

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO
PLÁNOVÁNÍ



**Určení spektrálních charakteristik
zemědělských plodin pomocí metod dálkového
průzkumu Země**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Bc. Klára Kyselová

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Klára Kyselová

Aplikovaná ekologie

Název práce

Určení spektrálních charakteristik zemědělských plodin pomocí metod dálkového průzkumu Země

Název anglicky

Spectral characteristics determination of agricultural crops with the help of remote sensing methods

Cíle práce

- zpracovat rešerši k problematice dálkového průzkumu Země (DPZ) a charakteristik vybraných systémů DPZ
- vybrat a zpracovat vhodné zdroje dat
- vybrat zájmovou lokalitu a popsat její charakteristiky
- porovnat výsledky s referenčními soubory dat a určit variabilitu sledovaného porostu
- zhodnotit využití vybraných souborů dat DPZ v zemědělství

Metodika

Nejprve se autor seznámí s problematikou DPZ, se spektrálními charakteristikami a metodikou využití metod DPZ v zemědělství. Na toto téma pak zpracuje literární rešerši. Dále autor popíše vybranou lokalitu. V praktické části autor data zpracuje dle takové metodiky, která bude nejlépe charakterizovat podmínky daného území a umožní určit variabilitu sledovaného porostu. Na základě výstupů a statistické analýzy autor výsledky zhodnotí a v diskuzi porovná s jinými případovými studii a odbornou literaturou. Řešení praktické části diplomové práce počítá s využitím geografických informačních systémů, především SW ENVI a ArcGIS a jeho nadstavěb.

Doporučený rozsah práce

40-80 stran

Klíčová slova

dálkový průzkum Země, zemědělství, obrazová data, spektrální indexy

Doporučené zdroje informací

HALOUNOVÁ, L. & PAVELKA, K. (2008). Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT, Praha, 192 s.

JONES, H. G. & VAUGHAN, R. A. (2010). Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications. Oxford university Press, Oxford, New York.

KUMHÁLOVÁ, J., ZEMEK, F., NOVÁK, P., BROVKINA, O. & MAYEROVÁ, M. (2014). Use of Landsat images for yield evaluation within a small plot. Plant Soil and Environment, 60(11), 501-506.

LILLESLAND, T.M., KIEFER, R.W. & CHIPMAN, J.W. (2015). Remote sensing and image interpretation, 7th ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 768 s.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Určení spektrálních charakteristik zemědělských plodin pomocí metod dálkového průzkumu Země“ vypracovala samostatně, pod vedením Mgr. Jitky Kumhálové, Ph.D. a uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Praze 11. 4. 2017

.....

Poděkování

Moje poděkování patří Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za cenné rady a vstřícnost při vedení této práce a Ing. Petru Novákovi, Ph.D. za konzultaci výsledků. Také bych ráda poděkovala své rodině a příteli za podporu při studiu vysoké školy.

Abstrakt

Metody dálkového průzkumu Země jsou v posledních letech rychle se rozvíjející oblastí získávání informací o zemském povrchu a jeho vlastnostech. Využití satelitních snímků je v současném pojetí v rámci zemědělských věd rozšířeno především na výpočet vegetačních indexů. Jedná se o časově nenáročnou a nedestruktivní metodu analyzování vegetace. Využívá se například v oblasti plánovaného zemědělství, které se v posledních letech zformovalo v odvětví nazývané precizní zemědělství.

V této práci byly analyzovány satelitní snímky komerčních družic WorldView-2 a SPOT-7, volně dostupné snímky družice Landsat 8 a hodnoty spektrálního indexu naměřené aktivním senzorem GreenSeeker Handheld Crop Sensor. Všechny tyto systémy se liší svým prostorovým, spektrálním a časovým rozlišením. Pro analýzu byly vybrány dva zemědělské pozemky s ozimým ječmenem (*Hordeum vulgare* conv. *vulgare*) na lokalitě Praha-Ruzyně a ječmenem jarním (*Hordeum vulgare* conv. *distichon* var. *nic*) na lokalitě Vendolí v sezóně 2015. Pro tyto plodiny byl s použitím satelitních snímků počítán vegetační index NDVI. S využitím softwaru ENVI a ArcGIS byla získaná data zpracována a dále byla provedena statistická analýza Pearsonovým korelačním indexem. Do této analýzy byly také zahrnuty hodnoty NDVI měřené aktivním senzorem GreenSeeker. Korelace NDVI s výnosem byla prokázána především u snímků družice Landsat 8, GreenSeekeru a družice SPOT-7. Využití indexu NDVI lze tedy označit za přínosné pro predikci výnosu a zjišťování stavu porostů.

Klíčová slova

Dálkový průzkum Země, zemědělství, obrazová data, spektrální indexy.

Abstract

In recent years, methods of remote sensing are rapidly developing in the area of obtaining information about the Earth's surface and its features. Using satellite images is extended mainly to the calculation of vegetation indices in the current concept. It is time-saving and non-destructive method for analysing vegetation. It is also used in branches such as the planned agriculture, which has recently formed into industry called precision agriculture.

In this thesis, satellite images of commercial satellites WorldView-2 and SPOT-7, free available images of satellite Landsat 8 and values of the spectral index measured by the active sensor Greenseeker Handheld Crop Sensor, were analysed. All these systems differ in their spatial, spectral and temporal resolution. Two agricultural fields of winter barley (*Hordeum vulgare* conv. *vulgare*) at Prague-Ruzyně and spring barley (*Hordeum vulgare* conv. *distichon* var. *nici*) at the site Vendolí in season 2015 were selected for the analysis. Vegetation index NDVI was calculated for these crops using satellite images. Obtained data were processed using ENVI and ArcGIS software. Further statistical analyses using Pearson correlation index were made. NDVI values, measured by the GreenSeeker active sensor, were also included in these analyses. NDVI correlation with yield was significant on images of Landsat 8, GreenSeeker and SPOT-7. NDVI index can be beneficially used for yield prediction and crops condition determination.

Key words

Remote sensing, agriculture, image data, spectral indices.

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. CÍLE PRÁCE	11
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	12
3.1 DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ.....	12
3.2 HISTORIE DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ.....	12
3.3 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ	14
3.3.1 Interakce záření s atmosférou	17
3.3.1.1 <i>Atmosférická korekce</i>	18
3.3.2 Interakce záření se zemským povrchem	19
3.3.3 Interakce s vegetací	19
3.4 DRUŽICOVÉ SYSTÉMY	20
3.4.1 Základní parametry družicových systémů.....	22
3.4.1.1 <i>Snímací senzory</i>	22
3.4.2 Landsat 8	23
3.4.2.1 <i>Operational Land Imager (OLI)</i>	23
3.4.2.2 <i>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</i>	24
3.4.3 WorldView-2.....	24
3.4.4 SPOT-7	25
3.5 GREENSEEKER HANDHELD CROP SENSOR.....	26
3.6 PRECIZNÍ ZEMĚDĚLSTVÍ	26
3.6.1 Predikce výnosu plodin	27
3.7 FENOLOGIE	27
3.8 JEČMEN OZIMÝ (HORDEUM VULGARE CONV. VULGARE).....	30
3.9 JEČMEN JARNÍ (HORDEUM VULGARE CONV. DISTICHON VAR. NICI)	30
3.10 VEGETAČNÍ INDEXY	31
3.10.1 Broadband Greenness	31
3.10.1.1 <i>Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)</i>	31
3.10.1.2 <i>Green Normalised Difference Vegetation Index (GNDVI)</i>	32
4. METODIKA	33
4.1 DRUŽICOVÁ DATA	33
4.2 VÝNOSOVÁ DATA.....	34
4.3 DATA Z RUČNÍHO MĚŘENÍ NDVI	34
4.4 METEOROLOGICKÁ DATA.....	35
4.5 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT	35
5. CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍCH ÚZEMÍ	36
5.1 PRAHA-RUZYŇ	36
5.2 VENDOLÍ	38

6. VÝSLEDKY	41
7. DISKUSE.....	48
8. ZÁVĚR.....	53
9. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
9.1 INTERNETOVÉ ZDROJE	61
10. PŘÍLOHY	64

1. ÚVOD

Současný trend v růstu lidské světové populace je neustále stoupající. Odhady tvrdí, že i nadále bude početnost populace na planetě stoupat a tento růst se bude neustále zrychlovat. Z důvodu zvyšujícího se počtu obyvatel na Zemi a jejich konzumního života je nutno tomuto růstu odpovídat adekvátní produkcí, a to zejména potravin. Pod tlak se tedy dostává hlavně oblast zemědělství, které v naší krajině hraje významnou roli.

Pro rostoucí lidskou populaci jsou nezbytné především nutričně hodnotné a vyvážené potraviny, které již v současné době bez aditivních látek nelze vyprodukovat v potřebném množství (Filho 2004). Neustále se také snižuje plocha orné půdy, což vede k intenzifikaci zemědělství. Na druhé straně se ve společnosti formuje tlak na šetrné využívání přírodních zdrojů a omezení negativních dopadů na krajinu.

Tyto skutečnosti vedly v zemědělství ke zformování odvětví precizního zemědělství, které pracuje s detailními daty a snaží se o efektivní hospodaření s maximálními ekonomickými užitky a minimálními environmentálními dopady detailním sledováním obhospodařovaného území a jeho charakteristik jako je vlhkost, obsah živin, riziko eroze apod. (Whelan a Taylor 2013). Primární produkce je základním předpokladem přežití a vývoje lidstva, proto je třeba toto odvětví rozvíjet. V precizním zemědělství je možné využívat metody dálkového průzkumu Země, kdy vyhodnocováním družicových snímků můžeme získat cenná data. Na základě těchto zjištěných informací pak lze vhodně přizpůsobit obhospodařování jednotlivých pozemků a následně i celé krajiny, čímž můžeme omezit dopady na ekosystémy a životní prostředí. V případě zjištění možného úbytku produkce zemědělských plodin v průběhu vegetační sezóny je zde tímto způsobem vytvářen prostor pro strategické plánování dalšího postupu s možností snížení dopadu této skutečnosti na celou společnost i hospodařící jednotlivce (Doraiswamy a kol. 2004).

2. CÍLE PRÁCE

Cílem teoretické části této diplomové práce je zpracování literární rešerše s využitím informací o dálkovém průzkumu Země, včetně jeho využití v zemědělství a dalších oborech.

Cílem praktické části diplomové práce je pak porovnání využití jednotlivých družicových systémů s pomocí vybraných softwarů porovnáním získaných dat o výnosu jednotlivých zemědělských plodin a snímků s vypočítaným vegetačním indexem NDVI.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Dálkový průzkum Země

Pro pojem dálkový průzkum Země (DPZ) existuje několik různých definic. Vůbec poprvé byl termín remote sensing (v překladu dálkový průzkum Země) použit v roce 1960. Nejčastěji je tento obor, či vědní disciplína definována jako činnost, která se zabývá získáváním informací o zemském povrchu bez přímého kontaktu s ním (Budd 1991, Schowengerdt 2006, Schott 2007). Velký rozvoj dálkového průzkumu byl zaznamenán v posledních několika desetiletích, kdy bylo prokázáno, že z něj pro společnost mohou plynout velice užitečné informace. Tyto informace nelze zjistit pouze místním pozorováním a monitoringem, nebo je to příliš náročné či nákladné. Jde především o procesy, které se odehrávají ve velkých měřících na úrovni celé krajiny, případně je s pomocí satelitních snímků možné vyhodnocovat těžko dostupné oblasti a jejich změny v průběhu času (Schott 2007). Ve své práci Shunlin a kol. (2012) uvádí DPZ jako možnost poznání procesů probíhajících na naší planetě, která je lidstvem využívána, avšak dopady naší činnosti na celou planetu nám nejsou v plné šíři známy. DPZ tedy může být i nástrojem k vyhodnocování a předpovídání pravděpodobnosti a síly dopadu určité činnosti na ekosystémy, krajinu i celou planetu. Dalším benefitem těchto metod je zjištění informací neviditelných pouhým okem, díky práci s více spektry záření, kterých se v dálkovém průzkumu využívá (Müllerová 2001).

Dálkový průzkum je založen na systému, který se skládá ze základny, například letadlo, vesmírná raketa či balón, případně může být i pevně spojen se zemí, a speciálního senzoru, který zachytává elektromagnetické záření a získané informace poskytuje k dalším analýzám. Získaná data jsou buď vizuálního, či digitálního charakteru (Joseph 2005).

3.2 Historie dálkového průzkumu Země

Již od dob počátku hospodaření s půdou se člověk dostával do situací, kdy musel vyhodnotit, zda jsou pro něj a jeho hospodaření vhodné místní podmínky, či nikoliv. Toto hodnocení probíhalo většinou pouze na malém měřítku. Průzkumem dané lokality, případně pohledem z nějakého vyvýšeného místa, které napomohlo udělat si celkovou představu o krajině, jejím využití a funkci ekosystémů (Schott 2007). Jako prvopočátek DPZ je označován snímek z roku 1859, který byl pořízen z balónu ve Francii. Autorem této fotografie je Gaspard Felix Tournachon.

Snímkování z balónů bylo později využíváno pro průzkumy i v průběhu americké občanské války (Liverman a kol. 1998). Následně v roce 1860 byla z balónu vytvořena fotografie města Boston. Na počátku 20. století si pak nechal patentovat J. Neubronne fotografickou komoru připevněnou na tělo poštovního holuba. V tomto období byly taktéž vyhotoveny první letecké snímky Prahy pořízené J. Plischkem z balónu (Dobrovolný 1998).

Další výraznou etapou v historii dálkového průzkumu představují světové války. Snímkování se provádělo především pro účely vojenské, ale i pro sledování topografie terénu, později bylo využíváno i v oblastech lesnictví a zemědělství (Dobrovolný 1998).

Po konci druhé světové války ve Spojených státech amerických a také v Sovětském svazu probíhal vývoj kosmických letounů pro rozsáhlejší snímkování. První snímek zemského povrchu z vesmíru pořídila Americká družice Explorer a Sovětský svaz navázal vypuštěním svých tří družic Sputnik v roce 1957. Tento rok je pak ve spojení s vypuštěním této družice označován jako počátek dálkového průzkumu Země snímkováním z vesmíru (Halounová a Pavelka 2008). Americká kosmická společnost NASA (*National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a kosmonautiku*) později vypustila v programech DPZ několik dalších družic. První z nich byly vypuštěny především za účelem získání geodetických dat a sledování povrchu Země, později se přidávaly různé elektrooptické senzory, které výzkum posunuly dále (Schott 2007).

V roce 1960 NASA vypustila první meteorologickou družici TIROS. Tato mise byla velice úspěšná a program družic TIROS byl podporován jak veřejností, tak i politiky a celkem bylo v intervalu pěti let těchto družic vysláno do vesmíru deset (National Research Council 2008). Následnou spoluprací s NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration – Národní úřad pro oceán a atmosféru*) byl program TIROS prodloužen a rozšířen senzory pro snímání teploty vody v oceánech, výšky sněhové pokrývky a mocnosti vrstvy ledu (NASA 2016).

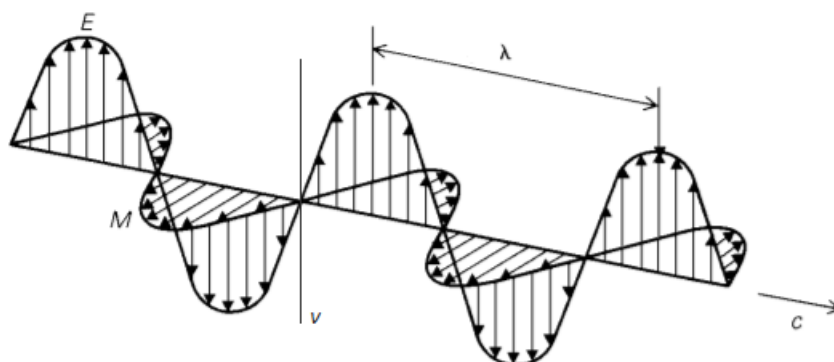
S postupem času byly družicové systémy zdokonalovány a jejich počet se zvyšoval spolu s množstvím a kvalitou informací, které poskytovaly pomocí různých zařízení a senzorů na jednotlivých družicích. Nejednalo se však pouze o rozvoj snímacích a pozorovacích zařízení. Souvisel s tím i rozvoj vědeckých disciplín, které mohly nově využívat data z dálkového průzkumu Země pro analýzu a predikci vývoje ekosystému, meteorologických jevů, geologických jevů, rozvoj navigačních systémů a další (National Research Council 2008).

S postupným vývojem přesnosti, kvality a množství získávaných informací byl DPZ využíván pro studium vegetace a v zemědělství pro sledování stavu zemědělských plodin, jejich předpokládaný výnos, případně vliv topografie či vlastností půdy na výnos plodin na dané lokalitě (Domínguez a kol. 2015), které vyžadovalo přesnější metody s větším rozlišením. Pro zjišťování těchto poznatků byly odvozeny vegetační indexy, se kterými se v oblasti studia vegetace pracuje již od roku 1978 (Jones a Vaughan 2010).

