

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroekologie a rostlinné produkce**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vegetační indexy a jejich využití v zemědělské praxi**

**Bakalářská práce**

**Josef Pekař**

**Rostlinná produkce**

**Doc. Ing. Václav Brant, Ph.D.**

**© 2023 ČZU v Praze**

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Vegetační indexy a jejich využití v zemědělské praxi jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. dubna 2023

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Václavu Brantovi, Ph.D. za odborné vedení práce, za pomoc a cenné rady při řešení této práce a pomoc se statistickým vyhodnocení dat. Děkuji panu Ing. Josefu Chárovi za poskytnutí pokusné plochy a pomoc při tvorbě bakalářské práce, dále pak členům Centra precizního zemědělství při České zemědělské univerzitě v Praze panu doc. Ing. Milanu Kroulíkovi Ph.D., panu Ing. Pavlu Procházkovi Ph.D. a panu Ing. Pavlu Hamouzovi Ph.D. za pomoc při vyhodnocení výsledku práce. V neposlední řadě pak paní Ing. Kateřině Křížové Ph.D. z Výzkumného ústavu rostlinné výroby za pomoc při vyhodnocení vegetačních indexů.

# Vegetační indexy a jejich využití v zemědělské praxi

## Souhrn

Cílem bakalářské práce bylo v literární rešerši specifikovat stávající vegetační indexy využívané v precizním zemědělství a v rámci experimentální části práce ověřit korelaci mezi vybranými vegetačními indexy a produkcí nadzemní biomasy ozimé pšenice v rozdílných růstových fázích. Přesný polní experiment proběhl na pozemku společnosti Statek Chyšne s.r.o. ve vegetační sezóně 2021/22. Pozemek o výměře 25,07 ha byl oset pšenicí ozimou odrůdy Julie. Na základě dlouhodobého výnosového potenciálu byl pozemek rozdělen do 3 zón podle produkčních úrovní. V průběhu pokusu byly v každé zóně výnosového potenciálu odebírány vzorky nadzemní biomasy pšenice ozimé, ze kterých byla následně stanovena produkce suché nadzemní biomasy pšenice v jednotlivých zónách v t/ha. V pravidelných intervalech od 10.4 do 16.7.2022 bylo provedeno 13x snímkování pozemku pomocí bezpilotního prostředku – dronu eBee SQ (AgEagle) s multispektrální kamerou Parrot Sequoia. Dronem byla zaznamenávána pásma spektra záření *Green*, *Red*, *Red edge*, *NIR* a zároveň celé viditelné spektrum samostatnou RGB kamerou. Snímkování bylo prováděno ve vysokém rozlišení 10,39 cm/px. Z těchto snímků byly vypočteny vegetační indexy pro jednotlivé zóny odběru vzorků nadzemní biomasy. V práci byly porovnávány vegetační indexy *NDVI*, *GNDVI*, *NDRE*, *SAVI*, *CVI*, *TGI*, *VARI* a *NGRDI*. U těchto vegetačních indexů byl porovnáván jejich průběh s produkcí suché nadzemní biomasy ozimé pšenice v závislosti na růstové fázi rostlin. Výsledky práce prokázaly korelaci mezi jednotlivými vegetačními indexy a produkcí nadzemní biomasy porostu. Prokázalo se, že korelace mezi indexy lze specifikovat do dvou období. První období lze stanovit do 150. dne v roce, tedy do fáze BBCH 50 (do počátku metání), těsnější a časnější závislost však byla stanovena pro období metání až počátek zrání. Nejdélší období korelace suché nadzemní biomasy s hodnotami indexu vykazoval index *TGI* a to v období 130–190 DOY.

**Klíčová slova:** vegetační indexy, produkce biomasy, precizní zemědělství, produkční zóny, monitoring pozemků

# Vegetation indices and their use in agricultural practice

## Summary

The aim of the bachelor thesis was to specify existing vegetation indexes used in precision agriculture in a literature search and to verify the correlation between selected vegetation indices and above-ground biomass production of winter wheat at different growth stages in the experimental part of the thesis. The precision field experiment was carried out on the land of the company Statek Chyšé s.r.o. in the growing season 2021/22. Based on the long-term yield potential, the plot was divided into 3 zones according to production levels. During the course of the experiment, samples of above-ground biomass of winter wheat were taken in each yield potential zone, from which the production of dry above-ground biomass of wheat in each zone was subsequently determined in t/ha. At regular intervals from April 10 to July 16, 2022, the plot was imaged 13 times using an unmanned aerial vehicle, the eBee SQ (AgEagle) drone with a Parrot Sequoia multispectral camera. The drone was used to record *Green*, *Red*, *Red edge*, *NIR* spectrum bands and a camera to record the visible spectrum. The imaging was performed at a high resolution of 10.39 cm/px. From these images, vegetation indices were calculated for each above-ground biomass sampling zone. The vegetation indices of *NDVI*, *GNDVI*, *NDRE*, *SAVI*, *CVI*, *TGI*, *VARI* and *NGRDI* were compared in this study. For these vegetation indices, their trend was compared with the dry aboveground biomass production of winter wheat as a function of plant growth stage. The results of the study showed a correlation between each vegetation index and the above ground biomass production of the crop. It was shown that the correlations between the indices can be specified into two periods. The first period can be specified up to the 150th day of the year, i.e. to the BBCH 50 stage (until the beginning of heading), but a closer and earlier dependence was established for the heading to the beginning of maturation period. The *TGI* index showed the longest period of correlation of dry aboveground biomass with the index values and this was during the period 130–190 DOY.

**Keywords:** vegetation indices, biomass production, precision agriculture, production zones, land monitoring

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Vědecká hypotéza</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Literární rešerše</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Vegetační indexy v zemědělství</b>	<b>11</b>
3.1.1	Indexy na základě rostlinné biomasy a výnosu	12
3.1.1.1	Index <i>NDVI</i> (Normalized Difference Vegetation Index)	12
3.1.1.2	Index <i>SR</i> (Simple Ratio)	13
3.1.1.3	Index <i>REIP</i> (Red Edge Inflexion Point)	13
3.1.1.4	Index <i>NDRE</i> (Normalized Difference RedEdge)	13
3.1.1.5	Index <i>SAVI</i> (Soil Adjusted Vegetation Index)	14
3.1.1.6	Index <i>GEMI</i> (Global Environmental Monitoring Index)	14
3.1.1.7	Index <i>NGRDI</i> (Normalised Green – Red Difference Index)	15
3.1.2	Indexy na základě obsahu chlorofylu	15
3.1.2.1	Index <i>CCCI</i> (Canopy Chlorophyll Content Index)	15
3.1.2.2	Index <i>CVI</i> (Chlorophyll Vegetation Index)	15
3.1.2.3	Index <i>TCI</i> (Triangular Chlorophyll Index)	16
3.1.2.4	Index <i>TGI</i> (Triangular Greenness Index)	16
3.1.2.5	Index <i>VARI</i> (Visible Atmospherically Resistant Index)	17
3.1.2.6	Index <i>GNDVI</i> (Green Normalized Difference Vegetation Index)	17
3.1.3	Indexy na základě listové plochy	17
3.1.3.1	Index <i>EVI</i> (Enhanced Vegetation Index)	17
3.1.3.2	Index <i>WDRVI</i> (Wide Dynamic Range Vegetation Index)	18
3.1.3.3	Index <i>LAI</i> (Leaf Area Index)	18
3.1.4	Index na základě obsahu dusíku	19
3.1.4.1	Index <i>NDNI</i> (Normalized Difference Nitrogen Index)	19
3.1.5	Indexy na základě obsahu vody v rostlinách	19
3.1.5.1	Index <i>LWCI</i> (Leaf Water Content Index)	19
3.1.5.2	Index <i>WBI</i> (Water Band Index)	19
3.1.5.3	Index <i>MSI</i> (Moisture Stress Index)	20
3.1.5.4	Index <i>NDWI</i> (Normalized Difference Water Index)	20
<b>3.2</b>	<b>Zdroje dat pro tvorbu indexů</b>	<b>20</b>
3.2.1	Družice Landsat	20

3.2.2	Družice Sentinel 2.....	20
3.2.3	PlanetScope.....	21
3.2.4	Radarová data .....	21
3.2.5	Snímkování pomocí dronu.....	21
<b>3.3</b>	<b>Software využívaný pro zpracování mapových podkladů .....</b>	<b>22</b>
3.3.1	Xarvio .....	22
3.3.2	OneSoil .....	22
3.3.3	SatAgro .....	22
3.3.4	Varistar.....	23
3.3.5	CleverFarm .....	23
<b>3.4</b>	<b>Pšenice ozimá.....</b>	<b>23</b>
3.4.1	Základní charakteristika.....	23
3.4.2	Hospodářský význam.....	24
3.4.3	Vývoj porostů a dynamika produkce biomasy .....	24
3.4.4	Základní agrotechnika.....	25
3.4.4.1	Zařazení do osevního postupu .....	25
3.4.4.2	Zpracování půdy .....	25
3.4.4.3	Zakládání porostu .....	25
3.4.4.4	Výživa a hnojení.....	26
3.4.4.5	Ochrana proti škodlivým činitelům (choroby, škůdci a plevele).....	27
3.4.4.6	Sklizeň a parametry sklizeného produktu .....	28
3.4.5	Využití vegetačních indexů v porostech pšenice .....	28
<b>4</b>	<b>Metodika.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Charakteristika stanoviště.....</b>	<b>30</b>
4.1.1	Charakteristika půdního bloku.....	30
4.1.2	Průběh počasí.....	31
4.1.3	Agrotechnika.....	31
4.1.4	Produkční zóny pozemku.....	32
<b>4.2</b>	<b>Polní pokus.....</b>	<b>33</b>
4.2.1	Odběry biomasy .....	33
4.2.2	Snímkování porostu .....	34
<b>4.3</b>	<b>Hodnocení pokryvnosti půdy .....</b>	<b>34</b>
<b>4.4</b>	<b>Zpracování hodnot nadzemní biomasy .....</b>	<b>35</b>
4.4.1	Modelace S-křivky.....	35
<b>4.5</b>	<b>Hodnocení sklizňových parametrů.....</b>	<b>36</b>
<b>4.6</b>	<b>Zpracování mapových podkladů .....</b>	<b>36</b>
<b>4.7</b>	<b>Hodnocení nadzemní biomasy s vegetačními indexy .....</b>	<b>37</b>
<b>4.8</b>	<b>Statistické vyhodnocení .....</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky.....</b>	<b>38</b>

<b>5.1</b>	<b>Hodnocení pokrývnosti půdy .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>Hodnocení hustoty porostu .....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Hodnocení suché nadzemní biomasy v jednotlivých zónách.....</b>	<b>39</b>
<b>5.4</b>	<b>Hodnocení sklizňových parametrů.....</b>	<b>40</b>
<b>5.5</b>	<b>Průběh vegetačních indexů v závislosti na nárůstu nadzemní biomasy ...</b>	<b>40</b>
5.5.1	Index <i>GNDVI</i> .....	40
5.5.2	Index <i>NDRE</i> .....	41
5.5.3	Index <i>NDVI</i> .....	42
5.5.4	Index <i>TGI</i> .....	42
5.5.5	Index <i>VARI</i> .....	43
5.5.6	Index <i>NGRDI</i> .....	44
5.5.7	Index <i>SAVI</i> .....	45
5.5.8	Index <i>CVI</i> .....	46
5.5.9	Hodnocení korelace vegetačních indexů s nadzemní biomasou.....	47
<b>6</b>	<b>Diskuze.....</b>	<b>49</b>
<b>6.1</b>	<b>Hodnocení zón produkčního potenciálu .....</b>	<b>49</b>
<b>6.2</b>	<b>Využití bezpilotních prostředků pro mapování porostu .....</b>	<b>49</b>
<b>6.3</b>	<b>Hodnocení korelace mezi vegetačními indexy a nadzemní biomasou .....</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>59</b>



# 1 Úvod

V současné době na zemědělský sektor přichází stále větší výzvy pro zajištění potravinové bezpečnosti a zároveň naplnění stále narůstajících ekologických požadavků. Moderní zemědělství se neobejde bez nových technologií, které v propojení s tradičními agronomickými postupy mají za cíl zvyšování efektivity práce, snižování energetických vstupů a omezení ekologických rizik. V souvislosti s rozvojem Zemědělství 4.0 se jedná i o detekci parametrů porostů, především jejich aktuálního výživného stavu, na základě bezkontaktních metod hodnocení. Významný potenciál uplatnění vykazují tzv. vegetační indexy.

S příchodem moderních technologií označovaných pod pojmem precizní zemědělství nabývají na významu právě vegetační indexy. Vegetačních indexů existuje celá řada, ale jen málo z nich má v současné době přímé praktické uplatnění. Obecně jejich stanovení vychází z analýzy vztahů mezi jednotlivými vlnovými délkami elektromagnetického záření, které nepřímo vyjadřují aktuální stav porostů. Jsou využívány jako podklad k vytváření aplikačních map pro variabilní hnojení a aplikaci přípravků na ochranu rostlin. V rámci metod dálkového průzkumu země lze specifikovat aktuální stav vegetace na jednotlivých částech porostu. Získávání těchto dat umožňuje individuální péči o jednotlivé části pozemků.

Vegetační indexy udávají bezrozměrné hodnoty vypočtené podle odrazivosti jednotlivých složek elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření dělíme na jednotlivá spektra podle vlnové délky na: *Blue*, *Green*, *Red*, *Red edge*, *NIR* a *SWIR*. Odrazivosti těchto jednotlivých složek záření můžeme zjišťovat na základě satelitních snímků z družic Sentinel, Landsat a dalších komerčních satelitů nebo pomocí v dnešní době intenzivně se rozvíjejících bezpilotních prostředků – dronů. Využití správných vegetačních indexů v činnostech precizního zemědělství může přinášet především úsporu finančních nákladů a šetrnější hospodaření s ohledem na životní prostředí.

Prokázání korelací mezi hodnotami vegetačních indexů a produkcí nadzemní biomasy ozimé pšenice pomocí efektivních metod DPZ by přispělo k optimalizaci výživy porostů především dusíkem a tím dosažení kvalitnější produkce a efektivního použití vstupů.

## **2 Cíl práce**

1. Cílem práce je na základě literární rešerše specifikovat stávající vegetační indexy využívané v precizním zemědělství.
2. Součástí experimentální práce je na základě polních experimentů ověřit korelaci mezi vybranými vegetačními indexy a produkcí nadzemní biomasy ozimé pšenice v rozdílných růstových fázích.

### **2.1 Vědecká hypotéza**

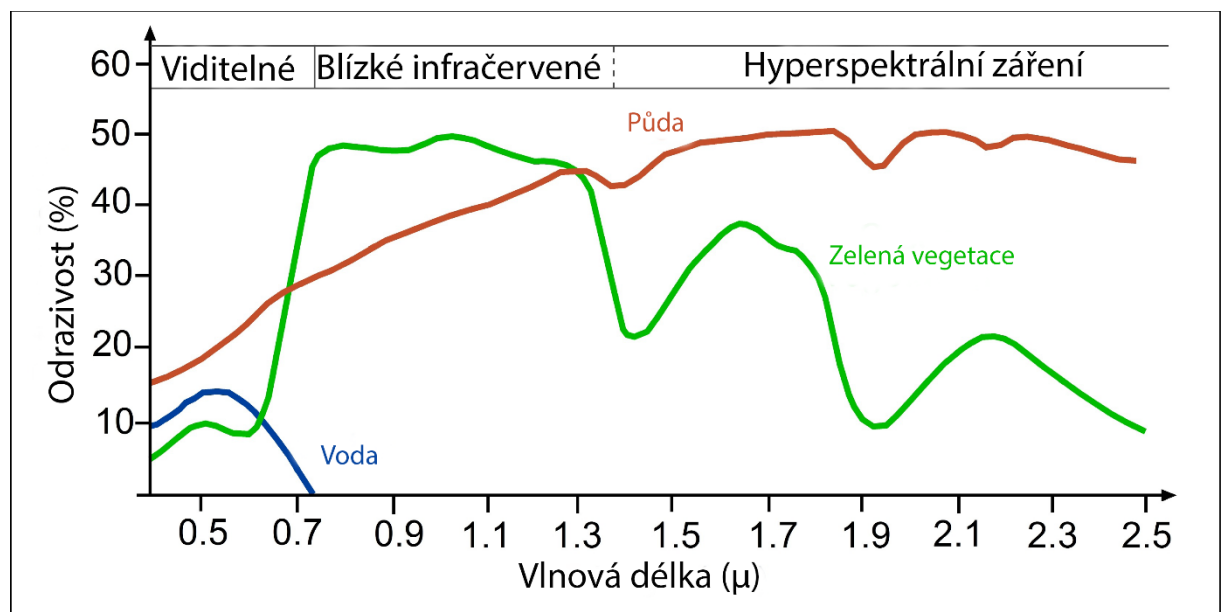
H1 – Produkce nadzemní biomasy ozimé pšenice vykazuje v rozdílné růstové fázi porostu odlišnou korelaci s vegetačními indexy.

### 3 Literární rešerše

#### 3.1 Vegetační indexy v zemědělství

Rostliny odrážejí v různém množství jednotlivá pásma elektromagnetického záření (obr. 1, kde je zelenou křivkou vyznačena odrazivost vegetace). Elektromagnetické záření rozlišujeme podle různých vlnových délek od nejkratší vlnové délky na modré, zelené, červené, *NIR* (blízké infračervené záření) a *SWIR* (hyperspektrální záření). Odrazivost viditelného spektra záření podává informaci o stavu fotosyntetického aparátu rostlin. Chlorofyl absorbuje záření především v oblasti viditelného spektra od 450 nm do 670 nm. V těchto spektrech se vyskytuje modrá a červená barva. Naopak chlorofyl silně odráží zelenou barvu (vlnová délka zelené barvy se pohybuje v rozmezí od 520 nm do 600 nm). Podle množství chlorofylu lze poznat například, zda je vegetace stresována (Brant *et al.* 2020). *NIR* záření udává množství biomasy. Podle těchto charakteristik můžeme s vysokou spolehlivostí detekovat porostní rozdíly jako je nedostatečná výživa, vodní stres a napadení rostlin škůdci nebo chorobami. Avšak podle těchto charakteristik nelze určit přesnou příčinu stresu a pro její určení je potřeba přistupovat ke každému pozemku individuálně a fyzicky prohlédnout daný porost (Lukas *et al.* 2012).

Vegetační indexy jsou vyvíjeny s cílem zlepšit citlivost vegetace a zohlednit vliv atmosféry a půdy. Informace obsažené v jednom spektrálním pásmu jsou obvykle pro charakterizaci stavu vegetace nedostatečné, proto je potřeba se na vegetaci zaměřit pomocí vegetačních indexů. Vegetační indexy se obvykle vytvářejí kombinací dvou nebo více spektrálních pásem a vycházejí z poměrů jednotlivých složek spektra. Pro snímání optickými senzory je potřeba dostatečné listové plochy rostlin (Brant *et al.* 2020; Lukas *et al.* 2012).



Obr. 1: Křivky odrazivosti spektra zelené vegetace, půdy a vody; (Seos 2022) upraveno

Půda a vegetační pokryv odráží rozdílnou intenzitou elektromagnetické záření. Odrazivost porostu je závislá na druhu a stavu rostlin a také na jejich složení (obsah chlorofylu, zastoupení uhlíku). Pomocí kombinace snímků pořízených v rozdílných spektrech můžeme

vypočítat vegetační indexy, které s větší mírou poukazují na variabilitu porostu (Brant *et al.* 2020).

Vegetačních indexů existuje mnoho a možnosti jejich využití a vypovídací hodnota se mění v průběhu vegetace. Nejznámější vegetační indexy jsou například Normalized Difference Vegetation index (*NDVI*), Normalized Difference RedEdge (*NDRE*), Normalized Red Edge Index (*NRERI*), Enhanced Vegetation index (*EVI*), Leaf Area Index (*LAI*) nebo Isaria Reflectance Measurement Index (*IRMI*), uvádí Brant *et al.* (2020); Mezera *et al.* (2019). Vegetačních indexů, které byly odvozeny z multispektrálních snímků existuje více než 100 (Huang 2021).

### 3.1.1 Indexy na základě rostlinné biomasy a výnosu

#### 3.1.1.1 Index *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index)

Index *NDVI* je bezpochyby nejčastěji používaným vegetačním indexem. Index vyjadřuje vitalitu vegetace. Hodnoty indexu korelují s řadou vybraných veličin jako je například objem nadzemní biomasy nebo zdravotní stav vegetace (Štych *et al.* 2015). Hodnoty indexu *NDVI* se pohybují od -1 do +1. A však u něj nelze vytvořit jasnou hranici mezi jednotlivými typy krajinného pokryvu. U záporných hodnot jde s vysokou pravděpodobností o vodu. Hodnoty blízké se k +1 naopak ukazují s vysokou pravděpodobností na hustou a zdravou zelenou vegetaci. Hodnoty blízké se k nule ukazují na oblast bez rostlinného pokryvu. K výpočtu hodnoty *NDVI* indexu se používají kanály vlnových délek v oblasti *NIR* (blízké infračervené záření) a červeného spektra. Zdravá vegetace s vysokým obsahem chlorofylu odráží více blízkého infračerveného (*NIR*) a zeleného světla oproti jiným vlnovým délkám záření. Rostliny pohlcují více červeného a modrého světla. Díky tomu lze lidským okem pozorovat jen rostliny se zelenou barvou. Pro tvorbu *NDVI* indexu je zapotřebí pro snímkování porostu využívat dron s multispektrální kamerou, která dokáže zachytit hodnoty odrazu *NIR* spektra záření (Zhangyan *et al.* 2006). *NDVI* je široce využíván zejména díky jeho jednoduchému výpočtu, kdy ho lze získat z jakéhokoliv multispektrálního snímku. Tyto multispektrální snímky lze snadno využít z družicových, leteckých nebo také stále častěji ze snímků z bezpilotních leteckých prostředků (UAV), uvádí Huang *et al.* (2021).

