

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů



**APLIKACE METOD PRECIZNÍHO ZEMĚDĚLSTVÍ PRO
ZVOLENÝ ZEMĚDĚLSKÝ PODNIK**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Petr Novák, Ph.D.

Autor práce: Bc. Zdeňka Pandulová

Praha 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Zdeňka Pandulová

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Aplikace metod precizního zemědělství pro zvolený zemědělský podnik

Název anglicky

Application of precision agriculture methods in selected farm.

Cíle práce

Cílem práce bude vyhodnotit možnosti využití metod precizního zemědělství na hodnocení stavu porostů základních polních plodin a půdních vlastností v podmínkách vybraného zemědělského podniku.

Metodika

Na základě soudobé tuzemské a cizojazyčné literatury vytvořit literární rešerši na téma uplatnění metod precizního zemědělství v podmínkách současné zemědělské praxe. Praktická část práce bude věnována zpracování dat systémů precizního zemědělství ve zvolené lokalitě v průběhu několika sezon. Budou hodnoceny možnosti využití dat k posuzování porostů a půdních podmínek. Využity budou data z pozemních čidel a senzorů, meteorologická data ale i data z dálkového průzkumu země. Součástí práce bude i ekonomické zhodnocení

Doporučený rozsah práce

55 stran

Klíčová slova

Půdní vlastnosti, výnos, dálkový průzkum země, vegetační indexy.

Doporučené zdroje informací

- Dominguez, J. A., Kumhálová, J., and Novák, P. (2015). Winter oilseed rape and winter wheat growth prediction using remote sensing methods. *Plant Soil Environment*, 61 (9), 410–416.
- Halounová, L. & Pavelka, K. (2008). *Dálkový průzkum Země*. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- 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 Environment*, 60(11), 501-506.
- Zhang Q., 2016. *Precision agriculture technology for crop farming*. CRC Press. Boca Raton, London, New York.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Novák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zemědělských strojů

Elektronicky schváleno dne 17. 1. 2017

prof. Dr. Ing. František Kumhála

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 03. 2018

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Aplikace metod precizního zemědělství pro zvolený zemědělský podnik vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

30. 3. 2018

Zdeňka Pandulová

Poděkování

Za konzultace a pomoc při vyhodnocení dat děkuji vedoucímu práce Ing. Petru Novákovi, Ph.D. Poděkování rovněž patří Zemědělskému družstvu Vendolí za poskytnutá data o výnosu.

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití metod precizního zemědělství ve zvoleném zemědělském podniku. Teoretická část je věnována především problematice precizního zemědělství a dálkového průzkumu Země. V praktické části práce je hodnoceno využití metod precizního zemědělství na konkrétním zemědělském pozemku o výměře 24,69 ha, který se nachází v katastrálním území obce Vendolí. Využita jsou data z dálkového průzkumu Země (družice Landsat, SPOT a Sentinel) a také výnosová data ze tří sezon – 2014 (pšenice ozimá), 2015 (ječmen jarní) a 2016 (řepka ozimá). Na základě těchto dat jsou vytvořeny mapy absolutních a relativních hodnot NDVI a výnosu ze všech sledovaných sezon. Dále jsou vytvořeny výsledné mapy aplikačních zón sledovaného pozemku dle hodnot výnosu i NDVI. Pro hodnocení stavu porostů a půdních podmínek jsou využita také data meteorologická. Dle získaných hodnot bylo zjištěno, že nejlepší stav půdy a porostu vykazuje střední část pozemku, kde byly zjištěny nejvyšší hodnoty výnosu i NDVI, zatímco okrajové části pozemku vykazují převážně hodnoty nižší, nejnižší pak zejména v jihovýchodní části pozemku. Hodnoty výnosu byly dle naměřených meteorologických dat silně ovlivněny srážkovou činností během hlavních vegetačních období plodin. Hodnocení je doplněno diskuzí o možnostech využití těchto metod. Práce je ukončena ekonomickým zhodnocením (zvýšení tržeb podniku při variabilní aplikaci dusíku).

Klíčová slova: půdní vlastnosti, výnos, dálkový průzkum Země, vegetační indexy

Application of precision agriculture methods in selected farm

Summary: This diploma thesis deals with the possibilities of using precision agriculture methods in selected farm. The theoretical part deals mainly with the problematics of precision agriculture and remote sensing. The practical part of the thesis evaluates the use of precision agriculture methods on the specific agriculture plot of 24,69 ha, which is situated in the cadastral area of the village of Vendolí. Data from remote sensing (Landsat, SPOT and Sentinel) as well as yield data from three seasons - 2014 (winter wheat), 2015 (spring barley) and 2016 (winter rape) are used. Based on these data, maps of absolute and relative NDVI and yield values from all the monitored seasons are created. Then the resulting maps of the application zones of the monitored plot are created according to the yield values as well as NDVI. For the evaluation of the state of vegetation and soil conditions the meteorological data are used too. According to the obtained values it was found that the best soil and vegetation state shows the middle part of the plot, where the highest yield and NDVI values were found, whereas the edges of the plot show mainly lower values, the lowest especially in the south-eastern part of the plot. According to the measured meteorological data the yield values were heavily affected by precipitation during the main growing seasons of the crops. The evaluation is complemented by a discussion about the possibilities of using these methods. The thesis is completed with economic evaluation (increase of the company's sales with variable nitrogen application).

Key words: soil properties, yield, remote sensing, vegetation indexes

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Precizní zemědělství.....	3
3.1.1	Přínosy precizního zemědělství	3
3.1.2	Sledování variability pozemků	4
3.1.3	Prostorové interpolace	5
3.1.4	Management zóny.....	7
3.2	Dálkový průzkum Země.....	9
3.2.1	Historie DPZ.....	10
3.2.2	Druhy DPZ.....	11
3.2.3	Elektromagnetické záření	12
3.2.4	Interakce elektromagnetického záření s atmosférou.....	14
3.2.4.1	Atmosférické korekce.....	15
3.2.5	Spektrální chování objektů	16
3.2.6	Spektrální projev vegetace.....	17
3.2.6.1	Vegetační indexy	18
3.2.7	Data DPZ	20
3.2.8	Družicové systémy.....	21
3.2.8.1	Landsat	22
3.2.8.2	SPOT	24
3.2.8.3	Sentinel.....	24
3.3	Mapování výnosů.....	26
3.3.1	Výnosová čidla	26

3.3.2	Globální navigační satelitní systémy	27
3.4	Zpracování dat.....	29
3.4.1	Geografický informační systém.....	29
4	Popis lokality	32
4.1	Základní geografické informace	32
4.2	Půdní a klimatické podmínky.....	32
4.3	Zemědělské družstvo Vendolí.....	34
4.4	Osevní postup.....	34
5	Metodika	35
5.1	Zdroje výnosových a družicových dat	35
5.2	Zpracování dat.....	37
6	Grafické znázornění dat a diskuze	40
7	Ekonomické zhodnocení.....	48
8	Závěr	50
9	Seznam použitých zdrojů.....	52
10	Seznam obrázků.....	58
11	Seznam tabulek	59

1 ÚVOD

V poslední době dochází ke globálnímu zvětšování problémů degradace půdy, což může vést ke snižování výnosů zemědělských plodin. Půda je přitom pro lidstvo nepostradatelným přírodním zdrojem. Degradace půdy může být způsobena různými faktory, a to například utužením, erozí, desertifikací, kontaminací chemickými látkami či nadměrným hnojením. K omezení degradace půd lze využít metody precizního zemědělství, které respektují požadavky rostlin i konkrétní stav půdy pro následné variabilní aplikace hnojiv či pesticidů. Využitím metod precizního zemědělství lze na půdě nejen hospodařit šetrněji vzhledem k životnímu prostředí, ale také dosáhnout větší výnosnosti produkce a z hlediska ekonomiky snížit náklady na pěstování plodin.

Pro hodnocení variability pozemku lze využít data dálkového průzkumu Země, tedy data získaná například z družicových snímků. Pomocí moderních technologií a software pro zpracování dat lze z těchto snímků vypočítat hodnoty různých vegetačních indexů, z nichž bývá jako nejběžnější uváděn index NDVI. Tento vegetační index zobrazuje zdravotní stav rostlin, tedy množství živé rostlinné hmoty. Lze předpokládat, že použití indexu NDVI u obilovin je vhodné, zatímco u řepky jsou výsledné hodnoty odrazivosti ovlivněny měnící se barvou plodiny v průběhu vegetace. Dalším ukazatelem variability pozemku může být rozdílná úroveň výnosu plodin v rámci pozemku. Pro mapování výnosů lze využít výnosová čidla, která jsou instalována na sklízecích mlátičkách. Systém měření výnosu musí být také doplněn o přijímač polohy obvykle v systému DGPS. Ze získaných družicových a výnosových dat lze poté vytvořit mapy aplikačních zón konkrétního pozemku.

Při výsledném hodnocení stavu porostů a půdních podmínek pomocí zjištěných hodnot NDVI a výnosu je důležité zahrnout do interpretace výsledků také data meteorologická ze sledovaných sezon, vliv topografie a dalších lokálních faktorů konkrétního pozemku. Aby podnik mohl přejít od uniformního hospodaření k lokálně cíleným pěstebním zásahům, je třeba znát příčinu rozdílného výnosu v rámci pozemku (například vliv topografie, mikroklima, dostupnost vody, zásobenost živinami, výskyt plevelů, chorob či škůdců). Pokud tato příčina není známa, doporučuje se provádět pěstební zásahy uniformně.

2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je vyhodnocení možností využití metod precizního zemědělství pro hodnocení stavu porostů základních polních plodin a půdních vlastností v podmínkách vybraného zemědělského podniku.

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1 Precizní zemědělství

Precizní zemědělství představuje hospodaření na půdě využívající možnosti současných informačních technologií, hospodaření, které využívá podrobné, prostorově orientované, lokálně specifické informace o půdě a plodinách k zpřesnění vstupů podporujících produktivitu plodin (Lipavský, 2000). Ryant (2001) uvádí, že cílem precizního zemědělství je usměrňovat vstupy a technologie v závislosti na lokálních podmínkách v rámci pole tak, aby bylo možné vykonat správný zásah na správném místě, ve správném čase a správným způsobem. Jakékoli vstupy mají být aplikovány pouze tehdy, kdy jsou potřeba a tam, kde jsou potřeba.

Precizní zemědělství představuje další systém hospodaření, který je založený na nevyrovnanosti (variabilitě) pozemků. Na základě znalosti variability určitého znaku pozemku lze provádět diferencované pěstební operace, jako například variabilní aplikace hnojiv nebo herbicidů. Godwin (2015) uvádí jako zdroje variability typ půdy (strukturu), dostupnost vody, živiny v půdě, škůdce plodin, nemoci a plevelle.

Častým ukazatelem heterogenity pozemků bývá rozdílná úroveň výnosu plodiny, kterou lze zjistit pomocí výnosových map. Lukas et al. (2011) uvádí, že lokálně cílené pěstební zásahy se doporučují v případě, že prostorové struktury rozdílů výnosu jsou konzistentní po více let a odpovídají některým z agronomicky významných jevů (zásoba živin, topografie terénu, historie užívání pozemku). V případě, že není známá příčina rozdílného výnosu v rámci pozemku, je vhodné provádět pěstební zásahy uniformně.

Precizní zemědělství zohledňuje jak rozdíly v půdních podmínkách, tak ve stavu porostu v rámci pozemku. Tyto rozdíly lze zjistit pomocí různých senzorů a také mapováním půdy, porostů a výnosů. Pro aplikaci metod precizního zemědělství je tak důležité využití moderních technologií jak v oblasti informačních technologií, tak zemědělské techniky. Jako hlavní technologie precizního zemědělství se uvádí výpočetní technika, geografický informační systém, globální navigační satelitní systémy, senzory a aplikační kontrolní prvky (Pierce et al., 1999).

3.1.1 Přínosy precizního zemědělství

Za hlavní přínosy využití technologií precizního zemědělství jsou považovány přínosy ekonomické a ekologické. Kroulík (2016) uvádí, že mezi hlavní cíle variabilních zásahů precizního zemědělství lze zařadit zvýšení výnosnosti rostlinné produkce, zvýšení kvality produktů a ochranu životního prostředí.

Ekonomické přínosy spočívají ve snížení spotřeby použitých přípravků, snížení nákladů na hnojiva a chemické prostředky a zvýšení zisků z jednoho hektaru. Ekonomický zisk je jednak přímý, daný zvýšením výnosů nebo kvality produkce důsledkem snížení spotřeby pohonných hmot, hnojiv či přípravků pro chemickou ochranu rostlin nebo nepřímý, který se projeví v dalších letech jako výsledek systematického lokálního hnojení fosforem a draslíkem, úpravy pH nebo menšího zhutnění půdy sníženým počtem přejezdů po poli. Porovnáním výše těchto ekonomických výnosů s náklady na zavedení a provoz precizního hospodaření se poté získá rentabilita. Na rentabilitu precizního zemědělství mají vliv především heterogenita pozemků, intenzita hospodaření a velikost podniku (Neudert et al., 2015).

Zavedení systému precizního zemědělství je však spojeno se spoustou nákladů, mezi které patří například náklady spojené se získáváním dat (půdní mapy, globální polohový systém GPS pro mapování výnosu, senzory pro zjišťování variability půdy a porostů), náklady na správu dat (výpočetní technika, přenos dat) a náklady na aplikační a navigační techniku (systémy navádění, technika pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů).

Ekologické přínosy precizního zemědělství spočívají v již zmíněné variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů, které nejsou aplikovány na celém pozemku nebo nejsou aplikovány stejné průměrné dávky na pozemku. Za nejvýznamnější ekologické přínosy lze považovat snižování úniku nitrátu z orné půdy, snížení kontaminace prostředí rezidui chemických přípravků na ochranu rostlin, omezení přehnojování půdy, omezení půdní eroze nebo snížení spotřeby pohonných hmot (provoz strojů pomocí navigačních systémů).

3.1.2 Sledování variability pozemků

Variabilitu pozemků lze rozdělit na prostorovou (sledovaný znak vykazuje změny v rámci plochy pozemku) a časovou (změna znaku v čase). Za příčiny prostorové variability lze považovat heterogenitu půdního prostředí, rozdílnou intenzitu obhospodařování pozemků nebo bioticky škodlivé vlivy, zatímco příčinou časové variability bývá průběh povětrnostních podmínek. Zohlednění časové variability je zatím ve fázi výzkumu, zatímco prostorovou variabilitu lze zachytit v rámci metod precizního zemědělství.

Pro uplatnění metod precizního zemědělství je prostorová variabilita a její identifikace stěžejním předpokladem, protože pokud jsou pozemky i porosty homogenní, není nutné provádět pěstební zásahy diferencovaně. Brodský et al. (2004) uvádí, že variabilita půdy je z hlediska prostoru i času klíčovým prvkem pro precizní zemědělství. Pokud by neexistovala žádná variabilita, tradiční postupy hospodaření se správným přizpůsobením pro aktuální podmínky na poli by byly dostatečné.

Čím vyšší je prostorová variabilita, tím vyšší jsou poté i přínosy využití metod precizního zemědělství. Prostorová variabilita může být stanovena celoplošným mapováním např. pomocí metod dálkového průzkumu Země (DPZ) nebo diskrétním mapováním ve vybraných bodech pozemku.

Důsledkem variability pozemků bývá již zmíněná různá úroveň výnosu, kterou mohou ovlivnit jak faktory pro daný pozemek víceméně neměnné (topografie, klima, zrnitost půdy), tak faktory více ovlivnitelné (živiny, vláha, pH, choroby a škůdci, plevele). Kumhálová a Matějková (2017) uvádí, že jedním z hlavních faktorů ovlivňujících výnos a variabilitu plodin je topografie. Godwin a Miller (2003) uvádí faktory ovlivňující výnos plodin včetně metod jejich zjišťování (tab. 1).

Tabulka 1 Faktory ovlivňující výnos plodin

Skupina	Faktor	Metoda
Půda a voda	Půdní zrnitost, struktura, dostupnost vody a zamokření	Mapování půdy, popis půdního profilu, EMI, tahová síla
Topografie	Topografie a mikroklima	Topografické mapování a 3D-DGPS
Živinný stav půdy	Zásobenost hlavními živinami, pH a mikroelementy	Cílené vzorkování, zjišťování hustoty porostu leteckým snímkováním, výnosové mapy
Škodliví činitelé	Zaplevelení, výskyt škůdců a chorob	Terénní průzkum, letecké snímkování a měření odrazivosti

Zdroj: Godwin a Miller (2003)

Upravil Lukas (2009)

Prostorová variabilita může být popisována pomocí geostatistických metod. V širším slova smyslu lze geostatistiku charakterizovat jako statistickou analýzu prostorově lokalizovaných dat (Dobrovolný, 2010). Oliver (1999) uvádí, že geostatistika nám poskytuje nástroje k prozkoumání struktury prostorové variability v půdě.

Základním předpokladem pro prostorovou závislost je, že body blíže u sebe vykazují vyšší podobnost sledovaných veličin (tedy nižší rozptyl) než body od sebe vzdálenější.

3.1.3 Prostorové interpolace

Prostorové interpolace se používají v případě, kdy máme data změřená v nepravidelné síti bodů a zajímá nás odhad hodnot v místech mezi těmito body, tedy v celé oblasti. Výsledkem

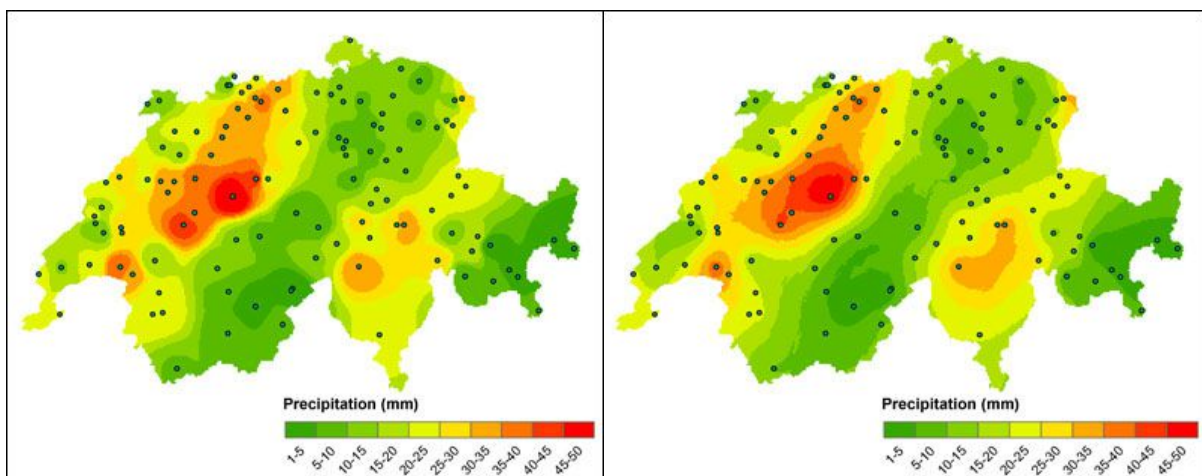
prostorových interpolací jsou spojité mapy. Zvolený interpolační postup i hustota vzorkování značně ovlivňují výslednou podobu mapy. V praxi se nejvíce používají metoda inverzní vzdálenosti a kriging.