3.3 Fyzikální principy dálkového průzkumu Země

Každé těleso na zemském povrchu má svůj specifický vzorec chování. Vyznačuje se jedinečným projevem v závislosti na vyzařování jednotlivých vlnových délek elektromagnetického záření, odrážení a pohlcování záření, které na něj dopadá. Podle toho lze odlišovat jednotlivé materiály a objekty (CENIA 2016). Určitým způsobem také působí a ovlivňuje okolní prostředí a tělesa prostřednictvím tzv. silových polí. Jedním z těchto silových polí je také elektromagnetické záření, jehož vlastnosti jsou využívány při dálkovém průzkumu Země (Dobrovolný 1998).

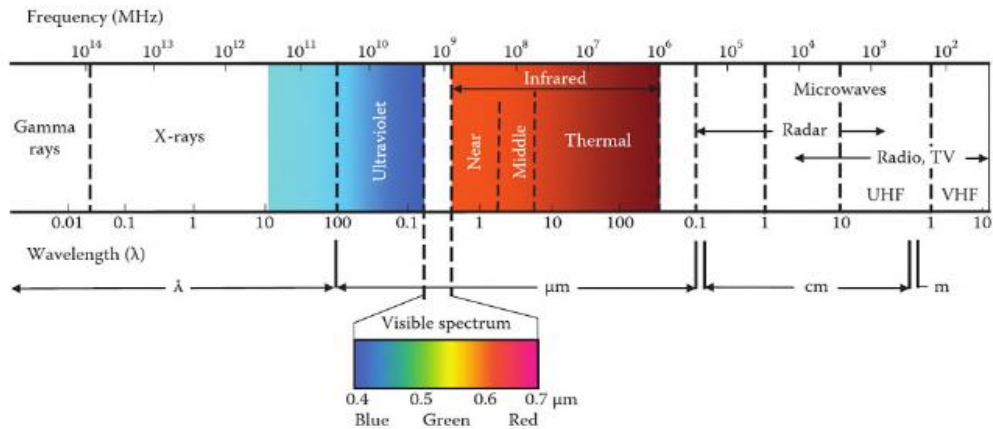
Elektromagnetické záření se skládá z elektrického a magnetického pole. Obě tato pole se šíří kolmo ke směru záření (viz obr. 1). Pro elektromagnetické záření definujeme tři základní charakteristiky, a to vlnovou délku, rychlost a frekvenci (Aggarwal 2004b). Vlnová délka (λ) vyjadřuje vzdálenost libovolného bodu na křivce záření k bodu, který se nachází ve stejné poloze na dané křivce. Rychlost se vyjadřuje jako rychlost světla (c), které tvoří část spektra elektromagnetického záření a frekvence (ν) vyjadřuje počet kmitů – vrcholů vlnění, za jednotku času.



Obr. 1: Schéma elektromagnetického záření (Aggarwal 2004b).
 E = elektrické pole, M = magnetické pole, λ = vlnová délka, c = rychlost světla, ν = frekvence.

Podle vlnových délek elektromagnetického záření rozeznáváme hlavní intervaly záření – spektra. Vlnová délka závisí na pohybu atomů v molekulách, na typu atomů a také na druhu chemické vazby, která se v dané látce vyskytuje. Molekuly mají svá specifika vyzařování a skupiny s podobnou vlnovou délkou vytvářejí téměř totožné pásy ve spektru. Odtud pak plyne označení tohoto spektra jako pásové. Elektromagnetické záření je produkováno také jednotlivými atomy, pokud přecházejí do jiných energetických drah v obalu molekuly (Halounová a Pavelka 2008).

Elektromagnetické záření je rozeznáváno částečně i lidským okem. To však představuje pouze malou část celého spektra v intervalu od 400 do 700 nanometrů. Tuto část nazýváme viditelným zářením (Schott 2007). Jednotlivá spektra se od sebe liší intervaly vlnových délek, ve kterých je můžeme zaznamenávat (viz obr. 2). Nejmenší vlnovou délku má kosmické záření, které se však pro dálkový průzkum Země nevyužívá. Dalším zářením je ultrafialové záření, které již DPZ využívá. Na ultrafialovou část spektra navazuje zmiňované viditelné spektrum. Čtvrtý interval tvoří infračervené záření, které ještě rozdělujeme na blízké, střední a termální. Poslední dva intervaly spektra jsou označovány jako mikrovlnné záření a radiové a televizní vlny (Dobrovolný 1998).



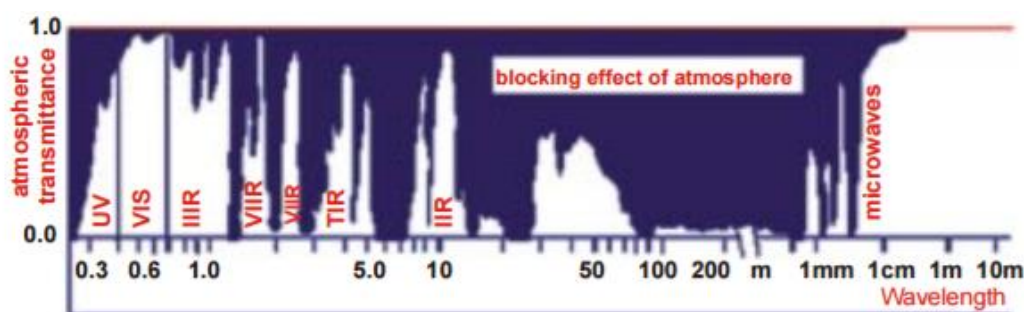
Obr. 2: Typy elektromagnetického záření dle vlnové délky (λ) (Chuvieco 2016).

V rámci DPZ pak rozlišujeme metody aktivní a pasivní. Pasivní metody snímají elektromagnetické záření, které se odráží od jednotlivých objektů na Zemi, na něž dopadá záření ze Slunce. Případně samy tyto objekty vyzařují, pokud je jejich teplota vyšší než absolutní nula. Pak hovoříme o termálním snímání. Metody aktivní využívají vysílání vlastního záření a zpětného přijímání odraženého signálu od jednotlivých objektů, z kterého pak vyvozují závěry a získávají informace (Rees 2012). Mezi aktivní systémy získávání dat patří RADAR (*Radio Direction and Ranging*), který pracuje s elektromagnetickým zářením, které je vysíláno směrem k zemi a přijímáno senzorem a SONAR (*Sound Navigation and Ranging*), který využívá akustickou energii. Tyto aktivní systémy jsou v současnosti hojně využívány v metodách dálkového průzkumu Země (Barrett 2013).

Pasivní metody dálkového průzkumu, které využívají dopadajícího slunečního záření na zkoumané objekty, jsou závislé na vlastnostech atmosféry, rozptylových podmínkách a také na úhlu dopadajícího paprsku. Budd (1991) ve své práci uvádí, že například vegetace bude mít jiné spektrální charakteristiky za slunečného dne, než když bude zataženo. Atmosféra také ovlivňuje využitelnost jednotlivých druhů elektromagnetického záření v dálkovém průzkumu, a to pohlcováním dané vlnové délky. Záření, které proniká atmosférou je tímto průchodem ovlivňováno. Proto je nutné využívat atmosférické korekce (Rees 1999).

Ozon, oxid uhličitý a vodní pára jsou nejčastějšími látkami v atmosféře, jež záření pohlcují. Zároveň také dochází k rozptylu záření v důsledku existence částic mnohem menších, než je samotná vlnová délka záření. Tento rozptyl je pak více patrný na záření s kratšími vlnovými délkami (Dobrovolný 1998). Jedinou výjimkou ve vlivu atmosféry a oblačnosti je termální záření. To prochází díky

své delší vlnové délce i oblačností a rozptyl na částicích přítomných v atmosféře ho při průchodu atmosférou tolik nepozměňuje (National Research Council 2008). Kvůli pohlcování slunečního záření atmosférou rozeznáváme tzv. atmosférická okna, v nichž prochází sluneční záření atmosférou k zemskému povrchu (viz obr. 3). Celkem rozeznáváme 11 atmosférických oken (Aggarwal 2004b). Většina sluneční energie dopadající na povrch je ve viditelné a infračervené části spektra (Jones a Vaughan 2010).



Obr. 3: Atmosférická okna (Aggarwal 2004b).

3.3.1 Interakce záření s atmosférou

Sluneční záření se před kontaktem s atmosférou šíří rychlostí světla ve vakuu. Po průchodu atmosférou se jeho rychlost šíření sníží interakcí s atmosférou. Průchodem atmosférou však dojde k jeho ovlivnění nejen v rychlosti, ale i intenzitě, vlnové délce a spektrální distribuci (Hadjimitsis a kol. 2010). Jako hlavní důsledky působení atmosféry můžeme jmenovat lom světla, rozptyl světla, absorpci a odrazivost. Tyto jednotlivé procesy charakterizuje Jensen (2015) takto:

Lom světla (refraction) je ovlivněn přechodem záření z prostředí s jinou hustotou. Lom světla se projevuje především při sledování ostrých úhlů, případně při vizualizaci dat naměřených z energetických veličin.

Rozptyl (scattering) světla je nepředvídatelný, avšak velmi častý jev interakce záření s atmosférou. Rozptyl lze charakterizovat základními třemi typy jako Rayleighův rozptyl, někdy také označován jako molekulární, Mieův rozptyl, a neselektivní rozptyl.

- *Rayleighův rozptyl* se projevuje, pokud molekuly vzduchu v atmosféře jsou mnohonásobně menší než vlnová délka záření. Rozptylu je dosaženo absorpcí a reemisí záření molekulami,

či atomy. Nejvíce k tomuto rozptylu dochází ve výšce 2-8 metrů nad zemským povrchem.

- *Mieův rozptyl* – nemolekulární, či rozptyl na částicích aerosolu, se projevuje především ve spodních vrstvách atmosféry kolem 4,5 kilometru. Velikost částic, které tento rozptyl způsobují, je přibližně stejná, jako vlnová délka záření. Tento rozptyl je větší ve svém rozsahu, než Rayleighův rozptyl.
- *Neselektivní rozptyl* ovlivňuje záření především ve spodních vrstvách atmosféry. Částice, které ho způsobují, jsou více než desetinásobně větší. Neselektivnost znamená, že ovlivňuje všechny vlnové délky záření.

Absorpce (absorption) je proces, kdy je energie záření absorbována a přeměněna na jinou formu energie. K absorpci dochází v atmosféře, ale i na zemském povrchu. Dochází k ní, pokud dopadající energie má stejnou frekvenci jako je rezonanční frekvence atomu molekuly a pohlcením této energie dojde k excitaci elektronu. Pokud po excitaci nenastane zpětné vyzáření ve formě fotonu se stejnou vlnovou délkou, energie je transformována na tepelnou a následně vyzářena s jinou vlnovou délkou. Tím dochází k absorpci některých vlnových délek.

Odráživost (reflectance) je proces kdy se záření odrazí od objektu, na který dopadá. Odráživost závisí na vlastnostech objektu, od něhož se záření odráží a také na úhlu dopadu záření. Odraz může nastat zrcadlový, téměř zrcadlový, difúzní.

3.3.1.1 *Atmosférická korekce*

Z důvodu interakce s atmosférou je nutné u družicových dat provést tzv. atmosférickou korekci. Tento krok je nezbytný k získání skutečných hodnot odrazivosti a tím i zjištění skutečných vlastností povrchu. Zejména je nutné tuto korekci použít, pracujeme-li s různými snímky a z nich například zjišťujeme vegetační indexy vegetace. Korekci je nutné provést, aby byly hodnoty správné a mohly být porovnávány mezi sebou a nevznikaly nesrovnalosti ve výsledcích (Hadjimitsis a kol. 2010). Nesrovnalosti pak mohou v závislosti na využitých spektrálních pásech znamenat rozdíly až 10 % (Che and Price 1992).

V rámci software ENVI společnosti Excelis VIS je dostupná atmosférická korekce FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*), která upravuje vlnové délky. Její použití je možné téměř u všech typů multispektrálních a hyperspektrálních snímků v pásmech viditelného, infračerveného (IR) a krátkovlnného infračerveného záření (SWIR) (HARRIS 2017b). Tato korekce byla vytvořena ve spolupráci Air Force Research Laboratory, NASA a amerických vládních organizací. Pro nastavení funkce je možné ručně zvolit velké množství parametrů, na základě nichž proběhne výpočet. Jedná se například o obsah aerosolů v atmosféře, určení polohy Slunce, či kvality viditelnosti a lze s ní i vyhledávat doplňkové jevy jako například částice vodní páry či aerosoly v atmosféře (Matthew a kol. 2002).

Druhou možností atmosférické korekce v programu ENVI je korekce QUAC (*Quick Atmospheric Correction*). Proces je značně rychlejší a je více automatický. Nelze tedy měnit některé parametry a korekce je počítána pouze na základě hodnot v pixelech. Tuto korekci je rovněž možno použít pro většinu multispektrálních a hyperspektrálních snímků v pásmech viditelného, infračerveného a krátkovlnného infračerveného záření (HARRIS 2017c).

3.3.2 Interakce záření se zemským povrchem

Záření, které dopadá na zemský povrch, může být po dopadu na určitý typ povrchu změněno. Tato změna je popisována jako odraz, absorpce a/nebo vedení. Poměry mezi těmito změnami záření po interakci s povrchem se mění v závislosti na vlastnostech povrchu, ale také na vlnové délce dopadajícího záření. Touto interakcí také vznikají jednotlivé barvy objektů, dle vlnové délky, kterou objekty nejvíce odráží či pohlcují. V závislosti na těchto spektrálních projevech jednotlivých materiálů a povrchů, lze charakterizovat dané objekty dle jejich typického spektrálního chování (Lillesand a kol. 2015).

3.3.3 Interakce s vegetací

Při dopadu na vegetaci jsou některé vlnové délky absorbovány, jiné naopak odraženy. Listový pigment chlorofyl silně pohlcuje viditelné záření v rozsahu vlnových délek 0,4-0,7 μm v červené a modré části spektra. Naopak v zelené části spektra je lokální maximum odrazivosti. Lidskému oku se potom jeví vegetace jako zelená. Tuto část spektra pak rostliny využívají k fotosyntéze. Záření

infračervené je buněčnými strukturami rostlin odráženo. Jedná se o vlnové délky 0,7-1,1 μm . Čím větší listovou plochu rostlina má, tím je odraz větší (Weier a Herring 2000).

Spektrální odrazivost vegetace lze obecně popsat vysokým nárůstem hodnot odrazivosti v blízké infračervené části spektra. Každý druh rostliny však v závislosti na vlastnostech svého těla záření odráží jiným, specifickým způsobem, z nichž pak při dostatečně detailních datech lze vylišit i jednotlivé druhy, případně nezdravé porosty od zdravých. Spektrální odrazivost vegetace je rozdělena do tří oblastí (Halounová a Pavelka 2008). Jedná se o:

- oblast pigmentační absorpce
- oblast buněčné struktury (vysoká odrazivost)
- oblast vodní absorpce

Oblast pigmentační absorpce je označována jako oblast absorpce viditelného záření ve vlnových délkách 0,4-0,7 μm . V této oblasti je spektrální odrazivost nízká z důvodu přítomnosti chlorofylu, který pohlcuje záření především v modré a červené části spektra. Naopak přibližně 10 % záření je odraženo v zelené části spektra. Proto se lidskému oku jeví vegetace jako zelená (Knipling 1970).

V rozsahu vlnových délek 0,72-1,3 μm je charakterizována *oblast buněčné struktury*. V této oblasti dochází k velkému nárůstu odrazivosti vegetace, neboť stavební buňky listu – buňky celulózy, mají v této oblasti nízkou schopnost pohlcování záření, ale jejich index lomu je 1,4, což přispívá k několikanásobnému odrazu uvnitř listu a tím i zvýšení odrazivosti záření. Buňky celulózy mají svou specifickou stavbu uvnitř listu rostliny. Dle stavby a následné různé odrazivosti lze rozeznávat jednotlivé druhy rostlin (Halounová a Pavelka 2008).

Oblast vodní absorpce je vymežována vlnovými délkami 1,3-3 μm . V této oblasti je infračervené záření silně pohlcováno vodou, která je přítomná v buněčných strukturách. Míra odrazivosti se odvíjí od obsahu vody. Čím vyšší obsah vody, tím větší absorpce a menší odrazivost a naopak. Tento princip lze využívat v procesech stanovování vodního stresu vegetace (Rees 2012).

3.4 Družicové systémy

Tělesa, která obíhají díky gravitačním silám kolem planet, případně Slunce, byla dříve označována jako satelity. Dnes mezi tyto satelity zahrnujeme i umělé družicové systémy, které využívá DPZ (Bekeryte 2007). Již v roce 1609 Johanes

Kepler formuloval zákony o pohybu planet ve vesmíru s jejich vztahem ke gravitaci. Objevil tak možnost, jak umístit na oběžnou dráhu umělé satelitní systémy, jejichž vývoj a využívání nastalo ve 20. století. Postupem času docházelo ke zvyšování jejich počtu a dnes tvoří celé družicové soustavy, které získávají data pro dálkový průzkum Země (Pattan 1993). První vlna jejich rozvoje začala s mezinárodní komunikací a satelitní televizí. Následovalo pak využití v DPZ, monitoringu atmosféry a vesmíru a dalších oblastech výzkumu (Maini a Agrawal 2010).

Aggarwal (2004a) již před 13 lety družicovým systémům přikládal velký význam, který se podle něho do budoucna měl ještě zvýšit a spektrální chování a snímkování se podle jeho slov mělo stát a stalo využívanější metodou studia než obyčejné letecké fotografie. Využití těchto snímků ale stále v některých oborech nalézá své uplatnění.

