

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

**Vyhodnocení vztahu vybraných topografických faktorů  
a výnosového potenciálu zájmového pozemku**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Marcel Pešek

Vedoucí práce: Ing. Jan Komárek, Ph.D.

2019

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Marcel Pešek

Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

**Vyhodnocení vztahu vybraných topografických faktorů a výnosového potenciálu zájmového pozemku**

Název anglicky

**Determination of relation of topographical indices to yield frequency**

---

### Cíle práce

Cílem práce je vyhodnotit vztah vybraných topografických faktorů a výnosového potenciálu vybraného půdního bloku. Dílčím cílem je také zhodnocení zastupitelnosti ručně naměřených hodnot vegetačního indexu a hodnot vegetačního indexu pořízených bezpilotním prostředkem a družicovým senzorem.

### Metodika

Autor se nejprve seznámí s problematikou precizního zemědělství, dálkového průzkumu Země a využití bezpilotních prostředků v zemědělství, na tato témata napíše literární rešerši. Na základě dat nasbíraných v terénu pomocí ručního měření, dat sebraných bezpilotním prostředkem a dat pořízených družicovým senzorem autor vypočítá hodnoty vybraného vegetačního indexu. Autor porovná vypočítané hodnoty vegetačního indexu a vhodně stanoví jejich vzájemnou zastupitelnost. Následně autor vypočítá vybrané topografické faktory a indexy vybraného půdního bloku. Pomocí pokročilých statistických metod autor stanoví vztah topografických proměnných a výnosového potenciálu.

### Doporučený rozsah práce

40 – 60 normostran

### Klíčová slova

precizní zemědělství, výnos, UAV, NDVI

---

### Doporučené zdroje informací

- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026–4047.
- DOBROVOLNÝ, R. *Dálkový průzkum Země ; Digitální zpracování obrazu..*
- JONES, H G. – VAUGHAN, R A. *Remote sensing of vegetation : principles, techniques, and applications.* New York: Oxford Univ. Press, 2010. ISBN 978-0-19-920779-4.
- NEUDERT, Lubomír, Vojtěch LUKAS, MENDELOVA UNIVERZITA a AGRONOMICKÁ FAKULTA, 2015. *Precizní zemědělství: technologie a metody v rostlinné produkci.* Mendelova univerzita: Brno. ISBN 978-80-7509- 311-0.
- Schmidt, F. & Persson, A. *Precision Agriculture* (2003) 4: 179.
- Zhang, S., Huang, Y., Shen, C., Ye, H., & Du, Y. (2012). Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information. *Geoderma*, 171, 35-43.
- 

### Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

### Vedoucí práce

Ing. Jan Komárek, Ph.D.

### Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

---

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 14. 04. 2019

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Komárka, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

V Praze 17. 4 . 2019

.....

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Komárkovi, Ph.D., za vstřícný přístup a cenné rady, při vedení této diplomové práce, také děkuji RNDr. Karlu Hrachovi, Ph.D. za odbornou konzultaci.

Na závěr bych rád poděkoval své rodině, za podporu během celého studia. TMNT.

## Abstrakt

Na variabilitu výnosu pěstovaných plodin mají vliv různé faktory, mezi ně patří i topografie. V této práci byl zjišťován vztah mezi výnosovým potenciálem a vybranými topografickými faktory pozemku na lokalitě Vendolí, které byly vypočítány na základě dat získaných bezpilotním prostředkem (UAV). Jednalo se o digitální model terénu, model svažitosti, model akumulace odtoku vody a topography wetness index. Pro vyhodnocení vztahu byla použita regresní analýza. Z výsledků statisticky významného regresního modelu, lze konstatovat, že výnosový potenciál pozemku závisí především na svažitosti a dostupnosti půdní vlhkosti. Také byla provedena měření hodnot vegetačního indexu NDVI pšenice ozimé (*Triticum aestivum* L.), ve třech fenologických fázích. Za pomoci ručního přístroje GreenSeeker, multispektrální kamery umístěné na UAV a družice Landsat 8. Zjištěné hodnoty byly testovány pomocí Wilcoxonova párové testu. Byly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi platformami, a proto byla vyloučena jejich vzájemná zastupitelnost.

Klíčová slova: precizní zemědělství, výnos, UAV, NDVI

## **Abstract**

Crop yields variability is influenced by various factors, including topography. In this thesis the relationship between the yield frequency and selected topographical factors of the site in the locality Vendolí, which were calculated on the basis of data obtained by UAV, was investigated. Topographical factors included digital elevation model, slope model, flow accumulation model and topography wetness index. Regression analysis was used for to evaluate the relationship. From the results of the statistically significant regression model, it can be stated that the yield frequency of the site depends on the slope and availability of soil moisture. Also measurements of the vegetation index NDVI on winter wheat (*Triticum aestivum* L.), in three phenological phases were made. With use of the GreenSeeker handheld sensor, the UAV equipped with multispectral camera and Landsat 8 satellite. Obtained values were tested using the Wilcoxon matched pairs test. There were statistically significant differences between platforms, therefore their substitutability was excluded.

Key words: precision agriculture, yield, UAV, NDVI

## Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Cíle práce .....	11
3.	Literární rešerše .....	12
3.1	Precizní zemědělství.....	12
3.1.1	Postupy v precizním zemědělství .....	16
3.1.2	Ekonomické benefity .....	18
3.1.3	Environmentální benefity .....	19
3.1.4	Limity precizního zemědělství.....	20
3.2	Dálkový průzkum Země.....	21
3.2.1	Rozdělení DPZ.....	22
3.2.2	Zdroje záření .....	23
3.2.3	Elektromagnetické záření .....	24
3.2.4	Elektromagnetické spektrum .....	25
3.2.5	Spektrální chování vegetace .....	26
3.2.6	Vegetační indexy .....	27
3.2.6.1	DVI .....	27
3.2.6.2	SR .....	27
3.2.6.3	GDVI .....	28
3.2.6.4	CVI .....	28
3.2.6.5	SAVI.....	28
3.3	Bezpilotní letecké prostředky.....	29
3.3.1	Historie UAV .....	29
3.3.2	Typy UAV .....	31
3.3.2.1	Letadlo .....	31
3.3.2.2	Křídlo.....	31
3.3.2.3	Multikoptéra .....	32



3.3.3	Využití UAV v zemědělství.....	33
3.4	Digitální model terénu.....	36
3.5	Fenologie.....	37
4.	Metodika.....	39
4.1	Lokalita.....	39
4.2	NDVI.....	40
4.3	GreenSeeker.....	41
4.4	Pořízení UAV dat.....	44
4.5	Landsat 8.....	46
4.6	Stanovení výnosu.....	47
4.7	Model svažitosti a akumulace odtoku vody.....	49
4.8	TWI.....	50
4.9	Statistické zpracování dat.....	51
5.	Výsledky.....	53
6.	Diskuse.....	59
7.	Závěr.....	65
8.	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	67

# 1. Úvod

V současné době, kdy si společnost začíná uvědomovat možné následky klimatických změn a růstu populace, je nutné, aby na takové prognózy bylo i adekvátně reagováno. Reakcí primárního sektoru zemědělství je hospodaření v systému precizního zemědělství. Takový systém využívá dostupných moderních technologií, pro dosažení maximálních výnosů na obhospodařovaných plochách a zároveň se snaží minimalizovat vstupy a vliv na životní prostředí. Na zvyšující se počty obyvatel a jejich konzumní způsob života se váže také potřeba dostatečné produkce a dostupnosti potravin. K zvyšování produkce bývají v rámci konvenčního zemědělství často využívány plošné dávky chemických látek, které mají negativní vliv na životní prostředí. Při současném trendu, kdy se produkční plochy zmenšují, z důvodu jejich zástavby, je nutné zvýšit efektivitu. I z těchto důvodů je nutné přistupovat k půdě jinak. Precizní zemědělství pomocí moderních technologií získává detailní data o obhospodařovaných pozemcích a plodinách, na základě získaných informací je možné vhodně přizpůsobit hospodaření. Využívá se například metod dálkového průzkumu Země, takové metody získávají data o pozemcích pomocí družic nebo bezpilotních leteckých prostředků. Jsou také počítány vegetační indexy, které prozradí mnoho informací o vegetaci, které by člověk běžným pohledem nezjistil, nebo jsou testovány půdní charakteristiky. Především se ale bere v potaz heterogenita obhospodařovaných ploch, na tu se reaguje variabilní aplikací látek, která snižuje negativní vlivy na životní prostředí a slouží k úspoře vstupů a zvýšení výnosů. Heterogenita půdy, která způsobuje variabilitu výnosů, je ovlivňována také topografickými charakteristikami, které ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti půdy, mezi ně řadíme i dostupnost vody, která bude v budoucích letech s ohledem na klimatické změny ještě důležitější.

Tato práce se zaměřuje na vztah výnosového potenciálu pozemku na lokalitě Vendolí a vybraných topografických faktorů, které byly vypočítány na základě dat získaných bezpilotním prostředkem. Také se zabývá zjišťováním hodnot vegetačního indexu za pomoci různých platforem.

## **2. Cíle práce**

Cílem práce je vyhodnotit vztah vybraných topografických faktorů a výnosového potenciálu půdního bloku na lokalitě Vendolí. Vztah bude vyhodnocen prostřednictvím regresní analýzy.

Dílčím cílem je také zhodnocení zastupitelnosti ručně naměřených hodnot vegetačního indexu NDVI a hodnot pořízených bezpilotním prostředkem a družicovým senzorem. Vzájemná zastupitelnost bude vyhodnocena pomocí vhodných statistických metod.

### 3. Literární rešerše

#### 3.1 Precizní zemědělství

Zemědělství je základním kamenem ekonomik všech zemí světa. Zatímco v některých státech se podílí na hrubém domácím produktu až 50 % a dává zaměstnání až 90 % obyvatel, v České republice je zemědělství v klesajícím trendu. V roce 2016 byl podíl zemědělství na hrubém domácím produktu méně než 2 % a podíl na zaměstnanosti v České republice mělo 1,9 % (MZe, 2017). I tak zůstává zemědělství odvětvím nezbytným, bez něhož by se neobešla žádná země na světě. Produktivita zemědělských ploch je velice důležitá pro ekonomiku státu. V posledních čtyřech dekádách se zdvojnásobila produktivita a zredukovaly se pracovní síly v zemědělském sektoru o dvě třetiny. To lze přisoudit postupné mechanizaci zemědělství nebo také využívání zavlažovacích systémů a zlepšování chemických hnojiv a pesticidů.

V tradičním konvenčním zemědělství se na poli pěstuje jedna konkrétní plodina a pole je zde vnímáno jako jedna homogenní jednotka, na kterou se následně aplikuje celoplošně stejná dávka hnojiva či chemického přípravku, jako by celá plocha pole byla stejně úrodná, stejně vlhká či se stejnými škůdci. Přitom již naši předci si uvědomovali, že jimi obdělávané pozemky nejsou všechny stejně vyrovnané a výnosné. Zemědělci svá relativně malá pole dobře znali a věděli, kde je část pole úrodnější a kde se naopak hospodařit nevyplatí. To vše vycházelo ze zcela jiného vztahu k půdě a krajíně jako takové než můžeme sledovat nyní. Svě na tom mělo i předávání zemědělských usedlostí z generace na generaci. A právě změnami v naší nepřilíživé historii docházelo ke vzniku velkých zemědělských podniků, které hospodařily na rozsáhlých územích, zde již chyběli mezigenerační znalosti o pozemcích a nabývání takovýchto informací na tak rozsáhlých výměrách není jednoduché a tak se stalo variabilní hospodaření takřka nedosažitelné. V této době jsou hnojiva a chemické přípravky spotřebovávány ve významných množstvích, navíc jsou velmi nákladné a tak rostou zemědělcům náklady (Lukas et al., 2010). Dalším problémem, jenž takové užívání hnojiv a chemických přípravků v konvenčním zemědělství přináší je ekologická zátěž pro životní prostředí. Podstatné ale je že se všechna tato negativa automaticky neodráží na vyšším výnosu (ČSÚ, 2016).

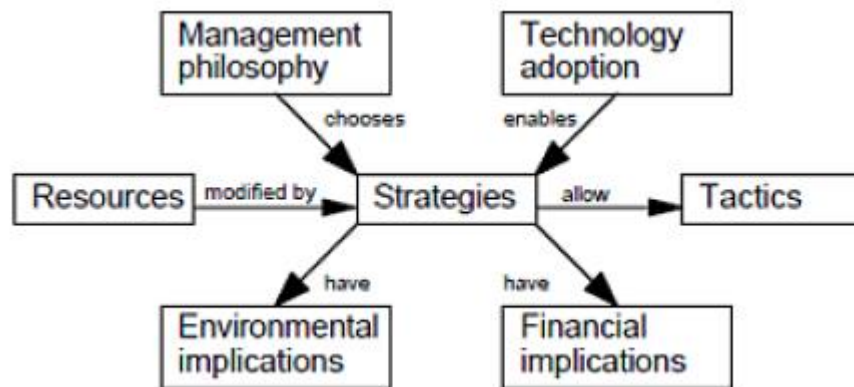
Tlak veřejnosti v posledních letech narůstá a tak je snaha v rámci zemědělské prvovýroby o zefektivnění, snížení vstupů, nákladů a negativní zátěže na životní prostředí. Na což reaguje precizní zemědělství, v angličtině precision agriculture. V anglické literatuře také pod názvy: farming by soil, soil specific crop management, site specific farming, farming by computer, farming by satellite nebo hightech sustainable agriculture. Pod tímto pojmem se skrývá systém obhospodařování půdy, který umožňuje přizpůsobit pracovní operace při pěstování zemědělských plodin, prostorové různorodosti. V takovém systému zemědělství jde především o dosažení co největších výnosů z plodin a vytvoření efektivní odolnosti rostlin proti chorobám a škůdcům, tím že budou využívány hnojiva a pesticidy pouze tam, kde to půda a plodiny potřebují a tedy vytvoření menších homogennějších ploch. To je hlavním rozdílem oproti konvenčnímu zemědělství, kde se všechny úkony vykonávají jednotně (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Duďák, 2016). Základním heslem precizního zemědělství je provádět pěstitelská opatření ve správnou dobu, správnou dávkou, na správném místě (Neudert et al. 2015). Což je nemyslitelné bez znalosti podkladových dat. K dosažení hlavních cílů precizního zemědělství, kterými jsou ziskovost, udržitelnost a ochrana životního prostředí, pomáhá využití informačních technologií (Rouse, 2016). Mnohé definice tedy precizní zemědělství berou jako systém řízení, při kterém se využívá nových pokročilých technologií pro sběr informací s následným podložením rozhodování zemědělců o příslušná data s cílem zvýšení výnosů plodin při současném snížení vstupů, a tedy při levnější investici dosažení vyššího finančního výnosu (USDA, 2007; Stoorvogel, et al. 2016).

Podle Křen et al. (2007) je precizní zemědělství schopné maximalizovat výnos plodin, s přesností sledovat a současně snižovat provozní náklady a zvýšit zisk. Dále díky variabilní aplikaci chemických látek a hnojiv do půdy snižovat dopad na životní prostředí. Hlavním principem tohoto systému tedy je usměrňovat vstupy maximálně efektivně. Do míst kde jsou potřebné, v potřebném množství a je-li to třeba (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Proto můžeme tento způsob hospodaření nazvat jako prostorově a časově cílený. Využívají se lokální specifické informace a data o půdě a plodinách vzhledem k pozemkové heterogenitě. Tím může dojít ke zpřesnění vstupů sloužících k stimulování produkce plodin. Jednou z primárních informací je mapování výnosu zemědělských plodin. Tím o půdě zjistíme podstatnou počáteční informaci. Znalosti konkrétních požadavků rostlin tak stavu půdy spolu se

snažením se o hospodaření šetrnější pro životní prostředí je považováno za moderní trend, který je opakem proti jednotnému hospodaření a smýšlení v konvenčním zemědělství. V precizním zemědělství se využívají rychlé, nedestruktivní a cenově efektivní metody, které jsou potřebné pro půdní management a kvalitní plodiny s využitím různých dávek hnojiv s ohledem na heterogenitu potřeb půdy (Kavka et al., 1998; Kodaira et al., 2013). Při zjištění nevyrovnaností v rámci výnosu plodin na pozemku, vzniká otázka, jak vyřešit problémy způsobující tyto nižší výnosy na dílčích plochách. Možností je buď vyrovnat vzniklé rozdíly, nebo se jim při pěstování přizpůsobit. Pokud bychom se snažili plochu upravit a nastavit zde, stejné podmínky jako v místech více úrodných, bude se jednat o značně finančně náročnou operaci, proto v rámci precizního zemědělství bude snaha co neoptimálněji v těchto plochách hospodařit, abychom rozdílnou produkční schopnost co nejvíce snížili (Lukas et al., 2010).

Precizní zemědělství jakožto jedno z nejmodernějších odvětví v zemědělství funguje na principu sběru dat. To z důvodu, abychom mohli přistupovat variabilně k jednotlivým stejnorodým částem pozemku. Dat je potřeba velké množství, toho dosáhneme za pomoci množství technologií, které se v rámci precizního zemědělství využívá. Aby vše mohlo fungovat, je nutné znát přesnou geografickou polohu daného objektu, kde chceme precizní zemědělství vykonávat. Mezi takové informace lze zařadit například tvar pozemku, lokalizaci pozemku, polohu strojů a další. Základní využívané technologie jsou globální navigační satelitní systémy (GNSS), geografické informační systémy (GIS), dálkový průzkum Země (DPZ), senzorová technika a aplikační ovládací prvky (Nozdrovický, 2008).

V rámci systému precizního zemědělství mohou zemědělci lépe chápat a kontrolovat své hospodářské plochy, jelikož systém precizního zemědělství slučuje informace z různých odvětví a začleňuje moderní informační technologie. To jim pomáhá k vykonávání korektních rozhodnutí o pěstebních opatřeních a zásazích (Gnip & Charvát, 2003). Precizním zemědělství by mělo být chápáno, jako možnost exaktně monitorovat, vyhodnocovat a kontrolovat způsob agrotechnických zásahů, ne pouze jako o možnost provádět variabilní opatření. Také je potřebné chápat celý proces, obnášející aplikaci vstupů se snahou dosažení cílů v precizním zemědělství a tedy ne pouze navýšení výnosu, ale také ekologicky šetrnějšího hospodaření, v souladu s ušetřením finančních prostředků. (Blackmore, 2003)



Obr. 1 : Diagram vytváření strategií a jejich dopadů (Blackmore, 2003).

Obecný systém hospodaření popisuje Blackmore (2003), jeho základem je vytvoření konkrétních strategií, ty jsou ovlivňovány vstupy a vytváří výstupy (obr. 1). Základním článkem jsou zdroje, které vstupují do procesu tvorby strategie a jsou jí pozměněny. Strategii si volí hospodář, podle svých postojů a umožňuje jí osvojení si technologií. Hospodáři zvolená strategie, poté vytváří určitou taktiku k dosažení cílů. Zvolená strategie má jak finanční tak environmentální dopady. Příkladem může být měření a záznam výnosů či odběr vzorků půdy, jakožto potřebné praktiky v rámci systému precizního zemědělství. Jedná se tedy o určité osvojení technologie a zvolení strategie pro dosažení určitých cílů práce.

Precizní zemědělství je výsledek vývoje v zemědělství, ačkoliv se to zdá být velice sofistikované řešení, což bez pochyby s využitím nejnovějších technologií je, už v dřívějších dobách se využívalo především na menších pozemcích lokálně cílené obhospodařování. Kdy si zemědělci uvědomovali rozdíly výnosů jednotlivých pozemků (Lukas et al., 2010). Se zvětšující se výměrou pole, se ale snižovala heterogenní identifikace a následně i individuální aplikace. Až nové technologie dovolují exaktnější vyhodnocení heterogenity půdy a časové dynamiky procesů, které ovlivňují výnosovost a taktéž provádění přesnějších zásahů. Tyto technologie, které nyní do precizního zemědělství řadíme, byly adaptovány poměrně pomalu. Systém, který je v zemědělství praktikován nejběžněji, přistupuje odlišně jako k nejmenším částem systému jenom k jednotlivým pozemkům. Až rozmach globálních navigačních satelitních systémů, aplikačních technologií a následný distanční monitoring s přesnou lokalizací umožnil individuální přístup k jednotlivým částem pozemků (Griffin & Lowenberg-DeBoer, 2005; Křen et al., 2007).

Pokud se podíváme do historie precizního zemědělství, můžeme najít například tyto události. První zmínky o lokálně cíleném hospodaření byly v 60. letech 20. století v USA. V roce 1985 byl na americkém trhu k dispozici první postřikovač s variabilní aplikací. Roku 1992 byla svolána první mezinárodní konference v americkém Minneapolis. A také byl zaznamenán vzestup v zavádění technologií GPS v zemědělství. Následně v roce 1996 dochází v Minneapolis ke sjednocení názvu. A v roce 1997 svolání první evropské konference v Anglickém Warwicku, v téže roce také začíná vycházet mezinárodní časopis Precision Agriculture. (Křen et al., 2007; Stoszek, 2009)

Ještě před rozmachem navigačních satelitních systémů, jež dovolují precizní lokalizaci potřebných zásahů, byly využívány alternativní systémy k variabilní aplikaci. V Evropě byly využívány počítačové sestavy, takzvané automatické řízení podniku, jež zpracovávalo nabytá terénní data, následně program nabytá data vyhodnocoval. Výsledek těchto analýz byl poté podkladem pro agronoma rozhodnutí například ohledně množství hnojiva nebo pesticidů. Byly to ale až satelitní navigační systémy, které byly schopny zajistit přesnou polohovou aplikaci zásahů. (Sobota, 2009 ex. Špelina, 1999; Vitharana et al., 2008). Podle Rüsche (2001) bylo precizní zemědělství převážně vyvíjeno na evropském kontinentu, jenže severoameričtí farmáři jej převzali v daleko větší míře. Z toho důvodu je hlavním podněcovatelem systému precizního zemědělství právě severní Amerika.