Index *NDVI* se využívá například k variabilnímu hnojení jarního ječmene. V pokusech při variabilním hnojení ječmene nejlépe vycházela varianta, kdy se zvyšovala dávka dusíkatého hnojiva s rostoucí hodnotou indexu *NDVI*. Pomocí variabilního hnojení došlo k prokazatelnému snížení spotřeby hnojiva (Brant *et al.* 2020).

Rovnice výpočtu vegetačního indexu *NDVI* (1):

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

Kde *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm) a *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm), uvádí Huang *et al.* (2021).

### 3.1.1.2 Index *SR* (Simple Ratio)

Index *SR* je nejjednodušší vegetační index. Tento index dává jednoduchý nástroj na odlišení zelených listů od ostatních objektů. Je vhodný také k relativnímu odhadu přítomnosti biomasy na snímku. Zelené listy mají nízkou odrazivost v červeném a modrém spektru, a naopak vyšší odrazivost v *NIR* spektru. Listy zelených rostlin tedy v tomto indexu nabývají mnohem větších hodnot než 1 při vysoké odrazivosti v *NIR* spektru a zároveň nízké odrazivosti v *Red* spektru záření. U ostatních objektů je odrazivost v obou spektrech podobná, hodnota indexu tedy nabývá hodnot blížících se k 1 (Hiphen 2022).

Výpočet indexu *SR* (2):

$$SR = \frac{NIR}{Red} \quad (2)$$

Kde *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm) a *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm), uvádí Hiphen (2022).

### 3.1.1.3 Index *REIP* (Red Edge Inflection Point)

Index *REIP* je vhodný například pro tvorbu předpisových map k variabilnímu hnojení pšenice. Tento index využívá pokročilejší systémy detekce záření v úzké oblasti *Red edge*. Indexy, které využívají toto úzké spektrální pásmo jsou více citlivé na změny obsahu chlorofylu v rostlinách, netrpí tak jako index *NDVI* saturačním efektem při vyšších hodnotách *LAI* (Leaf Area Index). Výhody v použití indexu *REIP* jsou také nižší citlivost k rušivým faktorům, jako je odražené záření od půdy a atmosférických vlivů (Žížala *et al.* 2021). Nevýhodou tohoto indexu je nutnost použití nákladnější sensorové techniky při pořizování snímků. K vytvoření tohoto indexu je potřeba snímků v přesně definovaných vlnových délkách záření (Lukas 2020). Výpočet indexu *REIP* (3):

$$REIP = 700 + 40 \frac{\frac{R_{670} + R_{780}}{2} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} \quad (3)$$

Kde  $R_{670}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 670 nm,  $R_{780}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 780 nm,  $R_{740}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 740 a  $R_{700}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 700 nm (Lukas 2020).

### 3.1.1.4 Index *NDRE* (Normalized Difference RedEdge)

Index *NDRE* (Normalized Difference RedEdge) je index, který je vhodný pro mapování variability půdního bloku ve vztahu k tvorbě map pro variabilní aplikace především při pozdějších aplikacích dusíku do porostů pšenice. Tento index využívá spektrální vlnové délky *NIR* a *Red edge*. Úzké spektrum *Red edge* je citlivé na střední až vysoké obsahy chlorofylu v rostlinách. Index je obdobou vegetačního indexu *NDVI*, jen je ve vzorci nahrazen kanál *Red* kanálem *Red edge* (Žížala *et al.* 2021). Vegetační index *NDRE* se uplatňuje především v pozdějších růstových fázích rostlin, kdy je přesnější než *NDVI* (Brant *et al.* 2020). Pomocí

vegetačního indexu *NDRE* lze dobře nacházet mezi rostlinami rozdíly v obsahu chlorofylu (Boiarskii & Hasegawa 2019).

Výpočet indexu *NDRE* (4):

$$NDRE = \frac{NIR - Red\ edge}{NIR + Red\ edge} \quad (4)$$

Kde *Red edge* je odrazivost v úzké části červeného spektra záření (690–730 nm) a *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm), uvádí Boiarskii & Hasegawa (2019).

### 3.1.1.5 Index *SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index)

Index *SAVI* byl vyvinut za účelem minimalizace vlivu půdy na spektrum odrážené vegetací. V porostech s méně hustou vegetací půda odráží část rozptýleného *NIR* spektra záření. Odrazy spektra záření mohou záviset na vlastnostech půdního substrátu. Nejvíce náchylné na zkreslení hodnot vegetačních indexů jsou červeně a žlutě zbarvené půdy (Heute 1988). Pro eliminaci vlivů půdního šumu byl do vzorce pro výpočet vegetačního indexu *SAVI* přidán do jmenovatele indexu faktor půdní úpravy *L*. Jako *L* se používá konstanta  $L = 0,5$ . Pomocí této konstanty se u indexu *SAVI* zvyšuje citlivost vegetace a snižuje se půdní šum, to dalo za vznik také modifikovanému *MSAVI* (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), u něhož dochází k vyššímu poměru mezi odrazivostí vegetace k půdnímu šumu (Qi *et al.* 1994).

Výpočet indexu *SAVI* (5):

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)} \cdot (1 + L) \quad (5)$$

Kde *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm), *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm) a *L* je konstanta eliminující půdní šum. Konstanta *L* má hodnotu 0,5, uvádí Qi *et al.* (1994).

### 3.1.1.6 Index *GEMI* (Global Environmental Monitoring Index)

*GEMI* je nelineární vegetační index, který se používá pro monitorování životního prostředí ze satelitních snímků. Tento index je odvozen tak, aby korigoval vlivy atmosféry. Index je podobný indexu *NDVI*, ale je méně citlivý na atmosférické vlivy. Index se nedoporučuje používat v porostech s řídkou nebo středně hustou vegetací kvůli výraznému ovlivnění holou půdou (Pinty & Verstraete 1992).

Výpočet indexu *GEMI* (6 a 7):

$$GEMI = eta(1 - 0,25 \cdot eta) - \frac{Red - 0,125}{1 - Red} \quad (6)$$

$$eta = \frac{2(NIR^2 - Red^2) + 1,5 \cdot NIR + 0,5 \cdot Red}{NIR + Red + 0,5} \quad (7)$$

Kde *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm), *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm), uvádí Pinty & Verstraete (1992).

### 3.1.1.7 Index *NGRDI* (Normalised Green – Red Difference Index)

*NGRDI* je jedním z indexů, který má uplatnění především při bezpilotním snímkování porostů pomocí dronů. Výpočet tohoto indexu je založen pouze na odrazivosti viditelného spektra barev. Ke snímkování lze pro tento index použít pouze levnější RGB kameru. Ve výzkumu Ramia Jannoura *et al.* (2015) na polích s hrachem a ovsem index *NGRDI* vykazoval významnou korelaci s nadzemní biomasou. Výpočet indexu je podobný indexu *NDVI*, jen je spektrum *NIR* nahrazeno spektrem *Green*. Indexy na základě RGB spektra záření se však nevyužívají tak často jako indexy se spektrem *NIR*, protože vzdálenost mezi spektry *Green* a *Red* je malá ve srovnání *Red* a *NIR*. Spektrální pásmo *NIR* poskytuje také více informací o geometrických rysech plodin a o biofyzikálních parametrech jako jen index listové plochy (*LAI*) oproti RGB spektru (Jannoura *et al.* 2015).

Výpočet indexu *NGRDI* (8):

$$NGRDI = \frac{Green - Red}{Green + Red} \quad (8)$$

Kde *Green* je odrazivost v zeleném spektru záření (490–570 nm), *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm), uvádí Index DataBase (2023).

## 3.1.2 Indexy na základě obsahu chlorofylu

### 3.1.2.1 Index *CCCI* (Canopy Chlorophyll Content Index)

Index *CCCI* byl vyvinut pro odhad dusíku v nadzemní biomase rostlin. Jeho výpočet vychází ze dvou indexů *NDRE* a *NDVI*. Hodnoty indexu *CCCI* se vypočítají jako podíl těchto indexů (rovnice 9). *CCCI* zohledňuje vztah mezi pokrývností porostu a obsahu dusíku v biomase. Pomocí indexu *CCCI* lze získávat informace o výživovém stavu porostu dusíkem nezávisle na stresu rostlin z nedostatku vody. Index *CCCI* nabývá hodnot od 0 do 1. Index je vhodný pro stanovení produkční dávky při hnojení dusíkem (Cammarano *et al.* 2011).

Výpočet indexu *CCCI* (9):

$$CCCI = \frac{\frac{NIR - Red\ edge}{NIR + Red\ edge}}{\frac{NIR - Red}{NIR + Red}} \quad (9)$$

Kde *Red edge* je odrazivost v úzké části červeného spektra záření (690–730 nm), *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm) a *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm), uvádí Cammarano *et al.* (2011).

### 3.1.2.2 Index *CVI* (Chlorophyll Vegetation Index)

Chlorofylový vegetační index *CVI* byl vyvinut pro zvýšenou citlivost na obsah chlorofylu v listech díky výpočtu pomocí odrazivosti v zeleném spektru záření. Poměr červeného a zeleného záření se využívá například k odhadu nadzemní biomasy. *CVI* byl původně navržen pro odhad koncentrace chlorofylu v listech cukrové řepy (Vincini *et al.* 2008).

Výpočet indexu *CVI* (10):

$$CVI = NIR \frac{Red}{Green^2} \quad (10)$$

Kde *Green* je odrazivost v zeleném spektru záření (520–600 nm), *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (630–690 nm) a *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (760–900 nm), uvádí Vincini *et al.* (2008).

### 3.1.2.3 Index *TCI* (Triangular Chlorophyll Index)

Index *TCI* je široce využíván v dálkovém průzkumu Země pro mapování zemědělských pozemků. Index je založen na obsahu chlorofylu v rostlinách. Obsah chlorofylu v rostlinách je velmi citlivým ukazatelem stresování rostlin vnějším prostředím, výkonu fotosyntézy a metabolické aktivity plodin (Shang *et al.* 2015).

Výpočet indexu *TCI* (11):

$$TCI = 1,2(Red\ edge - Green) - 1,5(Red - Green) \cdot \sqrt{\frac{Red\ edge}{Red}} \quad (11)$$

Kde *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (630–690 nm), *Red edge* je odrazivost záření v úzké části červeného spektra (690–730 nm) a *Green* je odrazivost v zeleném spektru záření (520–590 nm), zdroj: Shang *et al.* (2015).

### 3.1.2.4 Index *TGI* (Triangular Greenness Index)

Index *TGI* využívá pro svůj výpočet vlnové délky viditelného záření (400–700 nm). Tento index je dobrým ukazatelem obsahu chlorofylu v listech porostů s hustou vegetací. *TGI* je jeden z nejvhodnějších vegetačních indexů, kterým lze pomocí levnějších RGB kamer například na bezpilotních letounech zjišťovat zásobení rostlin dusíkem. Rovnice pro výpočet *TGI* je odvozena pomocí determinantu matice 3x3, která reprezentuje odrazivost ve 3 bodech trojúhelníku. Do vzorce zároveň byla započtena plocha tohoto trojúhelníku. Pomocí matematických výpočtů a úprav dále vznikla rovnice 12. Pro dobrou korelaci indexu *TGI* je potřeba použití v porostech s hustou vegetací. Tuto podmínku lze eliminovat použitím snímacích senzorů s vysokým rozlišením snímků (<10 mm/pixel). Hodnoty indexu *TGI* nabývají kladných i záporných hodnot. Kladné hodnoty udávají převahu v odrazivosti zelené barvy, což odpovídá zelené vegetaci. Záporné hodnoty indexu značí větší odrazivost modrého a červeného spektra záření, což může odpovídat například červeně zbarveným typům půd (Hunt *et al.* 2013).

Výpočet indexu *TGI* (12):

$$TGI = Green - 0,39 * Red - 0,61 * Blue \quad (12)$$

Kde *Green* je odrazivost v zeleném spektru záření (520–600 nm), *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (630–690 nm) a *Blue* je odrazivost v modrém spektru (760–900 nm), uvádí Hunt *et al.* (2013).



### 3.1.2.5 Index *VARI* (Visible Atmospherically Resistant Index)

K výpočtu hodnot vegetačního indexu *VARI* se využívají pouze vlnové délky viditelného záření (400–700 nm). Odrazivost viditelných složek záření je oproti *NIR* záření méně druhově specifická. Odrazivost ve viditelných vlnových délkách se řídí především obsahem a složením rostlinných pigmentů. Index *VARI* lze stanovit ze snímků z RGB kamery (Gitelson *et al.* 2002).

Výpočet indexu *VARI* (13):

$$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue} \quad (13)$$

Kde *Green* je odrazivost v zeleném spektru záření (520–600 nm), *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (630–690 nm) a *Blue* je odrazivost v modrém spektru (760–900 nm), uvádí Gitelson *et al.* (2002).

### 3.1.2.6 Index *GNDVI* (Green Normalized Difference Vegetation Index)

*GNDVI* je index postavený na odrazivosti zeleného spektra záření. Index udává fotosyntetickou aktivitu rostlin. Používá se v pozdějších fázích vývoje rostlin, k saturaci u tohoto indexu dochází později než u *NDVI*. Tento index je vhodný pro stanovení příjmu vody a dusíku v porostu. Jeho výpočet je podobný jako u indexu *NDVI*, jen je ve vzorci místo s červeným spektrem záření počítáno se zeleným. Hodnoty tohoto indexu jsou od -1 do 1. Hodnoty mezi -1 a 0 značí přítomnost vodní plochy nebo půdy bez porvy. *GNDVI* je citlivější než *NDVI* na změny chlorofylu v rostlinách a hodí se pro použití v pokročilejších růstových fázích oproti *NDVI* (Auravant 2022).

Výpočet indexu *GNDVI* (14):

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \quad (14)$$

Kde *Green* je odrazivost v zeleném spektru záření (490–570 nm) a *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm), uvádí: Index DataBase (2022).

## 3.1.3 Indexy na základě listové plochy

### 3.1.3.1 Index *EVI* (Enhanced Vegetation Index)

Index *EVI* vznikl z indexů *SAVI* a *ARVI* (Atmospherically Resistant Vegetation Index). Tento index je odolnější vůči složení atmosférického aerosolu a zároveň vlivům půdy. Pro zamezení vlivů atmosféry index používá ke svému výpočtu také odrazivost v modrém spektru záření. Index *EVI* také vykazuje lepší citlivost na snímky s velmi zelenou vegetací (Sukmono *et al.* 2019). Tento index byl vytvořen pro snímání pozemků pomocí satelitních platforem. Průchod záření mezi satelity a Zemí ovlivňuje velké množství aerosolů, což může způsobovat problémy při vyhodnocení snímků (Campbell 2017). Oproti nejpoužívanějšímu vegetačnímu indexu *NDVI*, u kterého je jeho hodnota více ovlivněna obsahem chlorofylu a saturuje při vysokém množství nadzemní biomasy porostu, index *EVI* vykazuje vyšší citlivost při plném zapojení porostu a ve větší míře reaguje na strukturní změny porostu. Lukas *et al.* (2018)

využíval index *EVI* pro výpočet výnosového potenciálu půdních bloků v Zemědělském družstvu Kojčice ze satelitních snímků za 8leté období.

Výpočet indexu *EVI* (15):

$$EVI = G \frac{NIR - Red}{(NIR + C_1 \cdot Red - C_2 \cdot Blue) + L} \quad (15)$$

Kde *L* je nelineární koeficient, *G* je koeficient zesílení, jeho hodnota je 2,5. *C1*, *C2* jsou koeficienty aerosolu. Koeficienty mají hodnoty *C1* = 6 a *C2* = 7,5. *NIR* je odrazivost blízkém infračerveném spektru (770–1300 nm), *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (600–700 nm) a *Blue* je odrazivost v modrém spektru záření (450–520 nm), uvádí Matsushita *et al.* (2007).

### 3.1.3.2 Index *WDRVI* (Wide Dynamic Range Vegetation Index)

Tento index je podobný indexu *NDVI*. Liší se použitím vážného koeficientu  $\alpha$ . Díky tomu má index širší dynamický rozsah. Nevýhodou tohoto indexu je, že při jeho použití je potřeba nejdříve hledat optimální hodnotu tohoto koeficientu (Campbell 2017). Index *WDRVI* je oproti *NDVI* až 3x přesnější. Zachycuje malé rozdíly v hustotě vegetace. *WDRVI* je citlivější na zeleň v horních částech rostlin. Index má využití především u zralých a hustých porostů plodin (Granular 2021).

Výpočet indexu *WDRVI* (16):

$$WDRVI = \frac{\alpha \cdot NIR - Red}{\alpha \cdot NIR + Red} \quad (16)$$

Kde  $\alpha$  je vážený koeficient, používá se pro snížení rozdílů příspěvků jednotlivých pásem *NIR* a *Red*.  $\alpha$  nabývá hodnot od 0 do 1. *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (780–1400 nm), *Red* je odrazivost v červeném spektru záření (640–760 nm), uvádí Granular (2021).

### 3.1.3.3 Index *LAI* (Leaf Area Index)

Index listové plochy *LAI* dává významnou charakteristiku vegetačního pokryvu zemského povrchu. Mohou se podle něho zjišťovat procesy jako je fotosyntéza, evaporace, transpirace. *LAI* je bezrozměrná veličina. Jednotka veličiny *LAI* odpovídá 10 000 m<sup>2</sup> listové plochy na hektar (Bréda 2008). *LAI* například dobře koreluje s množstvím nadzemní biomasy u rýže. *LAI* lze také počítat pomocí zjištění rozměrů rostlin (Wang *et al.* 2007).

Výpočet indexu *LAI* (17):

$$LAI = \frac{\text{celková plocha fotosyntetického aparátu listů [m}^2\text{]}}{\text{plocha půdy [m}^2\text{]}} \quad (17)$$

### 3.1.4 Index na základě obsahu dusíku

#### 3.1.4.1 Index *NDNI* (Normalized Difference Nitrogen Index)

Index *NDNI* se používá k odhadu relativního množství dusíku v porostu. Index se dá využít v zelené vegetaci, kde vykazuje výraznou citlivost na měnící se obsah dusíku. Výpočet indexu *NDNI* vychází z odrazivosti dvou pásem v blízkém infračerveném záření. Odrazivost při 1510 nm je závislá na množství biomasy a na koncentraci dusíku v listech. Odrazivost při 1680 nm by měla obsahovat podobnou závislost na množství biomasy bez vlivů absorpce záření dusíkem (Wang & Wei 2016).

Výpočet indexu *NDNI* (18):

$$NDNI = \frac{\log\left(\frac{1}{R_{1510}}\right) - \log\left(\frac{1}{R_{1680}}\right)}{\log\left(\frac{1}{R_{1510}}\right) + \log\left(\frac{1}{R_{1680}}\right)} \quad (18)$$

Kde  $R_{1510}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 1510 nm a  $R_{1680}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 1680 nm (Wang & Wei 2016).

### 3.1.5 Indexy na základě obsahu vody v rostlinách

#### 3.1.5.1 Index *LWCI* (Leaf Water Content Index)

Tento index udává obsah vody v listové hmotě. Index *LWCI* není citlivý na ovlivnění hodnot vlivy atmosférických šumů (Anazawa *et al.* 2001).

Výpočet indexu *LWCI* (19):

$$LWCI = G \frac{-\log [1 - (NIR - SWIR)]}{-\log [1 - (NIR + SWIR)]} \quad (19)$$

Kde  $G$  je půdní index, který má pro plochy s rostlinným pokryvem obvykle hodnotu 1. *NIR* je odrazivost v blízkém infračerveném spektru (800–1400 nm) a *SWIR* je odrazivost v krátkovlnném infračerveném spektru (1400–3000 nm), uvádí Sukmono *et al.* (2019).

#### 3.1.5.2 Index *WBI* (Water Band Index)

Tento index udává informace o obsahu vody v rostlinách. *WBI* vychází z poměrů odrazivosti spektra ve vlnových délkách, které jsou citlivé na změny stavu vody v listové biomase. Index se dá využít například k predikci vzniku požárů vyschlé vegetace. Hodnoty indexu pro zelenou vegetaci se pohybují od 0,8 do 1,2 (Kim *et al.* 2015).

Výpočet indexu *WBI* (20):

$$WBI = \frac{R_{970}}{R_{902}} \quad (20)$$

Kde  $R_{970}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 970 nm a  $R_{902}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 902 nm (Kim *et al.* 2015).

### 3.1.5.3 Index *MSI* (Moisture Stress Index)

Index *MSI* vykazuje citlivost vůči zvyšujícímu se obsahu vody v listech. Odrazivost záření ve vlnových délkách kolem 1599 nm je závislá na obsahu vody v listech rostlin. Ve vzorci se jako referenční hodnota používá odrazivost při 819 nm. V těchto vlnových délkách odrazivost není ovlivněna změnou obsahu vody v biomase. Běžné hodnoty indexu pro zdravou vegetaci se pohybují od 0,4 do 2. Vyšší hodnoty indexu znamenají větší vodní stres a menší obsah vody v rostlinách (Elhag & Bahrawi 2017).