Oproti klasické letecké fotografii na družicových snímcích můžeme sledovat několik informací díky různým zařízením přítomným na nosiči, kterým je ve většině případů družice. Letecké snímky mohou zobrazovat vysoce detailní data, avšak jejich pořizování není periodické a jsou více náchylná na meteorologické podmínky. Například i vítr může svými nárazy ovlivňovat letovou dráhu (Kolář a kol. 1997).

Základní oběžnou drahou, na kterou byly umísťovány satelity je geostacionární oběžná dráha nad rovníkem, která se nachází 35 786 km nad zemským povrchem a rychlost tělesa na této dráze je totožná s rychlostí rotace Země (Bekeryte 2007). Tyto satelity však díky stejné rychlosti jako rotace Země zůstávají stále na stejném místě a mohou tedy sledovat pouze jednu lokalitu na zemském povrchu. V další fázi výzkumu tedy byly analyzovány podmínky, za kterých lze vypustit na oběžnou dráhu družici, která bude negeostacionární, tedy její pohyb nebude stejný jako rotace Země.

Dalším typem oběžné dráhy je heliosynchronní dráha. Na ní umístěná družice obíhá Zemi tak, že je vždy nad stejným místem ve stejný sluneční čas. Tato technologie umožňuje snímání zemského povrchu každý den za stejných světelných podmínek. Tuto dráhu označujeme jako polární. Pohyb objektů po této dráze probíhá ve směru poledníků od severu k jihu v úhlu 90° k rovníku, těleso tedy přelétává nad póly Země (Sivakumar a Hindsman 2004).

3.4.1 Základní parametry družicových systémů

Pro umístění družice na oběžnou dráhu Země je nutná důkladná analýza a propočítání všech důležitých proměnných, které mají na celý proces vliv. Zejména je třeba zohlednit výšku, do které je vhodné družici umístit. Malá výška umístění družice může sice znamenat vyšší podrobnost získaných informací, avšak mohou se zde vyskytovat jevy jako sluneční větry, případně zde může působit síla atmosféry na daný objekt na oběžné dráze. Je zde také vyšší riziko tření, díky kterému může daný satelit zpomalovat svou rychlost. V důsledku toho začne působit gravitace a objekt se pohybuje její silou směrem do atmosféry Země (Tupin a kol. 2014).

Nejzásadnějšími parametry družicových systémů je jejich prostorové a časové rozlišení. Prostorové rozlišení ovlivňuje podrobnost zachyceného obrazu ale zároveň i velikost snímkaného území. Pokud tedy máme nízké rozlišení, můžeme sledovat velké krajinné celky, a naopak pokud je rozlišení vysoké, zobrazit můžeme velmi detailní informace, avšak pouze na menším měřítku. Dalším důležitým parametrem je již zmíněné časové rozlišení. Tím vyjadřujeme informaci, s jakou frekvencí je snímáno dané území. Rozlišení spektrální pak již spíše závisí na jednotlivých přístrojích, které snímají zemský povrch. Jedná se o šíři vlnových délek, kterou je schopen daný přijímač zachytit a vyhodnotit (CENIA 2016).

3.4.1.1 Snímací senzory

Senzor lze charakterizovat jako zařízení, které je schopné přijímat signál, například elektromagnetické záření, a přijímané hodnoty převádět do podoby, kterou lze získávat informace o sledovaném objektu (Aggarwal 2004a). Poprvé byly senzory využity v roce 1972 na satelitu ERTS-1. V roce 1999 pak nastal velký zlom. Senzor nesený družicí IKONOS byl sestaven k získávání trojrozměrných dat o zemském terénu. Od této doby jsou senzory a jejich rozlišení neustále vylepšovány (Downman a kol. 2012).

Snímací senzory můžeme rozdělit do dvou kategorií – aktivní a pasivní, které již byly zmíněny v kapitole Fyzikální principy dálkového průzkumu. Další dělení se provádí dle rozlišení prostorového, kdy se jedná o nejmenší možný zobrazený objekt, či velikost jednoho pixelu, dle rozlišení spektrálního, podle snímaných vlnových délek elektromagnetického záření, časového rozlišení, s jakou dobou opakování je snímána jedna plocha na Zemi, a radiometrického rozlišení,

které určuje, jaké množství dat je obsaženo v jednotlivých pásmech. Další dělení je pak dáno způsobem, kterým senzor předává získané informace. Data jsou buď přímo vysílána na zemský povrch, pokud je viditelná pozemní přijímací stanice, nebo jsou nahrávána do úložiště senzoru a posílán je až větší objem dat. Případně jsou data zasílána pomocí série komunikačních satelitů na geostacionární oběžné dráze (Richards a Jia 1999).

Morain a Budge (2003) u senzorů jako jeden z hlavních předpokladů správného fungování zdůrazňují jejich kalibraci. V současné době jsou proto data o jednotlivých senzorech poskytována uživateli, aby mohla být jejich přesnost a jednotlivé produkty porovnávány mezi sebou.

3.4.2 Landsat 8

Satelit Landsat 8 byl vypuštěn na oběžnou dráhu 11. února 2013 a jeho záznamy zemského povrchu jsou prováděny tak, aby bylo možné jejich porovnání se záznamy z předchozích Landsat misí (NASA 2017a). Landsat 8 se pohybuje po heliosynchronní polární oběžné dráze od severu k jihu ve výšce 705 kilometrů. Každý den provede celkem 14 celých průletů kolem planety a stejné místo na Zemi snímá s frekvencí šestnácti dní (USGS 2016b). Součástí družice Landsat 8 jsou dva nástroje: The Operational Land Imager (OLI) a Thermal Infrared Sensor (TIRS) (USGS 2016a).

3.4.2.1 *Operational Land Imager (OLI)*

Na rozdíl od předchozích misí se u OLI nevyužívá zrcadel, ale více než 7 000 lineárních detektorů na jedno spektrální pásmo. Poskytuje tedy větší množství a přesnější data s menším množstvím pohyblivých částí senzoru. Celková šíře snímaného pásu je 185 kilometrů a snímání zemského povrchu je tímto senzorem prováděno v devíti spektrálních pásmech:

- Kanál 1: 0,433-0,453 μm (pobřežní pásmo)
- Kanál 2: 0,450-0,515 μm (modré viditelné záření)
- Kanál 3: 0,525-0,600 μm (zelené viditelné záření)
- Kanál 4: 0,630-0,680 μm (červené viditelné záření)
- Kanál 5: 0,845-0,885 μm (blízké infračervené záření)
- Kanál 6: 1,360-1,390 μm (infračervené záření)

- Kanál 7: 1,560-1,660 μm (infračervené záření)
- Kanál 8: 0,500-0,680 μm (panchromatický snímek)
- Kanál 9: 2,100-2,300 μm (infračervené záření)

Tento senzor je určen jako hlavní operační senzor družice Landsat 8. Poskytuje kvalitní data s rozlišením 30 metrů, a v případě panchromatického pásma 15 metrů. Jeho životnost je stanovena na 5 let (USGS 2016a).

3.4.2.2 *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*

Fungování toho senzoru je zajištěno obdobně jako u senzoru OLI, tedy snímáním velkým počtem citlivých detektorů. Tento senzor byl k misi Landsat 8 připojen jako doplněk s rozlišením 100 metrů. Senzor zjišťuje data v termální části spektra ve dvou spektrálních pásmech (USGS 2016a):

- Kanál 10 (TIRS 1): 10,600-11,200 μm
- Kanál 11 (TIRS 2): 11,500-12,500 μm

Délka operování tohoto senzoru byla stanovena pouze na 3 roky, na rozdíl od senzoru OLI. Do projektu Landsat 8 byl tento typ senzoru zahrnut aby napomohl dalšímu vývoji v této oblasti dálkového průzkumu Země (NASA 2017b).

3.4.3 WorldView-2

Družice společnosti DigitalGlobe WorldView-2 byla vypuštěna 8. listopadu 2009 do operační výšky 770 kilometrů (Zhang a Gu 2013) a stala se první soukromou družicí, která poskytovala data s osmi spektrálními pásy a jedním panchromatickým pásmem ve velmi vysokém rozlišení. Tato družice pracuje s rozlišením až 50 centimetrů v panchromatickém snímku a rozlišením 2 metry pro multispektrální snímky (Iliadis a kol. 2011). Spektrální snímky této družice jsou díky velmi vysokému rozlišení využívány i pro mapování jednotlivých druhů stromů v porostech, a to i díky svým spektrálním pásmům:

- Kanál 1: 0,400-0,450 μm (pobřežní pásmo)
- Kanál 2: 0,450-0,510 μm (modré viditelné záření)
- Kanál 3: 0,510-0,580 μm (zelené viditelné záření)
- Kanál 4: 0,585-0,625 μm (žluté viditelné záření)

- Kanál 5: 0,630-0,690 μm (červené viditelné záření)
- Kanál 6: 0,705-0,745 μm (pásmo Red Edge)
- Kanál 7: 0,770-0,895 μm (pásmo blízkého infračerveného záření)
- Kanál 8: 0,860-1,040 μm (pásmo blízkého infračerveného záření)
- panchromatický snímek: 0,450-0,800 μm
(DigitalGlobe 2009)

Nově zařazené kanály pro tuto družici jsou využívány především v detekci vegetace a jejího zdravotního stavu. Pobřežní pásmo je citlivé na detekci chlorofylu, žluté pásmo snímá především žluté skvrny na listech vegetace a tím přispívá k detekci onemocnění jednotlivých porostů. Pásmo Red Edge pak napomáhá k rozlišení zdravých jedinců od napadených či poškozených a zároveň napomáhá k věkové a druhové determinaci porostu. Druhé pásmo infračerveného záření, které je méně ovlivňováno atmosférou, přispívá především ke studiu biomasy (Immitzer a kol. 2012).

3.4.4 SPOT-7

Družice SPOT-7 byla 30. června 2014 vypuštěna z indického kosmického střediska společností Airbus Defence & Space (Airbus DS) jako identická družice k již 2 roky operující SPOT-6. Tyto družice byly vypuštěny do výšky 694 kilometrů s rozlišením 1,5 metru v panchromatickém pásmu a 6 m v ostatních spektrálních pásmech (Dicati 2017). SPOT-7 poskytuje data v pěti spektrálních kanálech, z nichž jeden je panchromatický. Předpokládaná doba funkčnosti je odhadována na 10 let (Airbus DS 2013).

- Kanál 1: 0,455-0,525 μm (modré viditelné záření)
- Kanál 2: 0,530-0,590 μm (zelené viditelné záření)
- Kanál 3: 0,625-0,695 μm (červené viditelné záření)
- Kanál 4: 0,760-0,890 μm (pásmo infračerveného záření)
- Kanál 5: 0,455-0,745 μm (panchromatické pásmo)

Na konci roku 2014 byl SPOT-7 převeden do komerčního režimu a nově je označován jako Azersky. Perioda snímání satelitu jsou tři dny. V kombinaci s postavením totožné družice SPOT-6 na protilehlých stranách oběžné dráhy je možné dosáhnout i periody snímání 1 den (Gisat 2014).

3.5 GreenSeeker Handheld Crop Sensor

GreenSeeker Handheld Crop Sensor je zařízení, které slouží k ručnímu měření indexu NDVI a indexu Simple Ratio (SR) jako bodová měření na daném pozemku a vegetaci. Je to optický snímač, který pomocí světelných diod (LED) vysílá paprsky v červeném (660 nm) a blízkém infračerveném záření (780 nm), které se odráží od vegetace a hodnota odraženého světla je pak zachycena fotodiodami a zaznamenána (Debuisson a kol. 2010). Výhodou aktivního vysílání paprsku je nezávislost tohoto senzoru na intenzitě a úhlu dopadu slunečního záření (Verhulst a Govaerts 2010). Jako další výhodu Walsh a kol. (2013) uvádí nezávislost na prostorovém rozlišení družicových dat při zjišťování NDVI, kdy si při snímání vegetace GreenSeekerem určujeme hustotu a čas měření sami pohybem na pozemku.

U NDVI měřeného z družicových snímků můžeme zaznamenávat určité nepřesnosti vlivem interakce paprsku s atmosférou. U tohoto snímače je vlivu atmosféry a také nepřesnostem v geometrickém snímání způsobeném zakřivením zemského povrchu zamezeno jeho užitím přímo na dané lokalitě v těsné blízkosti vegetace (Verhulst a kol. 2011). Přesnost tohoto měření je 70 % a vyšší (Martin a kol. 2012).

Tento přístroj lze využít ke zjišťování výnosového potenciálu, stavu vegetace, vodního stresu apod. (Walsh a kol. 2013). Porost by měl být měřen z výšky 81-122 centimetrů nad povrchem. Šířka snímaného prostoru je pak vždy 61 centimetrů. Původně byl GreenSeeker a jemu podobná zařízení využíván pro detekci plevelu a jeho odlišení od rostlin pšenice (Martin a kol. 2012).

3.6 Precizní zemědělství

Precizní zemědělství se začalo vyvíjet od 80. let 20. století, kdy začal přechod na hospodaření, ve kterém bylo možné monitorovat úrodu, vzorkování půdy, snímání půdy pomocí senzorů apod. Tyto metody se postupem času staly komerčními (Zhang a Pierce 2016). V posledních několika letech lze precizní zemědělství označit jako jeden z nejdůležitějších směrů ve vývoji zemědělství. Tato metoda hospodaření spočívá především v detailní práci s obhospodařovaným pozemkem, který již není vnímán jako jeden celek. Na celém pozemku je hospodaření přizpůsobeno lokálním rozdílům v erozním ohrožení, vlhkostních

podmínkách, půdních vlastnostech, sklonu pozemku nebo obsahu živin v půdě (Kumhálová 2010).

Precizní zemědělství napomáhá hospodařit s půdou ekonomicky a zároveň snížit co nejvíce dopady hospodaření na životní prostředí zejména aplikací aditivních látek pouze na přesně lokalizované oblasti obhospodařovaného pozemku díky detailním informacím získaným o daném prostoru (Zhang a Pierce 2016).

3.6.1 Predikce výnosu plodin

Jako dva hlavní modely predikce výnosu zemědělských plodin uvádí Pinter a kol. (2003) model založený na odraženém záření – tedy využití biomasy či listové plochy pro predikci výnosu, a model založený na sledování stresu rostlin, využívající termální část spektra. Stres rostlin může být způsoben nedostatkem vody případně chemických látek. Odhad výnosu před sklizní může jednotlivým hospodářům napomoci připravit různá marketingová a hospodářská opatření k prosperitě svého podnikání.

Maini a Agrawal (2010) zdůrazňují, že rozvoj DPZ není pouze ve zlepšování rozlišení a přesnosti získaných dat, ale také ve zvyšování dostupnosti dat a rychlosti jejich získávání z družicových systémů. Předmětem dalších výzkumů jsou také senzory, které jsou umístěny na nosném tělese a jsou schopny rozlišovat jednotlivé vlnové délky elektromagnetického záření. Patří mezi ně hyperspektrální senzory, radary snímající oblačnost, lidarové senzory a různé měřicí přístroje. V případě, že ze snímaných dat vzniknou snímky, které lze poté hodnotit, mluvíme o tzv. zobrazovacích metodách. Naopak senzory, které snímají pouze číselné hodnoty, které jsou pak v různých formátech dále upravovány a analyzovány, nazýváme jako nezobrazující (Jones a Vaughan 2010).

3.7 Fenologie

Fenologie je věda, která se zabývá periodicky se opakujícími biologickými fenomény, mezi které můžeme zařadit růst rostlin, kvetení, migraci, či rozmnožování. Tyto jevy v přírodě nastávají s určitým opakováním. Jejich načasování a intenzita se však v důsledku reakce na přírodní podmínky stanoviště může meziročně lišit. Fenologie je především využívána v oblasti změn klimatu a odpovědi vegetace na tyto změny (Krška 2006). Jednotlivé fenologické fáze

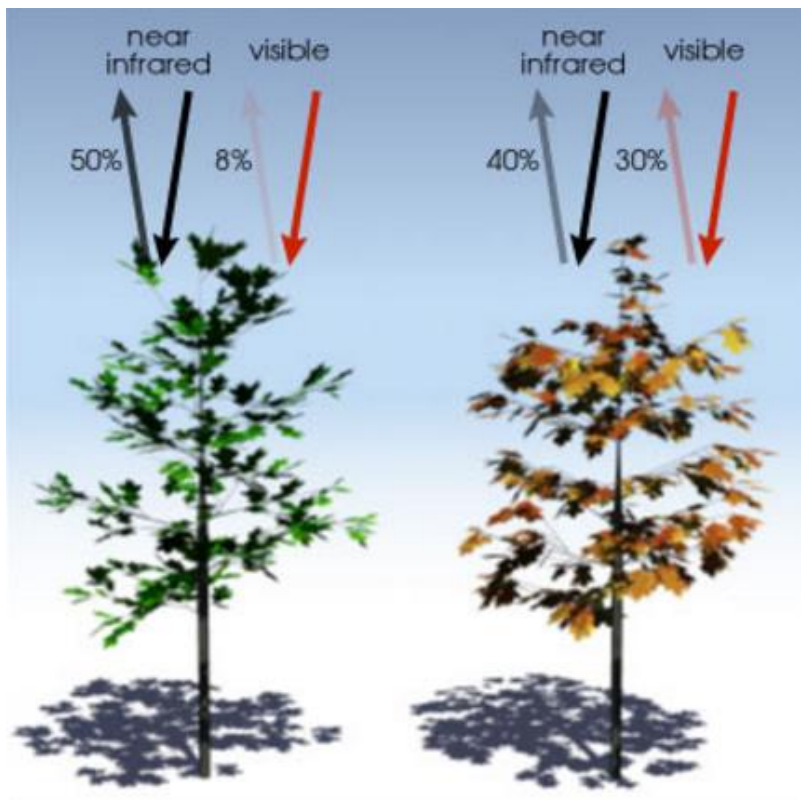
nastávají po sobě v různě dlouhých časových úsecích. Pro popis jednotlivých fází, ve kterých se daná plodina nachází je využívána mezinárodní stupnice BBCH. Jedná se o původně německou stupnici, jejíž zkratka byla vytvořena z písmen institucí, které se na její přípravě podílely (*Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft 20 (BBA)*, *Bundessortenamt (BSA)* a *CHemical industry*). Tabulky jsou připravovány pro jednotlivé druhy, případně skupiny plodin (například obilniny, viz příloha 1) (Hess a kol 1997).

