

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Stanovení obsahu sušiny silážní kukuřice pomocí
dálkového průzkumu Země**

Diplomová práce

Josef Božejovský

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Pavel Fuksa, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Stanovení obsahu sušiny silážní kukuřice pomocí dálkového průzkumu Země" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne datum odevzdání

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Pavlu Fuksovi, Ph.D. za milý přístup při vedení diplomové práce. Dále pak panu Ing. Pavlu Hamouzovi, Ph.D. a doc. Ing. Milanu Kroulíkovi, Ph.D. za spolupráci při práci na polním experimentu.

Souhrn

Stanovení obsahu sušiny silážní kukuřice pomocí dálkového průzkumu Země

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) je v České republice z velké části pěstována za účelem získání kukuřičné siláže, která je v současnosti jedním z nejdůležitějších krmiv pro hospodářská zvířata. Pro získání kvalitní siláže je zásadní stanovení optimálního termínu sklizně rostlin, který je odvislý od procentického zastoupení jejich sušiny. Stanovení obsahu sušiny rostlin, a tím pádem i termínu sklizně, je často problematické, a to zejména na velkých pozemcích, kde je často mezi aktuální sušinou vysoká variabilita. Řešením může být využití tzv. UAV fotogrammetrie (dálkový průzkum země pomocí dronu), neboť dokáže obsáhnout velké plochy a zároveň snížit pracovní i ekonomickou náročnost tohoto procesu. Cílem práce bylo vyhodnocení kauzálního vztahu mezi obsahem sušiny rostlin silážní kukuřice stanovené gravimetrickou metodou a normalizovanými vegetačními indexy stanovenými na základě snímků z dálkového průzkumu Země. Hypotéza stanovená v rámci této diplomové práce předpokládala, že normalizované vegetační indexy, stanovené pomocí dálkového průzkumu Země, korelují s obsahem sušiny rostlin silážní kukuřice stanovené gravimetricky.

Na demonstračním a pokusném pozemku České zemědělské univerzity v Praze byl od dubna do září 2021 veden přesný polní experiment. Po vysetí čtyř odrůd kukuřice (ES Katmandu, ES Faraday, ES Skywalker a ES Joker) se čtyřmi opakováními pro každou odrůdu, bylo provedeno 6 odběrů rostlin za účelem stanovení obsahu sušiny. Z letecky získaných snímků ve třech termínech pak byly vypočítány vegetační indexy (NDVI, SAVI, EVI 2 a nový index). Po získání hodnot sušiny a vegetačních indexů byla mezi těmito parametry provedena statistická analýza, která potvrdila silnou korelaci. Nejsilnější korelace byla zjištěna mezi sušinou a nově vytvořeným indexem $NIR-0,8 \times (R+G)$. Z výsledků tohoto výzkumu lze tedy vyvodit, že UAV fotogrammetrie je při stanovení obsahu sušiny silážní kukuřice vhodnou metodou, což potvrdilo stanovenou hypotézu.

Dále byly také analyzovány sklizňové parametry všech odrůd a statisticky zhodnoceny meziodrůdové rozdíly. Nejvyššího vzrůstu dosahovaly rostliny odrůdy ES Joker. Největší sušinu v době sklizně měla odrůda ES Katmandu. Největší hodnotu LAI měla odrůda ES Faraday. Nejvyšší hmotnosti dosahovala odrůda ES Skywalker.

Klíčová slova: Vegetační indexy, NDVI, fotogrammetrie, podíl palic, LAI

Abstract

Determination of dry matter content of silage maize by remote sensing

Maize is in the Czech Republic very often grown for getting maize silage which is one of the most important feed for livestock. For getting quality silage is very important to define optimal date of crop harvest which is dependent on dry matter amount in the plants. To determine dry matter and optimal crop harvest is often problematic mainly on big areas where is a big variability in actual content of the dry matter. The solution could be an UAV photogrammetry usage (drone remote sensing) which is able to reach big areas while is able to decrease working and economical demands. The aim of this work was to evaluate the causal relationship between dry matter content determined gravimetrically and normalized vegetation indices determined from remote sensing. The hypothesis of this work assume that normalized vegetation indices corellating with dry matter content determined gravimetrically.

On experimental field on the Czech University of Life Sciences Prague was from April to September 2021 conducted field experiment. For determine dry matter content were growed four maize varieties (ES Katmandu, ES Faraday, ES Skywalker, ES Joker) with four repetition for each variety. After that there was six samplings dates for determine actual dry matter content. An images from UAV photogrammetry were taken to determine vegetation indices (NDVI, SAVI, EVI2 and a new index) in three terms. Afterthat statistical analysis was made to find out correlation between these parameters. The statistical analysis confirmed strong correlation between dry matter content and all of the indices. The strongest correlation was founded between dry matter content and NIR-0,8 x (R+G) index. From results from this work is possible to claim that UAV photogrammetry is considerable method to determine dry matter content of silage maize.

Further all varieties harvest parameters was statistically analyzed to compare differences. The tallest variety was ES Joker. The highest dry matter content in harvest time had ES Katmandu variety. The highest LAI value had ES Faraday variety. The highest weight had ES Skywalker variety.

Keywords: Vegetation index, NDVI, photogrammetry, ear ratio, LAI

Obsah

1 Úvod	8
2 Vědecká hypotéza a cíle práce	9
3 Literární rešerše	10
3.1 Charakteristika kukuřice seté	10
3.2 Využití silážní kukuřice	11
3.3 Označování kukuřice číslem FAO	12
3.4 Sklizeň	12
3.5 Výnosy kukuřice na siláž	12
3.6 Precizní zemědělství	14
3.7 Způsoby stanovení sušiny	15
3.7.1 Mechanický odběr vzorků.....	16
3.7.2 Dálkový průzkum Země	16
3.7.3 Metody realizace dálkového průzkumu Země	17
3.8 Hodnota LAI	21
3.9 Vegetační indexy	22
3.10 Index NDVI	23
3.11 Další vegetační indexy	24
3.12 Uplatnění metod dálkového průzkumu Země u kukuřice	26
4 Materiál a metody	30
4.1 Metodika	30
4.1.1 Lokalita založení pokusu	30
4.1.2 Meteorologická charakteristika stanoviště	30
4.1.3 Charakteristika použitých rostlin	31
4.1.4 Založení pokusu	32
4.1.5 Ošetřování porostu během vegetace	32
4.1.6 Odběry vzorků, měření a sklizeň.....	33
4.1.7 Metody stanovení obsahu sušiny rostlin	33
4.1.8 Stanovení vegetačních indexů a hodnot spektrální odrazivosti pomocí UAV fotogrammetrie	33
4.1.9 Statistické vyhodnocení dat.....	34
5 Výsledky	35
5.1 Sklizňové parametry	35
5.1.1 Výška rostlin	35
5.1.2 Suchá hmotnost palic.....	35
5.1.3 Suchá hmotnost zbytku rostliny	35
5.1.4 Suchá hmotnost celých rostlin.....	36

5.1.5	Sušina palic.....	36
5.1.6	Sušina zbytku rostliny	36
5.1.7	Sušina celých rostlin.....	36
5.1.8	Podíl palic.....	37
5.1.9	Výnos sušiny.....	37
5.1.10	Obsah sušiny v době sklizně	37
5.1.11	Hodnota LAI v průběhu vegetace	37
5.2	Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny.....	37
5.2.1	Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u všech odrůd	37
5.2.2	Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Katmandu	38
5.2.3	Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Faraday 38	
5.2.4	Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Skywalker.....	38
5.2.5	Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Joker 39	
5.3	Vegetační indexy.....	39
6	Diskuze.....	42
7	Závěr	45
8	Literatura.....	46
9	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) patří v současnosti mezi nejpěstovanější plodiny světa. Mezi státy s vysokým zastoupením kukuřice se řadí i Česká republika, kde byla v roce 2020 (dle Českého statistického úřadu) pro pěstování na zrna využívána plocha 78 tis. ha a pro pěstování na siláž plocha 223 tis. ha.

Pro vytvoření kvalitní kukuřičné siláže je důležité zvolit vhodný termín sklizně, který úzce souvisí s obsahem sušiny rostlin. Aby proběhla fermentace sklizených rostlin úspěšně, jejich sušina by se měla pohybovat kolem 33 %. Stanovení obsahu sušiny je prováděno zejména mechanickým odběrem rostlin a následným zjištěním obsahu sušiny v laboratoři nebo pomocí satelitního snímání. V poslední době se také začíná uplatňovat stanovení obsahu sušiny rostlin pomocí snímání z dronů. U tohoto způsobu je výhodou vyšší rozlišení získaných snímků než u snímků získaných ze satelitů, a tedy možnost zpřesnění odhadu aktuálního obsahu sušiny.

V současné době je v souvislosti s demografickou situací stále více kladen důraz na vyšší produktivitu a efektivitu zemědělské práce, která ústí v tzv. implementaci principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. Jedním z prostředků pro zvýšení produktivity a redukce potřeby lidské práce může být právě také stanovení obsahu sušiny pomocí dálkového průzkumu Země. V rámci dálkového průzkumu Země jsou využívány multispektrální kamery, které jsou schopny zachytit různá spektra z oblasti záření (např. červené, zelené, NIR atd.) Naměřené spektrální hodnoty pak slouží jako základ pro výpočet vegetačních indexů, u kterých se předpokládá korelace s hodnotami sušiny. Vegetační indexy tak mohou nepřímo sloužit k stanovení obsahu sušiny. Vegetační indexy jsou číselné hodnoty naměřené prostřednictvím dálkového průzkumu Země používané ke kvantifikaci údajů získaných pomocí multispektrálních kamer. Nejčastěji používaný vegetační index, pomocí kterého jsou popisovány biofyzikální vlastnosti vegetačního pokryvu je index NDVI. Jedná se o matematicky vyjádřený poměr naměřených vlnových délek rostlinného povrchu v oblasti viditelného a infračerveného spektra.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

Cílem práce je vyhodnotit kauzální vztah mezi obsahem sušiny rostlin silážní kukuřice stanovené gravimetrickou metodou a normalizovanými vegetačními indexy stanovenými na základě snímků z dálkového průzkumu Země.

Hypotéza stanovená v rámci této diplomové práce předpokládá, že normalizované vegetační indexy, stanovené pomocí dálkového průzkumu Země, korelují s obsahem sušiny rostlin silážní kukuřice stanovené gravimetricky.

3 Literární rešerše

3.1 Charakteristika kukuřice seté

Ačkoli panuje o původu a raném vývoji kukuřice mezi odbornou veřejností pouze malý konsenzus, přece jen se nejčastěji odborníci shodují na tom, že kukuřice byla poprvé domestikována před 7-10 000 lety v jižním Mexiku. Po domestikaci se kukuřice celkem rychle rozšířila do Severní a Jižní Ameriky. Po kolonizaci Ameriky Evropany se pak kukuřice rychle rozšířila i po Evropě a z Evropy do dalších částí světa (Tollenaar a Dwyer, 1999).

Kukuřice se řadí mezi jednu z nejvýznamnějších plodin světa. Vysoká adaptabilita a výnos kukuřice jako potraviny a krmiva (píce) vede k její produkci v masivním měřítku a k rozšiřování pěstebních ploch na úkor jiných plodin. Kukuřice se uplatňuje také jako zdroj ethanolu využívaného pro pohon automobilů. Jako jedna z prvních rostlin byla také použita pro transgenozu (Bennetzen a Hake, 2009). V České republice je též kukuřice využívána při konverzi biomasy na bioplyn (methan a další plyny), jenž lze využít pro generování elektrické energie (Jiraň, 2015).

V botanickém systému je kukuřice (*Zea mays* L.) zařazena jako jednoletá rostlina, jednodomá, cizosprašná, různopohlavní, s prašnicovými (samčími) a pestíkovými (samičími) květy, uspořádanými do oddělených květenství. Patří do podtřídy jednoděložných (*Monocotyledonae*), řádu lipnicokvětých (*Poales*) a skupiny kukuřicovitých (*Maydeae*) (Zimolka et al., 2008).

Rostliny kukuřice mají mohutný, rozvětvený kořenový systém (dosahující hloubky 1,5-2 m) s adventivními kořeny podporujícími příjem živin a stabilitu rostlin (Plessis, 2003). Kukuřice, která bývá 120-300 cm vysoká (dle variety), má obdobně jako jiné obilniny vzpřímené dužnaté stéblo. Je složeno z článků (internodií) a kolének (nodů), z kterých vyrůstají široké, dlouze kopinaté listy (Zimolka et al., 2008).

Kukuřice na zrno má vysoké nároky na teplo, a proto se pěstuje v nejteplejších oblastech České republiky. V méně příznivých oblastech se osvědčují hybridy s krátkou vegetační dobou, anebo se pěstuje na siláž (Vaněk et al., 2016).

Pro normální růst musí být kukuřice pěstována v půdě s dostatečným množstvím vody a živin. Půda také musí být dostatečně prokypřená, což je zajištěno orbou (Varsa et al., 1997). Kukuřici lze však pěstovat i pomocí půdoochranných technologií. Půdoochranné technologie jsou koncept, který má za úkol redukovat nepříznivé vlivy některých plodin na půdu, avšak za

předpokladu udržení dostatečné produkce. V rámci této technologie by měly být uplatňovány 3 základní principy:

- minimální mechanické zásahy do půdy
- permanентní pokryv půdy
- diverzifikace plodin pěstovaných na pozemku po sobě (Ghosh et al., 2015).

Mezi nejčastější způsoby ochrany půdy patří setí do nezpracované půdy, setí do částečně zpracované půdy, nebo strip-till technologie (Maetens et al., 2012). V rámci výzkumu Procházkové et al. (2019) byl pozorován vliv půdoochranných technologií (technologie bez orby a strip-till technologie) na ztráty půdy při pěstování kukuřice. Ukázalo se, že použití těchto technologií mělo na ochranu půdy pozitivní efekt. Dále byl pozorován i konvenční způsob, kde byly výsledky znatelně horší.

Kukuřice může při nevhodném způsobu pěstování půdu poškozovat zásadním způsobem. Tím není míněna pouze eroze půdy, ale také vyčerpání půdy při nedostatečné výživě. To se týká zejména kukuřice na siláž při vysokých výnosech sušiny z hektaru. Při výnosech sušiny kolem 20 t/ha kukuřice odebírá až kolem 600 kg čistých živin. Pokud by byla silážní kukuřice pěstována monokulturním způsobem a nebyly by dostatečně doplňovány živiny a organické látky, došlo by k vyčerpání půdy a ke snížení její úrodnosti (kolektiv autorů kukuřice v praxi, 2012). Dle Klíra et al. (2008) odebere kukuřice na siláž při výnosu 20 t/ha 162 kg hlavních živin (N, P, K).

3.2 Využití silážní kukuřice

Kukuřice na siláž představuje jedno z nejdůležitějších a nejrozšířenějších krmiv pro přežvýkavce, slouží také jako základní materiál pro zemědělské bioplynové stanice a výchozí materiál pro výrobu ethanolu (Hlisnikovský et al., 2015). Silážní kukuřice patří ke snadno silážovatelným krmivům, neboť obsahuje dostatečné množství vodorozpustných sacharidů (15-30 % v 1 kg sušiny), má nízkou pufrační kapacitu (nízký obsah dusíkatých látek, bazických prvků a dusičnanů). Z těchto důvodů lze zpravidla vyrobit kvalitní kukuřičnou siláž při dodržení všech technologických podmínek, a to i bez použití silážních aditiv (Zimolka et al., 2008). V podmínkách České republiky patří kukuřice mezi plodiny s nejvyšším produkčním potenciálem celkové sušiny (Benetka, 2011).

3.3 Označování kukuřice číslem FAO

Pro lepší orientaci se u každého hybridu kukuřice uvádí i tzv. číslo FAO. Tento údaj udává přibližnou délku vegetace konkrétního hybridu. Čím je číslo nižší, tím potřebují rostliny k dozrání méně dnů. Podle ranosti se doporučují pro bramborářskou oblast nejranější hybridy (FAO 160-250), pro řepářskou hybridy skupiny FAO 250-300, v teplejší řepářské i hybridy pozdnější. V kukuřičné oblasti lze pěstovat hybridy skupiny FAO 300-400 (Tyrolová a Výborná, 2008).

3.4 Sklizeň

Růstová perioda kukuřice je z širšího hlediska rozdělena na část vegetativní a reprodukční, která je zakončena fyziologickou zralostí (Xu et al., 2019).

Optimální termín sklizně kukuřice je závislý na účelu jejího použití a na aktuálních prostředcích sklizňové techniky v konkrétním zemědělském podniku (Janoušek et al., 2021). Obecně uznávané optimum pro sklizeň kukuřice užívané ke krmení dojníc se pohybuje mezi 25-35 % sušiny (Jambor a Ust'ak, 2011). Dle Tyrolové a Výborné (2008) je pro zdárný průběh silážování vhodné sklízet kukuřici v době mléčně voskové zralosti, kdy se sušina celých rostlin pohybuje mezi 28-34 %. Při sklizni o nízkém obsahu sušiny nedojde k využití produkčních schopností pěstovaných hybridů a průběh fermentace není ideální. Dochází k nežádoucímu odtoku silážních tekutin (ničí se životní prostředí a odtékají cenné rozpustné živiny). Při sušině vyšší se zvyšuje nebezpečí napadení rostliny fuzariemi, zvyšuje se riziko vylomení palic a hmota, ve které jsou listy již suché a hnědé se hůře udusává, dochází k menší tvorbě fermentačních kyselin a siláž je náchylná k zahřívání. Nejčastěji jsou sklizeny celé rostliny, z kterých se následně získává tzv. řezanka.

3.5 Výnosy kukuřice na siláž

Výnosy kukuřice se v posledních desetiletích výrazně zvedly, což je způsobeno jednak díky šlechtitelům, kteří změnili genetické informace rostlin a vytvořili tak nové výkonnější odrůdy a jednak díky novým poznatkům agronomické praxe a její adaptace do zemědělského systému (Tollenaar a Lee, 2002).

Kromě působení základních abiotických a biotických faktorů prostředí je výnos kukuřice ovlivněn hlavně množstvím dodaného dusíku a ontogenezí rostlin zejména v kritických fázích jejich vývoje (Lemcoff a Loomis, 1986).