Metoda inverzní vzdálenosti IDW (Inverse Distance Weighting) je založena na předpokladu, že hodnota atributu v určitém bodě je váženým aritmetickým průměrem hodnot okolních měřených bodů. Váhy jsou určeny pro každý bod například jako inverzní vzdálenost měřeného bodu od bodu interpolovaného (čím bližší bod, tím má větší váhu) (Dobrovolný, 2010). Tato metoda je rychlá, nevyžaduje výpočet variogramu a lze ji použít i na rozsáhlejší datové soubory.

Asi nejpoužívanější metodou interpolace je kriging. V tomto případě je interpolace založena na váženém průměru hodnot okolních bodů, ale s tím rozdílem, že váhy hodnot se stanovují pomocí variogramu. Průběh interpolace je ovladatelný pomocí mnoha parametrů. Tato metoda je výpočetně náročnější, protože vyžaduje výpočet variogramu. Experimentální variogram je proložen matematickou funkcí, která určuje váhu hodnot predikovaných na místech bez vzorků. Za výhodu krigingu lze považovat možnost stanovení chyby odhadu.

Na obr. 1 lze vidět porovnání obou zmíněných interpolačních metod. Na obrázku vlevo je použita metoda IDW, typicky se zde vyskytují tzv. bull eyes (okrouhlé lokálně ohraničené struktury) okolo známých bodů. Na obrázku vpravo je použit kriging. Zde se tyto tzv. bull eyes nevyskytují, protože metoda kriging umožňuje nastavit prostorové souvislosti pomocí variogramu.

Obrázek 1 Porovnání metod IDW a kriging (úhrn srážek ve Švýcarsku)



Zdroj: <http://www.gitta.info>

3.1.4 Management zóny

Hospodaření v management zónách představuje specifický způsob lokálně cílené aplikace vstupů, který vyžaduje rozdělení pozemků na zóny s relativně homogenním obhospodařováním. Doerge (1999) definuje management zónu jako část pole, která vyjadřuje homogenní kombinaci výnos limitujících faktorů, a pro kterou je možné aplikovat jednotnou intenzitu vstupů.

Vytvoření mapy management zón je nezbytné pro efektivní aplikaci proměnlivé dávky. Aby bylo možné takovou mapu vytvořit, je třeba zvážit tři faktory, a to informace, které mají sloužit jako základ pro vytvoření management zón, postup pro zpracování těchto informací a optimální počet zón, do kterých má být pole rozděleno (Zhang et al., 2010).

Cílem každé strategie s proměnlivou dávkou vstupů je vytvoření přesné aplikační mapy. Tato aplikační mapa poté určuje výši a umístění vstupů, které budou aplikovány na pole. Čím více faktorů je obsaženo ve strategii pro vymezení management zóny, tím vyšší je přesnost aplikační mapy. Strategie vymezení management zóny zahrnuje několik klíčových aspektů, jedná se především o (Doerge, 1999):

- Vztah s výnosem – nejvýznamnější faktory, které je třeba zahrnout do strategie management zóny jsou ty, které přímo ovlivňují výnos plodiny. Například lze uvést vlhkost půdy, pH půdy, zamoření půdními patogeny a extrémy v obsahu půdních živin.
- Cena dat – některé zdroje prostorových dat jsou dostupné zdarma nebo za nízkou cenu. Patří sem místní znalosti pěstitele, mapy půdních průzkumů, letecké snímky a některé snímky z DPZ, které jsou dostupné na internetu.
- Kvantitativní a opakovatelná data – některé charakteristiky jsou přímo měřitelné a v průběhu času se značně neliší, včetně topografie, elektrické vodivosti, barvy půdy a dalších fyzikálních vlastností půdy. Jestliže tyto vlastnosti souvisí s výnosem plodiny, lze je považovat za spolehlivé způsoby pro definování management zón. Výhodou těchto dat je jejich stálost v čase a nutnost pouze jediného měření.
- Hustota dat – čím větší je hustota dat získaných o pozemku, tím menší jsou poté problémy s následnou interpolací. Menší zóny managementu mohou být přesněji definovány pomocí hustší odběrové sítě. Zhang et al. (2010) uvádí, že pro dosažení statistické významnosti mezi vzorky pro určení management zón je třeba velký počet vzorků, a z toho důvodu také velké výdaje na cenu a čas.

Existují různé způsoby pro vytvoření management zón (Pioneer Agronomy Sciences, 2012):

- Víceletá analýza výnosu – sběr dat o výnosu daného pole z 3 a více let, data z každého roku jsou zprůměrována, všechny roky jsou sloučeny dohromady z důvodu vytvoření průměrného relativního výnosu a dále jsou nastaveny parametry rozsahu průměrného relativního výnosu, aby bylo možné vytvořit management zóny. Výhodou tohoto způsobu je vysoké rozlišení (jemné detaily), naopak nevýhodou je nutnost sbírat data po dobu několika let.
- Dálkový průzkum Země – letecké, satelitní a ruční senzory. Barva půdy může korelovat s organickou hmotou, hodnota vegetačního indexu odvozená z družicových či leteckých snímků nebo z ručních senzorů může zobrazovat kondici plodin a jejich růstovou fázi především na základě barvy. Výhodami mohou být vztah k aktuálním podmínkám na poli a určitá korelace s růstovými fázemi. Mezi nevýhody patří závislost na oblačnosti a skutečnost, že růstové fáze ne vždy korelují s výnosem zrna. Zhang et al. (2010) uvádí, že spektrální odrazivost půdy nebo plodin, která byla naměřena v laboratoři, z ručních přístrojů, leteckých snímků a satelitních pozorování, byla ve velké míře používána pro vytvoření aplikačních map s proměnlivou dávkou vstupů.
- Půdní vlastnosti – odběr půdních vzorků, elektrická vodivost půdy, senzory on-the-go, pH senzor. Měří se půdní vlastnosti, které ovlivňují nebo mohou ovlivnit výnos plodin. Pro korelaci s měřeními je nutné získat data o výnosu.
- Znalosti pěstitele – vychází ze znalostí prostorových vzorů na poli z minulosti, může zahrnovat více zdrojů informací (úrodnost, topografie, odvodnění). Za výhody lze považovat nejnižší požadavek na technologie a použitelnost v případě, pokud nejsou k dispozici jiné zdroje. Nevýhodami mohou být nutnost znalosti pěstitele historie pole a také nevědecké základy tohoto způsobu, které spoléhají pouze na intuici nepodloženou výzkumem.

Pro účely této diplomové práce budou ke stanovení management zón využita data z dálkového průzkumu Země a také data z víceleté analýzy výnosu.

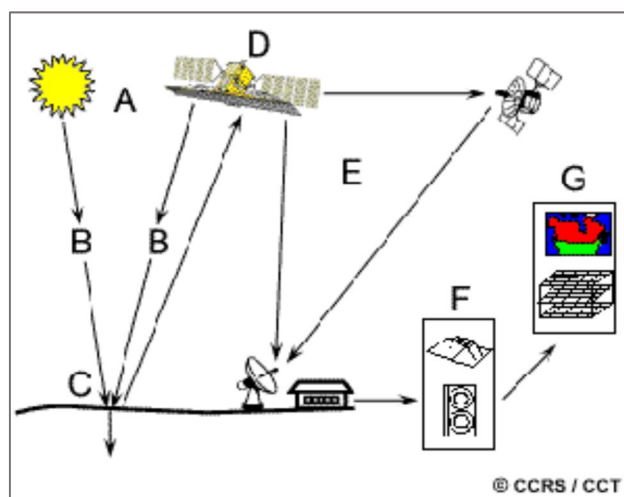
3.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země představuje metodu, pomocí které lze získat informace o objektech a jevech bezkontaktními metodami. Definici dálkového průzkumu Země uvádí například Lillesand a Kiefer (1994): „Dálkový průzkum Země je věda i umění získávat užitečné informace o objektech, plochách či jevech prostřednictvím dat měřených na zařízení, která s těmito zkoumanými objekty, plochami či jevy nejsou v přímém kontaktu.“ Dálkový průzkum Země lze zařadit mezi geoinformační technologie, které slouží ke sběru dat o zemském povrchu, dále je zpracovávají a ukládají informace pro další využití. V precizním zemědělství je dálkový průzkum Země založen na vztazích povrchové spektrální odrazivosti s různými vlastnostmi půdy a charakteristikami plodin.

DPZ je založen na interakci mezi dopadajícím zářením a objektem zájmu, v podstatě se tedy jedná o měření elektromagnetického záření vyzařovaného nebo odraženého zkoumaným objektem. Oršulák a Pacina (2010) popisují princip DPZ v následujících sedmi bodech:

1. A – zdroj elektromagnetického záření (zdroj energie ozařující objekt zájmu),
2. B – záření a atmosféra (energie prochází atmosférou při šíření od zdroje k objektu zájmu a poté odražená od objektu k senzoru),
3. C – interakce s objektem zájmu (v závislosti na vlastnostech objektu a typu záření),
4. D – zaznamenání energie senzorem (senzor, který není v přímém kontaktu s objektem, zaznamená elektromagnetické záření odražené, popřípadě vyzařené objektem zájmu),
5. E – přenos, příjem a zpracování (energie zaznamenaná senzorem je elektronicky přenesena do stanice, kde dojde ke zpracování),
6. F – vyhodnocení a analýza (vizuální nebo digitální vyhodnocení obrazu k získání informací o ozářeném objektu),
7. G – aplikace (využití informací získaných ze snímku).

Obrázek 2 Princip DPZ



Zdroj: Oršulák a Pacina (2010)

3.2.1 Historie DPZ

Historie DPZ je úzce propojena se znalostmi elektromagnetického záření, vývojem fotografie, letectví a kosmonautiky. Lze ji rozdělit do čtyř základních období, ve kterých docházelo k vývoji v těchto jednotlivých oblastech. Zásadní milníky spojené s touto disciplínou uvádí například Dobrovolný (1998) nebo Halounová a Pavelka (2008):

1. Období do 1. světové války:

- 1666 – Isaac Newton dokázal pomocí optického hranolu, že bílé světlo je složeno z elektromagnetického záření o různých vlnových délkách,
- 1800 – objev infračerveného záření (F. W. Herschel),
- 1839 – objev fotografie (N. Niepce, W. H. F. Talbot, L. J. M. Daugerre),
- 1858 – první fotografie pořízená z balónu, vesnice Bievre u Paříže (G. F. Tournachon),
- 1860 – fotografie Bostonu z balónu (J. W. Black),
- 1873 – formulace teorie elektromagnetického záření (J. C. Maxwell),
- 1903 – patent fotografické komory na poštovním holubu (J. Neubronne),
- 1906 – fotografie San Francisca po zemětřesení, nosičem drak (G. R. Lawrence),
- 1906 – první fotografie části Prahy z balónu (J. Plischek),
- 1909 – první fotografie z letadla pořízená v Itálii (W. Wright).

2. Období do poloviny 20. století:

- Velký rozvoj leteckého snímání během obou světových válek,
- 1956 – využití infračervené fotografie pro detekci škod na vegetaci (R. Colwell),
- vznik atlasu leteckých snímků,
- 1957, 1958 – vypuštěny první družice Země (Sputnik 1,2,3),
- 1958 – první fotografie zemského povrchu z družice (Explorer VI).

3. Počátky družicového snímání do roku 1972:

- 1960 – první meteorologická družice TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite),
- monitorování počasí – geostacionární družice,
- 60. léta – využití leteckých snímků z radaru pro civilní mapování.

4. Digitální DPZ od roku 1972:

- 1972 – vypuštění družice ERTS-1, později přejmenována na Landsat 1, první družice zaměřená na poskytování dat o DPZ,

- 80. léta – družice SPOT, data pro tvorbu digitálního modelu terénu,
- 1999 – první soukromá družice IKONOS,
- fotografii nahrazují digitální obrazové záznamy,
- tematické mapování povrchu Země,
- digitální zpracování obrazu,
- DPZ nedílnou součástí geoinformatiky.

3.2.2 Druhy DPZ

DPZ lze rozdělit dle různých kritérií. Dobrovolný (1998) rozdělil DPZ následovně:

1. Dle zdroje elektromagnetického záření:
 - Pasivní metody DPZ – využívají přirozeně dostupnou energii, zdrojem elektromagnetického záření je Slunce a Země. V tomto případě měří detektory na nosičích tzv. přírodní záření, tj. teplotní záření, které je objektem emitováno nebo odražené sluneční záření. Pasivní metody lze ještě dále rozdělit na přímé a nepřímé. Při použití přímých metod se registruje odražené a rozptýlené záření Slunce, naproti tomu u nepřímých metod záření vyzařované objekty na zemském povrchu a v atmosféře.
 - Aktivní metody DPZ (např. radarové systémy) – využívají umělý zdroj záření, který je zpravidla nesený nosičem současně s měřicí aparaturou. Senzory nejprve vysílají záření k objektu zájmu a poté zaznamenávají jeho odraženou energii.
2. Dle druhů nosičů senzorů: pozemní systémy, letadla, balóny, družice a bezpilotní letadla UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (řízeny na dálku nebo pomocí předprogramovaných letových plánů).
3. Dle způsobu záznamu obrazu:
 - Konvenční metody – fotografické snímky, pořizují se centrální projekcí, obraz vznikne v jediném okamžiku, fotografie se pořizují převážně z letadla, družice nebo modelu, nevýhodou je malý rozsah vlnových délek, ve kterých jsou data pořizována.
 - Nekonvenční metody – snímky vznikají postupně tzv. řádkováním, digitální podoba záznamu, nosiči družice nebo letadla.
4. Dle druhu vlnových délek: panchromatické, infračervené, tepelné, mikrovlnné.
5. Dle velikosti snímaného území: globální, oblastní, lokální, detailní.

6. Dle osy záběru: svislé, šikmé snímky.
7. Dle zorného pole kamery: s úzkým úhlem, normálním, širokouhlé.
8. Dle části spektra: multispektrální (měření ve více než jednom spektrálním pásu), hyperspektrální (měření ve vysokém počtu spektrálních pásem).

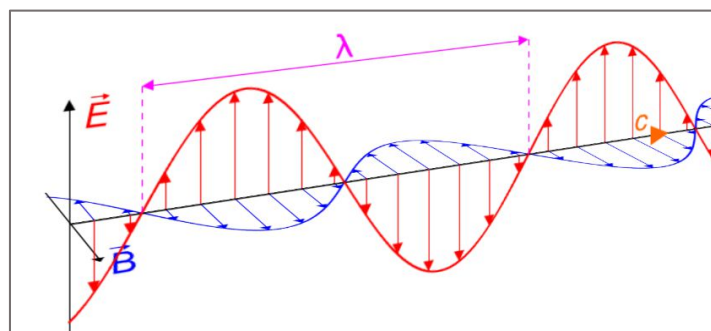
3.2.3 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je základem DPZ. Je proto důležité porozumět vlastnostem tohoto záření a jeho interakci nejen s objektem zájmu, ale i s atmosférou, kterou záření prochází a s detektorem, který ho zaznamenává. Důležité je pochopení základních fyzikálních principů, na kterých je DPZ založen. Poté lze plně využít data pro smysluplná měření a správně je interpretovat (Jones, Vaughan, 2010).

Elektromagnetické záření vzniká přeměnou energie z jiných forem energií (kinetická, elektrická, tepelná, chemická, magnetická nebo jaderná). Energie elektromagnetického záření spočívá ve vlnění, šíří se elektromagnetickými vlnami. Elektromagnetické záření je složeno z elektrického a magnetického pole, která jsou navzájem na sebe kolmá. Obě tato pole se šíří rychlostí světla.

Mezi základní charakteristiky elektromagnetického záření patří jeho vlnová délka (λ) a frekvence (ν). Vlnová délka je vzdálenost dvou sousedních vrcholů vlny, frekvence poté počet vrcholů vlny procházejících fixním bodem za jednotku času. Vlnová délka se měří v metrech a jednotkách odvozených, frekvence v Hertzech. Mezi vlnovou délkou a frekvencí platí nepřímá úměra: $c = \lambda \cdot \nu$, tedy čím kratší vlnová délka, tím vyšší frekvence a naopak (Dobrovolný, 1998).

Obrázek 3 Elektromagnetické záření



Zdroj: <https://dspace.cvut.cz>

Elektromagnetické záření je odráženo nebo pohlcováno všemi objekty, které mají teplotu větší než absolutní nula ($-273,15 \text{ } ^\circ\text{C}$). Charakteristiky tohoto záření vyplývají ze základních zákonů záření, které popisují přeměnu tepelné energie na zářivou. Tento proces je

však velice složitý, a proto se zjednodušuje pomocí modelu tzv. absolutně černého tělesa. Předpokládá se, že při přeměně tepelné energie na zářivou se absolutně černé těleso přemění a pohltí maximální množství energie při dané teplotě. Souvislost mezi intenzitou vyzařování tělesa M a jeho teplotou T udává Stefanův – Boltzmannův zákon, který lze vyjádřit následujícím vztahem (Dobrovolný, 1998):

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

kde M značí intenzitu vyzařování z povrchu tělesa, σ je Stefan Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota tělesa. Dalším důležitým zákonem je Wiennův zákon posuvu, který lze vyjádřit vztahem:

$$\lambda_{max} = \frac{c}{T} \quad (2)$$

kde vlnová délka s maximální intenzitou vyzařování λ_{max} je nepřímo úměrná teplotě tělesa T , c značí rychlost světla.

Uvedené vztahy ovšem platí pouze pro absolutně černé těleso, reálné objekty o stejné teplotě vyzařují různé množství energie, které je vždy menší než u absolutně černého tělesa. Tuto skutečnost popisuje Kirchhoffův zákon, který umožňuje definovat tzv. emisivitu (ε). Emisivita vyjadřuje poměr mezi intenzitou vyzařování reálného tělesa (M_λ) a intenzitou vyzařování černého tělesa ($M_{\varepsilon\lambda}$) o dané teplotě T :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{\varepsilon\lambda}} \quad (3)$$

Dle dosahovaných hodnot emisivity lze tělesa rozdělit na (Halounová, Pavelka, 2008):

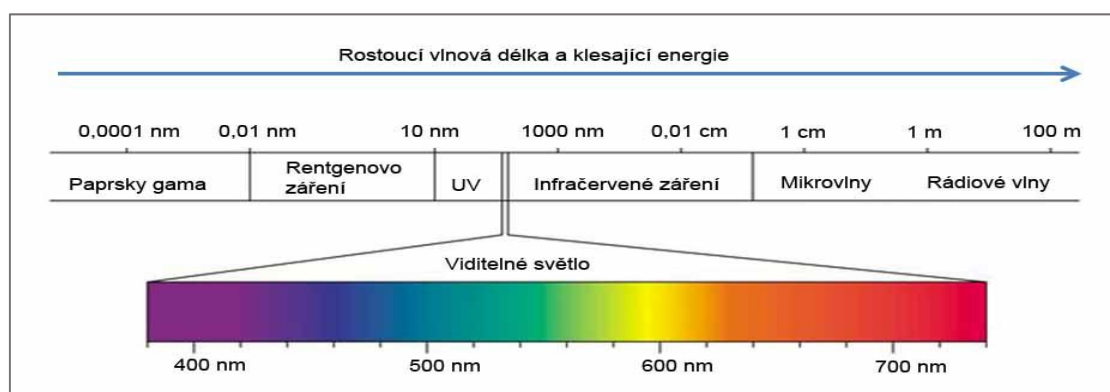
- Černé těleso ($\varepsilon = 1$).
- Šedivý zářič ($\varepsilon = \text{konst.}$) – většina běžných materiálů, velikost emisivity se pohybuje mezi 0,85-0,95.
- Barevný zářič ($\varepsilon \neq \text{konst.}$) – některé vlnové délky ve spektru vyzařovaného záření jsou zastoupeny s větší intenzitou.
- Bílý zářič ($\varepsilon = 0$) – těleso záření nevyzařuje, pouze teoretický případ, veškeré záření je povrchem odraženo, těleso je dokonalý odražeč.