Osvojování systému precizního zemědělství je dle Griffin & Lowenberg-DeBoer (2005) ve srovnání s jinými zemědělskými technikami poměrně pomalé a také nerovnoměrné, přirovnávají jeho přijetí k osvojování bezorebné technologie ve druhé polovině 20. století. To protože systém precizního zemědělství dorazilo na trh v poměrně nevyvinuté formě, bez existence integrovaného systému, jenž by zajistil zisk. Společnosti využily mnohé farmáře k beta testování, než došlo k využití komerčnímu, až po čase se trh rozdělil na úspěšné a neúspěšné společnosti.

### **3.1.1 Postupy v precizním zemědělství**

Precizní zemědělství vypadá v praxi následovně. Nejprve zemědělec zjišťuje stav obhospodařovaných ploch. Nejčastěji prováděním analýzy půdních vzorků, topografie místa, dálkovým průzkumem, monitoringem výnosu nebo pomocí svých vlastních zkušeností (Stoorvogel, et al. 2016). Velmi důležitou roli má i sensorová

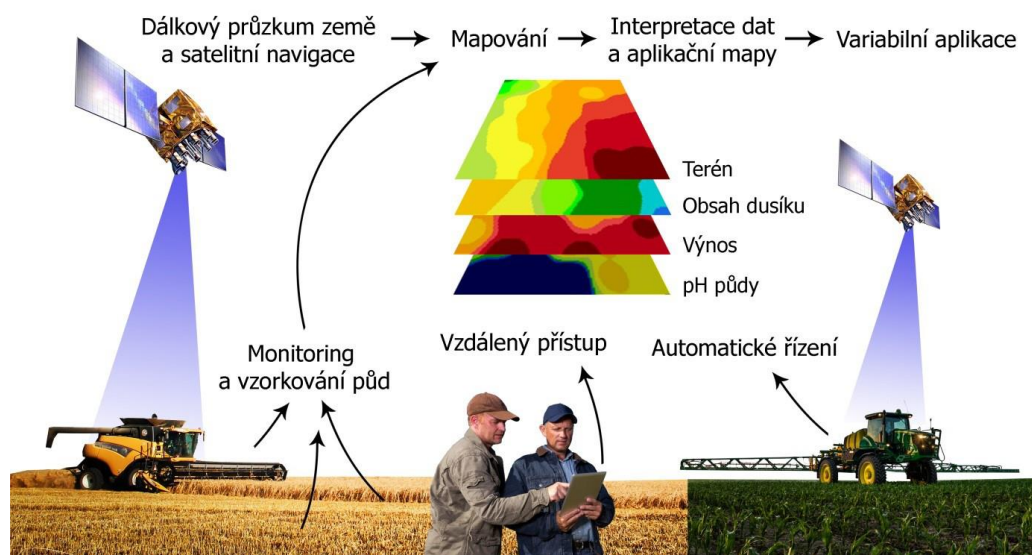


technika, která je napojena na globální navigační satelitní systém, nejčastěji se jedná o GPS. Takové senzory mohou kupříkladu analýzou spektra určit zásobení porostu živinami či vláhou nebo hustotu porostu. Dále také jak je půda utužená či obsah množství organické hmoty včetně úrovně pH, značně ovlivňující rostlinný růst. Hojně jsou využívány N testery tedy senzory, které jsou schopné měřit obsah chlorofylu v listech, ten koreluje s celkovým obsahem dusíku v rostlině. Stanovení optimálních dávek dusíku má pozitivní vliv na obsah bílkovin v zrna a výnos. Porosty jsou vyrovnanější kvalitativně i výnosově. Aplikací pouze potřebného množství dusíku, se snižuje riziko ztrát povrchovým smyvem, vyplavením či únikem amoniaku a aplikovaný dusík je lépe využit. Také můžeme snížit riziko poléhání obilovin (Neudert et al. 2015).

Nabytým datům jsou přiřazeny zeměpisné souřadnice. Data jsou poté vkládána do geografických informačních systémů (GIS) a kompilována do mapových vrstev. Nejvyužívanější bývá výnosová mapa, aplikační mapa, mapa zásobení rostlin živinami případně také mapa pohybu strojů po poli neboli telematika. Zkombinováním více mapových vrstev můžeme dojít i na určení sklonu svahu a následně spočítat například kde je půda ohrožená erozí nebo kde se při odtoku voda akumuluje (Zhang, 2016). Pokud má zemědělec k dispozici stroj, který je v reálném čase schopen měřit, analyzovat a aplikovat lze vytváření map předejít, jenže k dosažení přesných výsledků je většinou nutné mít více informací a to nejlépe pro delší časový rámec, z toho důvodu odborníci preferují vytváření aplikačních map (Kroulík 2012; Stone & Raun 2016).

Do aplikačních map jsou zemědělcem zanášena pěstitelská opatření o hnojení, setí, ochraně rostlin nebo zpracování půdy. Opatření jsou následně uplatňována v praxi za pomoci stroje, který je schopen tyto mapy číst. Takový stroj je naváděn pomocí GPS a danou mapu sleduje. Na základě dat získaných z mapy stroj upravuje dávky hnojiv, osiva nebo herbicidů. Řidiči stroje se na monitoru zobrazuje aktuální poloha, v případě vychýlení z trasy je systémem upozorněn. Nejpokročilejší systémy jsou samořiditelné a na konci řádků se samy otáčejí nebo jsou schopny ovládat sekce a v místě křížení řádků vypínají jednotlivé trysky, tím je aplikace přesnější a nedochází k překrývání nebo vynechávání (Štursa, 2017).

Postup má tedy tři hlavní kroky: analýzu pole, vytvoření mapy a využití mapových dat v praxi (obr. 2). Zemědělec může využít vlastních nakoupených zařízení, častěji si však menší zemědělci najímají externí firmy, které služby precizního zemědělství komerčně nabízí, od zapůjčení specializovaných strojů po vytváření a diagnostiky map.



Obr. 2 : Znázornění hlavních postupů v precizním zemědělství (Kašperová, 2018).

### 3.1.2 Ekonomické benefity

Zemědělci jsou k preciznímu zemědělství přitahováni především ekonomickým ziskem a to protože zvyšuje profit. Hlavně díky snižování množství vstupů (Knight et al., 2009). Jestliže precizní management navýší výnosy čilepší kvalitu plodin, podepíše se to v zisku mnohem více (Neudert et al. 2015). Jenže ve věci profitu ve skutečnosti není natolik jasno. To proto, že úspory na straně vstupů nejsou vždy schopny vyrovnat velmi vysoké provozní a pořizovací náklady. Lowenberg-DeBoer & Boehlje (1996), zkoumali 11 studií ziskovosti a pouze dvě potvrzují potencionální ziskovost precizního zemědělství. Další čtyři studie uvádí výsledky smíšené a pět studií tvrdí, že precizní zemědělství je ztrátové. Studie ovšem pokrývají období, jež je možné označit za ranou komercializaci precizního zemědělství a to roky 1991 až 1994 (Mulla & Khosla, 2016). Takové negativní výsledky odráží značně vysoké pořizovací náklady v té době. Griffin & Lowenberg-DeBoer (2005) zase zkoumali 234 publikací vydaných v letech 1998 až 2005, přičemž zjistili, že v 68 % případů byla některá z technologií zisková. Výsledky se ale lišily podle plodiny a technologie. Variabilní aplikaci dusíku například reportovalo jako ziskovou u kukuřice 72 % publikací,

kdežto u pšenice pouze 20 %. S postupným vývojem technologií a klesající cenou jsou po roce 2000 častěji vidět studie, které dokládají ziskovost. Koch et al. (2004) ušetřili variabilní aplikací dusíku v přepočtu 400 až 650 Kč/ha. Lukas & Neudert (2016) zase v nedávné době dosáhli k obdobným výsledkům, když s optimalizovanou dávkou hnojiva a pesticidů dospěli k zisku 300 až 500 Kč/ha. Shockley et al. (2012) při využití automaticky naváděných variabilních postřikovačů ušetřili v přepočtu 800 Kč/ha. Székely et al. (2000), tvrdí, že jsou technologie precizního zemědělství ziskové nad 250 hektarů obdělávané plochy. Pedersen (2003) doporučuje minimálně 500 hektarů. Britové doporučují nutnou hranici pro nejnižší možné investice 80 hektarů a pro nejvyšší nejméně 300 hektarů (Godwin et al., 2002). Při odhlédnutí od experimentálních modelů a prací, lze říci, že precizní zemědělství má potenciál ziskovosti, jeho výše však závisí na další řadě okolností, jimiž jsou použita technologie, přírodní podmínky, velikost farmy nebo výkupní cena plodin (Reichardt & Jürgens, 2008).

### **3.1.3 Environmentální benefity**

Hlavním benefitem v rámci systému precizního zemědělství je snížení úniků dusíku v nitrátové podobě do nižších vrstev půdního profilu a jeho zvýšené využití rostlinami (Neudert et al. 2015). V převládající zemědělské praxi dochází ke hnojení plodin rovnoměrnou dávkou, plodiny na přidaný dusík dobře reagují, jenže ho nevyužijí všechny. Nadbytečný dusík se v často ochuzené půdě nemá možnost uchytit a tak proniká do nižších vrstev půdního profilu, kde dochází ke znečišťování podzemních vod a eutrofizaci.

Využitím selektivního dávkování v rámci precizního zemědělství je dusík a jeho úniky snižován (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Z důvodu mineralizačního procesu, průsaku dusíku a jeho odebírání rostlinami závislém na půdních a klimatických podmínkách je ušetřené množství odlišné od 2,24 až 4,48 kg/ha po 29 až 60 kg/ha (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004; Pedersen et al., 2004). Díky selektivnímu dávkování dusíku, nemusí vést vždy k jeho menšímu celkovému množství užitému na ploše, ale vzhledem k jeho aplikaci, která bere ohledy na stav a potřebu rostlin je schopny mnohem efektivněji čerpat a omezit tím průsak a smyv (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Ušetří se také na užití herbicidů, podle využití technologie až 60 až 80 % (Mulla & Khosla, 2016). Německý výzkum (Timmermann et al., 2003) ušetřil oproti jednotné dávce, využitím

variabilního dávkování 54 % herbicidů. Dalším uváděným kladem je snížení pohonných hmot a to především díky satelitnímu navádění, které umožňuje efektivnější pohyb po poli a předcházení opakovanému přejíždění nebo vynechávání v částech pozemku (Pedersen, 2003; Shockley et al., 2011).

### **3.1.4 Limity precizního zemědělství**

Management v systému precizního zemědělství je finančně nákladný a to nejprve koupí potřebných zařízení a poté jejich zavedením a údržbou. Musí se počítat i se školením obsluhy pro potřebný software a hardware. Jednorázové výdaje, doplňují i výdaje za nákup licencí pro software a servis strojů (Neudert et al., 2015). Vysoké náklady mají za následek, to že si precizní zemědělství osvojují především velké podniky a také je více využíváno na úrodnějších půdách a u vysoce výnosných plodin (Daberkow et al., 1998).

Pozitivní vliv precizního zemědělství jako celku je omezený, jelikož dle Khanna (2001), je environmentální zisk lépe dosažitelný, pokud se hospodaří na méně úrodných půdách. Zatímco ekonomického zisku se dá lépe dosáhnout na úrodných půdách, kde je výnos plodin nevyrovnaný v částech pozemku a pomocí precizního managementu je zde tento rozdíl rychleji vyrovnán. Groffman (1997) varuje před ekologickými limity, které precizní zemědělství nemůže vyřešit, jelikož ty pochází z podstaty praxe, která je v zemědělství vykonávána. A to především ztráty dusíku, i přes pozitivní vliv precizního zemědělství na snižování ztrát, není schopné redukovat vyplavování před výsevem a v době sklizně, kdy na půdě není vegetace, která by odčerpávala živiny. Další povrch narušující činností je orba, půdu vystavuje erozi a podněcuje mineralizaci. Těmito problémy se ale vyznačuje většina zemědělské praxe, pouze ekologické zemědělství a protierozní opatření jsou schopna se s nimi zčásti vyrovnat (Šarapatka & Urban 2006). Podobný problém řeší i Delgado (2016), který tvrdí, že precizní zemědělství, jak ho známe, nedostatečně minimalizuje úniky dusíku. Z toho důvodu navrhuje doplnění čtyř základních principů precizního zemědělství o tři principy precizního ochranářství a to dělat správné opatření, vhodnou metodou, ve správném měřítku. Což by v praxi mohlo vést například k tvorbě map, ne pouze podle obsahu živin, ale i map s výskytem eroze a následně podle toho přizpůsobit hospodaření nebo využít protierozních opatření, jako například omezení orby, umístění zatravněných pásů, či zanechání posklizňových zbytků na pozemku (Berry et al., 2003).

## 3.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) z anglického Remote Sensing, je věda i metoda získávání užitečných informací o objektech, plochách a přírodních jevech prostřednictvím dat měřených na zařízeních, které s těmito zkoumanými objekty, plochami, či jevy nejsou v přímém kontaktu, tedy na dálku. Tímto procesem dochází k získávání kvalitativních a kvantitativních údajů o zkoumaných objektech, plochách, či jevech (Dobrovolný, 1998, Lillesand & Kiefer, 1994). Vzhledem k tomu, že s měřenými objekty nedochází k přímému kontaktu, jsou měřicí technologie umístěny na různých nosičích v různých hladinách. Ty představují družice, letadla nebo bezpilotní prostředky (Žížala et al., 2016). DPZ zkoumá jak na povrchu (pevninu a vodní plochy), pod povrchem (geologické mapování), tak i nad povrchem (spodní vrstvy atmosféry). Využívá elektromagnetického záření v jednom nebo více intervalech elektromagnetického spektra (Dobrovolný, 1998).

V DPZ je zahrnuto vícero kroků jako zhotovení, přenos, zpracování, vyhodnocení, analýza a využití materiálů. Výsledky dálkového průzkumu Země jsou především letecké snímky a družicové obrazové záznamy a to v analogové nebo digitální formě (Svatoňová & Lauermann, 2010). Snímky vznikají v různých výškových hladinách, což v současné technicky vyspělé době není problémem. Nejvyšší možnou hladinou snímkování je z oběžné dráhy Země pomocí družic. Nejnižší hladina je v malých výškách pomocí letadel a bezpilotních prostředků. Každá hladina má své výhody a nevýhody. Pro využití DPZ například v meteorologii je zapotřebí vysokých výškových hladin pro co nejširší záběr území, oproti tomu v zemědělství nebo lesnictví je vhodnější snímky pořizovat v nižších výškových hladinách. Snímky obsahují dva druhy informací. Informaci o druhu objektu a informaci o jeho poloze (Chudý, 2017).

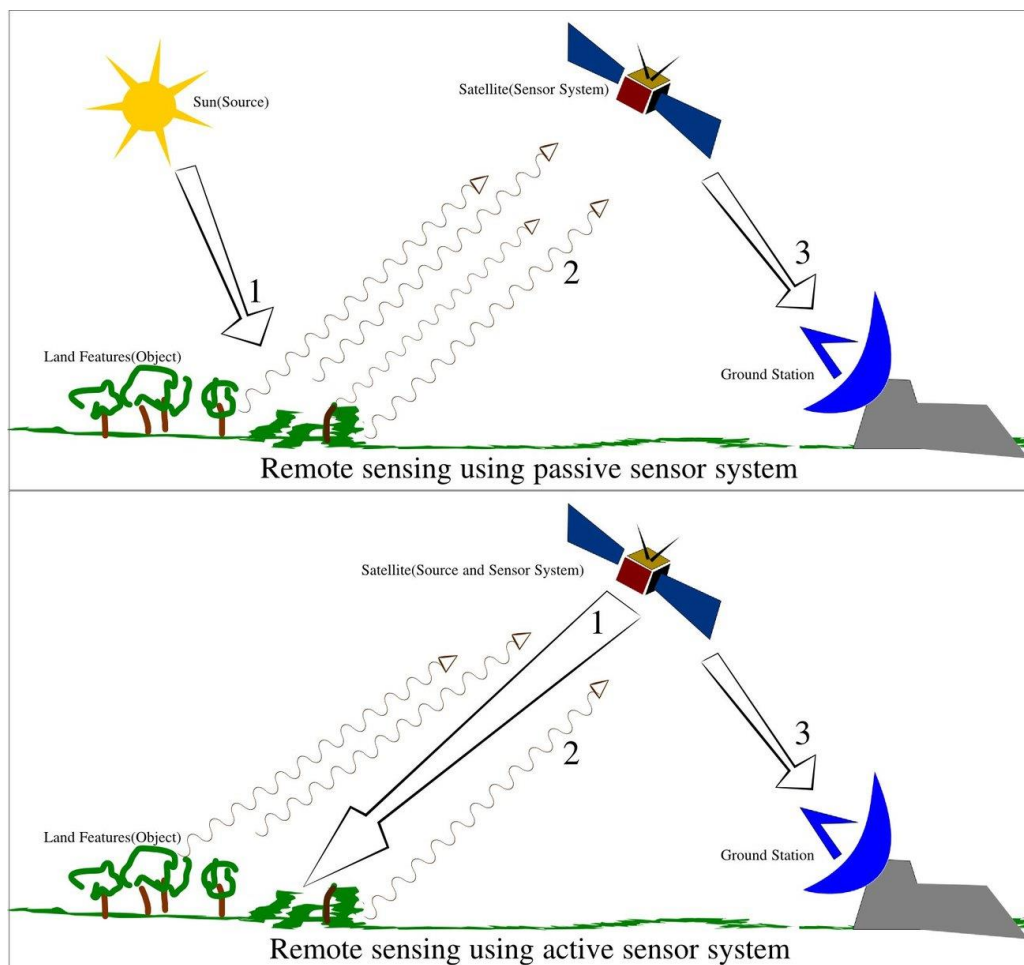
### 3.2.1 Rozdělení DPZ

Jsou známy dvě metody DPZ podle způsobu záznamu obrazu – metoda konvenční a nekonvenční.

První, takzvaná konvenční metoda neboli fotografická, převládající v počátcích DPZ, jelikož bylo využíváno analogových snímků. Výsledek metody je fotografie, obraz vzniká na celé ploše a naráz. Je geometricky přesná. Kvality snímků a rozsah snímkaného území záleží na více parametrech, těmi například jsou zvolená fotografická technika, výška letu nosiče, způsob zpracování a podmínky počasí. (Dobrovolný, 1998)

Druhá, takzvaná nekonvenční metoda se odlišuje od fotografické metody rozdílnou technikou zhotovení obrazu. K jejímu využívání pomohla digitalizace, rychlý přenos a kvalitnější technologie pro zobrazování snímků. Snímky vznikají postupně po malých obrazových prvcích, výsledkem je obrazový záznam – digitální snímek. Jeho kvalita méně závisí na podmínkách počasí. Nedisponuje takovou geometrickou přesností. Metoda nabízí možnost kvantitativního DPZ (Dobrovolný, 1998). Následné zpracování a měřické vlastnosti snímků za účelem správné topografie řeší fotogrammetrie, což je samostatná technická disciplína.

Dále dělíme DPZ podle zdrojů energie. Za účelem dosažení informací o objektech na dálku, pasivní nebo aktivní měřící zařízení přijímají záření, které je emitované nebo odražené jednotlivými objekty (obr. 3). U pasivní metody je zdrojem elektromagnetického záření slunce. Toto záření je u pasivní přímé metody odraženo od jednotlivých druhů povrchů. Při pasivní nepřímé metodě je zaznamenáváno záření, které emitují jednotlivé druhy povrchů v závislosti na své teplotě. U aktivní metody je využíváno záření, které vyzařují sama měřící zařízení a následně měří jeho odraz nebo rozptyl od objektu (Dobrovolný, 1998; Campbell & Wynne, 2011).



Obr. 3 : DPZ s využitím pasivního senzoru (nahore) a aktivního senzoru (dole)  
 (Zdroj: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Remote\\_Sensing\\_Illustration.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Remote_Sensing_Illustration.jpg))

### 3.2.2 Zdroje záření

Zdroje záření dělíme na přírodní a umělé. Přírodním zdrojem je Slunce, které se velmi podobá černému tělesu, což je takové těleso, které veškeré záření pohlcuje a je ideálním zářičem. Černá tělesa se v přírodě nevyskytují, pouze se mu podobají (Schowengerdt, 2006).

Umělými zdroji jsou lasery a radary. Oba zdroje mají koherentní záření. Radar z anglického Radio Detection and Ranging, tedy rádiové rozpoznávání a zaměřování, vyzařuje vysokofrekvenční elektromagnetické impulsy, jeho záření je polarizované a je usměrněno do úzkého svazku, odražené impulsy od objektů pod úhlem  $90^\circ$  se vrací zpět do antény a v přijímači jsou zpracovány (Halounová & Pavelka, 2008). Laser z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tedy

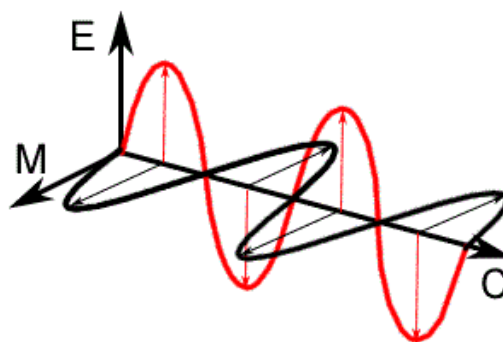
zesilování světla stimulovanou emisí záření, vysílá a přijímá viditelné a infračervené paprsky elektromagnetického spektra. Paprsek laseru může být vysílán i do atmosféry a může poskytnout informaci o ozónu (Schowengerdt, 2006).