Výpočet indexu *MSI* (21):

$$MSI = \frac{R_{1599}}{R_{819}} \quad (21)$$

Kde  $R_{1599}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 1599 nm a  $R_{819}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 819 nm (Elhag & Bahrawi 2017).

### 3.1.5.4 Index *NDWI* (Normalized Difference Water Index)

Index *NDWI* se používá k monitorování stavu vody v rostlinách. Slouží ke sledování vodního stresu rostlin, identifikaci deficitu vody a ke správnému nasycení rostlin vodou. Index nabývá hodnot od -1 do 1. Vysoké hodnoty udávají vysoký obsah vody v rostlinách a husté pokrytí vegetací. Nízké hodnoty ukazují na nízký obsah vody v rostlinách a řídký pokryv vegetací (Auravant 2022).

Výpočet indexu *NDWI* (22):

$$NDWI = \frac{R_{857} - R_{1241}}{R_{857} + R_{1241}} \quad (22)$$

Kde  $R_{857}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 857 nm a  $R_{1241}$  je odrazivost elektromagnetického záření o vlnové délce 1241 nm (Auravant 2022).

## 3.2 Zdroje dat pro tvorbu indexů

### 3.2.1 Družice Landsat

Družice vesmírného programu Landsat snímají povrch Země již od roku 1972. Od té doby bylo na oběžnou dráhu vyneseno již osm sad satelitů. V dnešní době jsou v provozu družice Landsat 8 a 9. Družice Landsat 9 obíhá Zemi po oběžné dráze ve vzdálenosti 705 km. Landsat 9 snímá zemský povrch pomocí kamery a infračervených senzorů v 11 spektrálních pásmech. Landsat 9 je schopen zobrazit všechna místa na Zemi každých 16 dní. V kombinaci s předchůdcem Landsat 8 je možné využívat snímky povrchu Země každých 8 dnů (Kemp 2021).

### 3.2.2 Družice Sentinel 2

Do projektu Copernicus Sentinel-2 patří dvě družice Sentinel 2A a 2B, které obíhají zemi po subpolární dráze po stejné oběžné dráze. Tyto družice jsou od sebe posunuté o 180°. První z těchto družic byla na oběžnou dráhu vypuštěna v červnu 2015, druhá v květnu 2017.

Družice Sentinel-2 snímají variabilitu podmínek zemského povrchu v širší záběru 290 km. Doba oběhu Země je na rovníku 10 dní pro jednu družici. Díky tomu, že jsou satelity dva, mohou snímat povrch rovníku každých pět dní. Ve středních zeměpisných šířkách snímají zemský povrch každé 2-3 dny v podmínkách bez oblačnosti (European Space Agency 2023).

Družice sentinel snímají sluneční záření odražené od zemského povrchu ve 13 spektrálních pásmech. Výška oběžné dráhy družic je 786 km se sklonem k rovníku 98,18°. Data z družic Sentinel 2 se mohou využívat ke sledování zdravotního stavu vegetace, k monitorování změn v krajině, pro precizní zemědělství, ale také k monitorování sněhové pokrývky a ledovců (World of space 2023).

### 3.2.3 PlanetScope

PlanetScope je seskupení družic pro snímkování zemského povrchu provozovaná společností Planet Labs Inc. Do seskupení PlanetScope patří přibližně 130 družic. Tyto komerční družice jsou vybaveny zobrazovacími senzory s vysokým rozlišením. Tyto družice umožňují pořizování snímků s rozlišením až 3 metry na pixel. Snímky pro konkrétní místo na planetě jsou z PlanetScope dostupné každý den. Díky svému rozlišení a frekvenci pořizování snímků jsou tyto družice vhodné pro monitorování dynamických procesů jako je růst plodin, odlesňování pralesů, monitorování přírodních katastrof a rozvoj měst. Využívání snímků z těchto družic je zpoplatněno (Arcdata 2023; Planet 2023).

### 3.2.4 Radarová data

Radarová data mohou sloužit jako vhodný doplňkový zdroj dat. Radarové snímky z družic odrážejí informace o rostlinných strukturách, obsahu vody ve vegetaci a v půdě. Radarová data lze získávat z družic Sentinel 1 (Tricht *et al.* 2018).

### 3.2.5 Snímkování pomocí dronu

K leteckému snímkování se používají především 2 druhy bezpilotních letounů – dronů. Do první kategorie dronů patří multikoptéry, nejčastěji kvadrokoptéry, do druhé kategorie patří letouny („křídla“). Obě tyto kategorie mají své výhody i nevýhody. Multikoptéry jsou drony s kolmým vzletem, k čemuž slouží určitý počet vrtulí a motorů. Multikoptéry můžeme nazývat podle počtu motorů a vrtulí, např. kvadrokoptéry, hexakoptéry, oktokoptéry. Multikoptéry lze využít k manuálnímu létání, i k létání podle letových plánů. Multikoptéry mají přesnější fotografie díky speciálnímu závěsu – gimbalu, na kterém je umístěna kamera, která pohlcuje vibrace a nárazy větru a udržuje kameru stále ve správném směru snímání. Hlavní nevýhodou Multikoptér je, že vydrží ve vzduchu mnohem kratší dobu než letouny. Multikoptérou lze během jednoho letu (cca 25 min) nasnímat přibližně 30 ha plochy v rozumné výšce letu, a tudíž při dobrém rozlišení snímků. Naopak letouny většinou létají jen podle letových plánů. Jejich provoz se musí více řídit podle počasí, kdy letounu vadí i mírný vítr. Poryvy větru během snímkování mohou výrazně ovlivňovat kvalitu pořízených fotografií. Letouny mohou na jednu baterii létat déle než multikoptéry. Na jeden let dokáží snímkovat plochu kolem 100 ha (Karas & Tichý 2016; Chára & Pinkas 2022).

Snímkování pomocí bezpilotních prostředků se dá využívat k agronomické inspekci porostů, k inventarizaci porostů jako je zapojení porostu, počet rostlin, mezerovitost. Monitoring pomocí UAV (unmanned aerial vehicle) nám také může poskytovat informace o výživném stavu porostu a zdravotním stavu rostlin. Můžeme také predikovat výnos plodin a zaplevelení pozemků (Lukas 2020). Snímání pozemků pomocí bezpilotních letounů nabízí bezprecedentní rozlišení snímků a operativní možnost jejich nasazení. Drony mohou pro snímkování využívat RGB kamery nebo speciální multispektrální senzory. Nespornou výhodou je, že drony mohou být využity pro periodické monitorování porostu. Při jejich nasazení lze volně vybírat optimální dobu pro let. Mezi nevýhody při použití dronů patří možnost radiometrického zkreslení absolutních hodnot odrazivosti jednotlivých spekter záření, pokud nejsou senzory před letem kalibrovány (Fanzini *et al.* 2019).

### **3.3 Software využívaný pro zpracování mapových podkladů**

Na českém trhu působí v dnešní době již řada společností zabývajících se precizním zemědělstvím. V této části je výčet několika hlavních leaderů na trhu.

#### **3.3.1 Xarvio**

Xarvio je jedna ze softwarových platforem, která zemědělcům po celém světě pomáhá s optimalizací zemědělské výroby. Aplikace xarvio patří do portfolia německé agrochemické firmy Bayer. Vlajkovou lodí této společnosti je produkt xarvio® FIELD MANAGER, se kterou pracuje více než 80 000 farmářů v 18 zemích při obdělávání více než 11 milionů ha. Aplikace umožňuje efektivní hospodaření pomocí široké škály datových vstupů pro optimální hospodaření na jednotlivých polích a zónách polí. Konkrétní rozhodování a vyhodnocování jednotlivých vstupů vychází od historických agronomických informací, sezónních rizik a modelů až po místní meteorologické údaje a satelitní snímky vegetace. Klíčovou vlastností xarvio® FIELD MANAGER je řízení výživy plodin. Aplikace upozorňuje zemědělce na optimální termíny aplikací a lze v ní také vytvářet variabilní aplikační mapy, které lze následně využívat pro aplikace hnojiv, fungicidů, regulátorů růstu a také pro variabilní setí (Čížková 2022).

#### **3.3.2 OneSoil**

OneSoil je švýcarská společnost, kterou na českém trhu zastupuje firma Strom Praha a.s. Pro potřeby precizního zemědělství nabízí firma svou platformu OneSoil Yield. V aplikaci Yield lze vytvářet produkční zóny na základě sklizňových map nebo dlouhodobých satelitních snímků za posledních šest let. Z těchto dat lze vytvářet předpisové mapy pro variabilní aplikace. V každé mapě pro variabilní aplikace je možnost nastavit podle požadavků kontrolní pásy pro pozdější vyhodnocování efektivnosti aplikací (Strom Praha 2023).

#### **3.3.3 SatAgro**

Platforma SatAgro je zaměřena především na využití pozorování Země (zejména z družic). Firma nabízí 2 základní verze své platformy pro zákazníky. V základní verzi

Professional je umožněno satelitní snímkování celé farmy, tvorba variabilních aplikačních map, rozdělení pozemků do zón a optimalizace odběrných bodů pro půdní rozbor. Ve verzi Premium je navíc možno využít monitorování porostů s vysokým rozlišením (3 m) pomocí Planet Labs Inc. Je zde také možnost agronomických konzultací v anglickém nebo polském jazyce a integrace senzorů a meteorologických stanic. Pro tvorbu aplikačních map jsou využívány zóny podle výnosového potenciálu nebo především index *NDVI*. SatAgro také umožňuje nahrávání vlastních snímků z bezpilotních prostředků (SatAgro 2023).

### 3.3.4 Varistar

Varistar je česká společnost, která se od roku 2017 zabývá komplexními řešeními v oblasti precizního zemědělství. Zaměřuje se především na variabilní aplikace. Podle výsledků této společnosti lze variabilními aplikacemi snížit dávku dusíku v průměru o 15 % při zachování stejného nebo i vyššího výnosu plodin. Pro tvorbu aplikačních map společnost využívá snímky z komerční satelitní konstelace PlanetScope, která nabízí snímky s více než 10x vyšším rozlišením než ze snímků pomocí satelitů Sentinel-2 nebo Landsat-8. Satelity PlanetScope zajišťují snímkování pozemků každý den při rozlišení 9 m<sup>2</sup>/pixel. Na portálu Varistar je možné zobrazovat satelitní snímky a vegetační indexy *NDVI*, *EVI*, *LAI* a další. (Semrádová 2022).

### 3.3.5 CleverFarm

Společnost CleverFarm je český startup, který nabízí několik nástrojů pro precizní zemědělství. Součástí nabídky této společnosti je také modul meteorologických stanic a senzorů, kterými lze zjišťovat optimální podmínky pro aplikaci přípravků, založení porostu apod. (Langmaier 2022). Firma se specializuje na IoT (Internet of Things) senzory, které pomocí dat z půdy a vzduchu optimalizují v aplikaci CleverIrrigation závlahy. Další služby CleverFarm jsou agrovidence, evidence půdy a nabízí také řešení pro variabilní aplikace. Pro tvorbu variabilních aplikačních map využívá analýzu družicových snímků, výnosové mapy ze sklízečích mlátiček a výsledky AZZP (Agrochemické zkoušení zemědělských půd), uvádí CleverFarm 2023.

## 3.4 Pšenice ozimá

### 3.4.1 Základní charakteristika

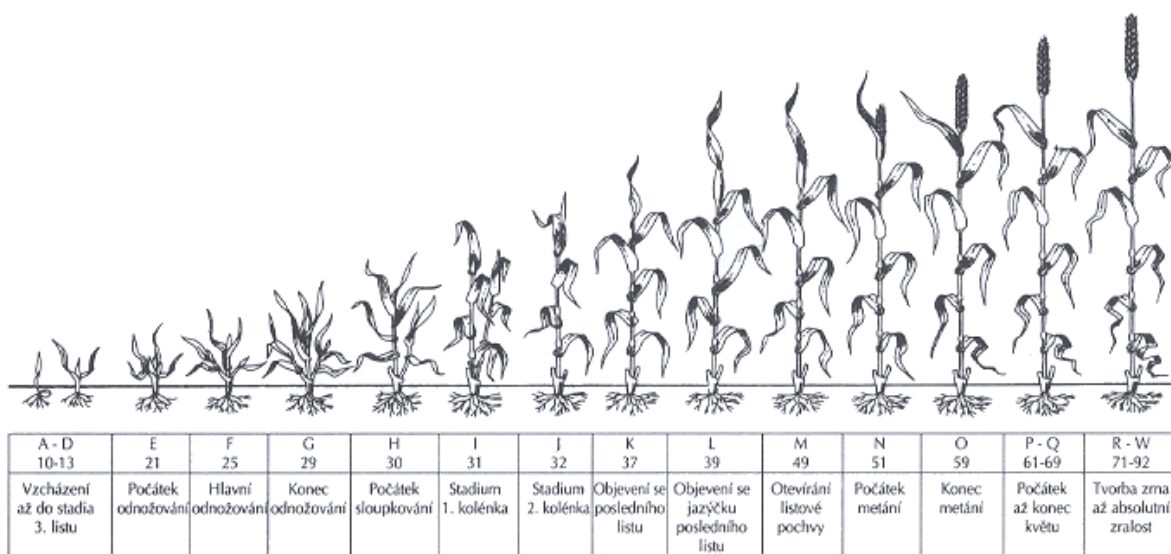
Pšenice ozimá (*Triticum aestivum*) je obilnina z čeledi lipnicovité (*Poaceae*). Stéblo pšenice je duté, tenkostěnné, obvykle tvořené 5 články oddělenými kolénky. Listy pšenice jsou čárkovité, ploché, bez řapíků. Na kraji listové pochvy a čepele se nachází krátký vroubkovaný jazýček. Plodem pšenice je obilka (Zimolka *et al.* 2005). V České republice se pěstuje velké množství odrůd ozimé pšenice s rozdílnými nároky. Rozmanitá skladba odrůd předurčuje úspěšné pěstování v nejúrodnějších oblastech, ale i v méně příznivých podmínkách (Vaněk *et al.* 2016).

### 3.4.2 Hospodářský význam

Pšenice ozimá je v České republice nejpěstovanější zemědělskou plodinou. Její osevní plocha je více než 800 tis. ha. Pšenice je klíčovým zdrojem sacharidů, bílkovin, minerálů a vlákniny pro lidstvo i hospodářská zvířata (Abrham *et al.* 2019). Pšenice se využívá jako hlavní komodita k potravinářským účelům, zejména k výrobě pekařských a pečivářských výrobků. Pšenice je také jednou z nejdůležitějších krmných obilovin pro potřeby výroby krmných směsí pro hospodářská i domácí zvířata. Ozimá pšenice je jedna z nejvýznamnějších tržních komodit, která významně ovlivňuje ekonomiku zemědělských podniků (Smutný *et al.* 2018). Výhody ozimé pšenice jsou především ve výnosové jistotě s dobrou možností exportu, případně i intervenčních nákupů (Kůst 2010). Pro lidskou stravu jsou produkty z pšenice dominující složkou a jejich spotřeba stále roste (Ryant *et al.* 2017).

### 3.4.3 Vývoj porostů a dynamika produkce biomasy

Pšenice během svého životního cyklu prochází růstem a vývojem. Vývoj pšenice začíná nabobtnáním a vyklíčením obilky a končí vytvořením nové obilky. Za růstové změny považujeme kvantitativní přírůstky organické hmoty (růst a diferenciaci buněk, pletiv), tvorbu rostlinných orgánů a jejich prostorové uspořádání na rostlině. Vývoj rostlin se dělí na dvě základní fáze vegetativní a generativní. Do vegetativní fáze patří klíčení, vzcházení a odnožování. Do generativní fáze patří sloupkování, metání, kvetení a zrání. Tyto růstové fáze lze přesně definovat pomocí stupnic. Pomocí těchto stupnic můžeme zaznamenávat momentální stav rostlin v porostech a určovat vhodné agrotechnické zásahy (Zimolka *et al.* 2005). V současné době je jedna z nejvyužívanějších stupnic BBCH (obr. 2). Tato stupnice byla poprvé publikována Bleiholderem v roce 1989. Název stupnice BBCH je odvozen od Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry. Tato fenologická stupnice se kromě pšenice využívá také pro hodnocení vývojových fází jednoděložných i dvouděložných rostlin. Hodnoty stupnice začínají od 01 do 99 (Kubíková *et al.* 2019).



Obr. 2: Fenologická stupnice BBCH pro pšenici; (Neudert & Smutný 2003)



### 3.4.4 Základní agrotechnika

#### 3.4.4.1 Zařazení do osevního postupu

Pšenice ozimá si klade z obilnin největší nároky na předplodinu (Zimolka *et al.* 2005). Nejlepšími předplodinami pro ozimou pšenici jsou bobovité rostliny, které výrazně zlepšují půdní úrodnost a obohacují půdu o dusík. Dalšími dobrými předplodinami jsou včas sklizené okopaniny a řepka. S ohledem na vysoké zastoupení pšenice na orné půdě musí být v osevních postupech zařazována i po méně vhodných předplodinách, jako jsou obilniny (Vaněk *et al.* 2016). Pokud se zařazují ozimé obilniny v osevních postupech vícekrát po sobě, zhoršují se půdní vlastnosti. Také se zvyšuje riziko zaplevelení pozemků specifickými plevele pro obilniny a je zde vyšší riziko napadení porostů houbovými chorobami a škůdci. Tyto negativní dopady je potřeba při pěstování kompenzovat vyššími dávkami průmyslových hnojiv a přípravků na ochranu rostlin. Tyto nepříznivé vlivy lze také poměrně úspěšně řešit výběráním tolerantních odrůd ozimé pšenice (Zimolka *et al.* 2005).

#### 3.4.4.2 Zpracování půdy

Zpracování půdy pro pšenici by se mělo řídit podle vláhových podmínek, typů půdy a podle předplodiny. Základem pro následné setí pšenice je zajistit zpracováním půdy co nejlepší podmínky pro klíčení a následný růst rostlin. Důležité je při přípravě půdy docílit optimálního množství vody v půdě. Nadbytek i nedostatek půdní vody je pro rostliny škodlivý (Neudert *et al.* 2005). Při dostatku srážek ve vlhčím období je vhodné pro zpracování půdy využít orbu. V sušších podmínkách je lepší provést minimalizaci nebo bezorebné zpracování půdy. Využití minimalizačních technologií má řadu výhod jako je veliký plošný výkon a tím umožnění založení porostů při příznivém stavu půdy na velkých plochách a snížení nákladů na zpracování půdy (Badalíková & Bartlová 2011). Při dostatečném množství srážek, které jsou pravidelně rozloženy nejsou prokazatelně zjištěny rozdíly mezi různými variantami zpracování půdy ve vlhkosti půdy ani ve výnosu ozimé pšenice (Neudert *et al.* 2005). V omezených podmínkách lze pro zakládání porostů ozimé pšenice využít setí do nezpracované půdy. Při tomto systému porosty vyžadují zvýšené dusíkaté hnojení (až o 50 kg/ha) a chemickou regulaci plevelů 7-10 dnů před setím. Setí do nezpracované půdy je vhodné zvláště po pozdě sklizených okopaninách, silážní kukuřici nebo lze využít i při setí do strniskových meziplodin. Při tomto typu výsevu lze na pozemcích lépe odolávat větrné erozi (Zimolka 2005).

#### 3.4.4.3 Zakládání porostu

Zakládání porostů ozimé pšenice je potřeba provést v optimálních půdních a vlhkostních podmínkách. Pro pšenici je důležité dobře připravené set'ové lůžko s utuženou spodní částí a kyprou částí nad uloženým osivem. Při setí je potřeba pravidelné rozmístění obilek, což je předpoklad pro vytvoření vyrovnaného porostu. K setí lze využívat klasické nesené nebo tažené secí stroje s mechanickým nebo pneumatickým typem výsevu. Secí stroje mohou být podle způsobu ukládání osiva botkové, diskové nebo radličkové. Tyto secí stroje ukládají osivo do úzkých řádků nejčastěji s roztečí 125 nebo 150 mm (Zimolka *et al.* 2005). Díky kompenzačním schopnostem lze pšenici vysévat také do širokých řádků 250 nebo

300 mm. Tyto porosty seté do širokých řádků lépe odolávají suchým podmínkám a lze u nich využít například souběžné pěstování pšenice ozimé s plodinami fixující vzdušný dusík (Brant *et al.* 2018).

Termín výsevu ozimé pšenice se liší podle výrobních oblastí. Optimální termín setí je od poloviny září do poloviny října. Při časnějším termínu setí je potřeba volit nižší výsevek (2,5 – 3 miliony klíčivých semen/ha. Při opoždění je potřeba postupně výsevek zvyšovat. Při setí po agrotechnické lhůtě je potřeba zvýšit výsevek až na 5,5 – 6 milionů klíčivých semen/ha. Podle povětrnostních podmínek se nastavuje hloubka setí v rozmezí od 30 do 50 mm. Menší hloubka je vhodná při dostatečné půdní vlhkosti nebo při očekávaných dešťových srážkách. Větší hloubku je dobré využít při suchých podmínkách, kdy má osivo pšenice hlouběji lepší podmínky pro klíčení (Zimolka *et al.* 2005).