Elektromagnetické záření se v přírodě může vyskytovat ve spojitém spektru, jehož rozsah je téměř dvacet řádů (Kolář, 1990; Dobrovolný, 1998) a které lze podle vlnové délky nebo frekvence rozdělit do několika základních oblastí. Celé spektrum je zobrazeno na obr. 4. Oršulák a Pacina (2010) uvádí, že pro DPZ se využívají pouze některé části spektra, a to viditelná část, ultrafialové záření, infračervené záření (blízké, střední, tepelné) a mikrovlny. Tyto oblasti se nachází v úsecích tzv. atmosférických oken, která propouští elektromagnetické záření z vesmíru. V jiných částech spektra zemská atmosféra záření propouští jen zčásti nebo

vůbec, což je dáno jejím chemickým složením, především obsahem vodní páry, oxidu uhličitého, ozonu, kyslíku a dusíku.

Záření o krátkých vlnových délkách (gamma až UV) je pohlcováno zejména ozonem. Následuje úzké optické okno a poté infračervené okno, které propouští záření pouze zčásti a pouze v některých oblastech vlnových délek. Molekuly vody a kyslíku pohlcují značnou část infračerveného a mikrovlnného záření. Po rádiovém oknu již delší vlnové délky nepropouští zemská ionosféra (Svatoňová, Lauermann, 2010).

Obrázek 4 Elektromagnetické spektrum



Zdroj: <http://labguide.cz>

Tabulka 2 Druhy záření využitelné v DPZ

Záření	Vlnová délka
Ultrafialové	50-400 nm
Viditelné	400-750 nm
Infračervené	750 nm- 1 mm
• Infračervené záření blízké	750-1400 nm
• Infračervené záření střední	1400-3000 nm
• Tepelné záření	3000 nm-1 mm
Mikrovlnné záření	1 mm-1 m

Zdroj: Svatoňová a Lauermann, 2010

3.2.4 Interakce elektromagnetického záření s atmosférou

Atmosféra ve velké míře ovlivňuje intenzitu a spektrální složení záření. Je to způsobeno především dvěma jevy – rozptylem a pohlcováním. Příčinou rozptylu elektromagnetického záření v atmosféře je její nehomogenita, která je způsobena různými částicemi vzduchu (molekuly

plynů, aerosoly apod.). Na povrchu těchto částic dochází k odrazu, lomu a pohlcování dopadajícího elektromagnetického záření (Halounová, Pavelka, 2008). Dobrovolný (1998) rozlišuje tři druhy rozptylu:

- Raleighův (molekulární) rozptyl – způsobují částice, které mají menší rozměr než vlnová délka záření, výsledkem je například modrá barva oblohy.
- Aerosolový rozptyl – pokud jsou průměry rozptylujících částic větší než vlnová délka záření, jedná se například o prachové částice nebo vodní páru.
- Neselektivní rozptyl – způsobují velké částice (například kapky vody), výsledkem je například bílá barva oblaků a mlhy.

Pohlcováním záření se v důsledku rozumí ztráty energie na dané vlnové délce. Určité molekuly, jako například vodní páry, oxid uhličitý nebo ozon, jsou zvláště dobrými pohlcovači záření. Ozon silně pohlcuje záření v UV části spektra, a proto také pomáhá chránit před škodlivým zářením. V oblastech blízkého, středního a tepelného infračerveného záření jsou hlavními pohlcovači vodní páry a oxid uhličitý. Vlnová pásma, ve kterých různé senzory zaznamenávají energii, byla záměrně vybrána v oblastech atmosférických oken, která jsou nejméně ovlivněna pohlcováním a rozptylem (Jones, Vaughan, 2010).

3.2.4.1 Atmosférické korekce

Atmosférické korekce slouží k eliminaci vlivů atmosféry na naměřené hodnoty záření (především se jedná o výše zmíněné procesy rozptylu a pohlcování). V oblastech viditelného a blízkého infračerveného záření se projevují atmosférické efekty jako kouřmo či zákal. Dobrovolný (1998) uvádí následující metody eliminace atmosférických efektů:

- Metoda nejtmavšího pixelu – vychází z fyzikálního poznatku, že vyzařování vodních objektů v oblasti blízkého infračerveného záření je rovno téměř nule.
- Metoda založená na regresní analýze mezi jednotlivými pásmy (družice Landsat), později rozvinuta výpočtem tzv. kovarianční matice pro všechny kombinace pásem multispektrálního obrazu – vychází z předpokladu, že rozdíly v odrazivých vlastnostech objektů jsou způsobeny lokálními vlivy topografie.
- Metody regresní analýzy mezi daty získanými distančními metodami a daty z pozemních měření.
- Modely atmosférických korekcí – vlivy atmosféry lze parametrizovat za pomoci meteorologických dat pořízených v době vytváření obrazového záznamu.

Například SW ENVI (Excelis, Inc., McLean, USA) používá atmosférické korekce QUAC (Quick Atmospheric Correction) a FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spektral Hypercubes). Procesy atmosférické korekce obvykle sestávají ze dvou částí. První částí je převod původních hodnot digitálních čísel (digital number = DN) na absolutní hodnoty spektrální záře. Druhá část představuje převod absolutních hodnot spektrální záře na odrazivost objektů (bottom reflectance) (Domínguez et al, 2015). V některých případech je možné použít i data, která jsou uváděna v hodnotách odrazivosti na horní hranici atmosféry (top of the atmosphere). Tato data jsou ovšem ovlivněna atmosférou, a tedy méně přesná.

3.2.5 Spektrální chování objektů

Každý objekt odráží a emituje záření různých vlnových délek svým charakteristickým způsobem. Intenzita odraženého a emitovaného záření je závislá na elektromagnetických vlastnostech každé látky (Halounová, Pavelka, 2008). Intenzita odraženého krátkovlnného záření a intenzita emitovaného dlouhovlnného záření závisí zejména na následujících faktorech (Dobrovolný, 1998):

- Druh látky nebo objektu (např. chemické složení),
- fyzikální stav objektu (teplota, vlhkost, zhutnění povrchu),
- stav okolí objektu (propustnost atmosféry apod.).

Spektrální vlastnosti jsou závislé na stavových parametrech, které u některých látek nabývají velkého významu, protože přináší informaci o časovém vývoji objektu v průběhu roku nebo více let. Slouží tedy jako tzv. časový rozpoznávací příznak.

Množství odraženého záření lze charakterizovat pomocí tzv. spektrální odrazivosti $\rho(\lambda)$, kterou lze graficky znázornit tzv. spektrální křivkou odrazivosti. Dobrovolný (1998) definuje spektrální odrazivost jako poměr intenzity odraženého záření (M_r) a intenzity dopadajícího záření (M_i) na určité vlnové délce (λ), který je udáván např. v procentech, tedy:

$$\rho(\lambda) = \frac{M_r(\lambda)}{M_i(\lambda)} \cdot 100 (\%) \quad (4)$$

Oršulák a Pacina (2010) popisují tři typy interakce záření s objekty při dopadu na zemský povrch, a to absorpci, průchod a odraz. V případě absorpce je záření objektem pohlceno, při průchodu poté záření objektem prochází. Za odraz je chápáno odražení záření od objektu a jeho přesměrování. Existují dva typy odrazu reprezentující dva extrémy odrazu záření od objektu:

- zrcadlový odraz – hladký povrch, energie odražena v jednom směru,
- difuzní odraz – hrubý povrch, energie odražena do všech směrů.

Způsob odrazu objektů je závislý na hrubosti jejich povrchu v porovnání s vlnovou délkou použitého záření. Například při použití dlouhovlnných mikrovln bude mít jemný písek vlastnosti hladkého povrchu, zatímco při použití viditelného záření hrubého povrchu.

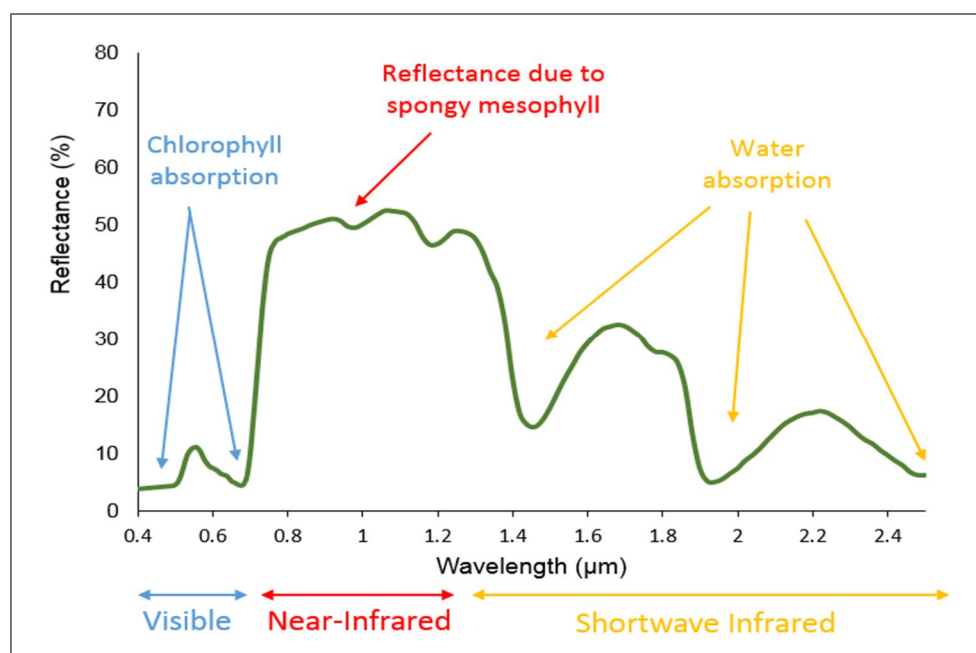
3.2.6 Spektrální projev vegetace

Vegetace je obsažena téměř ve všech datových souborech pořízených z letadlových či družicových nosičů, kromě oblastí polárních a pouštních. Jedná se o travní porosty, zemědělské plodiny, listnaté a jehličnaté lesy. Spektrální projev vegetace je výslednicí odrazivých a emisních vlastností různých částí rostliny i pozadí kolem ní, které jsou závislé na spoustě stavových parametrů. Nejvíce dominantní bývá odrazivost od listů rostlin. Jones a Vaughan (2010) uvádí, že interakce záření s rostlinami a vegetací je komplikována strukturou listů, jejich chemickým složením a uspořádáním v prostoru.

Spektrální vlastnosti listu určují jeho stavební části, a to buněčná tekutina, celulóza, tuky, lignin, proteiny, cukry a oleje v listu obsažené (Kolář, 1990). Spektrální projev listu se zjišťuje experimentálně, dostatečně přesný model založený na znalosti spektrálních vlastností jednotlivých částí zatím nebyl vytvořen.

Spektrální křivku odrazivosti vegetace lze rozdělit na tři základní oblasti, a to oblast pigmentační absorpce, oblast vysoké odrazivosti a oblast vodní absorpce. Tato křivka je zobrazena na obr. 5, kde na ose x je vynesena vlnová délka (μm) a na ose y odrazivost (%).

Obrázek 5 Spektrální křivka odrazivosti vegetace



Zdroj: <http://gsp.humboldt.edu>

I. Oblast pigmentační absorpce

Nejdůležitější částí z hlediska záření a listu je mezofylní vrstva listu, která obsahuje pigmentační látky – chlorofyl a karoteny. Tyto látky formují průběh spektrální křivky ve viditelné oblasti záření. Chlorofyl, který může tvořit až 65 % listového pigmentu, pohlcuje většinu záření v modré ($\lambda = 0,45 \mu\text{m}$) a červené ($\lambda = 0,65 \mu\text{m}$) části spektra. Mezi těmito absorpčními pásy pigmentační absorpce je maximum odrazivosti v okolí vlnové délky zeleného světla ($\lambda = 0,54 \mu\text{m}$). Viditelné záření je v listu velkou měrou absorbováno a zčásti listem prochází, odražené záření je málo intenzivní (Halounová, Pavelka, 2008).

Pokud rostliny stárnou nebo nejsou v dobrém zdravotním stavu, pak chlorofyl ubývá a projeví se jiné pigmentační látky, a to karoten a xanthofyl. Z tohoto důvodu bývají na podzim listy žlutě zbarveny. Dále se může projevit anthokyan, který dává listům červenou barvu.

II. Oblast vysoké odrazivosti (buněčné struktury)

V pásmu blízkého infračerveného záření ($0,72\text{-}1,3 \mu\text{m}$) nejvíce ovlivňuje odrazivost morfologická struktura listu. Zelená vegetace je v této oblasti charakterizována téměř stejně vysokou odrazivostí a prostupností a velmi nízkou pohltivostí (Kolář, 1990).

III. Oblast vodní absorpce

Oblast vodní absorpce určují výrazné absorpční pásy vody na vlnových délkách $1,4 \mu\text{m}$; $1,9 \mu\text{m}$ a $2,7 \mu\text{m}$. Absorpční pás na vlnové délce $2,7 \mu\text{m}$ je největší a označuje se jako hlavní vibrační absorpční pás vody. V pásmu $6,27 \mu\text{m}$ se nachází druhý základní absorpční vibrační pás. Dále se mohou projevit vedlejší pásy vody u spektrální křivky odrazivosti horní vrstvy listů a to na $0,96 \mu\text{m}$ a $1,1 \mu\text{m}$ (Halounová, Pavelka, 2008).

3.2.6.1 Vegetační indexy

Spektrální odrazivost z dat satelitních snímků může být využita pro studium vegetačního pokryvu. Několik vegetačních indexů bylo vyvinuto speciálně pro vyhodnocování dostatku vody u plodin, některé z těchto indexů jsou založeny na vztahu mezi blízkými infračervenými (NIR) a červenými pásmy. Prvním příkladem je poměrový vegetační index RVI (Ratio Vegetation Index), definovaný jako poměr mezi odrazivostí NIR a červeného pásma. V současnosti je nejpobulárnějším indexem normalizovaný diferenční vegetační index NDVI, normalizovaný poměr mezi NIR a červenými pásmy (Domínguez et al., 2015).

NDVI lze vyjádřit jako (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (5)$$

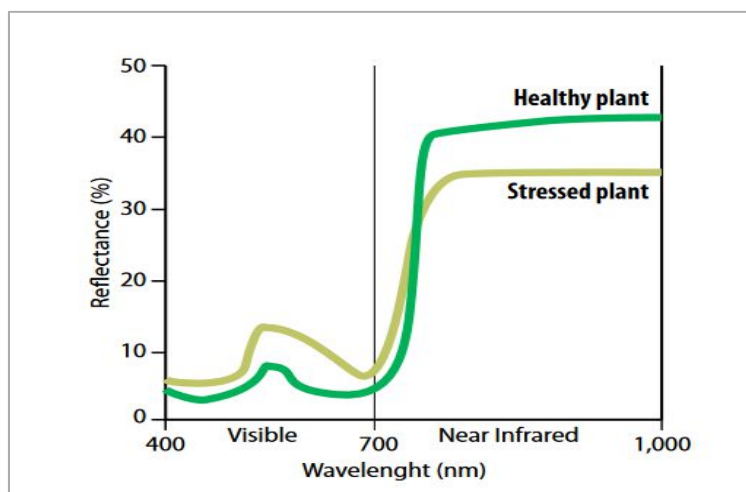
kde R_{NIR} značí odrazivost blízkého infračerveného záření a R_{RED} odrazivost viditelného červeného záření. NDVI se používá pro měření zdravotního stavu rostlin, je vynikajícím ukazatelem biomasy (množství živé rostlinné hmoty). NDVI nabývá hodnot od (-1) do (+1), nicméně žádné zelené listy nedávají hodnotu blízkou nule. Nula znamená povrch bez vegetace, naopak blízkost k +1 (0,8-0,9) naznačuje nejvyšší možnou hustotu zelených listů (Weier, Herring, 2000).

Jedním z důvodů velké popularity NDVI je skutečnost, že spousta senzorů (od ručních po satelity) poskytuje měření v NIR a červené části spektra. Většina nových komerčních satelitů bude mít červená a NIR pásma, takže dostupnost těchto dat se ještě zvýší (Verhulst, Goaverts, 2010).

Satelitní měření NDVI ovlivňují i další faktory kromě vegetačních, a to například atmosférické podmínky (např. oblačnost, aerosoly, vodní pára), geometrie a kalibrace satelitních snímků, půdní pozadí a struktura porostu nebo úhel dopadu slunečního záření. Těmto komplikacím se lze vyhnout použitím systému GreenSeeker. Jedná se o ruční optický senzor určený pro měření NDVI, který je držen v blízkosti nad plodinami (není potřeba řešit geometrické ani atmosférické korekce). Tento senzor využívá světelné diody (LED), které generují červené a blízké infračervené (NIR) světlo. Toto světlo se odráží od plodiny a měří se pomocí fotodiody umístěné v hlavě senzoru. Snímá se NDVI, barva rostliny a výnos biomasy (agris, 2005).

Červené světlo je absorbováno chlorofylem rostliny a slouží jako zdroj energie během fotosyntézy. Proto zdravé rostliny absorbují více červeného světla a odráží větší množství NIR než rostliny nezdravé. Typická odrazivost zdravé rostliny v porovnání s rostlinou stresovanou je zobrazena na obr. 6.

Obrázek 6 Typická odrazivost zdravé a stresované rostliny



Zdroj: Verhulst a Goaverts, 2010

3.2.7 Data DPZ

Výsledná data získaná z DPZ mohou mít dvě základní podoby – analogová data nebo digitální data. Analogová data byla využívána zejména v počátcích DPZ, v současné době lze tato data získat především z leteckých nosičů, získávají se fotografickými snímky. Analogová data lze převést do digitální podoby skenováním.

Digitální data se získávají elektronicky, tvoří je matice hodnot, které lze zobrazit v obrazové podobě. Digitální obraz se skládá z pixelů, které na sebe navazují a nabývají určitých kódovaných hodnot (například odrazivosti nebo intenzity). Tato kódovaná hodnota udává optickou hustotu stupně šedi nebo barvu pixelu při vlastním zobrazení (Halounová, Pavelka, 2008).