### 3.2.3 Elektromagnetické záření

V rámci metod DPZ se pracuje s faktem, že každý objekt na zemském povrchu je nositelem specifického vzorce chování, pomocí tzv. silových polí. V nich jsou obsaženy řady charakteristik, které mohou být zaznamenávány a kvantifikovány. Jednou z forem silového pole je elektromagnetické záření, které je základním nositelem informací v rámci DPZ (Dobrovolný, 1998).

Hlavním požadavkem pro dálkový průzkum Země je energie, kterou vysíláme na objekt zájmu, pokud energie není objektem sama vyzařována. Touto energií je elektromagnetické záření, to se skládá z elektrického a magnetického pole, jejich vektory jsou na sebe v homogenním a izotropním prostředí navzájem kolmé. Obě pole se šíří rychlostí světla ( $c$ ) a jejich charakteristikami jsou vlnová délka ( $\lambda$ ) a frekvence ( $\nu$ ) (Aggarwal, 2004). Vlnová délka je délka jednoho vlnového cyklu, který lze měřit jako vzdálenost mezi po sobě následujícími vrcholy vln, je měřena v metrech nebo jednotkách z metru odvozených. Frekvence značí počet vrcholů vlny procházejících fixním bodem za jednotku času, je měřena v Hertzech. (Dobrovolný, 1998; Oršulák & Pacina, 2010). Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí je dle následujícího vzorce (1):

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

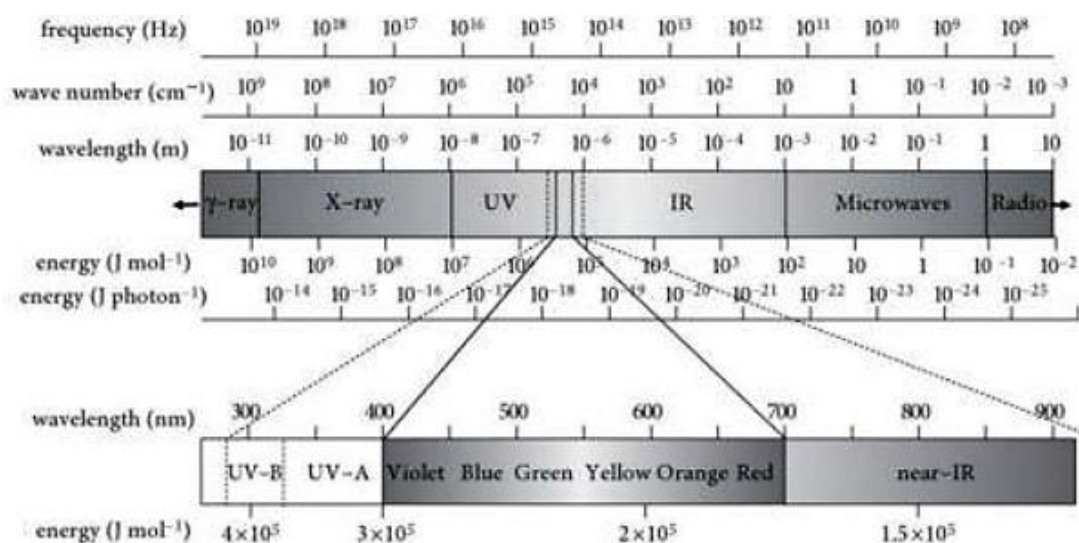


Obr. 4 : Schéma elektromagnetické vlny; E – elektrické pole, M – magnetické pole, C – rychlost světla (Oršulák & Pacina 2010).



### 3.2.4 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření v celém rozsahu vlnových délek je označováno jako elektromagnetické spektrum, to je konvenčně rozděleno na další subsystemy (obr. 5). Elektromagnetické záření je z části rozpoznáváno i lidským okem, to představuje jen úzkou část celého spektra v intervalu od 0,4 do 0,7  $\mu\text{m}$ , tato část je nazývána viditelné záření (Schott, 2007). Lze jej dělit na modré světlo (0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$ ), zelené světlo (0,5 – 0,6  $\mu\text{m}$ ) a červené světlo (0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ ). V oblasti viditelného záření fungují všechny konvenční metody pořizování obrazových dat a taktéž většina družicových a UAV systémů. Je nejvíce využíváno, i přes řadu nevýhod, jako jsou například modifikace atmosférou, neprůchodnost oblačností a nemožnost snímat v noci. Nejmenší vlnovou délku má záření s velkou energií nazývané gama, následuje rentgenové. Dále ultrafialové záření, které již je v rámci DPZ využíváno. Na ultrafialové záření navazuje již zmiňované viditelné spektrum záření. Další interval tvoří infračervené záření, to je dále děleno podle vztahu vlnových délek k oblasti viditelného záření na blízké (0,7 – 1,4  $\mu\text{m}$ ), vhodné pro topografické účely, zemědělství a lesnictví, střední (1,4 – 3  $\mu\text{m}$ ), vhodné pro studium zdravotního stavu vegetace a odlišení druhů a tepelné infračervené záření (3  $\mu\text{m}$  – 1 mm) využíváno k zjišťování tepelné bilance objektů. Závěrečné dva intervaly spektra jsou nazývány jako mikrovlnné záření a největší vlnovou délku má radiové záření (Dobrovolný, 1998; Halounová & Pavelka, 2008).



Obr. 5 : Elektromagnetické spektrum (Jones & Vaughan, 2010).

### 3.2.5 Spektrální chování vegetace

Po dopadu záření na zemský povrch, může dojít k jeho změně, podle typu povrchu, na které dopadá. Tyto změny jsou nazývány jako odraz, propustnost a pohlcení. V závislosti na vlastnostech povrchu a vlnové délce dopadajícího záření se mění mezi těmito změnami záření poměr. Na základě těchto interakcí záření s povrchy vznikají barvy objektů. Jsme schopni charakterizace objektů na základě spektrálních projevů jednotlivých povrchů a spektrálního chování, které je pro ně typické (Lillesand et al., 2015). Pokud záření dopadá na vegetaci, vlnové délky jsou absorbovány nebo odráženy. Spektrální odrazivost vegetace, dělíme do třech oblastí.

První tzv. oblast pigmentační absorpce, ve vlnových délkách 0,4 – 0,7  $\mu\text{m}$  je oblastí, kde viditelné záření v červené a modré části spektra je silně pohlcováno chlorofylem v listech, zatímco v zelené části spektra nabývá odrazivost lokálního maxima. Z toho důvodu se pro lidské oko vegetace jeví jako zelená (Hoffer, 1984).

Druhá tzv. oblast buněčné struktury, ve vlnových délkách 0,7 – 1,3  $\mu\text{m}$  infračervené části spektra. Záření je odráženo buněčnými strukturami rostlin, ty jsou u každého druhu odlišné, proto je i odlišná odrazivost a můžeme v této oblasti dobře identifikovat druhy rostlin. Specifická je v tomto pásmu oblast prudkého nárůstu v odrazivosti z viditelné na infračervenou část spektra. Jde o oblast mezi oblastí chlorofylové absorpce v červené části viditelného záření a rozptylu světla na listech v oblasti blízkého infračerveného záření. Tento nárůst je využíván jako indikace přítomnosti zelené vegetace, pro výpočet vegetačních indexů (Varshney & Arora, 2004).

Třetí tzv. oblast vodní absorpce, ve vlnových délkách 1,3 – 3,0  $\mu\text{m}$  infračerveného záření. Záření je pohlcováno vodou obsaženou v buněčných strukturách rostliny. Hodnota odrazivosti se odvíjí od obsahu vody v rostlině. Čím větší obsah vody, tím menší odrazivost a naopak. Je využíváno pro stanovení vodního stresu vegetace (Rees, 2012).

### 3.2.6 Vegetační indexy

S využitím multispektrálních snímků, můžeme stanovit vegetační indexy a tím získat komplexní informace o stavu vegetace. Vegetační indexy mají za cíl na základě znalosti spektrální odrazivosti zvýraznit vegetační složku a její vlastnosti. Využívají pro to aritmetické operace mezi dvěma nebo více pásmy spektra. Pomocí nich zjišťujeme specifické vlastnosti vegetace, jako je například obsah chlorofylu, obsah vody v listech nebo velikost listové plochy. Eliminují rušivé vlivy externích činitelů, atmosféry, půdy a dalších. Nejčastěji jsou při výpočtu vegetačních indexů využívána pásma viditelného a blízkého infračerveného záření. Vegetační indexy rozdělujeme podle způsobu výpočtu na poměrové a ortogonální. V současnosti je k dispozici přes 150 vegetačních indexů, ty se liší dle potřeby zjišťovaných specifíků (Dobrovolný, 1998; Lillesand et al., 2015).

#### 3.2.6.1 DVI

Pravděpodobně nejjednodušší vegetační index, je rozdílový Difference Vegetation Index. Vypočítáván rozdílem odrazivosti v pásmech blízkého infračerveného a červeného viditelného záření. Je velmi citlivý na hustotu vegetace a tedy okolní půdu, kterou dobře odlišuje. (Richardson & Weigand, 1977). Je počítán dle vztahu (2).

$$DVI = NIR - RED \quad (2)$$

#### 3.2.6.2 SR

Simple Ration index je jednoduchý poměrový vegetační index. Založen na principu, že hustá zelená vegetace absorbuje více červeného nežli infračerveného záření. Využíván pro odhad a monitoring zelené biomasy především v hustých porostech, protože je velmi citlivý na vegetaci. Nevhodný pro řídké porosty. Počítán podílem odrazivosti blízkého infračerveného a červeného viditelného záření (3) (Jordan, 1969).

$$SR = \frac{NIR}{RED} \quad (3)$$

### 3.2.6.3 GDVI

Green Difference Vegetation Index je modifikované DVI, nahrazením červeného pásma zeleným (4). Využíván pro zjišťování sezonních potřeb dusíku u kukuřice (Stripada et al., 2006).

$$GDVI = NIR - GREEN \quad (4)$$

### 3.2.6.4 CVI

Chlorophyll Vegetation Index je vegetačním indexem, vhodným pro odhad koncentrace chlorofylu v listech plodin, pro výpočet využívá odrazivosti ve třech pásmech spektra (5) (Vincini, 2008)

$$CVI = NIR * \frac{RED}{GREEN^2} \quad (5)$$

### 3.2.6.5 SAVI

Soil Adjusted Vegetation Index byl vytvořen za účelem potlačení vlivu půdy v okolí vegetace na výsledky indexů, které pracují s odrazivostí v červené a infračervené části spektra. Do výpočtu (6) vstupuje opravný součinitel L, který je funkcí vegetační hustoty a má hodnotu od 0 do 1. Je zapotřebí znát hustotu vegetace nebo použít optimální hodnotu  $L = 0,5$ . Tento index se využívá v oblastech s velmi řídkou vegetací, kde půdní povrch ovlivňuje výsledky (Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{(1 + L) * (NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} \quad (6)$$

### 3.3 Bezpilotní letecké prostředky

Bezpilotní letecký prostředek, z anglického Unmanned Aerial Vehicle (UAV) je létající stroj bez lidské posádky, ovládaný ze vzdáleného stanoviště, kdy je buď plně řízený pilotem, nebo letí samostatně na základě předem naprogramovaného letového plánu. Může být i plně autonomní. Hlavní rozdíl od klasického letadla je v tom, že se pilot nenachází na palubě stroje (Řehák, 2012). Úřad pro civilní letectví České republiky používá definici pro bezpilotní letadlo ve znění: Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. Je také používán termín Unmanned Aerial System (UAS), tedy systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více (LIS, 2017). Vyskytuje se i pojem Remotely Piloted Aircraft (RPA), tedy dálkově pilotované letadlo a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS), tyto pojmy pochází z Mezinárodní organizace pro civilní letectví, kterými se snaží nahradit pojmy UAV a UAS (ICAO, 2011). Veřejností jsou obecně bezpilotní prostředky označovány jako drony.

UAV nabízejí širokou škálu využití nejen pro monitoring životního prostředí a mapování povrchu. Jejich výhodou oproti družicím je dostupnost, časová a prostorová nezávislost a možnost různé konfigurace nesených senzorů (Lucieer et al., 2012).

#### 3.3.1 Historie UAV

V průběhu celého vývoje v oblasti bezpilotních prostředků převládala myšlenka a tendence pro jejich armádní využití. Nejstaršími zaznamenanými případy bylo použití draků pouštěných z bitevní lodi na počátku 19. století (Cook, 2007). V roce 1916 bylo sestrojeno první bezpilotní letadlo ovládané rádiově anglickým vynálezcem Archibaldem Montgomery Lowem, který byl průkopníkem v oblasti torpéd, letadel a řízených raket. Toto bezpilotní letadlo bylo pojmenováno Aerial Target. Následovala řada bezpilotních letadel řízených dálkově, jejichž hlavním účelem bylo dopravit torpéda, příkladem je experimentální dvouplošník, sestrojený Charlesem Ketteringem, nazvaný Kettering Bug, který startoval z vozíkové dráhy a byl schopen trefit cíl na 64 km. Poprvé byl testovaný roku 1918 (Karas & Tichý, 2016). Nad cílovou oblastí došlo k vypnutí motoru, to zapříčinilo volný pád letadla

s výbušninou na cíl. Letové mise byly naplánovány tím způsobem, že po změření vzdálenosti od místa startu k cílové oblasti byl nastaven počet otáček motoru, než došlo k jeho vypnutí (Cook, 2007).

V období 30. let 20. století byli bezpilotní prostředky využívány jako cvičné terče americké armády. Bepilotní prostředek, který si v průběhu druhé světové války nechali sestrojiti nacisté, nesl název V -1 , jednalo se o letoun, který nesl bombu, poprvé byl vypuštěn v roce 1944 proti Britům a zabil 900 civilistů. Na to po válce reagovali Američané zvýšenou snahou ve vývoji UAV. V 60. letech 20. století bylo poprvé použito antiradarové barvy na americkém AQM-34 Ryan Firebee, který byl použit při válce ve Vietnamu. V 70. a 80. letech 20. stol. se na vývoji UAV aktivně podílela Israel, představila nové technologie na modelech Scout a Pioneer, jako byla 360° kamera, která přenášela obraz v reálném čase. Následně se začala řešit i možnost napájení UAV. Největším průkopníkem ve vývoji solárního pohonu se stala NASA v rámci projektu Helios v 90. letech. Ten měl za cíl testovat maximální délku a výšku letu s napájením přes solární panely (Krock, 2012).

Vojenské UAV byly následně vyvíjeny pro monitorování nebezpečných, odlehlých území, se snahou o co nejdélší délku letu a kvalitu pořízených obrazových dat přenášených v reálném čase. Roku 1994 bylo nasazeno asi nejvíce známé vojenské UAV, MQ-1 Predator, používané americkou armádou při hledání a likvidaci teroristů na Blízkém východě (Verhoeven, 2009; Karas & Tichý 2016).



Obr. 6: Vojenské UAV MQ-1 Predator (Zdroj: <http://airforce-technology.com/predator>).

### 3.3.2 Typy UAV

Bezpilotní letecké prostředky můžeme rozdělit podle typu jejich konstrukce, mezi ty hlavní řadíme následující.

#### 3.3.2.1 Letadlo

Jedním z nejvíce používaných typů konstrukce UAV, hlavně v minulosti, je letadlo (obr. 7). Dnes je využíváno především pro jeho schopnost dlouhého doletu, nosnost a bezpečnost. Ovládání a stabilita je obdobná jako u klasického letadla. Klopení a zatáčení je zajištěno výškovými a směrovými ocasními plochami, klonění pomocí křidélek. Pohon je většinou řešen pomocí vrtule, umístěné v přední nebo zadní části. Vzlet je řešen u menších typů z ruky, u větších pak ze země, pokud je letadlo osazeno podvozkem. Výhodou je při poruše letadla možnost plachtění. Jsou dobré pro monitorování rozsáhlých ploch, díky své schopnosti dlouhého a stabilního letu. Nevýhodou je pak potřeba velkého prostoru pro vzlet a přistání. A také horší obratnost a vyšší rychlost letu, znemožňující snímání při delší expozici (Mířijovský, 2013).



Obr. 7 : UAV letadlo (Stehr, 2015)

#### 3.3.2.2 Křídlo

Křídlem je označováno UAV, které konstrukčně vychází z křídel letadla, na které působí vztlak, je bez trupu a ocasních ploch (obr. 8). Křídla se podobají tvarem i funkcí monitorovacím vojenským dronům. Jsou navržena pro největší aerodynamiku. Ovládání křídla je zajištěno pomocí dvojice řídicích ploch umístěných na odtokové hraně křídla. Způsob řízení, kdy jsou plochy využívány zároveň jako křídélka a výšková kormidla. Tyto sdružené plochy, jsou nazývány elevony. Na

většinou křidel nalezneme winglety, snižující indukovaný odpor, zlepšující klouzavost a manévrovatelnost UAV. Pohonek je tlačná vrtule, umístěná v zadní části křídla, mezi řídicími plochami. Takové řešení je výhodné pro přistávání do ruky, kdy je vyloučeno zranění se o vrtuli. Při přistávání na povrch, je také menší riziko poničení vrtule. Senzor pro snímání bývá umístěn přímo do těla UAV, u některých modelů je možné senzory měnit.

UAV tohoto typu má většinou předem naplánovanou letovou misi. V patřičném software, je mise připravena a následně nahrána do UAV, které poté letí podle připraveného plánu a snímá automaticky. Křídlo je vhodné pro monitorování rozsáhlejších ploch, výhodou je plynulost letu a díky nízké hmotnosti jeho doba letu. Nevýhodou může být vyšší rychlost a možnost rozostření snímků. Vzlet probíhá buď z ruky, nebo pomocí odpalovací rampy. Jakmile křídlo rozpozná pohyb, zapne se motor a začne nabírat potřebnou výšku. Přistávání je řešeno opět automaticky na předem určené místo, buď do ruky anebo na povrch, kdy ale hrozí nebezpečí poničení senzorů a křídla samotného (Fahlstrom & Gleason, 2012).



Obr. 8 : UAV křídlo SenseFly eBee SQ (Zdroj: <http://sensefly.com>)

### 3.3.2.3 Multikoptéra

V této době nejrozšířenější a nejpoužívanější UAV jsou tzv. multikoptéry. Jedná se o vícerotorové vrtulníky se čtyřmi nebo více nosnými rotory (obr. 9). Nejvíce se můžeme setkat s kvadrokoptéry, které disponují čtyřmi nosnými vrtulemi na ramenou, hexakoptéry, se šesti vrtulemi nebo oktokoptéry, s osmi vrtulemi. Čím více nosnými vrtulemi stroj disponuje, tím je bezpečnější a stabilnější jeho let a stoupá výkon. Výkonnější multikoptéra poté může nést těžší náklad nebo senzory a snímací zařízení. Multikoptéra vzléta směrem vzhůru, proto je vhodná i do stísněných prostorů. Další výhodou je možnost regulace rychlosti letu a schopnost



vznášení se na jednom místě. Samotný směr letu je řízen změnou otáček jednotlivých rotorů a změnou vzlaku na vrtulích. Řídící jednotka je převážně umístěna uprostřed mezi rameny, zde jsou vyhodnocována data z GPS, gyroskopu a akcelerometru, ta umožňuje kontrolu nad UAV.

Nevýhodou je, vzhledem k počtu rotorů, vyšší energetická náročnost stroje a tedy i kratší doba letu. Přistání probíhá buď do ruky anebo na povrch. Při poruše vrtule se multikoptéra stává špatně ovladatelnou, proto je bezpečnější volit šesti a více vrtulové stroje. Multikoptéry také bývají často vybaveny záchranným padákem (Fahlstrom & Gleason, 2012; Řehák, 2012).



Obr. 9 : UAV oktokoptéra DJI MG-1S (Zdroj: <http://dji.com>)

### 3.3.3 Využití UAV v zemědělství

Bezpilotních prostředků se v zemědělství využívá především jako platformy pro získání obrazových dat v rámci dálkového průzkumu Země, dovoluje nám to pohled z jiné perspektivy, díky kterému můžeme sledovat více aspektů, než jsme schopni z pozemního průzkumu. Jedná se o ekonomicky a časově efektivní zdroj dat pro hodnocení obhospodařovaných polí (Candiago et al., 2015). UAV mohou být opatřeny různými druhy kamer a senzorů. Nejvíce využívaná obrazová data jsou pro určení zdraví vegetace. Pokud je UAV vybaveno multispektrální kamerou, jsme schopni následně spočítat různé vegetační indexy, například vegetační index NDVI (Duan et al., 2017). Tento index je využíván již desítky let, data byla tehdy získávána pomocí družic nebo letadel. Jejich obrazové rozlišení, ale nebylo dostatečné na přesné zaměření pozemku, natož samotných rostlin. S příchodem UAV technologií, se ale mnohem více zlepšila přesnost a rozlišení pořízených snímků a tím pádem i možnosti využití. Taková úroveň informací nám umožňuje identifikovat i jednotlivé vegetační druhy (Komárek et al., 2018), zpřesnit výpočet vegetačních indexů, či zjistit v zárodku

vliv onemocnění nebo škůdců (Pederi & Cheporniuk, 2015). Následně mohou být na správné místo aplikována hnojiva nebo pesticidy. Pokročilé geoprostorové NDVI mapy mohou také sloužit v případě přírodních katastrof na polích k přesnějšímu odhadu vzniklých škod, porovnáním dat před a po vzniklé škodě. Takové využití může být uplatňováno i v rámci pojišťovacích procedur (FAO & ITU, 2018).