K odhadu výnosu v rámci pozemku (konkrétních míst na pozemku) lze použít tzv. mapy relativního výnosového potenciálu (RVP nebo mapy výnosových zón), které jsou asi nejdůležitějším podkladem, který mají zemědělci při zavádění precizního zemědělství v rámci rostlinné výroby k dispozici. Tyto mapy jsou tvořeny ze série mnohaletých družicových snímků, kdy je využito rozdílů v odrazivosti v blízkém infračerveném spektru pro stanovení pokryvnosti a stavu porostů v průběhu času. Dle zkušenosti Branta et al. (2020) RVP velmi dobře koreluje se skutečným výnosem většiny plodin, což potvrzuje porovnání mapy relativního výnosového potenciálu s výnosovou mapou získanou ze sklízecí mlátičky (Brant et al., 2020). Výnos může být odhadnut také např. způsobem, který se používá ve Svazijsku. Jedná se o způsob vyvinutý organizací pro výživu a zemědělství (FAO), který na základě vodní bilance pozemku (měřením kumulativních hodnot množství srážek a výparu) předpovídá výnos (Mkhabela et al., 2005). Dle pokusů Branta a kol. (2021) se průměrný výnos čerstvé hmoty z jejich pokusů v letech 2016-2019 pohyboval mezi 32,8-63,9 t/ha. Další výnosové parametry jsou uvedeny v tabulce č. 1:

Tabulka č. 1: Výnosové charakteristiky kukuřice na siláž v lokalitě Červený újezd (Brant et al. 2021)

rok	výnos zelené hmoty	výnos sušiny	podíl palic	sušina palic	sušina zbytku rostliny	sušina celých rostlin	počet dnů vegetace	počet sledovaných hybridů
	t/ha		%					
2016	62,1-	19,8-	51,2-	43,7-	22,2-	30,7-	142	5
	67,1	22,2	57,1	47,2	26,7	34,2		
průměr	63,9	20,7	54,3	45,2	24,2	32,4		
2017	41,2-	13,0-	57,6-	43,5-	19,5-	29,0-	135	6
	68,0	20,5	64,4	48,6	22,3	33,1		
průměr	55,6	17,2	61,5	45,6	20,7	31,1		
2018	28,6-	13,0-	47,0-	51,2-	30,9-	37,9-	120	6
	38,7	15,0	54,9	60,6	39,2	49,0		
průměr	32,8	14,1	52,5	55,8	34,6	43,4		
2019	52,0-	17,5-	59,1-	42,4-	18,6-	30,1-	147	7
	68,5	20,9	67,8	49,9	22,4	34,8		
průměr	60,1	19,1	63,3	46,4	20,7	31,9		

3.6 Precizní zemědělství

Jedním z významných faktorů zvyšujících produktivitu zemědělství je rozvoj nových technických řešení a technologických postupů, které jej od jeho vzniku posunovaly vpřed z hlediska zajištění potravin a dalších produktů pro rostoucí lidskou populaci. Technizace a mechanizace zemědělství vedla k dlouhodobému a setrvalému poklesu počtu lidí, kteří se na primární produkci podílejí, a to se všemi pozitivními a negativními dopady. Optimalizaci mezi dosažením požadované produkce zemědělských plodin a zachováním setrvalého fungování krajiny lze dosáhnout uplatněním principů precizního zemědělství a implementací těchto postupů do praxe (Brant et al., 2020).

Precizní zemědělství je mezinárodně uznávaný koncept hospodaření, který se poprvé začal používat v 80. letech 20. století. Cílem tohoto konceptu je zpřesnit podmínky hospodaření a úkony prováděné během pěstování z hlediska místa jejich provádění, použití intenzifikačních faktorů a načasování pracovních operací (Janoušek 2021). Dle Yanga (2018) je hlavním cílem precizního hospodaření zefektivnění využití vstupů vkládaných v rámci pěstebního procesu.

Základem precizního zemědělství je propojení nejnovějších poznatků o biologických principech pěstování plodin s moderními technologiemi. Prostředky a postupy precizního zemědělství umožňují zajištění požadované produkce a kvality surovin pro výrobu potravin a dalších produktů rostlinné výroby pro nepotravinářské využití při optimálním využití podmínek

krajinného prostoru a při omezení dodatkových vstupů energie do pěstebních systémů (Brant et al., 2020).

Oproti tradičním způsobům hospodaření je výhodami možnost práce s aktuálnějšími informacemi, možnost získávat a zpracovávat data z větších ploch nebo využívat menší množství pracovníků pro pracovní operace (Xia et al., 2011). V rámci této zemědělské modernizace, a s ní související aplikace principů ochrany životního prostředí, jsou pro precizní zemědělství využívány bezdrátové technologie, uváděné nejčastěji jako tzv. senzory (Song et al. 2013). Od 90. let 20. století pak došlo k významnému rozvoji globálního družicového polohového systému (GPS) a geografického informačního systému (GIS), což následně umožnilo rapidní rozvoj nových technologií s využitím senzorů, mezi něž patří také tzv. dálkový průzkum Země (Yang et al., 2018). Dálkový průzkum Země je prostředek pro observaci a shromažďování informací o objektu, a to pomocí zařízení separovaného od tohoto objektu určitou vzdáleností (Cracknell a Hayes, 2007.)

Využití precizních technologií v zemědělství je jedním z hlavních trendů, kterými se ubírají inovace výrobních postupů, a to jak v rostlinné, tak i v živočišné výrobě. I přes zájem o tyto technologie, ze strany zemědělské praxe se však řady podniků se zavedenými precizními postupy rozšiřují spíše pozvolna. Mezi hlavní důvody patří finanční náročnost na pořízení technologie a také nároky, které zavádění těchto systémů klade na uživatele (Brant et al., 2020).

3.7 Způsoby stanovení sušiny

Obsah sušiny, neboli poměr suché hmoty ku čerstvé hmotě, je klíčový ukazatel pro mnoho aspektů z hlediska růstu a vývoje rostlin, jejich přežití, a také termínu stanovení sklizně rostlin (Ali et al., 2019). Produkce sušiny rostlin je dána absorpcí fotosynteticky aktivní radiace (FAR) porostem a účinností, s kterou je tato energie v sušinu konvertována, přičemž efektivnost konverze závisí kromě působících abiotických a biotických faktorů prostředí (limitující faktory) hlavně na fenologické fázi, ve které se porost nachází (Tollenaar a Bruulsema, 1988).

Přesná predikce optimálního termínu sklizně je důležitá z hlediska maximalizace výnosu. Sklizňové ztráty nastávají, jsou-li rostliny sklizeny předčasně anebo naopak pozdě (Xu et al., 2019). Hodnota sušiny sklizených rostlin pak také souvisí s následnou kvalitou vyrobené siláže. Nekvalitní silážovaná hmota se vyznačuje nízkou stravitelností organické hmoty, biomasa se obtížněji dusá a kukuřičná hmota je náchylnější na plesnivění (Zimolka et al., 2008).

Ve výzkumu Jambora a Ust'aka (2011) byly laboratorně testovány chemické parametry kukuřičné siláže vyrobené z rostlin o sušině nižší než 25 %. Ukázalo se, že fermentační procesy

byly výrazně potlačeny. Vyšší obsah alkoholu indikoval větší ztráty a zároveň byl zjištěn vyšší obsah rozpustné sušiny kvůli potlačené fermentaci. To dokazuje výrazně nižší obsah kyseliny mléčné a těkavých mastných kyselin (TMK).

Dle Zimolky et al. (2008) má však samotné procento obsahu sušiny pouze informativní význam, důležitý je fyziologický stupeň zralosti zrna (ukončení syntézy škrobu v zrnech – fáze dvoutřetinové mléčné zralosti až výskytu černé skvrny). Obsah sušiny pro optimální sklizeň tedy může být různý, a to kvůli velkým rozdílům mezi jednotlivými typy hybridů a jejich zdravotnímu stavu při sklizni.

3.7.1 Mechanický odběr vzorků

V současné době je nejrozšířenější metodou stanovení obsahu sušiny mechanický odběr vzorků rostlin, ze kterých je pak v laboratoři stanoven obsah sušiny. Kvůli ceně realizace, vytížení laboratoří a heterogenitě vzorků, může být analýza prováděna pouze s limitovaným počtem vzorků, a tím pádem nedostatečně pokrývá prostorové změny v rámci velkých ploch, na kterých se kukuřice běžně pěstuje. V pokusu Janouška et al. (2021) byly pro stanovení obsahu sušiny odebrány vzorky rostlin (z tří různých míst na pozemku 10 vedle sebe rostoucích rostlin), které byly následně po dobu 24 hodin sušeny při teplotě 60 °C, aby se obsah sušiny stabilizoval. Obsah sušiny v procentech pak byl vypočítán podle vzorce: suchá hmota/čerstvá hmota x 100.

3.7.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země je z hlediska zásahů do porostu nedestruktivní metoda umožňující monitorovat vegetaci rostlin v prostoru a čase (Weiss et al., 2018). Může být použit v širokém spektru zemědělských aktivit jako je monitorování výnosu biomasy, výživného stavu porostu, vodního stresu, míry zaplevelení, napadení chorobami a škůdci, a také k monitorování stavu půdy – obsahu organické hmoty, vlhkosti, obsahu jílu, hodnoty pH nebo míry zasolení (Xu et al., 2019). Dle výsledků pokusu Janouška et al. (2021) lze dálkovým průzkumem Země stanovit obsah sušiny rostlin, a tím snadno určit termín sklizně. Ze snímků lze pak také následně vytvořit výnosové mapy (Yang et al., 2012), jejichž vytváření patří k jedné z nejčastěji využívaných technologií v rámci precizního zemědělství (Ping a Dobermann, 2005). V případě dálkového průzkumu bývá obvykle snímkována celá plocha pozemku a odpadá tedy riziko nedostatečné intenzity vzorkování (Brant et al., 2020).

Většina metod dálkového průzkumu Země využívá pro detekci vegetace oblast elektromagnetického spektra, a to v rozmezí od 400 do 2500 nm, přičemž významné rozdíly ve spektrální odrazivosti vegetace a půdy lze nalézt zejména v červeném a NIR pásmu (Brant et al., 2020). Elektromagnetické spektrum je forma oscilující elektrické a magnetické energie schopná procházet prostorem bez toho, aniž by s ním fyzicky interagovala (Herter, 1985).

K počátku využívání metody dálkového průzkumu Země vedlo zjištění, že radiace reflektovaná vegetací v rámci viditelného a infračerveného spektra je porovnatelná s měřitelným obsahem fotosynteticky aktivních pigmentů. Tento fakt vedl k vynalezení různých matematických kombinací těchto faktorů, z kterých lze následně odvodit požadované vlastnosti vegetace. Tyto kombinace se pak souhrnně nazývají jako tzv. vegetační indexy (Vina et al., 2004).

Dálkový průzkum Země je založen na získávání spektrálních informací rostlinných pigmentů skrze senzory, bez fyzického kontaktu s rostlinou, a to za pomoci principu reflektance rostlin (Cupertino da Silva et al. 2009). Senzory jsou schopny změřit reflektované elektromagnetické vlnění (nebo i vyzáření), z kterého pak lze odvodit požadované parametry porostu (Weiss et al., 2018). Metody založené na použití senzorů jsou oproti klasickému mechanickému odběru fytomasy rychlejší a usnadňují organizaci práce v zemědělském podniku (Perbandt et al., 2011).

Optické senzory využívají skutečnosti, že půda a vegetační pokryv odráží (popřípadě i vyzařují) elektromagnetické záření. Odrazivost je závislá jak na druhu a aktuálnímu stavu rostlin, tak na jejich hmotě (chlorofylu, zastoupení uhlíku). Při průchodu atmosférou je záření různým způsobem ovlivňováno, mění se směr a rychlost jeho šíření, ale i intenzita a spektrální složení. Významným jevem je pohlcování (absorpce) záření atmosférou. Viditelné spektrum je pohlcováno hlavně mechanickým znečištěním (prach, vodní kapky) a v infračerveném oboru se pak uplatňuje i vodní pára a plyny (oxid uhelnatý, oxid dusný) (Brant et al., 2020).

3.7.3 Metody realizace dálkového průzkumu Země

Dálkový průzkum Země je v zemědělském sektoru nejčastěji realizován pomocí dvou metod:

1) Satelitní snímkování

Satelitní sensory za více než 40 let své existence nashromáždily data, jež byla vystavena kritickému náhledu vědecké komunity. Tyto data jsou totiž ovlivněna působením atmosférických efektů a je proto nutná jejich korekce. Transformace satelitních dat na spektrální indexy poskytuje alternativní způsob pro redukci atmosférických efektů. Jedním

z nejčastěji používaných spektrálních indexů je index NDVI – normalized difference vegetation index (Fan a Liu., 2016). Klasifikace snímků získaných ze satelitů je obtížnou disciplínou, a to proto, že pořízené snímky vykazují vysokou variabilitu a pozorované objekty je obtížné zařadit do určité kategorie (do datového souboru). Basu et al. (2015) proto prezentují nově vytvořené datové soubory, které udávají rámec pro klasifikaci snímků. Datové sety SAT-4 a SAT-6 obsahují 500 000 (SAT 4) respektive 405 000 (SAT 6) referenčních snímků, jež pomáhají při klasifikaci získaných dat. Referenční snímky ze systému SAT-4 lze pak dělit na pustiny (bez většího vegetačního pokryvu), lesy, travní porosty a ostatní přírodní krajinné útvary. Referenční snímky získané ze systému SAT-6 pak kromě kategorie pustin, lesů a travních porostů obsahují ještě silnice, budovy a vodní tělesa. Každý z těchto snímků má rozlišení 28x28 pixelů.

Snímky ze satelitů byly dlouhou dobu nejvýznamnějším prostředkem při monitorování pěstebních podmínek, při identifikaci druhů rostlin a odhadování výnosů. Nicméně od 90. let 20. století se díky lepšímu rozlišení snímků a jejich vyhodnocení ujaly snímky pořízené letecky. Satelitní snímkování bývá používáno při mapování velkých oblastí, pozorování celých ekosystémů a výskytu rostlinných a živočišných druhů. Při dlouhodobějším (víceletém výzkumu) lze pak ze získaných údajů vyvodit změny a stanovit proměnu prostředí v čase (Reed et al., 1994). Dle Zhenga a Moskal (2009) mají snímky ze satelitů špatné rozlišení a nejsou proto tak vhodné ke stanovování hodnoty LAI, která je v rámci dálkového průzkumu Země velmi často zkoumaná. Ke stanovení této hodnoty je pak dle autorů vhodnější použití přístrojů nesených bezpilotními létajícími zařízeními.

V posledních letech však znovu dochází k rozvoji satelitů, mimo jiné také proto, že v roce 2019 byl po několika letech příprav spuštěn projekt DMM Tool od společnosti KWS OSIVA s.r.o. Tento systém je schopný za pomoci satelitů, matematických modelů a kalibrací pro jednotlivé hybridy kukuřice vytvořit přesné rozložení obsahu sušiny na vybraných pozemcích. Pěstitel dostává každý týden informace o stavu porostu a na následující týden odhad vývoje sušiny v porostu, který je podmíněný modelem počasí. Satelity nasnímají jednou týdně celé území České republiky. Následně se zpracují získané informace o intenzitě fotosyntézy (NDVI index) a vypočítá se index obsahu vody (NDWI index). Tyto informace jsou základem pro výpočet obsahu sušiny na pozemcích (Maňásek, 2020).

Na satelitech bývá často umístěn tzv. systém MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer). Ve výzkumu Hmimina et al. (2013) byla hodnocena přesnost dat získaných z MODISu u různých biotopů. Tato data byla reprezentována vytvořením série snímků, z nichž byly získány NDVI indexy, které popisovaly fenologický vývoj rostlin na biotopech. Ukázalo se, že NDVI indexy popisují různé druhy biotopů s různou přesností. Při snímání stále zelených

lesů byl jejich fenologický vývoj popsán s vysokou přesností, zatímco při snímání savany sice mohl být fenologický vývoj zaznamenán, avšak sezónní výkyvy zkreslovaly finální výsledek.

2) Fotogrammetrie realizovaná pomocí tzv. bezpilotních létajících zařízení (UAV fotogrammetrie)

Fotogrammetrie je disciplína, která se zabývá získáváním informací o vlastnostech povrchů objektů, aniž by bylo třeba fyzického kontaktu (Fraser a Brown, 1986). Nositelem senzorů, které umožňují dálkový průzkum, jsou zejména tzv. bezpilotní létající zařízení (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) (Ferrer-González., 2020). Sensory shromažďující požadované informace jsou většinou reprezentovány multispektrální, anebo také termální kamerou (Maresma et al., 2016).

Dle Janouška et al. (2021) nejvýznamnější platformu dálkového průzkumu Země v rámci monitorování rostlin zauímají bezpilotní létající zařízení, neboť zajišťují dobrou vyváženost mezi kvalitou snímků a náklady provozu.

Bezpilotní létající zařízení definujeme jako jakékoliv zařízení schopné letu bez lidské posádky na palubě, která by zařízení řídila. Mohou mít různý tvar, velikost i typ pohonu. Často bývají také označovány pod pojmem dron (Kenderessy, 2020). Dle Konga a Mettlera (2010) jsou UAV z hlediska konstrukčního široce variabilní a mají velké množství možností systémové konfigurace. V závislosti na účelu jejich použití a systémového nastavení je pak vytvořen konkrétní model.

Dle Fialové (2017) je UAV možno dělit dle mnoha kritérií, například podle účelu využití, doletové vzdálenosti, rychlosti, nosnosti, letové hladiny, stavby, konstrukce atd. Nejběžněji a nejzákladněji se však UAV dělí dle typu konstrukce na letoun, helikoptéru (obrázek č. 1) a multikoptéru (dron s více rotory).

Obrázek č. 1. UAV vrtulník (Fialová., 2017).



Dle Walshe a Hannana (2004) patří mezi hlavní funkce bezpilotních létajících zařízení observace, údržba, dohled, průzkum a udržování bezpečnosti objektů. UAV platformy (s rotorovým systémem a s fixovanými křídly) mohou být v rámci dálkového průzkumu Země vybaveny rozmanitými druhy různých senzorů:

- RGB kamerou (využití ve fotogrametrii, leteckém mapování, zeměměřičství)
- multispektrální kamerou (využití v precizním zemědělství, v rámci testování kvality vod a environmentálních studií, nebo při stanovování vegetačních indexů)
- LiDAR sensory (v rámci 3D modelování povrchů, identifikace objektů)
- termální infračervenou kamerou (při vyhledávání objektů a záchranných a bezpečnostních operacích, v precizním zemědělství, při inspekci vysílacích věží)
- hyperspektrální kamerou (v rámci environmentálního monitorování, inspekci potrubí, při důlním průzkumu a průzkumu minerálů) (Kong a Mettler, 2010).

