálního dopadu zemědělské činnosti a zároveň zvýšení efektivity její produkce (Kumhálová et al., 2014; Zhang, 2015).

2. CÍLE

Cílem diplomové práce je v první řadě zpracování literární rešerše, která bude tvořit teoretický podklad pro pochopení praktické části práce. Rešerše by měla shrnout současné poznatky v oblasti dálkového průzkumu Země a dále se věnovat problematice vegetačních indexů.

Praktická část diplomové práce si pak klade za cíl vybrané vegetační indexy spočítat s využitím vhodného SW. Bude provedena statistická analýza, při které budou jednotlivé vegetační indexy porovnány s hodnotami výnosů a topografickými charakteristikami území. Výsledky této analýzy budou dále prezentovány s přihlédnutím k meteorologickým podmínkám. Na základě výsledků pak bude možné formulovat závěr, zda jsou vybrané vegetační indexy vhodné pro popis variability výnosu zemědělského pozemku.

3. METODIKA

Teoretickou část diplomové práce tvoří literární rešerše, která je základem pro lepší pochopení části praktické. Jsou zde popisovány metody získávání informací o objektech a jevech na zemském povrchu (DPZ), jejich principy a možnosti využití. Při zpracování literární rešerše byly využity české i cizojazyčné literární zdroje, které byly dále doplněny relevantními internetovými zdroji.

Praktická část se pak opírala především o odborné články, které se věnují podobné problematice.

3.1 Zdroj a zpracování topografických dat

Data pro popis topografických charakteristik studijního území byla poskytnuta Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním.

Údaje o nadmořské výšce získané systémem LiDAR byly dále zpracovány v prostředí ArcGIS (ArcGIS 10.1). Data byla interpolována metodou *inverse distance weighing* (IDW), čímž byl vytvořen digitální model terénu (*digital elevation model* (DEM)). DEM dále sloužil jako vstupní vrstva pro vytvoření rastrů reprezentujících sklon terénu (*slope model*(SM)) a akumulaci vody v území (*flow accumulation model* (FAM)), které kromě vlastních popisných vlastností slouží jako vstup pro vytvoření rastru *topography wetness index* (TWI) (Kumáhlová et al., 2015).

Pro možnost porovnání TWI s jednotlivými VI byl nezbytný jeho převod na stejné, tedy 30 m rozlišení. Tato konverze byla provedena v programu ArcGIS (ArcGIS 10.2) s pomocí funkce *Resample*. Výsledek této úpravy je prezentován obrázkem č.1.

3.2 Zdroj a zpracování výnosových dat

Údaje o výši výnosu jednotlivých plodin ve zkoumaném období byly poskytnuty Výzkumným ústavem rostlinné výroby, v.v.i..

Data o výnosu jsou zde získávána pomocí sklízecí mlátičky, která je vybavena monitorem výnosu LH 500 a dále přijímačem DGPS (*Differential Global Positioning*

System) a korektorem EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*). Kumhálová et al. (2011) uvádí, že přesnost tohoto systému je ± 0.1 až 0.3 m horizontálním a ± 0.2 až 0.6 vertikálním směrem. Údaje o výnosu jsou zaznamenávány palubním počítačem, který je také součástí sklízecí mlátičky. Data jsou ukládána každé 3 s společně s jejich zeměpisnými souřadnicemi. Zároveň je kontinuálně měřena i vlhkost obilných zrn, kterou je nutno zohlednit při následném přepočtu na čistý výnos plodiny (Kumáhlová et al., 2015). Data byla dále převedena na 30 m prostorové rozlišení užitím funkce *Resample* v programu ArcGIS (ArcGIS 10.2). Výsledné rastry reprezentující výnosy plodin ve sledovaných letech jsou prezentovány obrázkem č.2.

3.3 Zdroj a zpracování družicových dat

Praktická část diplomové práce byla založena na práci s družicovými snímky. Pro každou z vybraných plodin (*pšenice ozimá, oves*) byly k dispozici dva snímky, každý z jiného roku, kdy byla plodina pěstována (tabulka č.1).

Data poskytnutá vědeckovýzkumnou agenturou USGS (*United States Geological Survey*) byla pořízena družicovým systémem LANDSAT 5 s prostorovým rozlišením 30 m (Kumáhlová et al., 2015).

K výpočtu vybraných vegetačních indexů (VI) byl využit software ENVI (ENVI 5.3). Pro účely diplomové práce bylo vybráno devět VI (bližší popis viz kapitola 4.5):

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
2. Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)
3. Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)
4. Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI)
5. Simple Ratio Vegetation Index (SRVI)
6. Enhanced Vegetation Index (EVI)
7. Leaf Area Index (LAI)
8. Moisture Stress Index (MSI)
9. Chlorophyll Vegetation Index (CVI)

Postup výpočtu byl proveden ve čtyřech opakováních, vždy totožně pro každý ze čtyř družicových snímků. Snímek byl v programu nejprve načten a vizualizován ve viditelném spektru (RGB). Dále byl zvolen *Region of Interest*, který tvořila

polygonová vrstva zkoumaného pozemku. Tímto krokem byl zajištěn průběh výpočtu pouze v rámci zájmové plochy.

Vlastní výpočet pak umožnil nástroj *Band Math*, zadáním matematického vztahu pro vybraný VI. S pomocí nástroje *Layer Stacking* byl pak výsledný index přiřazen k družicovému snímku jako jedno z jeho pásem. Pro možnost následného zpracování dat v programu ArcGIS byl výsledný rastr VI uložen pomocí nástroje *Convert Interleave* ve formátu *.BIL.

Konkrétní hodnoty VI byly získány dalším zpracováním v programu ArcGIS (ArcGIS 10.2). Do mapového dokumentu byly načteny rastrové vrstvy všech devíti VI spolu s rastrem výnosu a rastrem TWI, vždy pro každý sledovaný rok. Rastry VI byly nejprve oříznuty (*Extract by Mask*) podle rastru výnosu, čímž byly získány rastry o stejném počtu pixelů (130). Další postup zahrnoval převedení rastru výnosu na bodovou vrstvu (*Raster to Point*), kdy každý bod nesl hodnotu původního pixelu, a přiřazení hodnot VI a TWI do atributové tabulky bodové vrstvy (*Extract Multi Values to Point*). Výsledkem byla tabulka obsahující hodnoty všech vstupních rastrů, která byla dále exportována do formátu *.XLS. Tento postup byl opět opakován pro každý sledovaný rok.

Zároveň byly vytvořeny mapové výstupy prezentující výsledné VI v grafické formě (obrázky č.3, 4, 5 a 6).

3.4 Statistické zpracování dat

Tabulky s hodnotami VI, TWI a výnosů pro jednotlivé roky byly dále statisticky zpracovány v prostředí R (R Core Team, 2015).

Provedením sumarizace byla získána základní popisná statistika dat.

Dále byla vypočítána míra korelace mezi hodnotami:

- výnos – jednotlivé VI
- TWI – jednotlivé VI
- TWI – výnos

Hodnoty *Pearsonova korelačního koeficientu* a příslušné hodnoty *p-value* byly následně zpracovány do tabulky (tabulky č.2 a 3).

4. LITERÁRNÍ REŠERŠE

4.1 Dálkový průzkum Země

Termínem „*Dálkový průzkum Země*“ (DPZ) se označuje soubor technik, které umožňují získávání informací o objektech a jevech na zemském povrchu aniž by bylo třeba jakéhokoliv fyzického kontaktu. V posledních letech se tyto metody dostávají do stále širšího povědomí veřejnosti, neboť jejich využití je s postupným vývojem technologií jednoduché a ekonomicky stále méně náročné (Dobrovolný, 1998).

Obecně lze problematiku DPZ rozdělit na dva subsystémy. Podstatou prvního je sběr dat ve formě snímku. Snímky jsou pořizovány pomocí záznamových zařízení, které mohou být nesené různými typy nosičů, nejčastěji pak družicemi nebo letadly (Dobrovolný, 1998). Záznamové přístroje zaznamenávají intenzitu elektromagnetického záření v různých intervalech vlnových délek, přičemž výsledná data jsou dále analyzována (Richards, 1993). Analýza a interpretace dat tak tvoří druhý subsystém DPZ (Dobrovolný, 1998).

Velký význam je těmto metodám přisuzován v rámci studia vegetace. Snímkování a následná analýza spojená se znalostmi spektrálního chování vegetačního povrchu umožňuje studovat mnohé charakteristiky vegetačního pokryvu. Zásadní výhodou je zde fakt, že se jedná o metody nedestruktivní, čímž je umožněno provádění analýzy opakovaně, například v různých fenologických fázích zkoumaného porostu (Jones et Vaughan, 2010).

4.2 Historie DPZ

Počátky vývoje DPZ lze v určitém smyslu datovat již do období 1. a 2. světové války, kdy bylo pro různé účely prováděno letecké snímkování. V první řadě šlo o účely vojenské, ovšem snímky našly uplatnění i v zemědělství či lesnictví. Zásadní obrat v rozvoji těchto technik však přišel v 50. letech 20. století spolu s rozvojem raketových programů (Dobrovolný, 1998).

Za počátek satelitní éry je považováno vypuštění vesmírné družice Sputnik roku 1957, které současně s vývojem elektronických detektorů otevřelo nové možnosti snímkování zemského povrchu. V pozdních 60. letech 20. století již několik

meteorologických institucí plně využívalo družicových dat pro svůj výzkum či předpověď počasí. V daném období se zatím jednalo o družice obíhající na tzv. nízké oběžné dráze Země (low-earth orbit (LEO)), kterými byly například družicové systémy ATS, GOES nebo METEOSAT. Za revoluční je pak považováno vypuštění družice ERTS-1, později přejmenované na LANDSAT 1, 23. července 1972 na blízkou polární dráhu. Ta na rozdíl od předchozích družic nenesla fotografická zařízení, ale elektronické detektory, které umožnili zvýšit rozlišení z 1 km na 80 m. Družicový systém LANDSAT tak v následujících letech pořídil velké množství cenných dat, které přispěly mj. k porozumění vegetačním procesům (Jones et Vaughan, 2010).

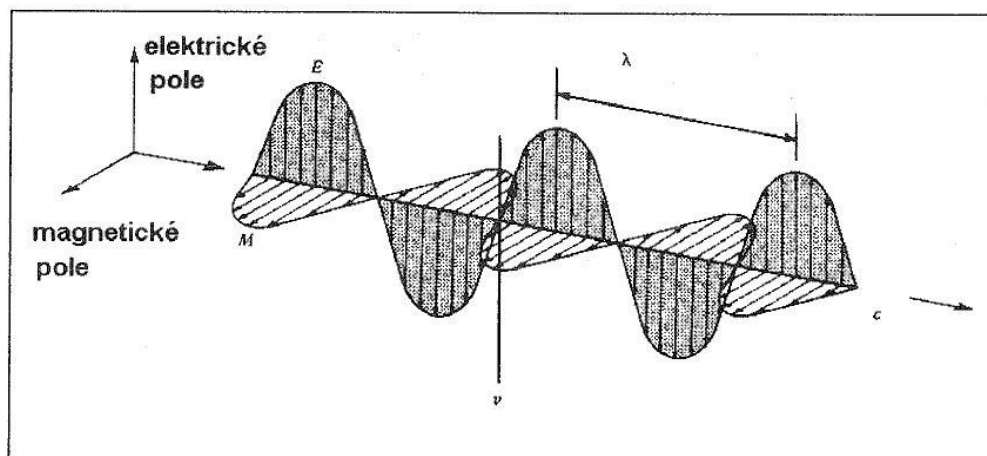
Za milníky v historii DPZ, které se týkají přímo studia vegetace, považují Jones et Vaughan (2010) v první řadě rok 1950, kdy Robert Cowell jako první využil infračervené spektrum leteckého snímku k určení druhu obilnin a jejich chorob. Ve stejné době docházelo také k rozvoji fotografické techniky zvané *fisheye (rybí oko)*, která umožňovala studium struktury vegetace. V počátcích 70. let 20. století se začalo s využíváním leteckých termálních skenerů pro studium stresu vegetace z nedostatku vláhy. V 90. letech 20. století pak dochází k rozvoji mnoha snímkovacích technik a poznatky spojené s fluorescenčními vlastnostmi chlorofylu začaly být plně využívány ke studiu rostlinných funkcí (Jones et Vaughan, 2010).

4.2 Fyzikální podstata DPZ

Metody DPZ jsou založeny na faktu, že každý objekt či jev na zemském povrchu o sobě vydává informace pomocí tzv. *silových polí*. Ta obsahují celou řadu charakteristik, které mohou být zaznamenávány a kvantifikovány. Elektromagnetické záření (dále jen „EMZ“) je jednou z forem silového pole a je pokládáno za základního nositele informací v oblasti DPZ (Dobrovolný, 1998). Jedním z projevů EMZ je tzv. *viditelné záření*, ke kterému je lidské oko citlivé a je tedy schopné v těchto vlnových délkách jeho charakteristiky detekovat. Dalšími projevy EMZ jsou pak *infračervené*, *ultrafialové* či *mikrovlnné záření*, pro které bylo třeba vyvinout speciální detektory k získávání pro ně specifických informací. Pro účely DPZ lze využívat i jiné formy silových polí, například akustické vlnění. Těchto postupů se však využívá jen zřídka, například pro měření charakteristik objektů a jevů pod hladinou vody (Jones et Vaughan, 2010).

4.2.1 Elektromagnetická vlna

Podstatou EMZ je šíření energie prostorem ve formě tzv. *elektromagnetické vlny* (obrázek č.7).



Obr.7: Schéma elektromagnetické vlny (Dobrovolný, 1998)

Schéma názorně dokládá složení elektromagnetické vlny ze dvou sinusoid:

- sinusoida E – elektrická vlna
- sinusoida M – magnetická vlna

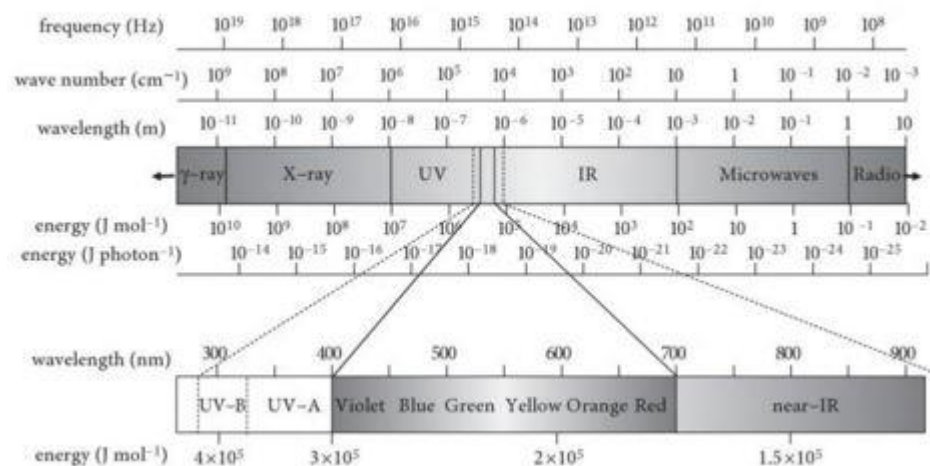
Tyto sinusoidy jsou na sebe navzájem kolmé, jsou rovnoběžné ve směru šíření a společně se šíří prostorem rychlostí světla c . Základními charakteristikami elektromagnetického vlnění pak jsou:

- *vlnová délka* λ , která charakterizuje vzdálenost mezi dvěma vrcholy elektromagnetické vlny
- *frekvence* ν , která udává počet vrcholů vlny procházející daným bodem za jednotku času.