#### 3.4.4.4 Výživa a hnojení

Výživa a hnojení je u pšenice velmi důležité. Pro dosažení dobrého výnosu a kvality zrna je zapotřebí dostatek dusíku, ale i ostatních živin, především fosforu a draslíku. Hnojením jednak přímo podporujeme výnos a jakost sklizeného zrna, ale také nepřímo podporujeme obnovu půdní úrodnosti dodáním odebraných živin sklizní. Množství potřebných živin je přímo závislé na výnosu. Pšenice k vytvoření 6 t zrna potřebuje 144 kg N, 30 kg P, 108 kg K, 24 kg Ca a 12 kg Mg. Pšenice pro svůj růst a správný vývoj potřebuje půdu s dostatečným množstvím přístupných živin. Důležité je také správné pH půdy. V případě potřeby je možné před setím pšenice aplikovat vápenec (nejlépe co nejdříve, tedy již koncem léta). Nejvyšší vliv na výnos a kvalitu zrna pšenice má výživa dusíkem. Dusík ovlivňuje utváření výnosových prvků. Hnojení dusíkem by mělo vycházet z biologických zvláštností odrůd, půdní úrodnosti, průběhu počasí a stavu porostu. Hnojení dusíkem je dobré rozdělit, nejčastěji se jarní dávka rozděluje na dvě dávky. Rozdělení dávky je vhodné provést, aby nedocházelo ke ztrátám minerálních forem dusíku. Podle termínu aplikace lze hnojení dusíkem rozdělit do několika částí (Vaněk *et al.* 2016).

První fází je základní hnojení, které probíhá nejpozději do období setí. Pšenice má v podzimním a zimním období malou potřebu dusíku, proto je vhodné provádět toto hnojení jen na pozemcích méně úrodných, po špatné předplodině a při zaorávce většího množství posklizňových zbytků. Pro základní hnojení je vhodný síran amonný. Jeho dávka by ale neměla překročit 40 kg N na hektar (Vaněk *et al.* 2016). Při zakládání porostu je také vhodné doplnit do půdy další živiny důležité pro růst rostlin. Jde zejména o fosfor a draslík. Tyto živiny lze dodávat prostřednictvím směsí jednosložkových nebo pomocí kombinovaných hnojiv. Z fosforečných hnojiv je potřeba upřednostnit ty, které obsahují fosfor ve vodorozpustné formě. K hnojení fosforem lze použít např. superfosfáty (jednoduchý, trojitý). Pro hnojení draslíkem je možné využít draselné soli (síran draselný, chlorid draselný). Všechny 3 základní živiny lze také aplikovat současně ve formě NPK hnojiv, potřebné živiny lze doplnit také pomocí organických hnojiv jako je hnůj, kejda, digestát nebo kompost. Dávky těchto hnojiv by měly vycházet z půdních rozborů a odebraných živin sklizní (Škarpa *et al.* 2016; Černý *et al.* 2020).

Další fází hnojení dusíkem je přihnojení během vegetace, které můžeme dále rozdělit na regenerační, produkční a kvalitativní. Regenerační hnojení se provádí brzy na jaře po přezimování podle půdních a povětrnostních podmínek. Tato dávka dusíkatých hnojiv

podporuje vývin porostu, regeneraci a odnožování (Vaněk *et al.* 2016). Formu dusíkatých hnojiv pro regenerační hnojení je potřeba volit podle stavu porostu a povětrnostních podmínek. Pro slabé a poškozené porosty mrazem, je vhodné použít k hnojení nitrátovou formu dusíku (ledková forma). Nitrátovou formu dusíku je dobré použít také při pozdějším a rychlém nástupu jara jako rychlý zdroj dusíku. V dobře odnožených porostech a při brzkém otevření jara je vhodné k hnojení použít amonnou či amidickou formu dusíku (DASA, močovina). Dávka čistého dusíku pro regenerační hnojení činí 20 až 60 kg na hektar (Ryant *et al.* 2017).

Druhou fází hnojení během vegetace je produkční hnojení. Toto hnojení by mělo být prováděno po konci odnožování, na počátku sloupkování v době, kdy dochází k diferenciaci vegetačního vrcholu. V této fázi se zakládá počet zrn v klasu, proto je důležité zajistit rostlinám dostatek dusíku. Podle stavu porostu volíme dávky od 20 do 60 kg N na hektar. Pro toto hnojení je vhodné využít ledková hnojiva nebo DAM 390 (Vaněk *et al.* 2016). V této fázi hnojení je pro ozimou pšenici také vhodné doplnění síry. Síra zvyšuje využití aplikovaného dusíku, působí pozitivně na kvalitu produkce i na výnos. Dávka síry pro ozimou pšenici se pohybuje okolo 20–30 kg/ha (Ryant *et al.* 2017).

Poslední fází hnojení pšenice ozimé během vegetace je kvalitativní hnojení. Toto hnojení by se mělo uskutečnit těsně před metáním nebo krátce po něm. Kvalitativním hnojením lze ovlivnit kvalitativní parametry zrna a hmotnost 1000 semen. V této fázi aplikujeme především u potravinářských pšenic 20 až 30 kg N na hektar. Pro hnojení lze použít ledková hnojiva, roztok močoviny s mikroelementy, ředěný DAM 390. Koncentrovaná kapalná hnojiva lze použít pouze při aplikaci pomocí speciálních hadicových nástavců na postřikovači. Dostupnost dusíku rostlinám po této aplikaci je značně závislá na průběhu počasí (Tvarůžek *et al.* 2011).

#### 3.4.4.5 Ochrana proti škodlivým činitelům (choroby, škůdci a plevele)

Ochrana pšenice proti škodlivým činitelům začíná ještě před jejím setím. Vše začíná při výběru vhodného pozemku, respektive vhodné předplodiny. Vhodná předplodina v osevním sledu dokáže redukovat patogeny napadající pšenici v půdě. Dále může být dalším preventivním opatřením účinná příprava půdy před setím. Při setí ozimé pšenice je nezbytné použít fungicidní moření proti sněti mazlavé a prašné, fuzariózám klíčnicích rostlin a plísni sněžné. Některá nová mořidla chrání obilniny i proti listovým chorobám v počátečních růstových fázích (Czakó & Malík 2017).

Na podzim po zasetí obilnin patří mezi hlavní zásahy herbicidní ochrana porostů a také podle tlaku škůdců ochrana proti přenašečům virových onemocnění. Podzimní aplikace herbicidů mají řadu výhod. Na trhu je řada převážně vícesložkových herbicidů, kterými lze vyřešit likvidaci celého plevelného spektra. Mezi hlavní účinné látky obsažené v těchto herbicidech patří *diflufenican*, *flufenacet*, *chlorotoluron*, *pendimethalin* a další. Podzimní aplikace herbicidů zajišťuje dobré podmínky pro růst hlavní plodiny a také nestresuje rostliny hlavní plodiny (Spáčilová 2014). U porostů v odnožování můžeme na podzim provést také aplikaci regulátorů růstu. Vhodnými morforegulátory jsou přípravky na bázi CCC (*ChlorCholineChlorid*), které podpoří odnožování, vyrovnání odnoží a zvýší schopnost rostlin k přezimování (Horčíčka *et al.* 2012).

Mezi jarní pesticidní zásahy u ozimé pšenice patří aplikace herbicidů u porostů, u kterých nebyla provedena podzimní aplikace anebo nebyla dostatečně účinná. Dalším z důležitých zásahů je aplikace fungicidů. V jarním období může být fungicidní ochrana směřována do několika období. Období aplikace fungicidů se označují T1, T2, T3 a T4. T1 aplikační termín nastupuje počátkem sloupkování, T2 konec sloupkování, T3 počátek metání a T4 kvetení. Podle infekčního tlaku v dané odrůdě je vhodné provést jedno až tři fungicidní ošetření. Mezi hlavní choroby pšenice ozimé, na které je potřeba se zaměřit, patří pravý stéblolam obilnin (*Pseudocercospora herpotrichoides*), černání pat stébel (*Gaeumannomyces graminis*), padlí travní (*Blumeria graminis*), rzi (*Puccinia*) a braničnatky (*Septoria*). Ze škůdců je potřeba si v porostu ozimé pšenice dát pozor především na kohoutky (*Oulema sp.*), uvádí Horčíčka *et al.* (2012); Bittner (2009).

#### 3.4.4.6 Sklizeň a parametry sklizeného produktu

Sklizeň pšenice ozimé by se měla provádět při plné zralosti pšenice. V této fázi jsou všechny části rostlin včetně všech kolének zaschlé. Obilky jsou tvrdé, nedají se lámat a odolávají i vrypu nehtem. Většina porostů je v současné době sklízena přímou sklizní pomocí sklízecích mlátiček s žacím válem. Sklízecí mlátičky je potřeba pro sklizeň náležitě seřadit s ohledem na vlhkost zrna pro snížení sklizňových ztrát. Pro sklizeň pšenice je optimální vlhkost zrna pod 15 %. Období sklizně pšenice obvykle probíhá od druhé poloviny července. Ve sklizňovém sledu by se měly porosty sklízet podle ranosti jednotlivých odrůd. Pro sklizeň by se měly také upřednostnit nejdříve množitelské porosty a potravinářské odrůdy pšenice pro zachování obsahu bílkovin, kvality lepku, objemové hmotnosti zrna a hodnoty čísla poklesu. S opožděním sklizně se hodnoty těchto parametrů snižují (Zimolka *et al.* 2005).

#### 3.4.5 Využití vegetačních indexů v porostech pšenice

Využití vegetačních indexů v pšenici jako jedné z nejpěstovanějších plodin je veliké. Vegetační indexy mají své uplatnění především při využití principů lokálně cíleného hospodaření na zemědělské půdě, tzv. precizního zemědělství. Pomocí vegetačních indexů lze na základě mapování variability porostů možné rozdělit pozemek do tzv. management zón a pomocí techniky provádět lokálně cílené aplikace hnojiv a přípravků na ochranu rostlin. Cílem těchto způsobů aplikace je efektivní využití zdrojů s ohledem na potenciál daného místa na pozemku, optimalizace kvality produkce a příznivý vliv na životní prostředí (Lukas *et al.* 2012).

Jedním z nejvhodnějších vegetačních indexů pro zjišťování zásobení porostů dusíkem je index *REIP*. Z výsledků Heege *et al.* (2008) bylo zjištěno, že nejvyššího koeficientu determinace dosáhl *REIP* vypočtený lineární interpolací. Pro variabilní hnojení se hojně používá také index *NDVI*. Při variabilním hnojení se během produkčního hnojení dávka dusíku snižuje se zvyšující se hodnotou *NDVI* či *REIP*. Během kvalitativního hnojení se naopak zvyšuje aplikační dávka se zvyšující se hodnotou *NDVI* a *REIP* (Lukas *et al.* 2012).

Campos *et al.* (2019) ve své práci při monitorování porostů jarní pšenice na polích v jihovýchodním Španělsku se zabývali odhadováním výnosu pšenice pomocí časového vývoje hodnot *NDVI* z družic Landsat 8 a Sentinel 2A. Z výsledků této studie vyplývá, že pro hodnocení celkového nárůstu biomasy pomocí *NDVI* z hlediska prostorové variability je potřeba

analyzovat celé vegetační období růstu, protože vývoj rostlin je dynamický proces a může se vyvíjet během celého vegetačního období.

Při hodnocení vegetačních indexů u pšenice ozimé je potřeba zohlednit při porovnávání porostu vliv odrůdy na hodnotu vegetačního indexu. Z práce Aparicio *et al.* (2000) při výzkumu na hodnocení výnosu pšenice tvrdé pomocí vegetačních indexů vyplývají statisticky významné rozdíly hodnot *LAI*, *NDVI*, *SR* a *PRI* mezi jednotlivými genotypy pšenice.

Společnost Yara nabízí svým zákazníkům zařízení Yara N-Tester, který slouží ke stanovení obsahu chlorofylu z listů obilnin. Pomocí tohoto zařízení lze zjistit aktuální nutriční stav rostlin a potřebné množství dusíku. Analýza listů vychází z měření spektrální odrazivosti pomocí světelného senzoru. Zařízení lze využít v řadě plodin jako je ozimá pšenice, ozimý ječmen, jarní ječmen, ozimé žito a ozimé tritikále. Pro optimalizaci výsledku je potřeba při měření zadávat analyzovanou odrůdu plodiny. V návodu pro měření jsou pro jednotlivé plodiny dodávány tabulky s hodnotami pro korekci hodnot a optimalizaci hodnot pro jednotlivé odrůdy (Lukas 2010; Atfarm 2023).

Zhuo *et al.* (2020) ve své práci prováděné v Čínské provincii Henan zjišťovali možnosti predikce zralosti ozimé pšenice na základě indexu listové plochy z dálkového průzkumu země. Z této práce vychází pro odhad optimálního termínu sklizně doplnění hodnot indexu *LAI* o meteorologický model. Tato predikce dat pro zralost by umožnila efektivnější plánování sklizně porostů a sklizení zrna v optimálním čase a tím zamezení ztrát časnou nebo pozdní sklizní. Tyto metody využívá i český software pro zemědělce Varistar, který využívá chlorofylový index *IRECI* (Inverted Red-Edge Chlorophyll Index) pro identifikaci bloků pro sklizeň (Agrinova Group 2020).

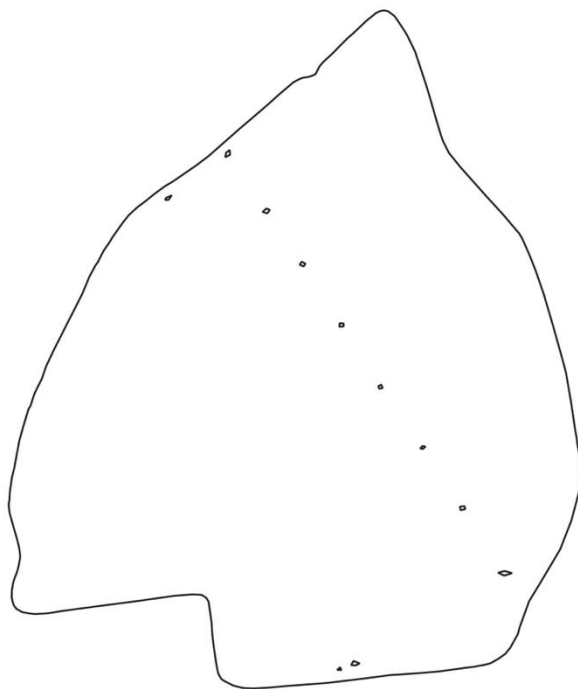
## 4 Metodika

### 4.1 Charakteristika stanoviště

Praktická část bakalářské práce probíhala na půdním bloku zemědělské společnosti Statek Chyšé s.r.o. Společnost se intenzivně zabývá inovacemi v oblasti zemědělství a využíváním nejmodernějších technologií precizního zemědělství. Rostlinná výroba je na farmě realizována na 4585 ha orné půdy, kde se pěstuje pšenice ozimá, ječmen jarní, žito ozimé, řepka ozimá a další. Farma obhospodaruje také 2197 ha trvalých travních porostů a věnuje se chovu masného skotu plemene Charolais.

#### 4.1.1 Charakteristika půdního bloku

Přesný polní experiment probíhal na modelovém půdním bloku (obr. 3) o výměře 25,07 ha s označením ve LPIS 5802-1 (820-1020). Půdní blok se nachází u obce Chyšé v Karlovarském kraji v katastrálním území Chyšé a Podštěly v průměrné nadmořské výšce 479 m s průměrnou sklonitostí 1,83°. Na půdním bloku jsou zastoupeny 3 BPEJ (Bonitovaná půdně ekologická jednotka). Jde o BPEJ 5.33.01 (12,22 ha), 5.12.00 (12,54 ha) a v malé míře 5.08.10 (0,32 ha). Na půdním bloku je středně těžký půdní druh. Podle výsledků AZZP je na pozemku silně kyselá půda (pH 5,0), obsah fosforu je hodnocen jako dobrý (91 mg/kg), obsah draslíku vysoký (363 mg/kg), obsah vápníku vyhovující (1615 mg/kg), obsah hořčíku je dobrý (181 mg/kg) a obsah síry vyhovující (24,8 mg/kg).



Obr. 3: Mapa půdního bloku 5802

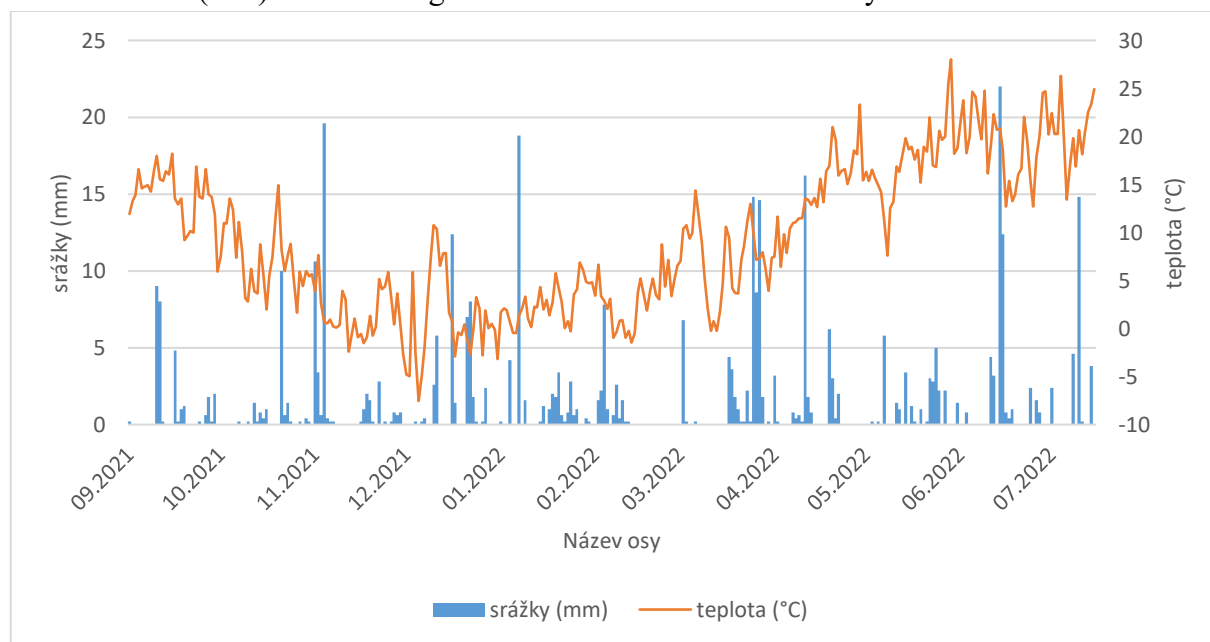
#### 4.1.2 Průběh počasí

Meteorologické údaje na lokalitě Chyšce dokumentuje graf 1 v období od 1.9.2021 do 28.7.2022 (do sklizně hodnocené ozimé pšenice). Hodnoty denního úhrnu srážek a teploty vzduchu byly naměřeny pomocí meteorologické stanice Rainset 2 (EMS Brno), která je umístěna v blízkosti sledovaného půdního bloku. Meteorologická stanice patří do meteorologické sítě Isidor (Centrum precizního zemědělství při ČZU v Praze).

Měsíc duben byl na lokalitě velmi srážkově příznivý, napršelo 69,8 mm, což je 226 % čtyřletého průměru. Naopak měsíce květen a červen byly výrazně srážkově podprůměrné. Během května spadlo 51 % srážek ze čtyřletého průměru a v červnu jen 49 %. Vzhledem k suchému období května a června docházelo k podesychnání porostu.

Celkový úhrn srážek ve sledovaném období byl 397,2 mm. V období od zasetí ozimé pšenice po její sklizeň to pak bylo 372,4 mm. Průměrná denní teplota ve sledovaném období byla 9,25 °C. Ročník byl tak celkově suchý a teplotně nadprůměrný s velmi teplou zimou.

Graf 1: Grafické vyjádření meteorologických údajů – průběhu teploty vzduchu (°C) a denních hodnot srážek (mm) z meteorologické stanice Isidor na lokalitě Chyšce



#### 4.1.3 Agrotechnika

Na pozemku byla 26. 9. 2021 vyseta minimalizační technologií ozimá pšenice odrůdy Julie. Julie je raná odrůda s elitní pekařskou jakostí od české osivářské společnosti Selgen a. s. Pro setí byl použit radličkový secí stroj Horsch Sprinter 9 SW. Výsevek činil 170 kg/ha (3,5 milionu klíčivých zrn), předplodinou byla ozimá řepka. Během setí bylo pod patu aplikováno 80 kg hnojiva NPK 10-26-26. Jarní hnojení během vegetace bylo rozloženo do 3 termínů (7. 3., 5. 5. a 25. 5.) v celkové dávce 157 kg dusíku na hektar. Všechny aplikace byly prováděny uniformně pro co největší zachování rozdílů mezi zónami na pozemku a jejich ovlivnění pouze produkčními vlastnostmi půdy. Kompletní agrotechnické operace prováděné na půdním bloku jsou uvedené v tabulce 1. Veškeré chemické ošetření v průběhu vegetace dokládá tab. 2.