Jednotlivé obrazové prvky nesou hodnoty (tzv. DN hodnoty), které představují určitou průměrnou hodnotu pro plochu reprezentovanou jedním obrazovým prvkem. Každá hodnota DN je převedena na stupeň šedi, obvykle čím je hodnota DN nižší (menší množství záření), tím je pixel obrazu tmavší. U některých obrazů může být toto zobrazení inverzní (Dobrovolný, 1998). Informace o rozložení DN hodnot v obraze lze získat pomocí histogramu (sloupcový diagram), který lze také použít pro úpravu kontrastu.

Souřadnicový systém

Nejčastěji se používá souřadnicová soustava sloupec, řádek nebo naopak, která přesně určuje polohu pixelu v obraze. Pokud známe současně také skutečnou velikost pixelu v metrech, lze lehce přejít na absolutní souřadnice (Halounová, Pavelka, 2008).

Družicové snímky jsou zpravidla v souřadnicovém systému WGS 1984 UTM (Universal Transverse Mercator), Zone 33 N (platí pro ČR).

Vizualizace digitálních obrazových dat

Obrazové záznamy jsou v současné době ve většině případů pořizovány v tzv. multispektrálním režimu (zaznamenání stejného území v několika intervalech spektra). Každý tento obrazový záznam se označuje jako pásmo (band, channel). Existují tři základní formy zobrazení obrazových dat (Dobrovolný, 1998):

- Černobílý obraz – zobrazení jednoho pásma, kolísání veličiny zobrazeno odstíny šedi.
- Pseudobarevný obraz – zobrazení jednoho pásma, intenzita záření zobrazena určitou barvou.

- Barevná syntéza – kombinace tří různých pásem (tří různých intenzit základních barev).

Nejčastější vizualizace digitálního obrazu je v barevném systému RGB (Red, Green, Blue) (obr. 7).

Obrázek 7 Zobrazení snímku v RGB, pravých barvách



Zdroj: vlastní

(snímek stažen z <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)

Vlastnosti digitálních snímků

Digitální snímky lze charakterizovat pomocí čtyř základních rozlišovacích schopností (Dobrovolný, 1998):

- Radiometrické rozlišení – počet úrovní, do kterých je obraz zaznamenán.
- Spektrální rozlišení – šířka intervalu zaznamenaných vlnových délek.
- Prostorové rozlišení – velikost jednoho pixelu.
- Časové rozlišení – frekvence vytváření snímků stejného území.

3.2.8 Družicové systémy

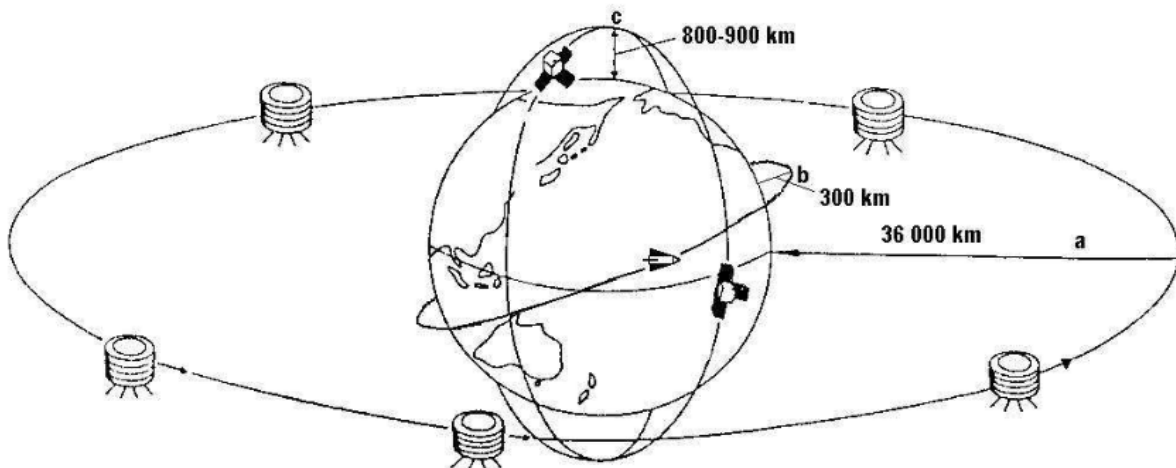
Satelitní systémy dálkového průzkumu pokrývají rozsáhlé plochy povrchu Země a také opakovaně snímají stejnou cílovou oblast (Kumhálová et al., 2014). Většina družic pořizuje obrazová i neobrazová data pomocí metod dálkového průzkumu již delší dobu. Jedná se o několik družic, které mají z hlediska kompatibility pořizovaných obrazových záznamů, z hlediska technických parametrů nosiče i z hlediska parametrů snímacího zařízení podobné

vlastnosti. Většinu dalších parametrů systému ovlivňuje oběžná dráha družice. Oběžnou dráhu lze rozdělit na tři základní typy (Dobrovolný, 1998):

1. Rovníková oběžná dráha (geostacionární) – družice ve výšce přibližně 36 000 km, doba oběhu družice je rovna době rotace Země okolo vlastní osy. Obrazy zemského povrchu s malým prostorovým rozlišením, ale s vysokou frekvencí. Využití především v meteorologii, například družice METEOSAT.
2. Šikmá oběžná dráha – svírá s rovinou rovníku úhel 30-65 stupňů, nelze snímat vyšší zeměpisné šířky. Primárně nejsou určeny pro pořizování dat.
3. Subpolární oběžná dráha – svírá s rovinou rovníku úhel 80-100 stupňů, družice ve výšce 700-1000 km. Tato dráha je také označována jako dráha synchronní se Sluncem (orientace dráhy vůči Slunci je neměnná). Doba oběhu je závislá na výšce letu, přibližně trvá dvě hodiny. Do této kategorie lze zařadit družice pro výzkum přírodních zdrojů Země, například Landsat, SPOT, IRS, TERRA nebo Sentinel 2.

Oběžné dráhy družic jsou zobrazeny na obr. 8, kde a – rovníková dráha, b – šikmá dráha, c – subpolární dráha.

Obrázek 8 Oběžné dráhy družic



Zdroj: www.google.cz

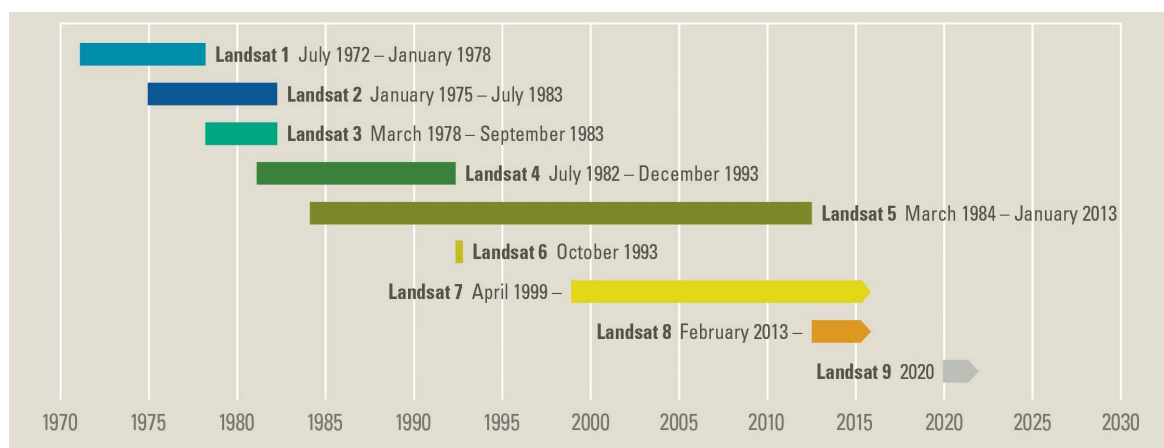
3.2.8.1 Landsat

Družicový systém Landsat představuje celosvětově nejdelsí nepřetržitou sbírku dat dálkového průzkumu Země. Vznikl společnou iniciativou mezi U. S. Geological Survey (USGS) a NASA. Snímky Landsat mohou být využívány pro různé účely, například v zemědělství,

geologii, lesnictví, vzdělávání nebo při výzkumu globálních změn. Velikost pozorované scény je přibližně 185 x 185 km (Landsat Science, 2018).

Jako první byla roku 1972 vypuštěna družice ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), později přejmenována na Landsat 1 (první družice zaměřená na poskytování dat o DPZ). Dále byly v letech 1975, 1978 a 1982 postupně vypuštěny družice Landsat 2, Landsat 3 a Landsat 4. Roku 1984 byla vypuštěna družice Landsat 5, roku 1993 poté nedosáhla oběžné dráhy další družice Landsat 6. Následovaly družice Landsat 7 roku 1999 a Landsat 8 roku 2013, které jsou stále funkční. Koncem roku 2020 je plánováno vypuštění Landsat 9 (USGS, 2017).

Obrázek 9 Časová osa misí Landsat



Zdroj: <https://landsat.usgs.gov>

Richards a Jia (2006) uvádí, že satelity Landsat používaly celkem tři různé přístroje (senzorová vybavení):

- Return Beam Vidicon (RBV) – vidikonové televizní kamery, které byly použity u družic Landsat 1-3.
- Multispektrální skener (MSS) – mechanické skenovací zařízení, které bylo použito u družic Landsat 1-5.
- Thematic mapper (TM) – mechanické skenovací zařízení s lepšími spektrálními, prostorovými a radiometrickými charakteristikami než MSS. S vypuštěním družice Landsat 7 byl přidán Enhanced Thematic Mapper + (ETM+).

Družice Landsat 8 již nese nové senzorné vybavení, a to senzory OLI (Operational Land Imager) a TIRS (Thermal Infrared Sensor). Družice Landsat 8 byla vypuštěna 11. 2. 2013 z Vanderbergské letecké základny v Kalifornii na raketě Atlas-V 401. OLI sbírá data z 9 spektrálních pásem v různých vlnových délkách viditelného, blízkého infračerveného

a krátkovlnného záření, velikost pozorované scény je přibližně 185 x 185 km. TIRS sbírá data ze dvou pásem, slouží zejména pro vědecké účely (Landsat Science, 2018).

Kumhálová a Matějková (2017) uvádí, že tradiční družicové systémy jako je Landsat byly ve velké míře využívány pro zemědělské účely na rozsáhlých geografických plochách. Mezi výhody systému Landsat zařazují jeho spektrální rozlišení (přes 7 spektrálních pásem) a volně dostupná data dálkového průzkumu na stránkách USGS. Nicméně jako nevýhody těchto satelitních snímků zmiňují jejich hrubé prostorové rozlišení (pro snímky Landsat je to 30 m) a časové rozlišení (16 dní).

Multispektrální snímek Landsat umožňuje odvození mnoha indexů, které mohou být využity pro vysvětlení variability rostlin v různých růstových fázích a následně také pro vysvětlení variability výnosu nebo pro jeho odhad (Kumhálová et al., 2014).

3.2.8.2 SPOT

SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre) je komerční systém francouzských družic, který funguje od roku 1986. Na vývoji tohoto systému se podílí Francie (francouzské výzkumné kosmické centrum CNES) ve spolupráci se Švédskem a Belgií. Velikost pozorované scény je 60 x 60 km a rozlišení od 20 m do 1,5 m (Airbus, 2018). V současné době jsou funkční družice SPOT 6 a SPOT 7.

První tři satelity (SPOT 1-3) byly totožné, nesly dva identické HRV (Visible High-Resolution) optické přístroje, přístroje pro zaznamenání dat a systém pro přenos snímků do pozemních přijímacích stanic. Družice SPOT 4 nesla dva identické optické přístroje HRVIR (Visible & Infrared High-Resolution) a také první vegetační senzor pro pozorování na globální úrovni. Družice SPOT 5 představovala ideální rovnováhu mezi vysokým rozlišením na jedné straně a pokrytím široké plochy na straně druhé. Tato družice nesla 2 HRG (High-Resolution Geometrical) přístroje, které poskytovaly vysoké rozlišení 5 a 2,5 m v panchromatickém režimu a 10 m v multispektrálním režimu. Dále nesla senzor HRS (High-Resolution Stereoscopic) a vegetační senzor, který zůstal neměnný v porovnání s družicí SPOT 4. Družice SPOT 6 a 7 nabízí vysoké rozlišení 1,5 m v panchromatickém režimu a 6 m v multispektrálním režimu, velikost pozorované scény je 60 x 60 km (Airbus, 2018).

3.2.8.3 Sentinel

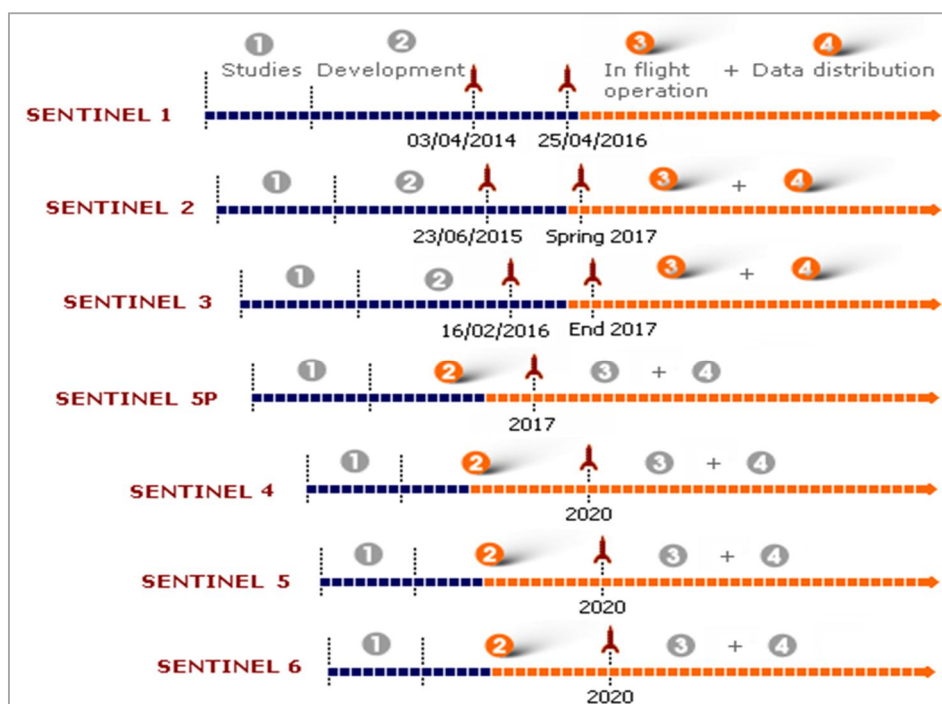
Družice Sentinel jsou vyvíjené v rámci programu Copernicus Evropské kosmické agentury (ESA). Celkem existuje 6 řad (Sentinely 1-6) (CNES, 2017). První 3 tyto řady tvoří

vždy 2 družice, které jsou označené jako A a B. Po roce 2020 se plánuje vypuštění dalších jednotek C a D, které by měly postupně nahradit dosluhující družice.

Stručná charakteristika jednotlivých misí Sentinel (Geo/Copernicus v České republice, 2016):

- Sentinel 1 – S1A vypuštěna roku 2014, S1B roku 2016, tato mise je zaměřena na sledování pevniny a moří, především na sledování oceánských vod, mořského pobřeží a polárních oblastí. Družice Sentinel 1 jsou určeny pro radarové mapování povrchu Země.
- Sentinel 2 – S2A vypuštěna roku 2015, S2B roku 2017, určeny především pro sledování krajinného pokryvu. Tyto družice nesou multispektrální senzor, jehož data jsou ideální pro monitorování vegetace (obsah chlorofylu v listech, zdravotní stav vegetace, tvorba vegetačních indexů). Šířka záběru senzoru je 290 km, data jsou sbírána ze 13 spektrálních pásem v prostorovém rozlišení 10, 20 a 60 m. Družice Sentinel 2 pořizují optická data DPZ.
- Sentinel 3 – S3A vypuštěna roku 2016, S3B roku 2017, určeny pro monitorování pevniny a oceánů.
- Sentinel 4, 5 a 5P– monitorování složení atmosféry.
- Sentinel 6 – topografie oceánů a velkých řek (CNES, 2017).

Obrázek 10 Časová osa misí Sentinel



Zdroj: <https://copernicus.cnes.fr/en>

3.3 Mapování výnosů

Mapování výnosů zemědělských plodin patří k základním prvkům v systému precizního zemědělství. Zhang et al. (2008) uvádí, že prostorová variabilita výnosu je velice důležitá pro precizní zemědělství. Výnosová data mohou být automaticky sbírána během sklizně pomocí výnosového monitoru instalovaného na sklízecí mlátičce. Výnosové monitory obsahují čidla okamžité průchodnosti materiálu, přijímače signálu polohy (nejčastěji v systému DGPS) a palubní počítače. Pro dobrou práci výnosových monitorů je třeba jejich dobrá kalibrace, dodržování pracovního záběru a konstantní pojezdové rychlosti.

3.3.1 Výnosová čidla

Pro zjištění okamžitého výnosu zrnin se používají snímače umístěné v dopravníku čistého zrna do zásobníku sklízecí mlátičky. Existují různé druhy snímačů, které pracují na různých principech. Zjišťování okamžitého výnosu je založeno na měření hmotnostního nebo objemového toku vyčištěného zrna do zásobníku sklízecí mlátičky. Pro určení okamžitého průtoku materiálu lze použít následující čidla (Kumhála, 2002):

- Mechanické – tvořeno lopatkovým kolem a dvěma senzory, je umístěné na výstupu zrnového dopravníku. Od mechanických čidel se ustupuje, protože nejsou dostatečně přesná.
- Optické – tvořeno vysílačem světelného paprsku a jeho přijímačem. Měří výšku vrstvy materiálu, který právě prochází okolo optického čidla na lopatce zrnového dopravníku. Okamžitý výnos je počítán z údajů o době přerušení světelného paprsku a rychlosti řetězu zrnového dopravníku.
- Kapacitní – principem je změna kapacity kondenzátoru, která je způsobena procházejícím zrnem mezi jeho deskami.
- Nárazové – zrno dopadá u výstupu ze zrnového dopravníku na zakřivenou nárazovou desku, jejíž poloha je snímána tenzometrickými snímači. Ze změny polohy desky lze usoudit hybnost narážejícího materiálu a následně i jeho hmotnost.
- Paprskové – měření zeslabení intenzity záření, které prochází zrnem. Čidlo tvoří vysílač radioaktivního záření umístěný v dolní části zrnového dopravníku a přijímač v horní části, který přijímá paprsky zeslabené procházejícím zrnem. Ze změny intenzity lze usoudit okamžitou hmotnost materiálu.

Mechanická a optická čidla měří objem sklizeného materiálu, zatímco čidla nárazová, kapacitní a paprsková měří jeho hmotnost. Obecně lze konstatovat, že čidla založená na měření hmotnosti jsou přesnější než čidla založená na měření objemu. Údaje získané z výnosových čidel je vhodné doplnit o údaje o okamžité vlhkosti sklizeného zrna (Kumhála, 2002).