Další možné využití UAV je v rámci živočišné produkce. Kdy můžeme využít tepelné snímkování v rámci tepelného infračerveného spektra pro kontrolu stáda, každý jedinec je na snímcích zobrazen jako teplotní bod a můžeme je snadno a přesně počítat a to zejména při snížené viditelnosti, kdy by konvenční metody zvířata stresovaly. Obdobně můžeme odhalit i případné predátory poblíž stáda. Pokud se zaměříme na samotná zvířata, jsme schopni pomocí termokamery srovnávat jejich tělesnou teplotu a tím odhalit případná onemocnění a reagovat na ně (Webb et al., 2017). Pomocí snímků v tepelné části spektra lze vytvořit i mapu zavodnění pozemku, která odhalí vláhové rozdíly, abychom mohli upravit zavlažovací režim na pozemku tak, aby byl na všech místech dostatek vláhy a nedocházelo tak k případným ztrátám na výnosu (Berni et al., 2009). Výhodou u tohoto druhu snímků je, že nepotřebují dalších výpočtů, vidíme ihned dle barevné škály, jak jsou na tom místa, co se týče teploty, kdy tmavá modrá reprezentuje teploty nízké, zatímco vyšší teploty jsou reprezentovány světlejšími barvami (Webb et al., 2017).

UAV jsou využívány také pro postřik plodin, tato technologie byla prvně implementována v 80. letech 20. století v Japonsku, na bezpilotních helikoptérách, vybavených postřikovým setem a nádrží s pesticidy. V Japonsku je pomocí UAV postřikováno 40 % všech rýžových polí. Metoda je totiž mnohem levnější než postřik pomocí zemědělských letadel (Enderle, 2002). V této době mají takto upravené UAV (obr. 10) kapacitu nádrže přes deset litrů, se schopností postřiku přes jeden litr za minutu, což jim dovoluje pokrýt jeden hektar pozemku za deset minut (FAO & ITU, 2018). Aby takové použití bylo efektivní, je zapotřebí již zmiňovaných analýz obrazových dat, abychom mohli využívat zvýšené dávky tam kde je potřeba, ale také omezit plýtvání, tam kde potřeba není.

Pro zemědělce je flexibilita a efektivnost, kterou bezpilotní prostředky nabízí velmi významná, protože včasné použití pesticidu, může pomoci minimalizovat ztrátu od hrozeb, jakými jsou škůdci, plevel nebo onemocnění a navýšit kvalitu výnosu.

Stejným způsobem lze aplikovat i hnojiva. Nejnovější technologie umožňují jednomu pilotovi kontrolovat i pět UAV najednou a tím ještě znásobit rychlost a efektivitu postřiku. Výhodné je využití UAV pro postřik především v pozdních fázích růstu rostlin, kde by se pracovník s manuálním postřikovačem těžko dostával skrz porost a zabralo by to velké množství času, proto UAV výrazně snižují i výdaje na pracovní sílu (Pederi & Cheporniuk, 2015).



Obr. 10 : UAV DJI Agras MG-1S, využívané pro postřik plodin  
(Zdroj: <https://www.dji.com/cz/mg-1s>).

Pomocí fotogrammetrické metody Structure from Motion, jsme schopni s UAV, získat 3D digitální model terénu, na základě kterého, můžeme zjišťovat různé topografické faktory pozemků. Využívají se například pro výpočet eroze nebo modely akumulace vody a svažitosti (Pineux et al., 2017). UAV jsou také schopny dostat se do těžko dostupných a odlehlých míst, jako jsou například rýžové terasy nebo plantáže v horských regionech (FAO & ITU, 2018).

Mapovací a snímkové schopnosti UAV platform s různými senzory může být využito v průběhu celého procesu produkce, pro lepší plánování a zvýšení produktivity. Než začne vegetační cyklus, UAV technologie může být využita ke zhodnocení půdních podmínek a tedy i potenciálních výnosů. Zbarvení půdy může prozradit její kvality, vláhu, proudění vody. V průběhu vegetačního období mohou být prováděny časté cyklické lety pro monitoring plodin a proces produkce, z důvodu plánování a v případě objevení nějakého problému, rychlé reakce. Za pomoci UAV snímků odvozených vegetačních indexů, pak můžeme sledovat růstové fáze a indikovat nejlepší čas pro sklizeň (Candiago et al., 2015). Spojením všech dostupných zdrojů informací a dat, jako je předpověď počasí, půdní mapy a data zajištěná pomocí UAV, může zemědělec využít veškerý potenciál pole

a maximalizovat výnos (Zhang & Kovacs, 2012). Širší využití UAV v zemědělství budou zpomalovat především letecké regulace a legislativní nařízení, které jsou v některých státech velmi přísná. Dále také potřebná znalost zpracování pořízených dat pomocí fotogrammetrických programů (Hardin & Jensen, 2011).

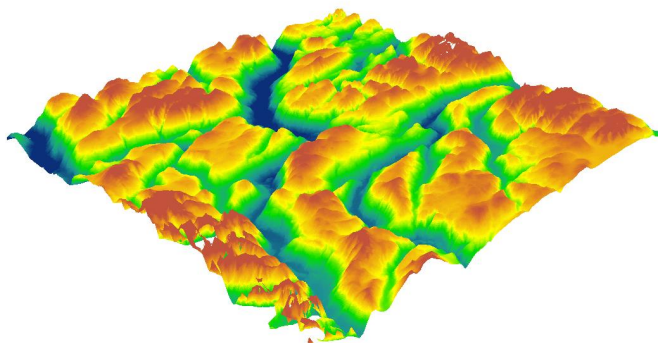
### **3.4 Digitální model terénu**

V anglickém jazyce se používá termínu DEM (digital elevation model), který zastřešuje další termíny, kterými jsou DTM (digital terrain model) a DSM (digital surface model). V české literatuře je používáno označení DMT (digitální model terénu), které zastřešuje termíny DMR (digitální model reliéfu) a také DMP (digitální model povrchu).

DMR představuje digitální reprezentaci topografické plochy reliéfu, vyjadřuje nadmořskou výšku zemského povrchu. DMP představuje povrch terénu a přírodní i antropogenní objekty na něm se vyskytující. Digitální modely terénu se odlišují od reálného zemského povrchu, ale obecně se usiluje o největší přiblížení. Podkladem pro digitální model jsou body se třemi souřadnicemi a atributy. Jedná se o digitální reprezentaci souvislého terénu, která zobrazuje průběh hodnot, který vzniká prostorovými interpolacemi mezi body s naměřenými hodnotami (obr. 11). Interpolační metody dopočítávají pomocí matematických funkcí pravděpodobná data pro místa, kde data chybí. Uvnitř modelovaného území je možné v libovolných bodech odvodit nadmořské výšky. DMT dělíme podle typu ploch na polyedrický model terénu, který je skládán z nepravidelné trojúhelníkové sítě, rastrový model terénu, složený z čtvercové sítě a plátový model terénu, který je složitější a může být hladce modelován terén (Li et al., 2004).

V dnešní době je také stále častěji využíváno fotogrammetrické metody Structure from Motion, která z dvourozměrných fotografií je schopna získat 3D prostorové souřadnice. Inspirací je zrak, díky kterému si vizualizujeme 3D strukturu objektů z 2D obrazu za pomoci pohybu kolem objektů. Nejčastěji za pomoci UAV, je nesena kamera, která snímá dané místo z více rozdílných úhlů a jsou pořizovány překrývající se snímky. Na snímcích, jsou následně pomocí algoritmů ve fotogrammetrickém software hledány totožné charakteristické body, jako jsou například hrany objektu. Takový bod musí být nalezen, alespoň na třech snímcích. Následně je vytvořeno řídké 3D bodové mračno, poté dochází ke svazkovému

vyrovnání všech parametrů. Vypočítání 3D souřadnic mračna bodů pomocí algoritmu PMVS (Patch based Multi View Stereopsis) a tvorbě modelu (Westoby et al., 2012). Takto vytvořený DMT, lze využít pro účely precizního zemědělství (Rokhmana, 2015).



Obr. 11: Vizualizace digitálního modelu terénu nekonkrétní plochy (Zdroj: <https://gisgeography.com/free-global-dem-data-sources>).

### 3.5 Fenologie

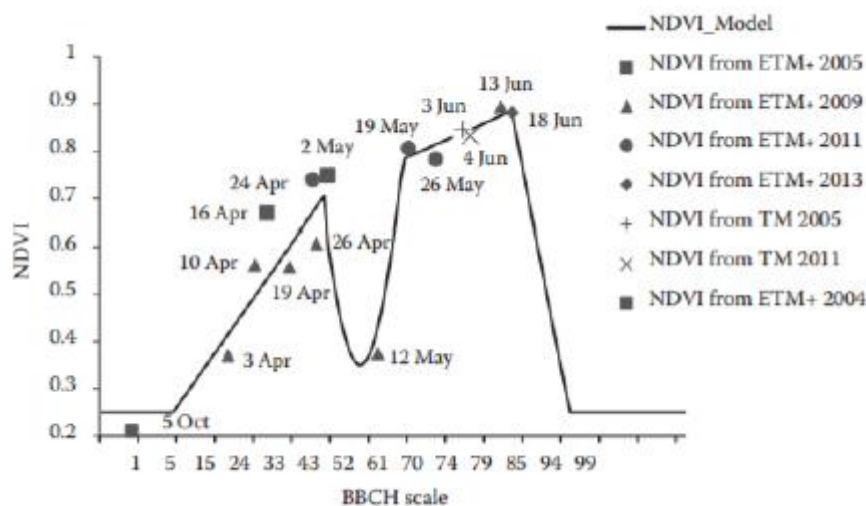
Fenologie je vědou zabývající se periodicky opakujícími se biologickými fenomény, mezi něž se řadí růst rostlin, kvetení, migrace nebo rozmnožování. Takové jevy se v přírodě dějí s určitým opakováním. Intenzita a načasování těchto jevů se ovšem v reakci na přírodních podmínkách stanoviště mohou meziročně lišit. Fenologie je převážně využívána v oblastech změny klimatu a reakcí vegetace na takové změny (Krška, 2006). Fenologické fáze po sobě nastávají v rozdílně dlouhých časových obdobích. Pro popis samostatných fází, ve kterých se plodina zrovna nachází, se používá mezinárodní stupnice BBCH. To je původně německá stupnice, zkratka, která se používá pro její označení je odvozena z písmen institucí, jež se podílely na vymýšlení této stupnice, Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie. Tabulky se připravují pro jednotlivé druhy, eventuálně celé skupiny plodin (Hess et al., 1997).

V rámci základního rozdělení podle stupnice BBCH je 10 základních stádií růstu (tab. 1), ta se následně dělí do dalších podstádií růstu (Enz & Dachler, 1997).

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

Tab. 1 : Základní fenologické fáze podle stupnice BBCH (Zdroj: Autor).

Za účelem určení fenologických fází vegetace můžeme použít i vegetačních indexů. Z důvodu změn v rámci fenologických fází během roku dochází ke změnám v monitorování vegetace za pomoci indexu NDVI a to z důvodu vývoje spektrální odrazivosti během vegetační sezóny (obr. 12). Hodnoty NDVI se v počátečních fázích růstu zvyšují. Dosažením růstové fáze metání – BBCH 50 u obilnin, je snížena odrazivost důsledkem růstu květenství, jež z části zakrývá zelené listové plochy. Hodnota NDVI se opět zvyšuje po konci kvetení – BBCH 69, z důvodu změn ve struktuře a barvě rostliny po ukončení kvetení. Po začátku zrání – BBCH 80, rostliny mění barvu ze zelené do žluté a odrazivost postupně klesá (Domínguez et al., 2015). V období sklizně se hodnoty NDVI pohybují okolo 0,2 (Franch et al., 2015).



Obr. 12: Vliv fenologických fází na hodnotu indexu NDVI u pšenice ozimé (*Triticum aestivum* L) (Domínguez et al., 2015).

## 4. Metodika

### 4.1 Lokalita

Zájmový pozemek se nachází na území Pardubického kraje, v obci Vendolí (49°43'48"N; 16°24'14"E). Pozemek má rozlohu 26,4 hektaru a jeho povrch je mírně zvlněný s průměrným sklonem 6 %. Rozsah nadmořských výšek je mezi 543–571 m n. m. Na pozemku hospodaří Zemědělské družstvo Vendolí, je hospodařeno běžnými orebnými technologiemi a je zaveden systém střídání plodin, mezi něž především patří pšenice ozimá, ječmen jarní a řepka ozimá.

Půda na zájmové ploše je tvořena modální kambizemí na podkladu vápničitých pískovců. Některé části pozemku jsou silně erodovány, hlavně ve svažitéjších částech pozemku. Zájmový pozemek se nachází v bramborářské výrobní oblasti. Roční srážky dosahují 700 milimetrů, průměrná teplota se pohybuje v rozmezí 5 až 7 °C. V období zpracování praktické části práce byla na pozemku pěstována pšenice ozimá (*Triticum aestivum* L.) (obr. 13; obr. 14). Naměřené srážkové úhrny a průměrné teploty v rámci jednotlivých fenologických fází pšenice ozimé od zasetí v říjnu 2016 do sklizně v srpnu 2017 jsou uvedeny v tabulce (tab. 2).

Pšenice ozimá		
Fenologická fáze	Srážky (mm)	Teplota (°C)
BBCH 0-19	166,1	1,7
BBCH 20-29	88,9	9,0
BBCH 30-59	75,4	16,2
BBCH 60-89	173,5	20,1
Suma	503,9	-
Průměr	126,0	11,8

Tab. 2 : Srážkové úhrny a průměrné teploty v průběhu fází růstu pšenice ozimé na lokalitě Vendolí (Zdroj: Autor).



Obr. 13: Pšenice ozimá na lokalitě Vendolí ve fázi odnožování (Zdroj: Autor).



Obr. 14: Pšenice ozimá na lokalitě Vendolí ve fázi kvetení (Zdroj: Autor).

## 4.2 NDVI

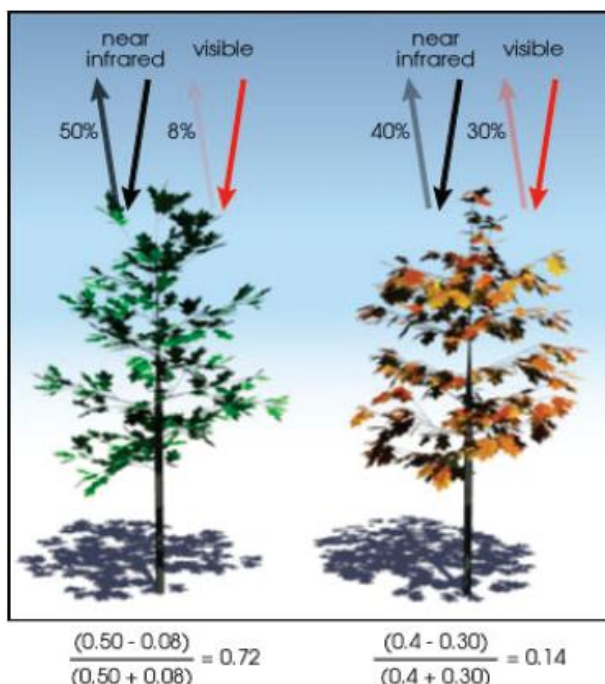
Na zájmovém pozemku byly zjišťovány hodnoty vegetačního indexu NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), byly použity 3 různé platformy k získání hodnot. Vegetační index NDVI slouží především k zjišťování zdravotního stavu a vodního stresu vegetace, množství dusíku v rostlinách, časových změn a průběhu fenologických fází a odhadům výnosů zemědělských plodin (obr. 15). To umožňuje korelace množství biomasy, listové plochy, obsahu vody a chlorofylu v rostlinách s indexem NDVI (Lukas, 2012).

Vyjadřuje vztah mezi odrazivostí v červené části viditelného spektra (RED, 0,6–0,7  $\mu\text{m}$ ) a v blízké infračervené části spektra (NIR, 0,7–0,9  $\mu\text{m}$ ) (Kolář et al., 1997). Obecně zde platí, že čím více záření je odraženo v oblasti infračerveného záření, tím je vegetace hustší. Hodnoty indexu se pohybují v intervalu (-1;1). Hodnoty blíží se nule značí nízkou intenzitu vegetačního pokryvu (Weier & Herring,



2000). Nejčastěji se hodnoty indexu pohybují v rozmezí 0,2 až 0,8 (Rouse et al. 1974). Pokud nabývá záporných hodnot je výsledek ovlivněn vyšší odrazivostí v oblasti viditelného spektra než v oblasti blízkého infračerveného, to může být zapříčiněno oblačností, ledem, sněhem nebo skalami (Hadjimitsis et al., 2009). V měřítku globálním může sloužit jako indikátor kolísání a změny klimatu (Lukas, 2012). NDVI se vypočte dle vzorce (7) (Rouse et al., 1974).

$$NDVI = \frac{NIR + RED}{NIR - RED} \quad (7)$$



Obr. 15: Příklad výpočtu NDVI, vlevo zdravá rostlina, vpravo stresovaná rostlina (Stehr, 2015).

### 4.3 GreenSeeker

GreenSeeker Handheld Crop Sensor je přístroj od společnosti Trimble, sloužící k ručnímu měření vegetačního indexu NDVI pro bodová měření na pozemku (obr. 16). Tento optický snímač pracuje na základě využití světelných LED diod, které vysílají paprsky v červeném (660 nm) a blízkém infračerveném (780 nm) záření, které je odraženo vegetací. Hodnota odrazivosti je zaznamenána fotodiodami. Měření probíhá po dobu stisknutí spouště přístroje, na displeji se průběžně zobrazují aktuálně naměřené hodnoty NDVI. Po uvolnění spouště se ukáže na displeji průměrná hodnota

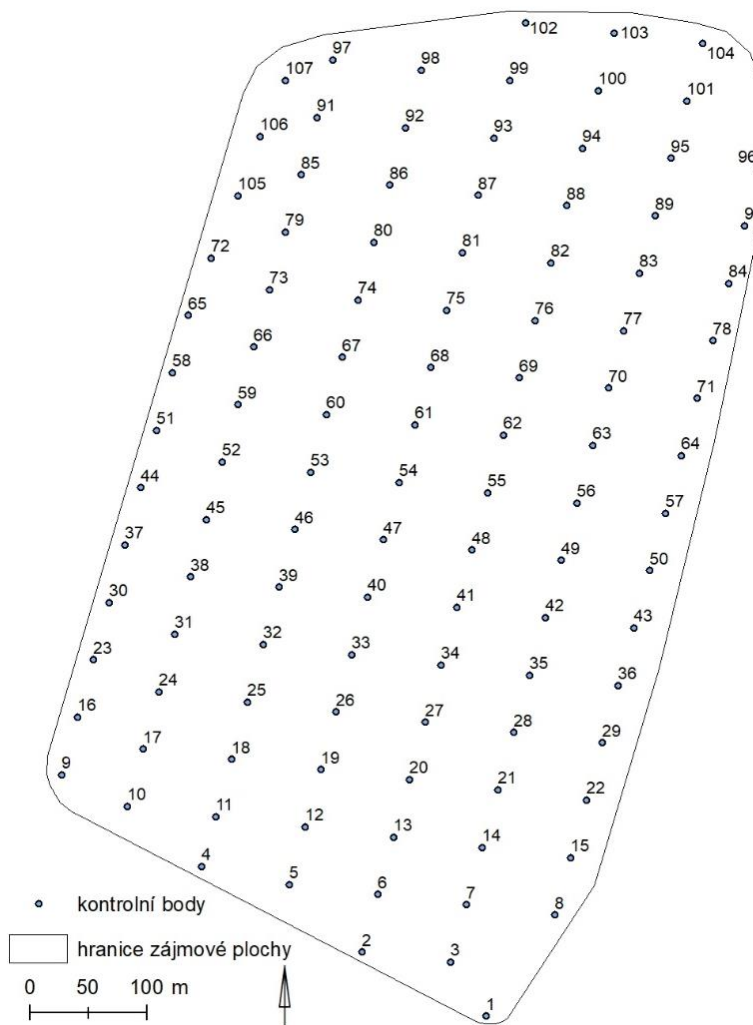
NDVI za celou dobu měření (Debuisson et al., 2010). Výhodou tohoto ručního aktivního senzoru je jeho nezávislost na slunečním záření, proto můžeme měřit v kteroukoliv denní dobu (Verhulst & Govaerts, 2010). A také nezávislost na prostorovém a časovém rozlišení družicových dat pro zjištění NDVI. Při používání ručního snímače si můžeme čas a hustotu měření volit sami pohybováním se po pozemku (Walsh et al., 2013). Při využívání GreenSeekeru také nedochází k nepřesnosti v NDVI způsobené vlivem atmosféry a zakřivení zemského povrchu, ke kterému může docházet při využití družicových snímků, jelikož měříme v těsné blízkosti povrchu a vegetace (Verhulst et al., 2011). Přesnost měření dosahuje 70 % a více (Martin et al., 2012). Snímač by měl být v průběhu měření držen 60–120 cm nad vegetací. Měřicí pásmo paprsků je oválné a zvětšuje se s výškou nad povrchem od 25 do 50 cm (Trimble, 2019). Lze jej využít pro zjišťování výnosového potenciálu, zdraví a vitality vegetace, vodního stresu apod. (Walsh et al., 2013).



Obr. 16: Měření hodnoty NDVI, pomocí přístroje GreenSeeker (Zdroj: Autor).