Tab. 1: Popis polních prací prováděných na pokusné lokalitě

pracovní operace	termín provedení	specifikace
podmítka	1.9.2021	
setí	26.9.2021	170 kg/ha osiva + 80 kg NPK
chemická ochrana	25.10.2021	aplikace 1
regenerační hnojení	7.3.2022	Lovofert LAD 27–150 kg/ha
chemická ochrana	19.4.2022	aplikace 2
chemická ochrana	1.5.2022	aplikace 3
produkční hnojení	5.5.2022	Lovodam 30–170 kg/ha
chemická ochrana	10.5.2022	aplikace 4
kvalitativní hnojení	25.5.2022	Lovofert LAD 27–242 kg/ha
chemická ochrana	7.6.2022	aplikace 5
sklizeň	28.7.2022	výnos 6,8 t/ha

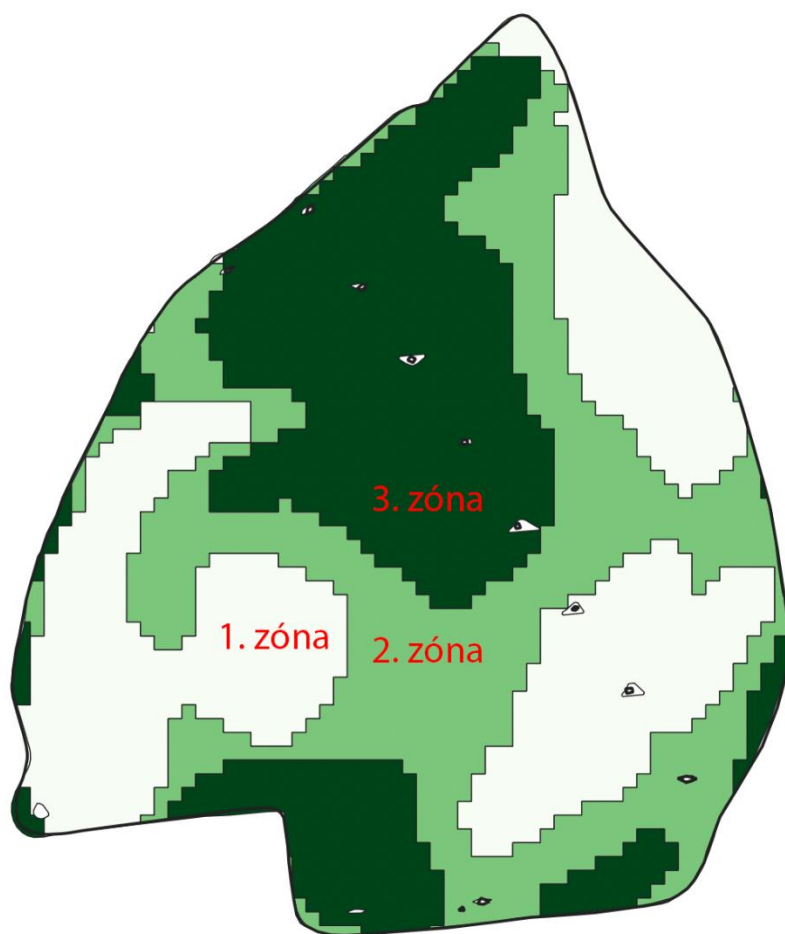
Tab. 2: Chemická ochrana v průběhu vegetace

1. aplikace		2. aplikace		3. aplikace		4. aplikace		5. aplikace	
dávka	produkt	dávka	produkt	dávka	produkt	dávka	produkt	dávka	produkt
200 l	voda	150 l	voda	200 l	voda	200 l	voda	200 l	voda
0,1 l	Lambo 50 EC	1,2 l	Agri CCC – 750 SL	1 l	Prochloraz 450	0,2 l	Flurostar 200	0,1 l	Lambo 50 EC
1,9 l	Chlortoluron SC	1,5 l	YaraVita Gramitre	0,25 l	Moxa	0,125 kg	Corello	0,1 l	Silwet Gold
20 g	Roni 75 WG			0,4 l	Spectre Maxx	0,1 l	Zumba	0,9 l	Boogie Xpro
				0,2 l	YaraVita Bortrac 150			0,2 l	YaraVita Bortrac 150
				0,2 l	YaraVita Mantrac Pro			0,3 l	YaraVita Zintrac 700
				2 kg	hořká sůl			1 l	YaraVita Thiotrac 300
								1,5 kg	hořká sůl

#### 4.1.4 Produkční zóny pozemku

Modelový pozemek byl pomocí dlouhodobého výnosového potenciálu rozdělen do 3 zón v pořadí: 1 - nejméně výnosná, 2 - průměrně výnosná a 3 - nejméně výnosná (obr. 4). Stanovení jednotlivých zón výnosového potenciálu probíhalo pomocí platformy OneYield (OneSoil, Švýcarsko). Zóny výnosového potenciálu byly určeny na základě prostorové a časové analýzy družicových dat z předchozích vegetačních období na daném pozemku. Platforma pro tvorbu zón výnosového potenciálu využívá z každého vegetačního období satelitní snímek s nejvyšší hodnotou vegetačního indexu *NDVI*. V tomto případě byly porovnávány celkem 4 snímky z posledních 4 ročníků. Na základě zpracování dat vegetačních indexů byla vytvořena vektorová mapa zón produkčního potenciálu se 74 % stabilitou.





Obr. 4: Mapa půdního potenciálu s označením jednotlivých produkčních zón

## 4.2 Polní pokus

### 4.2.1 Odběry biomasy

Pro odběry nadzemní biomasy pšenice ozimé byly určeny 3 odběrová místa (tab. 3) na základě výběru podle umístění na pozemku. Body byly na pozemku vytyčeny podle stanovených souřadnic bodů pomocí GPS lokalizátoru (GNSS South s-82T + S10 SE Survce). V jednotlivých bodech na pozemku byly umístěny vytyčovací tyče s číslem podle zóny, ve které se bod nacházel pro snazší orientaci při odběrech nadzemní biomasy.

Tab. 3: Souřadnice odběrových míst ve formátu WGS-84

zóna	zeměpisná šířka	zeměpisná délka
1	50.1078524 N	13.2529365 E
2	50.1074175 N	13.2554498 E
3	50.1089021 N	13.2547081 E

V jednotlivých zónách byly od jara 2022 (BBCH 24) v pravidelných intervalech odebírány vzorky nadzemní biomasy pšenice. Odběry každého vzorku probíhaly v pásčích  $0,3 \times 0,5$  m z důvodu výsevu porostu do pásů o rozteči 0,3 m. Celkem bylo provedeno 7 odběrů biomasy v rozmezí od 8. 4. do 25. 7. 2022, vždy se 4 opakováními v každé zóně výnosového potenciálu. Odebrané vzorky biomasy byly následně vysušeny při 105 °C a zváženy. Termíny odběrů vzorků a hodnotu BBCH v jednotlivých termínech odběru dokládá tab. 4.

Tab. 4: Termíny odběru vzorků

termín	8.4.2022	29.4.2022	10.5.2022	23.5.2022	7.6.2022	29.6.2022	25.7.2022
DOY	98	119	130	143	158	180	208
BBCH	24	31	32	43	59	72	90

#### 4.2.2 Snímkování porostu

V pravidelných intervalech od 25. 3. do 16. 7. 2022 bylo provedeno 13× snímkování (tab. 5) půdního bloku pomocí dronu s multispektrální kamerou. Ke snímkování byl použit dron eBee SQ (AgEagle). Tento dron je osazen kamerami Parrot Sequoia a obsahuje RGB kameru a multispektrální senzory osazené čtyřmi snímači na *Green*, *Red*, *Red edge* a *NIR* spektrum záření. Tyto senzory snímají odrazivost záření o vlnových délkách 550, 660, 735 a 790 nm. Snímkování porostu bylo prováděno na základě letového plánu vytvořeného v programu eMotionAG (AgEagle, USA). V programu byly nastaveny parametry letu a vytvořily se letové trajektorie určující letovou dráhu dronu. Snímkování porostu bylo prováděno ve výšce 80 m s rozlišením 10,39 cm/px. I s překryvy byly při každém snímkování pořízeny snímky z plochy 40 ha složené z 550 snímků, které na sebe vzájemně navazovaly. Při snímkování se ke každé fotografii ukládaly přesné souřadnice jejího pořízení. Při těchto parametrech bylo zajištěno nasnímání dané plochy během 34 minut s celkovou letovou vzdáleností 26,5 km.

Tab. 5: Termíny snímkování půdního bloku v roce 2022 a odpovídající hodnota DOY

termíny snímkování/DOY												
10.4	23.4	29.4	10.5	22.5	29.5	5.6	12.6	18.6	25.6	2.7	9.7	16.7
110	113	119	130	142	149	156	163	169	176	183	190	197

#### 4.3 Hodnocení pokryvnosti půdy

Při prvním odběru nadzemní biomasy 8. 4. 2022 bylo provedeno rovněž hodnocení pokryvnosti půdy porosty metodou infrasnímku. Pokryvnost byla hodnocena na ploše čtverce  $50 \times 50$  cm v každé ze zón výnosového potenciálu se čtyřmi opakováními. Pořízené snímky byly následně převedeny do černobílého formátu (porost představoval bílou barvu, půda černou). Pomocí analytického software Adobe Photoshop CS5 (Adobe Systems Software, Irsko) byl stanoven počet pixelů bílé barvy na snímku. Pokryvnost vycházela z metodiky Branta *et al.* (2017). Následnou kalibrací velikosti pixelů byla vypočtena skutečná pokryvnost povrchu půdy.

## 4.4 Zpracování hodnot nadzemní biomasy

Odebrané vzorky nadzemní biomasy ozimé pšenice byly váženy při 100 % sušíně. Odběry probíhaly na ploše  $0,3 \times 0,5$  m. Jednalo se o plochu  $0,15 \text{ m}^2$ . Pro každou z produkčních zón byla z hodnot stanovena průměrná produkce nadzemní biomasy v t/ha pro jednotlivé termíny odběrů.

### 4.4.1 Modelace S-křivky

Z průměrných hodnot produkce suché nadzemní biomasy byly stanoveny denní hodnoty produkce nadzemní biomasy vyjádřené S-křivkou pro jednotlivé zóny. Pro modelaci S-křivky vývoje porostu pšenice byl použit matematický model v statistickém software Statistica 12.0 (Software TIBCO, USA). V rámci programu bylo použito funkce nelineárních odhadů parametrů logistického trendu  $Tr_t = \frac{\gamma}{1+\alpha\beta^t}$  metodou vlastní regrese (metoda nejmenších čtverců). Pro odhad parametrů  $\alpha$ ,  $\beta$ , a  $\gamma$  bylo potřeba dosadit hodnoty navážené biomasy podle navážených hodnot jednotlivých odběrů za  $Tr_t$  a za proměnnou  $t$  datum vyjádřené pomocí DOY (day of year, hodnota udává pořadí jednotlivých dnů v roce). Pro každou produkční zónu byl vyjádřen předpis pro výpočet nadzemní biomasy ve kterémkoli dni během jarní vegetace. Hledané parametry křivky byly určeny na hladině spolehlivosti 95,0 % ( $\alpha = 0,050$ ).

## 4.5 Hodnocení sklizňových parametrů

Poslední odběr nadzemní biomasy proběhl 25. 7. 2022. U vzorků z jednotlivých zón byla hodnocena hustota porostu (počet klasů na metr) a výška porostu. Vzorky byly vymláčeny na stacionární mlátičce (obr. 5). Vymláčené zrno se následně hodnotilo z hlediska HTZ a výnosu zrna v jednotlivých zónách.



Obr. 5: Stacionární mlátička pro výmlat vzorků

## 4.6 Zpracování mapových podkladů

Snímky z dronu byly složeny do výsledné ortofotomapy (obr. 6) pomocí počítačové aplikace Pix4Dfields (Pix4D, Švýcarsko). Z této mapy byly následně stanoveny jednotlivé vegetační indexy. Z analyzovaných multispektrálních snímků ozimé pšenice byly vypočteny vegetační indexy *NDVI*, *GNDVI*, *NDRE* a *SAVI*. Z RGB snímků šlo o *TGI*, *VARI* a *NGRDI*. Vegetační indexy byly vypočtené pomocí rovnic 1, 4, 5, 8, 10, 12, 13 a 14. Pro každou zónu byly určeny 4 body v okruhu kolem výchozích bodů odběru nadzemní biomasy pšenice. U bodů byla stanovena hodnota vegetačního indexu získaná na základě interpolace dat pixelů v okruhu bodu o průměru 1 m.



Obr. 6: Mapa z aplikace Pix4Dfields, vlevo vegetační index *NDVI*, vpravo ortofotomapa, pořízeno 27.3.2022

#### 4.7 Hodnocení nadzemní biomasy s vegetačními indexy

U vegetačních indexů byla hodnocena závislost na produkci biomasy ve vybraných částech růstu vegetace. Hodnocení korelace bylo rozděleno do jednotlivých zón produkčního potenciálu. Pro každou ze zón bylo na základě jednoduché regrese hledáno období vegetačního růstu, při kterém byla nalezena statisticky průkazná korelace hodnot suché nadzemní biomasy ozimé pšenice s hodnotami jednotlivých vegetačních indexů. Korelace byla hodnocena pomocí jednoduché lineární regrese.

#### 4.8 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení výsledků proběhlo pomocí testu vícenásobného rozsahu Tukeyho testu (Tukey HSD, hladina významnosti 95 %) a jednoduché lineární regrese. Vyhodnocení statistických dat proběhlo ve statistickém software Statistica 12.0 (Software TIBCO, USA).

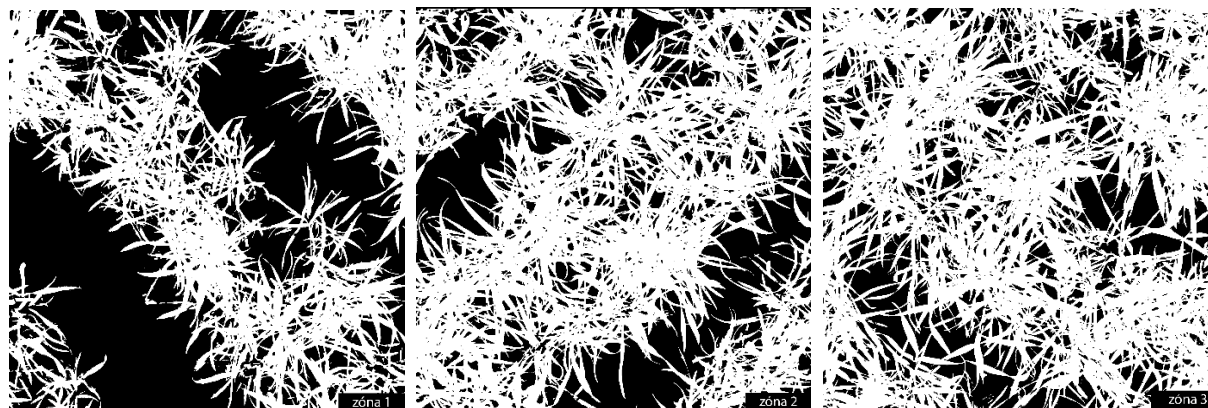
## 5 Výsledky

### 5.1 Hodnocení pokrývnosti půdy

Hodnoty pokrývnosti z infračervených snímků mezi zónami nevykazovaly statisticky průkazné rozdíly. Pokrývnost mezi zónami vzrůstala od zóny 1 (nejméně úrodná) po zónu 3 (tab. 6). Rozdíly mezi pokrývnostmi jednotlivých zón jsou graficky vyobrazeny v obr. 7.

Tab. 6: Průměrná pokrývnost čtverce 50x50 cm v hodnocených zónách produkčního potenciálu 8.4.2022 na lokalitě Chyšce, rozdílné indexy v rámci sloupců dokládají statisticky průkaznou diferenci na hladině významnosti 95 % (ANOVA, Tukey).

zóna	hodnota pokrývnosti (%)
1	64,3 a
2	66,9 a
3	70,3 a



Obr. 7: Snímky z infračervené kamery v jednotlivých produkčních zónách pro hodnocení pokrývnosti, zleva v pořadí zóna 1, zóna 2 a zóna 3

### 5.2 Hodnocení hustoty porostu

Parametry počet odnoží na rostlinu (kusy) a počet odnoží na 1 m<sup>2</sup> dokládá tab. 7. Mezi zónami byly stanovené statisticky průkazné hodnoty u počtu odnoží na rostlině. Hodnoty odnoží na rostlině vzrůstaly od nejméně výnosné zóny po nejvýnosnější zónu.

Tab. 7: Průměrný počet odnoží na rostlině a průměrný počet odnoží na 1 m<sup>2</sup> stanovený v hodnocených zónách produkčního potenciálu 8. 4. 2022 na lokalitě Chyšce, rozdílné indexy v rámci sloupců dokládají statisticky průkaznou diferenci na hladině významnosti 95 % (ANOVA, Tukey).

zóna	počet odnoží na rostlině (kusy)	počet odnoží na 1 m <sup>2</sup> (kusy)
1	3,5 a	1335,5 a
2	4,2 b	1460,5 a
3	5,0 c	1853,8 b

### 5.3 Hodnocení suché nadzemní biomasy v jednotlivých zónách

Při hodnocení nadzemní biomasy v jednotlivých zónách výnosového potenciálu byly stanoveny hodnoty, které dokládá tab. 8. Statisticky průkazné rozdíly mezi vývojem jednotlivých zón byly prokázány v období BBCH 43 a 59.

Tab. 8: Hodnoty suché nadzemní biomasy, rozdílné indexy v rámci sloupců dokládají statisticky průkaznou diferenci na hladině významnosti 95 % (ANOVA, Tukey).

DOY	98	119	130	143	158	180	208
BBCH	24	31	32	43	59	72	90
zóna 1 (t/ha)	1,118 a	1,834 a	3,209 a	4,438 a	7,689 a	10,800 a	10,278 a
zóna 2 (t/ha)	1,265 a	2,288 b	3,562 a	5,726 b	9,633 ab	12,542 b	10,816 a
zóna 3 (t/ha)	1,312 a	2,480 b	3,885 a	7,427 c	10,281 b	13,236 b	15,381 b

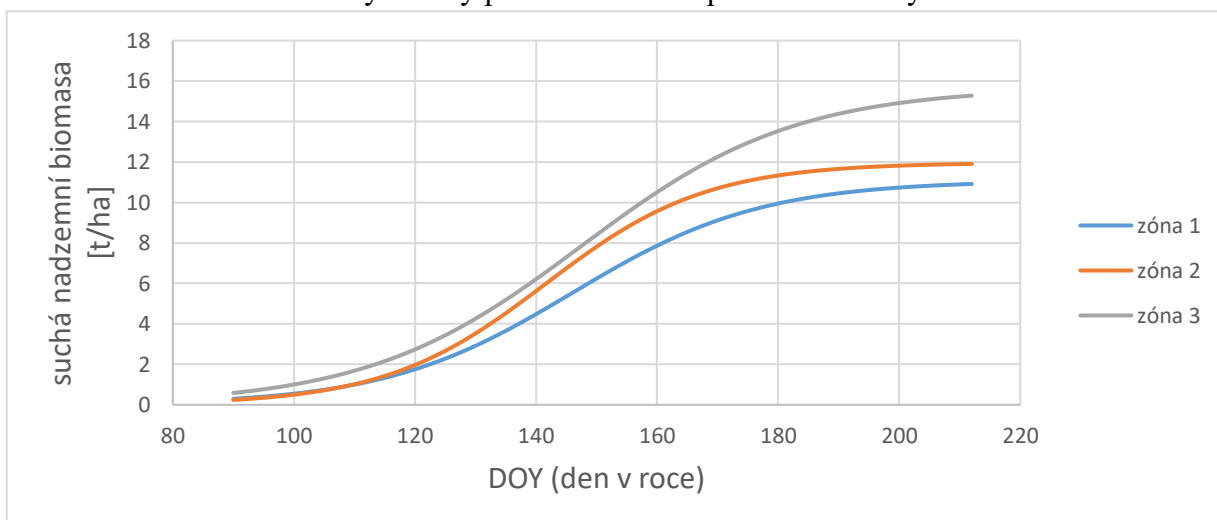
Z hodnot nadzemní biomasy ozimé pšenice byly stanoveny rovnice S-křivky vývoje suché nadzemní biomasy pro jednotlivé produkční zóny. Pomocí těchto rovnic lze dopočítat produkci biomasy porostem pro kterýkoli den během vegetace. Podobu dokládají rovnice 23, 24 a 25. Závislost hodnot suché nadzemní biomasy na čase vyjádřeném pomocí DOY (den v roce) v jednotlivých zónách výnosového potenciálu v grafické podobě dokládá graf 1. V grafu lze vidět odlišnou dynamiku produkce nejvýnosnější zóny pro konec vegetačního období.

$$biomasa\ zóna\ 1 = \frac{11,09479}{1 + 2,60236 \cdot 0,93864^{DOY}} \quad (23)$$

$$biomasa\ zóna\ 2 = \frac{11,97477}{1 + 2,20863 \cdot 0,92812^{DOY}} \quad (24)$$

$$biomasa\ zóna\ 3 = \frac{15,74881}{1 + 2,5262 \cdot 0,94601^{DOY}} \quad (25)$$

Graf 1: Porovnání růstové dynamiky produkčních zón pomocí S-křivky



## 5.4 Hodnocení sklizňových parametrů

U většiny sklizňových parametrů (tab. 9) byl statisticky průkazný rozdíl mezi zónami pouze pro zónu s nejvyšším výnosovým potenciálem. Jediný statisticky průkazný ukazatel mezi zónami byla výška rostlin. Rozdíly ukazatele počet klasů na m<sup>2</sup> (ks) se při porovnání jednotlivých zón shodoval s počtem odnoží na 1 m<sup>2</sup> uvedeném v tab. 7, kdy si zóny 1 a 2 byly hustotou porostu podobné a jen zóna 3 vykazovala statisticky průkazně vyšší hodnoty.