3.3.2 Globální navigační satelitní systémy

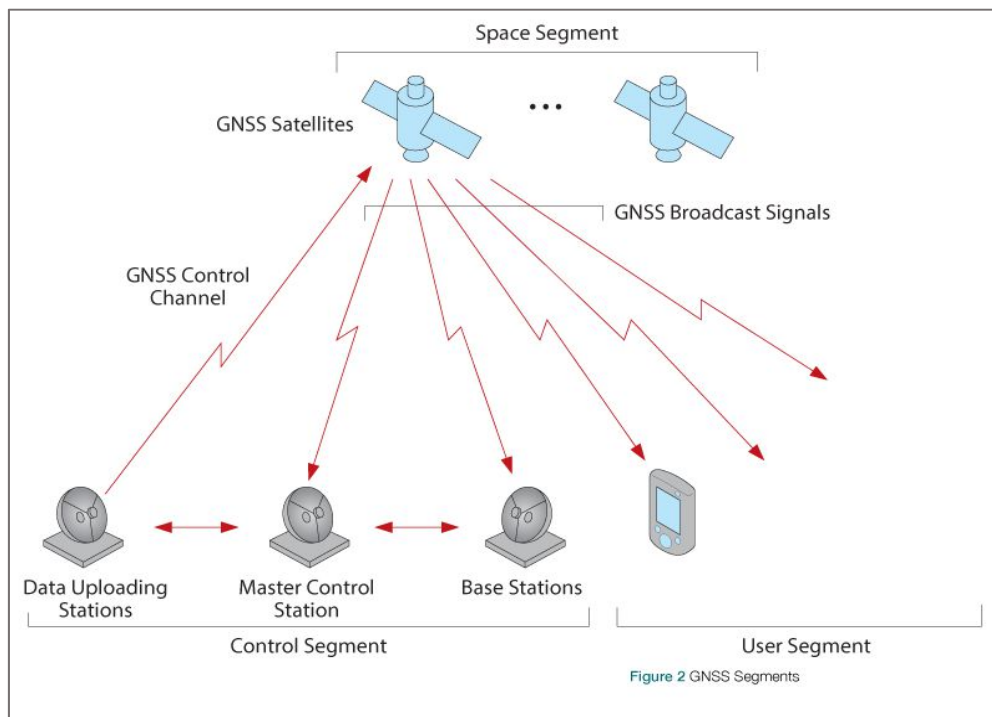
Aby bylo možné vytvořit výnosové mapy, je třeba celý systém mapování výnosů doplnit o přijímač signálu polohy obvykle v systému DGPS, který zpřesňuje signál GPS. Souhrnně lze tyto systémy pro určení polohy označit jako globální navigační satelitní systémy.

Globální navigační satelitní systém (Global Navigation Satellite System), ve zkratce GNSS, zahrnuje systémy určování polohy, které využívají umělé družice Země. Princip určování polohy spočívá ve vyhodnocování rádiových signálů vysílaných družicemi a pasivně přijímanými GNSS přijímači. Mezi tyto systémy lze zařadit americký navigační systém GPS a ruský navigační systém GLONASS. V rámci Evropské unie je vyvíjen systém Galileo.

Systém GNSS je složen ze tří hlavních částí:

- Vesmírná část – satelity obíhající kolem Země,
- pozemní část – síť základen, které řídí a sledují funkci satelitů,
- uživatelská část – přijímače využívající služby GNSS.

Obrázek 11 GNSS



Zdroj: www.novatel.com

GPS

Globální polohový systém (Global Positioning System), ve zkratce GPS, je vojenský globální družicový polohový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických. Tento systém umožňuje určení geografické polohy přijímače, který se nachází kdekoli na Zemi s přesností na jednotky metrů. Jedná se o jediný navigační systém, se kterým je možné běžně se setkat (mobilní telefony, automobily). Principem GPS je vysílání signálu navigačními družicemi, příjem signálu a následné zpracování pomocí přijímačů GPS. Družice nepřetržitě vysílají informace o své poloze, které na Zemi přijme a dekoduje GPS přijímač a zobrazí přesnou polohu (Kavka et al, 1998).

Využití GPS v precizním zemědělství vyžaduje však větší přesnost určení polohy v řádu jednotek centimetrů. Velmi vysoká přesnost je vyžadována například při automatickém řízení zemědělských strojů. Zpřesnění výsledků GPS je možné pomocí diferenční GPS (DGPS) nebo RTK GPS (Real Time Kinematic).

DGPS

DGPS zpřesňuje výsledky měření systému GPS pomocí referenční stanice, která vyhodnocuje odchylky měření v systému GPS od skutečného stavu své polohy a vypočítává korekce. Referenční stanice je GPS přijímač, který je umístěný na přesně zaměřeném místě a pomocí GPS sleduje svoji polohu. Tato poloha je známá, referenční stanice tedy zjišťuje aktuální velikost chyby, která bývá způsobená především atmosférou. Z této změřené chyby lze vypočítat korekce pro jednotlivé satelity a odeslat je do přijímače, který tyto korekce zahrne do výpočtu. Vzdálenost referenční stanice a přijímače by měla být maximálně několik set kilometrů a umístění zhruba ve stejné nadmořské výšce, aby korekce co nejvíce ovlivnily zvýšení přesnosti určení polohy. Korekce může šířit jedna referenční stanice do více DGPS přijímačů. Přesnost určení polohy pomocí DGPS se pohybuje mezi 0,3-1 m (Neudert et al., 2015).

RTK GPS

RTK GPS, také nazývané fázové GPS, dokáže mnohem přesněji vyhodnotit přijímané signály. Jde o nejpřesnější metodu měření pomocí GNSS. Godwin (2015) uvádí, že systém GPS se stal „využitelný“ v roce 1991 pomocí RTK s přesností na 2-3 cm. Tyto systémy potřebují k provozu RTK korekce nebo fázová data, které je možné vygenerovat pomocí referenční stanice. Tato stanice musí být na přesně zaměřeném místě ve vzdálenosti do 20 km od místa

měření (Neudert et al., 2015). Korekční data určená pro fázové přijímače nelze použít pro diferenční měření a naopak.

Zdroje korekcí DGPS a RTK

Pro přesné určení polohy je důležité použití správných korekčních dat. Korekční data je možné získat pomocí systémů, které pro tvorbu korekcí využívají síť přijímačů rozmístěných po celém území, které pokrývají. Mezi tyto systémy patří:

- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) - evropský projekt, který formou diferenciálního signálu poskytuje korekce k signálu GPS,
- OmniSTAR VBS, XP, HP – poskytuje DGPS i RTK korekce, tři stupně přesnosti,
- StarFire I, II – DGPS i RTK korekce,
- CZEPOS – DGPS i RTK korekce na území ČR, provozuje Zeměměřický úřad jako součást geodetických základů České republiky.

3.4 Zpracování dat

Data pořízená pomocí družicových systémů dálkového průzkumu Země i data zjištěná víceletou analýzou výnosu lze zpracovat pomocí geografického informačního systému, tedy software pro zpracování geografických dat. Lze využít software ArcGIS nebo volně dostupnou variantu QGIS. Pro zpracování obrazových dat lze využít i volně dostupný software SNAP, ze kterého lze exportovat data do GIS SW (libovolný software umožňující zpracování prostorových dat v oblasti geografických informačních systémů).

3.4.1 Geografický informační systém

Geografický informační systém je pojem běžně používaný pro označení počítačových systémů orientovaných na zpracování geografických dat (Smutný, 2007). Tento pojem nemá jednoznačnou definici, lze jej chápat jako programové vybavení, konkrétní aplikaci nebo vědeckou či technickou disciplínu. Jednu z definic uvádí například Burrough (1986): „GIS je funkční celek vytvořený integrací technických a programových prostředků, dat, pracovních postupů, obsluhy, uživatelů a organizačního kontextu, zaměřený na sběr, ukládání, správu, analýzu, syntézu a prezentaci prostorových dat pro potřeby popisu, analýzy, modelování a simulace okolního světa s cílem získat nové informace potřebné pro racionální správu a využívání tohoto světa.“ Jinou definici uvádí Streit (1997): „GIS je na počítačích založený informační systém pro získávání, obhospodařování, analýzu, modelování a vizualizaci geoinformací. Geo data, která využívá, popisují geometrii, topologii, tematiku (atributy)

a dynamiku (změny v čase) geoobjektů.“ Informační systém lze chápat jako soubor hardware, software (a lidí) určený ke sběru, analýze a spojování informací. Pojmem geoobjekt se rozumí fyzický nebo abstraktní objekt, který je určený svou geografickou polohou a atributy. Pro pojem geoobjekt jsou důležité ještě další dva pojmy, a to geometrie a topologie. Geometrie vyjadřuje prostorový popis objektu, tedy jeho polohu, tvar a velikost, zatímco topologie popisuje logické vazby mezi jednotlivými objekty (Hrubý, 2006).

GIS pracuje s údaji vztahujícími se k Zemi, pro které je dána nějaká lokalizace v prostoru. Pomocí nástrojů GIS se modeluje rozložení, funkce a vazby mezi jednotlivými objekty. V precizním zemědělství slouží GIS především pro tvorbu map, zpracování prostorově vztažených dat a vytváření databází.

Data v GIS

Data v GIS lze rozdělit na prostorová (daná pomocí souřadnic) a neprostorová (popisující ostatní vlastnosti objektu). Definicí prostorových dat uvádí Smutný (2007): „Prostorová data jsou jakákoliv data, která obsahují formální polohovou referenci, např. odkaz na buňku rastru. Jedná se např. o data DPZ nebo mapy.“ V případě, že data neobsahují žádné údaje o lokalizaci v prostoru, jsou nazývána jako neprostorová.

Datové modely

Datový model v systému GIS představuje zjednodušený pohled na část reálného světa a je budován dle určitých pravidel. Datové modelování je proces abstrakce, kterým jsou podstatné elementy reálného světa zdůrazněny a nepodstatné eliminovány (Smutný, 2007).

Existují dva základní typy datových modelů, a to vektorové modely a rastrové modely. Vektorové modely jsou charakterizovány třemi základními geometrickými prvky:

1. Bod – definován souřadnicemi v prostoru (dimenze 0), místa výskytu nějakého jevu, umístění malých objektů, měřicí body (pomocí interpolace lze převést na rastrovou mapu).
2. Linie – lomená čára mezi dvěma koncovými body (dimenze 1), vodovodní sítě, silniční sítě, řeky.
3. Polygon – uzavřená linie tvořící ohraničení, plocha (dimenze 2), katastrální pozemky, vodní plochy, územní výskyt daného jevu.

Rastrové modely (nazývané také mozaikové) překrývají povrch pravidelnou nebo nepravidelnou sítí bodů a definují hodnoty sledovaných jevů v konkrétních polohách prostoru. Každá buňka rastru nese atributovou hodnotu sledovaného jevu v daném prostoru (typicky

číslnou hodnotu). Užití rastrů je typické u fyzikálních veličin (teplota, osvětlení), nadmořské výšky nebo obrazů z DPZ, nepravidelnou síť lze využít při modelování terénu.

Pro tvarování zemského povrchu lze využít digitální modely terénu. Hrubý (2006) rozlišuje dva pojmy, a to:

1. DEM (Digital Elevation Model) – digitální výškový model, který pro každý bod konkrétního území udává jeho nadmořskou výšku, obvykle bývá reprezentován rastrovou mapovou vrstvou,
2. DTM (Digital Terrain Model) – model, který udává představu o tvaru povrchu konkrétního území (reliéf terénu), může být reprezentován rastrovými i vektorovými mapami.

LPIS

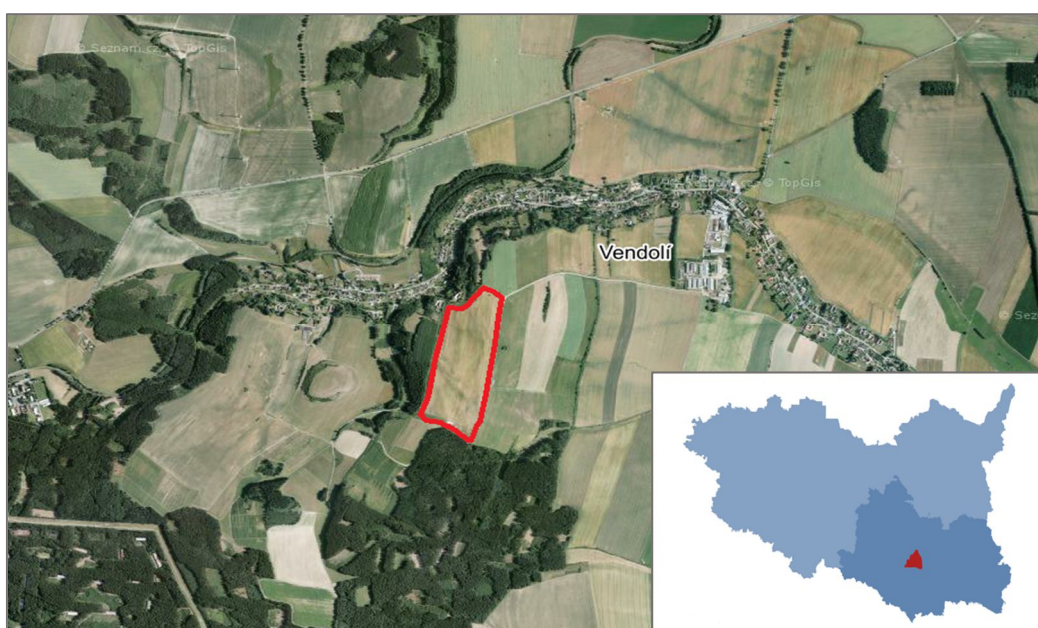
Prostřednictvím GIS je realizován LPIS (Land Parcel Identification System), jehož hlavním účelem je jednoznačná identifikace zemědělských pozemků. Primárně je tvořen evidencí využití půdy. Správcem LPIS v České republice je Ministerstvo zemědělství a aktualizaci dat provádí Státní zemědělský intervenční fond (SZIF, 2013).

4 POPIS LOKALITY

Pro praktickou část diplomové práce bylo zvoleno konkrétní území, které se nachází v katastrálním území obce Vendolí nedaleko města Svitavy v Pardubickém kraji. Jedná se o zemědělský pozemek o výměře 24,69 ha, na kterém hospodaří Zemědělské družstvo Vendolí. Pozemek je využíván jako standardní orná půda při konvenčním hospodaření.

Popisovaná lokalita je zobrazena na obr. 12, kde je v pravém dolním rohu červeně zobrazeno katastrální území obce Vendolí v rámci Pardubického kraje, dále je zde červeně ohraničený zvolený studijní pozemek v rámci obce Vendolí.

Obrázek 12 Katastrální území obce Vendolí a sledovaný pozemek



Zdroje: www.mapy.cz, www.kurzy.cz

4.1 Základní geografické informace

- Výměra: 24,69 ha
- Průměrná nadmořská výška: 562,86 m
- Průměrná sklonitost: 3,54 °
- Obvod: 2283,72 m

4.2 Půdní a klimatické podmínky

Půdní a klimatické podmínky jsou hodnoceny na základě BPEJ – bonitovaná půdně ekologická jednotka, která je vyjádřena pětimístným kódem. Zvolený pozemek je charakterizován kódem 7.25.14 na výměře 5,83 ha a kódem 7.30.14 na 18,86 ha.

7.25.14 (5,83 ha)

- 7 – klimatický region: mírně teplý, vlhký.
- 25 – hlavní půdní jednotka: kambizemě, půdotvorný substrát: opuky, pískovec.
- 1 – sklonitost a expozice: mírný sklon/rovina se všesměrnou expozicí.
- 4 – skeletovitost a hloubka půdy: středně skeletovitá/půda hluboká, půda středně hluboká.

7.30.14 (18,86 ha)

- 7 – klimatický region: mírně teplý, vlhký.
- 30 – hlavní půdní jednotka: kambizemě, půdotvorný substrát: permokarbonské horniny.
- 1 – sklonitost a expozice: mírný sklon/rovina se všesměrnou expozicí.
- 4 – skeletovitost a hloubka půdy: středně skeletovitá/půda hluboká, půda středně hluboká.

Obecně se tedy jedná o kambizemě převážně na mírných svazích, se všesměrnou expozicí a celkovým obsahem skeletu 25-50 %. Půdy jsou hluboké až středně hluboké v mírně teplém, vlhkém klimatickém regionu a produkčně málo významné (eKatalog BPEJ, 2017). Kambizemě jsou nejrozšířenějším půdním typem v ČR, využívají se jak k zemědělským, tak lesnickým účelům (Šarapatka, 1996). Charakteristika klimatického regionu 7 je uvedena v tab. 3.

Tabulka 3 Charakteristika klimatického regionu 7

Charakteristika regionu	Rozsah hodnot
Suma teplot nad 10 °C	2200-2400
Průměrná roční teplota °C	6-7
Průměrný úhrn srážek (mm)	650-750
Pravděpodobnost suchých vegetačních období v %	5-15
Vláhová jistota ve vegetačním období	nad 10

Zdroj: <https://bpej.vumop.cz>

V tab. 4 jsou dále uvedeny meteorologické faktory pro všechny 3 sledované sezony. Data jsou rozdělena vzhledem k vývojovým fázím jednotlivých plodin. Byla zvolena nejběžnější metoda určování fenofází plodin – BBCH (Meier, 1997). V tabulce jsou uvedeny záznamy srážek a průměrné teploty za dané období. Meteostanice je umístěna ve vzdálenosti do 100 m od hrany pozemku.

Tabulka 4 Meteorologické faktory během sledovaných sezon

	Srážky (mm)			Teplota (°C)		
	Lokalita: Vendolí					
	2014	2015	2016	2014	2015	2016
BBCH 0-19	37.0	30.4	69.0	8.8	5.5	12.1
BBCH 20-29	97.8	7.6	191.0	2.8	9.7	3.0
BBCH 30-59	127.2	35.8	44.2	9.6	13.0	6.7
After BBCH 60	201.8	132.6	177.5	17.1	18.6	15.9
Sum	463.8	206.4	481.7	-	-	-
Mean	115.9	51.6	120.4	9.6	11.7	9.4

Zdroj: vlastní

4.3 Zemědělské družstvo Vendolí

Zemědělské družstvo Vendolí bylo založeno dne 16. ledna 1993 (původní JZD Vendolí v roce 1952). V současné době družstvo obhospodařuje zemědělskou půdu o celkové výměře 1168 ha, z toho 1060 ha tvoří orná půda a 108 ha trvalé travní porosty.

Družstvo je orientováno jak na rostlinnou, tak i živočišnou produkci. V rostlinné výrobě převažuje pěstování obilovin, především se jedná o pšenici ozimou a ječmen jarní, a také řepky ozimé, k zajištění objemných krmiv pro živočišnou výrobu se pěstují i krmné plodiny (kukuřice na siláž, jetel). Dále se družstvo v menší míře zabývá množением osiv trav (jetel luční, hořčice, peluška). V živočišné výrobě se jedná výhradně o chov skotu s produkcí mléka.