Tyto veličiny jsou k sobě navzájem nepřímo úměrné (Dobrovolný, 1998).

4.2.2 Elektromagnetické spektrum

Rozsah vlnových délek a frekvencí EMZ je bezmála 20 řádů. Tento rozsah vytváří spektrum, které je konvenčně rozděleno na další subsystemy (obrázek č.8).



Obr.8: Elektromagnetické spektrum (Jones et Vaughan, 2010)

Nejčastěji využívanou oblastí spektra je *pásma viditelného záření (VIS)*, které se dále dělí na (Dobrovolný, 1998):

- Modré záření (0,4 – 0,5 μm)
- Zelené záření (0,5 – 0,6 μm)
- Červené záření (0,6 – 0,7 μm)

Následuje *pásma infračerveného záření (IR)*, které je se dále dělí podle vztahu vlnových délek k oblasti viditelného záření. Jedná se o (Kolář et al., 1997):

- blízké infračervené záření (0,72 – 1,3 μm)
- střední infračervené záření (1,3 – 4,0 μm)
- vzdálené infračervené záření (4,0 – 25 μm)

Dále je popisováno pásmo tzv. *submilimetrových vln*, které jsou velmi silně pohlcovány atmosférou a nejsou proto v DPZ příliš využitelné. Jedná se o vlnové délky větší než 25 μm a v oblasti nad 1 mm na ně navazuje *záření mikrovlnné (MW)*. Největší vlnovou délkou jsou pak charakterizovány *radiové vlny* (Kolář et al., 1997).

Na druhé straně spektra navazuje na viditelnou oblast *ultrafialové záření (UV)*, které je charakteristické kratšími vlnovými délkami a tedy vyšší frekvencí. Dále pak přechází v záření s ještě větší energií, kterým je *rentgenové (X-rays)* a dále *gama záření (γ)* (Jones et Vaughan, 2010).

4.2.3 Zdroje záření

Emitované elektromagnetické záření může být jednak přirozené a jednak produkované uměle. Dobrovolný (1998) na základě zdroje záření dělí metody sběru dat na *aktivní* a *pasivní*, přičemž pasivní metody jsou dále děleny na *přímé* a *nepřímé*.

Nejvýznamnějším přirozeným zdrojem elektromagnetického záření je Slunce, které je schopno emitovat $3,84 \cdot 10^{26}$ W čisté energie. Maximální vlnová délka dosahuje k 0,55 μm , ovšem průměrné hodnoty se pohybují v intervalu 0,3 – 0,4 μm . Slunce jako zdroj záření je podstatou přímých pasivních metod DPZ (Kolář et al., 1997).

Nepřímé pasivní metody DPZ jsou založeny na faktu, že každé těleso či hmota s teplotou vyšší, než je absolutní nula (0 K; $-273,16^\circ\text{C}$), emituje záření. To vzniká na základě vnitřních pohybů atomů a molekul, které se stoupající teplotou nabývají většího množství energie. Každý zdroj záření pak emituje specifické spektrum vlnových délek a intenzit, které lze dále analyzovat (Jones et Vaughan, 2010).

S umělými zdroji záření pak pracují aktivní metody DPZ, které využívají především radary, ale také lasery. Radar emituje energii ve formě krátkého pulsu, který tak vytvoří elektromagnetickou vlnu s velkým výkonem a především, čímž se liší od přírodních zdrojů, vlnu polarizovanou (Kolář et al., 1997).

4.2.4 Interakce elektromagnetického záření s prostředím

Pro správnou interpretaci dat z DPZ je nezbytné znát charakter změn EMZ při jeho interakcích s prostředím. Tyto změny způsobují tzv. *nehomogenity prostředí*. Těmi může být jakýkoliv hmotný objekt, ať už se jedná o atom nebo velké přírodní či umělé objekty nacházející se v atmosféře nebo na povrchu Země.

V okamžiku vlastní interakce tzv. *primární elektromagnetická vlna* vyvolává na povrchu kontaktní hmoty oscilační pohyb elektrických nábojů, které dále indukují vznik tzv. *sekundární elektromagnetické vlny*. Ta se od primární vlny liší svou intenzitou či energií, vlnovou délkou, polarizací a směrem šíření (Kolář et al., 1997). Sekundární elektromagnetická vlna se v závislosti na vlastnostech kontaktní hmoty může chovat třemi způsoby a to jako (Jones et Vaughan, 2010):

- *Odraz (Reflection)*: množství energie, které není hmotou absorbováno ani propuštěno, a je proto odraženo zpět do prostoru. Směr odraženého záření je pak určován především hrubostí povrchu vztáženou k vlnové délce. Hladké povrchy odrážejí záření zpravidla v úhlu rovném úhlu dopadu. V případě drsnějších povrchů každá nerovnost iniciuje jiný úhel dopadu, záření je proto při interakci rozkládáno a každá frakce odražena v jiném úhlu.
- *Propustnost (Transmission)*: energie procházející skrz kontaktní hmotu. V problematice DPZ je zemský povrch pokládán za nepropustný a proto může být tento komponent pomíjen. Ovšem při zaměření se na objekty a jevy v menším měřítku, jako jsou například vodní plochy nebo vegetační pokryv, poskytuje informace o rozptylu a absorpci, čímž umožňuje diagnostikovat řadu dalších vlastností daného povrchu.
- *Pohlcení (Absorption)*: množství energie, které je kontaktní hmotou pohlceno. Významné je zde především pohlcování energie ze slunečního záření. Ta je po dopadu přeměňována na energii tepelnou, v případě rostlin pak využita při fotosyntetických procesech. Úzká souvislost s primární produkcí biomasy, na které závisí většina forem života na Zemi, podtrhuje důležitost tohoto jevu.

V rámci DPZ je nejčastěji analyzován komponent odraženého záření. Právě jeho variabilita umožňuje rozlišovat různé typy materiálů na povrchu Země a dále studovat jejich vlastnosti (Jones et Vaughan, 2010).

Veličinou, která charakterizuje míru odraženého záření, je *spektrální odrazivost*. Ta dává do poměru množství odraženého a množství dopadajícího záření a v souvislosti s konkrétními vlnovými délkami určuje pro jednotlivé skupiny povrchů jejich tzv. *spektrální chování* (Dobrovolný, 1998). Kolář (1997) pak popisuje spektrální chování základních povrchů, jako je vegetační pokryv, voda či povrch bez vegetace, kam spadá půda a horniny a minerály.

4.2.4.1 Interakce elektromagnetického záření s vegetačním povrchem

Vegetační povrch a znalost jeho spektrálního chování je v DPZ zásadní, neboť kromě pouštních a polárních oblastí bývá součástí všech datových souborů. Ve

většině případů je zkoumáno společenství jednoho rostlinného druhu (Kolář et al., 1997).

Zkoumanými typy vegetačního povrchu mohou být jak listnaté, tak jehličnaté lesy, dále pak pole, louky či pastviny. Tyto typy vegetačních povrchů se projevují poměrně různorodě, ovšem mají vždy určité společné znaky. Nejčastěji je k popisu spektrálního chování vegetace využíváno odrazových vlastností listové plochy, které jsou ovlivňovány několika základními faktory (Dobrovolný, 1998):

- vnějším uspořádáním vegetačního krytu
- vnitřní strukturou částí rostliny
- vodním obsahem
- zdravotním stavem rostliny
- vlastností půdního substrátu

Míru spektrální odrazivosti pak charakterizuje tzv. *spektrální křivka*, kterou lze v případě vegetace rozdělit do tří základních oblastí (Kolář et al., 1997):

- *Oblast pigmentační absorpce* s vlnovými délkami v rozmezí 0,4 – 0,7 μm . Pigmentační látky jsou nejvýznamnějším faktorem, který ovlivňuje spektrální chování vegetace. Nejčastěji zastoupené zelené barvivo *chlorofyl* je schopno pohltit až 90% dopadajícího záření v modré a červené části spektra (Dobrovolný, 1998 ex. Campbell, 1996). Nejvyšší odrazivost naopak vykazuje v zelené spektrální oblasti, čímž se vysvětluje zelené zbarvení rostlin. Z důvodu vysoké míry absorpce není tedy složka odraženého záření příliš intenzivní.
- *Oblast buněčné struktury* v rozsahu 0,7 – 1,3 μm , tedy blízkého infračerveného záření, je naopak charakteristická výrazně vysokou odrazivostí. Tento nárůst a také značná variabilita hodnot je způsobena specifickou morfologií listu u jednotlivých rostlinných druhů. Tato oblast spektrální křivky tak poskytuje data, na jejichž základě lze druhy rostlin určovat.
- *Oblast vodní absorpce* se pohybuje ve vlnových délkách 1,3 – 3 μm a odrazivost je zde nepřímo úměrná obsahu vody v listu. V těchto vlnových délkách je tak možné indikovat například stres rostliny z nedostatku vláhy (Kolář et al., 1997; Dobrovolný, 1998).

4.2.4.2 Interakce elektromagnetického záření s atmosférou

Zásadním faktem, který musí být při interpretaci dat v DPZ zohledněn, je právě vzdálená pozice zdroje záření a cílového objektu. Zdroj záření emituje elektromagnetickou vlnu, která na své dráze k povrchu Země a poté zpět k detektoru dvakrát prochází atmosférou (Jones et Vaughan, 2010). Tuto skutečnost je třeba brát v potaz, neboť atmosféra sama má charakter látkového prostředí. Je tedy schopna veškeré procházející záření rozptylovat či pohlcovat, zatímco je sama zdrojem emitovaného záření.

Charakter rozptylu elektromagnetického záření je dán velikostí rozptylujících částic, kterými jsou v atmosféře jak molekuly jednotlivých plynů, tak aerosoly (Kolář et al., 1997). Částice o rozměrech menších než je vlnová délka záření vytvářejí tzv. *Rayleighův rozptyl*. Ten je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky a je tak schopen ovlivňovat především krátkovlnné záření. V problematice DPZ je původcem zákalu na vzniklých snímcích, čímž snižuje ostrost a kontrast daného obrazového materiálu.

Pokud je průměr částic větší než vlnová délka záření, vzniká tzv. *aerosolový rozptyl*. Ten způsobuje především vodní pára nebo prachové částice.

Za třetí typ je považován tzv. *neselektivní rozptyl*, který je způsobován většími částicemi v atmosféře, jako jsou například vodní kapky. Tento typ rozptylu není závislý na vlnové délce. Rozptyluje tedy všechny vlnové délky ve viditelné části spektra se stejnou intenzitou (Dobrovolný, 1998).

Druhým jevem, který snižuje intenzitu procházející elektromagnetické vlny, je absorpce. V prostředí atmosféry jsou příčinou absorpce především plynné složky, nejčastěji pak ozón (O_3), oxid uhličitý (CO_2) a vodní páry. Dané plyny jsou schopny pohlcovat záření o určitých vlnových délkách, přičemž nejvíce je ovlivněna infračervená a mikrovlnná část spektra (Kolář et al., 1997; Dobrovolný, 1998).

Dobrovolný (1998) také popisuje oblasti spektra, které nejsou ovlivňovány ani rozptylem, ani absorpcí, a nazývá je tzv. *atmosférickými okny*. Do této kategorie spadá především viditelná část spektra, dále pak intervaly 3 - 5 μm a 8 - 14 μm v oblasti termálního záření a určitá část záření mikrovlnného.

4.2.4.3 Atmosférické korekce

Atmosféra a její složení tedy způsobují značné zkreslení dat a pro získání tzv. absolutních hodnot bylo třeba vyvinout mechanismy, které její vliv eliminují. Tyto metody jsou souhrnně označovány jako *atmosférické korekce* (Dobrovolný, 1998).

Podstatou nejjednodušší korekce dat jsou plochy s relativně konstantní odezvou, jako je voda, led, sníh či poušť. Za nevhodnější pak Pavelka (1999) označuje čistou hlubší vodu, přičemž vychází z faktu, že odrazivost v blízkém infračerveném spektru je v případě takové plochy rovna nule. Lze tedy předpokládat, že veškeré záření tohoto spektra bude pohlceno. Jakákoliv naměřená hodnota je tak připisována vlivu atmosféry a je posléze odečtena od hodnoty každého pixelu daného snímku. Tento postup je popisován jako *metoda nejtmašího pixelu* a je ve své podstatě velmi hrubý a ne vždy je jeho využití vhodné. Ve skutečnosti totiž nemusí jít jen o příspěvek atmosféry, ale hodnota může být ovlivněna i chemickým složením vody či obsahem sedimentů rozpuštěných ve vodním sloupci (Dobrovolný, 1998; Pavelka, 1999).

Chavez (1975) pak popisuje metodu korekce dat s využitím regresní analýzy, kterou dále rozvíjí Switzer et al. (1981) aplikací kovarianční matice na veškeré kombinace pásem multispektrálního obrazu.

Dále je popisována skupina metod, které jsou založeny na modelování atmosférických vlivů. Tyto modely jsou vytvářeny na základě meteorologických dat, jako je teplota či vlhkost vzduchu, které jsou zaznamenávány v období vzniku obrazového záznamu. Vlivy atmosféry jsou tímto postupem převedeny na parametry a společně s hodnotami obrazového záznamu pak vstupují do numerických modelů, jejichž výsledkem jsou již opravená data. Nejčastěji používané jsou metody *LOWTRAN* a *MODTRAN*, které poskytují informace o propustnosti atmosféry za různě definovaných atmosférických podmínek (Dobrovolný, 1998 ex. Campbell, 1996). Tyto modely dále udávají míru propustnosti v závislosti na koncentraci plynů, jako je vodní pára, NO₂, O₃, CH₄, CO₂, SO₂ (Dobrovolný, 1998).

4.3 Možnosti snímání povrchu Země

Zařízení, která slouží ke snímání zemského povrchu, mohou být nesena různými typy nosičů, přičemž každý typ zařízení je svou podstatou vhodný pro jiný nosič (Kolář et al., 1997). Mudrych (1985) popisuje dvě hlavní skupiny, kde do první

řadí nosiče operující ve vzduchu a do druhé pak umělá vesmírná tělesa. Za formální hranici mezi těmito dvěma skupinami stanovuje výšku 100 km nad zemským povrchem.