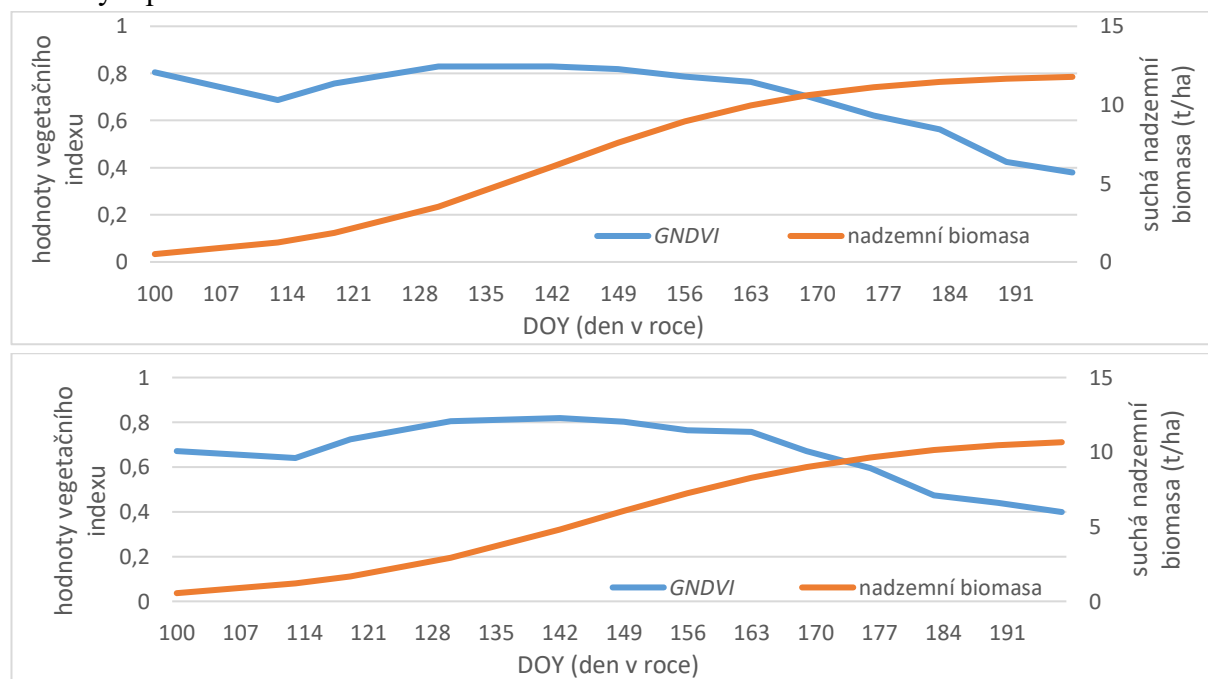
Tab. 9: Výsledky sklizňových parametrů porostu v hodnocených zónách produkčního potenciálu 25. 7. 2022 na lokalitě Chyše, rozdílné indexy v rámci sloupců dokládají statisticky průkaznou diferenci na hladině významnosti 95 % (ANOVA, Tukey).

ukazatel	výnos zrna (t/ha)	výnos slámy (t/ha)	HTZ (g)	počet klasů na m <sup>2</sup> (ks)	výška rostlin (m)
zóna 1	4,746 a	5,532 a	31,58 a	433,3 a	0,555 a
zóna 2	5,247 a	5,569 a	34,45 ab	440 a	0,603 b
zóna 3	6,566 b	8,814 b	36,64 b	616,7 b	0,708 c

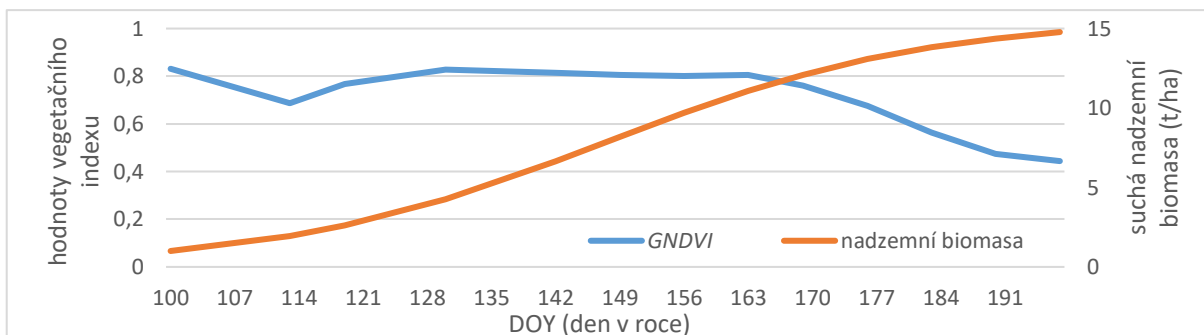
## 5.5 Průběh vegetačních indexů v závislosti na nárůstu nadzemní biomasy

### 5.5.1 Index GNDVI

Graf 2, 3, 4: Vegetační index *GNDVI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.



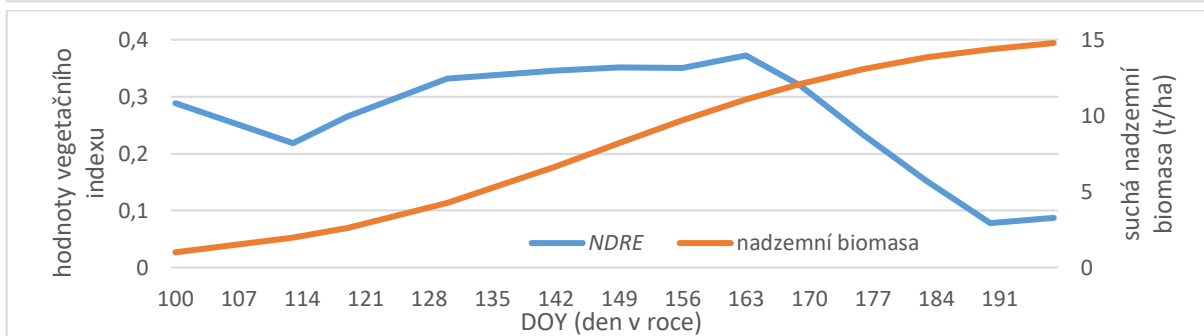
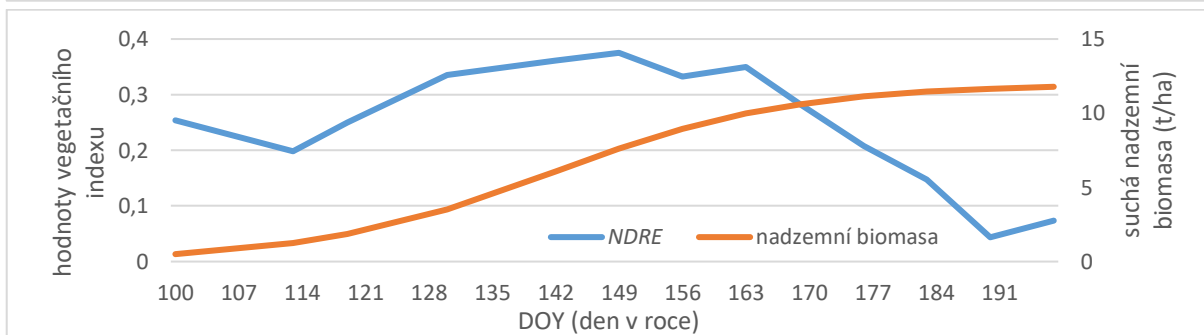
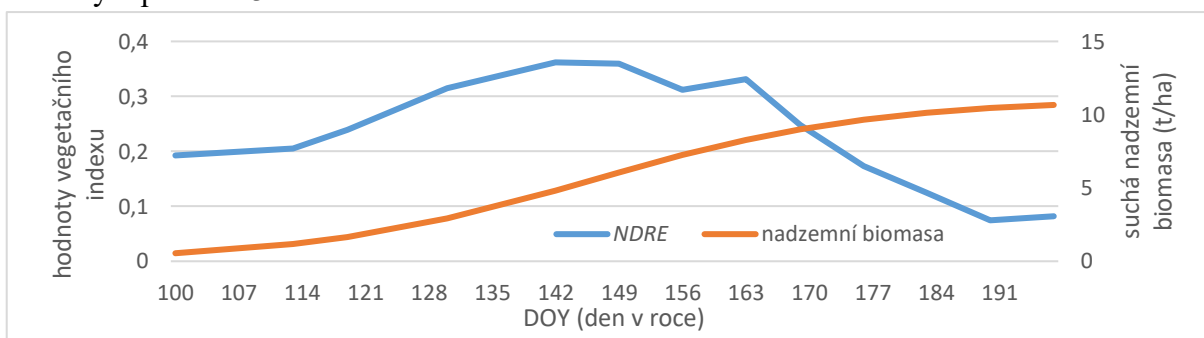




### 5.5.2 Index NDRE

Index *NDRE* v období DOY 130 až 149 vykazovaly oproti ostatním indexům odlišný trend. Hodnoty indexu pro nejnvýnosnější zónu v tomto období vykazovaly ostatním zónám nižší hodnoty.

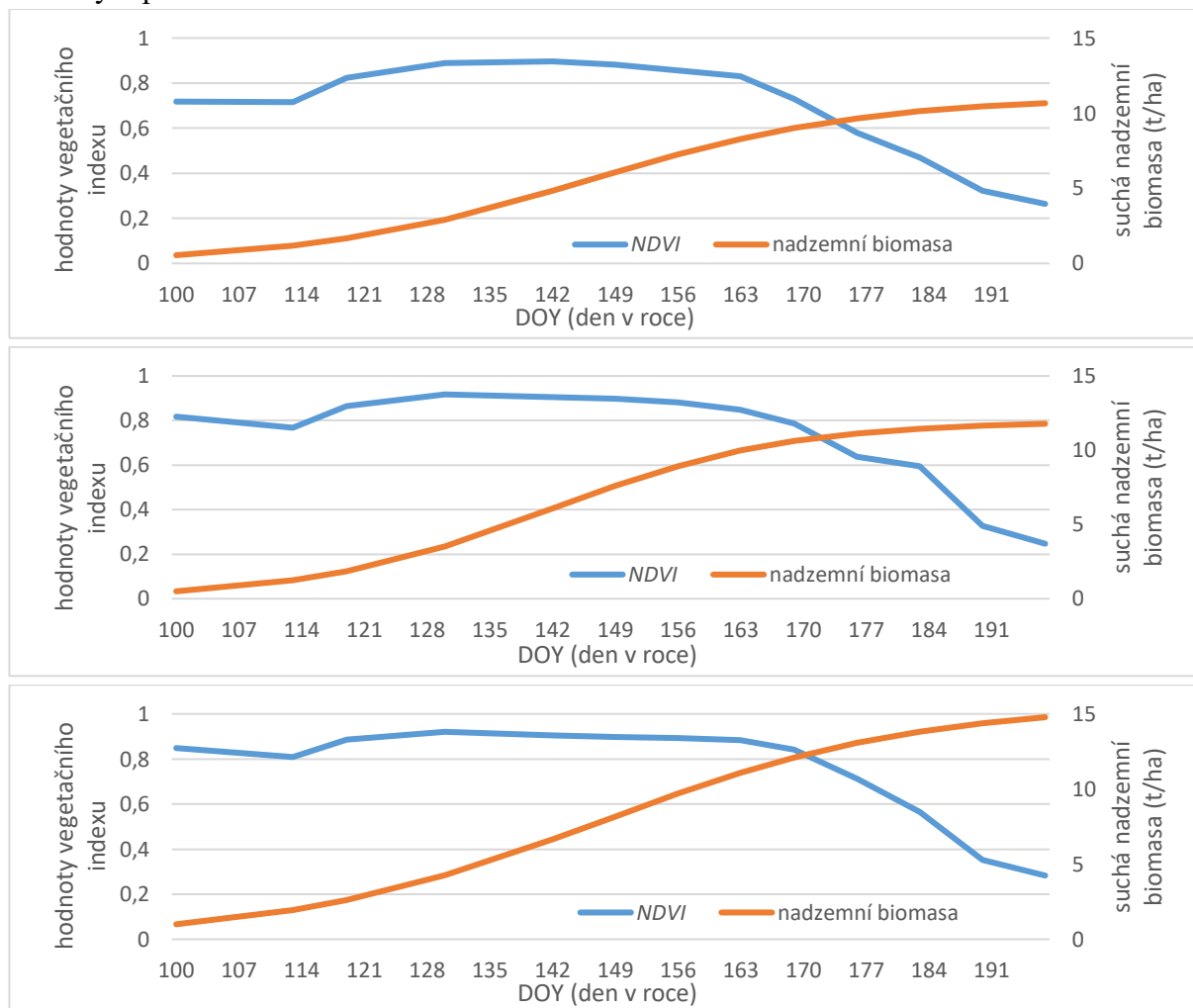
Graf 5, 6, 7: Vegetační index *NDRE*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.



### 5.5.3 Index *NDVI*

U indexu *NDVI* v období od DOY 130 do 156 docházelo k saturaci hodnot a produkční zóny se mezi sebou nelišily v hodnotě tohoto indexu.

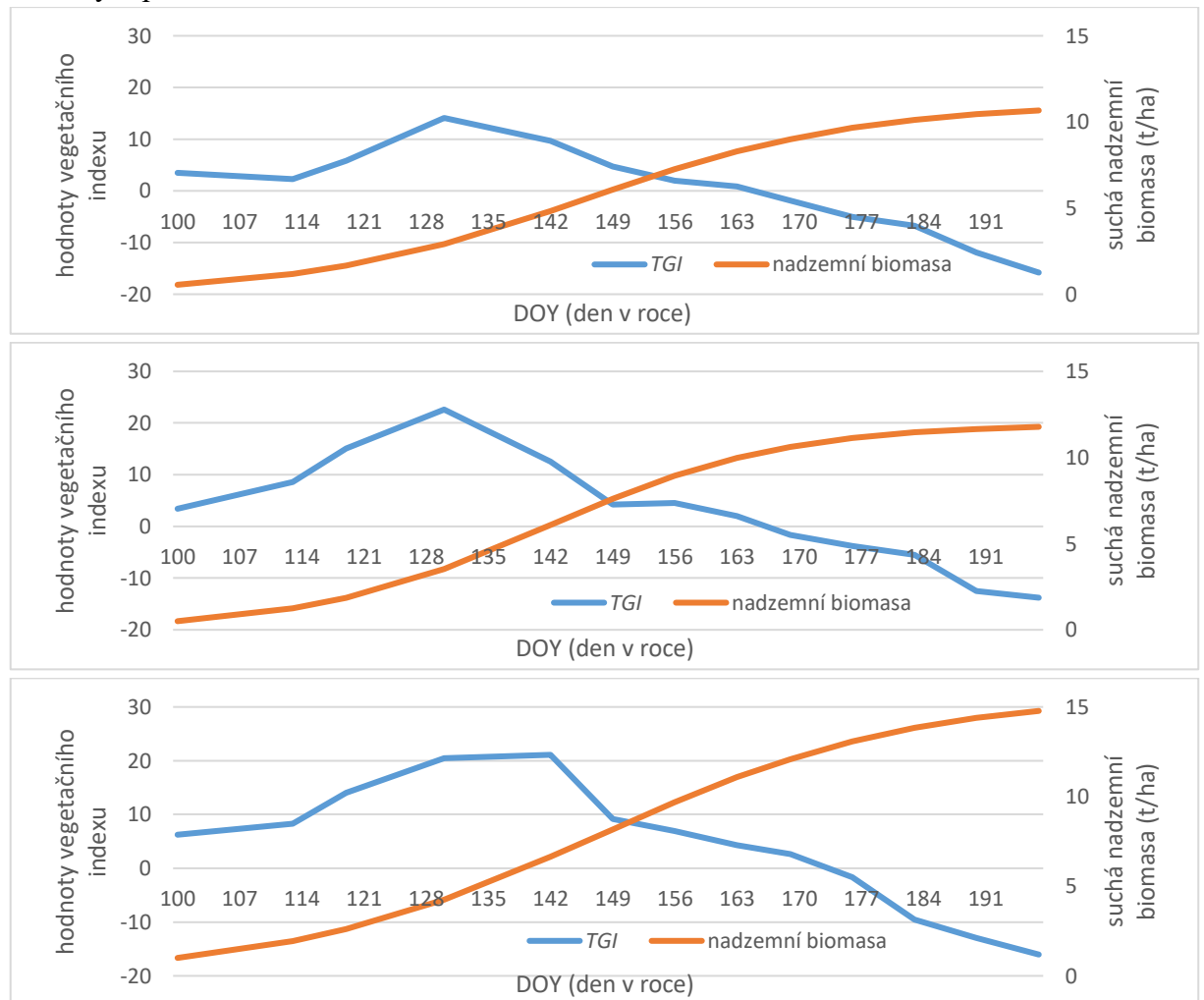
Graf 8, 9, 10: Vegetační index *NDVI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.



### 5.5.4 Index *TGI*

Index *TGI*, který je dle svého výpočtu v rovnici 12 závislý především na koncentraci chlorofylu vykazoval během pokusu v této bakalářské práci korelaci hodnot po nejdelší časové období. Jeho hodnoty postupně klesaly v době, kdy narůstalo množství suché nadzemní biomasy pšenice. Nejslabší byla korelace v nejvýnosnější produkční zóně s korelačním koeficientem -0,956.

Graf 11, 12, 13: Vegetační index *TGI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.



### 5.5.5 Index *VARI*

Index *VARI* byl ze sledovaných indexů jediným, u kterého došlo v období po DOY 170 ke kontinuálnímu nárůstu jeho hodnot, a tak ke kladné korelaci mezi hodnotami indexu a suché nadzemní biomasy v tomto období.

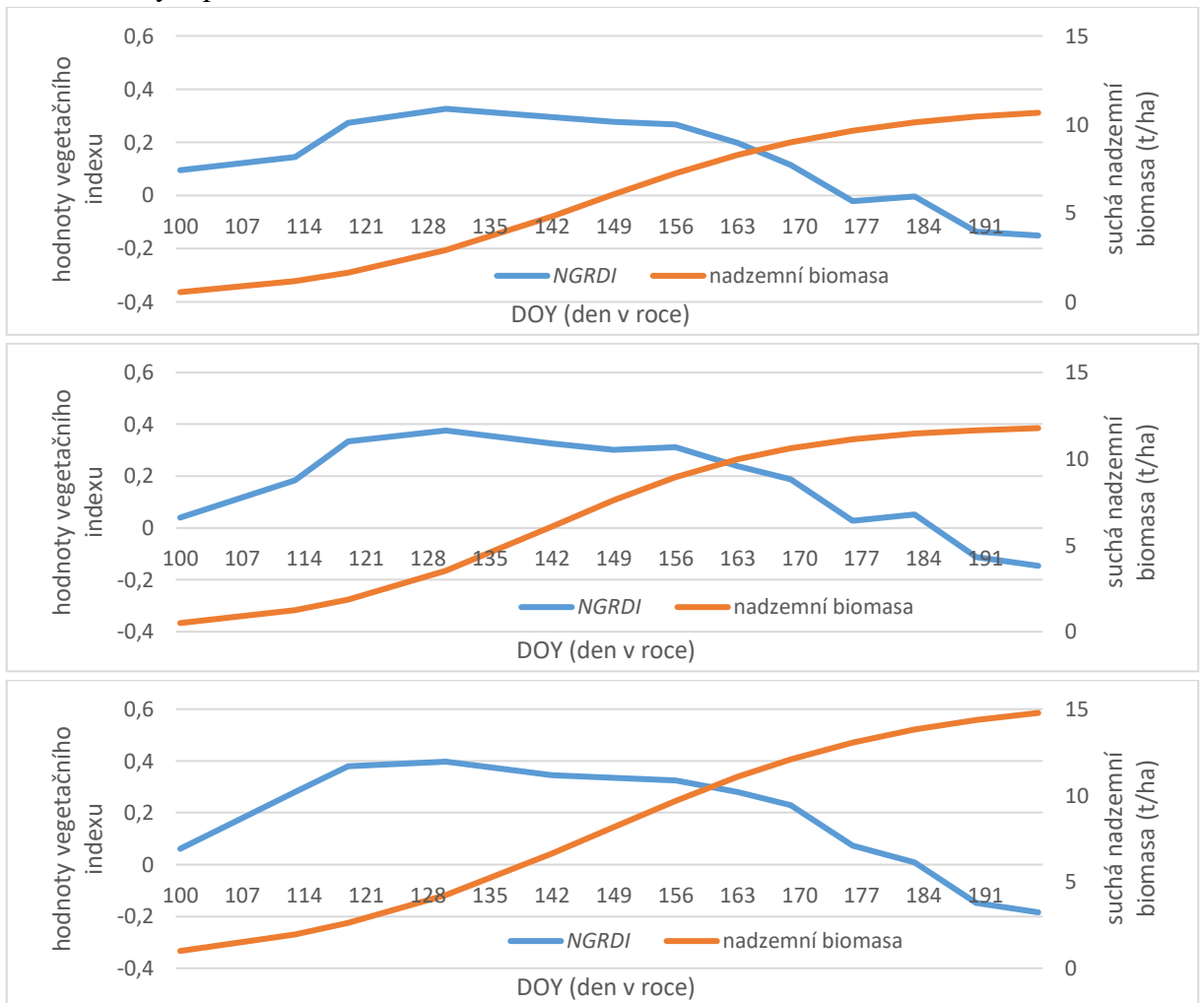
Graf 14, 15, 16: Vegetační index *VARI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.