4.4 Osevní postup

Na studijním pozemku dochází od roku 2014 ke střídání tří plodin – pšenice ozimá, ječmen jarní a řepka ozimá. Výnosová data jsou využita z let 2014, 2015 a 2016.

- 2014 – pšenice ozimá.
- 2015 – ječmen jarní.
- 2016 – řepka ozimá.

5 METODIKA

5.1 Zdroje výnosových a družicových dat

2014 – Pšenice ozimá

- Výnos – sklizeno dne 1. 8. 2014.
- Družicový snímek Landsat 8 pořízený dne 7. 7. 2014 (staženo z <https://earthexplorer.usgs.gov/>).
- Snímek byl upraven pomocí atmosférické korekce FLAASH.
- Landsat 8 sbírá data celkem z 11 pásem, prostorové rozlišení je 30 m v multispektrálním režimu a 15 m v panchromatickém režimu (tab. 5). V pásmech 10 a 11 jsou data sbírána ve 100 m.

Tabulka 5 Spektrální a prostorové rozlišení Landsat 8

Pásmo	Rozsah (μm)	Prostorové rozlišení (m)
Coastal	0,43-0,45	30
Blue	0,45-0,51	30
Green	0,53-0,59	30
Red	0,63-0,67	30
NIR	0,85-0,88	30
SWIR 1	1,57-1,65	30
SWIR 2	2,11-2,29	30
Pan	0,50-0,68	15
Cirrus	1,36-1,38	30
TIRS 1	10,6-11,19	100
TIRS 2	11,5-12,51	100

Zdroj: <https://www.satimagingcorp.com>

2015 – Ječmen jarní

- Výnos – sklizeno dne 26. 8. 2015.
- Družicový snímek SPOT – komerční snímek zakoupený od firmy ArcDATA, pořízený 4.7.2015.
- Snímek byl upraven pomocí atmosférické korekce FLAASH.
- SPOT sbírá data celkem z 5 pásem, prostorové rozlišení je 6 m v multispektrálním režimu a 1,5 m v panchromatickém režimu (tab. 6).

Tabulka 6 Spektrální a prostorové rozlišení SPOT

Pásmo	Rozsah (µm)	Prostorové rozlišení (m)
Blue	0,455-0,525	6
Green	0,530-0,590	6
Red	0,625-0,695	6
NIR	0,760-0,890	6
Pan	0,450-0,745	1,5

Zdroj: <https://www.satimagingcorp.com>

2016 – Řepka ozimá

- Výnos – sklizeno dne 4.8.2016.
- Družicový snímek Sentinel 2A pořízený dne 5. 6. 2016 (staženo z <https://sci-hub.copernicus.eu/dhus/#/home>).
- Snímek byl upraven pomocí atmosférické korekce SEN2COR.
- Sentinel 2A sbírá data celkem ze 13 pásem, prostorové rozlišení je 10, 20 a 60 m (tab. 7).

Tabulka 7 Spektrální a prostorové rozlišení Sentinel 2A

Pásmo	Rozsah (µm)	Prostorové rozlišení (m)
Blue	0,4575-0,5225	10
Green	0,5425-0,5775	10
Red	0,65-0,68	10
NIR	0,7845-0,8995	10
Red Edge	0,6978-0,7125	20
NIR	0,7325-0,7475	20
NIR	0,773-0,793	20
NIR	0,855-0,875	20
SWIR	1,565-1,655	20
SWIR	2,1-2,28	20
Coastal	0,433-0,453	60
NIR	0,935-0,955	60
NIR	1,365-1,395	60

Zdroj: www.gisat.cz

5.2 Zpracování dat

Výpočet výnosového potenciálu pomocí spektrálního indexu NDVI

Ke každému zkoumanému roku byl vybrán poslední vhodný bezoblačný snímek ve vegetačním období zemědělské plodiny. U každého snímku byl vypočítán spektrální index NDVI při převzorkování na jednotné prostorové rozlišení 30 m. Poté byla použita rastrová analýza k výpočtu popisné statistiky (v SW ArcGIS nástroj Zonal Statistics). Pomocí tohoto nástroje byla zjištěna průměrná hodnota půdního bloku, která byla poté použita při přepočtu absolutních hodnot indexu na hodnoty relativní podle vzorce:

$$NDVI_p = \frac{NDVI_{pixel}}{average\ NDVI_{DPB}} \times 100 \quad (6)$$

kde $NDVI_p$ – NDVI potenciál, $NDVI_{pixel}$ – hodnota NDVI v daném pixelu, průměrný NDVI DPB – průměrný NDVI dílčího půdního bloku.

Pomocí nástroje „Raster to Points“ byl převeden rastrový formát na formát vektorový bodový, přičemž body s danými hodnotami spektrálního indexu byly poté použity ve výpočtu interpolace území pomocí metody kriging. Tyto výstupy byly opět převedeny na rastr a pomocí nástroje „cell statistics“ při dosazení maximálních hodnot byla vytvořena průměrná mapa NDVI za všechny tři sledované roky. Tři základní zóny byly určeny dle geometrického intervalu.

Výpočet výnosového potenciálu pomocí výnosových map

Absolutní hodnoty výnosu u každé ze zkoumaných výnosových map byly přepočteny na hodnoty relativní podle vzorce:

$$Výnos_p = \frac{Výnos_{pixel}}{průměrný\ Výnos_{DPB}} \times 100 \quad (7)$$

kde výnos p = výnosový potenciál, výnos pixel – hodnota výnosu v daném pixelu, průměrný výnos DPB – průměrný výnos dílčího půdního bloku.

Z relativních hodnot výnosu byla vytvořena krigingová mapa, která byla následně převedena do rastrového formátu. Pomocí nástroje „cell statistics“ při dosazení maximálních hodnot byla vytvořena průměrná mapa výnosu za všechny tři sledované roky. Tři základní zóny byly určeny dle geometrického intervalu při použití nástroje fokální statistiky pro shlazení výstupních hodnot (dle Kumhálová et al., 2011).

Jelikož se dle pozemkové reformy probíhající během sledovaných let měnila hranice sledovaného pozemku, byla použita hranice pole z roku 2016 jako konečná po pozemkové reformě.

Popis použitých nástrojů (Esri, 2017):

- Raster to point – převedení rastrového datového formátu na bodový vektorový formát při zachování hodnot výnosu či NDVI. Body jsou umístěny ve středech buněk, které reprezentují.
- Cell statistics – umožňuje výpočet statistiky v rámci buňky z více rastrů. Lze vypočítat následující statistické hodnoty:
 - Mean – průměr vstupů.
 - Majority – nejčastější hodnota vstupů.
 - Maximum – nejvyšší hodnota vstupů.
 - Median – medián vstupů.
 - Minimum – nejnižší hodnota vstupů.
 - Minority – nejméně častá hodnota vstupů.
 - Range – rozsah, rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou vstupů.
 - Standard deviation – směrodatná odchylka vstupů (míra rozptýlení hodnot okolo průměru).
 - Sum – celková hodnota vstupů.
 - Variety – počet různých hodnot vstupů.
- Zonal statistics – umožňuje výpočet statistiky hodnot rastru v rámci zón jiné datové sady. Lze vypočítat následující hodnoty:
 - Mean – průměr všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Majority – hodnota, která se vyskytuje nejčastěji u všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Maximum – nejvyšší hodnota všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Median – hodnota mediánu všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Minimum – nejnižší hodnota všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.

- Minority – hodnota, která se vyskytuje nejméně často u všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Range – rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Standard deviation – směrodatná odchylka všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Sum – výpočet celkové hodnoty všech buněk v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
 - Variety – počet různých hodnot pro všechny buňky v rastru hodnot, které náleží do stejné zóny jako výstupní buňka.
- Focal statistics – umožňuje výpočet statistiky hodnot v rámci definovaného okolí dané buňky. Lze vypočítat následující hodnoty:
 - Mean – průměrná hodnota buněk v definovaném okolí.
 - Majority – nejčastější hodnota buněk v definovaném okolí.
 - Maximum – nejvyšší hodnota buněk v definovaném okolí.
 - Median – medián buněk v definovaném okolí.
 - Minimum – nejnižší hodnota buněk v definovaném okolí.
 - Minority – nejméně častá hodnota buněk v definovaném okolí.
 - Range – rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou buněk v definovaném okolí.
 - Standard deviation – směrodatná odchylka buněk v definovaném okolí.
 - Sum – celková hodnota buněk v definovaném okolí.
 - Variety – počet různých hodnot buněk v definovaném okolí.

6 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ DAT A DISKUZE

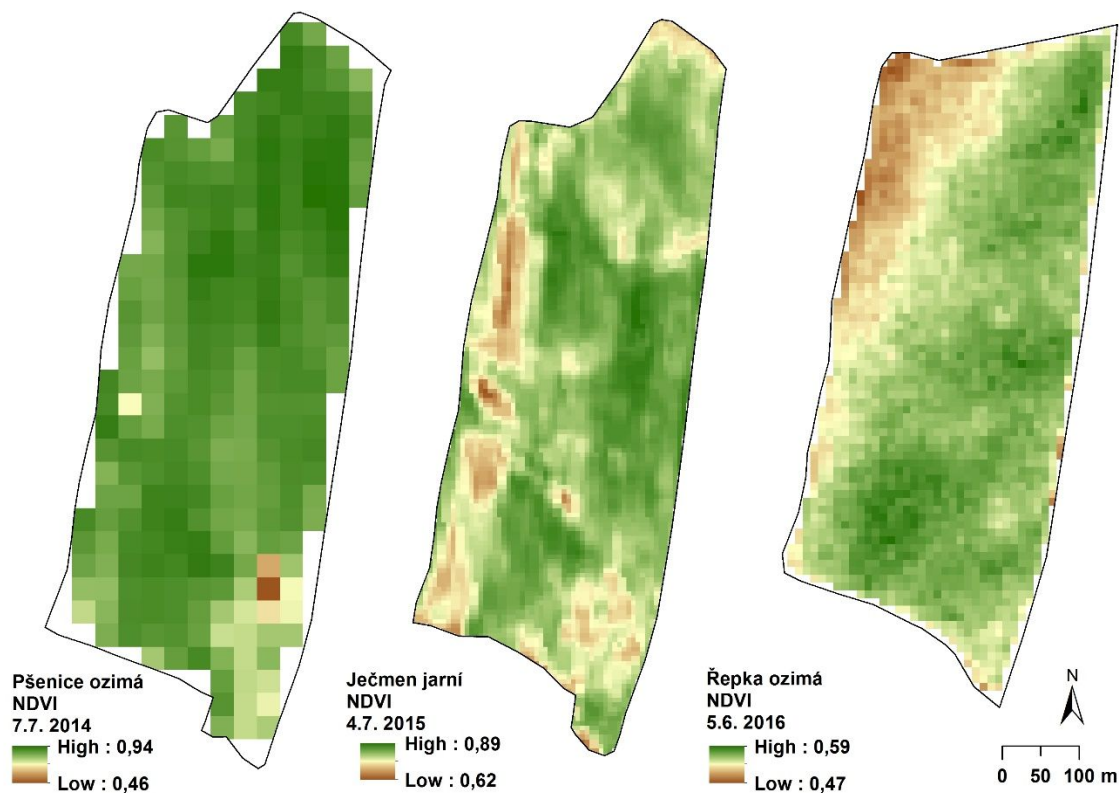
Na obr. 13 a 14 jsou zobrazeny mapy indexu NDVI v absolutní a relativní podobě. V levé části obou obrázků je uvedena mapa indexu NDVI pro ozimou pšenici v sezoně 2014. Data mají největší prostorové rozlišení. Jeden pixel představuje 30x30 m, což je nevýhoda dat z družice Landsat. Nicméně z obou obrázků je patrný fyziologický stav pozemku k datu 7.7. V tomto termínu jsou již u pšenice ozimé vyvinuty všechny klasy a pšenice začíná dozrávat. Rozhodující výnosotvorné prvky jsou již dány vývojem porostu. Obsah chlorofylu v rostlinách je stále vysoký, což odpovídá i vysokým hodnotám indexu NDVI. To mělo za následek pomalejší dozrávání porostu, což bylo způsobeno vysokým úhrnem srážek v období po BBCH 60 (viz tab. 4). Vysoké hodnoty indexu NDVI jsou ovlivněny i zásobeností vodou. Rostliny pšenice vykazují velmi malý vodní stres. I přes faktický dostatek srážek v období po BBCH 60 data vykazují poměrně vysokou variabilitu. Nejvyšší dosažená hodnota NDVI u jednoho pixelu dosáhla hodnoty 0,94, nejnižší pak jen 0,46. Nejnižší hodnoty jsou patrné v jižním cípu pozemku. Tato část pozemku je pravděpodobně ovlivněna několika vlivy. Půda je v této části více ovlivněna povrchovým odtokem, kdy dochází k akumulaci povrchového odtoku v této části pozemku. Paradoxně tak větší množství srážek přispělo k přílišné hodnotě půdní vlhkosti v závěrečných růstových fázích pozemku, což mělo za následek i pokles hodnot NDVI. Vlivem přílišné zásobenosti vodou se mění i odrazivost rostlin, což má vliv na fyziologický stav porostu. Z dat lze vysledovat, že nejvyrovnanější porost se nachází ve střední části pozemku, kde lze očekávat největší výnosový potenciál. Rovněž z okrajových pixelů je patrný vliv technogenního zhutnění na okrajích pozemku. Zejména obě souvratě jsou viditelně ovlivněny otáčením jednotlivých strojních souprav a bylo by vhodné uvažovat o případných nápravných opatřeních (např. hloubkové kypření).

Prostřední část obou obrázků pak zobrazuje hodnoty a prostorové rozložení pro porost jarního ječmene ze sezony 2015. V této sezoně byly použita data s vysokým prostorovým rozlišením, což dává detailnější informace o jednotlivých částech pozemku. Snímkování bylo datováno k 4. 7. 2015. Opět platí, že porost byl v relativně pozdní vegetační fázi a všechny výnosotvorné prvky již byly plně vyvinuty. Podle hodnot indexu NDVI lze opětovně usuzovat dobrou zásobenost porostu vodou, což odpovídá i záznamům meteorologických ukazatelů. Ječmen je vůči případným přísuškům citlivější než ozimá pšenice, ale to nebylo v rámci hodnocení nikterak podchyceno. Naopak porost vykazuje vyrovnanější strukturu než ozimá pšenice v předcházející sezoně. I přes vysoké hodnoty indexu NDVI ve sledovaném období je z detailního snímku patrný horší stav porostu v předsklizňovém období. To bylo pravděpodobně

způsobeno velmi suchým průběhem jara s vysokými teplotami s následným vodním stresem během hlavních růstových fází (BBCH 0-60). Opět je patrný i vliv topografie a agrotechnických parametrů sledovaného pozemku. Nejvitálnější části porostu lze pozorovat ve stejných částech jako u předcházející sezony. I během sezony 2015 lze dobře pozorovat technogenní zhutnění na souvratích pozemku a jeho vliv na stav porostu.

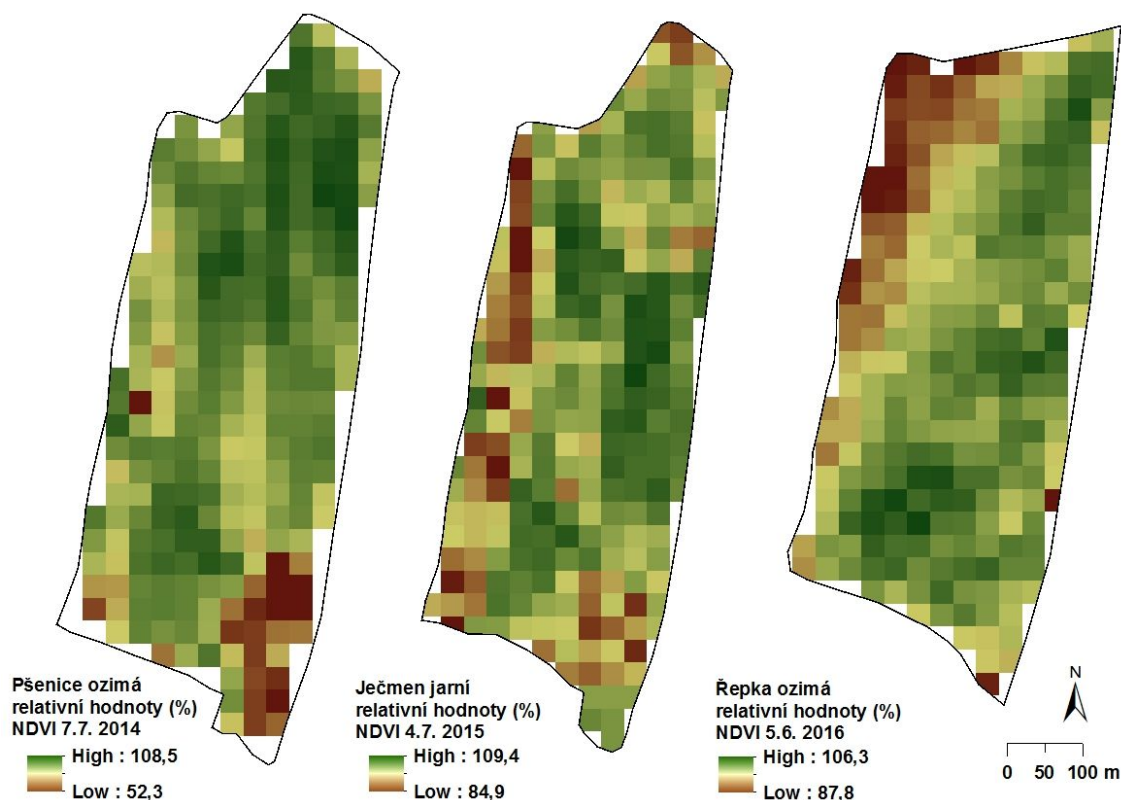
Poslední hodnocenou plodinou v rámci této práce byla ozimá řepka v sezoně 2016. Hodnocený snímek z družice Sentinel byl datován k 5. 6. 2016. Jeho prostorové rozlišení je 10 x 10 m. Hodnoty indexu NDVI mají sice poměrně malou variabilitu – nejvyšší zaznamenaná hodnota činila 0,59, nejnižší pak 0,47, nicméně hodnoty jsou poměrně nízké. Index NDVI v tomto případě je ovlivněn řepkovým porostem, kdy dochází během vegetace ke změně barvy porostu, což zásadně ovlivňuje odrazivost rostlin. Kvetení porostu je rovněž často ovlivněno topografií terénu a dalšími vlivy (teplota půdy, vlhkostní podmínky). Ukončení fáze kvetení tak není konstantní v celém porostu. Po odkvětu má řepka světlou barvu vlivem vývinu šesulí a její větvení taktéž mění odrazivost porostu a lom světla. Obecně platí, že vegetační indexy jsou dlouhodobě využívány zejména u lipnicovitých rostlin.