Získané informace mohou být rozděleny do 4 kategorií:

- geometrické informace, které určují tvar objektu a jeho pozici v prostoru
- fyzikální informace, které měří elektromagnetickou radiaci – energii záření, vlnovou délku a polarizaci
- sémantické informace, které pojednávají o významu samotného snímku a jsou úzce spjaty s požadovanou interpretací

-časové informace, které jsou obvykle získány porovnáním několika snímků pořízených v různém čase a slouží k pozorování změn vlastností daného objektu (Fraser a Brown, 1986).

V rámci článku Jorgeho et al. (2019) je popisována vhodnost různých druhů UAV pro různé výměry polí. Pro menší pole (s výměrou menší než 5 ha) je dle těchto autorů nejvhodnější UAV s rotorovým systémem, neboť je cenově nejvýhodnější. Pro větší pole pak UAV s fixovanými křídly.

3.8 Hodnota LAI

Hodnota LAI (leaf area index) je definována jako plocha listů rostliny na jednotku plochy povrchu půdy (Smolander a Stenberg, 2004). Vegetace je důležitý komponent globálních ekosystémů. Pokryvnost vegetace je obvykle popisována právě pomocí velikosti listové plochy (LAI) a dalších biofyzikálních parametrů. Při dálkovém průzkumu Země jsou k popisování těchto parametrů využívány tzv. vegetační indexy (Jiang et al., 2006). Určení hodnoty LAI pak často koreluje s výnosem, jak je uvedeno například v článku Perdebandta et al. (2011), kde hodnota LAI souvisela s výnosem pšenice tvrdé (*Triticum durum*).

LAI je klíčová biofyzikální proměnná ovlivňující procesy odehrávající se na zemském povrchu, jakými jsou například fotosyntéza, transpirace a energetická stabilita. Také slouží jako významný faktor při sestavování rozličných ekologických modelů (Wang et al., 2004).

Gitelson et al. (2014) uvádí, že ke stanovení radiace absorbované rostlinami a fotosyntetické aktivity rostlin je v rámci jejich výzkumů raději používána tzv. hodnota GLAI, která je definována jako plocha zelených listů na jednotku plochy. Ke stanovování však bývá jako prostředek používán lidský faktor, který je do jisté míry subjektivní, protože nedokáže vždy správně interpretovat barvu listu a s ní související fotosyntetickou aktivitu a absorpci radiace rostlinami.

Ve výzkumu Gitelsona et al. (2014) je uvedena jedna z metod měření LAI u kukuřice: Gitelson et al. (2014) použili destruktivní způsob (kontakt s rostlinami a jejich poškození), kdy z šesti menších parcel (20x20 m) byly odebrány 2 řádky o délce 1 m a byl spočten a zaznamenán počet odebíraných rostlin. Následně byly rostliny smíchané s ledem transportovány do laboratoře, kde byly odděleny zelené listy od suchých listů a příměsí. K samotnému stanovení hodnoty LAI byl pak použit přístroj Li-3100. Nakonec byla získaná hodnota znásobena tak, aby odpovídala celkové výměře parcel. Zjištěné hodnoty LAI pak byly použity ke srovnání s výnosovými parametry. Ukázalo se, že vyšší hodnoty LAI znamenaly následně i vyšší výnos.

Dle Zhenga a Moskal (2009) je destruktivní způsob stanovení hodnoty LAI pomocí lidské práce obtížný a časově náročný, a to zejména jedná-li se o větší plochy. Dle autorů jsou v současnosti populární tzv. nepřímé bezkontaktní metody stanovení, mezi něž patří:

- pozemní metody, založené na použití přístrojů, kterými je manipulováno v rámci zemského povrchu
- metody založené na nesení přístroje létajícím zařízením
- stanovení pomocí satelitu.

3.9 Vegetační indexy

Pro monitoring vegetačního pokryvu je nejzásadnější využití spektrální odrazivosti zkoumaného porostu, z níž je následně získána tzv. spektrální křivka odrazivosti, která vyjadřuje spektrální projev zkoumaného povrchu. Průběh křivky pak vyjadřuje aktuální stav porostu, přičemž každá ze zkoumaných vlastností je vyjádřena pomocí vegetačních indexů (Kenderresy, 2020).

Použití různých sektorů spektra barev (modrá, zelená, červená, NIR, a infračervená) znamená různou interakci jednotlivých barev s vegetací a jejich různou použitelnost při následném stanovování vegetačních indexů. Nejsilnější reflektivitu vůči rostlinnému pokryvu má pak spektrum infračervené, a proto je také při výzkumu nejhojněji používáno (Janoušek et al., 2021).

Vegetační indexy jsou číselné hodnoty naměřené prostřednictvím dálkového průzkumu Země používané ke kvantifikaci údajů získaných pomocí multispektrálních kamer (Ayanlade, 2017). Vegetační indexy jsou využívány k matematickému popisu různých biofyzikálních vlastností porostů a mají v rámci výzkumu různé využití (Janoušek et al. 2021). V literatuře je popisováno více než 40 druhů těchto indexů, nicméně mezi nejčastěji používané patří index NDVI (normalized difference vegetation index), RVI (ratio vegetation index) a TVI (transformed vegetation index) (Aylande., 2017). Dle Janouška et al. (2021) je v literatuře popisováno až 150 druhů těchto indexů, vysoký podíl z nich je však v rámci jejich využití funkčně ekvivalentní.

Struktura spektrální informace indexů se skládá ze signálů získaných z listové plochy rostlin, v kombinaci s jasnou oblohou, mraky a půdou v pozadí snímku (Vina et al., 2004). K redukci změn ve struktuře spektrální informace slouží zvolení vhodného indexu. Vegetační indexy jsou obvykle zjištěny výpočtem alespoň dvou spektrálních snímků, které jsou vybrány tak, aby na nich byly patrné změny sledované vegetace v čase (Janoušek et al., 2021).

V rámci článku Perbandta et al. (2011) je uváděno srovnání pozemní a dálkové metody průzkumu porostu a jejich vliv na přesnost měření různých faktorů:

- dálková měření poskytují více informací o struktuře rostlinného pokryvu
- dálkové měření umožňuje přesnější predikci vývoje daného faktoru
- pomocí dálkového měření je možno lépe určit množství sledované biomasy
- pozemní měření dokáže lépe určit množství dusíku v rostlinách
- dálkové měření je vhodnější pro porosty s většími hodnotami LAI, zatímco pro porosty s menšími hodnotami je vhodnější použít pozemní měření.

Ve výzkumu Dikera a Bausche (2003) se ukázalo, že v rámci dálkového měření je nadhodnocován obsah dusíku v rostlinách, zatímco při pozemním je naopak podhodnocován.

Ve výzkumu Hanuse et al. (2004) bylo prováděno srovnání hyperspektrálního dálkového průzkumu Země s tradičním multispektrálním měřením. Dle autorů hyperspektrální měření oproti multispektrálnímu poskytuje z hlediska měření stavu krajiny a jejich změn jedinečné možnosti. Poskytuje totiž souvislé pokrytí celého elektromagnetického spektra představovaného tzv. spektrálními signaturami. To umožňuje rozvoj nových metod pro detekci různých objektů na zemském povrchu s větší přesností a kvantitativní odezvu na vlastnosti zkoumaných povrchů.

V rámci článku Hanuse et al. (2004) byl pro výzkum použit dronem nesený hyperspektrální systém, který se skládal ze sensorové hlavičky, z jednotky shromažďující data (počítač), GPS jednotky a iradiačního sensoru (FODIS), operující v rámci viditelného spektra a spektra blízkého infračervenému.

3.10 Index NDVI

NDVI je nejčastěji používaný vegetační index, pomocí kterého jsou popisovány biofyzikální vlastnosti vegetačního pokryvu (Jiang et al., 2006). Dle Kenderessyho (2020) je NDVI nejznámější a nejosvědčenější vegetační index, který vyjadřuje množství a vitalitu vegetace na zemském povrchu. Druhým nejpoužívanějším indexem je pak PVI index fungující na podobném principu jako index NDVI.

NDVI je matematicky vyjádřený poměr naměřených vlnových délek rostlinného povrchu v oblasti viditelného a infračerveného spektra a je vypočítán takto:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

NIR vyjadřuje hodnoty vlnových délek infračerveného spektra a RED hodnotu vlnových délek červeného spektra (Carlson a Ripley, 2017). Výsledkem výpočtu NDVI je číslo nabývající hodnot mezi -1 a +1. Index se v rámci suchozemské vegetace zvyšuje v závislosti na její hustotě (+0,15 = holá půda až +1 = velmi hustá vegetace). Vodní plochy pak nabývají negativních hodnot a oblaka hodnot okolo 0 (Kenderessy., 2020).

NDVI slouží jako numerický indikátor zdravotního stavu rostlin a jako zdroj informací o vegetačních změnách. Také přináší informace o vodním stresu rostlin a obsahu chlorofylu (Janoušek et al., 2021). NDVI také může sloužit jako prostředek sledování změn a reakcí na dodávané vstupy (Neiff et al., 2015).

NDVI využívá oblasti červeného spektra, které je z celkového povrchu rostlin absorbováno především vrchními patry listoví. Spodnější patra rostlin proto významně nepřispívají k měření, neboť zhoršují korelaci mezi NDVI a zjišťovanými vlastnostmi. Tento efekt je tedy významný zejména u vyšších druhů rostlin, a to obzvláště v pozdějších fázích jejich vývoje (Janoušek et al., 2021).

Ve výzkumu Dikera a Bausche (2003) byl v rámci korelační analýzy zjištěn téměř lineární vztah mezi hodnotami NDVI a LAI u kukuřice, a proto autoři tvrdí, že index NDVI může být využit v rámci zemědělského podniku v praxi. Dle Wanga et al. (2004) sice mezi NDVI a LAI existuje korelace, avšak sezónní a meziroční variabilita je v rámci těchto hodnot méně prozkoumaná. Wang et al. (2004) se proto v jejich výzkumu (ve výzkumu lesního porostu) na tuto variabilitu zaměřili a zjistili následující skutečnosti:

-NDVI-LAI korelační vztah se lišil v rámci roku i meziročně ve třech fenologických fázích (fáze růstu listů, fáze konstantního počtu listů, fáze stárnutí a redukce počtu listů). Byl zde silný lineární korelační vztah ve fázi produkce a stárnutí listů, zatímco v období konstantního počtu listů jasný korelační vztah nebyl zjištěn.

-Ačkoli silný lineární korelační vztah byl zjištěn ve všech sledovaných letech, R^2 po shromáždění dat ze všech let tak velký nebyl.

Dalšími faktory ovlivňujícími výzkumné aktivity může být také orientace listů, prostorové rozmístění listů a úhel jejich růstu (Smolander a Stenberg 2004).

3.11 Další vegetační indexy

Velká sensitivita NDVI indexu k půdnímu pozadí na snímku a vlivům zemské atmosféry vedla ke zvýšenému zájmu o vývoj nových indexů, které by byly k těmto faktorům

méně sensitivní a tím pádem by zpřesňovaly výsledky měření. Mezi takovéto indexy patří například indexy SAVI (soil adjusted vegetation index), TSAVI (transformed soil-adjusted vegetation index), ARVI (atmospherically resistant vegetation index), GEMI (global environment monitoring index), MSAVI (modified soil adjusted vegetation index) (Rondeaux et al., 1996). Chechbouni et al. (1994) uvádí jako druhý nejpoužívanější index PVI (perpendicular vegetation index). Dalším často používaným indexem je EVI2, který je sensitivní pro oblasti s vysokým podílem biomasy na povrchu a také dokáže omezit rušivé vlivy půdy a atmosféry (Jiang et al. 2008.) Index EVI2 je vypočítán dle vzorce:

$$EVI2 = G \frac{NIR-RED}{NIR+(6-7,5/c) RED+1}$$

Ve výzkumu Elvidge a Chena (1995) byly pro zjištění LAI a pro zjištění procenta zelené plochy ze snímku zvoleny indexy NDVI, RVI, SAVI a PVI a byl zkoumán vliv pozadí (půdy) na přesnost výpočtu. Ukázalo se, že nežádoucí vliv tohoto pozadí lze redukovat zvolením indexu PVI a RVI.

Ve výzkumu Majora et al. (2007) byl při snímání spektrální odrazivosti pšenice pro následné výpočty vybrán index SAVI. Tento index byl v rámci tohoto výzkumu vhodný, neboť dobře redukoval rušivé vlivy půdy na pozadí snímku, kterými jsou např. barva a vlhkost půdy. Ukázalo se, že v porovnání s dalším indexem, který byl použit (index RVI) byl zvolen pro danou lokalitu vhodněji.

Dle Rena et al. (2018) je index SAVI nezbytný pro aridní lokality s malým procentem zastoupení vegetace. V rámci tohoto pokusu byla dálkově snímána poušť v Mongolsku a v Číně za účelem zjištění množství zeleně. Ukázalo se, že při uplatnění NDVI indexu nebyl výzkum tak přesný jako když se použil index SAVI, jehož vzorec oproti NDVI vzorci obsahuje tzv. soil adjustment factor L (v rámci tohoto výzkumu byla stanovena hodnota $L = -0,2$) a výpočet tohoto indexu byl stanoven jako:

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

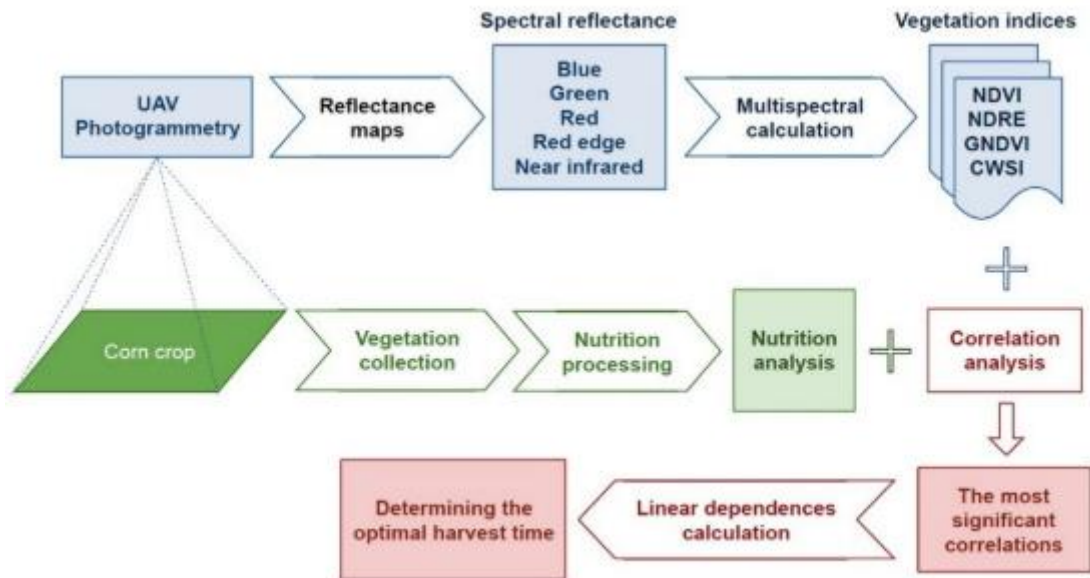
Hodnota faktoru L je stanovena na základě konkrétního zkoumaného povrchu, přičemž rozhodujícím kritériem pro určení hodnoty je pokryvnost vegetace v procentech. Pokud je požadováno zvýraznění rozdílů v rámci vegetačního pokryvu a zároveň ponechání vlastností daných indexem SAVI, index SAVI se modifikuje a vzniká index MSAVI (Chechbouni et al., 1994).

V rámci výzkumu Rondeau et al. (1996) byly porovnávány indexy NDVI, SAVI, TSAVI, MSAVI, OSAVI a GEMI při stanovování hodnoty LAI. Ukázalo se, že při použití různých indexů byla zjištěna rozdílná čísla. Nejmenší LAI (89,66) bylo vypočteno při použití indexu GEMI. Největší LAI (97,37) pak bylo vypočteno při indexu OSAVI, přičemž ostatní hodnoty se pohybovaly kolem 95.