Pro určování fenologických fází vegetace je možné využívat i vegetační indexy. Základní rozdělení dle mezinárodní stupnice vyděluje 10 základních stádií (viz tab. 1), která se pak dále dělí na další stádia růstu (Enz a Dachler 1997).

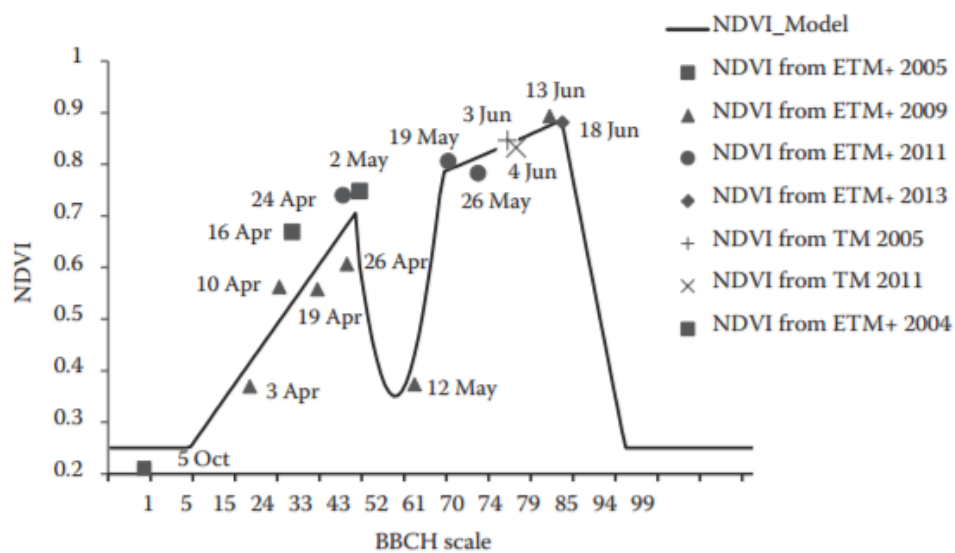
Tab. 1: Základní fenologické fáze.

Stádium	Popis
0	Klíčení
1	Růst listu
2	Odnožování
3	Sloupkování
4	Naduřování listové pochvy
5	Metání
6	Kvetení
7	Tvorba obilky
8	Zrání
9	Stáří

V důsledku fenologických změn dochází během roku ke změnám v detekci vegetace pomocí indexu NDVI. Na obrázku 4 a 5 je znázorněn vývoj odrazivosti a tím i vliv na hodnotu indexu NDVI v průběhu vegetační sezóny. Při dosažení fáze metání u obilnin (fáze BBCH 50) je odrazivost snížena v důsledku růstu květenství, které částečně zakrývá zelené plochy listů. Na konci fáze kvetení (fáze BBCH 69) se hodnoty odrazivosti opět zvýší a mají setrvale se zvyšující trend až do období stáří – fáze BBCH 90-99 (viz obr. 5) (Domínguez a kol. 2015).



Obr. 4: Vliv fenologické fáze na odrazivost (Weier a Herring 2000).



Obr. 5: Vliv fenologické fáze na hodnotu indexu NDVI u pšenice ozimé (*Triticum aestivum*) (Domínguez a kol. 2015).

3.8 Ječmen ozimý (*Hordeum vulgare* conv. *vulgare*)

Ječmen ozimý je málo náročná obilnina z hlediska nároků na půdu, předplodinu a klimatické podmínky. Jeho výnosy jsou vyšší než v případě ječmene jarního. Rizikem je však u této plodiny její nižší schopnost odolávat mrazům v časném stádiu vývoje, kdy vyžaduje spíše mírnější zimy a má vyšší nároky na teplotu než například pšenice ozimá (*Triticum aestivum*). Špatně také snáší prudké rozdíly teplot na jaře a nejpříznivější jsou pro něj podmínky západních Čech (Zimolka a kol. 2006). Tato plodina se na našem území objevila později než ječmen jarní, zejména kvůli náchylnosti k vymrzání, většímu riziku poléhavosti stébel a větší náchylnosti k houbovým chorobám. Její nároky na půdní vláhu jsou však nižší než v případě ječmene jarního (Lekeš a kol. 1985). Výsev se provádí především v druhé polovině září, ideální doba je uváděna mezi 15. a 25. zářím v optimálním výsevním množství 3,5-4 miliony klíčivých zrn na jeden hektar plochy. Doba sklizňové zralosti nastává přibližně v polovině července (Zimolka a kol. 2006).

3.9 Ječmen jarní (*Hordeum vulgare* conv. *distichon* var. *nicī*)

Ječmen jarní je charakteristický svou nejkratší vegetační dobou z obilnin, která se pohybuje mezi 110 a 125 dny. Největší nároky v průběhu růstu má v období sloupkování (Benada a kol. 2001). Celkově ale nároky této plodiny na prostředí nejsou nijak specifické, což mimo využití pro výrobu piva, napomáhá širokému rozšíření pěstování této plodiny napříč celou Českou republikou. Kvalitní sklizně ječmene jarního, který se dále využívá k výrobě sladu, je dosahováno především v nížinných řepařských oblastech. Tyto oblasti se v České republice nacházejí především v Polabí a Hané (Zimolka a kol. 2006). Období výsevu je všeobecně stanoveno na měsíc březen. Výsev probíhá co nejdříve na jaře, kdy se zejména věnuje pozornost zvýšené vlhkosti, která není pro klíčící obilky vhodná. Sklizeň je vhodné provádět až při plné zralosti obilky, která nastává v červenci až srpnu (Lekeš a kol. 1985). Petr (2005) zdůrazňuje, že v případě pozdního výsevu je zde velká pravděpodobnost snížení výnosů na pozemcích až o tunu na hektar, a zároveň zdůrazňuje i vliv počasí na výnosnost.

3.10 Vegetační indexy

Studium vegetace pomocí spektrálních dat je metodou, kterou lze získat komplexní informace o stavu daného porostu. Výpočet vegetačních indexů se provádí na základě odrazivosti dvou, případně více spektrálních pásem, z kterých zjišťujeme specifické vlastnosti vegetace, jako je například obsah chlorofylu, obsah vody, či listová plocha. Tyto indexy byly pro sledování stavu vegetace vyvinuty především kvůli snížení počtu parametrů v multispektrálním měření dat a tím i zjednodušení získávání výsledků o vegetaci (Hadjimitsis a kol. 2009).

V současné době je možno vylišit až 150 vegetačních indexů, z nichž každý je využíván pro zjišťování jiných specifických informací o vegetaci. Někdy byly tyto indexy vyvinuty i speciálně pro dané přírodní podmínky lokality. Ne všechny publikované indexy však byly testovány. Společnost Exelis VIS poskytuje software pro práci s daty dálkového průzkumu a nabízí pro zpracování dat o vegetaci uživatelům 27 vegetačních indexů, které mají biofyzikální základ a byly systematicky testovány (HARRIS 2017d). Nejčastěji jsou pro výpočet vegetačních indexů využívána pásma viditelného a blízkého infračerveného záření (NIR) (Viña a kol. 2011).

3.10.1 Broadband Greenness

Vegetační indexy, které jsou zahrnuty do této skupiny, jsou jednou z nejjednodušších metod, jak zjišťovat biomasu a vitalitu vegetace. Především se zde jedná o posouzení množství a kvality fotosyntetických struktur ve vegetaci a tím odvození zdravotního stavu a dalších charakteristik porostu. Toto posouzení probíhá porovnáváním odrazivosti v oblasti červeného viditelného záření a infračerveného záření. Tyto indexy jsou využívány především ke zjišťování listové plochy, studiu land-use, dopadu klimatických změn či vegetační fenologie (HARRIS 2017a).

3.10.1.1 Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)

Normalised Difference Vegetation Index je jedním z vegetačních indexů, který pracuje s viditelným a blízkým infračerveným zářením. Obecně zde platí, že čím více záření je odraženo v oblasti infračerveného záření, tím je vegetace hustší. Index tedy pracuje s poměrem odraženého záření ve viditelném červeném

spektru (Red) a blízkém infračerveném (NIR) spektru. Rozsah hodnot indexu je nejčastěji od -1 do 1. Hodnoty blízké nule značí nízkou intenzitu vegetačního pokryvu (Weier a Herring 2000). Nejčastěji se hodnoty tohoto indexu pohybují mezi 0,2 a 0,8 (Rouse a kol. 1973). V případě záporných hodnot je výsledek ovlivněn vyšším odrazem v oblasti viditelného spektra než v oblasti infračerveného, což může být způsobeno oblačností, sněhem, ledem či skalními výchozy (Hadjimitsis a kol. 2009).

NDVI je velmi rozšířenou metodou studia stavu vegetace. Přesto existují určité překážky v jeho využití. Jedná se především o nezahrnutí údajů o stavu půdy, množství chlorofylu či odrazivost půdy, která při nízké hustotě vegetace může výsledky silně ovlivnit (Štych a kol. 2015).

NDVI je definován takto (HARRIS 2017a):

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

3.10.1.2 Green Normalised Difference Vegetation Index (GNDVI)

V případě tohoto indexu se jedná o zdokonalení indexu NDVI s využitím zeleného viditelného záření (Green) místo záření červeného, kvůli lepší detekci obsahu chlorofylu ve vegetaci a umožnění precizního odhadu koncentrace pigmentu v listech vegetace (Gitelson a Merzlyak 1998).

Výpočet tohoto indexu se provádí dle vzorce (HARRIS 2017a):

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

4. METODIKA

Teoretická část této práce je tvořena literární rešerší, která obsahuje důležité informace o dálkovém průzkumu Země a jeho využití v praxi. V praktické části jsou pak zpracovány družicové snímky různých družicových systémů. Z těchto dat byl vypočítán vegetační index NDVI pro každou plodinu a následně byly hodnoty tohoto indexu porovnány s výnosovými daty získanými pomocí sklízecí mlátičky na dané lokalitě. Do této analýzy byly dále zahrnuty hodnoty indexu NDVI naměřené senzorem GreenSeeker přímo na lokalitě.

Pro práci s družicovými snímky byl využíván software společnosti Exelis Visual Information Solution (Exelis VIS) ENVI verze 5.3. Následné analýzy byly prováděny s využitím software ArcGIS verze 10.2 společnosti Esri. Statistické analýzy byly provedeny s využitím MS Excel a statistického programu R verze 3.3.3.

4.1 Družicová data

Získané snímky pro jednotlivé lokality z roku 2015 z družice Landsat 8 byly získány od společnosti USGS jako volně dostupná data na internetové adrese <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Satelitní snímky z družice SPOT-7 a WorldView-2 byly zakoupeny od společnosti ArcDATA Praha.

Jednotlivé snímky byly nejprve zpracovávány v programu ENVI 5.3. Jako první krok byla provedena atmosférická korekce FLAASH a následně byly jednotlivé snímky přepočítány na hodnoty indexu NDVI automatickým výpočtem funkcí *NDVI*. Snímky s hodnotami indexu pak byly dále zpracovávány v programu ArcGIS 10.2. Satelitní snímky s vyšším rozlišením byly následně převzorkovány. Převzorkování probíhá změnou rozlišení jednotlivých rastrů, kdy bylo jejich původní prostorové rozlišení změněno na rozlišení 30 m/pixel. Tento krok byl proveden především kvůli možnému porovnání dat s daty z družice Landsat 8. Následně byla každému pixelu snímku přiřazena jedna hodnota indexu pomocí funkce *Raster to Point*. Funkcí *Extract Values to Point* pak byly hodnoty pixelů zaznamenány do atributové tabulky daného snímku. Tyto hodnoty pak byly dále využity ke statistickému zpracování. Porovnání jednotlivých systémů je uvedeno v tabulce (viz tab. 1).

4.2 Výnosová data

Výnosová data z jednotlivých lokalit v sezóně 2015 byla získána sklízecí mlátičkou s funkcí zaznamenávání sklizeného množství plodiny. Na lokalitě Praha-Ruzyně byl sklizen ječmen ozimý. Data o sklizni byla získávána sklízecí mlátičkou Sampo 2070 s monitorem výnosu LH 500 a přijímačem DGPS (*Differential Global Positioning System*) s korekcí EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*). Přesnost tohoto systému je uváděna $\pm 0,1-0,3$ metru v horizontálním směru a $\pm 0,2-0,6$ metru ve směru vertikálním. Tato data byla ukládána do palubního počítače sklízecí mlátičky každé 3 sekundy spolu s údaji o poloze ve formátu zeměpisných souřadnic.

Data z lokality Vendolí byla získána sklizní ječmene jarního sklízecí mlátičkou New Holland CR9080 vybavenou zabudovaným sklízecím monitorem stejné značky a DGPS snímačem s korekcí EGNOS. Přesnost tohoto systému je stanovena na $\pm 0,1-0,3$ metru horizontálním a $\pm 0,2-0,6$ metru vertikálním směrem. V tomto případě byla data o výnosu ukládána spolu s jejich zeměpisnými souřadnicemi každou sekundu.

Na obou lokalitách byla zároveň s množstvím výnosu měřena také vlhkost obilných zrn, která byla zohledněna později při přepočtu na celkový výnos. Výnosová data byla následně interpolována a zároveň vizualizována pomocí geostatistické metody Kriging. Posledním krokem v práci s těmito daty bylo převzorkování výsledných výnosových map na rozlišení 30 metrů v programu ArcGIS, aby bylo dosaženo stejného rozlišení u všech typů dat.

4.3 Data z ručního měření NDVI

Ruční měření vegetačního indexu NDVI pomocí přístroje Greenseeker Handheld Crop Sensor bylo na lokalitě Praha-Ruzyně provedeno ve dvou opakováních a to 23. dubna a 19. května 2015. Na lokalitě Vendolí byla provedena tři měření ve dnech 8. května, 30. května a 30. června 2015. Tato data byla rovněž upravena na rozlišení 30 metrů. Porovnání spektrálního rozlišení tohoto senzoru s družicovými daty je uvedeno v tabulce (viz tab. 2).

4.4 Meteorologická data

Srážkové úhrny a teploty v průběhu vegetační sezóny byly naměřeny agrometeorologickou stanicí Výzkumného ústavu rostlinné výroby v Praze-Ruzyni a meteorologickou stanicí na lokalitě Vendolí (viz tab. 3 a 4).

4.5 Statistické zpracování dat

Z programu ArcGIS byly získány tabulky hodnot výnosů a indexů NDVI ze všech typů družicových systémů pro každou lokalitu a data z měření přístrojem GreenSeeker do MS Excel. Statistická analýza byla provedena v programu R. Nejprve byly zjištěny hodnoty popisné statistiky jednotlivých snímků, získaných hodnot a lokalit a následně byla *Pearsonovým korelačním koeficientem* vypočítána míra korelace výnosových dat se zjištěnými hodnotami vegetačního indexu NDVI.

Testovaná hypotéza:

H_0 : Hodnoty indexu NDVI a výnosová data jsou nezávislé veličiny.

Tab. 2: Porovnání spektrálního rozlišení družic a senzoru GreenSeeker.