### 5.5.6 Index *NGRDI*

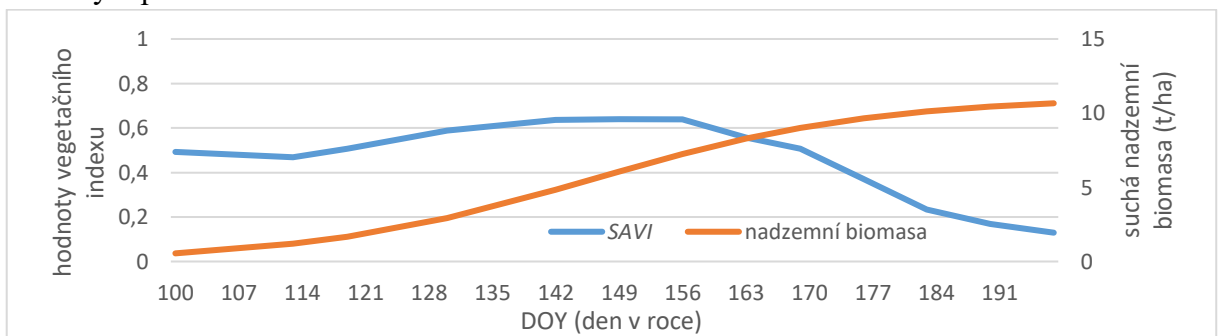
Hodnoty indexu *NGRDI* by šly použít pro porovnání zón mezi sebou. V období od DOY 113 do 176 vykazovala vždy nejvýhodnější produkční zóna nejvyšší hodnotu indexu a nejméně výhodná zóna nejnižší hodnotu.

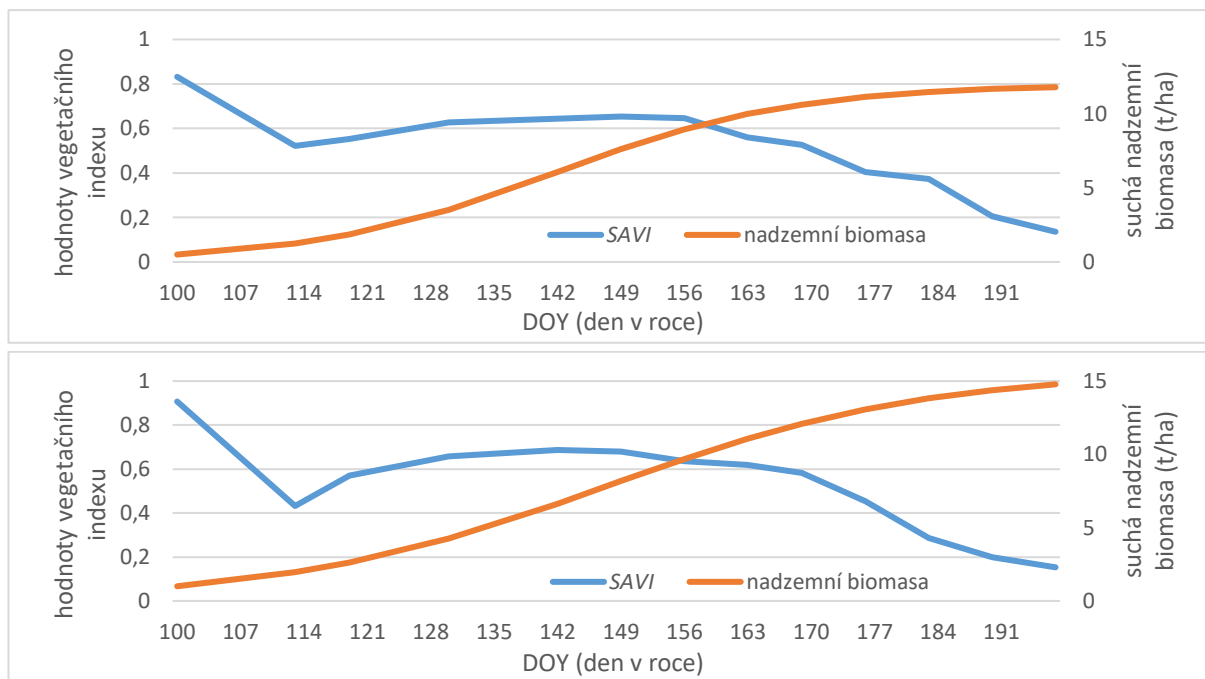
Graf 17, 18, 19: Vegetační index *NGRDI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.



### 5.5.7 Index *SAVI*

Graf 20, 21, 22: Vegetační index *SAVI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.

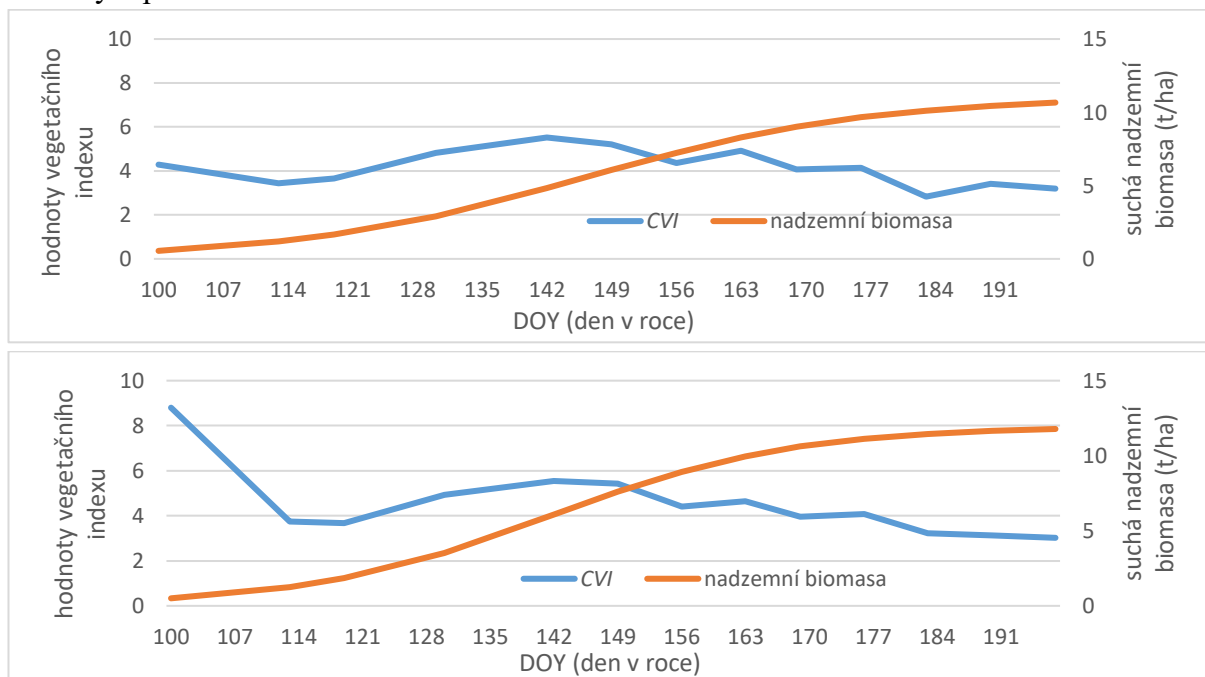


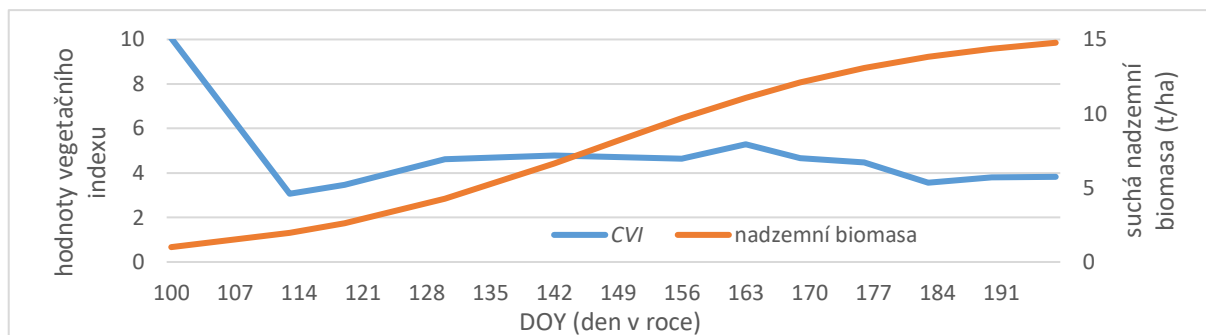


### 5.5.8 Index CVI

U indexu *CVI* se jako u jednoho z mála sledovaných indexů podařilo statisticky prokázat korelaci s hodnotami nadzemní biomasy pro zónu 1 a 2 ve fázích DOY 113–149 s vysokým korelačním koeficientem (0,98 a 0,96).

Graf 23, 24, 25: Vegetační index *CVI*, hodnoty indexu v jednotlivých zónách v závislosti na dynamice růstu nadzemní biomasy. Zóny produkčního potenciálu jsou řazeny postupně za sebe od zóny 1 po zónu 3.





### 5.5.9 Hodnocení korelace vegetačních indexů s nadzemní biomasou

Korelace mezi indexy a suchou nadzemní biomasou byly prokázány u všech sledovaných vegetačních indexů DOY 163-190 (tab. 10). Indexy *TGI* a *CVI* dokonce pro období s 9 opakováními. Index *TGI* vykazoval korelaci v období DOY 130-190 ve všech zónách výnosového potenciálu s korelačním koeficientem -0,9757 až -0,9561, nejvyšších korelací tak bylo dosahováno pro nejméně produkční zónu výnosového potenciálu.

Tab. 10: Hodnocení korelace mezi hodnotami vegetačních indexů a hodnotami nadzemní biomasy pšenice ozimé na lokalitě Chyšě

vegetační index	období (DOY)	zóna	algoritmus	korelační koeficient	počet opakování
GNDVI	163–197	1	$DB = 13,2411 - 6,37413 * Iv$	-0,9906	6
		2	$DB = 13,5826 - 4,31245 * Iv$	-0,9406	
		3	$DB = 18,9423 - 9,25504 * Iv$	-0,9798	
NDRE	100–149	1	$DB = -4,7393 + 27,2547 * Iv$	0,9547	6
		2	$DB = -7,1652 + 35,9232 * Iv$	0,9037	
		3	není korelace		
	156–197	1	$DB = 11,4836 - 11,1201 * Iv$	-0,9468	7
		2	$DB = 12,3344 - 7,5144 * Iv$	-0,8902	
		3	$DB = 15,8723 - 13,9388 * Iv$	-0,9323	
NDVI	163–197	1	$DB = 11,8379 - 4,0179 * Iv$	-0,9838	6
		2	$DB = 12,6007 - 2,6171 * Iv$	-0,9093	
		3	$DB = 16,4729 - 5,3889 * Iv$	-0,9567	
TGI	130–190	1	$DB = 7,8106 - 0,3089 * Iv$	-0,9757	9
		2	$DB = 9,6414 - 0,2587 * Iv$	-0,9649	
		3	$DB = 11,6253 - 0,2819 * Iv$	-0,9561	
VARI	163–190	1	$DB = 8,4624 + 5,6701 * Iv$	0,9782	5
		2	$DB = 10,3902 + 4,3169 * Iv$	0,8863	
		3	$DB = 11,3670 + 8,4076 * Iv$	0,9614	
NGRDI	156–197	1	$DB = 9,6377 - 7,5420 * Iv$	-0,9720	7
		2	$DB = 11,2346 - 5,5216 * Iv$	-0,9293	
		3	$DB = 13,4298 - 8,7002 * Iv$	-0,9569	
SAVI	113–149	1	$DB = -11,0442 + 25,3075 * Iv$	0,9428	5
		2	$DB = -21,1784 + 42,0538 * Iv$	0,9157	
		3	není korelace		
	156–197	1	$DB = 11,5725 - 5,9753 * Iv$	-0,9672	7
		2	$DB = 12,8409 - 5,0292 * Iv$	-0,9092	
		3	$DB = 16,2483 - 8,4707 * Iv$	-0,9368	
CVI	113–142	1	$DB = -4,3813 + 1,6137 * Iv$	0,9789	4
		2	$DB = -6,9398 + 2,2609 * Iv$	0,9647	
		3	není korelace		
	142–197	1	$DB = -6,9398 + 2,2609 * Iv$	-0,9043	9
		2	$DB = 18,1424 - 1,9781 * Iv$	-0,9349	
		3	$DB = 27,1677 - 3,5419 * Iv$	-0,6986	

Pozn.: DB - suchá nadzemní biomasa (t/ha), *Iv* - hodnota indexu (index value)



## 6 Diskuze

Využití vegetačních indexů pro technologie precizního zemědělství má široké možnosti uplatnění. Vegetační indexy jsou účelný nástroj pro optimalizaci vstupů pro zemědělské plodiny. Využívají se převážně pro tvorbu variabilních aplikačních map, které jsou v poslední době velmi se rozvíjejícím nástrojem precizního zemědělství.

### 6.1 Hodnocení zón produkčního potenciálu

Tato práce se věnovala produkci biomasy ozimé pšenice v jednotlivých zónách výnosového potenciálu. Dle Lukase *et al.* (2020) jsou výnosové zóny základním předpokladem pro uplatnění postupů precizního zemědělství. Při prvním jarním hodnocení porostu a odběru biomasy po jarním obnovení vegetace porost vykazoval v jednotlivých zónách statisticky průkazné rozdíly mezi počty odnoží na rostlině. Zóna s nejvyšším produkčním potenciálem měla i nejvyšší počet odnoží na rostlinu, poskytuje nejlepší podmínky pro růst a odnožování. Jednotlivé zóny produkčního potenciálu mezi sebou vykazovaly po celou dobu rozdílnou dynamiku nárůstu nadzemní biomasy. Největší statistické rozdíly byly u porostu při odběru biomasy v 143 DOY. Při hodnocení sklizňových parametrů mezi zónami nejvyšší statistické rozdíly vykazoval parametr výška porostu. V zóně s nejvyšším produkčním potenciálem by tak měla přijít nejvyšší dávka regulátoru růstu na zkrácení stébla pro minimalizaci rizika polehnutí porostu.

### 6.2 Využití bezpilotních prostředků pro mapování porostu

Během přesného polního experimentu byl porost pšenice snímán bezpilotním prostředkem – dronem s křídlovou konstrukcí. Mezi přínosy využití tohoto prostředku lze vnímat rychlost mapování (Karas & Tichý 2016). Při snímkování však bohužel nebyla použita radiometrická kalibrace, což může u výpočtů vegetačních indexů zapříčinit drobné výkyvy hodnot, např. u indexu *NDRE* při snímkování v DOY 156. Obraz z UAV snímku byl kalibrován pouze světelným senzorem. Alckmin *et al.* (2022) se ve své práci na odhad biomasy jílku vytrvalého na produkčních plochách v Austrálii používali také multispektrální snímky z UAV, které porovnávali s daty z ručního spektrometru. Hodnoty z UAV, které naměřili se shodovaly s hodnotami z ručního spektrometru až po provedené radiometrické kalibraci. Pro zpřesnění zdroje dat vegetačních indexů by bylo vhodné volit při každém snímkování korekci obrazu pomocí kalibračního panelu. Ten však nebyl použit kvůli jeho vysoké ceně.

### 6.3 Hodnocení korelace mezi vegetačními indexy a nadzemní biomasou

Vegetační indexy *NDVI* a *SAVI* vycházejí ze spektrálních pásem *NIR* a *Red*. Tato pásma se zaměřují převážně na množství rostlinné biomasy. Obdobou vegetačního indexu *NDVI* je index *GNDVI*, tento index má ve svém výpočtu místo *Red* spektra *Green*. Na rozdíl od *NDVI* by index měl být více citlivější na koncentraci chlorofylu v rostlinách (Auravant 2022). Vegetační index *NDRE* byl jediný ze zkoumaných indexů, u kterého se k výpočtu používalo pásmo *Red edge* společně s *NIR*. Tento index by měl lépe reprezentovat množství biomasy zároveň s množstvím chlorofylu (Žížala *et al.* 2021). Poslední z hodnocených indexů,

využívající *NIR* spektrum, byl index *CVI*. U indexu *CVI* se využívá poměr *Red* a *Green* záření využitelný pro odhad nadzemní biomasy (Vincini *et al.* 2008). V této práci byly porovnávány také vegetační indexy, které ke svému výpočtu nepotřebují použití drahých multispektrálních kamer, ale stačí jím snímky z obyčejných RGB snímačů. Šlo o indexy *VARI*, *TGI* a *NGRDI*. Index *NGRDI* je postaven na poměru odrazivosti spekter *Green* a *Red*. Tento index se svou povahou řadí mezi indexy pro zjištění rostlinné biomasy (Janoura *et al.* 2015). Indexy *VARI* a *TGI* pro výpočet využívají spektra *Green*, *Red* i *Blue*.

Při hodnocení vegetačních indexů byla hodnocena jejich korelace s nadzemní biomasou pšenice ozimé v průběhu jarní vegetační sezóny. Rostlinná biomasa představuje základní parametr pro tvorbu výnosu plodin. Z tohoto důvodu by tato práce mohla být výchozí pro predikci výnosu plodin. Song *et al.* (2021) ve svém pokusu v Čínské provincii Henan hodnotili korelaci 11 vegetačních indexů se suchou nadzemní biomasou ozimé pšenice. Při jejich výzkumu docházelo k odlišné korelaci v rozdílných fenologických fázích pšenice, což se v této bakalářské práci potvrdilo. Indexy *NDVI* a *NDRE* v jejich pokusu vykazovaly nízkou korelaci s nadzemní biomasou ve fázi odnožování, a naopak vysokou korelaci ve fázi kvetení, což bylo stanoveno a u těchto indexů se také potvrdilo.

V období od fáze metání byla prokázána korelace u všech sledovaných vegetačních indexů. Tyto výsledky byly stanoveny také u Li *et al.* (2022). Během jejich výzkumu pro odhad biomasy a výnosu pšenice došlo ke zjištění, že nejlepší období pro predikci výnosu je ve fázi kvetení. V této fázi strukturální i biochemické parametry porostu jako je jeho výška a obsah chlorofylu v biomase dosahují maximálních hodnot a v průběhu kvetení nedochází k jejich změně.

K nejvýznamnější korelaci hodnot vegetačního indexu se suchou nadzemní biomasou došlo u vegetačního indexu *TGI*. Tento index vykazoval zápornou korelaci v nejdelším časovém období – DOY 130–190. V tomto období nastalo snižování hodnot vegetačního indexu, což mohlo být způsobeno postupným snižováním obsahu chlorofylu v nadzemní biomasě. Téměř všechny vegetační indexy vykazovaly záporné korelace v období od fáze metání porostu. Kladné korelace v období intenzivního nárůstu nadzemní biomasy vykazovaly pouze 3 vegetační indexy. Jednalo se o indexy *NDRE*, *SAVI* a *CVI* v pořadí od nejvýznamnější korelace po nejméně významnou. Index *NDRE* koreloval z těchto indexů v nejdelším časovém období – DOY 100–149. Korelaci v tomto období se však nepodařilo prokázat pro všechny zóny produkčního potenciálu. Výsledky jsou srovnatelné s publikací Yue *et al.* (2019). V jejich experimentu docházelo v hustém porostu k saturaci hodnot vegetačních indexů, to mohl být také důvod absence korelace v tomto experimentu u zóny s nejvyšším produkčním potenciálem. Více tedy v tomto období korelovaly indexy zaměřené na produkci biomasy.

Při predikci výnosu by bylo možné určovat požadované množství živin porostem pro různé části půdního bloku, a tudíž by toto požadované množství mohlo být využitelné pro nástroje precizního zemědělství. Většina komerčních programů pro zemědělce nabízí využití pouze vegetačního indexu *NDVI*, a tak by bylo dobré se zaměřit i na odlišné vegetační indexy.

Pro další výzkum by bylo vhodné zaměřit se na průběhy jednotlivých pásem spekter v čase. Z jednotlivých pásem by pak mohl být vytvořen nový vegetační index nebo kombinace stávajících vegetačních indexů.

## 7 Závěr

Z práce vyplývá potvrzení položené hypotézy bakalářské práce. Vegetační indexy během vegetace vykazovaly odlišné korelace s produkcí nadzemní biomasy ozimé pšenice. Z hlediska analýz se prokázalo, že korelace mezi indexy lze specifikovat do dvou období. První období lze stanovit do 150. dne v roce, tedy do fáze BBCH 50 (do počátku metání), těsnější a časnější závislost však byla stanovena pro období metání až počátek zrání.

Výsledky práce prokázaly korelaci mezi jednotlivými vegetačními indexy a produkcí nadzemní biomasy porostu. Výsledky naznačují, že přes změnu hodnoty vegetačních indexů, které primárně zachycují závislost na koncentraci chlorofylu, lze odhadnout produkci biomasy. Za předpokladu průměrného obsahu dusíku v rostlinné biomase pšenice ozimé, který se během vegetace může pohybovat v rozmezí 1,5 až 3,5 %, by bylo možné optimalizovat hnojení dusíkem, a to pro pozdní produkční hnojení a pro kvalitativní přihnojení.

Využití vegetačních indexů pro variabilní aplikaci hnojiv, přípravků na ochranu rostlin a osiv se jeví jako vhodný nástroj precizního zemědělství. Tyto aplikace přináší řadu ekonomických i ekologických benefitů.

Podle výsledků provedené práce vyplívají následující závěry:

- Porosty pšenice ozimé vykazují na jednotlivých zónách produkčního potenciálu odlišnou dynamiku produkce nadzemní biomasy.
- Vegetační indexy lze využít pro kvantifikaci produkce nadzemní biomasy porostů.
- Většina vegetačních indexů korelovala s hodnotami suché nadzemní biomasy porostu od začátku fáze metání.
- Index TGI vykazuje korelaci s produkcí suché nadzemní biomasy během dlouhé doby vývoje porostů (130–190 DOY).
- Výsledky práce se dají využít pro možnosti specifikace produkce biomasy jako základu pro odhad odběru dusíku porosty.