3.12 Uplatnění metod dálkového průzkumu Země u kukuřice

Přesné monitorování růstu a fenologického vývoje rostlin je důležitou složkou managementu rostlinné výroby, neboť dokáže obsáhnout kritické periody jejich vývoje. Při pěstování kukuřice jsou k simulaci tohoto vývoje používány dynamické modely, které odhadují denní růst a produkci sušiny od vzejití až ke zralosti, z čehož je pak následně stanoven odhad výnosu. Tyto modely ovšem často selhávají za předpokladu, že rostliny nerostou v optimálních podmínkách (jsou poškozeny mrazem, kroupami, chorobami, škůdci nebo suchem). Vina et al. (2004) proto jako řešení navrhuje monitorování rostlin pomocí dálkového průzkumu Země, pomocí kterého lze následně vytvoření modelů výrazně zpřesnit. Prostředkem pro zpřesnění jsou pak naměřené vlnové délky a vypočítané vegetační indexy, u kterých byla zjištěna úzká korelace s některými vlastnostmi rostlin. Dle Rojase (2007) lze pak pomocí těchto hodnot odhadovat množství vytvořené biomasy, výnos a odhadnout obsah sušiny, podle kterého je pak určen termín sklizně. Komplexní schéma postupu stanovení ideálního termínu sklizně kukuřice na základě metod dálkového průzkumu Země je znázorněn na obrázku č. 2:

Obrázek č. 2: Schéma postupu stanovení ideálního termínu sklizně kukuřice (Janoušek et al., 2021)



poznámka: český překlad Obrázku č.2 UAV (unmanned aerial vehicle) photogrammetry = UAV (bezpilotní létající zařízení) fotogrammetrie, reflectance maps = mapy odrazivosti, spectral reflectance (blue, green, red, red edge, near infrared), pásma spektrální odrazivosti (modré, zelené, červené, okraj červené části spektra, oblast blízka infračervenému spektru), multispectral calculation = multispektrální kalkulace, vegetation indices = vegetační indexy (NDVI, NDRE, GNDVI, CWSI), corn crop = porost kukuřice, vegetation collection = odběr vzorků, nutrition processing = příprava vzorků pro nutriční analýzy, nutrition analysis = nutriční analýza, correlation analysis = korelační analýza, the most significant correlation = nejvýznamnější korelace, linear dependences calculation = výpočet lineárních vztahů, determining the optimal harvest time = určení optimálního termínu sklizně

Janoušek et al. (2021) pomocí UAV fotogrammetrie naměřili vlnové délky a vypočítali vegetační indexy u porostu kukuřice. Dále v laboratoři analyzovali vzorky rostlin, aby zjistili jejich chemické parametry. Získaná data byla následně podrobena korelační analýze. Z výsledků bylo zjištěno, že s postupujícím fenologickým vývojem rostlin souvisí nárůst jejich sušiny. Dalšími parametry, u kterých byla zjištěna silná korelace byl obsah škrobu a obsah organické hmoty. Janoušek et al. (2021) jejich výzkum shrnují tvrzením, že (pokud se tedy vezme ohled na jejich konkrétní metodický postup) optimální termín sklizně může být predikován pomocí dálkového průzkumu Země (odhadem procenta sušiny, ale i odhadem obsahu škrobu a bílkovin). Kompletní výsledky korelací mezi chemickými parametry rostlin vlnovými délkami a vegetačními indexy jsou uvedeny v tabulce č. 2:

Tabulka č. 2: Korelační koeficienty relevantní pro data získaná multispektrálním snímkováním a chemickými analýzami (Janoušek et al., 2021)

Characteristics	Spectral Reflectivity					Vegetation Indices		
	Blue	Green	Red	Red Edge	NIR	NDVI	NDRE	GNDVI
Nutrition characteristics								
¹ DM [g/kg]	0.804	0.861	0.866	0.691	0.012	-0.920	-0.924	-0.901
² CP [g/kg DM]	-0.858	-0.892	-0.953	-0.788	-0.261	0.922	0.854	0.746
³ CF [g/kg DM]	-0.755	-0.858	-0.904	-0.804	-0.394	0.798	0.777	0.654
⁴ Starch [g/kg DM]	0.783	0.875	0.905	0.767	0.267	-0.884	-0.867	-0.751
⁵ Ash [g/kg DM]	-0.772	-0.838	-0.936	-0.795	-0.373	0.853	0.756	0.639
⁶ NDF [g/kg]	-0.602	-0.764	-0.814	-0.711	-0.391	0.719	0.697	0.579
⁷ DNDF [%]	0.607	0.480	0.640	0.524	0.260	-0.563	-0.381	-0.456
⁸ DOM [%]	0.703	0.844	0.912	0.765	0.325	-0.863	-0.803	-0.651
Yield characteristics								
⁹ FM [kg/ 10 plants]	-0.289	-0.217	-0.165	-0.056	0.574	0.375	0.420	0.530
¹⁰ EW [kg/ 10 plants]	0.840	0.947	0.945	0.925	0.473	-0.822	-0.867	-0.513
¹¹ YFM [kg/ha]	-0.289	-0.217	-0.165	-0.056	0.574	0.375	0.420	0.530
¹² YDM [kg/ha]	0.699	0.824	0.842	0.741	0.359	-0.761	-0.769	-0.645

¹ DM—dry matter; ² CP—crude protein (determined from the DM); ³ CF—crude fiber; ⁴ starch—starch content; ⁵ Ash—ash content; ⁶ NDF—neutral detergent fiber; ⁷ DNDF—digestibility (NDF); ⁸ DOM—digestibility (organic matter); ⁹ FM—fresh matter; ¹⁰ EW—ear weight; ¹¹ YFM—yield of fresh matter; ¹² YDM—yield of dry matter.

Table 6. The linear correlation rates.

Value	0 to 0.2	0.2 to 0.4	0.4 to 0.6	0.6 to 0.8	0.8 to 1
Correlation	Very weak	Weak	Medium	Strong	Very strong

poznámka: český překlad anglických pojmů z tabulky č. 2

spectral reflectivity = spektra odrazivosti

blue = modré spektrum, green = zelené spektrum, red = červené spektrum, red edge = okraj červené části spektra

NIR = oblast blízká infračervenému spektru

vegetation indices – vegetační indexy

nutrition characteristics = nutriční charakteristiky

dry matter = sušina, crude protein = hrubý protein, crude fibre = hrubá vláknina, starch = škrob, ash = popelovin,

neutral detergent fiber = neutrálně detergentní vláknina, DNDF = stravitelná neutrálně detergentní vláknina, DOM

= stravitelná organická hmota

yield characteristics = výnosové charakteristiky

fresh matter = čerstvá hmota, ear weight = hmotnost palic, yield of fresh matter = výnos čerstvé hmoty, yield of

dry matter = výnos suché hmoty

correlation rates = hodnoty korelací

very weak = velmi slabá korelace, weak = slabá korelace, medium = středně silná korelace, strong = silná korelace,

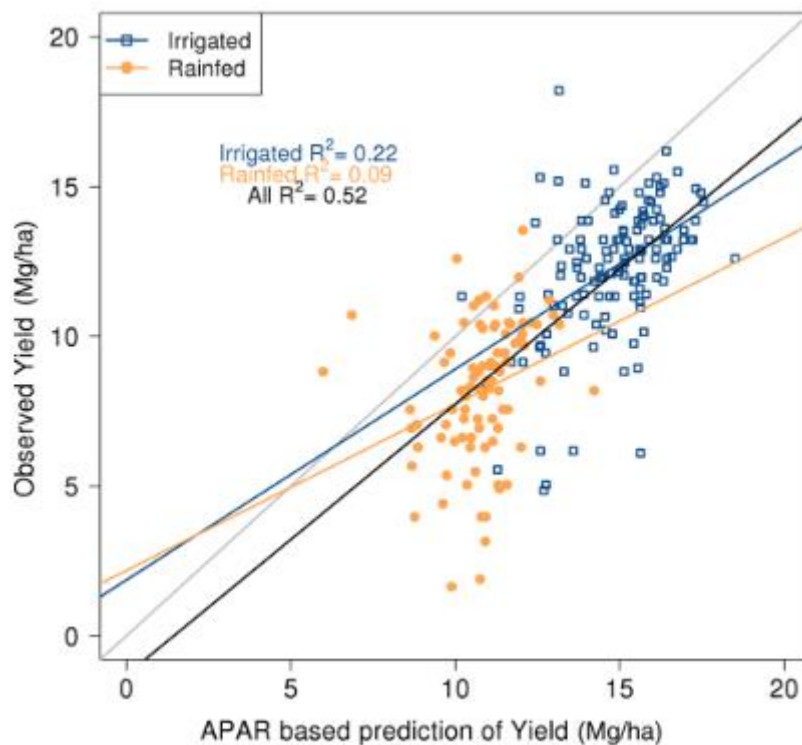
very strong = velmi silná korelace

Ve výzkumu Rojase (2007) byl pro odhad výnosu kukuřice použit systém využívající index NDVI. Ukázalo se, že tento systém je schopen relativně přesně odhadnout výnos 20-30 dní dopředu.

Ve výzkumu Gitelzona et al. (2003) byl zkoumán vztah NDVI indexu k hodnotě LAI. Index NDVI byl v tomto pokusu sensitivní k hodnotě LAI zejména na počátku vegetace (při hodnotách LAI 0-1,2), při hodnotách LAI nad 1,5 byla sensitivita nízká. NDVI index dosáhl maximální hodnoty 0,9. Tento vztah sice v žádné z fází fenologického vývoje rostlin nebyl lineární, ale byl zde patrný vztah mezi oběma měřenými hodnotami. Dle Gitelzona et al. (2003) je proto tato znalost použitelná pro praxi.

Ve výzkumu Sibleyho et al. (2014) byla provedena predikce výnosu kukuřice tzv. metodou APAR, kdy byla z MODIS senzorů umístěných na družici získána data, která byla srovnána se změřeným výnosem. Výsledky popisuje graf č. 1:

Graf č. 1: Srovnání naměřených výnosů s hodnotami získanými z predikčního modelu APAR (Sibley et al., 2014)



poznámka: český překlad anglických pojmů z tabulky č. 2

Irrigated = hodnoty korelací získané ze zavlažovaných pozemků

All = všechny hodnoty korelací

Rainfed = hodnoty korelací získané z pozemků získávajících vodu z dešťových srážek

Observed yield = pozorovaný výnos

APAR based prediction of yield = odhadovaný výnos získaný z predikčního modelu APAR

4 Materiál a metody

4.1 Metodika

4.1.1 Lokalita založení pokusu

V rámci této diplomové práce byl založen přesný polní pokus a místem, kde byl tento experiment veden, se stal demonstrační a pokusný pozemek České zemědělské univerzity v Praze (ČZU), který je v rámci podnebí České republiky zařazen dle agrometeorologické kategorizace jako lokalita s velmi teplým a suchým klimatem. Stanoviště je lokalizováno v řepařské výrobní oblasti v nadmořské výšce 286 m n. m. Na stanovišti se nachází hluboká hlinitá černozem.

4.1.2 Meteorologická charakteristika stanoviště

Na demonstračním a pokusném pozemku České zemědělské univerzity v Praze byl v rámci třicetiletého období zjištěn roční úhrn srážek 526 mm, průměrná roční teplota 7,9 °C a průměrná délka slunečního svitu 1921 hodin (Fuksa a kol., 2004). Hodnoty úhrnů srážek pro rok 2021 jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3: Porovnání průběhu počasí roku 2021 s normálem Praha-Ruzyně 1981-2010

Měsíc	Teplotní normál (°C)	Prům. teplota (°C)	Odchylka od normálu	hodnocení	Srážkový normál (mm)	Srážky (mm)	Hodnocení
1.	-1,4	0,2	1,6	normální	22	35	nadnormální
2.	-0,3	0,5	0,8	normální	20	34,2	nadnormální
3.	3,6	4,2	0,6	normální	28	26,2	normální
4.	8,5	6,8	-1,7	podnormální	28	8,2	Silně podnormální
5.	13,5	11,7	-1,8	podnormální	70	88,1	nadnormální
6.	16,2	20,2	4,0	mimořádné nadnormální	67	90,2	nadnormální
7.	18,3	19,8	1,5	normální	78	77,1	normální
8.	17,9	15,7	-2,2	silně podnormální	66	83,1	nadnormální
9.	13,5	15,6	2,1	silně nadnormální	38	13,7	podnormální
10.	8,5	9,5	1,0	normální	27	15,5	normální
11.	3,1	4,6	1,5	nadnormální	30	33,7	normální
12.	-0,3	2,0	2,3	nadnormální	28	26,8	normální
Průměr teplot a suma srážek za vegetační období	14,7	15,0	0,3	normální	347	360,4	normální
Průměr teplot a suma srážek za rok	8,4	9,2	0,8	normální	502	531,8	normální

4.1.3 Charakteristika použitých rostlin

Při pokusu na demonstračním a pokusném pozemku byly použity 4 různé odrůdy kukuřice seté:

-Sc Odrůda ES Katmandu – raná odrůda s číslem S 220/Z 210, využívaná pro sklizeň zrna a výrobu bioethanolu, charakteristická vysokým výnosem a nízkou sklizňovou vlhkostí zrna. Optimální výsevek je 80-90 tis. rostlin/ha.

-Sc Odrůda ES Faraday – středně pozdní odrůda s číslem FAO S 310/Z 300, využívaná ke sklizni zrna a pro výrobu bioethanolu. Optimální výsevek je 75-85 tis. rostlin/ha.

-Sc odrůda ES Skywalker s číslem FAO S 270, využívaná k silážování. Optimální výsevek je 80-85 tis. rostlin/ha.

-Sc Odrůda ES Joker – raná odrůda s číslem FAO S 250/Z 240, využívaná na silážování i pro sklizeň zrna. Optimální výsevek je 80-85 tis. rostlin/ha.

4.1.4 Založení pokusu

V podzimním období před založením pokusu byla provedena orba a na jaře předseťová příprava půdy. Před zasetím porostu bylo dne 8. 4. 2021 aplikováno hnojivo NPK 15-15-15 v dávce 1 t/ha tj. 150 kg N/ha, 65 kg P/ha a 125 kg K/ha.

Před založením pokusu bylo provedeno vyměření celkové plochy pozemku, vyměření parcel, okrajů a vyměření vzdáleností mezi jednotlivými parcelami a okraji. Na pozemku bylo celkem vyměřeno 16 parcel o rozměrech 14 m² (2,8 · 5 m).

Na 16 parcelách byly 26. 4. 2021 zasety celkem 4 varianty (4 odrůdy), každá se čtyřmi opakováními ve znáhodněných blocích (uspořádání v latinském čtverci), jak je patrné z obrázku č. 3. Na každé parcele byly 4 řádky s roztečí 0,7 m a se vzdáleností rostlin v řádku 16 cm, tedy výsevek činil 90 tis. rostlin/ha.

Obrázek č. 3: Plánek pokusu – rozmístění sledovaných hybridů na stanovišti Praha – Suchdol

ES Faraday	ES Skywalker	ES Joker	ES Kathmandu
ES Skywalker	ES Joker	ES Kathmandu	ES Faraday
ES Joker	ES Kathmandu	ES Faraday	ES Skywalker
ES Kathmandu	ES Faraday	ES Skywalker	ES Joker

4.1.5 Ošetřování porostu během vegetace

Během vegetace byl porost dne 9. 5. 2021 herbicidně ošetřen přípravkem Lumax v dávce 3,5 l/ha. Tento herbicid obsahuje účinné látky terbuthylazine (125 g/l), S-metolachlor (375 g/l) a mesotrione (37,5 g/l).

4.1.6 Odběry vzorků, měření a sklizeň

Přibližně v týdenních intervalech bylo provedeno celkem 6 ručních odběrů vzorků za účelem stanovení obsahu sušiny rostlin. Souběžně s posledními třemi ručními odběry pak byla ještě provedena UAV fotogrammetrie za účelem získání vegetačních indexů.

V průběhu vegetace byla také změřena výška rostlin (2. 9. 2021) a stanovena LAI porostu (2. 9. a 20. 9. 2021) na základě zjištění průměrné plochy listů (délka x šířka listů x koef. 0,75) u třech reprezentativních rostlin na každé parcele a následném vynásobení této hodnoty počtem rostlin na 1 m².

4.1.7 Metody stanovení obsahu sušiny rostlin

Pomocí ručních odběrů vzorků byly z každé parcely vždy odebrány tři rostliny (při posledním sklizňovém odběru ještě do dvou látkových pytlů), které byly následně zváženy. Odebrané rostliny byly rozděleny na palice a zbytek rostliny. Poté byl tento materiál vložen do papírových pytlů a náležitě označen. Následně byly vzorky přemístěny do sušáren. Po usušení rostlin a palic při 105 °C došlo opět k jejich vážení a z naměřených hmotností čerstvé a suché hmoty bylo spočítáno procento jejich sušiny.

4.1.8 Stanovení vegetačních indexů a hodnot spektrální odrazivosti pomocí UAV fotogrammetrie

Porost kukuřice byl snímkován pomocí multispektrální kamery Parrot Sequoia nesené bezpilotním prostředkem Parrot Disco Pro. Kamera samostatnými čipy snímá čtyři spektrální pásma: zelené, červené, red edge a NIR.

Snímkování bylo uskutečněno v termínech 2. 9., 9. 9. a 20. 9. roku 2021 vždy v odpoledních hodinách při zatažené obloze.

Před započítáním snímkování byly vždy v porostu pomocí odrazných desek o velikosti 20 x 20 cm vyznačeny hranice jednotlivých parcel a v blízkosti porostu byly umístěny referenční desky se známou odrazivostí v jednotlivých spektrálních pásmech.

Bezprostředně po každém snímkování byly ze všech parcel odebrány reprezentativní vzorky nadzemní hmoty kukuřice a byla stanovena hmotnost v čerstvém stavu. Vzorky byly následně vysušeny při 105 °C do konstantní hmotnosti a byl vypočten obsah sušiny (viz kap. 4.1.7).

Pomocí zonální statistiky byly v programu ArcGis 10.7.1 stanoveny průměrné jasové hodnoty pro jednotlivá spektrální pásma kamery ve všech parcelách pokusu. Tyto hodnoty byly

následně převedeny pomocí dat z referenčních ploch na skutečnou odrazivost v každém spektrálním pásmu.

Pomocí programu Microsoft Excel byly pro každou parcelu pokusu vypočteny vegetační indexy NDVI, SAVI a EVI2 (vzorce pro výpočet viz kapitoly 3.10 a 3.11) a byl stanoven korelační koeficient mezi sušinou kukuřice a hodnotami těchto indexů. Dále byl empiricky hledán nový index, který by poskytl vyšší míru korelace vzhledem k obsahu sušiny kukuřice.

Pořízené snímky jsou prezentovány přiloženy v přílohovém obrázku 1-5.

4.1.9 Statistické vyhodnocení dat

Získané výsledky byly statisticky vyhodnoceny pomocí jednofaktorové a vícefaktorové analýzy rozptylu ($\alpha = 0,05$: Tukey HSD test) v programu Statistica 12. Regresní a korelační analýza dat byla zpracována v programu Microsoft Excel.

5 Výsledky

5.1 Sklizňové parametry

5.1.1 Výška rostlin

V přílohovém grafu č. 1 je porovnáván vliv odrůdy na výšku rostlin. Z grafu je patrné, že mezi odrůdou ES Katmandu a ES Faraday, ES Skywalker a ES Katmandu, ES Joker a ES Katmandu a ES Joker a ES Faraday existují statisticky průkazné rozdíly.

V přílohovém grafu č. 2 je porovnáván vliv odrůdy na výšku nasazení palic. Statisticky průkazný rozdíl byl nalezen mezi odrůdami ES Katmandu a ES Faraday, ES Katmandu a ES Skywalker, ES Katmandu a ES Joker a ES Faraday a ES Skywalker.

5.1.2 Suchá hmotnost palic

Z přílohového grafu č. 3 je zřejmé, že u všech sledovaných odrůd v průběhu vegetace narůstala suchá hmotnost palic, přičemž v posledních čtrnácti dnech vegetace se nárůst hmotnosti zpomaloval.