Družice	Red (nm)	NIR (nm)
Landsat 8	630-680	845-885
WorldView-2	630-690	705-895
SPOT-7	625-695	760-890
GreenSeeker	660, ~25	780, ~25

5. CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍCH ÚZEMÍ

5.1 Praha-Ruzyně

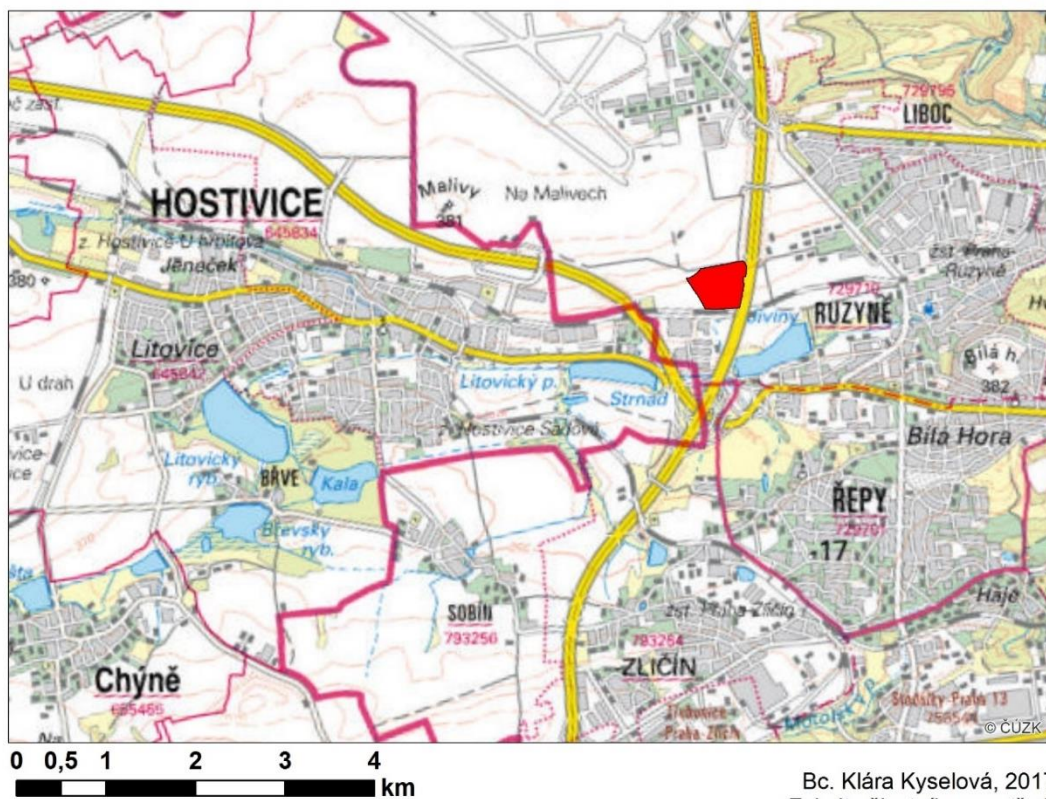
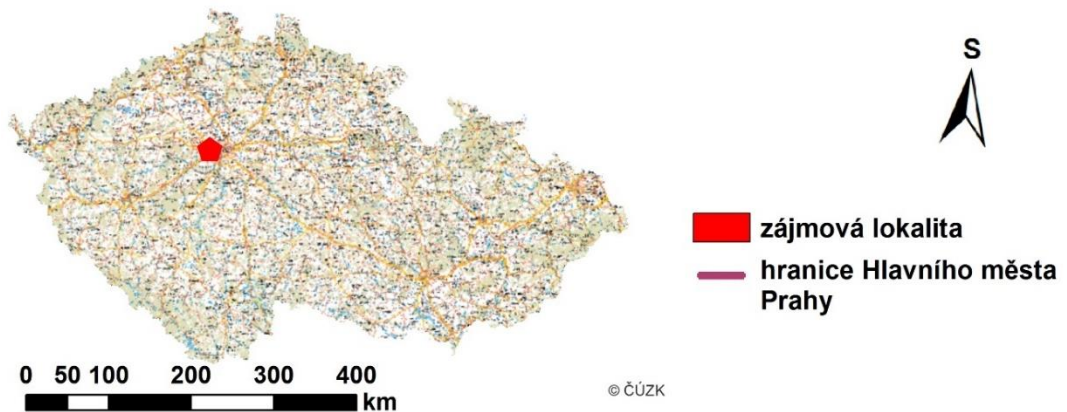
Zájmová lokalita se nachází v Praze, městské části Ruzyně (50°05' severní šířky, 14°17'30" východní délky) (viz obr. 6). Jedná se o experimentální plochu Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v.v.i. Velikost tohoto pozemku je 11,5 hektaru. Jedná se o ornou půdu s průměrným sklonem 6 %. Nadmořská výška se pohybuje v intervalu od 338,5 do 357,5 m n. m.

Půdní typ tohoto pozemku je hnědozem, z části je tato oblast lokalizována na vápenatých pískovcích s vyšším obsahem hrubších naplavenin a menším obsahem jílových částic a jílu. Pozemek se nachází v řepařské výrobní oblasti. Obsah minerálních látek je označován jako dobrý až velmi dobrý. Průměrný úhrn srážek na této lokalitě je 526 milimetrů za rok a průměrná teplota 7,9 °C. V tabulce 3 jsou uvedeny naměřené teploty a srážkové úhrny v průběhu sezóny 2015.

Tab. 3: Srážkové úhrny a průměrné teploty v průběhu vegetační sezóny 2015 v Praze-Ruzyni.

		Srážkový úhrn (mm)	Teplota (°C)
Fenologická fáze	BBCH 0-19	48,70	11,00
	BBCH 20-29	100,40	3,80
	BBCH 30-59	43,70	12,30
	BBCH > 60	64,60	17,10
	Suma	257,40	---
	Průměr	64,35	11,05

Zájmová lokalita Praha - Ruzyně



Bc. Klára Kyselová, 2017
Fakulta životního prostředí
Česká zemědělská univerzita v Praze
software: ArcGIS 10.2
souřadnicový systém: WGS_1984_UTM_Zone_33N
zdroj: ČÚZK, Základní mapa

Obr. 6: Lokalizace pozemku Praha-Ruzyně.

5.2 Vendolí

Tato lokalita se nachází ve východních Čechách v Pardubickém kraji (49°43'48" severní šířky, 16°24'14" východní délky) (viz obr. 7). Obhospodařování této plochy zajišťuje Zemědělské družstvo Vendolí. Pozemek má celkovou rozlohu 26,4 hektaru a jeho povrch je mírně zvlněný s průměrným sklonem 6 %. Rozsah nadmořských výšek je mezi 543-571 m n. m.

Zájmovou plochu tvoří modální kambizemě na podkladu vápnatých pískovců. Některé části pozemku jsou silně erodované, především ve svažitéjších částech pozemku. Zájmové území se nachází v bramborářské výrobní oblasti. Průměrné srážky zde dosahují 700 milimetrů. Průměrná teplota se pohybuje mezi 6 a 7 °C. Naměřené srážkové úhrny a teploty sezóny 2015 jsou uvedeny v tabulce 4.

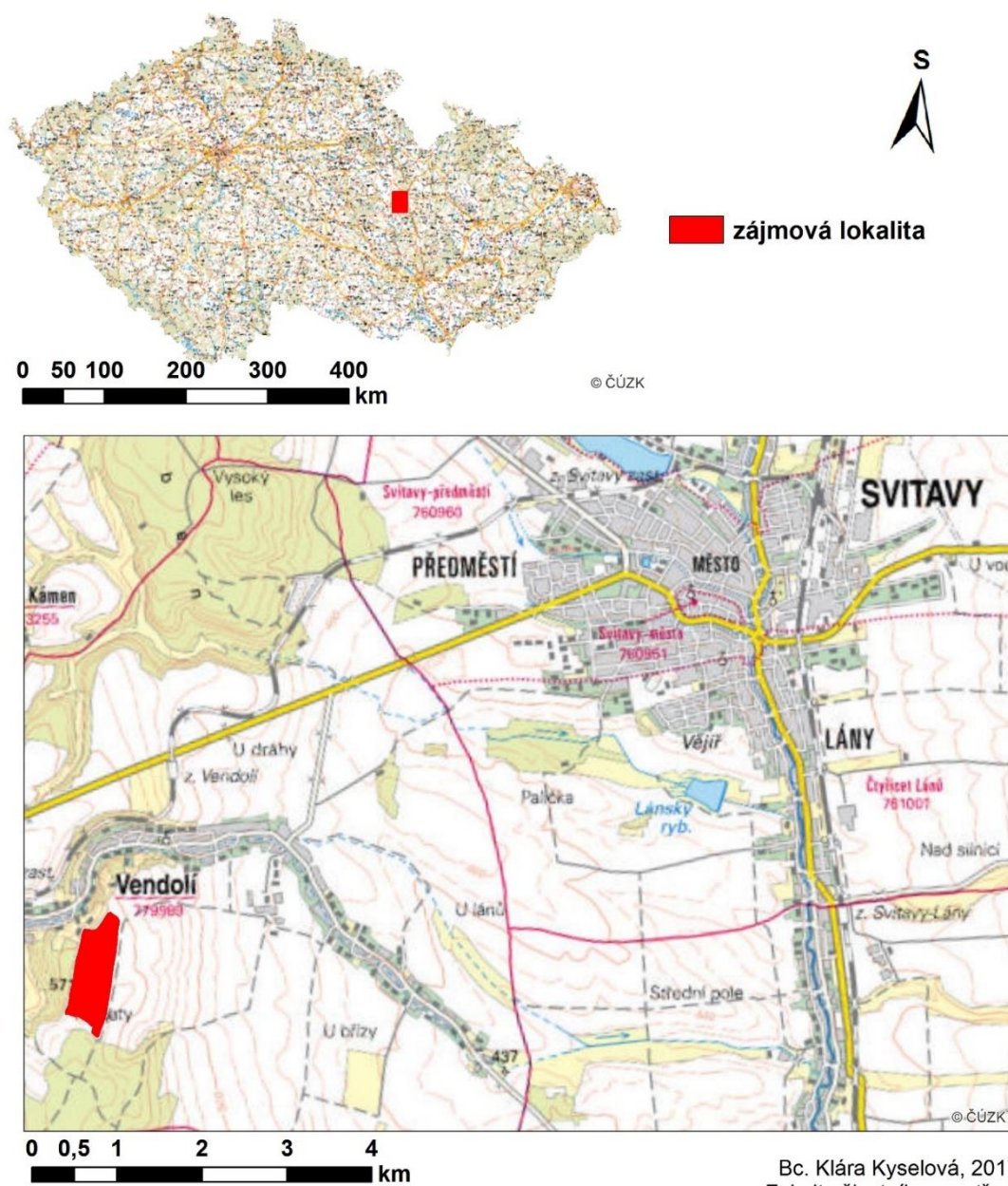
Tab. 4: Srážkové úhrny a průměrné teploty v průběhu vegetační sezóny 2015 ve Vendolí.

		Srážkový úhrn (mm)	Teplota (°C)
Fenologická fáze	BBCH 0-19	30,40	5,50
	BBCH 20-29	7,60	9,70
	BBCH 30-59	35,80	13,00
	BBCH > 60	132,60	18,60
	Suma	206,40	---
Průměr		51,60	11,70

Na obou zájmových lokalitách je hospodařeno běžnými orebnými technologiemi. Je zde zaveden systém střídání plodin, mezi které především patří pšenice ozimá, ječmen a řepka ozimá.

Praktická část této práce se zabývá analýzou pěstování ozimého ječmene v roce 2015 v Praze-Ruzyni a ječmene jarního na lokalitě Vendolí (viz obr. 8 a 9).

Zájmová lokalita Vendolí

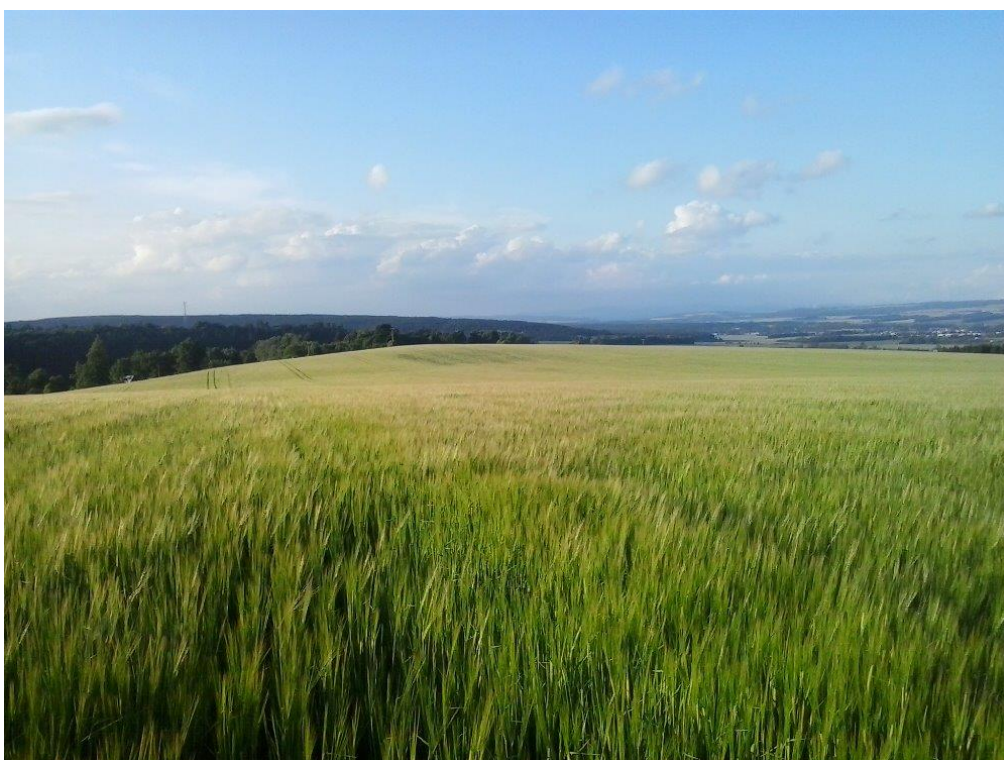


Bc. Klára Kyselová, 2017
Fakulta životního prostředí
Česká zemědělská univerzita v Praze
software: ArcGIS 10.2
souřadnicový systém: WGS_1984_UTM_Zone_33N
zdroj: ČÚZK, Základní mapa

Obr. 7: Lokalizace pozemku ve Vendolí.



Obr. 8: Ječmen jarní na lokalitě Vendolí ve fázi BBCH 25 (foto: J. Kumhálová).



Obr. 9: Ječmen jarní na lokalitě Vendolí ve fázi BBCH 58 (foto: J. Kumhálová).

6. VÝSLEDKY

Na lokalitě Praha-Ruzyně byly hodnoty vegetačního indexu NDVI zjištěny ze snímků družice Landsat 8 s prostorovým rozlišením 30 m/pixel a WorldView-2 s prostorovým rozlišením 2 m/pixel. Dalším zdrojem dat byl GreenSeeker. Měření hodnot NDVI tímto přístrojem bylo uskutečněno ve dvou opakováních dle stanovených fenologických fází (23. dubna a 19. května 2015). Snímky z družice Landsat 8 byly pořízeny 18. března, 19. dubna a 14. května, snímek z družice WorldView-2 je z 23. března 2015.

Data pro lokalitu Vendolí byla získána ze snímků družice Landsat 8 a družice SPOT-7 s prostorovým rozlišením 6 m/pixel. Dále byly hodnoty NDVI měřeny senzorem GreenSeeker ve třech opakováních. Snímky z družice Landsat 8 byly pořízeny 30. května, 24. června a 1. července 2015, snímky z družice SPOT-7 pak 4. července 2015. Měření GreenSeekerem probíhalo 8. a 30. května a 20. června 2015.

Popisná statistika jednotlivých snímků je uvedena v tabulce 5. Počet pixelů v rozlišení 30 metrů byl na lokalitě Praha-Ruzyně (11,5 ha pozemek) stanoven na 101, po odstranění všech pixelů, které byly z převážné části mimo hranice pozemku a mohly tak ovlivnit výslednou hodnotu NDVI. V případě vysokého rozlišení družice WorldView-2 byl počet pixelů, které byly zahrnuty do analýzy, 26 701. Na lokalitě Vendolí (26,4 ha pozemek) bylo zájmové území tvořeno 226 pixely při prostorovém rozlišení snímku 30 metrů. V případě snímku Landsat 8 ze dne 1. července bylo pro analýzu využito pouze 200 pixelů z důvodu výskytu oblačnosti na snímku v severní části lokality. U satelitního snímku SPOT-7 s prostorovým rozlišením 6 metrů pak byl počet hodnocených pixelů 6 098.

Nejvyšší hodnoty indexu NDVI ječmene ozimého byly na lokalitě Praha-Ruzyně zaznamenány 19. dubna 2015 ze snímku družice Landsat 8, kdy hodnota dosahovala 0,9685. Naopak nejnižší hodnota indexu, 0,1847, byla zjištěna ze snímku družice WorldView-2 z 23. března 2015. Nejnižší hodnota indexu na této lokalitě ze snímků satelitu Landsat 8 ze 14. května byla rovna 0,3026.

Na zájmové ploše ve Vendolí se maximální zjištěná hodnota indexu jarního ječmene pohybovala o něco výše než v Ruzyni. Nejvyšší hodnota indexu NDVI zde byla získána ze snímku družice Landsat 8 24. června. Hodnota byla stanovena na 1,1150. Na stejném snímku byla zaznamenána i nejnižší hodnota indexu na této lokalitě 0,5423.

Nejvyšší hodnota směrodatné odchylky, 0,1667, byla na snímcích z Ruzyně ze satelitu Landsat 8 ze 14. května 2015. Tyto hodnoty značí velké rozdíly mezi minimální a maximální hodnotou indexu NDVI. Naopak nejmenší hodnota směrodatné odchylky byla zaznamenána na snímku stejné družice z 19. dubna a to 0,0307. Ve Vendolí byly směrodatné odchylky na snímcích Landsat 8 výrazně vyšší (0,0791; 0,0907; 0,0849) než na snímcích z družice SPOT-7 (0,0451; 0,0427). Rozdíly však nebyly tak markantní.

Tab. 5: Popisná statistika indexu NDVI z družicových dat.