Pro měření hodnot NDVI za pomoci GreenSeekeru, byla na zájmovém pozemku nejprve stanovena síť 107 kontrolních bodů rozprostírajících se po celé jeho ploše (obr. 17). Body se souřadnicemi byly nahrány do navigačního GPS přístroje Garmin, za pomoci kterého se poté zjišťovala poloha v rámci pozemku a snímaly se hodnoty NDVI GreenSeekerem na daných kontrolních bodech, které se zapisovaly do tabulek. Měření hodnot NDVI pšenice ozimé probíhalo ve třech termínech, 1. měření probíhalo

25. března 2017 ve fázi odnožování, 2. měření probíhalo 20. května 2017 ve fázi sloupkování a 3. měření probíhalo 6. července 2017 ve fázi kvetení. Následně byly souřadnice kontrolních bodů vloženy do programu ArcMap 10.5 a byl vytvořen bodový shapefile. Bodům byly v atributové tabulce přidány hodnoty NDVI do sloupců za každé měření.



Obr. 17: Kontrolní body na zájmové ploše (Zdroj: Autor).

#### 4.4 Pořízení UAV dat

Pro nálet lokality bylo využito UAV křídla SenseFly eBee Classic, schopného plně automatického letu na základě předem definované mise (obr. 18). Parametry UAV:

- rozpětí: 96 cm
- hmotnost: 0,69kg
- dosah rádia: 3 km
- rychlost: 40-90 km/h
- maximální doba letu: 50 min
- maximální nalétaná vzdálenost: 33 km
- GSD: až 1,5 cm / pixel
- použitý senzor: MultiSPEC 4C

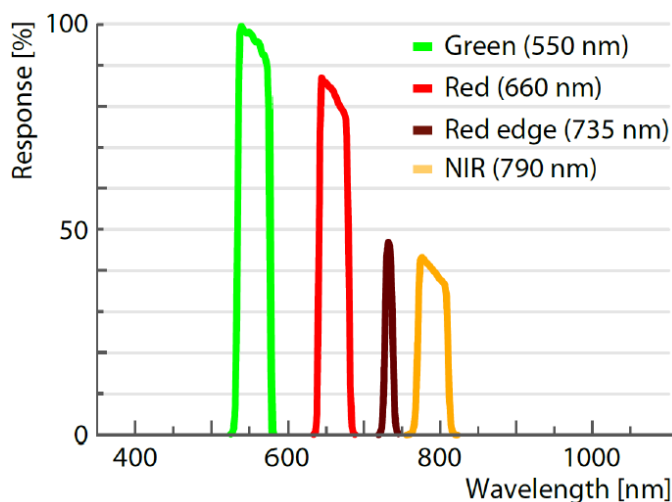


Obr. 18 : UAV křídlo SenseFly eBee, použité pro nálet lokality (Zdroj: Autor)

Samotné UAV neslo multispektrální snímač MultiSPEC 4C, který snímá ve čtyřech pásmech spektra vhodných pro monitoring vegetace. Jedná se o spektra zelené, červené, červené okrajové a blízké infračervené. Graf níže zobrazuje odezvy vlnové délky každého snímače (obr. 19). Před použitím snímače je nutné provést jeho kalibraci na kalibrační desce, aby nedošlo ke zkreslení výsledných snímků. Součástí snímače je čidlo příchozí radiace, které je umístěno v horní části křídla a je využito pro kalibraci, kdy zkalibruje senzory pro vysokou přesnost dle aktuálních světelných podmínek, čímž omezí jejich chybu. Pořízená data jsou uložena na SD kartu.

Parametry snímače:

- senzory: 4x 1/3 “ CMOS
- rozlišení: 4x 1,2 Mpix
- maximální světelnost: f/1,8
- formát výstupu: čtyři 10 bitové snímky ve formátu TIFF (vlastní výstup pro všechna pásma)
- váha: 160 g



Obr. 19: Rozložení vlnových délek jednotlivých senzorů multipektrální kamery MultiSPEC 4C (Zdroj: MultiSPEC DC Camera User Manual)

Pro naplánování a provedení letové mise byl použit software pozemní kontrolní stanice eMotion 2, kde operátor kontroluje průběh letu. Byla vymezena plocha zájmu, nastaveny parametry letu. Letový plán byl prováděn využitím kolmých letových linií s podélným a příčným překryvem snímků 70 % pro zajištění kvalitních dat.

Získané snímky byly zpracovány ve fotogrammetrickém programu Pix4Dmapper 3.2 do podoby ortorektifikované mozaiky, vegetačního indexu NDVI a digitálního modelu terénu (DMT), využitím metody Structure from Motion. Snímky byly pořízeny v souřadnicovém systému WGS84. Velikost pixelu rastrů NDVI je 0,12 m, u DMT je to 0,59 m. Snímkování probíhalo ve dvou termínech, stejných jako ruční měření NDVI, pomocí GreenSeeker, pro možnost porovnání dat z obou platform. První ve fázi odnožování pšenice ozimé 25. března 2017 a druhé ve fázi sloupkování

20. května 2017. Třetí snímkování pomocí UAV, 6. července 2017 nebylo možné uskutečnit z technických důvodů, proto byl pro tento termín použit satelitní snímek z družice Landsat 8. Výsledné rastry byly exportovány do programu ArcMap 10.5 pro další zpracování.

## 4.5 Landsat 8

Družice Landsat 8 byla vynesena na oběžnou dráhu 11. února 2013, ve spolupráci mezi NASA a USGS. Cílem mise je sbírat a archivovat multispektrální obrazová data zemského povrchu, zpětná konzistentnost se snímky z předešlých misí a bezplatná dostupnost dat pro veřejnost.(NASA, 2017). Družice se pohybuje po heliosynchronní polární oběžné dráze od severu k jihu ve výšce 705 kilometrů s inklinací 98,2°. Doba oběhu Země je 99 minut, stejné místo na Zemi snímá s frekvencí šestnáct dnů (USGS, 2016a). Družice byla navržena na délku mise pět a čtvrt roku, s dostatkem paliva až na deset let. Družice Landsat 8 nese dva přístroje: Operational Land Imager (OLI) a Thermal Infrared Sensor (TIRS) (USGS, 2016b).

### Operational Land Imager (OLI)

OLI využívá více než 7 000 lineárních detektorů pro jedno spektrální pásmo, což poskytuje přesnější data s nižším počtem pohyblivých částí senzoru. Šířka snímaného pásu je 185 kilometrů a snímání zemského povrchu je tímto senzorem prováděno v devíti spektrálních pásmech:

- Pásmo 1 : 0,435–0,451  $\mu\text{m}$  (Coastal Aerosol)
- Pásmo 2 : 0,452–0,512  $\mu\text{m}$  (Blue)
- Pásmo 3 : 0,533–0,590  $\mu\text{m}$  (Green)
- Pásmo 4 : 0,636–0,673  $\mu\text{m}$  (Red)
- Pásmo 5 : 0,851–0,879  $\mu\text{m}$  (Near-Infrared)
- Pásmo 6 : 1,566–1,651  $\mu\text{m}$  (SWIR 1)
- Pásmo 7 : 2,107–2,294  $\mu\text{m}$  (SWIR 2)
- Pásmo 8 : 0,503–0,676  $\mu\text{m}$  (Panchromatic)
- Pásmo 9 : 1,363–1,384  $\mu\text{m}$  (Cirrus)

Senzor OLI je hlavním operačním senzorem družice Landsat 8. Data jsou poskytována s rozlišením 30 metrů, u panchromatického pásma 15 metrů (USGS 2016b).

## Thermal Infrared Sensor (TIRS)

Stejně jako u senzoru OLI, je TIRS senzor vybaven velkým počtem citlivých detektorů. Senzor byl k misi Landsat 8 připojen později jako doplněk, aby přispěl k dalšímu vývoji v této oblasti DPZ. Senzor snímá data v termální části spektra ve dvou spektrálních pásmech s rozlišením 100 metrů (USGS 2016b):

- Pásmo 10: 10,600–11,190  $\mu\text{m}$  (TIRS 1)
- Pásmo 11: 11,500–12,510  $\mu\text{m}$  (TIRS 2)

Družicový snímek pořízený družicí Landsat 8 6. 7. 2017 zahrnující zájmovou lokalitu, byl získán od společnosti USGS, volně dostupný na internetové adrese <http://earthexplorer.usgs.gov>. Snímek byl nejdříve zpracován v programu ENVI 5.3, kde byla provedena atmosférická korekce FLAASH. Následně bylo použito čtvrté a páté pásmo snímku pro výpočet vegetačního indexu NDVI, pomocí funkce NDVI. Poté byl vytvořený rastr otevřen v programu ArcMap 10.5 pro další manipulaci a převzorkování funkcí Resample na velikost pixelů, jako mají snímky z UAV.

## 4.6 Stanovení výnosu

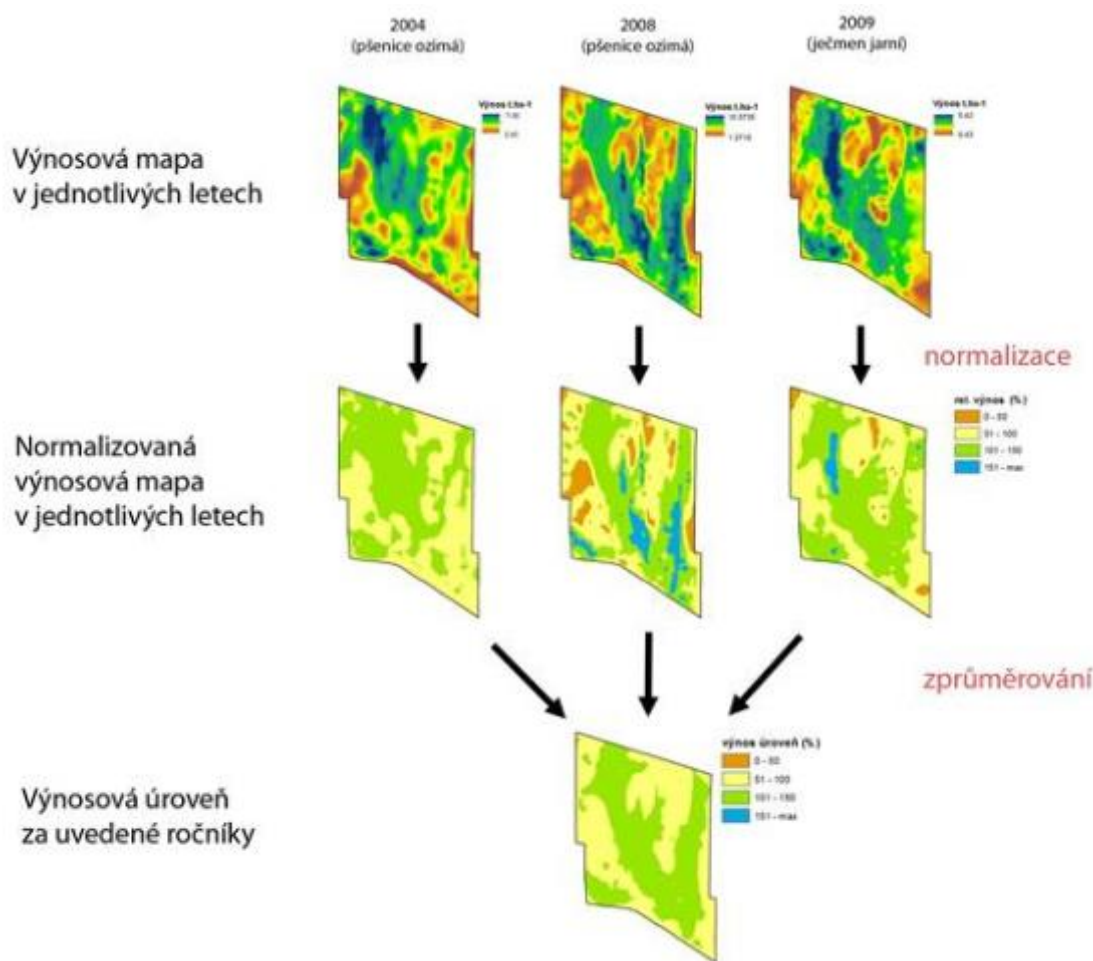
Výnos je chápán jakožto kvantitativní interpretace úrovně pěstování rostlin, jež jsou závislé na celé řadě faktorů půdního prostředí či klimatu. (Rüsch, 2001) V rámci systému precizního zemědělství je důležité výnos mapovat. Sběr dat pro vytvoření výnosové mapy probíhá při sklizni, pomocí speciálních senzorů umístěných na sklízecích mlátičkách. S využitím navigačních satelitních systémů jsou data ze sklízecích mlátiček, přesně lokalizována a přiřazena k místu na poli. Následně jsou data za pomoci geoinformačních systémů zpracována, vstupní bodová data je zapotřebí nejdříve upravit (odstraněním chybových, nulových a odlehlých hodnot, přepočítat na konstantní vlhkost zrn) a poté pomocí prostorových interpolací vytvořit celoplošné rastrové mapy, které vyjadřují výnos v absolutních jednotkách (t/ha; kg/ha) v každém pixelu. Tím je vytvořena výnosová mapa, ta je podkladem pro zhodnocení úspěšnosti hospodaření (Škoda, 2014). Z těchto map jsme schopni po normalizaci výnosu, tedy přepočítání absolutního výnosu na relativní, stanovit výnosovou úroveň pozemku.

Podle Lukas et al. (2011) lze zprůměrováním historických výnosových map s relativním výnosem eliminovat vlivy rozdílných ročníků a plodin na výnos a tím získat přehled o výnosovém potenciálu a jeho rozložení na pozemku. Normalizovaný výnos se vypočte takto (8):

$$Výnos_{norm} = \frac{Výnos_{pixel}}{\text{průměrný } Výnos_{plot}} \times 100 \quad (8)$$

$Výnos_{pixel}$  je hodnota každého pixelu, tedy výnos na daném místě, průměrný  $Výnos_{plot}$  je průměr výnosu na celém pozemku. Výsledkem je normalizovaný výnos, který stanovuje, o kolik procent byl nižší nebo vyšší než průměrný výnos celého pozemku daného roku. Normalizování výnosu dovoluje použít data z výnosových map rozdílných plodin nebo odrůd s odlišným výnosovým potenciálem, jelikož je zohledňován pouze poměr k průměrnému výnosu, ne absolutní hodnoty výnosu. Výnosová úroveň se stanovuje v rámci dvou kroků, nejprve normalizací jednotlivých výnosových map a poté jejich zprůměrováním za více let (obr. 20). Zprůměrování výnosových dat za více let umožňuje identifikaci oblastí na pozemku s dlouhodobým nadprůměrným nebo podprůměrným výnosem (Lukas & Neudert, 2016). V případě této práce bylo využito dat z výnosových map pšenice ozimé z roku 2014, ječmenu jarního z roku 2015 a řepky ozimé z roku 2016. Výsledný rastr byl dále zpracován a převzorkován na rozlišení DMT v prostředí ArcMap 10.5.





Obr. 20: Proces stanovení výnosové úrovně (Lukas & Neudert, 2016).

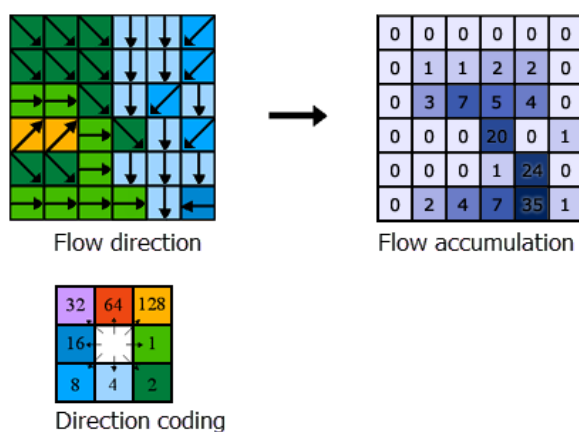
#### 4.7 Model svažitosti a akumulace odtoku vody

Pro zhodnocení vlivu topografických faktorů na výnosový potenciál, bylo zapotřebí jejich vypočítání, jednalo se o model svažitosti Slope a model akumulace odtoku vody Flow Accumulation.

Pro vytvoření modelů byl využit program ArcMap 10.5. Vstupním rastrem ve funkci Slope pro model svažitosti byl rastr DMT. Model reprezentuje maximální míru změny nadmořské výšky pro každou buňku digitálního modelu terénu vůči sousedním buňkám (ESRI, 2016). Svažitost výsledného rastru je udávána ve stupních.

Pro výpočet modelu akumulace odtoku vody funkcí Flow Accumulation, je nejprve nutné vytvoření modelu směru odtoku vody pomocí funkce Flow Direction, který je odvozen z rastru digitálního modelu terénu. Směr odtoku vody je definován nalezením směru nejvíce strmého spádu z každé buňky, existuje osm platných výstupních směrů vztahujících se k osmi sousedním buňkám buňky, do kterých může

voda proudit. Je vypočítán jako změna v hodnotě z, dělena vzdáleností a vynásobena 100. Vzdálenost je počítána mezi středy buněk. Když je nalezen směr nejstrmějšího klesání, výstupní buňka je kódována hodnotou reprezentující tento směr. Tento přístup se běžně označuje jako osmi-směrný průtokový model (D8) (obr. 21) (Jenson & Domingue, 1988). Následně byl rastr Flow Direction použit jako vstupní rastr pro výpočet modelu Flow Accumulation. Hodnota buněk ve výstupním rastru je dána počtem buněk, které vtékají do každé buňky nového rastru. Buňky s vysokou akumulací odtoku vody jsou plochy s koncentrovaným tokem a mohou být použity k identifikaci linií toku. Výstupní buňky s nulovou akumulací odtoku vody jsou lokální topografické vyvýšeniny (ESRI, 2016).



Obr. 21: Princip stanovení modelu akumulace odtoku vody (ESRI, 2016).

## 4.8 TWI

Dalším počítaným topografickým faktorem byl Topography Wetness Index zkráceně TWI je běžně používaný algoritmus pro detekci distribuci vody v rámci pozemku. Je založen na předpokladu, že topografie určuje pohyb vody terénem a proto také prostorové rozložení půdní vlhkosti. (Schmidt & Persson, 2003). TWI je definováno vztahem (9) (Beven & Kirkby, 1979):

$$TWI = \ln(A_s / \tan\beta) \quad (9)$$

Kde  $A_s$  je specifická plocha povodí a  $\beta$  je lokální sklon. TWI používá jako vstupy rastrová data modelu akumulace odtoku vody ( $A_s$ ) a modelu svažitosti ( $\beta$ ). Oblasti s nízkým gradientem shromažďují vodu (vysoké hodnoty TWI), zatímco strmé plochy mají tendenci ji ztrácet (nízké hodnoty TWI). Hodnoty TWI jsou nedimenzionální relativní indexy a liší se podle typu krajiny a DMT (Kumhálová et al., 2014). Zmiňovaný výraz se vstupy modelů akumulace odtoku vody a svažitosti, byl spočítán pomocí funkce Raster Calculator v programu ArcMap 10.5, výsledkem byl rastr s hodnotami TWI.

#### **4.9 Statistické zpracování dat**

Rastry DMT, výnosové úrovně, TWI, modelů svažitosti a akumulace odtoku byly nejprve zpracovány v prostředí ArcMap 10.5, tím způsobem, že byla nejprve okolo všech 107 kontrolních bodů vytvořena 1 m obalová zóna funkcí Buffer, následně byla využita funkce Zonal Statistics as Table a u všech rastrových vrstev byla vypočítána popisná statistika v rámci těchto zón. Stejným způsobem byly zpracovány i NDVI snímky z UAV a Landsat 8. Následně, použitím funkce Table to Excel byly hodnoty převedeny do formátu tabulkového procesoru Excel 2016, zde byla data vyselektována. Pro další statistické zpracování byla u všech vrstev použita průměrná hodnota pixelů v rámci zóny.

Pro samotné statistické analýzy byl využit program Statistica 13.5. Pro vyhodnocení vztahu mezi výnosovým potenciálem a topografickými faktory byla využita regresní analýza. Nejprve byla do programu Statistica vložena data z Excel sešitu, která obsahovala hodnoty výnosové úrovně, DMT, modelu svažitosti, modelu akumulace vody a TWI pro 107 kontrolních bodů. Následně bylo v záložce Statistics zvolena vícenásobná regrese. Volíme závislou proměnnou Y, v případě této práce tedy výnosovou úroveň. Dále zvolíme nezávislé proměnné – regresory X, jsou jimi DMT, model svažitosti, model akumulace vody a TWI. Zahrnuty byly všechny 4 regresory. Použita metoda Forward stepwise – kroková vzestupný výběr, která do modelu postupně přidává potenciální regresory, ty jsou testovány dle vybraných testových kritérií, do modelu jsou přidávány proměnné, které statisticky významně vylepší model, proces se opakuje, dokud již není další proměnná, která by model statisticky významně vylepšila v rámci nastavených kritérií. (Lee & Koval, 1997). Také byly vytvořeny krabicové a bodové grafy.

Dále byly do programu Statistica vloženy Excel sešity obsahující jednotlivá měření hodnot NDVI. Pro všechna měření tedy měření č. 1 z března, č. 2 z května a č. 3 z července 2017 byla nejdříve vypočtena korelace mezi daty z GreenSeekeru a UAV, respektive GreenSeekeru a Landsat 8 u měření č.3 v záložce Basic statistics. Poté byla v záložce Basic statistics, zvolena možnost Frequency tables a vypočten Shapiro-Wilk test normality pro zjištění, zda datové sady nabývají normálního rozdělení či ne.