Z přílohového grafu č. 4 je patrné, že statisticky průkazné rozdíly mezi hmotností palic v průměru za všechny odběry, lze nalézt mezi odrůdami ES Faraday a ES Joker.

Z přílohového grafu č. 5 lze vypožorovat průběh vývoje suché hmotnosti palic jednotlivých hybridů. U odrůdy ES Katmandu je patrný pokles hmotnosti palic v posledních dvou týdnech vegetace, který však nebyl statisticky významný.

5.1.3 Suchá hmotnost zbytku rostliny

Z přílohového grafu č. 6 je zřejmé, že u všech sledovaných odrůd docházelo ke kolísání suché hmotnosti zbytku rostliny, avšak bez průkazných rozdílů mezi odběry. Z výsledků je tedy patrné, že se hmotnost zbytku rostliny ve sledovaném období již prakticky neměnila.

Z přílohového grafu č. 7 je patrné, že statisticky průkazné rozdíly mezi hmotnostmi zbytku rostliny v průměru za sledované období, lze nalézt u odrůd ES Katmandu a ES Faraday, ES Katmandu a ES Skywalker, ES Faraday a ES Joker a ES Skywalker a ES Joker.

Z přílohového grafu č. 8 lze vypožorovat průběh vývoje hmotnosti zbytku rostliny. U všech sledovaných odrůd je patrné statisticky nevýznamné kolísání hmotnosti zbytku rostlin v čase.

5.1.4 Suchá hmotnost celých rostlin

Z přílohového grafu č. 9 je patrné, že suchá hmotnost celých rostlin narůstala během prvních čtyřech odběrů a poté už se téměř nezměnila.

Z přílohového grafu č. 10 je patrné, že statisticky průkazné rozdíly mezi suchými hmotnostmi celých rostlin v průměru za sledované období, jsou patrné mezi odrůdami ES Katmandu a ES Skywalker.

Z přílohového grafu č. 11 lze vyzorovat průběh vývoje hmotnosti celých rostlin. Z grafu je patrné, že interakce hybrid*termín odběru nebyla statisticky významná.

5.1.5 Sušina palic

Z přílohového grafu č. 12 je patrné, že sušina palic u všech odrůd v čase narůstala.

Z přílohového grafu č. 13 je zřejmé, že statisticky průkazné rozdíly mezi sušinami palic za celé sledované období, lze nalézt mezi odrůdami ES Katmandu a ES Faraday, ES Katmandu a ES Joker, ES Faraday a ES Skywalker a ES Faraday a ES Joker.

Z přílohového grafu č. 14 lze vyzorovat průběh vývoje sušiny palic jednotlivých odrůd. U všech odrůd během vegetace docházelo k nárůstu sušiny palic.

5.1.6 Sušina zbytku rostliny

Z přílohového grafu č. 15 je patrné, že sušina zbytku rostlin u všech odrůd v čase narůstala.

Z přílohového grafu č. 16 je patrné, že statisticky průkazné rozdíly mezi sušinou zbytku rostlin v průměru za všechny odběry, lze nalézt mezi odrůdami ES Skywalker a ES Joker.

Z přílohového grafu č. 17 lze vyzorovat průběh vývoje sušiny zbytku rostlin u jednotlivých odrůd. Z výsledků prvních třech odběrů vyplývá, že obsah sušiny u jednotlivých hybridů stagnoval, ale od 4. odběru lze již u všech odrůd pozorovat viditelný trend nárůstu sušiny.

5.1.7 Sušina celých rostlin

Z přílohového grafu č. 18 je patrné, že sušina celých rostlin u všech odrůd v čase narůstala.

Z přílohového grafu č. 19 je zřejmé, že statisticky průkazné rozdíly mezi sušinou celých rostlin v průměru za všechna sledování, lze nalézt mezi odrůdami ES Katmandu a ES Faraday, ES Katmandu a ES Skywalker, ES Faraday a ES Skywalker a ES Skywalker a ES Joker.

Z přílohového grafu č. 20 lze vypožorovat průběh vývoje sušiny celých rostlin u jednotlivých odrůd. Z výsledků je zřejmé, že sušina celých rostlin v čase narůstala u všech odrůd.

5.1.8 Podíl palic

Z přílohového grafu č. 21 je patrné, že podíl palic se vůči celé rostlině v čase zvyšoval u všech odrůd.

Z přílohového grafu č. 22 je patrné, že statisticky průkazné rozdíly mezi podíly palic jednotlivých odrůd v průměru za celé sledované období, lze nalézt mezi odrůdami ES Katmandu a ES Faraday, ES Katmandu a ES Skywalker a ES Faraday a ES Joker.

Z přílohového grafu č. 23 lze vypožorovat průběh vývoje podílu palic u jednotlivých odrůd. Z výsledků je zřejmé, že podíl palic narůstal v čase u všech odrůd.

5.1.9 Výnos sušiny

Z přílohového grafu č. 24 je patrné, že statisticky průkazné rozdíly mezi výnosem sušiny lze nalézt mezi odrůdami ES Katmandu a ES Joker.

5.1.10 Obsah sušiny v době sklizně

Z přílohového grafu č. 25 je zřejmé, že statisticky průkazné rozdíly mezi sušinou rostlin při sklizni lze nalézt mezi odrůdami ES Katmandu a ES Faraday

5.1.11 Hodnota LAI v průběhu vegetace

Z přílohového grafu č. 26 vyplývá, že u všech odrůd byla vyšší hodnota LAI v prvním termínu měření než ve druhém termínu. K největšímu poklesu LAI došlo u odrůdy ES Katmandu, naopak u odrůdy ES Joker klesla hodnota LAI jen mírně. Největší hodnota LAI byla naměřena u odrůdy ES Faraday.

5.2 Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny

5.2.1 Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u všech odrůd

Z přílohového grafu č. 27 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny klesala hodnota blízkého infračerveného záření (NIR). Koeficient determinace byl 0,75.

Z přílohového grafu č. 28 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny narůstala hodnota červeného záření. Koeficient determinace byl 0,25.

Z přílohového grafu č. 29 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny narůstala hodnota zeleného záření. Koeficient determinace byl 0,21.

Z přílohového grafu č. 30 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny se měnila hodnota záření okraje červeného spektra. Koeficient determinace byl 0,03.

5.2.2 Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Katmandu

Z přílohového grafu č. 31 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny klesala hodnota NIR. Koeficient determinace byl 0,84.

Z přílohového grafu č. 32 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota červeného záření. Koeficient determinace byl 0,83.

Z přílohového č. 33 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota zeleného záření. Koeficient determinace byl 0,82.

Z přílohového grafu č. 34 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny klesala hodnota záření okraje červeného spektra. Koeficient determinace byl 0,11.

5.2.3 Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Faraday

Z přílohového grafu č. 35 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny klesala hodnota NIR. Koeficient determinace byl 0,71.

Z přílohového grafu č. 36 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota červeného záření. Koeficient determinace byl 0,70.

Z přílohového grafu č. 37 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota zeleného záření. Koeficient determinace byl 0,63.

Z přílohového grafu č. 38 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny se měnila hodnota záření okraje červeného spektra. Koeficient determinace byl 0,42.

5.2.4 Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Skywalker

Z přílohového grafu č. 39 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny klesala hodnota NIR. Koeficient determinace byl 0,74.

Z přílohového grafu č. 40 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota červeného záření. Koeficient determinace byl 0,75.

Z přílohového grafu č. 41 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota zeleného záření. Koeficient determinace byl 0,56.

Z přílohového grafu č. 42 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny se měnila hodnota záření okraje červeného spektra. Koeficient determinace byl 0,12.

5.2.5 Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u odrůdy ES Joker

Z přílohového grafu č. 43 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny klesala hodnota NIR. Koeficient determinace byl 0,73.

Z přílohového grafu č. 44 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota červeného záření. Koeficient determinace byl 0,84.

Z přílohového grafu č. 45 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny stoupala hodnota zeleného záření. Koeficient determinace byl 0,73.

Z přílohového grafu č. 46 je patrné, že s narůstající hodnotou sušiny se měnila hodnota záření okraje červeného spektra. Koeficient determinace byl 0,18.

5.3 Vegetační indexy

Z tabulky č. 4 je patrné, že nejvyšších hodnot indexů NDVI, SAVI a EVI2 dosahovala odrůda ES Joker, nejvyšší hodnoty nového indexu dosáhl celý porost.

Tabulka č. 4: Zjištěné hodnoty vegetačních indexů NDVI, SAVI, EVI2 a nového vegetačního indexu v prvním termínu měření (2. 9. 2021)

	NDVI	SAVI	EVI2	Nový index	
Celý porost	0,908	1,348	2,093	40,645	NIR-0.8*(R+G)
ES Katmandu	0,871	1,293	1,961	21,448	NIR-3*(R+G)
ES Faraday	0,895	1,329	2,045	26,124	NIR-3*(R+G)
ES Skywalker	0,920	1,366	2,137	28,862	NIR-0.8*(R+G)
ES Joker	0,946	1,403	2,230	29,976	NIR-3*(R+G)

Z tabulky č. 5 je patrné, že nejvyšších hodnot indexů NDVI, SAVI a EVI2 dosahovala odrůda ES Joker, nejvyšší hodnoty nového indexu dosáhl celý porost.

Tabulka č. 5: Zjištěné hodnoty vegetačních indexů NDVI, SAVI, EVI2 a nového vegetačního indexu v druhém termínu měření (9. 9. 2021)

	NDVI	SAVI	EVI2	Nový index	
Celý porost	0,900	1,335	2,062	39,263	NIR-0.8*(R+G)
ES Katmandu	0,865	1,286	1,937	19,874	NIR-3*(R+G)
ES Faraday	0,886	1,316	2,015	24,868	NIR-3*(R+G)
ES Skywalker	0,915	1,358	2,115	27,492	NIR-0.8*(R+G)
ES Joker	0,934	1,384	2,182	27,315	NIR-3*(R+G)

Z tabulky č. 6 je patrné, že nejvyšších hodnot indexů NDVI, SAVI a EVI2 dosahovala odrůda ES Joker. Nejvyšší hodnoty nového indexu dosahoval celý porost.

Z výsledků všech třech termínů měření je zřejmé, že hodnota všech indexů v čase klesala.

Tabulka č. 6: Zjištěné hodnoty vegetačních indexů NDVI, SAVI, EVI2 a nového vegetačního indexu ve třetím termínu měření (20. 9. 2021)

	NDVI	SAVI	EVI2	Nový index	
Celý porost	0,814	1,206	1,764	29,556	NIR-0.8*(R+G)
ES Katmandu	0,765	1,133	1,608	2,594	NIR-3*(R+G)
ES Faraday	0,802	1,191	1,729	9,641	NIR-3*(R+G)
ES Skywalker	0,836	1,238	1,832	11,944	NIR-0.8*(R+G)
ES Joker	0,853	1,263	1,888	13,121	NIR-3*(R+G)

Z tabulky č. 7 je patrné, že mezi sušinou a vegetačními indexy je silná korelace. Nejsilnější korelace byla zjištěna mezi indexem SAVI a sušinou u odrůdy ES Joker. Nejnížší korelace byla zjištěna mezi indexem NDVI a sušinou všech odrůd.

Tabulka č. 7: Korelace vegetačních indexů s hodnotami sušiny (hodnoty korelačních koeficientů)

	NDVI	SAVI	EVI2	Nový index	
Celý porost	-0,667	-0,676	-0,672	-0,867	NIR-0.8*(R+G)
ES Katmandu	-0,866	-0,867	-0,870	-0,881	NIR-3*(R+G)
ES Faraday	-0,862	-0,863	-0,866	-0,862	NIR-3*(R+G)
ES Skywalker	-0,902	-0,903	-0,905	-0,904	NIR-0.8*(R+G)
ES Joker	-0,922	-0,923	-0,927	-0,921	NIR-3*(R+G)

Z tabulky č. 8 je patrné, že mezi hodnotou LAI a vegetačními indexy je střední až silná korelace. Nejvyšší korelace byla zjištěna mezi indexem NDVI a hodnotou LAI odrůdy ES Faraday. Nejnížší korelace byla zjištěna mezi indexem EVI2 a hodnotou LAI všech odrůd.

Tabulka č. 8: Korelace vegetačních indexů s hodnotami LAI (hodnoty korelačních koeficientů)

	NDVI	SAVI	EVI2	Nový index	
Celý porost	0,492	0,501	0,491	0,717	NIR-0.8*(R+G)
ES Katmandu	0,781	0,783	0,791	0,824	NIR-3*(R+G)
ES Faraday	0,928	0,926	0,925	0,902	NIR-3*(R+G)
ES Skywalker	0,921	0,9208	0,919	0,894	NIR-0.8*(R+G)
ES Joker	0,582	0,576	0,574	0,524	NIR-3*(R+G)

6 Diskuze

Dle Zimolky et al. (2008) rostliny kukuřice obvykle dosahují výšky 120–300 cm. V rámci tohoto experimentu však byla naměřena průměrná výška všech odrůd 334,5 cm, u odrůdy ES Katmandu 322 cm, u odrůdy ES Faraday 334 cm, u odrůdy ES Skywalker 338 cm a u odrůdy ES Joker 344 cm. V pokusu Enujeke (2013) bylo zjištěno, že odrůda má vliv na výšku rostlin, což odpovídá výsledkům tohoto pokusu. Dle Amanullaha et al. (2009) je významným faktorem ovlivňujícím výšku rostlin dávka dusíku a hustota setí.

V pokuse Freye (1981) byly pěstovány 2 hybridy kukuřice 3388 a 3369A a bylo zjištěno, že suchá hmota se akumulovala více u hybridu 3369A. To odpovídá výsledkům tohoto pokusu, kde u každého hybridu docházelo k odlišné rychlosti akumulace suché hmoty palic. V pokuse Freye (1981) bylo zjištěno, že ztráta listů má vliv na akumulaci suché hmoty palic. To odpovídá měřením z tohoto pokusu, kde byl v posledním týdnu vegetace zaznamenán pokles hodnoty LAI i pokles rychlosti akumulace suché hmoty, který byl však zřejmý zejména u odrůdy ES Katmandu. V pokusu Centera et al. (1970) sušina stonků klesala od mléčné do plné zralosti, což se shoduje s výsledky tohoto pokusu. Hmotnost suché hmoty palic kromě odrůdy ES Katmandu mírně stoupala. Kromě odrůdy ES Katmandu došlo v posledních 14 dnech vegetace k nárůstu hmotnosti palic a poklesu hmotnosti zbytku rostliny. To mělo zřejmě vliv na celkovou hmotnost rostlin, která po celou vegetaci stoupala, avšak v posledních 14 dnech vegetace byla téměř konstantní. Podíl palic se však vůči zbytku rostliny i v posledním týdnu mírně zvyšoval, a to právě z toho důvodu, že rychlost schnutí byla vyšší u zbytku rostliny než u palice.

Dle Daccorda et al. (1996) je kukuřici na siláž vhodné sklízet při 30 % jejich sušiny. Obdobné hodnoty jsou uvedeny v článku Tyrolové a Výborné (2008), které tvrdí, že zdařilé silážování proběhne, mají-li rostliny 28–34 % sušiny. V rámci tohoto pokusu byla průměrná sušina všech odrůd při sklizni 37,84 %, u odrůdy ES Katmandu 39,66 %, u odrůdy ES Faraday 35,54 %, u odrůdy ES Skywalker 37,59 % a u odrůdy ES Joker 38,57 %, což přesahuje doporučené hodnoty. Pozdní sklizeň však proběhla záměrně, a to z důvodu zjištění korelace s vegetačními indexy.

Během pokusu Janouška et al. (2021) bylo provedeno celkem 8 odběrů v různých fenologických fázích vývoje rostlin, při kterém byly zjištěny různé hodnoty sušiny. Ukázalo se, že hodnoty indexu NDVI byly při různých hodnotách sušiny rozdílné. V tabulce č. 8 je

provedeno srovnání sušiny rostlin ze třech odběrů tohoto pokusu a z pokusu Janouška et al. (2021):

Tabulka č. 9: Srovnání indexu NDVI a sušiny v tomto pokusu a v pokusu Janouška et al. (2021)

Pokus Praha – Suchdol (tento pokus)		Pokus Janoušek et al. (2021)	
Sušina (%)	Index NDVI	Sušina (%)	Index NDVI
27,42	0,908	22,44	0,900
31,36	0,900	31,97	0,891
35,35	0,814	35,57	0,830

U obou pokusů je z tabulky č. 9 patrné, že při vysokých hodnotách sušiny docházelo k poklesu hodnoty indexu NDVI.

V rámci tohoto pokusu byly pořízeny snímky v červené a zelené oblasti spektra a dále v oblasti blízké infračervenému spektru a v oblasti okraje červeného spektra. Dle Branta et al. (2020) významné rozdíly ve spektrální odrazivosti vegetace a půdy lze nalézt zejména v červeném spektru a v oblasti okraje červeného spektra. Dle Janouška et al. (2021) je pro stanovování vegetačních indexů nejvíce používáno spektrum infračervené. V rámci tohoto pokusu byla nejsilnější korelace sušiny s hodnotami NIR, což potvrzuje tvrzení Branta et al. (2020) o silné sensitivitě této části spektra. Naopak s tvrzením těchto autorů o sensitivitě vegetace a půdy k záření v oblasti okraje červeného spektra se výsledky tohoto pokusu neshodují. Dle Lorenzena a Jensena (1987) zeleného, červeného a modrého spektra lze využít zejména pokud rostliny obsahují jen malé množství zelené hmoty.

Dle Kenderessyho (2020) se hodnota indexu NDVI pohybuje mezi hodnotami -1 až 1, přičemž záporné hodnoty představují vodní plochy a hodnoty 0-1 představují hustotu vegetace. Výsledky hodnoty NDVI se v tomto pokusu pohybovaly kolem hodnoty 0,8 a vegetaci bylo možno označit jako hustou. Naměřené hodnoty se tedy shodují s tvrzením Kenderessyho (2020).