## 8 Literatura

- Abrham Z, Vach M, Hlisnikovský L. 2019. Vliv aplikace hnojiv na výnosy, jakost a ekonomiku ozimé pšenice. Výzkumný ústav zemědělské techniky v. v. i., Praha. Available from <https://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2019/033.pdf> (accessed December 2022).
- Agrinova Group. 2020. Satelitní portál Varistar. Agrinova Group. Available from [https://www.variabilni-aplikace.cz/images/Varistar/Portal\\_satelitni\\_Varistar-manual.pdf](https://www.variabilni-aplikace.cz/images/Varistar/Portal_satelitni_Varistar-manual.pdf) (accessed March 2023).
- Alckmin GT, Lucieer A, Rawnsley R, Kooistra L. 2022. Perennial ryegrass biomass retrieval through multispectral UAV data. *Computers and Electronics in Agriculture*. Available from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921005913> (accessed March 2023).
- Anazawa M, Saito G, Sawada Y, Sawada H. 2001. Vegetation monitoring study using leaf water content index (LWCI) and NDVI. National University of Singapore. Available from [https://www.researchgate.net/profile/Haruo-Sawada/publication/267405548\\_VEGETATION\\_MONITORING\\_STUDY\\_USING\\_LEAF\\_WATER\\_CONTENT\\_INDEX\\_LWCI\\_AND\\_NDVI/links/5617ccc508ae3253ad5d1648/VEGETATION-MONITORING-STUDY-USING-LEAF-WATER-CONTENT-INDEX-LWCI-AND-NDVI.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Haruo-Sawada/publication/267405548_VEGETATION_MONITORING_STUDY_USING_LEAF_WATER_CONTENT_INDEX_LWCI_AND_NDVI/links/5617ccc508ae3253ad5d1648/VEGETATION-MONITORING-STUDY-USING-LEAF-WATER-CONTENT-INDEX-LWCI-AND-NDVI.pdf) (accessed January 2023).
- Aparicio N, Villegas D, Casadesus J, Araus JL, Royo C. 2000. Spectral Vegetation Indices as Nondestructive Tools for Determining Durum Wheat Yield. *Agronomy Journal* **92(1)**:83-91.
- Arcdata. 2023. Planet Labs Inc. Available from <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/druzicova-data/multispektralni-druzicova-data/planet-labs> (accessed March 2023).
- Atfarm. 2023. Maximise your return on nitrogen applications. Yara Atfarm. Available from <https://www.at.farm/gb/n-tester/> (accessed March 2023).
- Auravant. 2022. Vegetation indices and their interpretation: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE and NDWI. Auravant. Available from <https://www.auravant.com/en/blog/precision-agriculture/vegetation-indices-and-their-interpretation-ndvi-gndvi-msavi2-ndre-and-ndwi/> (accessed December 2022).
- Badalíková B, Bartlová J. 2011. Tvorba výnosů pšenice ozimé a silážní kukuřice při různém zpracování půdy. Zemědělský výzkum, spol. s r. o. Troubsko. Available from <http://www.cbks.cz/Rostliny2011/prispevky/BadalikovaBartlova.pdf> (accessed December 2022).
- Bittner V. 2009. Škodlivé organizmy pšenice. Kurent s.r.o., České Budějovice.
- Boiarskii B, Hasegawa H. 2019. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Technology and Engineering J. Mech. Cont. & Math. Sci* **4**:20-29.

- Brant V, Kroulík M, Krček V, Krása J, Kapička J, Hamouz P, Lukáš J, Zábanský P, Škeříková M, Škeřík J, Job Z, Lang J, Petrus D. 2020. Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. Kurent s.r.o., České Budějovice.
- Brant V, Kroulík M, Pivec J, Zábanský P, Hakl J, Holec J, Kvíz Z, Procházka L. 2017. Management in Combination with Shallow Strip-tillage before Sowing. *Soil & Water Research* **12**(2):106-116.
- Brant V, Zábanský P, Škeříková M, Kroulík M, Hofbauer M, Nýč M, Kunte J. 2018. Hrách – pomocná plodina v ozimé pšenici. *Agromanual*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/hrach-pomocna-plodina-v-ozime-psenici> (accessed January 2023).
- Bréda NJJ. 2008. Leaf Area Index. Pages 2148-2154 in Jørgensen SE, Fath BD, editors. *Encyclopedia of Ecology*. Academic Press.
- Cammarano D, Fitzgerald GJ, Basso B, O'Leary GJ, Chen D, Grace P, Fiorentino C. 2011. Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for Remote Estimation of Wheat Nitrogen Content in Rainfed Environments. *Agronomy Journal* **103**(6):1597-1603.
- Campbell C. 2017. How to Get More From Your NDVI Sensor (Part 3). *Environmental Biophysics*. Available from <https://www.environmentalbiophysics.org/correct-ndvi-sensor-limitations/> (accessed December 15, 2022).
- Campos I, González-Gómez L, Villodre J, Calera M, Campoy J, Jiménez N, Plaza C, Sánchez-Prieto S, Calera A. 2019. Mapping within-field variability in wheat yield and biomass using remote sensing vegetation indices. *Precision Agriculture*. **20**:214-236.
- CleverFarm. 2023. Precizní zemědělství. CleverFarm. Available from <https://www.cleverfarm.ag/cs/produkty/precizni-zemedelstvi/> (accessed January 2023).
- Czakó M, Malík S. 2017. První zkušenosti s mořidlem Systiva v ozimé pšenici. *Agromanual*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/choroby/prvni-zkusenosti-s-moridlem-systiva-v-ozime-psenici> (accessed January 2023).
- Černý J, Sedlář O, Kulhánek M, Balík J, Šiler D. 2020. Hnojení ozimé pšenice dusíkem podle vývoje porostu a vědeckých poznatků. *Agromanuál*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/hnojeni-ozime-psenice-dusikem-podle-vyvoje-porostu-a-vedeckych-poznatku> (accessed March 2023).
- Čížková M. 2022. xarvio® FIELD MANAGER učiní výživu rostlin pohodlnější a efektivnější. *Agromanual*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/precizni-zemedelstvi/xarvio-field-manager-ucini-vyzivu-rostlin-pohodlnejsi-a-efektivnejsi-presne-doporuceni-a-nacasovani> (accessed January 2023).
- European Space Agency. 2023. Sentinel-2. European Space Agency. Available from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (accessed January 2023).

- Franzini M, Ronchetti G, Sona G, Casella V. 2019. Geometric and Radiometric Consistency of Parrot Sequoia Multispectral Imagery for Precision Agriculture Applications. Applied Sciences. Available from [https://www.researchgate.net/publication/337775157\\_Geometric\\_and\\_Radiometric\\_Consistency\\_of\\_Parrot\\_Sequoia\\_Multispectral\\_Imagery\\_for\\_Precision\\_Agriculture\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/337775157_Geometric_and_Radiometric_Consistency_of_Parrot_Sequoia_Multispectral_Imagery_for_Precision_Agriculture_Applications) (accessed February 2023).
- Gitelson AA, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment **80**:76-87.
- Granular. 2021. WDRVI: what is the acronym that helps you increase your profitability!. Agrishow digital. Available from <https://digital.agrishow.com.br/english-content/wdrvi-what-acronym-helps-you-increase-your-profitability> (accessed December 2022).
- Heege HJ, Reusch S, Thiessen E. 2008. Prospects and results for optimal systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. Precision Agriculture **9(3)**:115-131.
- Heute AR. 1988. Soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment. **25**:295-309.
- Hiphen. 2022. Vegetation Indices Basics (SR – NDVI – PRI). Hiphen. Available from <https://www.hiphen-plant.com/vegetation-index/3582/> (accessed December 15, 2022).
- Horčíčka P, Čapek J, Kocourková Z, Bížová I, Veškrna O, Bláha T, Skala R, Sedláček T. 2012. Pšenice s jistotou. Kurent s.r.o., České Budějovice.
- Huang S, Tang L, Hupy JP, Wang Y, Guofan S. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. J. For. Res. **32(1)**:1-6.
- Hunt ER, Doraiswamy PC, McMurtrey JE, Daughtry CST, Perry EM. 2013. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation **21**:103-112.
- Chára J, Pinkas J. 2022. Selektivní aplikace přináší úsporu nákladů. Strom Praha. Available from [https://www.youtube.com/watch?v=llcf6LeX6qk&t=378s&ab\\_channel=STROMPRAHA](https://www.youtube.com/watch?v=llcf6LeX6qk&t=378s&ab_channel=STROMPRAHA) (accessed November 2022).
- Index DataBase. 2022. Index: Normalized Difference NIR/Green Green NDVI. Index DataBase. Available from <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=401> (accessed December 2022).
- Index DataBase. 2023. Index: Normalized Difference Green/Red Normalized green red difference index, Visible Atmospherically Resistant Green (VIgreen). Index DataBase. Available from <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=390> (accessed January 2023).

- Jannoura R, Brinkmann K, Uteau D, Bruns C, Joergensen RG. 2015. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering* **129**:341-351.
- Karas J, Tichý T. 2016. *Drony*. Computer Press, Brno.
- Kemp W. 2021. Landsat 9, dosud nejvýkonnější satelit NASA, bude vypuštěn z typu Landsat „go“ v pondělí. Tíseň. Available from <https://www.tisen.tv/landsat-9-dosud-nejvykonnesji-satelit-nasa-bude-vypusten-z-typu-landsat-go-v-pondeli/> (accessed January 2023).
- Kim DM, Zhang H, Zhou H, Du T, Wu Q, Mockler TC, Berezin MY. 2015. Highly sensitive image-derived indices of water-stressed plants using hyperspectral imaging in SWIR and histogram analysis. *Sci. Rep.* Available from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4632122/> (accessed January 2023).
- Kubíková Z, Smejkalová H, Kadaňková P, Hutýrová H, Pelikán J. 2019. Využití fenologické stupnice BBCH a jejích modifikací při hodnocení vývoje svazenky. *VÚMOP v.v.i., Praha*.
- Kůst F. 2010. *Pěstování a produkce pšenice ozimé*. Profi Press. Available from <https://zemedelec.cz/pestovani-a-produkce-psenice-ozime/> (accessed December 2022).
- Langmaier V. 2022. Pestrá paleta odrůd obilnin v Počátkách. *Agromanual*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/osivo-a-sadba-1/pestra-paleta-odruda-obilnin-v-pocatkach> (accessed January 2023).
- Li Q, Jin S, Zang J, Wang X, Sun Z, Li Z, Xu S, Ma Q, Su Y, Guo Q, Jiang D. 2022. Deciphering the contributions of spectral and structural data to wheat yield estimation from proximal sensing. *The Crop journal* **10(5)**:1334-1345.
- Lukas V, Neudert L, Duffková R, Fučík P, Mereza J. 2018. *Mapa výnosového potenciálu pro Zemědělské družstvo Kojčice*. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Lukas V, Ryant P, Neudert L, Dryšlová T, Gnip P, Smutný V. 2012. Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Lukas V. 2010. *Mapování variability pozemků*. Profi Press. Available from <https://zemedelec.cz/mapovani-variability-pozemku/> (accessed March 2023).
- Lukas V. 2020. *Hodnocení stavu porostů a monitoring pozemků pomocí bezpilotních prostředků – výsledky výzkumu a možnosti uplatnění pro variabilní hnojení a cílenou aplikaci POR. Ústav agrosystémů a bioklimatologie Mendelova univerzita v Brně*. Available from [http://web2.mendelu.cz/af\\_217\\_demofarma/monitoring/Prezentace\\_Lukas\\_exp.pdf](http://web2.mendelu.cz/af_217_demofarma/monitoring/Prezentace_Lukas_exp.pdf) (accessed December 2022).
- Matsushita B, Yang W, Chen J, Onda Y, Qiu G. 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effect: A Case Study in High-density Cypress Forest. *Sensors* **7(11)**:2636-2651.

- Mezera J, Lukas V, Elbl J, Smutny V. 2019. Comparison of Sentinel-2 and ISARIA winter wheat mapping for variable rate application of nitrogen fertilizers. Pages 48-53 in Cerkal R, Březinová Belcredi N, Prokešová L, Pilátová A, editors. MendelNet. Mendel University in Brno Faculty of AgriSciences, Brno.
- Neudert L, Smutný V, Brotan J. 2005. Vliv povětrnostních podmínek na změny vlhkosti půdy a výnosy ozimé pšenice při různém zpracování půdy. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Brno. Available from <http://www.cbks.cz/sbornik05b/neudert.pdf> (accessed December 2022).
- Neudert L, Smutný V. 2003. Polní plodiny. Ústav obecné produkce rostlinné MZLU, Brno. Available from [https://web2.mendelu.cz/af\\_217\\_multitext/prezentace/pp/uvod.php](https://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/prezentace/pp/uvod.php) (accessed December 2022).
- Pinty B, Verstraete MM. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* **101**:15-20.
- Planet. 2023. PlanetScope. Planet/Developers. Available from <https://developers.planet.com/docs/data/planetscope/> (accessed March 2023).
- Qi J, Chehbouni A, Huete AR, Kerr YH, Sorooshian S. 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*. **48**:119-126.
- Ryant P, Antošovský J, Škarpa P. 2017. Hnojení pšenice ozimé na jaře. *Agromanual*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/hnojeni-pšenice-ozime-na-jare> (accessed January 2023).
- SatAgro. 2023. Využijte satelitních údajů a nechte svou farmu vydělávat mnohem více. SatAgro. Available from <https://satagro.cz/#first> (accessed January 2023).
- Semrádová M. 2022. Varistar® - Váš spolehlivý partner pro variabilní aplikace. *Agromanual*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/precizni-zemedelstvi/varistar-vas-spolehlivy-partner-pro-variabilni-aplikace> (accessed January 2023).
- Seos. 2022. Introduction to Categorisation of Objects from their Data. Seos-project. Available from <https://seos-project.eu/classification/classification-c01-p05.html> (accessed December 2022).
- Shang J, Liu J, Ma, B, Zhao T, Jiao X, Geng X, Huffman T, Kovacs J, Walters D. 2015. Mapping spatial variability of crop growth conditions using Rapid Eye data in Northern Ontario, Canada. *Remote Sensing of Environment* **168**:113-125.
- Song X, Xu D, Huang Ch, Zhang K, Huang S, Guo D, Zhang S, Yue K, Huo T, Wang S, Zang H. 2021. Monitoring of nitrogen accumulation in wheat plants based on hyperspectral data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. Available from <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352938521001348?token=A622CFBCFA78E47B86EDBC439ED7DB9F8821779D0269679584EBA601CD3E1CF5363A00557A7D1A8D12BA5165AFE4A3AD&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230321165727> (accessed March 2023).



- Spáčilová V. 2014. Podzimní herbicidní ochrana ozimé pšenice. Agromanual. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/plevele/podzimni-herbicidni-ochrana-ozime-psenice> (accessed January 2023).
- Strom Praha. 2023. Nástroj pro zavedení variabilní aplikace a zjištění její účinnosti. Strom Praha a. s. Available from <https://www.strompraha.cz/zemedelska-technika/ams-precizni-zemedelstvi/reseni-precizniho-zemedelstvi/onesoil-yield> (accessed January 2023).
- Sukmono A, Nugraha AL, Firdaus HS. 2019. Integration of Leaf Water Content Index (LWCI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) for Stress Detection of Rice Plant Using Landsat 8 Satellite Imagery. KnE Engineering. Available from <https://media.neliti.com/media/publications/508820-integration-of-leaf-water-content-index-407d31cb.pdf> (accessed December 15, 2022).
- Škarpa P, Ryant P, Antošovský J. 2016. Základní hnojení pšenice ozimé. Agromanual. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/zakladni-hnojeni-psenice-ozime> (accessed January 2023).
- Štych P, Šandera J, Malíková L, Marcinkowska-Ochytra A, Jarocińska A, Zagajewski B. 2015. The use of vegetation indices in the evaluation of vegetation phenology based on meris data: The Czech republic study. AUC Geographica **50**:101-110. Available from [https://karolinum.cz/data/clanek/1569/Geogr\\_1\\_2015\\_09\\_Stych.pdf](https://karolinum.cz/data/clanek/1569/Geogr_1_2015_09_Stych.pdf) (accessed December 2022).
- Tricht KV, Gobin A, Gilliams S, Piccard I. 2018. Synergic Use of Radar Sentinel-1 Optical Sentinel-2 Imagery for Crop Mapping: A Case Study for Belgium. Remote Sensing, Boeretang. Available from <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1642> (accessed January 2023).
- Tvarůžek L, Bílovský J, Bernardová M. 2011. Pozdní přihnojení ozimé pšenice v počátku metání – Aktuální informace o kvalitativním hnojení dusíkem. Agromanual. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/pozdni-prihnojeni-ozime-psenice-v-pocatku-metani-aktualni-informace-o-kvalitativnim-hnojeni-dusikem> (accessed January 2023).
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P, Kolář L. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press s.r.o., Praha.
- Vincini M, Frazzi E, D'Alessio P. 2008. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. Precision Agriculture. **9**:303-319.
- Wang FM, Huang JF, Tang YL, Wang XZ. 2007. New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice. Rice Science **14**(3):195-203.
- Wang L, Wei Y. 2016. Revised normalized difference nitrogen index (NDNI) for estimating canopy nitrogen concentration in wetlands. Optik **127**:7676-7688.
- World from space. 2023. Sentinel 2. Available from <https://worldfrom.space/cs/sentinel-2/> (accessed January 2023).

- Yue J, Yang G, Tian Q, Feng H, Xu K, Zhou Ch. 2019. Estimate of winter-wheat above-ground biomass based on UAV ultrahigh-ground-resolution image textures and vegetation indices. *ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **150**:226-244.
- Zhangyan J, Alfredo RH, Jin Ch, Yunhao Ch, Jing L, Guangjian Y, Xiaoyu Z. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* **101**:366-378.
- Zhuo W, Huang J, Gao X, Ma H, Huang H, Su W, Meng J, Li Y, Chen H, Yin D. 2020. Prediction of Winter Wheat Maturity Dates through Assimilating Remotely Sensed Leaf Area Index into Crop Growth Model. *Remote sensing* **12(18)**: 2896.
- Zimolka J, Edler S, Hřivna L, Jánský J, Kraus P, Mareček J, Novotný F, Richter R, Říha K, Tichý F. 2005. Pšenice pěstování, hodnocení a užití zrna. Profi Press, s.r.o., Praha.
- Žížala D, Lukas V, Kumhálová J. 2021. Dálkový průzkum země a precizní zemědělství. Zemědělský svaz ČR – Česká technologická platforma pro zemědělství.

## 9 Seznam použitých zkratek a symbolů

°	stupeň
<i>ARVI</i>	Atmospherically Resistant Vegetation Index
<i>AZZP</i>	Agrochemické zkoušení zemědělských půd
<i>BBCH</i>	mezinárodní stupnice vývojových a růstových fází rostlin
<i>Blue</i>	modrá oblast spektra
<i>BPEJ</i>	Bonitovaná půdně ekologická jednotka
<i>CCC</i>	<i>ChlorCholineChlorid (chlormequat-chlorid)</i>
<i>CCCI</i>	Canopy Chlorophyll Content Index
cm	centimetr
<i>CVI</i>	Chlorophyll Vegetation Index
DAM 390	roztok dusičnanu amonného a močoviny
DASA	hnojivo obsahující dusičnan amonný se síranem amonným
DOY	day of year (den v roce)
<i>EVI</i>	Enhanced Vegetation Index
g	gram
<i>GEMI</i>	Global Environment Monitoring Index
<i>GNDVI</i>	Green Normalized Difference Vegetation Index
<i>Green</i>	zelená oblast spektra
ha	hektar
HTZ	hmotnost tisíce zrn
IoT	Internet of Things (internet věcí)
<i>IRECI</i>	Inverted Red-Edge Chlorophyll Index
<i>IRMI</i>	Isaria Reflectance Measurement Index
kg	kilogram
km	kilometr
ks	kusy
<i>LAI</i>	Leaf Area Index = index listové plochy
log	logaritmus
<i>LWCI</i>	Leaf Water Content Index
m	metr
mm	milimetr
<i>MSAVI</i>	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
<i>MSI</i>	Moisture Stress Index
<i>NDNI</i>	Normalized Difference Nitrogen Index
<i>NDRE</i>	Normalized Difference Red Edge Index
<i>NDVI</i>	Normalized Difference Vegetation Index
<i>NDWI</i>	Normalized Difference Water Index
<i>NGRDI</i>	Normalized Green – Red Difference Index
<i>NIR</i>	near infrared reflectance
nm	nanometr
<i>NRERI</i>	Normalized Red Edge Index
obr.	obrázek

pH	potential of hydrogen (stupnice ukazující koncentraci vodíkových iontů)
<i>PRI</i>	Photochemical Reflectance Index
px	pixel
<i>Red</i>	červená oblast spektra
<i>Red edge</i>	okrajová část červeného spektra
<i>REIP</i>	Red – Edge Inflection Point
RGB	Red, Green, Blue
<i>SAVI</i>	Soil Adjusted Vegetation Index
<i>SR</i>	Simple Ratio
<i>SWIR</i>	short-wavelength infrared
tab.	tabulka
<i>TCI</i>	Triangular Chlorophyll Index
<i>TGI</i>	Triangular Greenness Index
UAV	unmanned aerial vehicle (bezpilotní letadlo)
<i>VARI</i>	Visible Atmospherically Resistant Index
<i>WBI</i>	Water Band Index
<i>WDRVI</i>	Wide Dynamic Range Vegetation Index
μ	mí