	Ruzyně					Vendolí				
	L 8	L 8	L 8	WV-2	WV-2	L 8	L 8	L 8	SPOT-7	SPOT-7
Družice	L 8	L 8	L 8	WV-2	WV-2	L 8	L 8	L 8	SPOT-7	SPOT-7
Prostorové rozlišení	30 m	30 m	30 m	2 m	30 m	30 m	30 m	30 m	6 m	30 m
Datum	18. 3.	19. 4.	14. 5.	23. 3.	23. 3.	30. 5.	24. 6.	1. 7.	4. 7.	4. 7.
Počet záznamů	101	101	101	26701	101	226	226	200	6098	226
Minimum	0,4114	0,7734	0,3026	0,1847	0,2874	0,6193	0,5423	0,7084	0,6106	0,6684
Průměr	0,5313	0,9110	0,6060	0,4143	0,4185	0,7881	0,9690	0,8978	0,8019	0,8043
Medián	0,5332	0,9166	0,6182	0,4155	0,4210	0,7999	0,9978	0,9065	0,8102	0,8121
Maximum	0,6260	0,9685	0,9493	0,6185	0,5510	0,9214	1,1150	1,0694	0,8864	0,8793
Směrodatná odchylka	0,0394	0,0307	0,1667	0,0575	0,0523	0,0791	0,0907	0,0849	0,0451	0,0427

L 8 = družice Landsat 8, WV-2 = družice WorldView-2, SPOT-7 = družice SPOT-7.

Popisná statistika hodnot NDVI z měření ručním senzorem GreenSeeker je zanesena v tabulce 6. Tyto hodnoty byly měřeny dvakrát a byly přepočítány na rozlišení 30 metrů, aby bylo dosaženo totožného počtu hodnot jako u družicových snímků, tedy 101. V prvním měření z Ruzyně 23. dubna měly zaznamenané hodnoty indexu větší směrodatnou odchylku 0,0624, než v druhém měření 19. května. V druhém termínu měření byly již hodnoty vyrovnanější se směrodatnou odchylkou 0,0298. Zatímco minimální hodnota se měřením 19. května ukázala být vyšší, hodnota maximální byla naměřena nižší než 23. dubna. Průměrná hodnota indexu se mezi měřeními zvýšila z 0,7785 na 0,8024, což odpovídá nárůstu biomasy mezi sledovanými růstovými fázemi.

Užitím senzoru GreenSeeker na lokalitě Vendolí a následnou úpravou hodnot NDVI na prostorové rozlišení 30 m bylo získáno 226 pixelů pro následnou analýzu. Hodnoty NDVI byly měřeny ve třech opakováních. Nejnižších hodnot a zároveň i nejmenší směrodatné odchylky bylo dosaženo při prvním měření 8. května. Průměrná hodnota byla 0,3209. Maximální hodnota byla naměřena 20. června, kdy byla ale průměrná hodnota nižší, než v druhém měření 30. května. Při druhém měření byla zaznamenána největší směrodatná odchylka 0,0637. Maximum indexu NDVI 0,8269 bylo naměřeno na ječmenu jarním 20. června (viz tab. 6).

Tab. 6: Popisná statistika indexu NDVI z ručního měření senzorem GreenSeeker.

Měření	Ruzyně		Vendolí		
	GS 1	GS 2	GS 1	GS 2	GS 3
Datum	23. 4.	19. 5.	8. 5.	30. 5.	20. 6.
Počet záznamů	101	101	226	226	226
Minimum	0,3900	0,6700	0,2665	0,4802	0,5152
Průměr	0,7785	0,8024	0,3209	0,6982	0,6762
Medián	0,7900	0,8100	0,3170	0,7074	0,6833
Maximum	0,8900	0,8500	0,3963	0,8036	0,8269
Směrodatná odchylka	0,0624	0,0298	0,0292	0,0637	0,0546

GS 1, 2, 3 = měření senzorem GreenSeeker na dané lokalitě.

Průměrná hodnota výnosu ječmene ozimého na lokalitě Praha-Ruzyně byla 5,3530 t.ha⁻¹. Tato průměrná hodnota výnosu byla vyšší než průměrná hodnota výnosu ječmene jarního ve Vendolí. Většího maximálního výnosu bylo však dosaženo na lokalitě Vendolí. Na této lokalitě také byly zaznamenány nejvyšší maximální výnosy (viz tab. 7).

Výnosová data byla nejprve přepočítána na rozlišení 30 metrů a poté i na vyšší prostorové rozlišení dle komerčních družic – 2 metry pro porovnání s hodnotami snímku WorldView-2 a 6 metrů pro SPOT-7. Při vyšším rozlišení bylo dosaženo většího rozsahu hodnot výnosů jak na pozemku v Praze-Ruzyni tak ve Vendolí. Většího rozdílu bylo dosaženo u ječmene ozimého, kde bylo prostorové rozlišení pouze 2 metry.

Tab. 7: Popisná statistika výnosů (t.ha⁻¹).

	Ruzyně		Vendolí	
Plodina	Ječmen ozimý		Ječmen jarní	
Prostorové rozlišení	30 m	2 m	30 m	6 m
Počet záznamů	101	26 701	226	6 098
Minimum	4,0830	3,3212	1,1710	0,9085
Průměr	5,3530	5,3160	4,1700	4,1021
Medián	5,3700	5,3600	4,3360	4,1997
Maximum	6,1970	7,2550	6,9620	7,6566
Směrodatná odchylka	0,3794	0,4308	1,0555	1,1061

Výnosová data byla dále korelována s hodnotami NDVI jednotlivých satelitních snímků (viz tab. 8) a senzoru GreenSeeker (viz tab. 9).

Lokalita Vendolí vykazovala korelaci hodnot indexu s výnosovými daty ve všech případech. Míra korelace zde byla významně signifikantní. U lokality Ruzyně byla korelace prokázána v případě snímků Landsat 8 z 18. března a 19. dubna. Poslední snímek nebyl s výnosem korelován. V případě družicového snímku WorldView-2 byla korelace významná pouze při ponechání původního rozlišení 2 metry z důvodu velkého počtu porovnávaných hodnot (26 701 pixelů, viz tab. 5). Korelační koeficient však dosahoval pouze hodnoty 0,1343. Hodnoty ručního měření aktivním senzorem byly na lokalitě Ruzyně korelovány signifikantně pouze v druhém měření. V prvním měření byla zjištěna míra významnosti korelace s výnosem 0,0582, tedy těsně nad hladinou významnosti 0,05.

Tab. 8: Korelační koeficienty indexu NDVI a výnosu na lokalitách.

Družice	Ruzyně					Vendolí				
	L 8	L 8	L 8	WV-2	WV-2	L 8	L 8	L 8	SPOT-7	SPOT-7
Prostorové rozlišení	30 m	30 m	30 m	2 m	30 m	30 m	30 m	30 m	6 m	30 m
Datum	18. 3.	19. 4.	14. 5.	23. 3.	23. 3.	30. 5.	24. 6.	1. 7.	4. 7.	4. 7.
Korelační koeficient	0,3076	0,3367	0,0643	0,1343	0,0635	0,6639	0,4368	0,3843	0,4451	0,5108
<i>p value</i>	0,0018 **	0,0006 ***	0,5230	< 0,001 ***	0,5283	< 0,001 ***	< 0,001 ***	< 0,001 ***	< 0,001 ***	< 0,001 ***

L 8 = družice Landsat 8, WV-2 = družice WorldView-2, SPOT-7 = družice SPOT-7, Korelační koeficient = těsnost korelace hodnot NDVI a výnosu, *p value* = hladina významnosti testování (0,05 *, 0,001 **, 0,0001 ***).

Tab. 9: Korelační koeficienty indexu NDVI naměřeného senzorem GreenSeeker a výnosu na lokalitách.

Měření	Ruzyně		Vendolí		
	GS 1	GS 2	GS 1	GS 2	GS 3
Datum	23. 4.	19. 5.	8. 5.	30. 5.	20. 6.
Korelační koeficient	0,1891	0,3357	0,3322	0,4630	0,4135
<i>p value</i>	0,0582	0,0006 ***	< 0,001 ***	< 0,001 ***	< 0,001 ***

GS 1, 2, 3 = měření senzorem GreenSeeker na dané lokalitě, Korelační koeficient = těsnost korelace hodnot NDVI a výnosu, *p value* = hladina významnosti testování (0,05 *, 0,001 **, 0,0001 ***).

Jako poslední byly analyzovány korelace mezi časově blízkými hodnotami NDVI získaných ze snímků Landsat 8 a hodnotami NDVI změřenými senzorem GreenSeeker (viz tab. 10 a 11).

Obdobně jako u předchozí výsledků byla zjištěna významná míra korelace na lokalitě Vendolí, a to u obou snímků Landsat 8 a druhého a třetího měření ručním senzorem (viz tab. 9). Na lokalitě Ruzyně byla zjištěna korelace v případě hodnot snímku z 14. května a naměřených hodnot z 19. května.

Tab. 10: Korelační koeficienty indexu NDVI ze snímků Landsat 8 a GreenSeekeru v Praze-Ruzyni.

		GS 1 23. 4. 2015	GS 2 19. 5. 2015
L 8 19. 4. 2015	Korelační koeficient	0,0741	---
	<i>p value</i>	0,4614	---
L 8 14. 5. 2015	Korelační koeficient	---	0,3150
	<i>p value</i>	---	0,0013 *

L 8 = družice Landsat 8, GS 1, 2 = měření senzorem GreenSeeker na dané lokalitě, Korelační koeficient = těsnost korelace hodnot NDVI, *p value* = hladina významnosti testování (0,05 *, 0,001 **, 0,0001 ***).

Tab. 11: Korelační koeficienty indexu NDVI ze snímků Landsat 8 a GreenSeekeru ve Vendolí.

		GS 2 30.5.2015	GS 3 20.6.2015
L 8 30. 5. 2015	Korelační koeficient	0,6742	---
	<i>p value</i>	< 0,001 ***	---
L 8 24. 6. 2015	Korelační koeficient	---	0,4903
	<i>p value</i>	---	< 0,001 ***

L 8 = družice Landsat 8, GS 2, 3 = měření senzorem GreenSeeker na dané lokalitě, Korelační koeficient = těsnost korelace hodnot NDVI, *p value* = hladina významnosti testování (0,05 *, 0,001 **, 0,0001 ***).

7. DISKUSE

V této diplomové práci byla analyzována data družic komerčních (WorldView-2, SPOT-7), a volně dostupné snímky družice Landsat 8, které jsou v zemědělství hojně využívány i díky většímu počtu spektrálních pásem, se kterými lze dále pracovat (Kumhálová a kol. 2014). Zjištěné hodnoty indexů NDVI získané z družicových dat byly dále porovnávány s výnosovými daty získanými při sklizni plodin na lokalitách pomocí sklízecí mlátičky. Toto porovnání hodnot je často využíváno k predikci výnosu plodin v precizním zemědělství. Důvodem výběru komerčních snímků byla především nepřítomnost oblačnosti nad zájmovou lokalitou.

Na jednotlivých zájmových lokalitách byly pěstovány dvě odlišné odrůdy ječmene. Na lokalitě Praha-Ruzyně se jednalo o ječmen ozimý, zatímco na lokalitě Vendolí o ječmen jarní. Tyto dvě plodiny se liší zejména obdobím výsevu zrna, které je obsaženo i v rodovém jménu plodiny. Odlišná doba výsevu těchto dvou plodin způsobuje rozdíly v rychlosti a způsobu růstu rostlin (Zimolka a kol. 2006) a tím určuje i vhodnou dobu, při níž je již možné využití satelitních snímků pro odhad výnosu. To je důvodem, proč na lokalitě Praha-Ruzyně s ozimým ječmenem mohly být analyzovány satelitní snímky Landsat 8 a WorldView-2 již v časném období vegetační sezóny 2015. Na lokalitě Vendolí pak byl pěstován ječmen jarní, jehož výsev se provádí na jaře a jeho růst je tedy oproti ječmenu ozimému posunut o několik týdnů až měsíců (Lekeš a kol. 1985). Tento rozdíl v hodnotách zjištěného vegetačního indexu NDVI je zaznamenán i v tabulce 5. Ječmen jarní zde také prokázal svou velkou schopnost odnožování po výsevu (Zimolka a kol. 2006), kdy došlo již na snímcích z 30. května k naměření výrazně vysokých hodnot indexu NDVI a porost byl již v tuto dobu celistvý.

Každá z lokalit se v rámci České republiky nachází v jiné výrobní oblasti, z čehož mohou vyplývat rozdíly ve výnosnosti těchto lokalit a rozdíly v mikroklima na jednotlivých pozemcích. Obecně je lokalita Praha-Ruzyně nacházející se v řepařské oblasti oblastí vhodnější pro pěstování obilnin než v případě oblasti bramborářské, do které je řazeno Vendolí (Lipavský 2017). Rozloha pozemku v Praze-Ruzyni 11,5 hektaru byla také v porovnání s Vendolím, jehož plocha je 26,4 hektaru, menší. V důsledku rozlišení 30 metrů u snímků Landsat 8 zde mohla chyba v měření několika pixelů ovlivnit výsledek větší měrou než v případě většího půdního celku ve Vendolí, kde byla prokázána korelace ve všech případech. Především se jedná o dvojnásobný počet hodnot indexu NDVI na lokalitě Vendolí, což mohlo ovlivňovat statistickou analýzu. V některých studiích však byly s rozlišením 30 metrů analyzovány i pozemky menší či srovnatelné plochy

(Doraiswamy a kol. 2004, Julien a kol. 2011, Kumhálová a kol. 2014). Nelze tedy s jistotou určit vliv tohoto atributu na přesnost výsledků.

Jednotlivé družicové systémy mají odlišné spektrální i prostorové rozlišení (viz tab. 1). Z tohoto důvodu byly porovnávány popisnou statistikou jednotlivé družice (viz tab. 5).

Snímky družice Landsat 8 ve všech případech vykazovaly vyšší hodnoty průměru indexu NDVI, a i jejich maximální hodnoty byly v porovnání se systémy s vyšším prostorovým rozlišením vyšší (viz tab. 5). Je zde předpoklad, že družice Landsat 8 se senzorem OLI a rozsahem pásem 630-680 nanometrů pro červené a 845-885 nanometrů pro blízké infračervené záření (USGS 2016a) je vhodnější pro zjišťování vegetačních indexů pracujících právě s těmito dvěma spektrálními pásy. Mezi tyto indexy řadíme například index NDVI, který patří k nejvyužívanějším vegetačním indexům (Klem a kol. 2014, Roy a kol. 2016).

Červené viditelné záření je nejvíce pohlcováno v oblasti 660-680 nanometrů (Wu a kol. 2008). V závislosti na odlišném spektrálním rozlišení jednotlivých družic dosahuje index NDVI rozdílných hodnot. Družice WorldView-2 má rozsah Red pásma 630-690 nanometrů a družice SPOT-7 625-695 nanometrů. U družice SPOT-7 a WorldView-2 jsou rozsahy jednotlivých pásem širší než v případě Landsat 8 a to především v oblasti NIR (DigitalGlobe 2009, Airbus DS 2013). Střední hodnota NIR pásma se liší především u satelitu WorldView-2 (Immitzer a kol. 2012), u kterého byla také prokázána nízká míra korelace hodnot NDVI s hodnotami výnosu (viz tab. 8). Touto družicí však byly také naměřeny nejnižší hodnoty indexu, což může být způsobeno vyšším prostorovým rozlišením, a tedy i detailnějšími daty o pozemku. Na lokalitě Ruzyně pak byla u snímků Landsat 8 hodnota korelačního koeficientu mezi výnosem a hodnotou NDVI vyšší, než v případě družicového snímku WorldView-2, což může být opět způsobeno jinou střední hodnotou spektrálních pásem Red a NIR (viz tab. 1).

Nekorelovanost hodnot indexu NDVI na snímku lokality Ruzyně ze 14. května 2015 s výnosovými daty byla pravděpodobně způsobena fenologickou fází. V tomto období se ozimý ječmen nacházel ve fenologické fázi kvetení (BBCH 61-69), které způsobuje změnu barvy porostu a obsah chlorofylu se v tomto období snižuje. Následkem toho dochází k rozdílné odrazivosti slunečního záření (Hunt a kol. 2013, Domínguez a kol. 2015).

Data z družic s vysokým prostorovým rozlišením byla dále převzorkována na hrubší rozlišení třiceti metrů. Je zde patrná ztráta některých hodnot zvýšením

minimální a snížením maximální hodnoty indexu (viz tab. 5), což může vést k dalším nepřesnostem. Například u družice WorldView-2 u převzorkovaných dat na rozlišení 30 metrů, na rozdíl od původního rozlišení, nebyla zjištěna korelace s výnosem. Korelační koeficient však i v případě původního rozlišení dosahoval pouze hodnoty 0,1343, což značí nízkou míru korelace, která však v důsledku velkého množství dat (26 701 pixelů) byla statistickou analýzou vyhodnocena jako průkazná (viz tab. 8). Na obou lokalitách došlo vlivem změny rozlišení ke zvýšení průměrné hodnoty indexu a ke snížení směrodatné odchylky, což značí ztrátu některých hodnot vstupujících do dalších analýz.