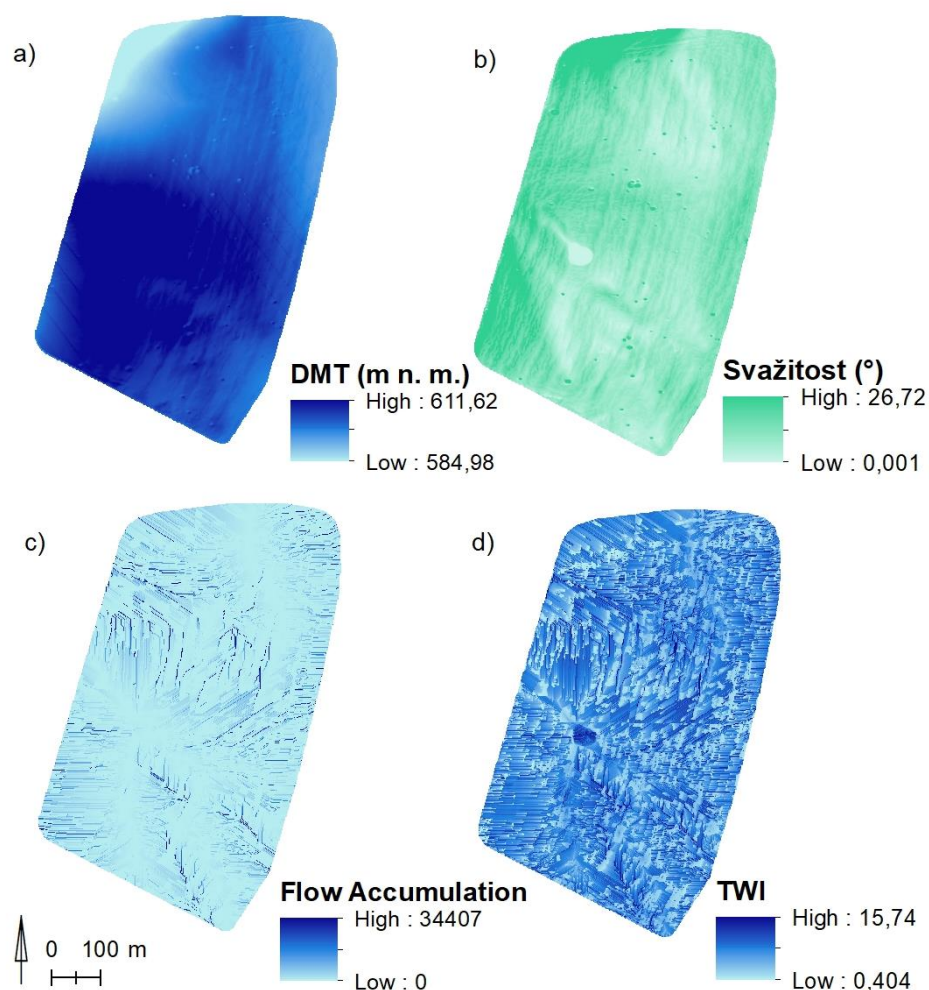
Testující nulovou hypotézu  $H_0$ : Populace má normální rozdělení. Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .  $H_1$ : Populace nemá normální rozdělení.

Po zjištění výsledků testů normality byl pro srovnání naměřených hodnot NDVI z jednotlivých snímačů GreenSeekeru a UAV, respektive GreenSeekeru a Landsat 8 použit neparametrický test, pro dva závislé vzorky. Wilcoxon matched pairs test – Wilcoxonův párový test, který testuje rozdíl mediánů mezi jednotlivými vzorky. Byly zhotoveny krabicové grafy.

Testována byla nulová hypotéza  $H_0$ : Medián rozdílů je nulový. Na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .  $H_1$ : Medián rozdílů je různý od nuly.

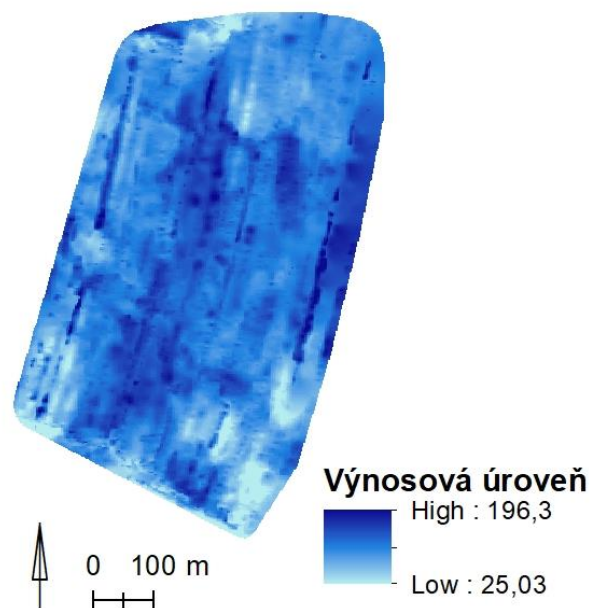
## 5. Výsledky

V rámci hlavního cíle práce byl na lokalitě Vendolí pro zájmový pozemek nejdříve vytvořen výsledný digitální model terénu (DMT), pomocí, kterého byly vypočítány výsledné modely svážitosti (Slope), akumulace odtoku vody (Flow Accumulation) a topography wetness index (TWI) (obr. 22) Hodnoty z těchto čtyř výsledných rastrů vstupovaly jako regresory do modelu regresní analýzy.



Obr. 22: Výsledné rastry: a) digitální model terénu, b) model svážitosti, c) model akumulace odtoku vody, d) topography wetness index (Zdroj: Autor).

Výsledný rastr výnosové úrovně s výnosovým potenciálem, který vstupoval do regresní analýzy, jako závislá proměnná (obr. 23).



Obr. 23: Rastr výnosové úrovně s výnosovým potenciálem (Zdroj: Autor).

Vícenásobná regrese typu forward stepwise, použita pro stanovení závislosti mezi závislou proměnnou a regresory, kde  $N = 107$ , statisticky signifikantní na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  dopadla následovně. Do modelu byly zahrnuty dva regresory, regresor Svažitosti ( $p < 0,05$ ) a regresor TWI ( $p > 0,05$ ).

Koeficient determinace modelu  $R^2 = 0,06112964$  a hodnota  $p < 0,05$ .

Výsledná rovnice regresního modelu, závislosti na dvou proměnných (10).

$$Y = 106,9601 - 2,0255 * \text{Svažitost} + 2,9134 * \text{TWI} \quad (10)$$

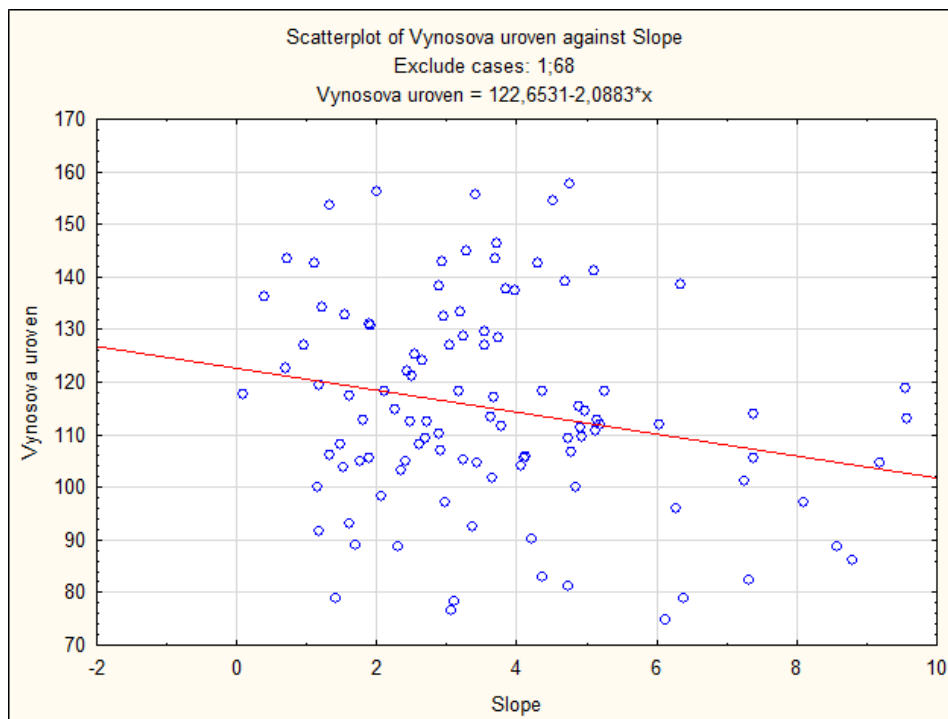
Následně proveden krabicový graf pro výnosovou úroveň, kde byly detekovány 2 odlehlé hodnoty. Hodnota č. 1 s podezřele nízkým výnosovým potenciálem a č. 68 s podezřele vysokým výnosovým potenciálem. Hodnoty (1; 68) vynechány z regrese provedené na nejvýznamnějšího kandidáta na regresor, tedy Svažitost, kde  $N = 105$ , statisticky signifikantní na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  dopadla následovně.

Koeficient determinace modelu  $R^2 = 0,049002$  a hodnota  $p < 0,05$ .

Výsledná rovnice regresního modelu, závislosti výnosové úrovně na svažitosti (11).

$$Y = 122,6531 - 2,0833 * \text{Svažitost} \quad (11)$$

Výsledkem regresního modelu byla statisticky významně prokázána závislost výnosového potenciálu na svažitosti (obr. 24). Čím větší svažitost pozemku, tím nižší výnosový potenciál.



Obr. 24: Bodový graf zobrazující regresní model závislosti výnosové úrovně na svažitosti (Zdroj: Autor).

Pro dílčí cíl, tedy 3 ruční měření hodnot NDVI a jejich srovnání s hodnotami NDVI z UAV a družice, byla vypočtena nejprve korelace,  $N=107$ , statisticky významná na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

1. měření: GS a UAV:  $r = 0,70402$ ;  $p < 0,05$
2. měření: GS a UAV:  $r = 0,422422$ ;  $p < 0,05$
3. měření: GS a L8:  $r = 0,064506$ ;  $p > 0,05$

Výsledky Shapiro-Wilk testu normality pro jednotlivá měření.  $N = 107$ , statisticky signifikantní na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

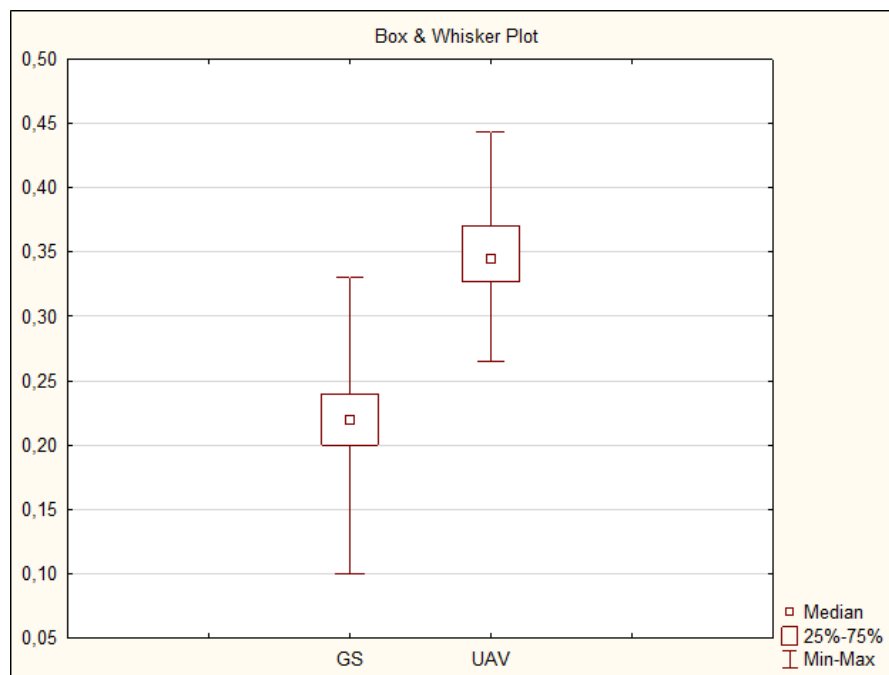
- 1. měření: GS:  $W = 0,974679$ ;  $p < 0,05$   
UAV:  $W = 0,981263$ ;  $p > 0,05$
- 2. měření: GS:  $W = 0,744453$ ;  $p < 0,05$   
UAV:  $W = 0,470284$ ;  $p < 0,05$
- 3. měření: GS:  $W = 0,973724$ ;  $p < 0,05$   
L8:  $W = 0,899423$ ;  $p < 0,05$

Pro posouzení, zda se měření mezi jednotlivými snímači NDVI liší, bylo využito Wilcoxonova párového testu,  $N = 107$ , statisticky signifikantní na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

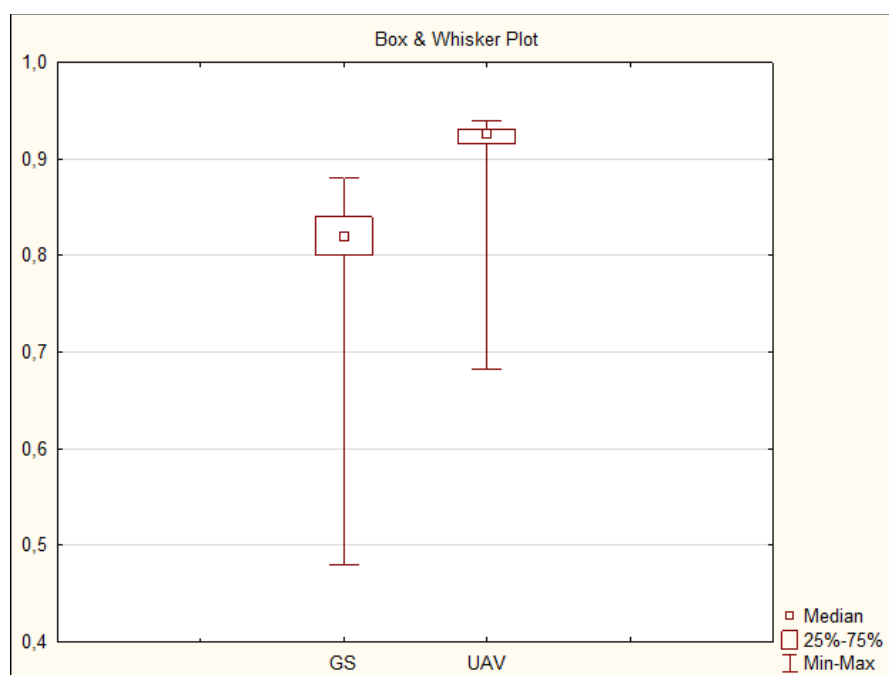
- 1. měření: GS a UAV:  $Z = 8,979045$ ;  $p < 0,05$
- 2. měření: GS a UAV:  $Z = 8,777025$ ;  $p < 0,05$
- 3. měření: GS a L8:  $Z = 8,975937$ ;  $p < 0,05$

U všech testovaných měření můžeme zamítnout  $H_0$ , to znamená, že naměřené hodnoty NDVI GreenSeekerem a UAV se statisticky signifikantně liší u 1. měření (obr. 25), i u 2. měření (obr. 26). Můžeme říci, že UAV nadhodnocuje naměřené hodnoty. Statisticky signifikantně se liší i hodnoty NDVI u 3. měření (obr. 27), srovnání GreenSeekeru s družicí Landsat 8, můžeme říci, že hodnoty NDVI z družice Landsat 8 jsou podhodnocené.

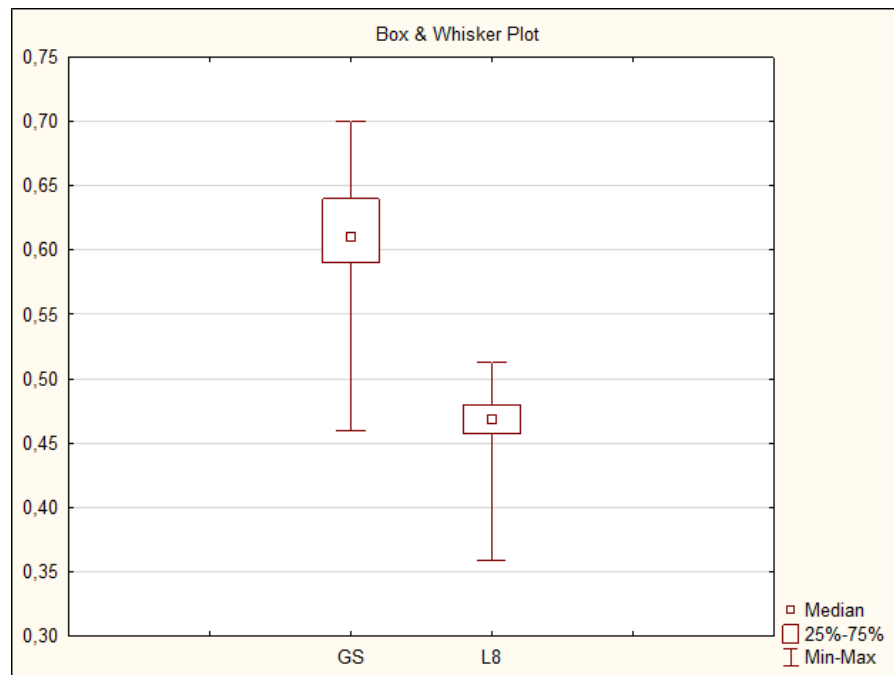




Obr. 25: Srovnání mediánů hodnot NDVI u 1. měření, GS: Me = 0,22;  
UAV: Me = 0,34 (Zdroj: Autor).



Obr. 26: Srovnání mediánů hodnot NDVI u 2. měření, GS: Me = 0,82;  
UAV: Me = 0,93 (Zdroj: Autor).



Obr. 27: Srovnání mediánů hodnot NDVI u 3 . měření, GS: Me = 0 ,61;  
L8: Me = 0 ,47 (Zdroj: Autor).

## 6. Diskuse

V oblasti precizního zemědělství se v posledních letech významně rozmohlo využívání bezpilotních prostředků pro dálkový průzkum Země. Jedná se o ekonomicky a časově efektivní zdroj dat pro hodnocení obhospodařovaných polí (Candiago et al., 2015). V rámci této práce bylo využito technologie UAV a snímků jím pořízených k vyhodnocení vztahu vybraných topografických faktorů a výnosového potenciálu.

Výšková data mohou být pořízena ze tří hlavních zdrojů, pomocí pozemního měření, již existujících topografických map a dálkovým průzkumem (Ouédraogo et al., 2014). Právě získávání obrazových dat využitím UAV k odvození výšek se v posledních letech stále více používá. Jsme schopni získávat data s vysokým prostorovým a časovým rozlišením a tedy i dostatečně přesné ortofotomozaiky a digitální modely terénu. Pro tyto důvody se využití dat z UAV v zemědělství aplikuje pro mnoho různých využití (Zhang & Kovacs, 2012).

Je obecně známo, že topografie má velmi důležitou roli na růst rostlin a voda je nejčastějším limitním faktorem v zemědělství (Schmidt & Persson, 2003). Variabilita výnosu je zapříčiněna mnoha faktory, mezi které patří teplota, distribuce srážek, půdní a rostlinné faktory a topografie. Tento fakt je důležitý pro pochopení managementu na pozemcích v systému precizního zemědělství. Z těchto důvodů mají výnosové mapy tendenci se lišit každý rok (Guo et al., 2012). Nejvíce využívané topografické faktory pro vysvětlení vlivu topografie na výnos jsou: digitální model terénu (Iqbal et al., 2005; Murphy et al., 2009), sklon (Pilesjö et al., 2005), zakřivení (Guo et al., 2012), model akumulace odtoku vody (Marques da Silva & Silva 2008; Kumhálová et al., 2013), topography wetness index (Schmidt & Persson, 2003; Sørensen et al., 2006), vzdálenost od odtokových linií (Marques da Silva & Silva, 2006) a compound topographic index (Momm et al., 2013). Automatizace analýzy terénu a použití DMT umožňuje kvantifikaci různých topografických a hydrologických proměnných včetně svažitosti, orientace, sítě odtokových linií, směru odtoku, akumulace odtoku, délky toku, indexu transportu sedimentů, indexu vlhkosti a dalších. Dříve byly tyto proměnné odvozovány z map nebo polních průzkumů. V posledních letech jsou přímo odvozovány z DMT (Tribe, 1992). V rámci této práce byly vybrány následující topografické faktory: digitální model terénu, model svažitosti, model akumulace odtoku vody a TWI.

Prostorovou variabilitu výnosu a vliv topografie lze monitorovat mnohými způsoby, rozšířené jsou pozemní měření, měření pomocí sklízecí mlátičky, dálkový průzkum družicemi, letadly a UAV (Jones & Vaughan, 2010). Dálkový průzkum pomocí družic sice pokrývá velké plochy s určitým opakováním, jako například družice Landsat, která je v zemědělství široce využívána na velkých plochách, ale pro precizní zemědělství není příliš vhodná, kvůli svému nízkému rozlišení (Zhang & Pierce, 2013). Pro tuto práci bylo k získání snímků, použito bezpilotního prostředku typu křídlo, SenseFly eBee, které je schopné pořizovat snímky s vysokým rozlišením a je možné zachytit mikro topografii pozemků, kdykoliv je to nutné. Velikost pixelu ve výsledném DMT činila 0,59 m. Moravec et al. (2017) srovnávali digitální modely terénu z více platforem. Dospěli k výsledku, že vhodnějším DMT pro vysvětlení výnosové variability je DMR 4G, i s nižším rozlišením 5 x 5 m, mělo lepší výsledek než DMT z UAV a sklízecí mlátičky. Mezi všemi vstupními DMT, ale nebyl nalezen statisticky významný rozdíl, tvrdí tedy, že i s méně přesnými a volně dostupnými daty, lze dosáhnout dostatečně kvalitních výsledků.