Dle Jianga et al. (2008) index EVI2 vykazuje vysoké hodnoty korelace zejména u ploch s vysokou pokryvností vegetace. To se shoduje s výsledky tohoto pokusu, kde rostliny kukuřice tvořily hustý porost a hodnoty korelací byly mírně vyšší než u indexů NDVI a SAVI. Z výsledků toho pokusu je ale zřejmé, že i indexy NDVI a SAVI jsou vhodné pro porosty s vysokou pokryvností, protože i u nich byla nalezena vysoká hodnota korelace. Dle Vaniho et al. (2017) je index SAVI používán zejména pro aridní a semi-aridní lokality, kde oproti indexu NDVI vykazuje vyšší hodnotu korelace. V lokalitě Praha – Suchdol, kde byl veden tento pokus

se však, jak už bylo řečeno, o takovou lokalitu nejedná, neboť úhrn srážek za rok přesahoval v roce 2021 500 mm, což může být příčinou těchto minimálních rozdílů. Z předchozích tvrzení vyplývá, že různé typy indexů jsou vhodné pro různé typy lokalit. V rámci tohoto pokusu byl vytvořen nový index vypočtený podle vzorce $NIR-0.8*(R+G)$ a $NIR-0.3*(R+G)$, jenž byl matematicky přizpůsobený pro toto konkrétní stanoviště. Díky vytvoření této matematické kombinace se podařilo mezi tímto novým indexem a hodnotami sušiny nalézt největší korelaci. To se shoduje s článkem Vaniho et al. (2017), jenž doporučuje pro konkrétní lokalitu zvolit vhodný index.

Dle tvrzení Janouška et al. (2021) mohou vegetační indexy sloužit k nepřímému stanovení obsahu sušiny rostlin, neboť s ní úzce korelují. To se shoduje s výsledky tohoto pokusu, kde byla korelace těchto parametrů též zřejmá. Janoušek et al. (2021) v jejich pokusu využili k porovnání korelací indexy NDVI, NDRE a GNDVI. Z výsledků vyplynulo, že nejlépe s obsahem sušiny koreloval index NDRE následovaný indexem GNDVI a NDVI. Avšak rozdíly mezi hodnotami korelací byly mezi jednotlivými indexy jen nepatrné a korelace byla u všech indexů vyhodnocena jako velmi silná. V rámci tohoto pokusu byly hodnoty indexu NDVI ve většině případů podobné a u odrůdy ES Joker byla zjištěna totožná hodnota jako v pokusu Janouška et al. (2021), což též odpovídá velmi silné korelaci.

V rámci pokusu Gitelsova et al. (2014) byla hodnota LAI měřena přístrojem Li-300, při měření hodnoty LAI bylo v tomto pokusu měřeno LAI ručně. Souběžně s měřením LAI bylo také prováděno snímkování za účelem získání vegetačních indexů. Při druhém měření byla zjištěna nižší hodnota LAI i nižší hodnota vegetačních indexů, avšak míra poklesu byla závislá na konkrétní odrůdě. Hodnota LAI se u všech odrůd i měření vždy pohybovala nad hodnotou 1,5. Dle Gitelsova et al. (2014) je index NDVI k hodnotě LAI bližší pouze na počátku vegetace, kdy LAI dosahuje hodnot 1-1,2. Dle Wanga et al. (2007) může být pomocí vegetačních indexů odhadována hodnota LAI, neboť mezi těmito parametry panuje silná korelace. To se shoduje s výsledky tohoto pokusu, kde byla také zjištěna silná korelace. Wang et al. (2007) v rámci jejich pokusu dosazovali do vzorce pro výpočet NDVI také hodnoty zeleného a modrého záření, z čehož vytvořili indexy GNDVI a GBNDVI. U těchto indexů byla zjištěna vyšší korelace s hodnotou LAI než u častěji používaného indexu NDVI.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit kauzální vztah mezi obsahem sušiny rostlin silážní kukuřice stanovené gravimetrickou metodou a normalizovanými vegetačními indexy stanovenými na základě snímků z dálkového průzkumu Země. V rámci tohoto pokusu byl veden přesný polní experiment na demonstračním a pokusném pozemku České zemědělské univerzity v Praze. Byly zasety 4 odrůdy kukuřice seté (ES Katmandu, ES Faraday, ES Skywalker a ES Joker). Nejprve byly statisticky zhodnoceny výnosové parametry jednotlivých odrůd a popsány rozdíly mezi nimi. V rámci výzkumu byly zjištěny následující skutečnosti:

- Největší výšky dosahovaly rostliny odrůdy ES Joker
- Největší výšky nasazení palic dosahovaly rostliny odrůdy ES Faraday
- Největší hmotnost palic dosahovaly rostliny odrůdy ES Joker
- Největší hmotnost celých rostlin měla odrůda ES Skywalker
- Největší sušinu palic měla odrůda ES Faraday
- Největší sušinu celých rostlin měla odrůda ES Katmandu
- Největší podíl palic měla odrůda ES Katmandu
- Nejvyššího výnosu dosahovaly rostliny odrůdy ES Joker
- Nejvyšší obsah sušiny v době sklizně měla odrůda ES Katmandu
- Největších hodnot LAI dosahovala odrůda ES Faraday

V průběhu pěstování byly odebírány vzorky za účelem stanovení obsahu sušiny. Dále byl porost snímkován multispektrální kamerou a ze získaných hodnot spektrální odrazivosti byly vypočteny vegetační indexy.

Mezi hodnotou LAI a vegetačními indexy byla zjištěna střední až silná korelace. Nejvyšší korelace byla zjištěna mezi indexem NDVI a hodnotou LAI u odrůdy ES Faraday. Nejnižší korelace byla zjištěna mezi indexem EVI2 a hodnotou LAI všech odrůd. Tento vegetační index by tak mohl nejlépe sloužit při odhadování tohoto parametru.

Mezi sušinou a hodnotami spektrální odrazivosti a mezi sušinou a vegetačními indexy byla zjištěna silná korelace, což potvrdilo stanovenou hypotézu. Nejsilnější korelace byla zjištěna mezi indexem SAVI a sušinou u odrůdy ES Joker. Nejnižší korelace byla zjištěna mezi indexem NDVI a sušinou všech odrůd, nicméně i přesto byla korelace silná. Všechny zjištěné indexy tedy vykazují vhodnost jejich použití při stanovování hodnot sušiny porostů kukuřice.

8 Literatura

- Ali A, Darvishzadeh R, Shahi, KR, Skidmore A. 2019. Validating the predictive power of statistical models in retrieving leaf dry matter content of a coastal wetland from a sentinel-2 image. *Remote Sensing* **11**:1-17
- Ayanlade A, 2017. Remote sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques. *Geoinformatica Polonica* **16**:7-17
- Basu S, Ganguly S, Mukhopadhyay S, DiBiano R, Karki, M, Nemani R. 2015. DeepSat. 1-10.
- Hake S, Bennetzen JL, 2009. Handbook of maize. Springer. New York.
- Reed BC, Brown, JF, VanderZee, D, Loveland TR, Merchant JW, Ohlen DO. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* **5**:703-714.
- Brant et al. 2020. Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. Kurent s.r.o. České budějovice.
- Brant V, Kroulík, M, Šmöger J, Škeříková M, Zábranský P, Jursík M, Prokinová E, Fuksa P, Hakl J. 2021. Efektivní hospodaření s vodou a eliminace degradace půdy v pěstebních systémech kukuřice seté. Agrární komora české republiky. Praha.
- Carlson TN, Ripley DA. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* **62**:241-252.
- Cracknell PA, Hayes L. 2007. Introduction to remote sensing. CRC press. Boca Raton.
- Cupertino da Silva Júnior M., de Assis de Carvalho Pinto, F, Marçal de Queiroz D, Alves EA, Navas Gracia LM, Gomez Gil J. 2009. Correlation between vegetation indices and nitrogen leaf content and dry matter production in *Brachiaria decumbens*. *Bornimer Agrartechnische Berichte* **69**:145-150.
- Daccord R, Arrigo Y, Vogel R. 1996. Nutritive value of maize silage. *Revue suisse d'agriculture*.
- Diker K, Bausch WC. 2003. Potential Use of Nitrogen Reflectance Index to estimate Plant Parameters and Yield of Maize **85**:437-447.
- Benetka et al. 2011. *Acta Pruhoniana*. VÚKOZ. Průhonice.
- Elvidge CD, Chen Z. 1995. Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices **48**:38-48.
- Fan X, Liu Y. 2016. A global study of NDVI difference among moderate-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **121**:177-191.

- Ferrer-González E, Agüera-Vega F, Carvajal-Ramírez F, Martínez-Carricondo P. 2020. UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing* **12**:1-19.
- Fialová K, 2017. Využití bezpilotních létajících prostředků v precizním zemědělství [BSc. Thesis]. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha.
- Fraser CS, Brown DC. 1986. Industrial photogrammetry: New developments and recent applications. *The photogrammetric record*. **12**:197-217.
- Ghosh BN, Dogra P, Sharma NK, Bhattacharyya R, Mishra PK. 2015. Conservation agriculture impact for soil conservation in maize–wheat cropping system in the Indian sub-Himalayas. *International Soil and Water Conservation Research* **3**:112-118.
- Gitelson AA, Gritz, Y, Merzlyak MN. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*. **160**: 271-282.
- Gitelson AA, Peng Y, Arkebauer TJ, Schepers J. 2014. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production. *Remote Sensing of Environment* **144**:65-72.
- Hanus J, Fabianek T, Kaplan V, Zemek F. 2013. Airborne imaging spectroscopy at Czechglobe-Potential, data processing and quality indicators. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* **2**:557-63.
- Herter ACh. 1985. The electromagnetic spectrum: A critical natural resource. *Natural resources* **651**.
- Hlisnikovský L, Vach M, Kunzová E, Abrham Z. Vliv aplikace hnojiv na produkci a ekonomiku silážní kukuřice. *Agritech* **20**:1-7.
- Hmimina G, et al. 2013. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: An investigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment* **132**:145-158.
- Chehbouni A, Huete AR, Kerr YH, Sorooshian S. 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index **126**:119-126.
- Jambor V, Ust'ak S, 2011: Vliv vybraných konzervačních přípravků na kvalitu siláže z kukuřice s vysokou a nízkou sušinou a na výtěžnost bioplynu. *Agritech science* **11**:1-9
- Janoušek J, Jambor V, Marcoň P, Dohnal P, Synková H, Fiala P. 2021. Using UAV-based photogrammetry to obtain correlation between the vegetation indices and chemical analysis of agricultural crops. *Remote Sensing* **13**:1-20.

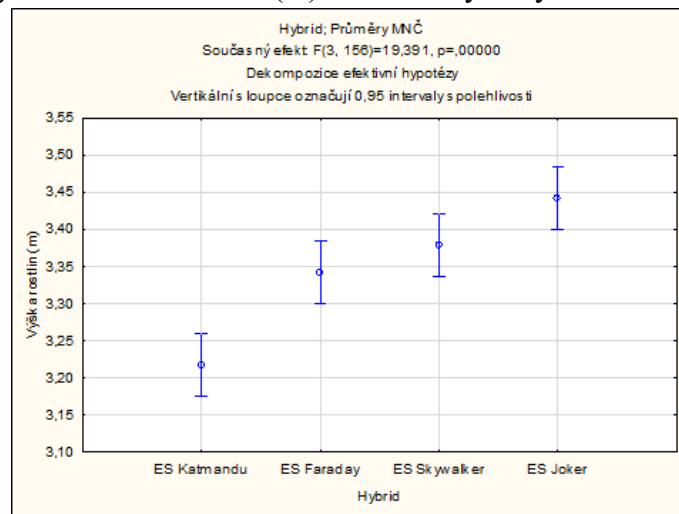
- Jiang Z, Huete AR, Chen J, Chen Y, Li, J, Yan, G, Zhang X. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* **101**:366-378.
- Jiang Z, Huete AR, Didan K, Miura T. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* **112**:3833-3845
- Jiraň M. 2015. Pěstování kukuřice pro energetické využití.
- Jorge J, Vallbé M, Soler JA. 2019. Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*. **52**:169-177.
- Kenderessy P. 2020. Using Unmanned Aerial Vehicles and Remote Sensing in Precision Agriculture. *Životné prostredie*, 2020. **54**:67-72.
- Klír J, Kunzová E, Čermák P. 2008. Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení. Výzkumný ústav rostlinné výroby. Praha.
- Kolektiv autorů 2014. Kukuřice: Sborník z mezinárodní konference pořádané k 95. výročí založení univerzity v Brně. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta a KWS Osiva. Brno.
- Kong Z, Mettler B. 2011. Evaluation of Guidance Performance in Urban Terrains for Different UAV Types and Performance Criteria Using Spatial CTG Maps. **61**:135-156.
- Lemcoff JH, Loomis RS. 1986. Nitrogen Influences on Yield Determination in Maize. *Crop Science* **26**: 1017-1022.
- Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. 2012. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Reviews* **115**:21-36.
- Major DJ, Baret F, Guyot G. 2007. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*. **11**: 727-740.
- Mkhabela MS, Mashinini NN. 2005. Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR **129**:1-9.
- Maňásek J. 2020. Precizní zemědělství a silážování. *Zemědělec* **47**:11.
- Maresma Á, Ariza M, Martínez E, Lloveras J, Martínez-Casasnovas JA. 2016. Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing* **8**:1-15.
- Neiff N, Dhliwayo T, Suarez EA, Burgueno J, Trachsel S. 2015. Using an Airborne Platform to Measure Canopy Temperature and NDVI under Heat Stress in Maize Using an Airborne

- Platform to Measure Canopy Temperature and NDVI under Heat Stress in. *Journal of Crop Improvement* **29**:669-690.
- Perbandt D, Fricke T, Wachendorf M. 2011. Off-nadir hyperspectral measurements in maize to predict dry matter yield, protein content and metabolisable energy in total biomass. *Precision Agriculture* **12**:249-265.
- Ping JL, Dobermann A. 2005. Processing of yield map data. *Precision Agriculture* **6**:193-212.
- Plessis J. 2003. Maize production. Resource Centre Directorate Agricultural Information Services **1**:1-38.
- Procházková E, Kincl D, Kabelka D, Vopravil J, Nerušil P, Menšík L, Barták V. 2020. The impact of the conservation tillage “maize into grass cover” on reducing the soil loss due to erosion. *Soil and Water Research* **15**:158-165.
- Ren H, Zhou G, Zhang F. 2018. Remote Sensing of Environment Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment* **209**:439-445.
- Rojas O. 2007. Operational maize yield model development and validation based on remote sensing and agro-meteorological data in Kenya. *International Journal of Remote Sensing* **28**:3775-3793.
- Rondeaux G, Steven M, Baret F. 1996. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices **107**:95-107.
- Sibley AM, Grassini P, Thomas NE, Cassman KG, Lobell DB. 2014. Testing Remote Sensing Approaches for Assessing Yield Variability among Maize Fields. *Agronomy Journal* **106**:24-32.
- Smolander S, Stenberg P. 2005. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies **94**:355-363.
- Tollenaar M, Bruulsema TW. 1988. Efficiency of Maize Dry Matter Production During Periods of Complete Leaf Area Expansion. *Agronomy Journal* **80**: 580-585.
- Tollenaar M, Dwyer LM. 1999. *Physiology of Maize*. Springer. Berlin.
- Tollenaar M, Lee EA. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research* **75**:161-169.
- Tyrolová Y. 2008. Metodika hodnocení hybridů kukuřice dlouhodobě testovaných v řepařské výrobní oblasti. VÚŽV. Uhřetěves.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press. Praha.

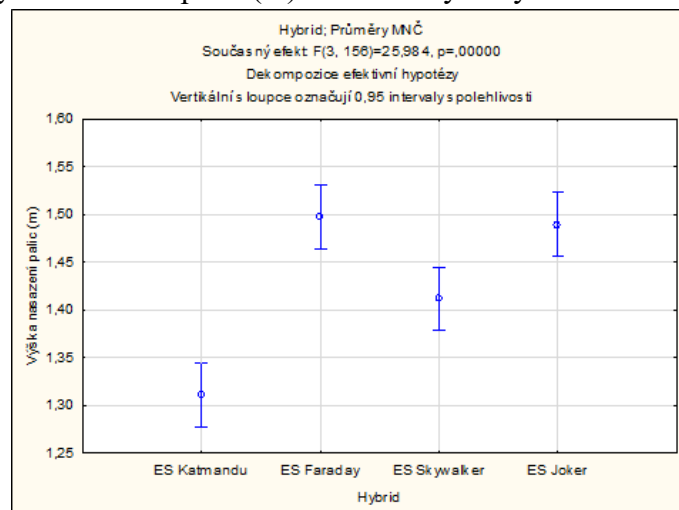
- Varsa EC, Chong SK, Abolaji JO, Farquhar DA, Olsen FJ. 1997. Tillage Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production **43**:219-228.
- Viña A, Gitelson AA, Rundquist DC, Keydan G, Leavitt B, Schepers J. 2004. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal* **96**:1139-1147.
- Walsh D, Hanan I. 2004. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36**:1-8
- Wang Q, Adiku S, Tenhunen J, Granier A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment* **94**:244-255.
- Weiss M, Jacob F, Duveiller G. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment* **236**:1-19.
- Xia J, Tang Z, Shi X, Fan L, Li H. 2011. An Environment Monitoring System for Precise Agriculture Based on Wireless Sensor Networks. *Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*.
- Xu, J, Meng J, Quackenbush LJ. 2019. Use of remote sensing to predict the optimal harvest date of corn. *Field Crops Research* **236**:1-13.
- Yang C. 2018. High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture **5**:393-405.
- Zheng G, Moskal LM. 2009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors **9**:2719-2745.
- Zimolka J. 2008. *Kukuřice: Hlavní užitkové směry*. Profi Press.