Vedle pasivních metod byl na zájmových lokalitách použit i aktivní senzor GreenSeeker, který vykazoval korelaci s výnosem téměř ve všech případech. Jedinou výjimkou bylo první měření na lokalitě Ruzyně (viz tab. 9). Z agronomického hlediska není tento termín na konci března příliš vhodný pro analýzy s použitím vegetačního indexu NDVI. V tomto období se porost teprve po fázi jarovizace probouzí do vegetační sezóny, případně je vhodnější využít jiný vegetační index (Novák 2017, in verb). Hodnoty z tohoto prvního měření aktivním senzorem také nebyly korelovány s hodnotami indexu satelitního snímku Landsat 8 z lokality Praha-Ruzyně, stejně tak i druhé měření nebylo korelováno, přestože byla od sebe měření aktivní a pasivní metodou provedena v rozmezí několika dnů (viz tab. 10). Důvodem může být rovněž rozdílné spektrální rozlišení obou senzorů. Střední hodnoty rozsahu jednotlivých pásem se liší především v pásmu NIR, kdy u senzoru OLI družice Landsat 8 je střední hodnota stanovena na 865 nanometrů, zatímco u GreenSeekeru je tato hodnota výrazně nižší a to 780 nanometrů (viz tab. 1). Také následné převzorkování naměřených hodnot aktivním senzorem na rozlišení 30 metrů mohlo výsledky ovlivnit. Na lokalitě Vendolí bylo dosaženo korelace ve všech případech (viz tab. 8 a 11).

Jak již bylo v této práci zmíněno, index NDVI pracuje s hodnotami odrazivosti v červené a blízké infračervené části spektra. Toto záření odráží vegetace, ale jeho hodnoty mohou být v řídkých porostech ovlivňovány prosvítajícím půdním pokryvem (Huete 1988, Jackson a Huete 1991, Rondeaux a kol. 1996), což mohlo ovlivnit hodnotu měření a tím i nedostatečnou korelaci hodnot z měření GreenSeekerem v Ruzyni 23. dubna. Druhé měření na této lokalitě již korelováno bylo. Na druhou stranu je zde také riziko rychlého nasycení indexu. Při výskytu vysoce husté vegetace již tento index není schopen rozlišit jemnější změny v hustotě a kvalitě vegetačního pokryvu (Huete a van Leeuwen 1997, Klem a kol. 2014). Tato skutečnost může způsobovat nižší rozsah hodnot již vzrostlé vegetace. Tento

důsledek se mohl projevit i na lokalitě Ruzyně, kde nebyla zjištěna korelace hodnot indexu NDVI a výnosu. Na pozemku ve Vendolí se tato saturace zřejmě projevila snižující se hodnotou korelačního koeficientu hodnot indexu NDVI s výnosem jak u pasivních, tak u aktivních metod.

Dalším výrazně ovlivňujícím faktorem pro růst a prosperitu vegetace jsou srážkové úhrny a jejich rozložení během vegetační sezóny a také změny teplot. Celkově je sezóna 2015 označována za sezónu srážkově podprůměrnou (ČHMÚ 2017), což mohlo porosty ovlivnit. Rostliny v důsledku sníženého množství srážek obsahují méně chlorofylu, což vedlo k ovlivnění korelace mezi výnosovými daty a indexem NDVI v důsledku snížení odrazivosti porostu (Domínguez a kol. 2015, Novák 2017, in verb). Petr (1988) poukazuje na větší náchylnost ozimých obilnin k poškození živelnými činiteli než v případě jarních obilnin. Nedostatek srážek se tedy pravděpodobně projevil v Ruzyni, kdy v období fáze BBCH 20-29 nastala větší srážková událost, která mohla narušit celistvost porostu a dále ovlivňovat následné fáze růstu ozimého ječmene. V tomto období také došlo na této lokalitě k poklesu teplot, což mohlo ovlivnit růst ječmene. V případě lokality Vendolí byl zaznamenán malý srážkový úhrn v období fází BBCH 20-29, kdy bylo naměřeno pouze 7,6 milimetrů srážek (viz tab. 3). Důsledkem této události dosahovaly zjištěné výsledky indexu NDVI nižších hodnot (viz tab. 5), což se projevilo na poklesu minimální hodnoty 26. června a poklesem průměrné hodnoty indexu na snímku z 1. července (viz tab. 5).

Dalším faktorem ovlivňujícím výnosy a kvalitu vegetace je topografie terénu, která způsobuje rozdíly v mikroklimatu dané lokality. Míra ovlivnění topografií terénu dále souvisí s dalšími faktory jako je srážková činnost, či teplotní průběh sezóny (Kitchen a kol. 2003, Kumhálová a kol. 2011, Kumhálová a kol. 2014). Následkem tohoto faktoru jsou naměřené výsledky nekonzistentní pro celou lokalitu a vznikají zde rozdíly mezi minimální a maximální hodnotou indexu NDVI.

Naměřené nižší hodnoty indexu NDVI v okrajových částech obou lokalit, především v západní části lokality Vendolí (viz příloha 2 a 3), mohou být ovlivněny technogenním zhutněním půdy, které zabraňuje kvalitnímu růstu porostu a ovlivňuje terén lokality. K tomuto zhutnění dochází při častém zatížení dané části pozemku pojezdem strojů. Často se tak stává v okrajových částech polí v důsledku otáčení strojů (Novák 2017, in verb).

V případě výnosových dat byl větší rozsah hodnot a větší směrodatná odchylka zaznamenána na lokalitě Vendolí (viz tab. 7, příloha 4). Průměrná hodnota

výnosu se na lokalitách lišila asi o $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ve prospěch Ruzyně. Je to způsobeno především většími výnosy ozimých obilnin v České republice (Petr 1988, Novák 2017, in verb.). Nejnižší a nejvyšší hodnota výnosu byla zaznamenána na lokalitě Vendolí, kde zřejmě v důsledku větší plochy pozemku má větší vliv na kvalitu vegetace i topografie terénu.

8. ZÁVĚR

Družicové systémy se ukázaly jako vhodný prostředek pro zjišťování charakteristik porostu. Především v předběžném určování stavu porostu a předpokládaném výnosu v oblasti precizního zemědělství. Toto odvětví je velice perspektivní, neboť má velmi pozitivní environmentální dopady na krajinu a zároveň přináší dostatečnou produkci plodin pro rostoucí lidskou populaci na Zemi v kombinaci s maximálním ekonomickým ziskem hospodáře. Environmentálními přínosy jsou především nízké dávky aditivních látek do půdy. Aplikace je omezena pouze na konkrétní místa, která jsou zjištěna předešlým důkladným průzkumem zájmových pozemků.

V této práci byl analyzován stav zemědělských plodin ječmene ozimého a ječmene jarního. Pro tyto plodiny se ukázalo být zásadním období, ze kterého pocházejí satelitní snímky. Toto období je důležité zohlednit především kvůli fenologické fázi porostu, který je zkoumán.

Pro analýzu dat byla využita data ze tří družicových systémů. Komerční družice WorldView-2 a SPOT-7 a volně dostupné snímky družice Landsat 8. V případě družice WorldView-2 nebyla prokázána korelace s výnosem. Po provedené analýze získaných dat nelze doporučit využití snímků z této družice pro zjišťování charakteristik porostu pomocí indexu NDVI. Naopak komerční družice SPOT-7 s rozlišením 6 metrů dosahovala nejvyšších hodnot korelace s výnosovými daty. Lze tedy předpokládat, že se pro výpočet hodnot NDVI hodí nejlépe a nejlépe vystihuje stav porostu. Jelikož se jedná o komerční data, byl z důvodu nákladnosti analyzován pouze jeden snímek každé z těchto družic, což může být pro závěry nedostatečné.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo u družice Landsat 8. Její korelace s výnosovými daty byla dobrá. Záleží zde na výběru období pro snímkování, kdy se v průběhu vegetační sezóny mění obsah chlorofylu v rostlinách a tím i odrazivost vegetace. Snímky této družice jsou volně dostupné ke stažení. Proto jsou také nejčastěji využívány a jejich využití v precizním zemědělství je velice rozšířeno. I přes jejich hrubší rozlišení 30 metrů se zdají být pro analýzy vegetace vhodné.

Zjišťování hodnot vegetačních indexů s využitím satelitních snímků je vhodným a v současné době i hojně rozšířeným prostředkem pro zjišťování stavu vegetace a odhadování předběžného výnosu plodin v zemědělství. Alternativu představují aktivní senzory jako například GreenSeeker, které měří hodnotu NDVI

přímo na lokalitě. Výhodou tohoto přístroje je jeho minimální ovlivnění atmosférickými vlivy a intenzitou slunečního záření. Nevýhodou je pak časová náročnost snímkování dané lokality, které je prováděno ručně.

V této práci bylo využito vegetačního indexu NDVI, který je v rámci vegetačních indexů jedním z nejvyužívanějších. Mohou pro něj však vznikat různá omezení, jako například prosvítání půdního povrchu, či jeho nasycenost při příliš husté vegetaci. Pro analýzu predikce výnosu ozimého a jarního ječmene však bylo jeho využití prokázáno jako přínosné.

9. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

- AGGARWAL S., 2004a: Earth Resource Satellites. In: SIVAKUMAR M.V.K., ROY P. S., HARMSSEN K. a SAHA S. K. [eds.]: Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. World Meteorological Organisation, Ženeva: 39-65.
- AGGARWAL S., 2004b: Principles of remote sensing. In: SIVAKUMAR M. V. K., ROY P. S., HARMSSEN K. a SAHA S. K. [eds.]: Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology, World Meteorological Organisation, Ženeva: 23-38.
- AIRBUS DS, 2013: SPOT-7 Specifications – SPOT-6, SPOT-7, High Resolution, Broad Coverage. Airbus Defence & Space, Toulouse, 2 s.
- BARRETT E. C., 2013: Introduction to Environmental Remote Sensing. Routledge, 480 s.
- BEKERYTE I., 2007: Satellite Systems – History, Definition, Functioning Principles and Application Spheres. GRIN Verlag, 68 s.
- BENADA J., FLAŠAROVÁ M., HUBÍK K., KRYŠTOF Z., KROFTA S., KŘEN J., MACHÁŇ F., MILOTOVÁ J., MÍŠA P., ONDERKA M., POKORNÝ E., STŘALKOVÁ R., TICHÝ F. a VÁŇOVÁ M., 2001: Metodika pěstování jarních obilnin – ječmen jarní, oves, pšenice jarní. Zemědělský výzkumný ústav, s. r. o., Kroměříž, 143 s.
- BUDD J. T. C., 1991: Remote sensing techniques for monitoring land-cover. In: GOLDSMITH B. [ed.]: Monitoring for conservation and ecology, Chapman & Hall, London: 33-60.
- DEBUISSON S., GERMAIN C, GARCIA O., PANIGAI L. a MONCOMBLE D., 2010: Using Multiplex® and Greenseeker™ to manage spatial variation of vine vigor in Champagne. 10th International Conference on Precision Agriculture, Denver, 15 s.
- DICATI R., 2017: Stamping the Earth from Space. Springer Science & Business Media, Berlín, 429 s.
- DOBROVOLNÝ P., 1998: Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. Masarykova univerzita, Brno, 208 s.

- DOMÍNGUEZ J. A., KUMHÁLOVÁ J. a NOVÁK P., 2015: Winter oilseed rape and winter wheat growth prediction using remote sensing methods. *Plant Soil and Environment* 61: 410-416.
- DORAISWAMY P. C., HATFIELD J. L., JACKSON T. J., AKHMEDOV B., PRUEGER J. a STERN A., 2004: Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment* 92: 548-559.
- DOWNMAN I., JACOBSEN K., KONECNY G. a SANDAU R., 2012: High Resolution Optical Satellite Imagery. Whittles Publishing, Dunbeath, 256 s.
- FILHO W. L., 2004: Ecological Agriculture and Rural Development in Central and Eastern European Countries. IOS Press, Amsterdam, 217 s.
- GITELSON A. a MERZLYAK M., 1998: Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research* 22: 689-692.
- HADJIMITSIS D. G., THEMISTOCLEOUS K., AGAPIOU A. a CLAYTON C. R. I., 2009: Monitoring archaeological site landscapes in Cyprus using multi-temporal atmospheric corrected image data. *International Journal of Architectural Computing* 7: 121-138.
- HADJIMITSIS D. G., PAPADAVID G., AGAPIOU A., THEMISTOCLEOUS K., HADJIMITSIS M. G., RETALIS A., MICHAELIDES S., CHRYSOULAKIS N., TOULIOS L. a CLAYTON C. R. I., 2010: Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards Earth System Sciences* 10: 89-95.
- HALOUNOVÁ L. a PAVELKA K., 2008: Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT, Praha, 192 s.
- HESS M., BARRALIS G., BLEIHOLDER H., BUHR L., EGGERS T., HACK H. a STAUSS R., 1997: Use of the extended BBCH scale ± general for the descriptions of the growth stages of mono- and dicotyledonous weed species. *Weed Research* 37: 433-441.
- HUETE A. R., 1988: A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295-309.
- HUETE A. R. a VAN LEEUWEN W. J., 1997: The use of vegetation indices in forested regions: issues of linearity and saturation. *Geoscience and Remote Sensing* 4: 1966-1968.

- HUNT E. R., DORAISWAMY P. C., MCMURTREY J. E., DAUGHTRY C. S., PERRY E. M. a 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.
- CHE N. a PRICE J. C., 1992: Survey of Radiometric Calibration Results and Methods for Visible and Near Infrared Channels of NOAA-7,-9, and-11 AVHRRs. *Remote Sensing of Environment* 41: 19-27.
- CHUVIECO E., 2016: *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach, Second Edition*. CRC Press, Boca Raton, 468 s.
- ILIADIS L., MAGLOGIANNIS I. a PAPADOPOULOS H., 2011: *Artificial Intelligence Applications and Innovations: 12th International Conference, EANN 2011 and 7th IFIP WG 12.5 International Conference, Part 2*. Springer Science & Business Media, Berlín, 496 s.
- IMMITZER M., ATZBERGER C. a KOUKAL T., 2012: Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2 Satellite Data. *Remote Sensing* 4: 2661-2693.
- JACKSON R. D. a HUETE A. R., 1991: Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*: 11: 185-200.
- JENSEN J. R., 2015: *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Pearson Education, New Jersey, 544 s.
- JONES H. G. a VAUGHAN R. A., 2010: *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press, Oxford, 353 s.
- JOSEPH G., 2005: *Fundamentals of Remote Sensing*. Universities Press, Telangana, 486 s.
- JULIEN Y., SOBRINO J. A. a 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.
- KITCHEN N. R., DRUMMOND S. T., LUND E. D., SUDDUTH K. A. a BUCHLEITER G. W., 2003: *Soil Electrical Conductivity and Topography*

Related to Yield for Three Contrasting Soil–Crop Systems. *Agronomy Journal* 95: 483-495.

- KLEM K., MÍŠA P., MÍŠA M. a KŘEN J., 2014: Využití měření spektrální odrazivosti a odvozených specializovaných vegetačních indexů v pěstební technologii jarního ječmene (Metodika pro zemědělskou praxi). Agrotest fyto, s.r.o, Kroměříž, 40 s.
- KNIPLING E. B., 1970: Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.
- KOLÁŘ J., HALOUNOVÁ L. a PAVELKA K., 1997: Dálkový průzkum Země 10. Vydavatelství ČVUT, Praha, 164 s.
- KRŠKA K., 2006: Fenologie jako nauka, metoda a prostředek. In: ROŽNOVSKÝ J., LITSCHMANN T. a VYSKOT I. [eds.]: Fenologická odezva proměnlivosti podnebí. Česká bioklimatická společnost, Praha: 1-4.
- KUMHÁLOVÁ J., KUMHÁLA F., KROULÍK M. a MATĚJKOVÁ Š., 2011: The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture* 12: 813-830.
- KUMHÁLOVÁ, J., ZEMEK, F., NOVÁK, P., BROVKINA, O. a MAYEROVÁ, M., 2014: Use of Landsat images for yield evaluation within a small plot. *Plant, Soil and Environment*, 60: 501-506.
- LEKEŠ J., BENADA J., BRÜCKNER F., KOPECKÝ M., MINAŘÍK F., PŘIKRYL K., VOŇKA Z. a ZENIŠČEVA L., 1985: Ječmen. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 312 s.
- LILLESAND T., KIEFER R. W. a CHIPMAN J., 2015: Remote Sensing and Image Interpretation, 7th Edition. Wiley Academic, New Jersey, 768 s.
- MAINI A. K. a AGRAWAL V., 2010: Satellite Technology. Wiley Academic, New Jersey, 694 s.
- MARTIN D. E., LÓPEZ J. D. JR. a LAN Y., 2012: Laboratory evaluation of the GreenSeeker™ hand-held optical sensor to variations in orientation and height above canopy. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 5: 43-47.
- MATTHEW M. W., ADLER-GOLDEN S. M., BERK A., FELDEB G., ANDERSON G. P., GORODETZKYC D., PASWATERS S. a SHIPPERT M.,

- 2002: Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data. In: SCHAEFER D. H. [ed.]: Proceedings 31st Applied Imagery Pattern Recognition Workshop: 157-163.
- MORAIN S. a BUDGE A. M., 2003: Post-Launch Calibration of Satellite Sensors: Proceedings of the International Workshop on Radiometric and Geometric Calibration. CRC Press, Boca Raton, 204 s.
 - LIVERMAN J., 2001: A remote sensing approach to the study of sub-alpine vegetation. Disertační práce, nepublikováno. Dep.: SIC ČZU v Praze.
 - LIVERMAN D., MORAN E. F., RINDFUSS R. R. a STERN P. C., 1998: People and pixels. Linking Remote Sensing and Social Science. National Academies Press, Washington, D.C., 256 s.
 - NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008: Earth Observations From Space: The First 50 Years Of Scientific Achievements. National Academies Press Washington, D.C., 142 s.
 - PATTAN B., 1993: Satellite Systems: Principles and technologies. Springer Science & Business Media, Berlín, 406 s.
 - PETR J., 1988: Tvorba biologického a hospodářského výnosu obilnin. Doktorská disertační práce. Vysoká škola zemědělská v Praze, Praha, 78 s.
 - PETR J., 2005: Jarní ječmen je znamenitá, ale náročná plodina. In: VACH M. a VRKOČ F. [eds.]: Kompendium vybraných poznatků při pěstování jarního sladovnického ječmene. ČZU v Praze: 3-4.
 - PINTER P. J. JR., HATFIELD, J. L., SCHEPERS J. S., BARNES E. M., MORAN M. S., DAUGHTRY C. S. T. a UPCHURCH D. R., 2003: Remote Sensing for Crop Management. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 69: 647-664.
 - REES W. G., 1999: The Remote Sensing Data Book. Cambridge University Press, Cambridge, 262 s.
 - REES W. G., 2012: Physical Principles of Remote Sensing. Cambridge University Press, Cambridge, 441 s.
 - RICHARDS J. A. a JIA X., 1999: Remote sensing digital image analysis, Vol. 4. Springer Science and Business Media, Berlín, 454 s.