4.3.1 Nosná zařízení operující ve vzduchu

V této skupině lze nalézt jak letadla a vrtulníky, tak letecké modely, balony či zvýšené pozemní základny. Metody snímání s jejich pomocí jsou tradiční, prováděné prakticky již od 30. let 20. století (Mudrych, 1985).

Letadla jsou využívána motorová i proudová. Jejich výhodou je dostatek místa na palubě, kam lze umístit jak veškerou záznamovou aparaturu, tak i její obsluhující personál. To umožňuje okamžité přizpůsobení podmínek snímání změnám vnějších faktorů. Základním požadavkem je malá pracovní rychlost a stabilita během letu. Právě stability však bývá těžké dosáhnout, což může být zdrojem různých nepřesností a chyb v měření (Kolář et al., 1997).

Vrtulníky našly uplatnění především v detailních průzkumech z malých výšek, jako například v dopravě nebo při dokumentaci různých typů havárií (Mudrych, 1985).

V neposlední řadě je též využíváno *leteckých modelů* nebo také mikroletadel. Značnou výhodou je zde ekonomičnost provozu díky snadné dopravě a řízení dráhy letu operátorem ze zemského povrchu (Mudrych, 1985).

Podobné výhody má v poslední dekádě se stále rozšiřující využívání tzv. *dronů*. Tímto termínem jsou označovány přístroje menších rozměrů, konstruované na bázi helikoptér. Kromě snímacího zařízení bývají vybaveny zpravidla čtyřmi či osmi rotory a palubním počítačem, který umožňuje jejich navigaci ze Země. Zprvu byly přístroje tohoto typu vyvíjeny pro vojenské účely, s rozvojem chytrých technologií se však staly vhodnými i pro civilní uživatele (Cheng, 2015).

4.3.2 Umělá vesmírná tělesa

Vypuštěním družice Sputnik (1957) začala éra využívání umělých vesmírných těles ke studiu Země a vesmíru. Do této kategorie spadají vesmírné stanice a družice.

Kolář (1997) označuje družice za ideální nosič pro účely DPZ. Zásadní je možnost snímání velkých ploch s přístupem k datům bezprostředně po jejich naměření. Další výhodou oproti leteckému snímání je větší stabilita. Družice netrpí nárazy větru a zároveň jsou méně náchylné k vlastním otřesům. Výsledný snímek pak závisí na směru a výšce dráhy vesmírného tělesa.

Družice se zpravidla pohybují po třech typech oběžných drah:

- rovníkové
- polární (subpolární)
- šikmé

Družice pro studium přírodních jevů využívají polární oběžnou dráhu, kde je pohyb tělesa synchronizován s pohybem Slunce a je tak umožněno snímání konkrétního místa vždy ve stejném čase, tedy za přibližně stejných světelných podmínek.

Často využívané jsou družice bez vlastní posádky. Ty jsou řízené ze Země a jsou charakteristické větší výškou letu. Mezi významné družice bez posádky se řadí například METEOSAT či NOAA, které jsou využívány především k meteorologickým účelům. Ke zkoumání přírodních zdrojů pak slouží družice systému LANDSAT (Mudrych, 1985; Kolář et al., 1997).

4.3.3 Družicový systém LANDSAT

LANDSAT je nejstarším družicovým systémem navrženým k získávání pravidelných informací o zemském povrchu. V oblasti DPZ hraje zásadní roli v rámci rozvoje získávání dat a veškeré nově vznikající systémy jsou s ním porovnávány (Richards, 1993). Realizace projektu LANDSAT byla iniciována ve Spojených Státech Amerických na základě úspěchů planetárního výzkumu a to Ministerstvem vnitra (Department of Interior), Ministerstvem Zemědělství (Department of Agriculture) a NASA (USGS, 2015a).

První družicí systému LANDSAT byl ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), později přejmenován na LANDSAT 1. Na oběžnou dráhu byl vypuštěn 23. července 1972, kde setrval v činnosti až do 6. ledna 1978. V následujících letech byly vypuštěny další družice – LANDSAT 2 a LANDSAT 3 – a to na identickou oběžnou dráhu, kterou obíhal LANDSAT 1. Tato dráha se nacházela ve výšce 920

km, kde jeden cyklus trval 103 min. Následovala éra družic tzv. druhé generace, kterou zahájilo vypuštění LANDSAT 4 16. července 1982 a pokračovalo vypuštěním LANDSAT 5 1. března 1984. Tyto družice měly oproti předchozím podstatně nižší oběžnou dráhu, což mělo zajistit lepší prostorové rozlišení pořizovaných snímků. Jeden cyklus ve výšce 705 km je pak zdolán v intervalu 98.9 min. Na rozdíl od družic první generace, které byly vybaveny rekordéry k ukládání dat, LANDSAT 4 a 5 posílají data buď přímo na sběrné stanice na zemském povrchu nebo přes komunikační satelit *Tracking and Data Relay Satellite* (TRDS). TRDS je vysokokapacitní satelit používaný k přenosu dat z mnoha vesmírných misí. Jeho základna se nachází ve White Sands v Novém Mexiku, odkud jsou data rozesílána v rámci pozemních komunikačních satelitů (Richards, 1993, USGS, 2015a). V říjnu roku 1993 selhal pokus o vypuštění LANDSAT 6, kdy se družici nepodařilo dosáhnout oběžné dráhy. Následoval LANDSAT 7, který byl úspěšně vypuštěn v dubnu roku 1999 (USGS, 2015a). LANDSAT 5 byl v té době však stále v provozu, obě družice tak pracovaly současně a snímkovaly stejné území s časovým odstupem 8 dní. LANDSAT 7 je vybaven vylepšeným skenerem ETM+ a pořizuje data v rozlišení 15, 30 a 60 m (Gisat, 2010). V únoru roku 2013 pak byla do provozu uvedena zatím poslední družice systému - LANDSAT 8. Ta nese na rozdíl od svých předchůdců nové typy sensorů a to *Optional Land Imager* (OLI) a *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Pořizuje data s rozlišením 15, 30 a 100 m a předpokládána životnost je stanovena minimálně na 5 let (USGS, 2015b). V plánu už je proto vypuštění LANDSAT 9 a to předběžně na rok 2023 (USGS, 2015a).

Přehled všech družic systému LANDSAT a délky jejich působení je prezentován obrázkem č. 9.

LANDSAT 5 drží světový rekord jako „nejdéle operující družice pozorující Zemi“ a to 28 let a 10 měsíců (USGS, 2015a).

S rozvojem veškeré užívané techniky docházelo i k obměnám sensorů nesených družicemi LANDSAT (Richards, 1993). Názorný přehled udává tabulka č.4. Pro účely této práce jsou níže specifikovány přístroje družice LANDSAT 5.

4.3.4 Multispektrální skener

Multispektrální skener (MSS) byl základní součástí všech dosavadních družic systému LANDSAT. Jedná se o mechanické zařízení, které snímkuje povrch Země

simultánně v šesti liniích za pomoci oscilujícího zrcadla. Odražené sluneční záření je pak detekováno ve čtyřech pásmech spektra (Richards, 1993):

- Band 4: Zelené záření (0,5 – 0,6 μm)
- Band 5: Červené záření (0,6 – 0,7 μm)
- Band 6: Blízké infračervené záření (0,7 – 0,8 μm)
- Band 7: Blízké infračervené záření (0,8 – 1,1 μm)

Snímaná plocha má šířku 185 km a velikost jednoho pixelu je 80 m (Dobrovolný, 1998).

4.3.5 Thematic Mapper

Thematic mapper (TM) je stejně jako MSS také mechanické snímkovací zařízení, ovšem s vylepšenými spektrálními, prostorovými a radiometrickými charakteristikami. Zatímco MSS získává data snímáním povrchu pouze v jednom směru, TM využívá dvou směrů. Data jsou tedy získávána celkem v šestnácti liniích, které pokrývají šíři 185 km. Proces tak může probíhat v pomalejším tempu, což umožňuje efektivnější snímání zemského povrchu. Tímto je zajištěno i větší rozlišení výsledných snímků. Velikost jednoho pixelu je zde 30 m, s výjimkou termálního pásma, kde jsou pixely o velikosti 120 m (Richards, 1993).

TM operuje v sedmi spektrálních pásmech o různých vlnových délkách (USGS, 2014):

- Band 1: Modré záření (0,45 – 0,52 μm)
- Band 2: Zelené záření (0,52 – 0,60 μm)
- Band 3: Červené záření (0,63 – 0,69 μm)
- Band 4: Blízké infračervené záření (0,76 – 0,90 μm)
- Band 5: Střední infračervené záření (1,55 – 1,75 μm)
- Band 6: Termální záření (10,4 – 12,5 μm)
- Band 7: Střední infračervené (2,08 – 2,35 μm)

4.4 Zpracování dat DPZ

Konečným produktem sběru dat distančními metodami je *snímek*. Dle jeho charakteru dělí Dobrovolný (1998) metody sběru na:

- *Klasické*, které využívají fotografických snímků a prezentaci dat v analogové formě
- *Nekonvenční*, kdy jsou data sbírána v číselné formě a dále analyzována pomocí výpočetních technologií

4.4.1 Analogová forma záznamu

Analýzou klasických analogových snímků, jakožto výsledku konvenčních metod DPZ, se zabývá *fotogrammetrie*. Jde o obor, který získává informace o objektech a jevech měřením jejich fotografických obrazů, nikoliv jich samých. Využívá jednoznačných geometrických vztahů mezi předmětem a jeho snímkem, které lze numericky, graficky či mechanicky určovat. V závislosti na objektivu a použitém fotografickém materiálu je tak možno dosáhnout vysokého rozlišení fotografovaného objektu. Jak uvádí Ličev (2010), z černobílého snímku o rozměrech 18 x 18 cm lze získat až 200 milionů informací, které lze zachytit během zlomku sekundy. Tímto lze výrazně zjednodušit měřické práce v terénu a zároveň uchovat původní informace pro další analýzy. Kolář (1997) pak doplňuje tuto problematiku o fakt, že v případě analogových snímků DPZ byl analyzován spíše kvalitativní a kvantitativní obsah snímku, nikoli geometrické vztahy. Postupným rozvojem veškerých technologií však fotogrammetrické přístupy a DPZ splývají.

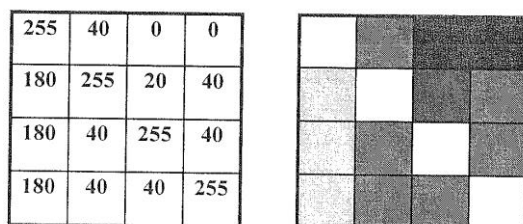
4.4.2 Digitální forma záznamu

V současnosti však naprostá většina snímků vzniká ve formě digitální, tedy jako výsledek nekonvenčních metod. Zde není obraz vytvářen v jednom okamžiku, ale postupně po jednotlivých obrazových prvcích, tzv. *pixelech*. Nekonvenční metody dále umožňují dosáhnout vyššího spektrálního rozlišení. Klasická fotografie zachycuje vlnové délky od 0,3 do 0,9 μm , zatímco rozkladové zařízení je schopno snímat 0,3 – 14 μm . Naproti tomu prostorové rozlišení je zde značně omezeno. Analogová fotografie dokáže zachytit detaily nerozeznatelné lidským okem, kdežto rozlišení družicových snímků se pohybuje v řádech jednotek až desítek metrů. Konečně zásadní výhodou digitální fotografie je ukládání záznamu v číselné formě. To umožňuje nejen snadnou kalibraci a následnou možnost porovnávání jednotlivých snímků, ale i automatizaci jednotlivých analýz a kombinaci s jinými formami digitálních dat (Dobrovolný, 1998).

4.4.2.1 Vlastnosti digitálního záznamu

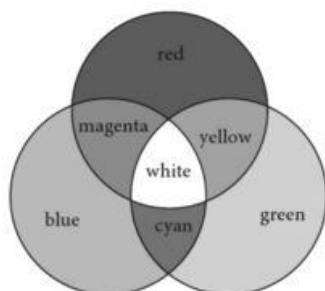
Digitální obraz vždy podléhá jistému stupni generalizace, která závisí především na technických parametrech při samotném sběru dat. Základní jednotkou takto generalizovaného obrazu je *pixel*, obrazový element o určité velikosti, který je nedělitelný a se kterým je dále pracováno (Pavelka, 1999). Každému takovému elementu je při jeho vzniku či převodu analogových dat na data digitální přiřazována právě jedna hodnota, která odpovídá průměru hodnot naměřených v rámci celé jeho plochy (Dobrovolný, 1998). Výsledný digitální obraz je tedy určitou soustavou pixelů o m řádcích a n sloupcích, které je dále přiřazován souřadnicový systém. Pokud je známa i velikost pixelu, lze u georeferencovaného obrazu snadno přejít k souřadnicím absolutním (Pavelka, 1999).

Vizualizace digitálních dat se nejčastěji provádí jednak ve stupních šedi a jednak barevnou syntézou. Princip převodu dat na černobílý obraz je demonstrován obrázkem č.10:



Obr.10: Vizualizace digitálního obrazového záznamu (Dobrovolný, 1998).

Princip barevné syntézy je potom založen na tzv. *aditivním skládání*, kdy jsou kombinovány jednotlivé složky viditelného záření. Výsledkem těchto kombinací je vznik dalších barev, mimo systém RGB (red; green; blue), viz obrázek č. 11:



Obr.11: Barevná syntéza (Jones et Vaughan, 2010)

Digitální data je třeba také vhodně ukládat. Existuje celá řada formátů, z nichž za nejběžněji používané Dobrovolný (1998) označuje:

- BSQ (band sequential)
- BIL (band interleaving by line)
- BIP (band interleaving by pixel)

V závislosti na prostorovém rozlišení mají jednotlivé snímky také rozdílné nároky na kapacitu paměťových zařízení. Z potřeby co nejvíce využít těchto kapacit bylo vyvinuto mnoho kompresních algoritmů, které jsou nejčastěji založeny na zpracování opakujících se hodnot v rámci jedné soustavy pixelů (Dobrovolný, 1998).

4.5 Vegetační indexy

Jednou z možných analýz zemského povrchu, které lze provádět na základě snímků z DPZ, je výpočet vegetačních indexů. Jedná se o skupinu aritmetických operací, které s využitím dvou či více spektrálních pásem umožňují zvýraznit určité vlastnosti vegetace, např. množství biomasy v jednom pixelu (Dobrovolný, 1998). Ve vědecké literatuře bylo popsáno více než 150 VI, ovšem ne všechny mají podstatný biofyzikální základ či byly systematicky testovány. Software ENVI¹ a jeho online dostupná technická podpora popisuje celkem 27 VI, které lze využít k analýzám obsahu pigmentu, vody či uhlíku ve zkoumané oblasti vegetačního pokryvu (Harris, 2016a).