9 Samostatné přílohy

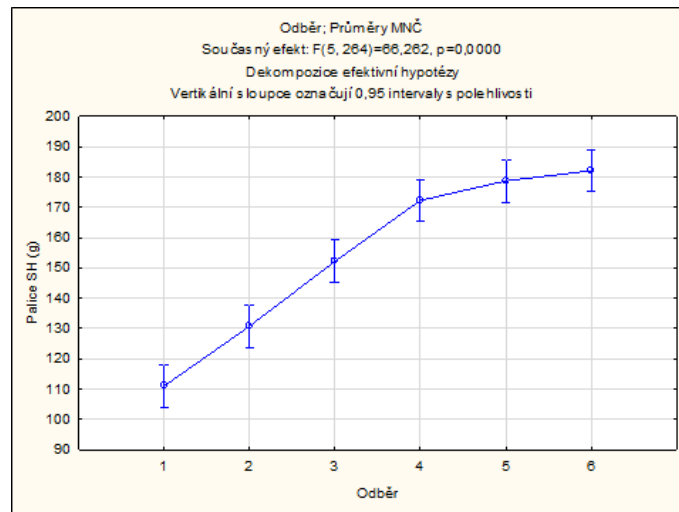
Přílohový graf 1: Výška rostlin kukuřice (m) u sledovaných hybridů kukuřice



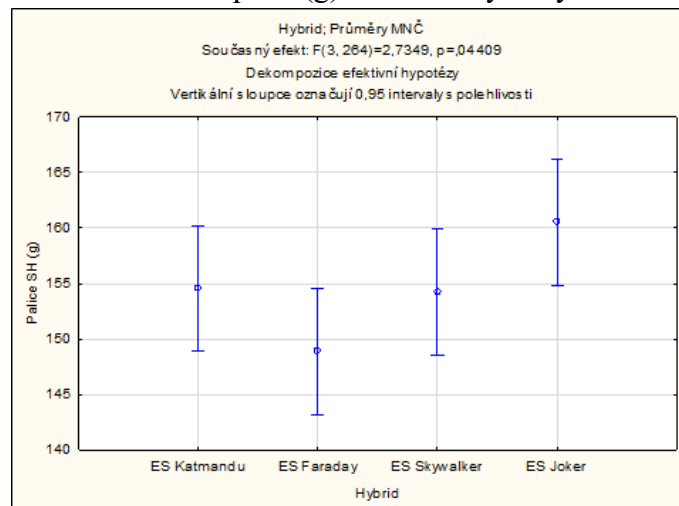
Přílohový graf 2: Výška nasazení palic (m) u sledovaných hybridů kukuřice



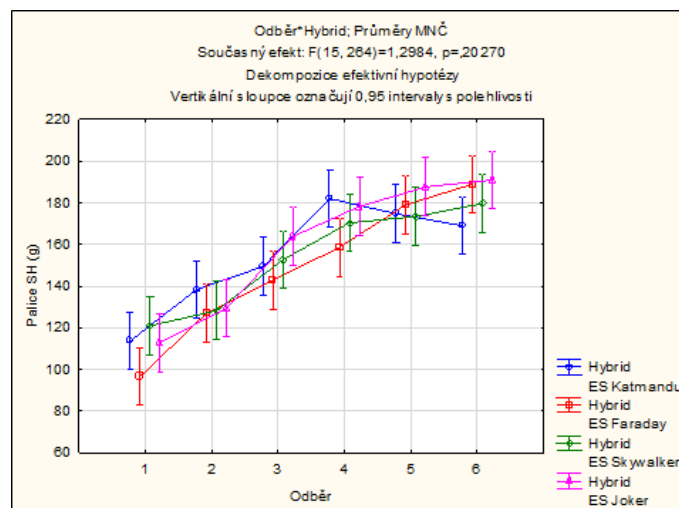
Přílohový graf 3: Vývoj hmotnosti palic (g) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



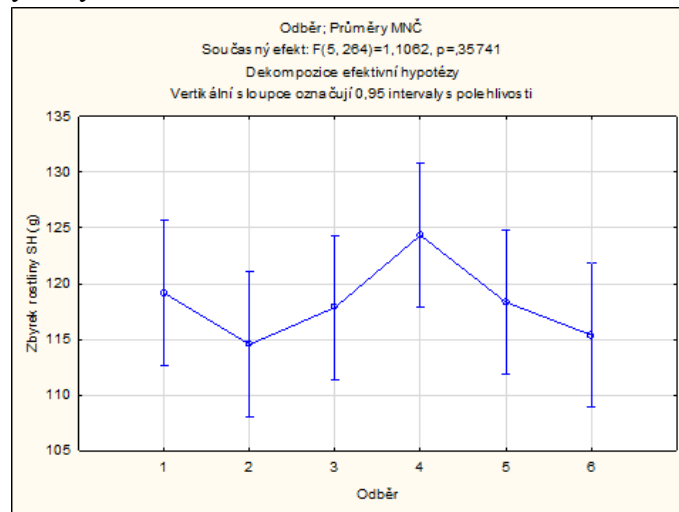
Přílohový graf 4: Průměrná hmotnost palic (g) u sledovaných hybridů kukuřice



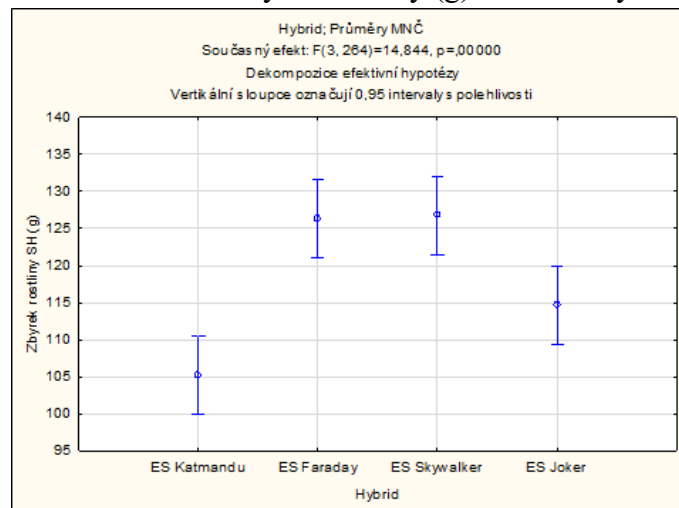
Přílohový graf 5: Vývoj hmotnosti palic (g) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



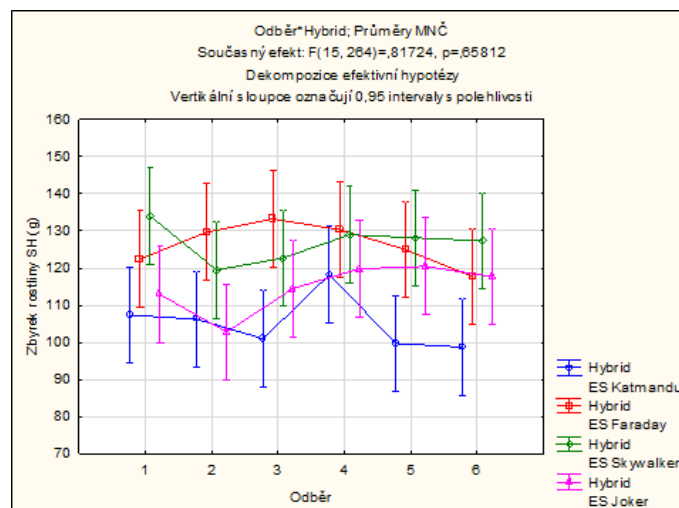
Přílohový graf 6: Vývoj hmotnosti zbytku rostliny (g) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



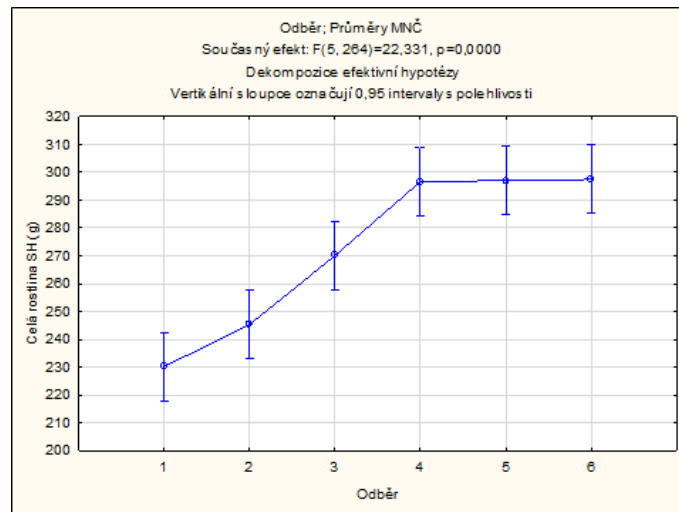
Přílohový graf 7: Průměrná hmotnost zbytku rostliny (g) u sledovaných hybridů kukuřice



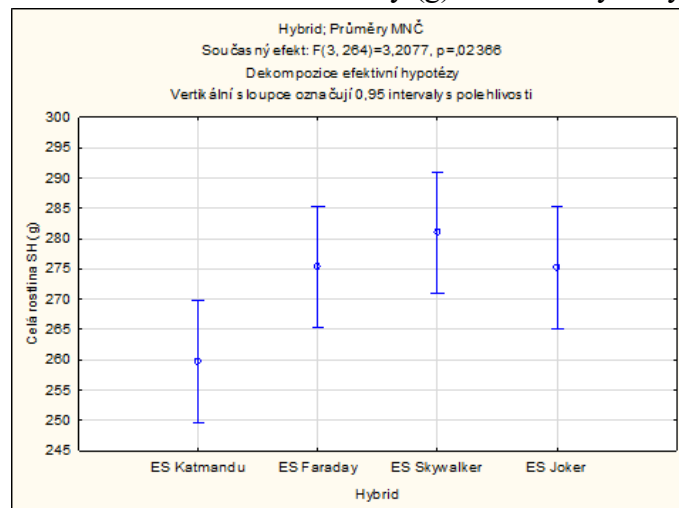
Přílohový graf 8: Vývoj hmotnosti zbytku rostliny (g) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



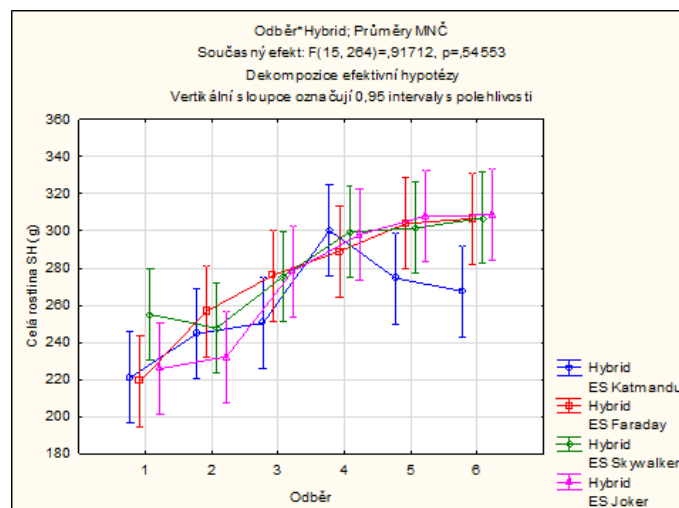
Přílohový graf 9: Vývoj hmotnosti celé rostliny (g) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



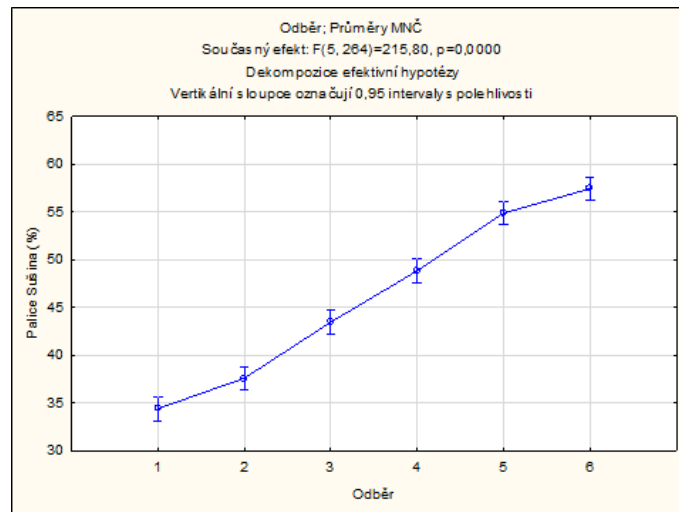
Přílohový graf 10: Průměrná hmotnost celé rostliny (g) u sledovaných hybridů kukuřice



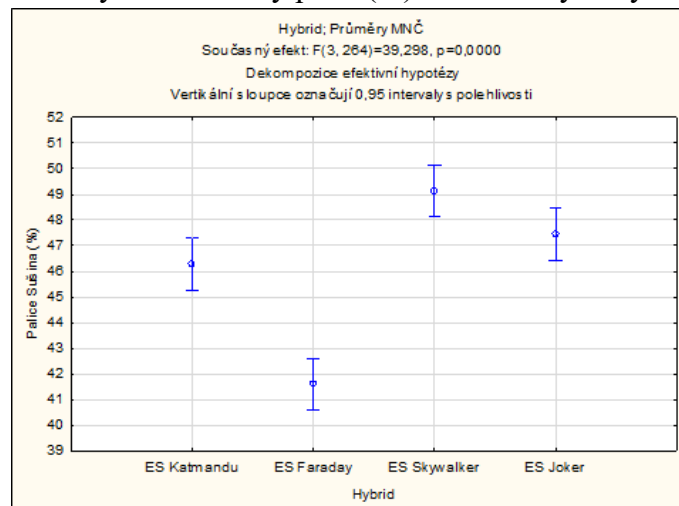
Přílohový graf 11: Vývoj hmotnosti celé rostliny (g) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



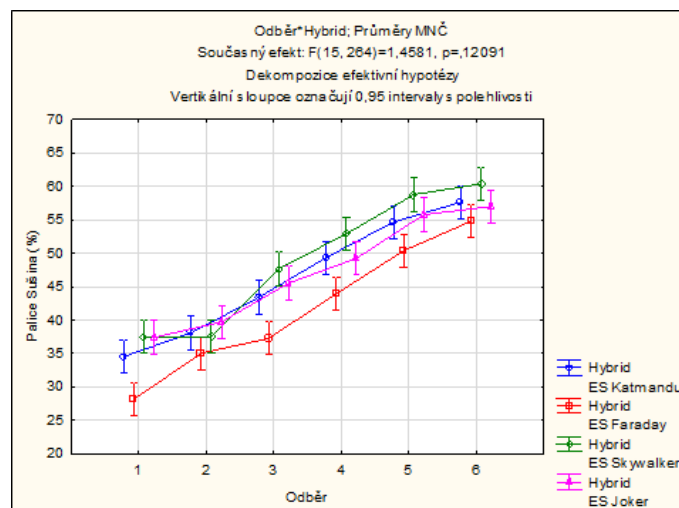
Přílohový graf 12: Vývoj obsahu sušiny palic (%) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



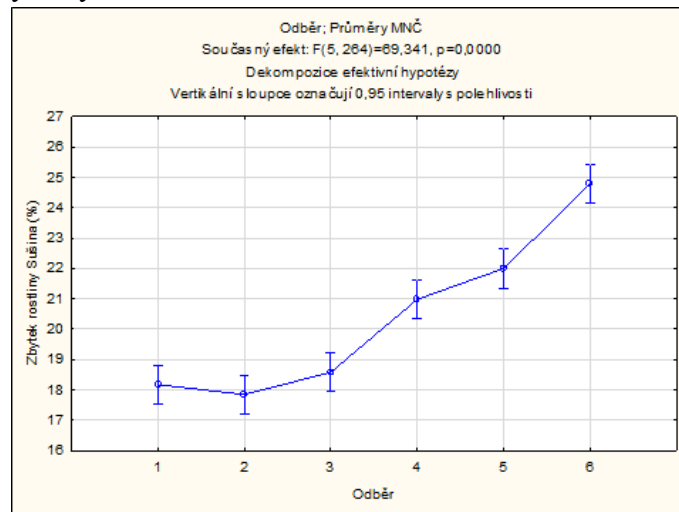
Přílohový graf 13: Průměrný obsah sušiny palic (%) u sledovaných hybridů kukuřice



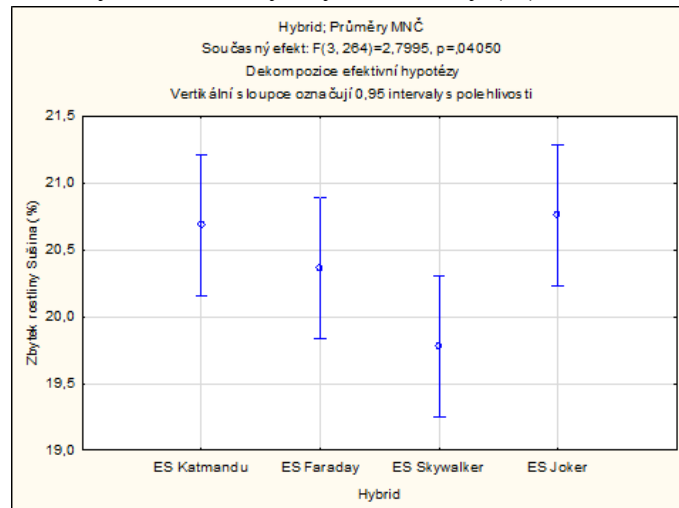
Přílohový graf 14: Vývoj obsahu sušiny palic (%) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



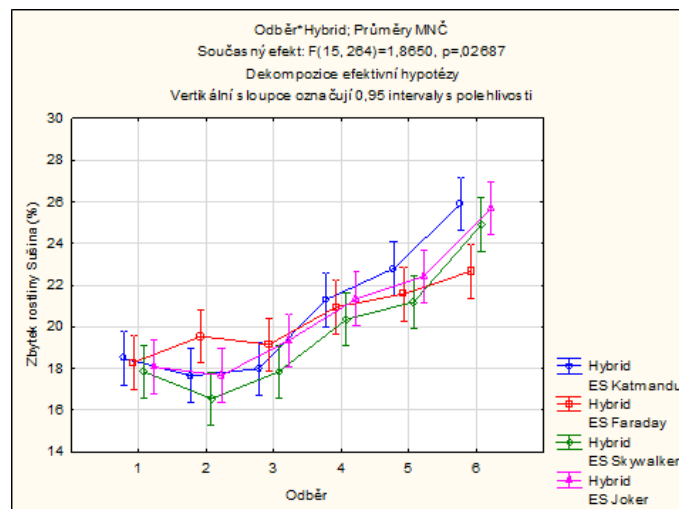
Přílohový graf 15: Vývoj obsahu sušiny zbytku rostliny (%) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