Obrázek 13 Hodnoty NDVI na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016



Zdroj: vlastní

Obrázek 14 Relativní hodnoty NDVI na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016



Zdroj: vlastní

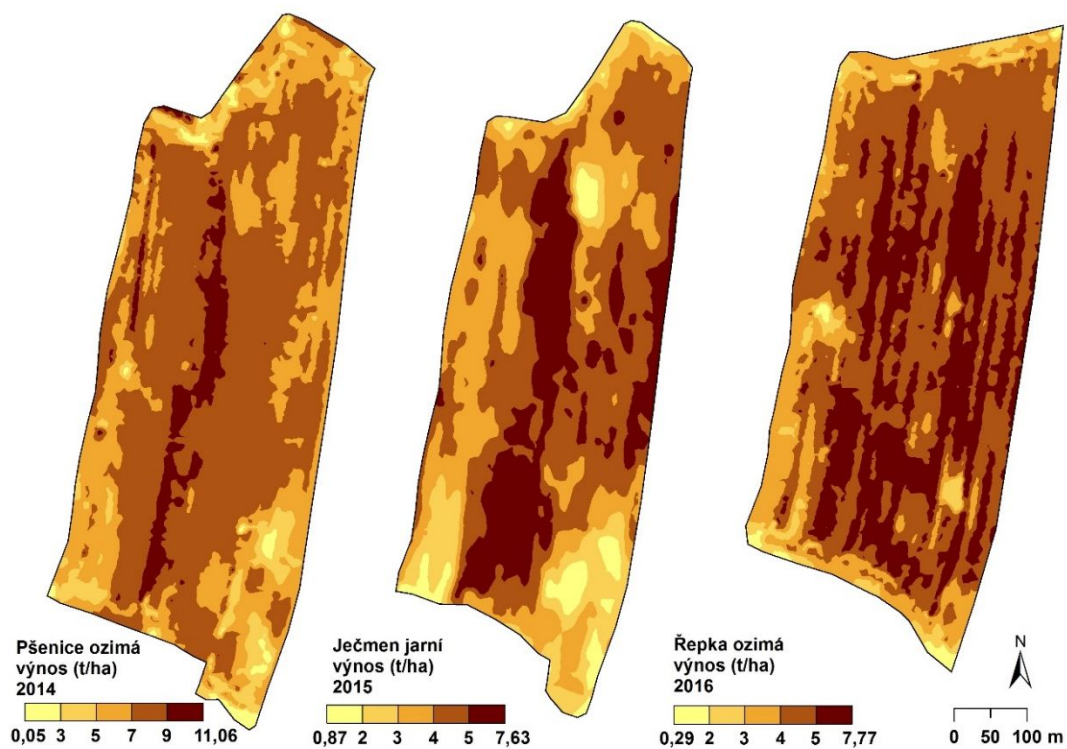
Na obr. 15 a 16 jsou zobrazeny výnosové mapy všech sledovaných plodin, a to opětovně v absolutní i relativní formě. V levé části obrázků je opětovně uvedena situace u ozimé pšenice ze sezony 2014. Pšenice byla charakterizována výborným stavem porostu během hodnocení s využitím indexu NDVI. To bylo potvrzeno i měřením výnosu. Průměrný výnos 6,9 t/ha lze považovat s ohledem na lokalitu za velmi dobrý výsledek. Vyrovnanost porostu byla i z výnosového pohledu dobrá. Potvrdil se předpoklad, kdy nejvyšší výnos byl zaznamenán na střední části pozemku. Výnosová mapa je samozřejmě ovlivněna i směrem pohybu sklízecí mlátičky po pozemku. Nicméně trend z měření je dobře patrný, výnos na střední části pozemku výrazně převyšoval okrajové části. Není ani příliš patrný vliv topografie pozemku. Naopak je potvrzeno tvrzení o negativním vlivu technogenního zhutnění souvrátí, což se odrazilo i na výnosu pšenice. Ve výnosové mapě lze vysledovat i lokální poškození pozemku. Zejména se jedná o poškozené meliorační vedení v jihovýchodní části pozemku. Přesto na pozemku nelze nalézt výraznější problém s agrotechnikou během celé sledované sezony 2014.

V následujícím roce byl na pozemku pěstován jarní ječmen. Variabilita výnosu byla větší než v předcházející sezoně. To bylo pravděpodobně způsobeno suchým obdobím během hlavních vegetačních období (BBCH 0-60). Ve výnosové mapě 2015 lze dobře pozorovat

topografické vlivy. Je možné vidět směry povrchového odtoku i akumulaci vody na pozemku, což se v suchém období odrazilo na fyziologickém stavu porostu. Průměrný výnos činil 4,04 t/ha což je spíše podprůměrný výsledek. Výnosově nejhodnotnější je opětovně středová část pozemku. Potvrdily se tak závěry ze sledování pozemku s využitím indexu NDVI. I na výnosové mapě jsou patrné vlivy technogenního zhutnění souvratí, ale tento jev bývá viditelný na většině pozemků. Během hodnocení sezony 2015 se rovněž potvrdil fakt, že největší ovlivnění porostu nepředstavují agrotechnické metody, ale průběh počasí a zejména vliv srážkové činnosti. Rovněž je třeba zdůraznit fakt, že jarní ječmen je z hlediska přísušku jedna z nejcitlivějších plodin vzhledem k povaze jeho kořenového systému.

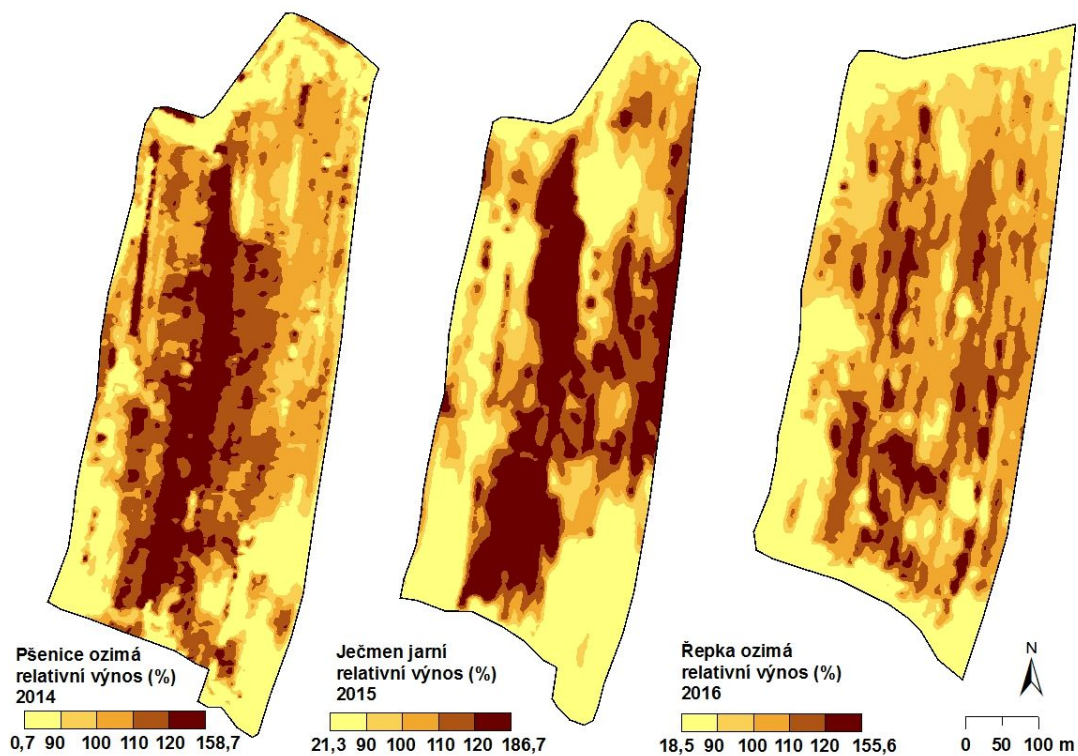
Pravá část obou obrázků je věnována ozimé řepce ze sezony 2016. Charakter výnosové mapy je výrazně odlišný od dvou předcházejících sezon. Vnitřní část pozemku vykazuje výnosovou vyrovnanost, i když nejcennější lokality kopírují trend z obou lokalit. Průměrný výnos činil bezmála 4,5 t/ha, což představuje velmi dobrý výsledek. Porost řepky byl výnosově nejslabší na obvodu pozemku, zejména pak na souvratích. Zde je možné nalézt několik příčin. Opět je možné vysledovat vliv technogenního zhutnění souvratí. Následkem byl pravděpodobně slabší porost s nižším počtem přezimujících jedinců. Pokles výnosu je však patrný i po celém západním okraji pozemku. Vzhledem k tomu, že jde o návětrnou stranu pozemku, lze pozorovat vliv škůdců. V tomto případě se jedná o napadení krajních rostlin bejlmorkou, která nalétávala ze sousedních kultur. Rostliny řepky tak vykazovaly velký počet napadených šesulí zejména v sekundárním a terciálním větvení rostlin, kvůli čemuž došlo k výraznému poklesu výnosu. Ani použití kontaktních herbicidů (systémové nelze z důvodů ochrany včelstev použít) nemůže vzhledem k nalétávání škůdců plně zabránit poškození porostu. Celková vyrovnanost porostu řepky však byla výrazně větší než u porostu obilovin. Zde by pro hodnocení bylo výhodnější použít parametr nadzemní biomasy před výnosem semen. Tento parametr není tolik zatížen vlivem škůdců a chorob. Rostliny řepky vzhledem ke kúlovému kořenovému systému vykazovali vyšší odolnost topografickým vlivům i průběhu srážek. Rovněž platí, že nelze najít výraznou souvislost mezi indexem NDVI ve sledovaném období a výnosem řepky. Porost řepky není tolik citlivý na krátkodobé přísušky vzhledem ke schopnosti využívat půdní vlhkost z větších hloubek než mělce kořenicí obiloviny. Rovněž základní vegetační indexy, které jsou založeny na „zelenosti“ (obsah chlorofylu) příliš nezohledňují rozdílný vývoj plodin s viditelným květenstvím a častou změnou barvy porostu.

Obrázek 15 Hodnoty výnosu na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016



Zdroj: vlastní

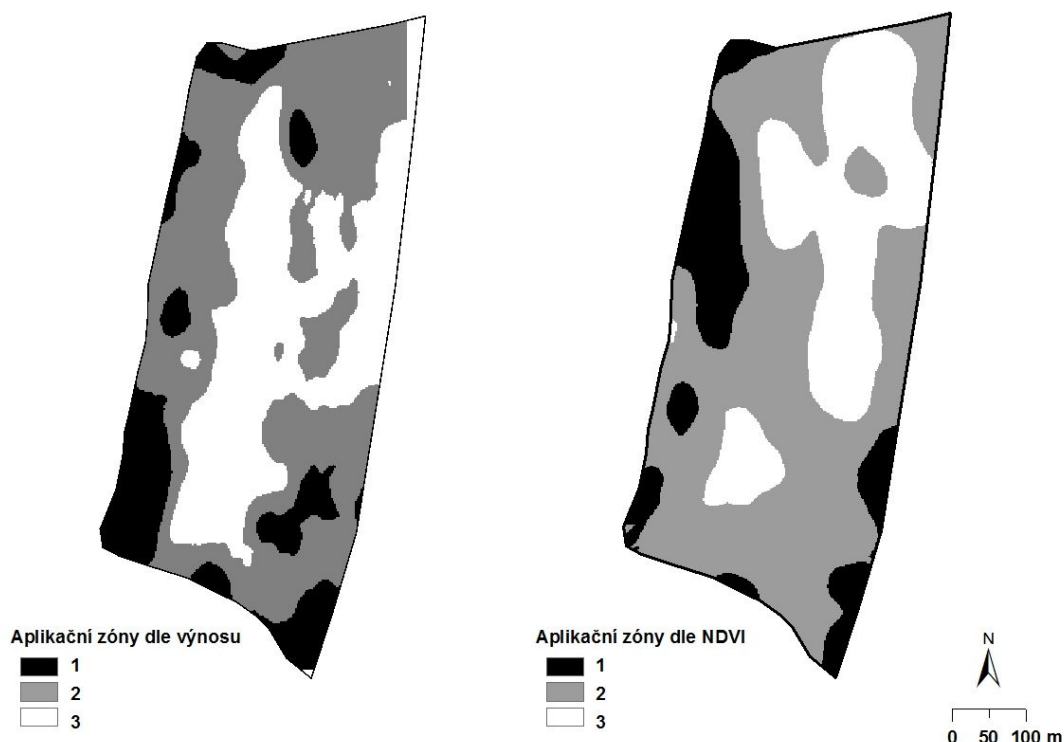
Obrázek 16 Relativní výnos na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016



Zdroj: vlastní

Na obr. 17 je uvedena mapa managementu zón, která byla vytvořena z obou vstupních údajů (NDVI a výnos). Výslednou mapu vytvořenou z parametru výnosu silně ovlivnil vliv rozdílného chování porostu řepky oproti oběma obilninám. Přesto základní charakteristiky obou map zůstávají stejné. Z obou map je patrný dobrý stav střední části pozemku, kdy je předpokládána vysoká hladina obsahu živin v půdě i dobrý fyzikální stav půdy. Je třeba připomenout i fakt, že mapa je částečně ovlivněna i změnou hranic pozemku. Proto není příliš patrný vliv technogenního zhutnění. Zde je třeba podotknout i to, že nápravné opatření zhutnění rozhodně není zvýšení aplikačních dávek hnojiva, ale jiná opatření. Rovněž je třeba mapy doplnit a konfrontovat s mikro lokálními podmínkami pozemku. Např. zvýšení aplikačních dávek na místech přerušných meliorací (zamokřená místa apod.) nevede k nárůstu výnosu v těchto místech. Mapy vytvořené na základě dat z výnosoměrů popř. z metod DPZ je třeba doplnit o znalosti půdních podmínek a teprve pak je možno hovořit o zlepšení podmínek aplikace s následným zvýšením kvality produkce a snížení prostorové variability pozemku. K vytváření aplikačních map jsou i vhodnější nástroje (např. rozborů půdy). Problémem však je vyšší cena vstupních dat i vysoká prostorová variabilita pozemků s nutnou úpravou rastru vzorkování.

Obrázek 17 Výsledné mapy management zón dle výnosu a NDVI



Zdroj: vlastní

V současné době se mnoho studií věnuje vztahům mezi vegetačními indexy a výnosem. V rámci těchto studií jsou hodnoceny různé pozemky s různými plodinami. Podstatným faktorem však zůstává i velikost pozemku. V posledních letech dochází k prudkému rozvoji systémů dálkového průzkumu Země pro hodnocení variability s následným využitím pro cílenou aplikaci zejména hnojiv. Pro zemědělské účely je možné používat metody dálkového průzkumu od hyperspektrálních po multispektrální systémy, z bezpilotních vzdušných dopravních prostředků nebo letadel, spektrometrů až po satelitní systémy pro sledování variability plodin. Pro tuto práci bylo vybráno satelitní dálkové snímání – družicové údaje Landsat 8, SPOT a Sentinel 2A. Prostorové rozlišení těchto obrazů je různé a vytváří tak rozdílnou kvalitu vstupních dat. Nejnižší kvalitu vykazují snímky z družice Landsat. To by mohlo mít vliv na kvalitu vyvozených závěrů. Nicméně, Kumhálová et al. (2014) dospěla k závěru, že obrazy Landsat TM/ETM+ mohou být použity pro odvození spektrálních indexů, které mohou dostatečně vysvětlit variabilitu rostlin na poli o velikosti 11,5 ha – tedy pozemek menší než v rámci této práce. Podobné výsledky uvádí i například Chao Rodriguez et al. (2014) při hodnocení malé vodní plochy (11,5 ha). Autoři dále zjistili, že historický archiv v Landsatu může stále poskytnout množství informací o životním prostředí. Wu et al. (2015) použily snímky ve své studii o odhadu indexu listových ploch (Leaf Area Index) ze syntetických dat Landsat (Landsat-7 ETM+) na 36,9 ha experimentálního pozemku.

Mnoho vědeckých prací je věnováno monitorování variability plodin s využitím vegetačních indexů (např. Vincini et al., 2008, Hunt et al., 2013). Tyto studie obvykle naznačují, že vegetační indexy jsou vhodné a přímo souvisí se zelenou složkou vegetace (obsah chlorofylu). Koncentrace listových pigmentů, obsah vody v listu a struktura listů způsobuje změnu odrazivosti, propustnosti a absorpce listů (van Leeuwen a Huete 1996).

Bylo zjištěno, že vlastnosti odrazivosti a propustnosti jsou odlišné u dvouděložných a jednoděložných rostlin kvůli rozdílům v mezofylové struktuře (Sinclair et al., 1971). Van Leeuwen a Huete (1996) popsali, že odrazivostní rozdíly mezi vegetací a povrchem půdy mohou být přičítány histologickým a optickým vlastnostem. Zavadání rostlinných složek nastává během nebo po zralosti rostliny nebo může být způsobeno stresovým faktorem, jako je nedostatek vody a živin nebo extrémní teploty. Zavadání a následný rozklad listů nakonec způsobí rozpad celého zeleného pigmentu listů rostlin. Tento jev do jisté míry může způsobit i např. poškození porostu škůdci, fytotoxicita pesticidů apod. Tyto (velmi často přechodné) jevy samozřejmě ovlivňují i výslednou hodnotu vegetačních indexů.

Většina vegetačních indexů je specifická pro danou skupinu plodin, a proto není vhodné, pokud jsou aplikovány na různé plodiny s různou architekturou a strukturou listů (Viña et al., 2011). V tomto případě šlo o využití indexu NDVI pro obiloviny a řepku. NDVI index je nejběžněji a nejdéle využívaným indexem. Jeho využití pro obiloviny je mnohokrát zopakováno a potvrzeno. Problém v této práci představuje využití pro řepku. Řepka je specifická několikanásobnou změnou barvy během vegetace, nízkým pokrytím povrchu v raných vegetačních fázích a dalšími vývojovými faktory, které nelze nikterak ovlivnit. Toto tvrzení je v dobré shodě s výsledky Piekarczyka et al. (2006). Autoři této studie zjistili velmi špatný vztah mezi běžně užívanými vegetačními indexy a všemi agronomickými parametry řepky olejné zejména na začátku jarního vegetačního období. V jejich studii je rovněž potvrzen vliv na jaře odumřelých vnějších listů řepky a vliv kvetení. Optické metody dálkového průzkumu se zdají být nevhodným nástrojem pro hodnocení řepky olejné. Huang et al. (2015) uvádí, že vhodnou alternativou může být použití aktivního mikrovlnného snímání, často označované jako radar. Aktivní pozorování mikrovlnami lze použít k poskytnutí doplňujících informací o vegetačních vlastnostech porostu jako jsou vegetační struktury nebo hladiny vegetačního růstu (výška porostu). Rádiový vegetační index (RVI) může také dobře korelovat s obsahem vegetační vody v rostlinách, dále s indexem listových ploch (Leaf Area Index). Dinesh Kumar et al. (2013) uvádí i možnou souvislost s NDVI indexem, ale to lze opětovně uvažovat u jiného typu rostlin, než je řepka. Přesto využitím mikrovlnného snímání nelze úplně vegetační indexy nahradit. Jde spíše o měření množství a do jisté míry i kvality nadzemní biomasy.