Dle principu výpočtů dělí Dobrovolný (1998) VI do dvou skupin:

- *Poměrové VI* využívají vztahu odrazivostí povrchů v červené viditelné a blízké infračervené části spektra,
- *Ortogonální VI* počítají s lineárními kombinacemi původních spektrálních pásem

ENVI pracuje s rozdělením, které je připisováno Dr. Gregory P. Asnerovi z Carnegie Institution ve Washingtonu. Ten rozděluje VI podle podobných vlastností

¹ Environment for Visualizing Images

vegetace, které lze danými vztahy vypočítat (HARRIS, 2016a). Níže je pak uváděn podrobný popis VI souvisejících s předkládanou prací.

Označení jednotlivých pásem ve výrazech je následující:

- *NIR* (*near-infrared*) – blízké infračervené záření
- *Red* – červené spektrum viditelného záření
- *Green* – zelené spektrum viditelného záření
- *Blue* – modré spektrum viditelného záření

4.5.1 Broadband Greenness

Vegetační indexy v této podskupině patří mezi nejjednodušší ukazatele celkového množství a kvality fotosyntetizujícího materiálu. V principu je zde porovnávána odrazivost vegetačního pokryvu v blízkém infračerveném spektrálním pásmu, kdy je míra penetrace poměrně vysoká, s odrazivostí v červeném spektrálním pásmu, kde jsou fotony naopak silně pohlcovány. Toto poměrně široké spektrum umožňuje výpočty VI s vysokou efektivitou i na základě dat snímaných multispektrálními sensory, jako jsou AVHRR nebo LANDSAT TM. Obvyklé analýzy, ke kterým VI této sekce přispívají, jsou fenologické studie, zjišťování land-use, posuzování klimatických vlivů či modelování produktivity dané vegetační plochy (HARRIS, 2016b).

4.5.1.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

NDVI je využíván jako ukazatel zdravé, zelené vegetace. Počítá s oblastmi nejvyšší absorpce a odrazivosti chlorofylu a je tak využitelný v rámci velmi širokého spektra podmínek.

Hodnoty NDVI se pohybují od -1 do 1 a je dán tímto výrazem (Rouse et al., 1973):

$$(1) \quad NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

4.5.1.2 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

GNDVI je index počítaný na podobné bázi jako NDVI. Rozdílem je nahrazení červení oblasti spektra oblastí zelenou, pohybující se ve vlnových délkách od 540 do 570 nm. Tento rozdíl činí daný index sensitivnějším na koncentraci chlorofylu, než je NDVI.

Vztah pro výpočet GNDVI je formulován takto (Gitelson et Merzlyak, 1998):

$$(2) \quad GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

4.5.1.3 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

SAVI klade důraz především na potlačení efektu pixelů reprezentujících půdní povrch. Při výpočtu je využíván opravný součinitel L , který je funkcí vegetační hustoty. Je tedy vhodné předem znát množství vegetace nebo použít optimální hodnotu $L = 0,5$. Vysoké uplatnění zaznamenává tento index v oblastech s řídkou vegetací, kde je půdní povrch skrz vegetaci dobře viditelný.

Výpočet indexu SAVI je dán tímto vztahem (Huete, 1988):

$$(3) \quad SAVI = \frac{1.5 * (NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.5)}$$

4.5.1.4 Optimalized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI)

Index založený na SAVI, od kterého se liší pouze hodnotou opravného součinitele L . Ten je zde stanoven na $L = 0,16$, což má za následek vyšší sensitivitu při vegetačním pokryvu vyšším než 50%.

OSAVI je definován takto (Rondeaux et al., 1996):

$$(4) \quad OSAVI = \frac{1.5 * (NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.16)}$$

4.5.1.5 Simple Ratio (SR)

SR pracuje se stejnými spektrálními pásmy jako NDVI, tedy s vlnovou délkou s nejvyšší vegetační odrazivostí a vlnovou délkou, která je nejvíce absorbována chlorofylem. Klasický poměr těchto pásem je jednoduchý a zároveň efektivní v rámci širokého rozpětí podmínek.

SR je dán vzorcem (Birth et McVey, 1968):

$$SR = \frac{NIR}{Red} \quad (5)$$

4.5.1.6 Enhanced Vegetation Index (EVI)

Tento index byl vyvinut jako vylepšení NDVI. Využívá modré spektrum k optimalizaci signálu půdního povrchu a k redukci atmosférických vlivů.

Výraz pro výpočet EVI je následující (Huete et al., 2002):

$$EVI = 2.5 * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 * Red - 7.5 * Blue + 1)} \quad (6)$$

4.5.1.7 Leaf Area Index (LAI)

LAI se využívá při odhadu vegetačního pokryvu a zároveň umožňuje předpovídat výnos zemědělských plodin.

Při výpočtu LAI je třeba znát hodnoty indexu EVI (Boegh et al., 2002):

$$LAI = (3.618 * EVI - 0.118) \quad (7)$$

4.5.1.8 Chlorophyll Vegetation Index (CVI)

CVI je indexem, který není zařazen do výše zmiňované 27 VI, udávané online podporou SW ENVI. Jedná se však o index, který je značně sensitivní k obsahu chlorofylu v rostlině a byl proto zařazen do skupiny indexů, které jsou předkládanou prací počítány.

Vztah pro výpočet CVI udává Vincini (2008) takto:

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

(8)

4.5.2 Canopy Water Content

VI této podskupiny se využívají při odhadech obsahu vody ve zkoumaném porostu. Obsah vody je přitom jedním z důležitých ukazatelů zdravé a prosperující vegetace. Vyšší obsah vody iniciuje rychlejší růst a vyšší odolnost proti požárům.

Při výpočtech jsou dávány do vztahu hodnoty blízkého infračerveného a krátkovlnného infračerveného záření. Využívá se zde znalosti absorpčních vlastností vody a hloubky penetrace v oblasti blízkého infračerveného záření (HARRIS, 2016c).

4.5.2.1 Moisture Stress Index (MSI)

MSI byl sestaven tak, aby byl co nejvíce sensitivní ke změnám obsahu vody ve zkoumané vegetaci. Pokud se obsah vody zvyšuje, zvyšuje se i absorpce ve vlnových délkách kolem 1599 nm, zatímco absorpce kolem 819 nm zůstává nezměněna a slouží tedy jako srovnávací hladina.

MSI nachází využití v rámci různých analýz, mezi něž patří stresová analýza, předpověď produktivity, analýza ohrožení požárem nebo také studie fyziologie ekosystému.

Výsledné hodnoty se pohybují v intervalu od 0 do 3, přičemž rostoucí hodnoty značí větší stres a nižší obsah vody ve zkoumané vegetaci.

MSI je počítán dle následujícího vztahu (Hunt et Rock, 1989; Ceccato et al., 2001):

$$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}} \quad (9)$$

kde se ρ_{1599} pohybuje v rozmezí 1590 – 1620 nm a ρ_{819} v rozmezí 815 – 824 nm (HARRIS, 2016d).

4.6 Topography Wetness Index (TWI)

TWI je jedním z topografických indexů, který popisuje distribuci půdní vlhkosti v rámci zkoumaného území a je proto často využíván k určení výskytu a velikosti saturovaných zón (Mackey, 2002). Moore et al. (1991) definuje TWI vztahem:

$$TWI = \ln (A_s / \tan(\beta)) \quad (10)$$

kde A_s označuje specifickou plochu povodí (m^2/m) a β sklon terénu ($^\circ$).

Kumhálová et al. (2014) dále uvádí, že hodnocení vlivu topografie na distribuci půdní vody vychází z předpokladu, že plochy s nízkým výškovým gradientem vodu zadržují, zatímco strmější plochy mají tendenci ji ztrácet.

4.7 Software pro zpracování dat

Postupný vývoj a inovace ve všech oblastech DPZ mají za následek také stále větší množství vznikajících dat. Pro jejich vizualizaci, provádění analýz a interpretaci výsledků bylo třeba vytvořit vhodné prostředí. Byla proto vyvinuta celá řada softwarů, které tyto činnosti umožňují. Zvláště pak od přelomu tisíciletí, kdy došlo k rozšíření bezdrátových technologií, internetu a mobilních zařízení, stává se tato oblast stále více veřejně přístupnou a využívanou (Pourabbas, 2014).

Otázkou vizualizace a zpracování dat se zabývá geoinformatika, poměrně mladá vědní disciplína propojující poznatky geografie s informačními technologiemi. Byly vyvinuty tzv. *Geografické informační systémy* (GIS), které uživatelům umožňují manipulaci s daty, aniž by nutně museli být obeznámeni s předchozími kroky, jako

např. jak jsou data ukládána nebo jaké postupy vedly k jejich získání (Richards, 1993).

Počátky GIS se datují do pozdních 60. let 20. století a od této doby zaznamenávají velmi rychlý rozvoj. Každá dekáda přinesla konkrétní inovace, jako například vizualizace a modelování prostorových dat v letech 70., propojení s databázemi v 80. a složité mapové analýzy v 90. letech (Pourabbas, 2014).

Zásadní výhodou práce v GIS je propojení vizuálního zobrazení dat ve formě mapy a dat uložených v databázích, které často obsahují řadu polohopisných a popisných charakteristik. Tyto interakce umožňují provádění širokého spektra analýz, vždy podle specifických požadavků daného uživatele. Prostředí GIS dále umožňuje prezentaci výsledků provedených analýz ve formě mapových výstupů.

Kromě vlastních dat lze pro práci v GIS využívat také dat umístěných na internetu, tzv. *WMS služeb*. Existuje celá škála mapových serverů, které poskytují data týkající se různých odvětví lidské činnosti. Poznatků geoinformatiky lze kromě oblasti samotné geografie využít například ve státní správě, při řešení otázek ochrany přírody nebo dále v architektuře či cestovním ruchu (Geoportal Praha, 2010).

Konkrétních softwareových programů je na poli GIS poměrně mnoho. Obecně známým je SW *ArcGIS*, který byl také využit k analýze v rámci předkládané diplomové práce. Dále lze pracovat například v SW *QGIS* nebo *Topol*.

Některé SW se pak více zaměřují přímo na zpracování dat z DPZ. Jedním z nich je SW *ENVI*, který byl speciálně vyvinut pro práci s družicovými snímky a to jak panchromatickými, tak multi- či hyperspektrálními, snímky získanými systémem *LiDAR (Light Detection And Ranging)* či *SAR (Synthetic Aparature Radar)*. Umožňuje také zpracování vektorových dat nebo geodatabází (Exelis, 2011; ARCDATA, 2016). Nástroje softwaru *ENVI* jsou založeny na ověřených vědeckých metodách a proto určeny k provádění vysoce specializovaných analýz, jako jsou (Exelis, 2011; ARCDATA, 2016):

- *Klasifikace*
- *Identifikace materiálů na základě spektrálního chování*
- *Detekce změn a cílů*
- *Vegetační analytické nástroje*

Mimo základní verzi je dostupná celá řada rozšiřujících komponent (ARCDATA, 2016). Tyto nadstavby jsou jedním z důvodů rozšíření softwaru ENVI do mnoha oblastí lidské činnosti, zahrnující otázky obrany, územního plánování, geologie a těžby či věd zabývajících se vesmírným prostorem a zemským povrchem (GISsat, 2016). Významné je také propojení softwaru ENVI s GIS, které rozšiřuje jejich využití jakožto analytického nástroje. K tomuto byly vyvinuty například *ENVI Tools for ArcGIS* a *ENVI Tools for ArcGIS for Server*, které umožňují analýzu a zpracování družicových snímků v prostředí ArcGIS (ARCDATA, 2016).

4.8 Precizní zemědělství

Vzhledem ke stále se zvyšující poptávce po kvalitních surovinách byl v posledních třech dekadách zaznamenán rozvoj strategie označované jako *Precizní zemědělství* (Zhang, 2015). Jedná se o soubor technik, které využívají moderních informačních technologií k získávání dat o zemědělském pozemku a jeho výnosu v závislosti na prostorovém a časovém měřítku. Tato data po následné analýze umožňují zvýšení efektivity zemědělských operací zároveň se snížením finančních nákladů a dopadu na životní prostředí. Rozvoj precizního zemědělství tak vykazuje zásadní přínos jak z hlediska ekonomického, tak i environmentálního a sociopolitického (Dixon, 1997). Dixon (1997) dále rozděluje samotný proces do třech fází:

1. získávání dat ve vhodném měřítku
2. jejich analýza a interpretace
3. implementace výsledků do procesu rozhodování

V principu se pak jedná o využití GPS (*Global Positioning System*) či GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ke sledování výnosů na přesně určených pozicích. Získaná data jsou dále analyzována. Na základě výsledků jsou pak opatření, jako například aplikace hnojiv, směřována do konkrétních částí zemědělského pozemku (Zhang, 2015).

5. Charakteristika studijního území

5.1 Lokalita

Praktická část diplomové práce byla zpracována pro konkrétní území, kterým byl experimentální pozemek Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i.. Nachází se v Praze-Ruzyni, na 50°05' severní šířky a 14°17'30" východní délky (obrázek č.12 a 13). Jedná se o zemědělský pozemek o velikosti 11,5 ha. Nadmořská výška se zde pohybuje od 338,5 do 357,5 m n. m., což vytváří sklon terénu v průměru 6%.

5.2 Půdní a meteorologické podmínky

Půda experimentálního pozemku je klasifikována jako hnědozem, zčásti ležící na vápenatých pískovcích a částečně na jílech. Kationtová výměnná kapacita svrchní vrstvy, obsahující jíly, se pohybuje mezi 20 a 35%. Půdní profil je neutrální. Sorpční kapacita je uváděna jako nasycená až plně nasycená a obsah minerálů jako dobrý až velmi dobrý. V některých částech lze v hnědozemi pozorovat iluviální rezidua, v dalších pak silně erodovaný půdní povrch.

Meteorologické podmínky zkoumaného období jsou shrnuty podrobně pro vybrané růstové fáze v tabulce 5.

5.3 Plodiny

Plodiny pěstované na zkoumaném pozemku jsou střídány v souladu s praxí běžnou pro ČR. Od roku 2001 byl osevní postup následující:

- cukrová řepa (2001)
- ječmen jarní (2002)
- pšenice ozimá (2003)
- řepka ozimá (2004)
- pšenice ozimá (2005)
- oves (2006)
- ječmen ozimý (2007)
- řepka ozimá (2008)
- pšenice ozimá (2009)
- oves (2010)
- pšenice ozimá (2011)

Pro předkládanou práci byla využita data pro pšenici z let 2005 a 2011 a dále pro oves z let 2006 a 2010 (tabulka č.1).