- RONDEAUX G., STEVEN M. a BARET F., 1996: Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* 55: 95-107.
- ROUSE J. W., HAAS R. S., SCHELL J. A. a DEERING D. W., 1973: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, 3rd ERTS Symposium*: 48-62.
- ROY D. P., KOVALSKYY V., ZHANG H. K., VERMOTE E. F., YAN L., KUMAR S. S. a EGOROV A., 2016: Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment* 185: 57-70.
- SHUNLIN L., LI X. a WANG J. [eds.], 2012: *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*. Elsevier Science, Amsterdam, 821 s.
- SCHOTT J. R., 2007: *Remote Sensing*. Oxford University Press, Oxford, 701 s.
- SCHOWENGERDT R. A., 2006: *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Elsevier Science, Amsterdam, 558 s.
- SIVAKUMAR M. V. K. a HINSMAN D. E., 2004: Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology and WMO satellite activities In: SIVAKUMAR M. V. K., ROY P. S., HARMSEN K. a SAHA S. K. [eds.]: *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*. World Meteorological Organisation, Ženeva: 1-21.
- ŠTYCH P., ŠANDERA J., MALÍKOVÁ L., MARCINKOWSKA-OCPTYRA A., JAROČIŇSKA A. a ZAGAJEWSKI B., 2015: The use of vegetation indices in the evaluation of vegetation phenology based on MERIS data: the Czech Republic case study. *AUC Geographica* 50: 101-110.
- TUPIN F., INGLADA J. a NICOLAS J. M. [eds.], 2014: *Remote Sensing Imagery*. Wiley Academic, New Jersey, 367 s.
- VERHULST N. a GOVAERTS B., 2010: The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. CIMMYT, Mexico, 16 s.

- VERHULST N., GOVAERTS B., NELISSEN V., SAYRE K. D., CROSSA J., RAES D. a DECKERS J., 2011: The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. *Field Crops Research*, 120: 58-67.
- VIÑA A., GITELSON A. A., NGUY-ROBERTSON A. L. a PENG Y., 2011: Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment* 115: 3468-3478.
- WALSH O. S., KLATT A. R., SOLIE J. B., GODSEY C. B. a RAUN W. R., 2013: Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum L.*). *Precision Agriculture*, 14: 343-356.
- WHELAN B. a TAYLOR J., 2013: *Precision Agriculture for Grain Production Systems*. Csiro Publishing, Clayton, 208 s.
- WU Ch., NIU Z., QUAN T. Q. a HUANG W., 2008: Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and forest meteorology* 148: 1230-1241.
- ZHANG L. a GU Y., 2013: *Information Systems and Computing Technology*. CRC Press, Boca Raton, 184 s.
- ZHANG Q. a PIERCE F. J., 2016: *Agricultural Automation: Fundamentals and Practices*. CRC Press, Boca Raton, 411 s.
- ZIMOLKA J., CERKAL R., DVOŘÁK J., EDLER S., EHRENBERGEROVÁ J., HŘIVNA L., KAMLER J., KLEM K., MILOTOVÁ J., MÍŠA P., PROCHÁZKOVÁ B., PSOTA V., RICHTER R., RYANT P., TICHÝ F., VACULOVÁ K., VÁŇOVÁ M. a VEJRAŽKA K., 2006: *Ječmen – formy a užitkové směry v ČR*. Profi Press, s. r. o., Praha, 199 s.

9.1 Internetové zdroje

- CENIA, 2016: Základní principy DPZ. CENIA, Praha, online: <http://copernicus.gov.cz/zakladni-informace-a-princip-dpz>, cit. 10. 3. 2017.
- ČHMÚ, 2017: *Historická data – meteorologie a klimatologie*. Český hydrometeorologický ústav, Praha,

online: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zakladni-informace>,
cit. 25. 3. 2017.

- DIGITALGLOBE, 2009: WorldView-2 Overview. DigitalGlobe, Westminster, online: <http://content.satimagingcorp.com.s3.amazonaws.com/static/satellite-sensor-specification/WorldView-2-PDF-Download.pdf>, cit. 10. 3. 2017.
- ENZ M. a DACHLER CH., 1997: Compendium of Growth Stage Identification Keys for Mono- and Dicotyledonous Plants, Extended BBCH scale, 2nd edition. Novartis, Basilej, online: <http://www.gartneriraadgivning.dk/upl/website/bbch-skala/scaleBBCH.pdf>, cit. 10. 3. 2017.
- GISAT, 2014: Nová družice Spot 7.... Gisat, Praha. Online: <http://www.gisat.cz/content/cz/novinky/zpravy-ze-sveta/917-nova-druzice-spot-7...>, cit. 10. 3. 2017
- HARRIS, 2017a: Broadband Greenness. Exelis Visual Information Solutions, Boulder, online: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/BroadbandGreenness.html>, cit. 10. 3. 2017.
- HARRIS, 2017b: Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH). Exelis Visual Information Solutions, Boulder, online: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/FLAASH.html>, cit. 10. 3. 2017.
- HARRIS, 2017c: QUAC Background. Exelis Visual Information Solutions, Boulder, online: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/backgroundquac.html>, cit. 10. 3. 2017.
- HARRIS, 2017d: Vegetation Indices. Exelis Visual Information Solutions. Boulder, online: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/VegetationIndices.html>, cit. 10. 3. 2017.
- KUMHÁLOVÁ J., 2010: Využití GIS v precizním zemědělství. Nepublikováno. Masarykova univerzita v Brně, Brno, online: https://is.muni.cz/th/14090/prif_d/, cit. 12. 3. 2017.
- LIPAVSKÝ J., 2017: Charakteristika výrobních oblastí a podoblastí. Normativy pro zemědělskou a potravinářskou výrobu AGroConsult, online: <http://www.agronormativy.cz/genframes;jsessionid=E9C8E182E1CE4606E8A8A425EE9A9FEE?thl=2&snid=6883&otn=str1>, cit. 25. 3. 2017.

- NASA, 2016: TIROS. NASA, Washington, D. C.,
online: <https://science.nasa.gov/missions/tiros>, cit. 10. 3. 2017.
- NASA, 2017a: Landsat 8. Landsat Science – NASA, Washington, D. C.,
online: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/>, cit. 10. 3. 2017.
- NASA, 2017b: TIRS Requirements. Landsat Science – NASA, Washington,
D. C., online: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/tirs-requirements/>,
cit. 10. 3. 2017.
- USGS, 2016a: Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Reston, online:
<https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook-section-2>,
cit. 10. 3. 2017.
- USGS, 2016b: Landsat—Earth Observation Satellites. Fact Sheet
2015-3081, ver. 1.1. Reston,
online: <https://pubs.usgs.gov/fs/2015/3081/fs20153081.pdf>, cit. 10. 3. 2017.
- WEIER, J. a HERRING D., 2000: Measuring vegetation (NDVI & EVI). Earth
Observatory – NASA, Washington, D. C.,
online: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>,
cit. 10. 3. 2017.

10. PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Tabulka fenologických stádií BBCH obilovin (Enz a Dachler 1997).

Kód BBCH	Růstová fáze
0	Klíčení:
00	Suchá obilka
03	Nabobtnalá obilka
05	Vyražení primárního kořínku
07	Objevení koleoptile na obilce
09	Vzcházení: Objevení koleoptile nad povrchem půdy
1	Růst listů:
11	Fáze 1. listu (2. list vyrůstá z pochvy 1. listu)
12	Fáze 2. listu (3. list vyrůstá)
13	Fáze 3. listu (4. list vyrůstá)
14-19	Fáze 4. listu a dalších (9. listu)
2	Oodnožování:
20	Neodnožená rostlina, odnož uvnitř pochvy listu
21	Začátek oodnožování, 1. viditelná odnož
25	Plné oodnožování, 5 viditelných odnoží
29	Konec oodnožování, 9 a více odnoží
3	Sloupkování:
30	Začátek sloupkování, hlavní stéblo a odnože se vzpřimují
31	1. kolénko 1 cm nad oodnožovacím uzlem
32	2. kolénko je patrné (2 cm nad 1. kolénkem)
33-36	3.-6. kolénko je patrné
37	Objevení posledního listu (stočený)
39	Objevení jazýčku posledního listu
4	Naduřování listové pochvy:
41	Začátek naduřování pochvy horního listu
45	Naduřelá pochva
47	Prasklá pochva
49	Viditelné osiny vyčnívající pochvy
5	Metání:
51	Začátek metání, první klásek viditelný
53	30 % klasu vymetáno
55	50 % klasu vymetáno
57	70 % klasu vymetáno
59	Celý klas vymetán
6	Kvetení:
61	Začátek kvetení, první prašníky viditelné
65	Plné kvetení, 5 % prašníků
69	Konec kvetení, většina klásků odkvetlá, ojediněle visí zaschlé prašníky z klasu
7	Tvorba obilky: Mléčná zralost
71	Tvorba obilky, první obilky dosáhly poloviny velikosti, obsah je vodnatý

Pokračování přílohy č. 1.

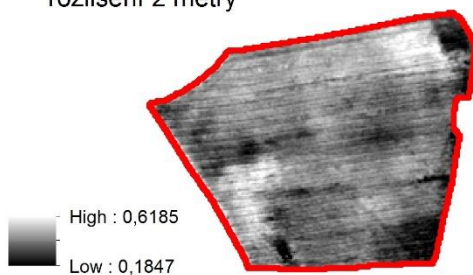
73	Raně mléčná zralost
75	Středně mléčná zralost, obilky mají konečnou velikost, stále zelené
77	Pozdně mléčná zralost
8	Zrání: Vosková zralost
83	Raně vosková zralost
85	Vosková zralost – obsah obilky je měkký, ale mezi prsty se hněte, je tvárný
87	Žlutá zralost – obsah obilky, pevný při vrypu nehem se tvoří rýha
89	Plná zralost, obilka tvrdá
9	Stáří:
91	Mrtvá zralost
92	Přezrállost
94	Dormance obilek
95	Životaschopné obilky klíčí z 50 %
96	Ztráta dormance obilek
97	Vznik druhého období dormance obilek
98	Ztráta druhé dormance obilek – sklizené zrno

NDVI Praha - Ruzyně

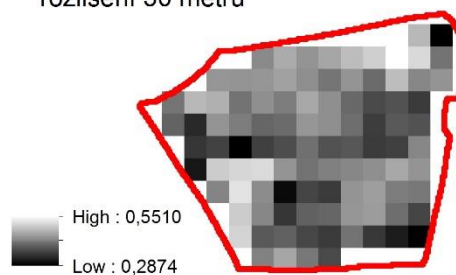
Družice WorldView-2



a) 23.3.2015
rozlišení 2 metry

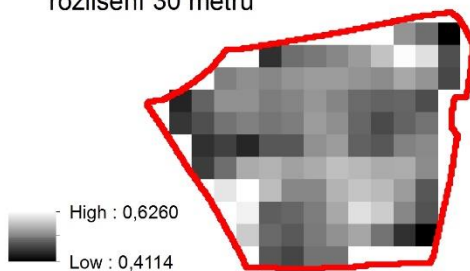


b) 23.3.2015
rozlišení 30 metrů

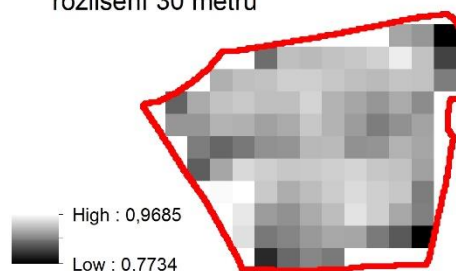


Družice Landsat 8

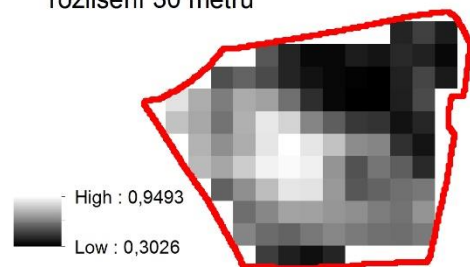
c) 18.3.2018
rozlišení 30 metrů



d) 19.4.2015
rozlišení 30 metrů



e) 14.5.2015
rozlišení 30 metrů



0 50 100 200 300 400
metrů

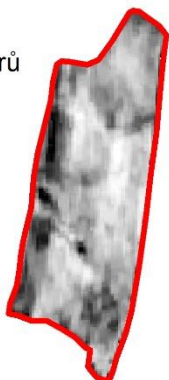
Bc. Klára Kyselová, 2017
Fakulta životního prostředí
Česká zemědělská univerzita v Praze
software: ArcGIS 10.2, ENVI 5.3
souřadnicový systém: WGS_1984_UTM_Zone_33N
zdroj: VÚRV, ČZU v Praze, FŽP

NDVI Vendolí

Družice SPOT-7

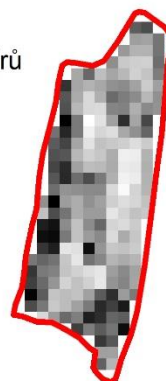
a) 4.7.2015
rozlišení 6 metrů

High : 0,8864
Low : 0,6106



b) 4.7.2015
rozlišení 30 metrů

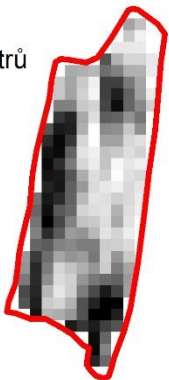
High : 0,8793
Low : 0,6684



Družice Landsat 8

c) 30.5.2017
rozlišení 30 metrů

High : 0,9214
Low : 0,6193



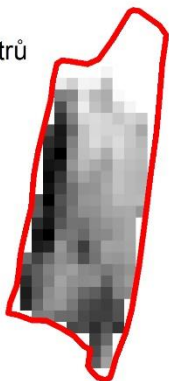
d) 24.6.2017
rozlišení 30 metrů

High : 1,1150
Low : 0,5423



e) 1.7.2017
rozlišení 30 metrů

High : 1,0694
Low : 0,7084



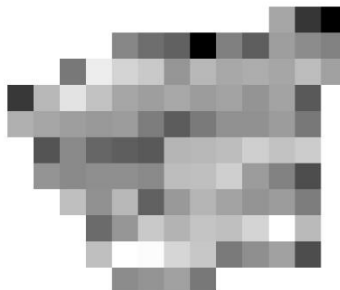
0 125 250 500 750 1 000
metrů

Bc. Klára Kyselová, 2017
Fakulta životního prostředí
Česká zemědělská univerzita v Praze
software: ArcGIS 10.2, ENVI 5.3
souřadnicový systém: WGS_1984_UTM_Zone_33N
zdroj: ČZU v Praze, FŽP

Výnosová data

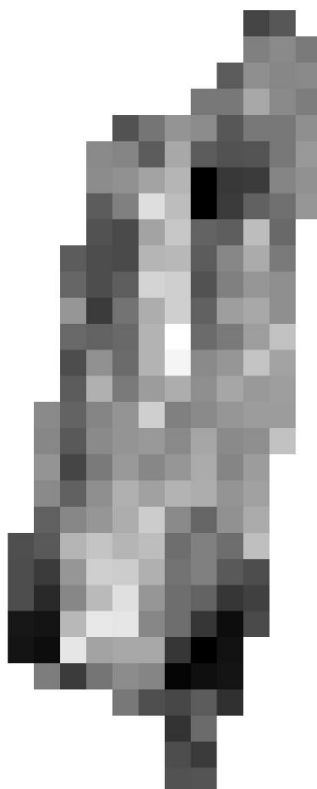
a) Praha - Ruzyně

High : 6,19663
Low : 4,08268



b) Vendolí

High : 6,96156
Low : 1,17131



0 50 100 200 300 400
metrů

Bc. Klára Kyselová, 2017
Fakulta životního prostředí
Česká zemědělská univerzita v Praze
souřadnicový systém: WGS_1984_UTM_Zone_33N
zdroj: VÚRV, ČZU v Praze, FŽP