I před tím než byly dostupné technologie výnosového monitoru a mapování výšek, většina farmářů tušila, že na kopcích jsou nižší výnosy, než ve spodních partiích a nížinách. Což potvrzuje i řada výzkumníků například Spomer & Piest (1982) sledovali, že výnosy kukuřice byly větší v nižších a středních částech kopce než na jeho vrcholu. Obdobně Stone et al. (1985), sledovali nejvyšší výnosy kukuřice v místech, která byla zásobena povrchovou a podpovrchovou vodou z vyšších míst svahu. Vrchní pozice kopcovitých polí bývají erodovány a mají světlejší barvu půdy, kameny na povrchu, málo organické hmoty a obsahují více jílovitých anebo písčitých částic. Takové podmínky se z části vytvořily z důvodu pohybu svrchních vrstev půdy po svahu způsobené vodou, větrem a obděláváním (Frye et al., 1982; Lindstrom et al., 1992). Pierson & Mulla (1990) zjistili, že objem organické hmoty v půdě se zvyšoval, když měřili směrem z výše položených míst do nižších míst svahu. S větším sklonem se zvyšuje rychlost proudění povrchové vody a snižuje se doba zadržení vody a potenciál pro její infiltraci. Zakřivení pozemku částečně určuje koncentraci nebo rozptyl povrchové vody. Negativní zakřivení (konkávní) koncentruje vodní tok, který zvyšuje infiltraci a pozitivní zakřivení (konvexní) rozptyluje vodní tok a snižuje infiltraci (Daniels et al., 1987; Timlin et al., 1998). Nadmořská výška, sklon a zakřivení mají také nepřímý efekt na vodní zásobu a infiltraci pro svůj vztah

k půdním podmínkám a erozi. Ztráta ornice, organické hmoty a expozice jemnějších nebo zhutněných půdních částic v horních polohách svahu může snížit rychlost infiltrace vody a vodní kapacitu v těchto polohách svahu (Frye et al., 1982; Afyuni et al., 1993). Dle Marques da Silva & Silva (2008) je výnos vyšší tam, kde se soustřeďuje vodní tok. Ebeid et al. (1995) také zdůraznili jak důležitá je dostupnost vody, jako faktoru ovlivňující výnos. V důsledku těchto přímých a nepřímých účinků mají nižší polohy často k dispozici více vody pro růst plodin než vyšší a šikmé polohy v rámci pozemků (Hanna et al., 1982; Afyuni et al., 1993).

Důležitost dostupnosti půdní vláhy a vody pro vyšší výnos potvrzují i výsledky této práce, kde v prvním regresním modelu bylo ze 4 regresorů, vstupujících do vícenásobné krokové regresní analýzy s vzestupným výběrem, zařazeno pouze TWI a model svažitosti. TWI, je v rámci výpočtu odvozeno z modelů svažitosti a modelu akumulace odtoku vody. Určuje oblasti s nízkým gradientem, které vodu shromažďují a mají vysoké hodnoty TWI a strmé plochy, které mají tendenci vodu ztrácet a nabývají nízkých hodnot indexu. Kumhálová et al. (2014) tvrdí, že TWI může nahradit model akumulace odtoku vody a model svažitosti, jako vysvětlující faktor vlivu topografie na výnos pozemku. TWI v modelu ovlivňuje výnos pozitivně, jeho koeficient v rovnici má hodnotu 2,9134, to znamená, že při každém navýšení indexu TWI o jednotku se výnosový potenciál navýší o hodnotu koeficientu. Samotné TWI, ovšem nebylo statisticky signifikantním regresorem. Pouze dotvářelo model s regresorem modelu svažitosti, vyjadřující sklon na pozemku. Celý model byl ovšem statisticky významný na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Koeficient determinace modelu nabýval hodnoty  $R^2 = 0,06112964$ , to znamená, že celý model vysvětluje výnosový potenciál pouze přibližně z šesti procent.

Při obdobném experimentu s daty z roku 2005, Kumhálová (2010) testovala vztah mezi výnosem pšenice ozimé a topografickými faktory a půdními charakteristikami. Výnosová variabilita byla modelem vyhodnoceným pomocí krokové dopředné regrese, ve kterém figurovaly jako nezávislé proměnné topografická data získaná pomocí sklízecí mlátičky, DMT, modelu svažitosti a modelu akumulace odtoku vody a také organický uhlík a absolutní dusík v půdě, vysvětlena z 3,5 %.

Důvodem statisticky neprůkazného výsledku vztahu TWI k výnosovému potenciálu by mohla být metoda jeho výpočtu. Jak upozorňuje Kopecký & Čížková (2010), metod výpočtu TWI se v oblasti ekologie používá mnoho, přičemž různí se

především parametr  $A_s$ , tedy specifická plocha povodí. Který charakterizuje tendenci místa přijímat vodu z výše položených míst, zatímco parametr  $\beta$  – lokální sklon charakterizuje tendenci místa vodu ztrácet, index je tak relativní mírou dostupnosti dlouhodobé půdní vlhkosti (Gruber & Peckham, 2008). V případě této práce je použit jako parametr  $A_s$ , rastr modelu akumulace odtoku vody, který je vypočítán pomocí algoritmu D8, dostupného v programu ArcMap 10.5, takovou metodu výpočtu použila například i Kumhálová et al. (2014). V případě algoritmu D8 voda odtéká do jedné přilehlé buňky s nejstrmějším spádem (Jenson & Domingue, 1988). Kopecký & Čížková (2010) ve své studii prokázali lepší výsledky výpočtu TWI s využitím algoritmů směru odtoku, kde voda může odtékat do dvou, či více okolních buněk.

Ve druhém modelu, který byl v rámci této práce vypočítán regresní analýzou, nefigurovaly dvě odlehlé hodnoty výnosového potenciálu a byl počítán na nejvýznamnější regresor, tedy model svažitosti, vyjadřující sklon terénu na pozemku. Výsledný model byl statisticky významný na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Svažitost měla v rovnici záporný koeficient s hodnotou -2,0833, což znamená, že s každým stupněm sklonu, klesá výnosový potenciál o hodnotu koeficientu. Koeficient determinace modelu  $R^2 = 0,049002$ , vyjadřuje, že výnosový potenciál je modelem vysvětlen z méně než pěti procent. Obdobný výsledek předvedl Kaspar et al. (2003) v jeho studii, kde měla svažitost negativní závislost a negativní koeficient v regresním modelu pro průměrný výnos za 6 let u kukuřice. Ve dvou rocích byla svažitost pozitivně korelována s výnosem, což přisuzují tomu, že v těchto letech byly abnormálně vysoké srážky a rostliny v níže položených a plochých místech byly stresovány nadměrnou vlhkostí. Také Godwin & Miller (2003) pro které byla topografie nejzřetelnější příčinou pro variabilitu výnosu, z důvodu přímého vlivu na mikroklimaticky vázané půdní faktory jako je teplota půdy. I Fietz et al. (1994) ve své studii sledovali změnu výnosu v průběhu dvou po sobě jdoucích let v závislosti na sklonu a orientaci svahu. Na základě výsledků této práce, lze potvrdit vliv topografie na výnosový potenciál pozemku. Podle výsledného modelu, má na výnosový potenciál vliv svažitost pozemku tak i dostupnost půdní vlhkosti.

Dále byly v této práci měřeny hodnoty NDVI pomocí ručního přístroje GreenSeeker a ty porovnávány s hodnotami NDVI získanými z UAV a družice Landsat 8. Datová sada naměřená při 1. měření, pomocí GreenSeekeru má medián 0,22. Medián dat z UAV je 0,34. Při 2. měření mají data z GreenSeekeru medián 0,82

a z UAV 0,93. V rámci posledního 3. měření byla hodnota mediánu u dat z GreenSeekeru 0,61 a z družice Landsat 0,47. Při prvním a druhém měření hodnoty z GreenSeekeru a UAV vzájemně korelovaly středně silně. Téměř nulová korelace byla zaznamenána při třetím měření mezi hodnotami GreenSeekeru s družicí Landsat. Testované rozdíly mezi hodnotami z použitých snímačů u všech tří měření byly vyhodnoceny jako statisticky významné.

Přesnost měření NDVI je ovlivňována biofyzikálními charakteristikami prostředí a efekty měřících zařízení (Gutman, 1999). Hodnoty NDVI se také mění v důsledku přírodních podmínek, jako je teplota a vodní režim (Crusiol et al., 2016). Úhel senzoru a slunce, radiometrická kalibrace a půdní okolí také ovlivňují odrazivost vegetace (Mulla, 2013). Senzory se také liší ve vlnových délkách, v kterých snímají. GreenSeeker snímá odrazivost červeného záření o vlnové délce 660 nm a infračerveného záření o 780 nm. Senzor, který neslo UAV, snímá červené záření o vlnové délce 660 nm a infračervené záření o 735 nm. Družice Landsat 8, snímá odrazivost červeného záření v intervalu od 636–673 nm a infračervené záření v intervalu 851–879 nm. Odlišnosti v měřených vlnových délkách snímači se také odraží na výsledných hodnotách NDVI (Mulla, 2013).

Při prvním měření, byla pšenice ozimá ve fázi odnožování a hodnoty NDVI byly nižší, při druhém měření ve fázi sloupkování se hodnoty NDVI výrazně zvýšily, naopak při třetím měření ve fázi kvetení byl zaznamenán pokles hodnot. Takové výsledky jsou v souladu se studií Domínguez et al. (2015) a také Li et al. (2015), kteří zaznamenali snížení hodnot NDVI u pšenice ozimé ve fázích 51-69 BBCH v důsledku růstu květenství.

Na základě výsledků práce, lze tvrdit že UAV při měření nadhodnocovalo. To potvrzuje i studie Duan et al. (2017), kde využívaly pro měření NDVI u pšenice také ruční přístroj GreenSeeker a data pomocí UAV, ty byly vzájemně silně korelovány, ale hodnoty z UAV vždy vyšší. Hodnoty NDVI získané pomocí snímků z družice Landsat 8, která je velmi využívána v oblasti environmentálních věd, především pro množství spektrálních pásem, které snímá a volnou dostupnost (Kumhálová et al. 2014), naopak hodnoty měla podhodnocené oproti GreenSeekeru. Snímky z této družice mají velmi hrubé prostorové rozlišení, proto není příliš vhodná pro precizní zemědělství (Zhang & Pierce, 2013). Slabou korelaci mezi hodnotami NDVI sbíranými pomocí GreenSeekeru a těmi ze snímků družice Landsat 8 sledovaly

i Kumhálová & Matějková (2017). Verhulst & Govaerts (2010) tvrdí, že GreenSeeker, může být využíván k hodnocení prostorové variability růstu plodin v průběhu sezóny. Kvalitních a přesných výsledků dosahovali při ve studii za pomoci GreenSeekeru i Crain et al. (2012). Podle Kumhálová & Matějková (2017) není GreenSeeker vhodný pro odhad výnosu na větších pozemcích z důvodu časové náročnosti sběru dat a nutnosti použít interpolace pro získání map, oproti získání plošných dat z družice Landsat dostupných volně na internetu. Duan et al. (2017) považuje za hlavní výhodu UAV oproti GreenSeekeru rychlost získání dat. Výsledky této práce dokazují, že využití platformy pro měření hodnot NDVI nejsou vzájemně zastupitelné.



## 7. Závěr

Vztah mezi topografií a výnosovým potenciálem zájmového pozemku byl na základě výsledků této práce potvrzen. Pro získání topografických dat bylo využito bezpilotního leteckého prostředku schopného plně automatického letu, moderní metody využívané v precizním zemědělství. Data jím získaná byla následně zpracována pomocí fotogrammetrického software a geografického informačního systému. Vybrané topografické faktory a jejich vztah k výnosovému potenciálu půdního bloku, byly vyhodnoceny pomocí regresní analýzy.

Výsledky modelů ukazují, že na výnosový potenciál má vliv především svažitost pozemku. Zároveň také dostupnost vody v půdě. V oblastech pozemku s větším sklonem, kde se voda hůře infiltruje, z důvodu vyššího povrchového a podpovrchového odtoku, výnosový potenciál klesá. Zatímco v oblastech, kde je zajištěna dostupnost vody v půdě se výnosový potenciál zvyšuje. Nicméně nebyla zjištěna statistická významnost regresoru TWI, který vyjadřuje dostupnost vlhkosti v půdě. Výsledky nám tedy ukazují, že topografické charakteristiky ovlivňují výnosovost plodin a je potřeba s tím počítat při jejich pěstování.

Dílčím cílem, který se tato práce snažila vyhodnotit, byla vzájemná zastupitelnost platform, běžně využívaných v rámci precizního zemědělství pro sběr hodnot vegetačního indexu NDVI, který je v precizním zemědělství využíván k zjišťování zdravotního stavu a vodního stresu vegetace, množství dusíku v rostlinách, časových změn a průběhu fenologických fází a odhadům výnosů plodin. Pro pozemní měření byl použit ruční přístroj GreenSeeker, kterým byly hodnoty NDVI měřeny na 107 kontrolních bodech. Pěstovanou plodinou byla pšenice ozimá. Měření probíhalo ve třech fenologických fázích. Dvakrát bylo využito bezpilotního prostředku s multispektrální kamerou, pro získání obrazových dat. Pro třetí měření byl použit snímek z družice Landsat 8.

Po vypočítání hodnot NDVI ze snímků, byly hodnoty ze snímacích platform využity pro jednotlivé termíny měření, statisticky analyzovány. Byla počítána korelace mezi hodnotami NDVI z GreenSeekeru a UAV, která vyšla pro obě měření středně silná. Korelace mezi hodnotami z družice Landsat 8 a GreenSeekeru byla téměř nulová. Následně byl proveden Wilcoxonův párový test, pro zhodnocení rozdílů mezi platformami. U všech tří měření byl zjištěn statisticky signifikantní rozdíl mezi

hodnotami NDVI. Hodnoty měřené pomocí GreenSeekeru byly brány, jako ty správné. Na základě výsledků bylo vyhodnoceno, že UAV nadhodnocuje hodnoty NDVI a družice Landsat 8 podhodnocuje hodnoty NDVI. A tedy, že platformy nejsou vzájemně zastupitelné.

## 8. Přehled literatury a použitých zdrojů

- AFYUNIM . M . , CASSEL D . K . , ROBARGE W . P . , 1993: Effect of landscape position on soil water and corn silage yield. *Soil Science Society of America Journal* 57, 1573–1580.
- AGGARWAL S . , 2004: Principles of remote sensing. In: SIVAKUMAR M . V . K . , ROY P . S . , HARMSSEN K . a SAHA S . K . [eds.]: *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, World Meteorological Organisation, Ženeva: 23-38.
- BEVEN K . J . , KIRKBY M . J . , 1979: A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43–69.
- BERRY J . K . , DELGADO J . A . , KHOSLA R . , PIERCE F . J . , 2003: Precision conservation for environmental sustainability. *Journal of Soil and Water Conservation*. 58(6 ), 332–339.
- BONGIOVANNI R . , LOWENBERG-DEBOER J . , 2004: Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture*. 5 . 359–387.
- BERNI J . A . J . , ZARCO-TEJADA P . J . , SUAREZ L . , FERERES, E . , 2009: Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 722–738.
- COOK K . , 2007: The silent force multiplier: the history and role of UAVs in warfare. In: *IEEE Aerospace Conference*. 1 –7.
- CAMPBELL, J . B . , WYNNE R . H . , 2011: *Introduction to Remote Sensing Fifth Edition*. The Guilford Press, New York. 667 Pages ISBN 978-1 -60918-176-5
- CRAIN, J . , ORTIZ-MONASTERIO I . , RAUN B . , 2012: Evaluation of a Reduced Cost Active NDVI Sensor for Crop Nutrient Management. *Journal of Sensors*, 2012, 1 –10.
- CRUSIOL L . G . T . , CARVALHO J . DE F . C . , SIBALDELLI R . N . R . , NEIVERTH W . , RIO A . DO, FERREIRA L . C . , PROCÓPIO S . DE O . , MERTZ-HENNING L . M . , NEPOMUCENO A . L . , NEUMAIER N . , FARIAS J . R . B . , 2016: NDVI variation according to the time of measurement, samplingsize, positioning of sensor and water regime in different soybean cultivars. *Precis.Agric*. 1 –21.

- DANIELS R . B ., GILLIAM J . W ., CASSEL D . K ., NELSON L . A ., 1987: Quantifying the effects of past soil erosion on present soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation* 42, 183–187.
- DOBROVOLNÝ P ., 1998: Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. Brno: Masarykova Univerzita. 208 s.
- DABERKOW S . G ., MCBRIDE W . D ., 1998: Socioeconomic profiles of early adopters of precision agriculture technologies. *Journal of Agribusiness*. 16, 151–168.
- DEBUISSON S ., GERMAIN C , GARCIA O ., PANIGAI L . a MONCOMBLE D ., 2010: Using Multiplex® and Greenseeker™ to manage spatial variation of vine vigor in Champagne. 10th International Conference on Precision Agriculture, Denver, 15 s.
- DELGADO J ., 2015: 4 Rs Are Not Enough: We Need 7 Rs for Nutrient Management and Conservation to Increase Nutrient Use Efficiency and Reduce Off- Site Transport of Nutrients. In: Rattan LAL a B . A STEWART, ed. *Soil-specific farming: precision agriculture*. Boca Raton: Taylor & Francis Group . ISBN 978-1 -4822-4534-9.
- DOMÍNGUEZ J . A ., KUMHÁLOVÁ J . a NOVÁK P ., 2015: Winter oilseed rape and winter wheat growth prediction using remote sensing methods. *Plant Soil and Environment* 61: 410-416.
- EBEID M .M ., LAL R ., HALL G .F ., MILLER E . 1995: Erosion effects on soil properties and soybean yield on Miamian soil in western Ohio in a season below normal rainfall. *Soil Technol.*, 8 , 97–108.
- ENDERLE B ., 2002: Commercial Applications of UAV's in Japanese Agriculture. 1st UAV Conference.
- DUAN T ., CHAPMAN S . C ., GUO Y ., ZHENG B ., 2017: Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71–80.
- FRYE W . W ., EBELHAR S . A ., MURDOCK L . W ., BLEVINS R . L ., 1982: Soil erosion effects on properties and productivity of two Kentucky soils. *Soil Science Society of America Journal* 46, 1051–1055.
- FIETZ T . E ., MILLER B . C ., PAN W . L ., 1994: Winter wheat yield and grain protein across varied landscape positions. *Agronomy Journal*, 86, 1026-1032.

- FAHLSTROM P . G ., GLEASON T . J ., 2012: Introduction to UAV systems. 4th ed. Chichester: John Wiley. Aerospace series. 280 s . ISBN 978-1 -119-97866-4.
- FRANCH B ., VERMOTE E.F ., BECKER-RESHEF I., CLAVERIE M ., HUANG J ., ZHANG J ., JUSTICE C ., SOBRINO J .A . 2015: Improving the timeliness of winter wheat production forecast in the United States of America, Ukraine and China using MODIS data and NCAR growing degree day information. *Remote Sensing of Environment*, 161: 131–148.
- GROFFMAN P ., 1997: Ecological Constraints on Precision Agriculture. In: J . V . LAKE, BOCK G ., GOODE J ., ed. *Precision Agriculture: Spatial and Temporal Variability of Environmental Quality*. Chichester, New York: Wiley, Ciba Foundation symposium, 210. ISBN 978-0 -471-97455-0.
- GUTMAN G .G ., 1999: On the use of long-term global data of land reflectances and vege-tation indices derived from the advanced very high resolution radiometer. *J .Geophys. Res. Atmos.* 104, 6241–6255.
- GODWIN R . J ., EARL R ., TAYLOR J . C ., WOOD G . A ., BRADLEY R . I ., WELSH J . P ., RICHARDS T ., BLACKMORE B . S ., CARVER M . J ., KNIGHT S . AND OTHERS, 2002: Precision Farming of Cereals Crops, a five-year experiment to develop management guideline. Home Grown Cereals Authority.UK.Project Report No. 267.
- GNIP P ., CHARVÁT K ., 2003: Management of zones in precision farming. *Agricultural Economics*, Vol. 43, No. 9 : 416–418.
- GODWIN, R . J ., MILLER P . C . H ., 2003: A review of the technologies for mapping within-field variability. *Biosystems Engineering*, 84, 393–407.
- GRIFFIN T ., LOWENBERG-DEBOER J ., 2005: Worldwide adoption and profitability of precision agriculture Implications for Brazil. *Revista de Politica Agricola*. 14(4 ), 20–37.
- GRUBER S ., PECKHAM S ., 2008: Land-surface parameters and objects in hydrology. In: Hengl, T . & Reuter, H.I. (eds.) *Geomorphometry: concepts, software, applications*. pp. 171–194. Elsevier, Amsterdam, NL.
- GUO W ., MAAS S .J ., BRONSON K .F . 2012: Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. *Precision Agriculture*, 13: 678–692.