6. Výsledky

Cílem diplomové práce bylo porovnání vybraných VI a určení jejich vhodnosti pro popis variability výnosu na konkrétním zemědělském pozemku. Za tímto účelem byly vybrány družicové snímky, vždy po dvou pro každou sledovanou plodinu (tabulka č.1).

Pro určení míry vhodnosti využití VI byla provedena korelační analýza (*Pearsonův korelační koeficient*) mezi:

- VI – výnosem
- VI –TWI
- TWI – výnosem.

Výsledky této korelační analýzy jsou prezentovány tabulkami č.2 a 3.

V první řadě byly vždy porovnány vybrané VI s výnosovými daty pro konkrétní sledovaný rok, celkem tedy 36 relací. Pro každou z nich byla stanovena tato nulová hypotéza:

H₀: Hodnoty VI a výnosová data nejsou závislé veličiny.

Hodnoty korelačních koeficientů ukazovaly na silně korelovaný vztah (tabulka č.2). S ohledem na tyto výsledky byla *H₀* ve všech případech zamítnuta. Lze tedy usuzovat, že VI a výnosová data jsou závislé veličiny.

Pšenice ozimá byla pěstována v letech 2005 a 2011. Nejtěsnější korelaci VI s výnosem v roce 2005 vykazoval SRVI (0.684), v roce 2011 pak MSI (-0.835). Naopak nejnižší hodnoty korelačního koeficientu byly pro oba roky pozorovány u CVI (0.495; 0.650). *Oves* byl pěstován v letech 2006 a 2010. Zde byla v obou letech nejsilnější korelace výnosu také se SRVI (0.768; 0.694), nejnižší potom opět u CVI (0.567; 0.514).

Následovalo porovnání VI s topografickým faktorem TWI. Zde byla stanovena analogická nulová hypotéza:

H₀: Hodnoty TWI a VI nejsou závislé veličiny.

Výsledky jsou prezentovány také v tabulce č.2 a je zde opět patrná silná míra korelace ve všech zkoumaných rovinách. *H₀* byla tedy i zde ve všech případech

zamítnuta. TWI a jednotlivé VI jsou tedy s velkou pravděpodobností závislými veličinami.

Pro *pšenici ozimou* byla v této kategorii nalezena nejtěsnější korelace s MSI v obou zkoumaných letech (-0.48; -0.49). Oves pak vykazoval nejvyšší hodnoty korelačního koeficientu se SRVI, taktéž pro oba zkoumané roky (0.590; 0.600).

Byla také spočítána míra korelace mezi výnosovými daty a TWI. Opět byla stanovena nulová hypotéza:

H₀: Hodnoty TWI a výnosová data nejsou závislé veličiny.

Výsledky této analýzy jsou prezentovány v tabulce č.3, přičemž *H₀* byla i v tomto případě zamítnuta s ohledem na velmi nízké hodnoty p-value.

Výnos *pšenice ozimé* pak v roce 2005 vykazuje nižší míru korelace (0.280) než v roce 2011 (0.610), zatímco u *ovsa* jsou hodnoty pro obě období stejné (0.530).

Tabulka č.5 pak popisuje meteorologické podmínky daného území ve sledovaných obdobích. Proměnlivost srážkových úhrnů a průměrných teplot ovlivňuje nejen výnos, ale také jednotlivé popisné charakteristiky počítaných VI, shrnuté v tabulce č.6 pro *pšenici ozimou* a v tabulce č.7 pro *oves*.

V tabulce č.8 jsou vypsány VI, u kterých byla nalezena největší míra korelace s výnosovými daty a TWI.

7. Diskuse

U všech vybraných VI byla prokázána silná korelace s výnosem i topografií území. Tento v zásadě pozitivní výsledek je nejspíše způsoben výběrem zkoumaných plodin. Vybrané VI jsou vhodné k popisu variability výnosu *pšenice ozimé* a *ovsa* a to především z důvodu, že se jedná o obiloviny. Při aplikaci na jiný typ zemědělské plodiny, například na řepku ozimou, by již VI nevykazovaly takové výsledky. Důvodem jsou jiné spektrální vlastnosti způsobené především květem rostliny (Novák, 2016, in verb)

V tabulce č.8 lze nalézt VI, které při porovnání s výnosovými daty a TWI vykazovaly nejvyšší hodnoty korelačních koeficientů. Velmi vysoké hodnoty lze pozorovat u SRVI. Nejtěsnější korelace byla nalezena v roce 2006 a 2010, tedy v letech, kdy byl pěstován *oves*. Pro *pšenici ozimou* se SRVI objevuje na první pozici v roce 2005, v roce 2011 už však tak silná korelace pozorována nebyla. MSI byl vyhodnocen jako další VI s vysokými hodnotami korelačních koeficientů. Na prvním místě se objevuje právě v roce 2011 (*pšenice ozimá*) a to jak při porovnání s výnosem, tak i s TWI.

Nejnižší hodnoty korelace VI s výnosem byly pozorovány u CVI. Tento fakt je nejspíš způsoben hnojením porostu za účelem dodání dusíku. Hnojení mimo jiné způsobuje tmavší barvu vegetačního povrchu. Důvod nižších hodnot závislosti právě u CVI lze hledat ve vztahu pro jeho výpočet (výraz č.8). Odrazivost v zeleném spektru viditelného záření je zde umocněna na druhou, čímž je v rámci výpočtu umocněn její význam. Tmavnutí porostu však tuto odrazivost snižuje, což může značně ovlivnit výsledné hodnoty (Novák, 2016, in verb.). V případě porovnání s TWI vykazuje CVI taktéž nejnižší hodnoty korelace, přičemž vysvětlení je analogické, jako při porovnání s výnosem.

Variabilita výnosu je pak zpravidla ovlivňována více faktory a má proto tendenci se meziročně lišit. Nejzásadněji výnos ovlivňují topografické atributy pozemku a meteorologické podmínky (Kumhálová et al., 2014). Proto bylo třeba výsledky analýzy VI porovnat nejen s TWI, ale zahrnout také množství srážek a průměrné teploty ve specifických fenologických fázích.

Nejvyšší srážkové úhrny lze pozorovat v roce 2011 (tabulka č.5), což mělo za následek velmi nízké hodnoty MSI (0.13) u *pšenice ozimé* (tabulka č.2). Naopak nejnižší srážkové úhrny byly naměřeny v roce 2006, kdy MSI u *ovsa* dosáhl nejvyšší

průměrné hodnoty (0.37) (tabulka č.2). MSI je typem indexu, který vyjadřuje stres rostliny z nedostatku vláhy. Tyto hodnoty společně s výsledky korelační analýzy tedy potvrzují vhodnost využití MSI v rámci dané problematiky.

S otázkou dostatečného zásobení vodou souvisí i porovnání výnosu s TWI, který reprezentuje pohyb vody v závislosti na topografických atributech území (Mackey, 2002). Jak uvádí Kumhálová et al. (2014), konvexní plochy mají tendenci vodu ztrácet, zatímco plochy konkávního charakteru vodu, a s ní zároveň i živiny, zadržují. Z výsledků tohoto porovnání (tabulka č.3) je patrný značný rozdíl v hodnotách pro roky 2005 a 2011, kdy byla pěstována *pšenice ozimá*. V roce 2005 byl výnos na topografickém faktoru závislý o poznání méně (0.280), než v roce 2011 (0.610). Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben nevyrovnaností srážek v jednotlivých fázích vývoje vegetace v roce 2011 (tabulka č.5). Naopak oves vykazuje v obou letech stejné hodnoty korelace s TWI (0.530). Oves je oproti *pšenici ozimé* rostlinou mělce kořenící a je tedy mnohem více závislý na okamžitých srážkách (Kumhálová, et al., 2014; Novák, 2016, in verb).

Popisné charakteristiky VI a výnosu *pšenice ozimé* jsou shrnuty v tabulce č.6. Průměrné výnosy jsou pro oba sledované roky obdobné (6.04; 6.92 [t/ha]), ačkoliv v roce 2011 lze pozorovat nižší minimální a zároveň vyšší maximální hodnoty. Toto širší rozpětí dat lze vysvětlit nevyrovnaností srážek v průběhu jednotlivých fenologických fází v roce 2011 (tabulka č.5). Pokud jde o popisné charakteristiky vybraných VI, průměrné hodnoty se v rámci sledovaných let příliš neliší. Značně rozdílné hodnoty lze najít u SRVI, kde maxima v roce 2005 dosáhla znatelně vyšších hodnot, než v roce 2011 (25.53; 14.76). Tento fakt se promítá i do hodnot směrodatných odchylek daného indexu (4.46; 2.68). U většiny VI, jakožto i u výnosu a TWI, lze pozorovat negativní zešikmení dat. Tyto hodnoty ukazují na pozici aritmetického průměru, který je v tomto případě nalevo do mediánu. Většina hodnot datového souboru je tedy vyšší, než samotný průměr. Pozitivní zešikmení dat lze najít pro oba roky u MSI a CVI a dále v roce 2011 u SRVI. Pozorované průměrné teploty se ve sledovaných letech příliš neliší a pravděpodobně tak nijak zásadně neovlivnily variabilitu dat.

Popisná charakteristika pro oves je dále shrnuta v tabulce č.7. Zde je naopak patrný značný rozdíl v průměrných hodnotách výnosu, kdy v roce 2006 je tato hodnota více než dvojnásobná oproti roku 2010 (4.72; 2.10 [t/ha]). Rozpětí dat mezi minimálními a maximálními hodnotami, stejně jako směrodatné odchylky, však dosahují podobných hodnot pro oba sledované roky. Vyšší výnos v roce 2006 tak

může být vysvětlen celkově vyššími srážkami, jak v průměru, tak jejich sumou (tabulka č.5). Popisné charakteristiky VI se ve sledovaných letech také příliš neliší. Opět lze pozorovat rozdíl u SRVI. V roce 2010 byla data značně variabilnější, což dokazuje nejen rozpětí dat mezi minimem a maximem, ale i vyšší směrodatná odchylka (7.32) oproti roku 2006 (4.98). Negativní zešikmení dat je pro oves pozorováno ve všech případech s jedinou výjimkou, kterou tvoří MSI. Vývoj průměrných teplot byl, stejně jako u *pšenice ozimé*, v obou sledovaných letech velmi podobný a proto také zásadněji nevysvětlují variabilitu dat.

Další otázkou k diskuzi je vlastní využití snímků družicového systému LANDSAT pro výpočet VI pro relativně malé plochy. Zkoumaný zemědělský pozemek o rozloze 11.5 ha byl snímán s prostorovým rozlišením 30 m. Výsledkem bylo zobrazení ve formě rastru o 130 pixelech. Zhang et Pierce (2013) uvádějí, že využití snímků ze systému LANDSAT pro účely precizního zemědělství je právě pro své malé prostorové rozlišení omezeno. Proti tomuto tvrzení však vystupují výsledky mnoha autorů. Například Guo et al. (2012) s využitím těchto snímků úspěšně hodnotil výnos bavlníkového pole o rozloze 50 ha. Dále pak výzkum výnosu kukuřice a sóji na 100x50 km (Doraiswamy et al., 2004) či výzkum Juliána et al. (2011), kdy byl hodnocen výnos různých plodin na ploše odpovídající dvěma družicovým snímkům. Tato otázka pak byla řešena i v rámci experimentálního pozemku VÚRV, v.v.i v Praze-Ruzyni opět s kladným výsledkem (Kumhálová et al., 2014). Možná nevýhoda 30 m rozlišení se pak objevuje při převodu ostatních dat (výnosových či topografických) na stejné rozlišení (*resampling*). Zde může docházet ke zkreslování některých dat právě díky vytváření průměrných hodnot pro jednotlivé pixely (Kumhálová, 2016, in litt.), viz obrázek č.1. Kumhálová et al. (2014) však dodává, že výhodou snímků ze systému LANDSAT je možnost využití různých spektrálních pásem k výpočtu VI. Rozlišení 30 m se tedy zdá být naprosto dostačujícím pro analýzy tohoto typu.

8. Závěr

Předkládaná diplomová práce se věnuje problematice DPZ, následně pak výpočtu VI a určení jejich vhodnosti pro popis variability výnosu zemědělských plodin.

Na základě čtyř družicových snímků bylo s pomocí specializovaného SW spočítáno celkem devět VI, vždy pro každý sledovaný rok. Tyto indexy byly dále upraveny pro porovnání s výnosovými daty a topografickými atributy území. Korelační analýza byla provedena s použitím statistického SW. Výsledky této analýzy pak ukázaly na silnou korelaci se všemi vybranými VI. Lze tedy předpokládat, že tyto indexy s přihlédnutím k topografickým a meteorologickým podmínkám velmi dobře popisují charakter sledovaného vegetačního povrchu.

Tato skutečnost má význam především v rámci rozvoje *precizního zemědělství*. V době, kdy světová populace přesahuje již 7 mld obyvatel a stále roste, je třeba o to více dbát na principy *trvale udržitelného rozvoje*. Precizní zemědělství, které si klade za cíl s pomocí moderních technologií vhodně směřovat agronomický management a tím snižovat finanční a environmentální zátěž zemědělské produkce, bezpochyby patří k těmto principům. Jeho rozvoj je tedy s ohledem na budoucí generace více než žádoucí.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

9.1 Literární zdroje

- ❖ BIRTH G. et McVEY G., 1968: Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer. *Agronomy Journal* 60: 640-643.
- ❖ BOEGH E., SOEGAARD H., BROGE N., HASAGER C., JENSEN N., SCHELDE K. et THOMSEN A., 2002: Airborne Multi-spectral Data for Quantifying Leaf Area Index, Nitrogen Concentration and Photosynthetic Efficiency in Agriculture. *Remote Sensing of Environment* 81: 179-193.
- ❖ CAMPBELL J.B., 1996: *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis, London, 622 s.
- ❖ CECCATO P. et al., 2001: Detecting Vegetation Leaf Water Content Using Reflectance in the Optical Domain. *Remote Sensing of Environment* 77: 22-33.
- ❖ DIXON J.[ed.], 1997: *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. National Academy Press, Washington, D.C., 149 s.
- ❖ DOBROVOLNÝ P., 1998: *Dálkový průzkum Země, Digitální zpracování obrazu*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity, Katedra Geografie, Brno, 208 s.
- ❖ DORAISWAMY P.C., HATFIELD J.L., JACKSON T.J., AKHMEDOV B., PRUEGER J. et STERN A., 2004: Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote sensing of Environment*, 92: 548-559.
- ❖ GITELSON A. et MERZLYAK M., 1998: Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research* 22: 689-692.
- ❖ GUO W., MAAS S.J. et BRONSON K.F., 2012: Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography and Landsat imagery. *Precision Agriculture*, 13: 678-692.
- ❖ HUETE A. et al., 2002: Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* 83: 195-213.
- ❖ HUETE A., 1988: A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295.