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Z hlediska ekonomiky umožňuje aplikace metod precizního zemědělství zvýšení výnosového potenciálu pozemku a tím také tržeb zemědělského podniku. Při variabilní aplikaci dusíku lze zvýšit výnos v průměru o 5 % (ČSÚ, 2017), což potvrzuje například i společnost MJM Litovel, a.s., která se zabývá mimo jiné variabilní aplikací hnojiv (technologie PREFARM Nitrosensing) (MJM Litovel, a.s., 2018).

Cílem ekonomického zhodnocení je vypočítat, jak by se zvýšil výnos během všech tří sledovaných sezon při využití metod precizního zemědělství – variabilní aplikace dusíku. Poté lze vypočítat dle výkupních cen plodin v jednotlivých sezonách i zvýšení tržeb podniku.

Průměrné výnosy plodin na sledovaném pozemku:

- Pšenice ozimá (2014) – 6,9 t/ha.
- Ječmen jarní (2015) – 4,04 t/ha.
- Řepka ozimá (2016) – 4,5 t/ha.

Tabulka 8 Zvýšení výnosu při variabilní aplikaci dusíku

Rok	Plodina	Celkový výnos (t)	Potenciální výnos (t)	Zvýšení výnosu (t)
2014	Pšenice ozimá	170,36	178,88	8,52
2015	Ječmen jarní	99,75	104,73	4,99
2016	Řepka ozimá	111,11	116,66	5,56

Zdroj: vlastní

V tab. 8 jsou uvedeny výnosy jednotlivých plodin na sledovaném pozemku, potenciální výnos poté znamená zvýšení výnosu při variabilní aplikaci o již zmíněných 5 %. V případě pšenice ozimé by se výnos navýšil o 8,52 t, u ječmene jarního o 4,99 t a u řepky ozimé o 5,56 t. Průměrné výkupní ceny jednotlivých plodin během sledovaných sezon jsou poté následující (SZIF, 2016):

- Pšenice ozimá (2014) – 4336 Kč/t.
- Ječmen jarní (2015) – 4282 Kč/t.
- Řepka ozimá (2016) – 9798 Kč/t.

Tabulka 9 Zvýšení tržeb při variabilní aplikaci dusíku

Rok	Plodina	Výkupní cena (Kč/t)	Tržby při uniformním hospodaření (Kč)	Tržby při variabilní aplikaci dusíku (Kč)	Zvýšení tržeb (Kč)
2014	Pšenice ozimá	4336	738685,30	775619,56	36934,26
2015	Ječmen jarní	4282	427119,22	448475,18	21355,96
2016	Řepka ozimá	9798	1088606,79	1143037,13	54430,34

Zdroj: vlastní

V tab. 9 jsou uvedeny výkupní ceny jednotlivých plodin v sezonách 2014, 2015 a 2016 včetně výpočtu tržeb při zvolení uniformního hospodaření a při variabilní aplikaci dusíku (tržby z vypočítaného potenciálního výnosu). V posledním sloupci je poté uvedeno zvýšení tržeb při variabilní aplikaci dusíku.

Zhodnocení

Při uniformním hospodaření dosahoval výnos celkem 170,36 t pšenice ozimé v sezoně 2014; 99,75 t ječmene jarního v sezoně 2015 a 111,11 t řepky ozimé v sezoně 2016. Pokud by podnik zavedl variabilní aplikaci dusíku, výnos by mohl dosáhnout o 5 % vyšší hodnoty, to znamená 178,88 t pšenice ozimé; 104,73 t ječmene jarního a 116,66 t řepky ozimé. Z hlediska tržeb podniku by došlo k jejich navýšení o 36934,26 Kč u pšenice ozimé, o 21355,96 Kč ječmene jarního a o 54430,34 Kč u řepky ozimé. Celkem za tyto 3 sezony by tak mohl podnik realizovat o 112720,57 Kč vyšší tržby při využití variabilní aplikace dusíku.

8 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou precizního zemědělství, konkrétně způsoby sledování prostorové variability zvoleného pozemku během tří po sobě jdoucích sezon. Pro zachycení prostorové variability byly využity dvě metody, a to výpočet vegetačního indexu NDVI z družicových snímků a měření výnosů pomocí výnosových čidel. Všechny družicové snímky byly bezoblačné a byl vybrán poslední možný snímek z vegetačního období zemědělských plodin. Data o výnosu byla poskytnuta Zemědělským družstvem Vendolí. Na základě těchto dat byly vytvořeny v software ArcGIS mapy absolutních a relativních hodnot NDVI a výnosu. Interpolace dat byla provedena pomocí metody kriging. Z relativních hodnot byly vytvořeny průměrné mapy NDVI a výnosu za všechny tři sledované sezony bez ohledu na charakteristiky plodin tak, aby se určily produkční zóny pozemku. Maximální hodnoty byly rozděleny dle geometrického intervalu na tři zóny. V rámci hodnocení porostů byla využita také data z meteorologické stanice umístěné v blízkosti sledovaného pozemku.

V první sledované sezoně 2014, kdy byla pěstována pšenice ozimá, byl zjištěn velmi dobrý stav porostu z hodnot NDVI i výnosu (6,9 t/ha), což je také ve shodě s dostatkem srážek naměřených meteorologickou stanicí. Naopak v další sledované sezoně 2015 byl výnos ječmene jarního spíše podprůměrný (4,04 t/ha), což mohlo být způsobeno suchem během hlavních vegetačních období plodiny. Hodnoty NDVI byly vyrovnanější než v případě pšenice, nicméně nedosahovaly tak vysokých hodnot. V poslední sezoně 2016 byla pěstována řepka ozimá, která změnou barvy během vegetace silně ovlivnila i výsledné hodnoty NDVI. Hodnoty jsou poměrně nízké a příliš nesouvisí s hodnotami výnosu. Výnos v případě řepky byl oproti oběma předcházejícím sezonám v rámci pozemku vyrovnaný a činil 4,5 t/ha, což představuje velmi dobrý výsledek.

Celkově lze konstatovat, že nejvyšší hodnoty výnosu i NDVI se vyskytovaly ve střední části pozemku, z čehož lze usuzovat dobrý živinný stav půdy v této oblasti. Na souvratích lze pozorovat vliv technogenního zhutnění půdy, který není ve výsledných mapách aplikačních zón tolik patrný z důvodu změny hranice pozemku. Velmi nízké hodnoty výnosu i NDVI byly zjištěny v jihovýchodní části pozemku, kde dochází k akumulaci povrchového odtoku. Zvýšení aplikační dávky hnojiva v těchto místech by nevedlo ke zvýšení výnosu, je tedy třeba uvažovat o jiných nápravných opatřeních.

Pomocí dat získaných měření výnosu a dat z družicových snímků lze v precizním zemědělství posoudit stav porostů a půdních podmínek, vegetační index NDVI však není vhodným ukazatelem stavu porostu ozimé řepky. Pro stanovení management zón nejsou tyto

metody příliš vhodné, lepší by bylo provést půdní rozbory a zjistit tak příčiny rozdílného výnosu v rámci pozemku.

Dle ekonomického zhodnocení při využití variabilní aplikace dusíku by podnik mohl zvýšit tržby celkem o 112720,57 Kč za všechny sledované sezony, což vychází z předpokladu zvýšení výnosu v průměru o 5 % při využití těchto metod.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- AGRIS (2005). GreenSeeker – nový systém pro výpočet aktuální potřeby dusíku u rostlin. [online]. Publikováno 25. 10. 2005 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <http://www.agris.cz/clanek/143935/greenseeker-novy-system-pro-vypocet-aktualni-potreby-dusiku-u-rostlin>
- AIRBUS (2018). SPOT 1-5. SPOT 6/7. [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z <https://www.intelligence-airbusds.com/en/65-satellite-imagery>
- BRODSKÝ, L., VANĚK, V., BORŮVKA, L., SZÁKOVÁ, J. (2004). Consistency of spatial dependence of soil chemical properties in two fields: a geostatistical study. *Plant Soil Environment*, 50 (11), 507-512.
- BURROUGH, P. A. (1986). Principles of geographical information systems for land resource assessment. Clarendon Press, Oxford. 193 s. ISBN 978-0198545637
- CNES (2017). Satellites. [online]. Publikováno 6. 1. 2017 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <https://copernicus.cnes.fr/en/satellites>
- ČSÚ (2017). Statistická ročenka České republiky. Český statistický úřad, Praha. 823 s. ISBN 978-80-250-2778-3
- DINESH KUMAR, S., SRINIVASA RAO, S., SHARMA, J. R. (2013). Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton. *Indian Cartographer* 12, 91–96.
- DOBROVOLNÝ, P. (1998). Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno. 207 s. ISBN 80-210-1812-7
- DOBROVOLNÝ, P. (2010). Geostatistika (pracovní texty). Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno. 104. s.
- DOERGE, T. A. (1999). Management Zone Concepts. Site-Specific Management Guidelines. The Potash and Phosphate Institute, Atlanta, GA, USA.
- DOMINGUEZ, J. A., KUMHÁLOVÁ, J., NOVÁK, P. (2015). Winter oilseed rape and winter wheat growth prediction using remote sensing methods. *Plant Soil Environment*, 61 (9), 410–416.
- eKATALOG BPEJ (2017). VÚMOP v. v. i. – Půdní služba, webová aplikace. [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z <https://bpej.vumop.cz/>

ESRI (2017). ArcGIS Pro. Tool reference. [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>

GEO/COPERNICUS V ČESKÉ REPUBLICE (2016). Družice Sentinel. [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <http://copernicus.gov.cz/druzice-sentinel>

GODWIN, R. J. (2015). The potential of Precision Farming. [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <https://www.tf.czu.cz/dl/50889?lang=en>

GODWIN, R. J., MILLER, P. C. H. (2003). A Review of the Technologies for Mapping Within-field Variability. *Biosystems Engineering*, 84 (4), 393-407.

HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (2008). *Dálkový průzkum Země*. Vydavatelství ČVUT, Praha. 192 s. ISBN 978-80-01-03124-7

HRUBÝ, M. (2006). *Geografické informační systémy (studijní opora)*. Vysoké učení technické, Brno. 91 s.

HUANG, Y., WALKER, J.P., GAO, Y., WU, X. & MONERRIS, A. (2015). Estimation of Vegetation Water Content From the Radar Vegetation Index at L-Band. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 54 (2), 981–989.

HUNT JR., E. R., DORAISWAMY, P. C., MCMURTREY, J. E., DAUGHTRY, C.S.T., PERRY, E. M., AKHMEDOV, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 21, 103-112.

CHAO RODRÍGUEZ, Y., EL ANJOURI, A., DOMÍNGUEZ GÓMEZ, J. A., RODRÍGUEZ PÉREZ, D., RICO, E. (2014). Using Landsat image time series to study a small water body in Northern Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*. 186 (6), 3511-22.

JONES, H. G., VAUGHAN, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press, Oxford, New York. 384 s. ISBN 978-0199207794

KAVKA, M., POŠAR, B., RYBKA, A., NOZDROVICKÝ L. (1998). Princip precizního zemědělství. *Agris*. [online]. Publikováno 10. 12. 1998 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <http://www.agris.cz/clanek/126796/princip-precizniho-zemedelstvi>

KOLÁŘ, J. (1990). *Dálkový průzkum Země*. Populární přednášky o fyzice. Sv. 35. SNTL, Praha. 170 s. ISBN 80-03-00517-5

- KROULÍK, M. (2016). Senzory a technika pro precizní zemědělství. *Agrojournal* [online]. Publikováno 2. 8. 2016 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <https://www.agrojournal.cz/clanky/senzory-a-technika-pro-precizni-zemedelstvi-193>
- KUMHÁLA, F. (2002). Mapování výnosů u sklízecích mlátiček jako součást precizního zemědělství. *Mechanizace zemědělství* [online]. Publikováno 20. 5. 2002 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <http://mechanizaceweb.cz/mapovani-vynosu-u-sklizecich-mlaticek-jako-soucast-precizniho-zemedelstvi/>
- KUMHÁLOVÁ, J., KUMHÁLA, F., KROULÍK, M., MATĚJKOVÁ, Š. (2011): The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 12: 813–830.
- KUMHÁLOVÁ, J., MATĚJKOVÁ, Š. (2017). Yield variability prediction by remote sensing sensors with different spatial resolution. *International Agrophysics*, 31, 195-202.
- KUMHÁLOVÁ, J., ZEMEK, F., NOVÁK, P., BROVKINA, O., MAYEROVÁ, M. (2014). Use of Landsat images for yield evaluation within a small plot. *Plant Soil Environment*, 60 (11), 501-506.
- LANDSAT SCIENCE (2018). History. [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history/>
- LANDSAT SCIENCE (2018). Landsat 8. [online]. [cit. 2018-01-15]. Dostupné z <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons, New York. 750 s.
- LIPAVSKÝ, J. (2000). Precizní zemědělství ve světě a v České republice. In: Uplatňování precizního zemědělství v České republice. MJM Group a.s., Olomouc. 8-14.
- LUKAS, V. (2009). *Metody hodnocení variability půdních podmínek jako podklad pro diferencované provádění pěstebních zásahů*. Disertační práce. Mendelova univerzita, Brno. 170 s. Školitel prof. Jan Křen, CSc.
- LUKAS, V. et al. (2011). *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství*. Mendelova univerzita, Brno. 34 s. ISBN 978-80-7375-562-1
- MEIER, U. (1997). *Growth Stages of Mono- and Dicotyledons Plants*. Blackwell Wissenschafts-Verlag.

- MJM Litovel, a.s. (2018). Prefarm Nitrosensing. [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z <http://www.mjm.cz/prefarm-nitrosensing>
- NEUDERT, L. et al. (2015). Precizní zemědělství. Technologie a metody v rostlinné produkci. Mendelova univerzita, Brno. 240 s. ISBN 978-80-7509-311-0
- OLIVER, M. A. (1999). Exploring soil spatial variation geostatistically. In: Precision Agriculture 99. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, ed. J. V. Stafford, Sheffield Academic Press, Sheffield, UK. 3-18.
- ORŠULÁK, T., PACINA, J. (2010). Dálkový průzkum Země. Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem. 18 s.
- PIEKARCZYK, J., WÓJTOWICZ, M., WÓJTOWICZ, A. (2006). Estimation of agronomic parameters of winter oilseed rape from field reflectance data. Acta Agrophysica. 8 (1), 205-218.
- PIERCE, F. J., NOWAK, P., DONALD, L. S. (1999). Aspects of Precision Agriculture. Advances in Agronomy. 67, 1-85.
- PIONEER AGRONOMY SCIENCES (2012). Management zones – What, Why, and How. [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/management-zones/>
- RICHARDS, J. A., JIA, X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 439 s. ISBN 978-3-540-25128-6
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHEL, J. A., DEERING, D.W. (1974): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceedings of the Third ERTS-1 Symposium, NASA Goddard, NASA SP-351, 309–317.
- RYANT, P. (2001). Precizní zemědělství. [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <http://docplayer.cz/4231770-Precizni-zemedelstvi-ing-pavel-ryant-ph-d-ustav-agrochemie-a-vyzivy-rostlin.html>
- SINCLAIR, T. R., HOFFER, R. M., AND SCHREIBER, M. M. (1971). Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. Agronomy Journal. 63, 864-868.
- SMUTNÝ, J. (2007). Geografické informační systémy. Vysoké učení technické, Brno. 121 s.
- STREIT, X. (1997). Introduction to Geoinformatics. Springer Verlag, New York.

SVATOŇOVÁ, H., LAUERMANN, L. (2010). Dálkový průzkum Země – aktuální zdroj geografických informací. Masarykova univerzita, Brno. 96 s. ISBN 978-80-210-5162-1

SZIF (2013). Aktualizace LPIS. [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <https://www.szif.cz/cs/lpis>

SZIF (2016). Zpráva o trhu obilovin, olejnin a krmiv. Tržní informační systém ČR, Praha. 16 s.

ŠARAPATKA, B. (1996). Pedologie. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc. 235 s. ISBN 80-7067-590-X

USGS (2017). Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972. [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>

VAN LEEUWEN, W. J. D. AND HUETE, A. R. (1996). Effects of standing litter on the biophysical interpretation of plant canopies with spectral indices. *Remote Sensing of Environment*. 55, 123-138.

VERHULST, N., GOVAERTS, B. (2010). The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeekerTM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. Mexico, D.F.; CIMMYT.

VINCINI, M., FRAZZI, E., D'ALESSIO, P. (2008). A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*. 9, 303-319.

VIÑA, A., GITELSON, A. A., NGUY-ROBERTSON, A. L., 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.

WEIER, J., HERRING, D. (2000). Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Earth Observatory. NASA. [online]. Publikováno 30. 8. 2000 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php

WU, M., WU, CH., HUANG, W., NIU, Z., WANG, CH. (2015). High-resolution Leaf Area Index estimation from synthetic Landsat data generated by a spatial and temporal data fusion model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 115, 1-11.

ZHANG, M., Li, M. Z., LIU, G., WANG, M. H. (2008). Yield mapping in precision farming. in IFIP International Federation for Information Processing, Volume 259; Computer and Computing Technologies in Agriculture, Vol. 2; Daoliang Li; (Boston: Springer), pp. 1407–1410.

ZHANG, X., SHI, L., JIA, X., SEIELSTAD, G., HELGASON, C. (2010). Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. Precision Agriculture. 11, 103-114.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Porovnání metod IDW a kriging (úhrn srážek ve Švýcarsku)	6
Obrázek 2 Princip DPZ	9
Obrázek 3 Elektromagnetické záření	12
Obrázek 4 Elektromagnetické spektrum	14
Obrázek 5 Spektrální křivka odrazivosti vegetace	17
Obrázek 6 Typická odrazivost zdravé a stresované rostliny	19
Obrázek 7 Zobrazení snímku v RGB, pravých barvách.....	21
Obrázek 8 Oběžné dráhy družic	22
Obrázek 9 Časová osa misí Landsat.....	23
Obrázek 10 Časová osa misí Sentinel	25
Obrázek 11 GNSS	27
Obrázek 12 Katastrální území obce Vendolí a sledovaný pozemek	32
Obrázek 13 Hodnoty NDVI na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016	41
Obrázek 14 Relativní hodnoty NDVI na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016	42
Obrázek 15 Hodnoty výnosu na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016.....	44
Obrázek 16 Relativní výnos na sledovaném pozemku v sezonách 2014, 2015 a 2016	44
Obrázek 17 Výsledné mapy management zón dle výnosu a NDVI.....	45

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Faktory ovlivňující výnos plodin	5
Tabulka 2 Druhy záření využitelné v DPZ.....	14
Tabulka 3 Charakteristika klimatického regionu 7	33
Tabulka 4 Meteorologické faktory během sledovaných sezon	34
Tabulka 5 Spektrální a prostorové rozlišení Landsat 8	35
Tabulka 6 Spektrální a prostorové rozlišení SPOT	36
Tabulka 7 Spektrální a prostorové rozlišení Sentinel 2A.....	36
Tabulka 8 Zvýšení výnosu při variabilní aplikaci dusíku	48
Tabulka 9 Zvýšení tržeb při variabilní aplikaci dusíku.....	49