- GÓMEZ-CANDÓN D ., DE CASTRO A .I ., LÓPEZ-GRANADOS F ., 2014: Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precis. Agric.* 15(1 ), 44–56.
- HANNA A . Y ., HARLAN P . W ., LEWIS D . T ., 1982: Soil available water as influenced by landscape position and aspect. *Agronomy Journal* 74, 999–1004.
- HOFFER R . M ., 1984: “Remote Sensing of the Distribution and Structure of Vegetation-Chapter 5.” *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing: 131–59.*
- HUETE A ., 1988: A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295.
- HESS M ., BARRALIS G ., BLEIHOLDER H ., BUHR L ., EGGERS T ., HACK H . a STAUSS R ., 1997: Use of the extended BBCH scale ± general for the descriptions of the growth stages of mono- and dicotyledonous weed species. *Weed Research* 37: 433-441.
- HALOUNOVÁ L ., PAVELKA K ., 2008: *Dálkový průzkum Země. V Praze: České vysoké učení technické, ISBN 978-80-01-03124-7.*
- HADJIMITSIS D . G ., THEMISTOCLEOUS K ., AGAPIOU A . a CLAYTON C . R . I ., 2009: Monitoring archaeological site landscapes in Cyprus using multi-temporal atmospheric corrected image data. *International Journal of Architectural Computing* 7 : 121-138.
- HARDIN P . J ., JENSEN R . R ., 2011: Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48, 99–111.
- IQBAL J ., READ J . J ., THOMASSON A . J ., JENKINS J . N ., 2005: Relationships between soil landscape and dryland cotton lint yield. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3 ), 872–882.
- JORDAN C . F ., 1969: Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50(4 ), 663–666.
- JENSON S . K ., DOMINGUE J . O ., 1988: Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593–1600.

- JONES H. G ., VAUGHAN R . A ., 2010: Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications. Oxford University Press, Oxford, New York, 353 s.
- KANG I . L ., JOHN J . K ., 1997: Determination of the best significance level in forward stepwise logistic regression, *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 26:2 , 559–575.
- KOLÁŘ J ., HALOUNOVÁ L ., PAVELKA K ., 1997: Dálkový Průzkum Země 10. 1st ed. Praha: České vysoké učení technické.
- KAVKA M ., POŠAR B ., RYBKA A ., NOZDROVICKÝ L ., 1998: Možnosti využití systému precizního zemědělství v podmínkách ČR. Zamyšlení nad rostlinnou výrobou 1998, Česká zemědělská společnost: 37–43.
- KHANNA M . 2001: Sequential adoption of site-specific technologies and its implications for nitrogen productivity: A double selectivity model. *American Journal of Agricultural Economics*. 83(1 ), 35–51.
- KASPAR T .C ., COLVIN T .S ., JAYNES D .B ., KARLEN D .L ., JAMES D .E ., MEEK D .W ., PULIDO D ., BUTLER H . 2003: Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture*, 4 : 87–101.
- KOCH B ., KHOSLA R ., FRASIER W . M ., WESTFALL D . G ., INMAN D ., 2004: Economic Feasibility of Variable-Rate Nitrogen Application Utilizing Site-Specific Management Zones. *Agronomy Journal*, 96(6 ), 1572.
- KRŠKA K ., 2006: Fenologie jako nauka, metoda a prostředek. In: ROŽNOVSKÝ J ., LITSCHMANN T ., VYSKOT I . [eds.]: Fenologická odezva proměnlivosti podnebí. Česká bioklimatická společnost, Praha: 1–4.
- KNIGHT B ., BILL M . AND OTHERS, 2009: A whole-farm investment analysis of some precision agriculture technologies. *Australian Farm Business Management Journal*. 6 (1 ), 41.
- KOPECKÝ M ., ČÍŽKOVÁ Š ., 2010: Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? *Applied Vegetation Science*, 13(4 ), 450–459.
- KODAIRA M ., SHIBUSAWA S ., 2013: Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. *Geoderma*, Vol. 199:64–79.

- KUMHÁLOVÁ J., KUMHÁLA F., NOVÁK P., MATĚJKOVÁ Š. 2013: Airborne laser scanning data as a source of field topographical characteristics. *Plant, Soil and Environment*, 59: 423–431.
- KUMHÁLOVÁ J., ZEMEK F., NOVÁK P., BROVKINA O., MAYEROVÁ M., 2014: Use of Landsat images for yield evaluation within a small plot. *Plant Soil Environ.*, 60(11), 501-506.
- KUMHÁLOVÁ J., MATĚJKOVÁ Š., 2017: Yield variability prediction by remote sensing sensors with different spatial resolution. *International Agrophysics*, 31(2), 195–202.
- KARAS J., TICHÝ T., 2016: *Drony*. Brno: Computer press, Albatros Media a. s., 264 s. ISBN 978-80-251-4680-4.
- KOMÁREK J., KLOUČEK T., PROŠEK J., 2018. The potential of Unmanned Aerial Systems: A tool towards precision classification of hard-to-distinguish vegetation types? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 71, May, s. 9–19. ISSN 0303-2434.
- LINDSTROM M. J., NELSON W. W., SCHUMACHER T. E., 1992: Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil Tillage Research* 24, 243–255.
- LILLESAND T. M., KIEFER R. W., 1994: *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 750 s.
- LOWENBERG-DEBOER J., BOEHLJE M., 1996: Revolution, evolution or dead-end: economic perspectives on precision agriculture. In: *Proc. 3rd Intl. Conf. Precision Agriculture: Precision Agriculture*. s. 923–944.
- LI Z., ZHU Q., GOLD CH., 2004: *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press, 318 pp. ISBN 0-415-32462-9.
- LUKAS V., RYANT P., NEUDERT L., DRYŠLOVÁ T., GNIP P., SMUTNÝ V. 2011: *Tvorba aplikačních map pro základní hnojení plodin v precizním zemědělství*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011, 36 s. ISBN 978-80-7375-561-4.
- LUKAS V., 2012: *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství: metodika pro praxi*. 1. vyd. Brno: Mendelova



univerzita v Brně. Metodika pro praxi (Mendelova univerzita v Brně). ISBN 978-80-7375-686-4.

- LUCIEER A ., ROBINSON S ., TURNER D ., HARWIN S ., KELCEY J ., 2012: Using a micro-UAV for ultra-high resolution multi-sensor observations of antarctic moss beds ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci., XXXIX-B1, 429–433.
- LI X .M ., HE Z .H ., XIAO Y .G ., XIA X .C ., TRETOWAN R ., WANG H .J ., CHEN X .M . 2015: QTL mapping for leaf senescence-related traits in common wheat under limited and full irrigation. *Euphytica*, 203: 569–582
- LILLESAND T ., KIEFER R . W ., CHIPMAN J ., 2015: Remote Sensing and Image Interpretation, 7th Edition. Wiley Academic, New Jersey, 768 s.
- LUKAS V ., NEUDERT L ., 2016: Senzorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů: Certifikovaná metodika pro praxi. Brno: Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7509-460-5.
- MARQUES DA SILVA J .R ., SILVA L .L ., 2006: Relationship between distance to flow accumulation lines and spatial variability of irrigated maize grain yield and moisture at harvest. *Biosystems Engineering*, 94: 525–533.
- MARQUES DA SILVA J .R ., SILVA L .L ., 2008: Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystems Engineering*, 101: 183–190.
- MURPHY P .N .C ., OGILVIE J ., ARP P ., 2009: Topographic modelling of soil moisture conditions: A comparison and verification of two models. *European Journal of Soil Science*, 60: 94–109.
- MARTIN D . E ., LÓPEZ J . D . JR. a LAN Y ., 2012: Laboratory evaluation of the GreenSeeker™ hand-held optical sensor to variations in orientation and height above canopy. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 5 : 43–47.
- MULLA D .J ., 2013: Twentyfive years of remote sensing in precision agriculture: key ad-vances and remaining knowledge gaps. *Biosyst. Eng.* 114, 358–371.
- MOMM H ., BINGNER R ., WELLS R ., RIGBY J ., DABNEY S ., 2013: Effect of topographic characteristics on compound topographic index for identification of gully channel initiation locations. *Transactions of the ASABE*, 56: 523–537.

- MULLA D ., KHOSLA R ., 2016: Historical Evolution and Recent Advances in Precision Farming. In: Rattan LAL a B . A STEWART, ed. Soil-specific farming: precision agriculture. Boca Raton: Taylor & Francis Group. ISBN 978-1 -4822-4534-9.
- MORAVEC D ., KOMAREK J ., KUMHÁLOVÁ J ., KROULIK M ., PROŠEK J ., KLÁPŠTĚ P ., 2017: Digital elevation models as predictors of yield: Comparison of an UAV and other elevation data sources. *Agronomy Research*. 15. 249-255.
- NEUDERT L ., VOJTĚCH L ., 2015: Precizní zemědělství: technologie a metody v rostlinné produkci. Mendelova univerzita: Brno. ISBN 978-80-7509-311-0 .
- NOZDROVICKÝ L ., 2008: Presné pôdohospodárstvo: Implementácia s podporou informačných technológií a techniky. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2008. ISBN 978-80-552-0123-8 .
- OUÉDRAOGO M .M ., DEGRÉ A ., DEBOUCHE C . & LISEIN J ., 2014: The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology* 214, 339–355.
- PIERSON F . B ., MULLA D . J ., 1990: Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position. *Soil Science Society of America Journal* 54, 1407–1412.
- PEDERSEN S . M ., 2003: Precision farming: Technology Assessment of Variable Rate Treatment in Cereals. Lyngby. Ph. D . Thesis. Technical University of Denmark.
- PEDERSEN S . M ., SPYROS F ., BLACKMORE B .S ., MORTENG., JØRGEN L . P ., 2004: Adoption and perspectives of precision farming in Denmark. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B -Soil & Plant Science*. 54(1 ), 2 –8.
- PILESJÖ P ., THYLÉN L ., PERSSON A ., 2005: Topographical data for delineation of agricultural management. In: Stafford J .V . (ed.): *Precision Agriculture*. Wageningen Academic Publishers, Uppsala, 819–826.
- PEDERI Y . A ., CHEPORNIUK H . S ., 2015: Unmanned Aerial Vehicles and new technological methods of monitoring and crop protection in precision agriculture. 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD).

- PINEUX N ., LISEIN J ., SWERTS G ., BIELDERS C . L ., LEJEUNE P ., COLINET G ., DEGRÉ A ., 2017: Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology*, 280, 122–136.
- ROUSE J .W ., HAAS R .H ., SCHELL J .A ., AND DEERING D .W ., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings Third ERTS-1 Symposium*, NASA Goddard, NASA SP-351, 309–317.
- RICHARDSON J . C, WEIGAND C., 1977: “Distinguishing vegetation from soil background information,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43.
- REICHARDT M ., JÜRGENS C ., 2008: Adoption and future perspective of precision farming in Germany: results of several surveys among different agricultural target groups. *Precision Agriculture*, 10(1 ), 73–94.
- REES W . G ., 2012: *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press, Cambridge, 441 s.
- ROKHMANA C . A ., 2015: The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 245–253.
- SPOMER R . G ., PIEST R . F ., 1982: Soil productivity and erosion of Iowa loess soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 25, 1295–1299.
- STONE J . R ., GILLIAM J . W ., CASSEL D . K ., DANIELS R . B ., NELSON L . A . AND KLEISS H . J ., 1985: Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. *Soil Science Society of America Journal* 49, 987–991.
- SZÉKELY C ., KOVÁCS A ., GYÖRÖK B ., 2000: The practice of precision farming from an economic point of view. *Gazdálkodás*, 13, 56–65.
- SCHMIDT F ., PERSSON A ., 2003: Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture* 4 , 179–192.
- SCHOWENGERDT R . A ., 2006: *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Elsevier Science, Amsterdam, 558 s.
- SRIPADA R . P ., HEINIGER R . W ., WHITE J . G ., MEIJER, A . D . 2006: Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-Season Nitrogen Requirements in Corn. *Agronomy Journal*, 98(4 ), 968.

- SØRENSEN R ., ZINKO U ., SEIBERT J ., 2006: On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10: 101–112.
- SCHOTT J . R ., 2007: *Remote Sensing*. Oxford University Press, Oxford, 701 s.
- STOSZEK J ., 2009: *Precision farming*. Ostrava: VŠB–TU.
- SVATOŇOVÁ H ., LAUERMANN L ., 2010: *Dálkový průzkum Země – aktuální zdroj geografických informací*. Brno: Masarykova univerzita. ISBN 978-80-210-5162-1.
- SHOCKLEY J . M ., DILLON C . R . STOMBAUGHT T . S ., 2011: A whole farm analysis of the influence of auto-steer navigation on net returns, risk, and production practices. *Journal of Agricultural and Applied Economics*. 43(1 ), 57–75.
- SHOCKLEY J ., DILLON C . R ., STOMBAUGH T ., SHEARER S ., 2012: Whole farm analysis of automatic section control for agricultural machinery. *Precision Agriculture*, 13(4 ), 411–420.
- STEHR N . J . 2015: Drones: The Newest Technology for Precision Agriculture. *Natural Sciences Education*, 44(1 ), 89.
- STONE, Marvin L . a William R . RAUN, 2016. *Sensing Technology for Precision Crop Farming*. In: Qin ZHANG, ed. *Precision agriculture technology for crop farming*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC. ISBN 978-1 -4822-5108-1.
- STOORVOGEL J ., LAMMERT K ., J . BOUMA, 2016:. *Managing Soil Variability at Different Spatial Scales as a Basis for Precision Agriculture*. In: Rattan LAL a B . A STEWART, ed. *Soil-specific farming: precision agriculture*. Boca Raton: Taylor & Francis Group. ISBN 978-1 -4822-4534-9.
- ŠARAPATKA B ., URBAN J ., 2006: *Ekologické zemědělství v praxi*. Šumperk: PRO-BIO.
- ŠKODA V ., 2014: *Možnosti využití technologií precizního zemědělství v zemědělském podniku*. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- ŠTURSA V ., 2017: *Opět dokonalejší precizní zemědělství*. Biro.
- TRIBE A . 1992: Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139(1 -4 ), 263–293.

- TIMLIN D . J . , PACHEPSKY Y . , SNYDER V . A . , BRYANT R . B . , 1998: Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Science Society of America Journal* 62, 764–733.
- TIMMERMANN C . , GERHARDS R . , KÜHBAUCH W . , 2003: The economic impact of site-specific weed control. *Precision Agriculture*. 4 (3 ), 249–260.
- VARSHNEY P . K . , ARORA, M . K . , 2004: “Advanced Image Processing Techniques Hyperspectral Data.” Springer.
- VINCINI M . , FRAZZI E . , D’ALESSIO P . , 2008: A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*. 9 . 303-319.
- VITHARANA W . A . U . , VAN MEIRVENNE M . , SIMPSON D . , COCKX L . , DE BAERDEMEAKER J . , 2008: Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in European loess area. *Geoderma*, Vol. 143, No. 1 -2 : 206–215.
- VERHOEVEN G . J . J . , 2009: Providing an archaeological bird's-eye view—an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. Ghent: Archaeological Prospection. 16.4 : 233–249.
- VERHULST N . , GOVAERTS B . , 2010: The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A : Concepts and case studies. CIMMYT, Mexico, 16 s.
- VERHULST N . , GOVAERTS B . , NELISSEN V . , SAYRE K . D . , CROSSA J . , RAES D . a DECKERS J . , 2011: The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. *Field Crops Research*, 120: 58-67.
- WESTOBY M . J . , BRASINGTON J . , GLASSER N . F . , HAMBREY M . J . , REYNOLDS J . M . , 2012: ‘Structurefrom-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314.
- WALSH O . S . , KLATT A . R . , SOLIE J . B . , GODSEY C . B . a RAUN W . R . , 2013: Use of soil moisture data for refined GreenSeeker sensor based nitrogen recommendations in winter wheat (*Triticum aestivum* L . ). *Precision Agriculture*, 14: 343-356.
- WEBB P . , MEHLHORN S . A . , SMARTT P . , 2017: Developing Protocols for Using a UAV to Monitor Herd Health. 2017 Spokane, Washington July 16 - July 19, 2017.

- ZHANG C ., KOVACS J .M ., 2012: The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. Precision Agriculture 13(6 ), 693–712.
- ZHANG Q ., PIERCE J .F ., 2013: Agricultural Automation: Fundamentals and Practices. CRC Press, Boca Raton.
- ZHANG Q . E ., 2016: Precision agriculture technology for crop farming. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC. ISBN 978-1 -4822-5108-1.
- ŽÍŽALA D ., KRÁSA J ., 2016: et al.. Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země. 1 . vydání. Praha 6 – Suchdol: Powerprint s .r .o ., 156 s . ISBN 978-80-87361-63-4.

### Ostatní zdroje

- BLACKMORE S ., 2003: The role of yield maps in Precision Farming. A PhD thesis, Cranfield University at Silsoe.(disertační práce)
- ČSÚ, 2016: Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin - 2015. Český statistický úřad (online) [cit. 15. 2. 2019].Dostupné z : <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udajeo-sklizni-zemedelskych-plodin-20/>
- DUŽÁK J ., 2016: Roľnícke noviny: Precízne poľnohospodárstvo (online)[cit. 2019 20.2 .]. Dostupné z : <http://rno.sk/precizne-polnohospodarstvo/>
- ENZ M ., DACHLER CH., 1997: Compendium of Growth Stage Identification Keys for Mono- and Dicotyledonous Plants, Extended BBCH scale, 2nd edition. Novartis, Basilej, (online)[cit. 20. 3. 2019].Dostupné z : <http://www.gartneriraadgivningen.dk/upl/website/bbch-skala/scaleBBCH.pdf/>
- ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2016: (online)[cit. 23. 3. 2019].Dostupné z : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>
- FAO & ITU, 2018: Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Telecommunication Union Bangkok, E -Agriculture in action: Drones for agriculture, ISBN 978-92-5 -130246-0s
- CHUDÝ J ., 2017: Využití dronů pro získávání dat o zmlazení z území ovlivněných disturbancemi. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. 62 s. (diplomová práce)
- ICAO, 2011: Unmanned Aircraft Systems (UAS). Montréal: ICAO Cir 328. (online)[cit.16.3 .2019].Dostupné z :[http://www.icao.int/Meetings/UAS/ /Documents/Circular%20328\\_en.pdf](http://www.icao.int/Meetings/UAS/ /Documents/Circular%20328_en.pdf)

- KŘEN J., NEUDERT L., LUKAS V., 2007: Možnosti využití precizního zemědělství v podmínkách ČR. Prezentace, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- KUMHÁLOVÁ, J., 2010: Využití GIS v precizním zemědělství. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno. 120 s. (disertační práce)
- KROULÍK M., 2012: Senzory pro měření půdních vlastností. Zemědělec (online)[cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z : <http://zemedelec.cz/senzory-pro-mereni-pudnichvlastnosti/>
- KAŠPEROVÁ M., 2018: Precizní zemědělství v Česku: Kvantitativní analýza faktorů ovlivňujících jeho osvojení, Masarykova univerzita, Fakulta sociálních studií, Brno. (diplomová práce)
- LETECKÁ INFORMAČNÍ SLUŽBA, 2017: (online)[cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z : <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>
- LUKAS V., NEUDERT L., KŘEN J., 2010: Precizní zemědělství a jeho přínosy. (online)[cit. 20. 2. 2019]. Dostupné z : <http://zemedelec.cz/precizni-zemedelstvi-a-jeho-prinosy>
- MIŘIJOVSKÝ J., 2013: Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Olomouc. 144 s. (disertační práce)
- MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY, 2017: Zpráva o stavu zemědělství ČR za rok 2016 „Zelená zpráva“ (online)[cit. 20. 2. 2019] Dostupné z : [http://eagri.cz/public/web/file/569334/ZZ16\\_V3.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/569334/ZZ16_V3.pdf)
- SENSEFLY, 2014: MultiSPEC DC Camera User Manual.
- NASA, 2017: Landsat 8 . Landsat Science – NASA, Washington, D .C (online)[cit. 18. 3 . 2019]. Dostupné z : <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/>
- ORŠULÁK T., PACINA J., 2010: “Dálkový Průzkum Země.” Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny. (online)[cit. 12. 3 . 2019]. Dostupné z : [http://gis.fzp.ujep.cz/GIS/DPZ/Materialy/DPZ\\_skripticka.pdf](http://gis.fzp.ujep.cz/GIS/DPZ/Materialy/DPZ_skripticka.pdf).
- RÜSCH P . C ., 2001: Precision farming in South Africa. A Master of Engineering thesis, University of Pretoria. (diplomová práce)
- ROUSE M., 2016: TechTarget: Precision agriculture (online) [cit. 27. 2. 2019]. Dostupné z : <http://whatis.techtarget.com/definition/precision-agriculture-precision-farming>

- ŘEHÁK M ., 2012: Využití bezpilotních prostředků ve fotogrametrii. Praha: České vysoké učení technické. (diplomová práce)
- SOBOTA L ., 2009: Využití geodetického sběru dat v precizním zemědělství, Západočeská univerzita v Plzni. (bakalářská práce)
- TRIMBLE, 2019: GreenSeeker Handheld, Trimble Agriculture ,Trimble - Transforming the Way the World Works. (online)[cit. 26. 2 . 2019].Dostupné z : [https://www.trimble.com/Agriculture/gs-handheld.aspx?tab=Product\\_Overview](https://www.trimble.com/Agriculture/gs-handheld.aspx?tab=Product_Overview)
- USDA, 2007: Precision agriculture: NRCS support for emerging technologie.Washington, DC: United States Department of Agriculture. Agronomy Technical Note No. 1 .
- USGS, 2016a: Landsat–Earth Observation Satellites. Fact Sheet 2015-3081, ver.1 .1 .Reston.(online)[cit.19.2 .2019].Dostupné z : <https://pubs.usgs.gov/fs/2015/3081/fs20153081.pdf>
- USGS, 2016b: Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Reston, (online)[cit. 27. 2. 2019].Dostupné z : <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-l8-data-users-handbook-section-2>
- WEIER J ., HERRING D ., 2000: Measuring vegetation (NDVI & EVI). Earth Observatory – NASA, Washington, D . C ., (online)[cit. 2 . 3 . 2019].Dostupné z : <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>