- ❖ HUNT Jr. E. et ROCK B., 1989: Detection of Changes in Leaf Water Kontent Using Near- and Modele-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment* 30: 43-54.
- ❖ CHAVEZ P.S., 1975: Atmospheric, Solar, and M.T.F. Corrections for ERTS Digital Imagery. *Proceedings, American Society of Photogrammetry*, 69-69a.
- ❖ CHENG E., 2015: *Aerial Photography and Videography Using Drones*. Peachpit Press, Berkeley, 288 s.
- ❖ JONES H. G. et VAUGHAN R. A., 2010: *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press, Oxford, New York, 353 s.
- ❖ JULIEN Y., SOBRINO J.A. et JIMÉNEZ-MUNOZ J.C., 2011: Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 711-720.
- ❖ KOLÁŘ J., HALOUNOVÁ L., PAVELKA K., 1997: *Dálkový průzkum Země 10*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 164 s.
- ❖ KUMHÁLOVÁ J., NOVÁK P., ZEMEK F. et MADARAS M., (submitted) 2015: Evaluation of oat and winter wheat variability using Landsat and ALI satellite time series within a small plot. Submitted to *Precision Agriculture*.
- ❖ KUMHÁLOVÁ J., ZEMEK F., NOVÁK P., BROVKINA O. et MAYEROVÁ M., 2014: Use of Landsat images for yield evaluation within a small plot. *Plant Soil Environment*, 60(11): 501-506.
- ❖ LIČEV L., 2010: *Analýza, modelování, rozpoznávání a vizualizace procesu měření objektů na snímcích*. Computer Press, 127 s.
- ❖ MACKEY B., 2002: *Wildlife, Fire & Future Climate: A Forest Ecosystem Analysis*. Csiro Publishing, Clayton, 188 s.
- ❖ MOORE, I.D., GRAYSON R.B. et LADSON A.R., 1991: Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5: 3-30.
- ❖ MUDRYCH Z., 1985: *Dálkový průzkum Země*. Academia, Praha, 144 s.
- ❖ PAVELKA K., 1999: *Zpracování obrazových záznamů DPZ*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 138 s.
- ❖ POURABBAS E. [ed.], 2014: *Geographical Information Systems: Trends and Technologies*. Taylor & Francis, London, 347.
- ❖ RICHARDS J. A., 1993: *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin, 340 s.

- ❖ RONDEAUX G., STEVEN M. et BARET F, 1996: Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* 55: 95-107.
- ❖ ROUSE J., HAAS R., SCHNELL J. et DEERING D, 1973: Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA*: 309-317.
- ❖ SWITZER P., KOWALICK W.S., LYON R.J.P.: 1981: Estimation of Atmospheric Path-Radiance by the Covariance Matrix Method. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 47: 1469-1476.
- ❖ VINCINI M., FRAZZI E. et D'ALESSIO P, 2008: A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at canopy scale. *Precision Agriculture* 9: 303-319.
- ❖ ZHANG Q. et PIERCE J.F, 2013: *Agricultural Automation: Fundamentals and Practices*. CRC Press.
- ❖ ZHANG Q., 2015: *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. CRC Press, Boca Raton, 360 s.

9.2 Internetové zdroje

- ❖ ARCDATA PRAHA, 2016: ENVI. ARCDATA PRAHA, online: <http://www.arcddata.cz/produkty/envi>, cit. 28.1.2016.
- ❖ EXELIS, 2011: ENVI. Exelis, Virginia, online: <http://www.exelisinc.com/solutions/ENVI/Pages/default.aspx>, cit. 28.1.2016.
- ❖ GEOPORTAL PRAHA, 2010: Co je GIS?. Geoportal Praha, Praha, online: <http://www.geoportalpraha.cz/cs/clanek/11/co-je-gis#.VqEMsfnhDIU>, cit. 20.1.2016.
- ❖ GISSAT, 2016: ENVI. GISsat, Parmaribo, online: <http://www.gissat.com/gissat/envi.php>, cit. 28.1.2016.
- ❖ HARRIS, 2016a: Vegetation Indices. HARRIS, Melbourne, online: <http://www.exelisvis.com/docs/vegetationindices.html>, cit. 21.1.2016.
- ❖ HARRIS, 2016b: Broadband Greenness. HARRIS, Melbourne, online: <http://www.exelisvis.com/docs/broadbandgreenness.html>, cit. 21.1.2016.
- ❖ HARRIS, 2016c: Canopy Water Content. HARRIS, Melbourne, online: <http://www.exelisvis.com/docs/canopywatercontent.html>, cit. 21.1.2016.
- ❖ HARRIS, 2016d: Spectral Indices. HARRIS, Melbourne, online: <http://www.exelisvis.com/docs/spectralindices.html#Narrowba>, cit. 21.1.2016.

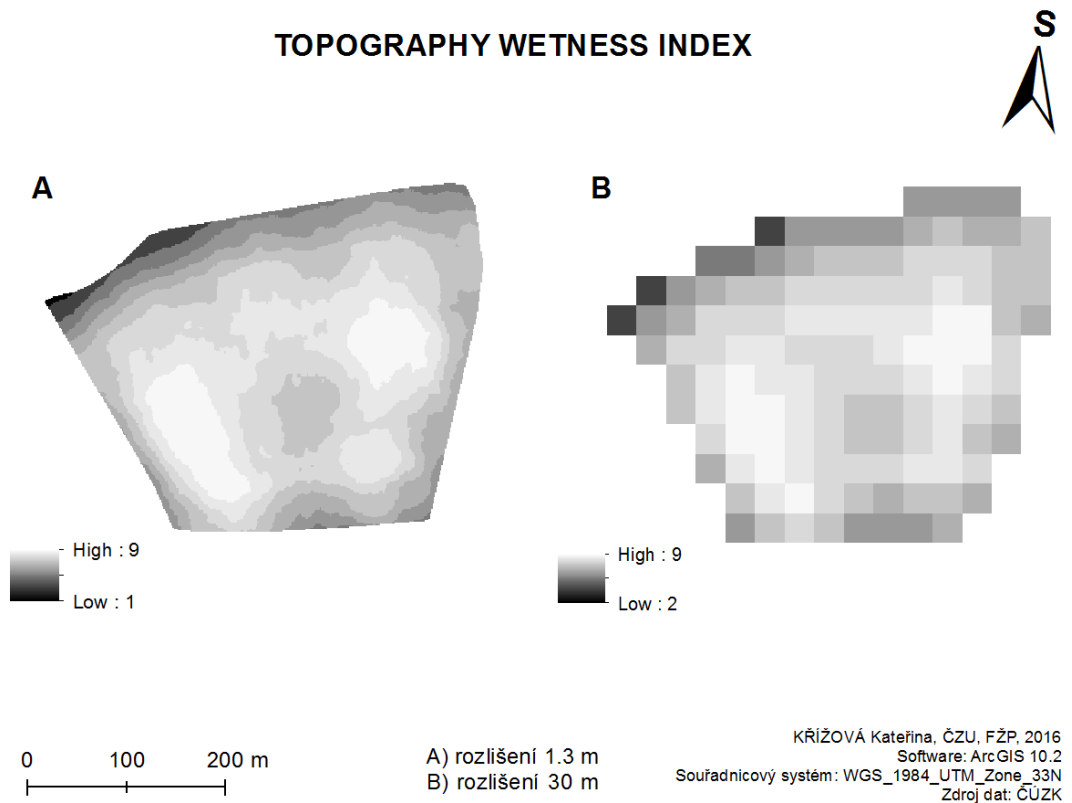
- ❖ USGS, 2013: Landsat 7 History. USGS, Reston, online: http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php, cit. 19.12.2016.
- ❖ USGS, 2014: Landsat 5 History. USGS, Reston, online: http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php, cit. 19.1.2016.
- ❖ USGS, 2015a: Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972. USGS, Reston, online: <file:///C:/Users/Katerina/Documents/DP/Landsat%20Missions%20Timeline.html>, cit. 19.1.2016.
- ❖ USGS, 2015b: Landsat 8 History. USGS, Reston, online: http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php, cit. 19.12.2016.

9.3 Software

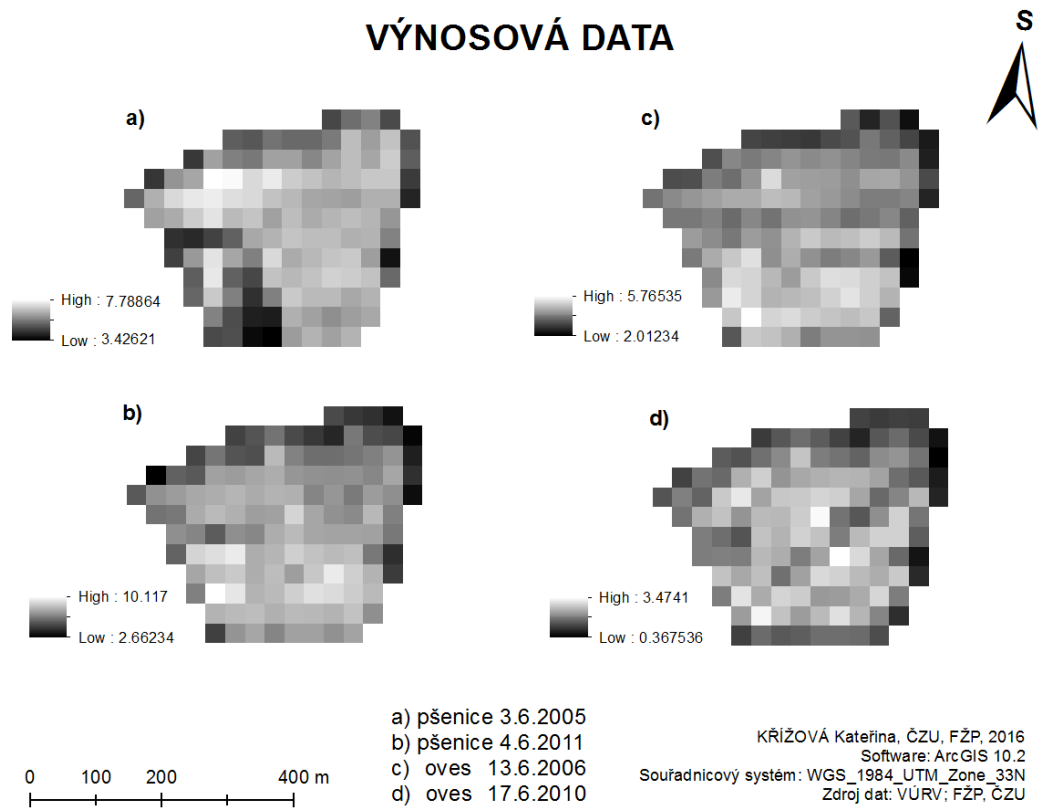
- ❖ ARCGIS, version 10.1, ESRI, CA, USA.
- ❖ ARCGIS, version 10.2, ESRI, CA, USA.
- ❖ ENVI; version 5.3, Exelis, Inc., McLean, VA, USA.
- ❖ R Core Team, 2015: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

10. Přílohy

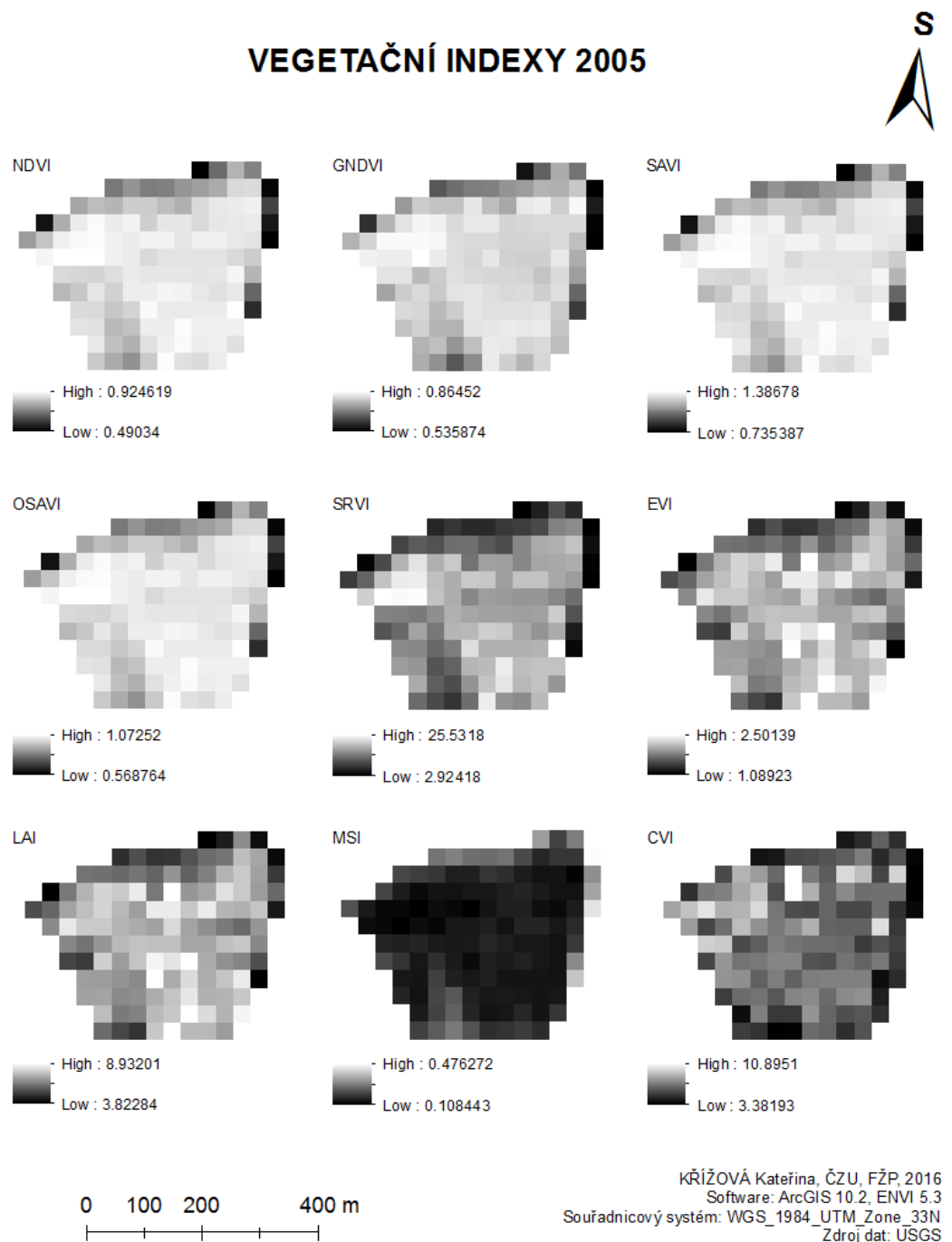
Obr.1: Topografický faktor TWI (zdroj: vlastní)



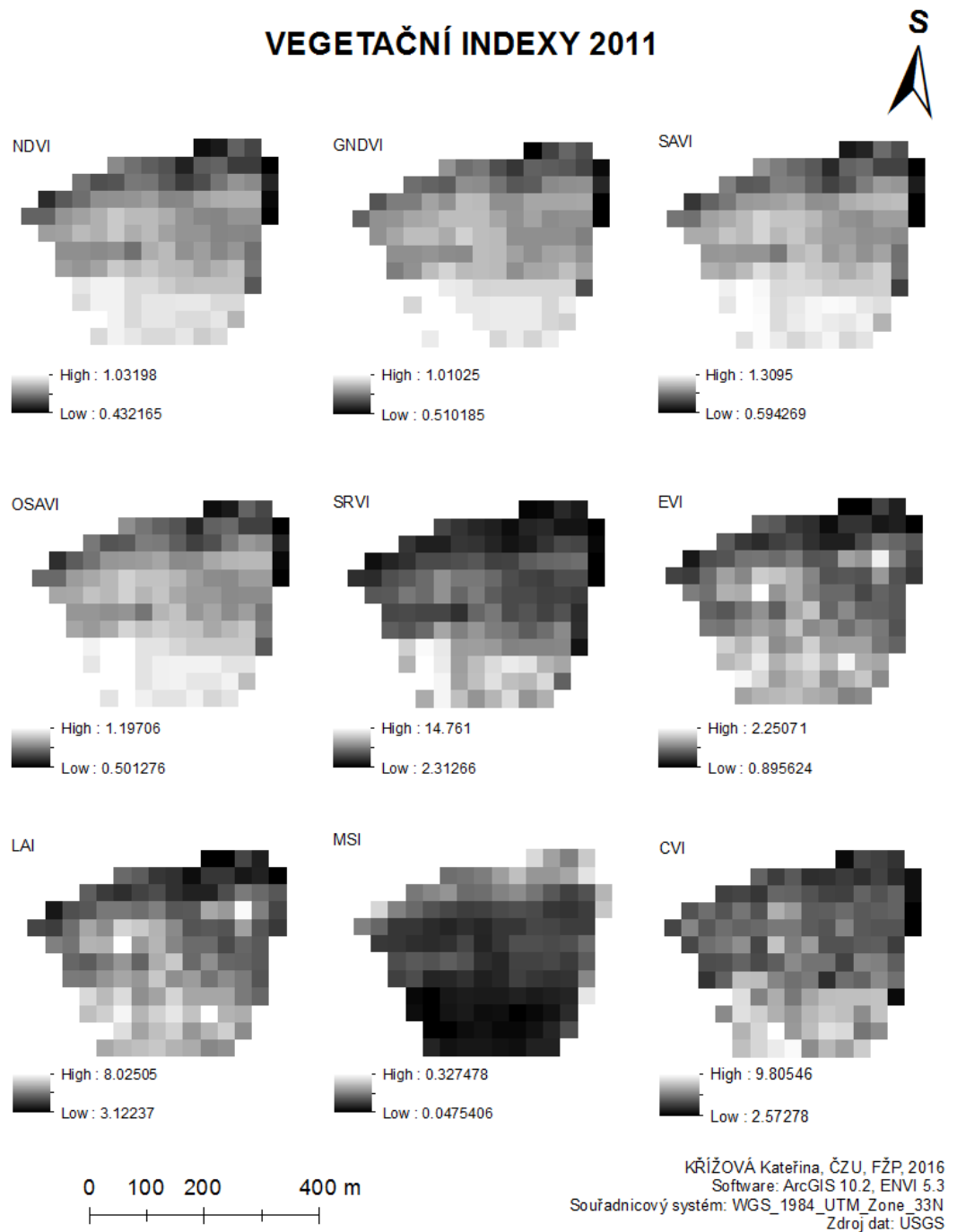
Obr.2: Výnosová data [t/ha] (zdroj: vlastní)



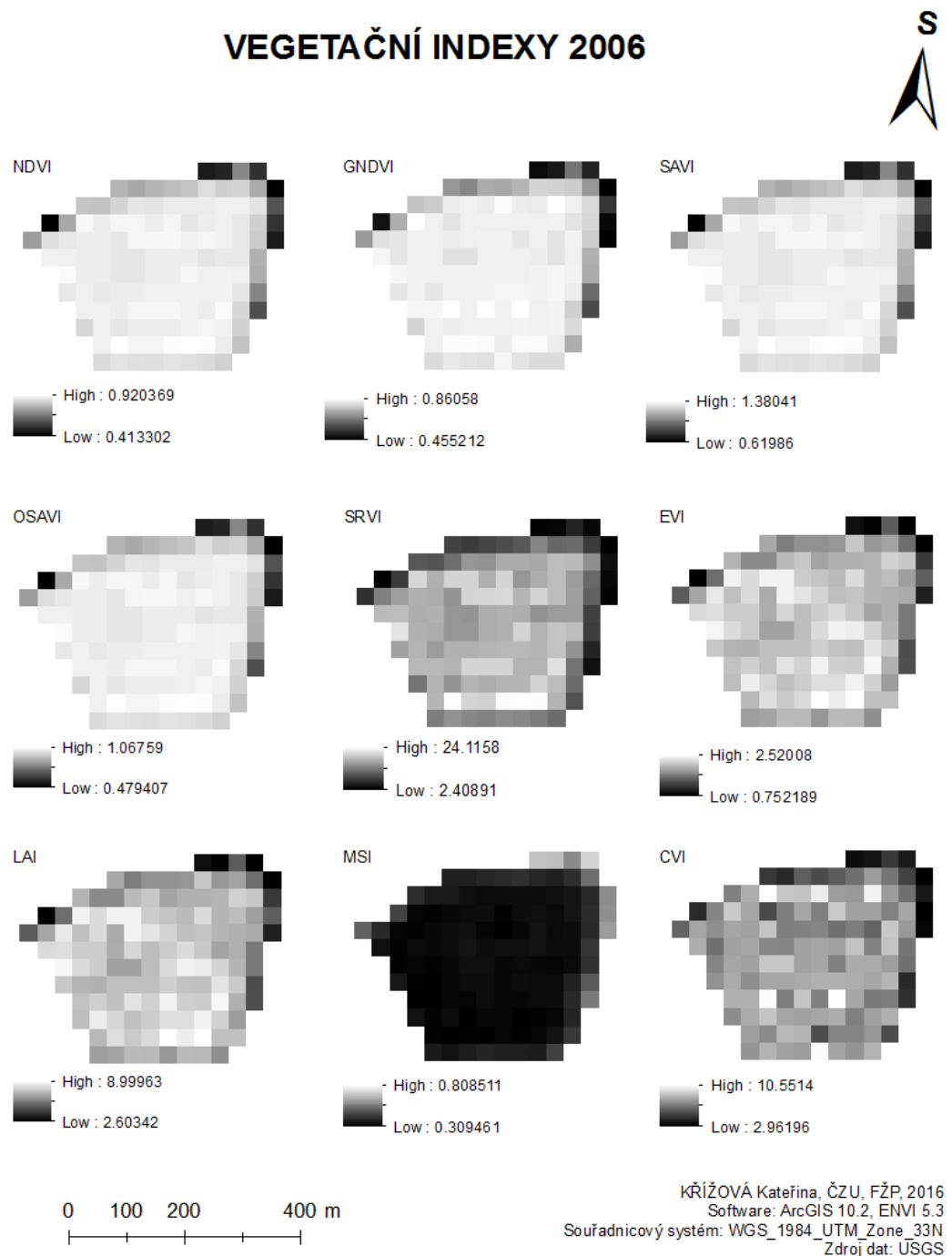
Obr.3: Vegetační indexy (pšenice, 2005) (zdroj: vlastní)



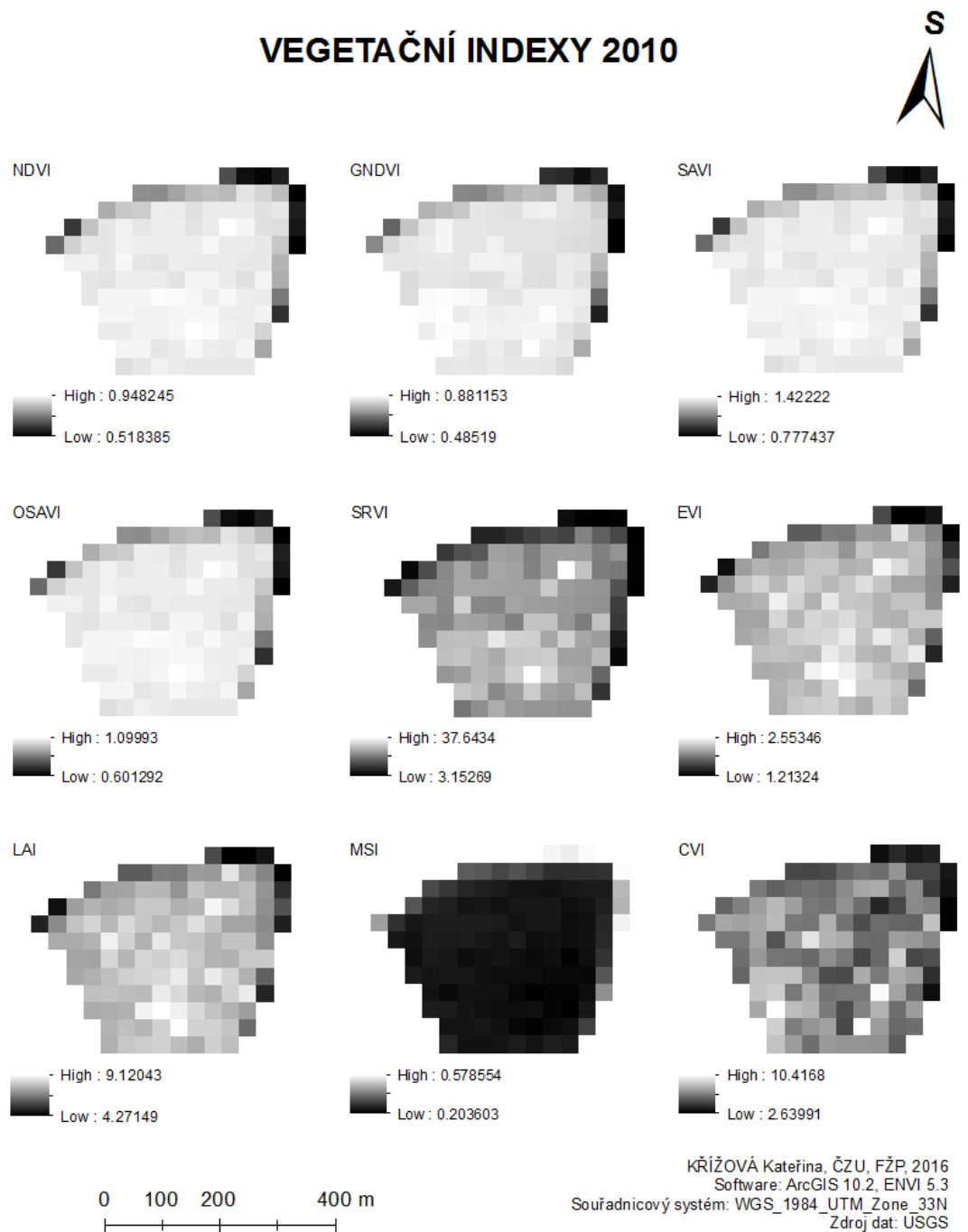
Obr.4: Vegetační indexy (pšenice, 2011) (zdroj: vlastní)



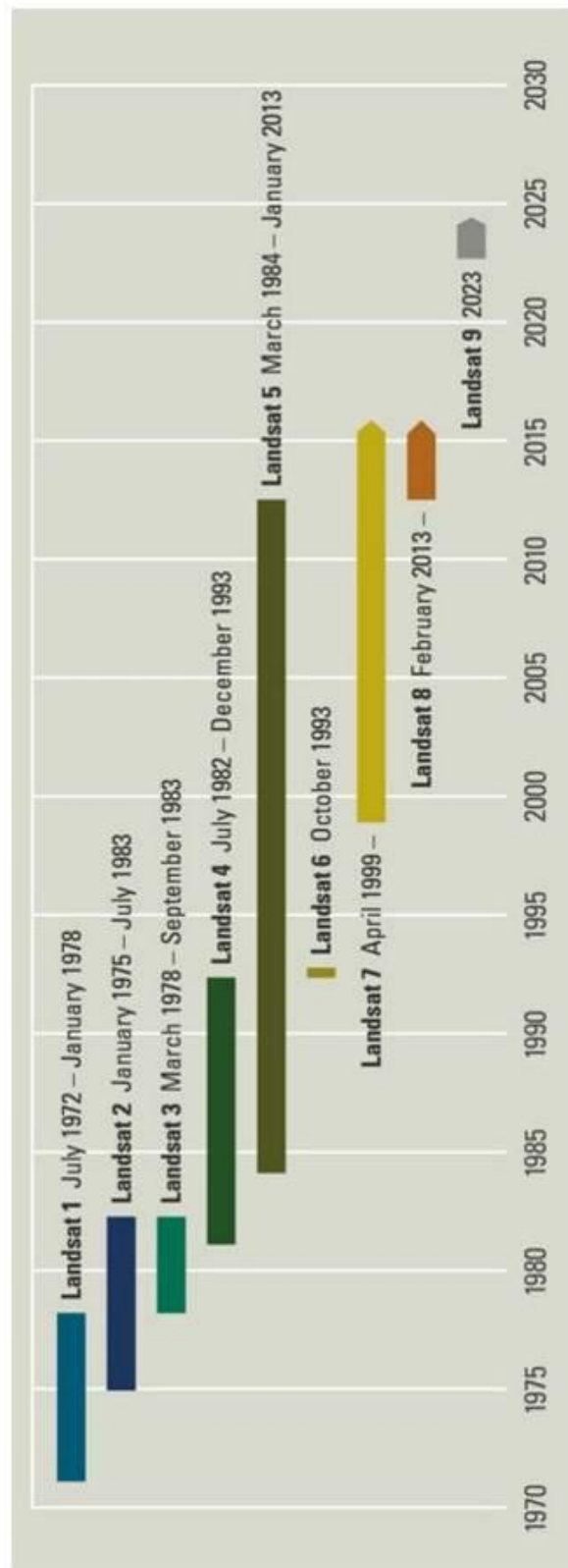
Obr.5: Vegetační indexy (oves, 2006) (zdroj: vlastní)



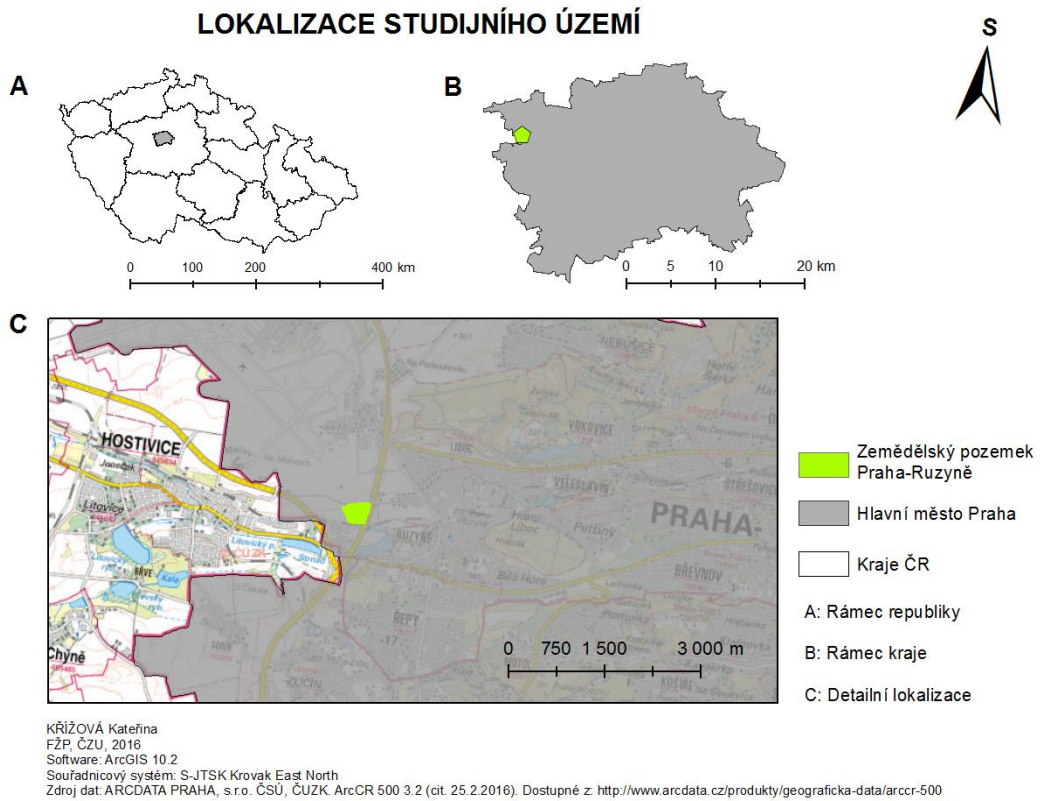
Obr.6: Vegetační indexy (oves, 2010) (zdroj: vlastní)



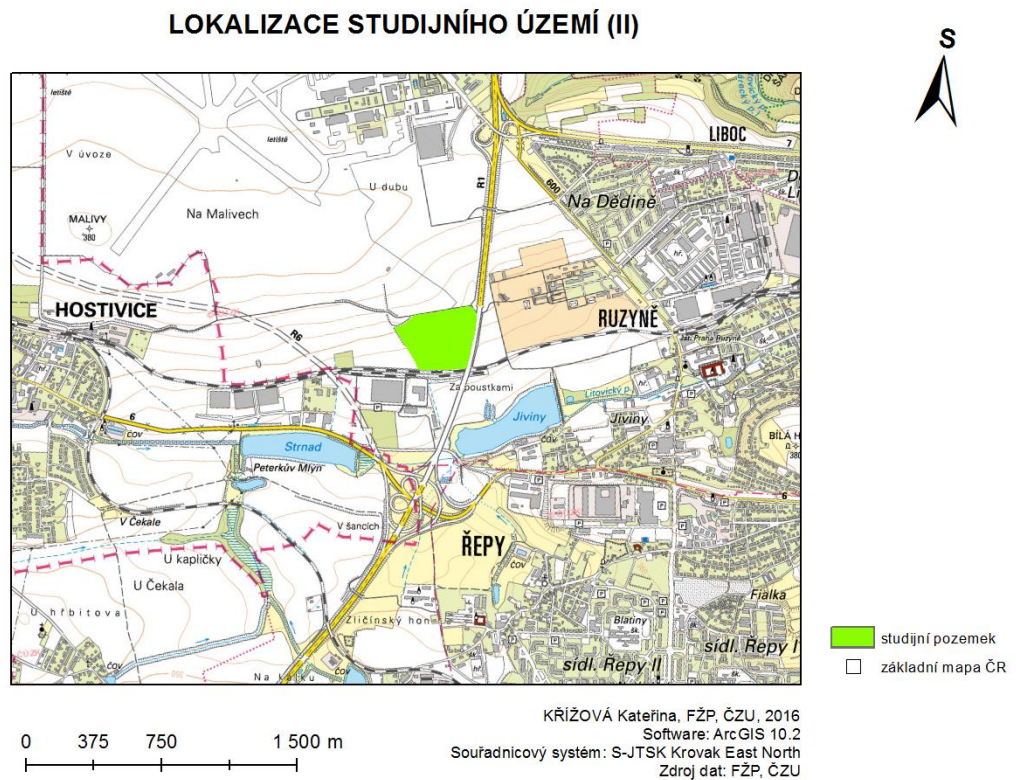
Obr. 9: Družice systému LANDSAT (zdroj: USGS, 2015a)



Obr.12: Lokalizace studijního území (zdroj: vlastní)



Obr.13: Lokalizace studijního území (II) (zdroj: vlastní)



Tab.1: Základní informace k použitým družicovým snímkům (zdroj: Kumhálová et al., 2014)

	PŠENICE		OVES	
<i>Datum</i>	3.6.2005	4.6.2011	13.6.2006	17.6.2010
<i>Typ sensoru</i>	LANDSAT 5	LANDSAT 5	LANDSAT 5	LANDSAT 5

Tab.2: Hodnoty korelace pro výnos, TWI a VI (zdroj: vlastní)

		NDVI	GNDVI	SAVI	OSAVI	SRVI	EVI	LAI	MSI	CVI	
PŠENICE	2005	VÝNOS	0.625	0.679	0.625	0.625	0.684	0.591	0.591	-0.655	0.495
		TWI	0.44	0.41	0.44	0.44	0.41	0.41	0.41	-0.48	0.19
		<i>korelační koef.</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031
		<i>p-value</i>	0.787	0.768	0.800	0.787	0.702	0.715	0.715	-0.835	0.650
2011	VÝNOS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		TWI	0.410	0.390	0.410	0.410	0.320	0.440	0.440	-0.490	0.290
		<i>korelační koef.</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		<i>p-value</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
OVES	2006	VÝNOS	0.699	0.712	0.699	0.699	0.768	0.705	0.705	-0.665	0.567
		TWI	0.500	0.490	0.500	0.500	0.590	0.480	0.480	-0.510	0.380
		<i>korelační koef.</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		<i>p-value</i>	0.656	0.673	0.656	0.656	0.694	0.652	0.652	-0.615	0.514
2010	VÝNOS	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
		TWI	0.500	0.480	0.500	0.500	0.600	0.550	0.550	-0.530	0.300
		<i>korelační koef.</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		<i>p-value</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tab.3: Průměrné hodnoty a hodnoty korelace pro topografický faktor a výnos (zdroj: vlastní)

	PŠENICE		OVES	
	2005	2011	2006	2010
VÝNOS	6.04	6.92	4.72	2.10
TWI	6.64			
<i>korelační koef.</i>	0.280	0.610	0.530	0.530
<i>p-value</i>	0.001	0.000	0.000	0.000

Tab.4: Přístroje na družicích systému LANDSAT (zdroj: viz tabulka)

Družice	Přístroje			
LANDSAT 1	RBVm	MSS		
LANDSAT 2	RBVm	MSS		
LANDSAT 3	RBVp	MSSt		
LANDSAT 4		MSS	TM	
LANDSAT 5		MSS	TM	
LANDSAT 6			ETM	
LANDSAT 7			ETM+	
LANDSAT 8			OLI	TIRS

m - multispectral RBV (Richards, 1993)
 p - panchromatic RBV (Richards, 1993)
 t - MSS with thermal band (Richards, 1993)
 RBV - The Return Beam Vidicon (Richards, 1993)
 MSS - The Multispectral Scanner (Richards, 1993)
 TM - The Thematic Mapper (Richards, 1993)
 ETM - Enhanced Thematic Mapper (Richards, 1993)
 ETM+ - Enhanced Thematic Mapper plus (USGS, 2013)
 OLI - Operational Land Imager (USGS, 2015b)
 TIRS - Thermal Infrared Sensor (USGS, 2015b)

Tab.5: Meteorologické podmínky (zdroj: Kumhálová et al., 2014)

Srážky (mm)				
	oves		pšenice	
	2006	2010	2005	2011
BBCH 20-29	111.4	93.4	83.4	104.4
BBCH 30-59	48.6	84.7	90.4	39.5
BBCH > 60	94.6	142.3	207.8	257.4
Suma	254.6	320.4	381.6	401.3
Průměr	84.9	106.8	127.2	133.8

Teplota (°C)				
	oves		pšenice	
	2006	2010	2005	2011
BBCH 20-29	14.1	12.3	4	3.4
BBCH 30-59	16.6	16.5	13.9	14.8
BBCH > 60	22.2	21.1	18.4	17.9
Průměr	17.6	16.6	12.1	12

Tab.6: Popisná statistika (pšenice) (zdroj: vlastní)

PŠENICE							
2005							
	suma	průměr	median	minimum	maximum	směrodatná odchylna	šikmost
NDVI	130	0.84	0.87	0.49	0.92	0.08	-2.31
GNDVI	130	0.79	0.81	0.54	0.86	0.06	-2.04
SAVI	130	1.26	1.30	0.74	1.39	0.12	-2.31
OSAVI	130	0.97	1.01	0.57	1.07	0.09	-2.31
SRVI	130	13.38	14.35	2.92	25.53	4.46	-0.39
EVI	130	2.06	2.10	1.09	2.50	0.28	-0.94
LAI	130	7.32	7.49	3.82	8.93	1.02	-0.94
MSI	130	0.18	0.16	0.11	0.48	0.06	2.43
CVI	130	6.53	6.51	3.38	10.90	1.58	0.35
TWI	130	6.64	7.00	2.00	9.00	1.67	-0.52
VÝNOS	130	6.04	6.29	3.43	7.79	0.96	-0.73
2011							
	suma	průměr	median	minimum	maximum	směrodatná odchylna	šikmost
NDVI	130	0.83	0.83	0.43	1.03	0.13	-0.66
GNDVI	130	0.84	0.85	0.51	1.01	0.11	-0.61
SAVI	130	1.08	1.09	0.59	1.31	0.14	-0.78
OSAVI	130	0.96	0.97	0.50	1.20	0.15	-0.66
SRVI	130	6.93	6.35	2.31	14.76	2.68	0.63
EVI	130	1.58	1.57	0.90	2.25	0.30	-0.04
LAI	130	5.59	5.57	3.12	8.03	1.10	-0.04
MSI	130	0.13	0.12	0.05	0.33	0.06	1.21
CVI	130	5.82	5.56	2.57	9.81	1.54	0.39
TWI	130	6.64	7.00	2.00	9.00	1.67	-0.52
VÝNOS	130	6.92	7.29	2.66	10.12	1.54	-0.70

Tab.7: Popisná statistika (oves) (zdroj: vlastní)

OVES							
2006							
	suma	průměr	median	minimum	maximum	směrodatná odchylna	šikmost
NDVI	130	0.85	0.89	0.41	0.92	0.10	-2.71
GNDVI	130	0.81	0.84	0.46	0.86	0.08	-2.60
SAVI	130	1.27	1.33	0.62	1.38	0.15	-2.71
OSAVI	130	0.98	1.03	0.48	1.07	0.11	-2.71
SRVI	130	14.98	17.06	2.41	24.12	4.98	-0.89
EVI	130	2.06	2.13	0.75	2.52	0.34	-1.83
LAI	130	7.35	7.60	2.60	9.00	1.21	-1.83
MSI	130	0.37	0.34	0.31	0.81	0.09	2.87
CVI	130	7.12	7.53	2.96	10.55	1.44	-0.73
TWI	130	6.64	7.00	2.00	9.00	1.67	-0.52
VÝNOS	130	4.72	4.18	2.01	5.77	0.76	-0.49
2010							
	suma	průměr	median	minimum	maximum	směrodatná odchylna	šikmost
NDVI	130	0.88	0.92	0.52	0.95	0.09	-2.55
GNDVI	130	0.82	0.85	0.49	0.88	0.08	-2.55
SAVI	130	1.33	1.37	0.78	1.42	0.13	-2.55
OSAVI	130	1.03	1.06	0.60	1.10	0.10	-2.55
SRVI	130	20.80	22.78	3.15	37.64	7.32	-0.85
EVI	130	2.14	2.19	1.21	2.55	0.28	-1.62
LAI	130	7.63	7.80	4.27	9.12	1.00	-1.62
MSI	130	0.27	0.25	0.20	0.58	0.08	2.73
CVI	130	6.53	6.40	2.64	10.42	1.49	-0.15
TWI	130	6.64	7.00	2.00	9.00	1.67	-0.52
VÝNOS	130	2.10	2.11	0.37	3.47	0.68	-0.24

Tab.8: VI s nejvyššími hodnotami korelačních koeficientů při porovnání s výnosovými daty a TWI (zdroj: vlastní)

>

PŠENICE	2005	VÝNOS	<i>SRVI (0.684)</i>	<i>GNDVI (0.679)</i>	<i>MSI (-0.655)</i>
		TWI	<i>MSI (-0.48)</i>	<i>NDVI, SAVI, OSAVI (0.44)</i>	<i>EVI, GNDVI, LAI, SRVI (0.41)</i>
	2011	VÝNOS	<i>MSI (-0.835)</i>	<i>SAVI (0.800)</i>	<i>NDVI, OSAVI (0.787)</i>
		TWI	<i>MSI (-0.490)</i>	<i>EVI, LAI (0.440)</i>	<i>NDVI, OSAVI, SAVI (0.410)</i>
OVES	2006	VÝNOS	<i>SRVI (0.768)</i>	<i>GNDVI (0.712)</i>	<i>EVI, LAI (0.705)</i>
		TWI	<i>SRVI (0.590)</i>	<i>MSI (-0.510)</i>	<i>NDVI, OSAVI, SAVI (0.500)</i>
	2010	VÝNOS	<i>SRVI (0.694)</i>	<i>GNDVI (0.673)</i>	<i>NDVI, OSAVI, SAVI (0.656)</i>
		TWI	<i>SRVI (0.600)</i>	<i>EVI, LAI (0.550)</i>	<i>MSI (-0.530)</i>