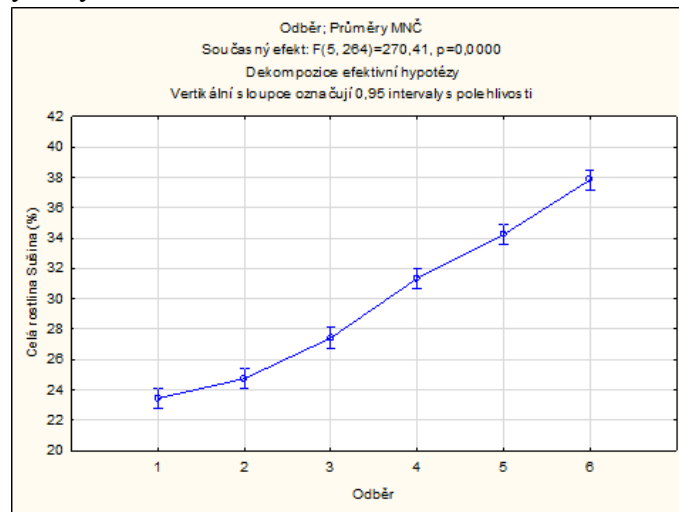
Přílohový graf 16: Průměrný obsah sušiny zbytku rostliny (%) u sledovaných hybridů kukuřice



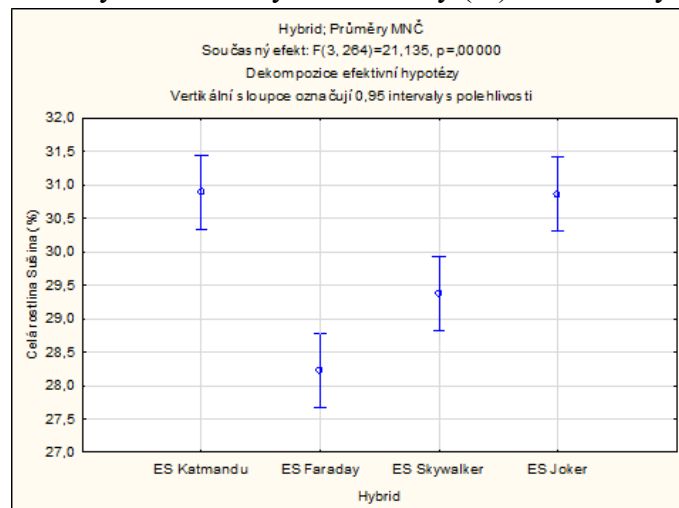
Přílohový graf 17: Vývoj obsahu sušiny zbytku rostliny (%) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



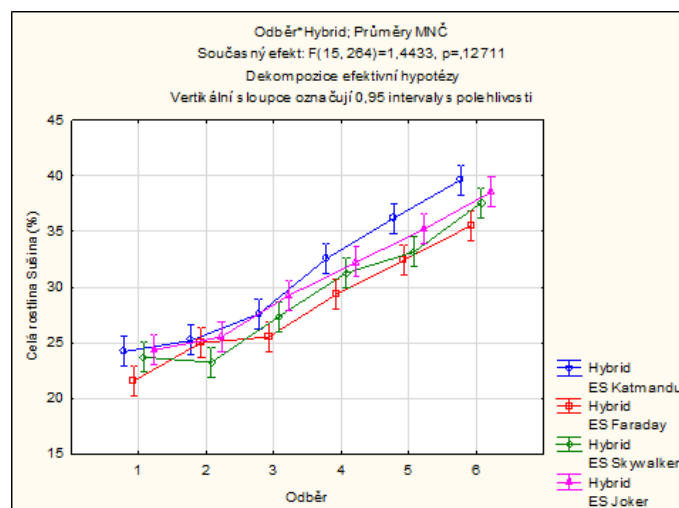
Přílohový graf 18: Vývoj obsahu sušiny celé rostliny (%) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



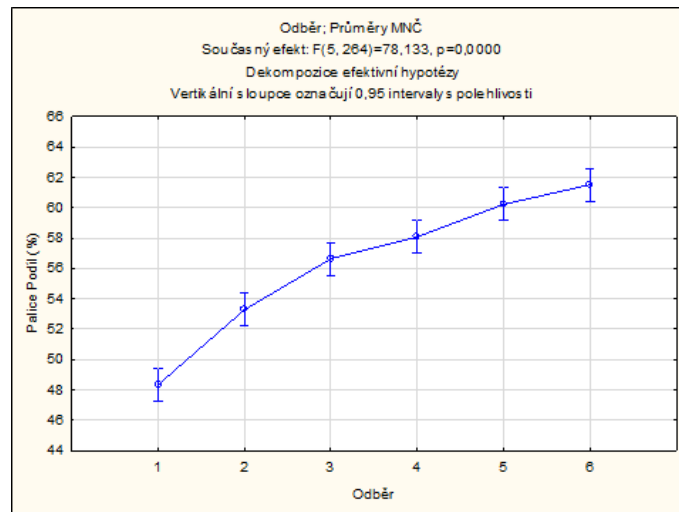
Přílohový graf 19: Průměrný obsah sušiny celé rostliny (%) u sledovaných hybridů kukuřice



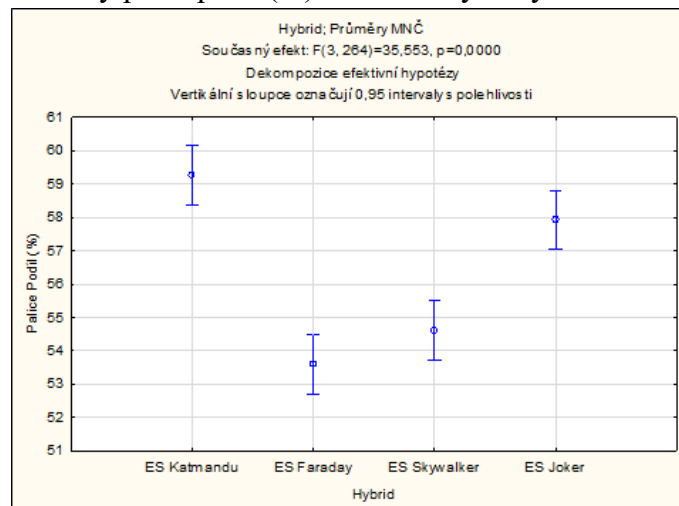
Přílohový graf 20: Vývoj obsahu sušiny celé rostliny (%) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



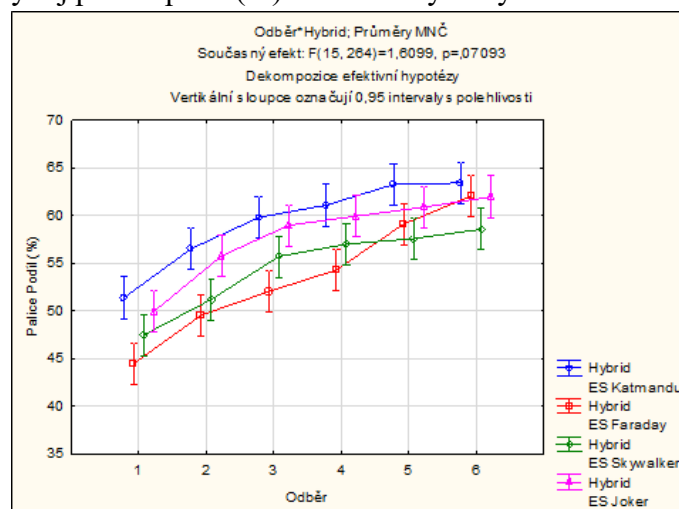
Přílohový graf 21: Vývoj podílu palic (%) v průběhu vegetace v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



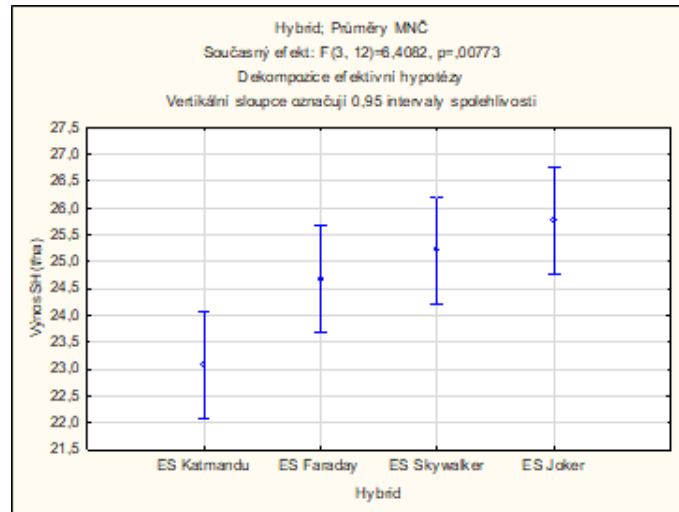
Přílohový graf 22: Průměrný podíl palic (%) u sledovaných hybridů kukuřice



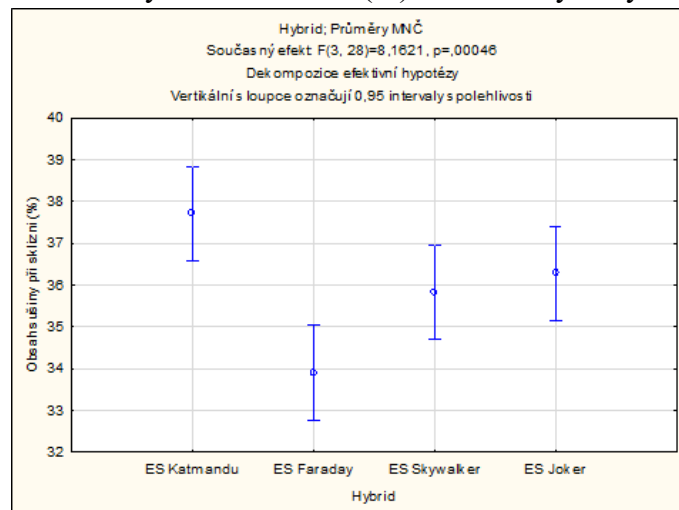
Přílohový graf 23: Vývoj podílu palic (%) u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



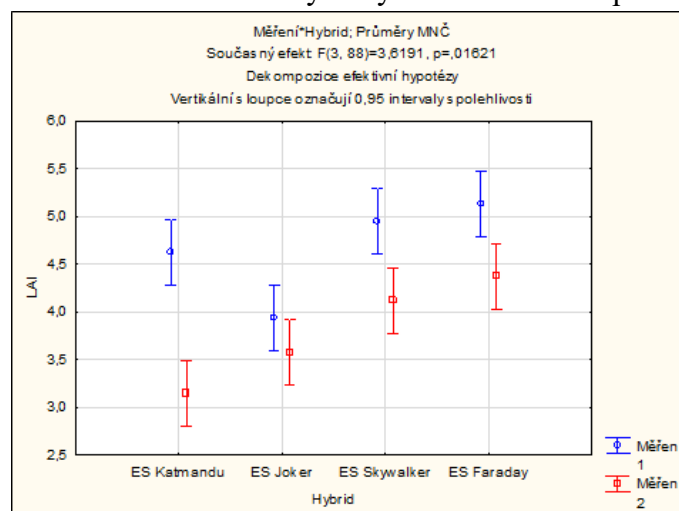
Přílohový graf 24: Výnos sušiny (t/ha) u sledovaných hybridů kukuřice



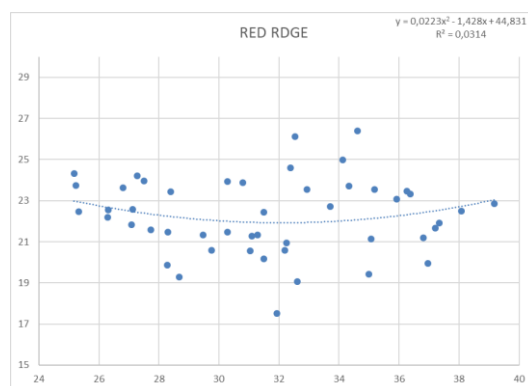
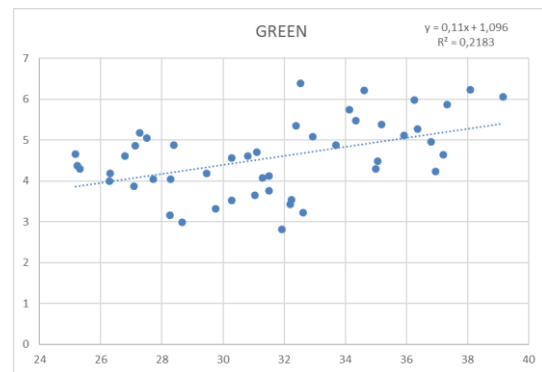
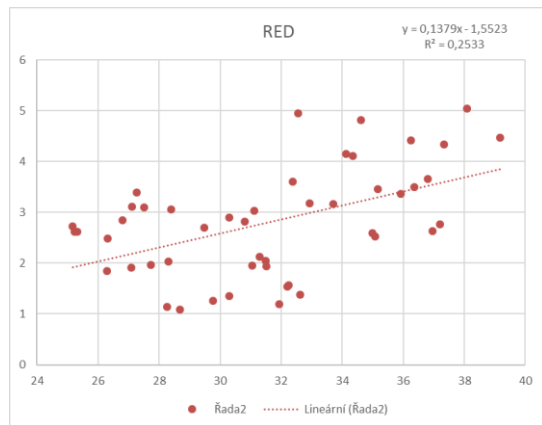
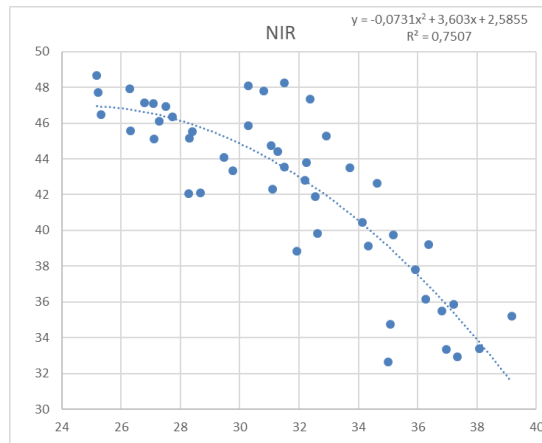
Přílohový graf 25: Obsah sušiny v době sklizně (%) u sledovaných hybridů kukuřice



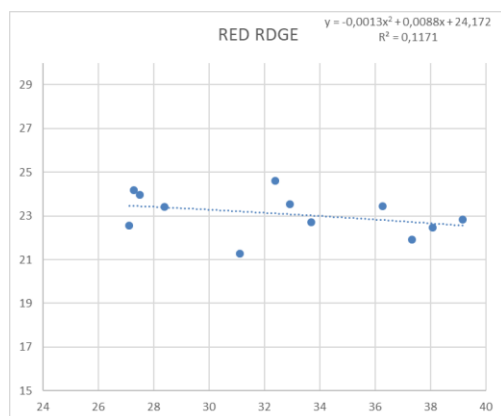
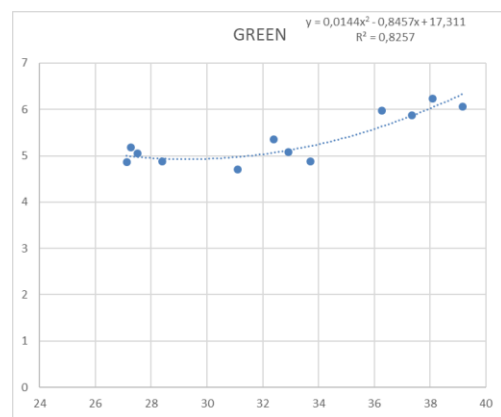
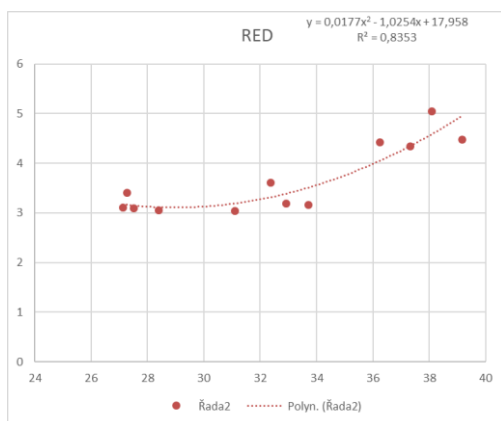
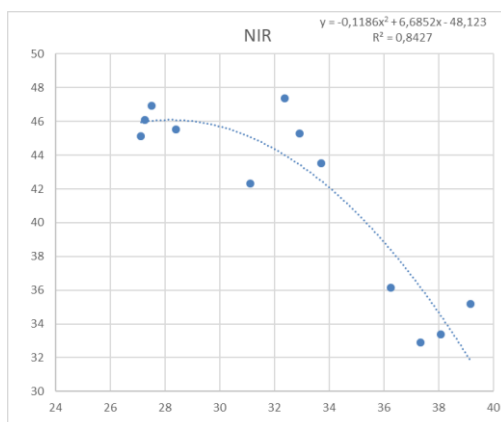
Přílohový graf 26: Hodnota LAI u sledovaných hybridů kukuřice v průběhu vegetace



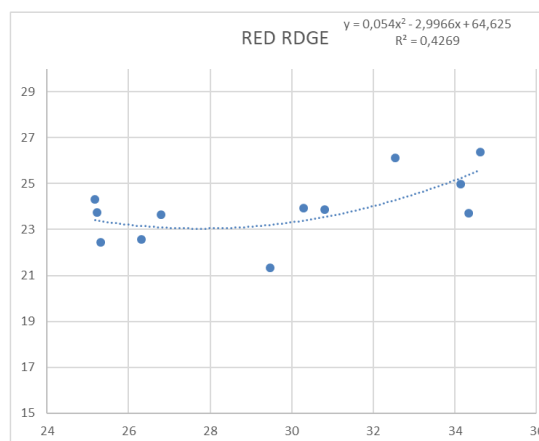
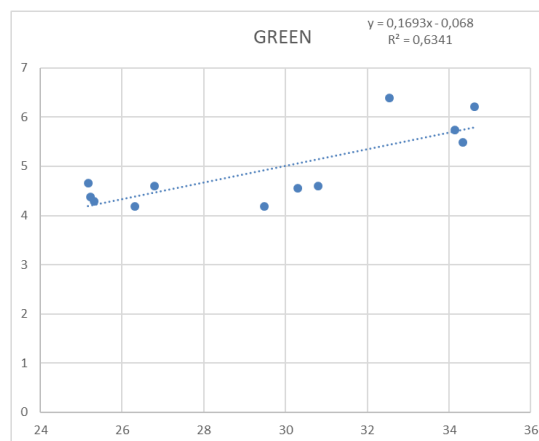
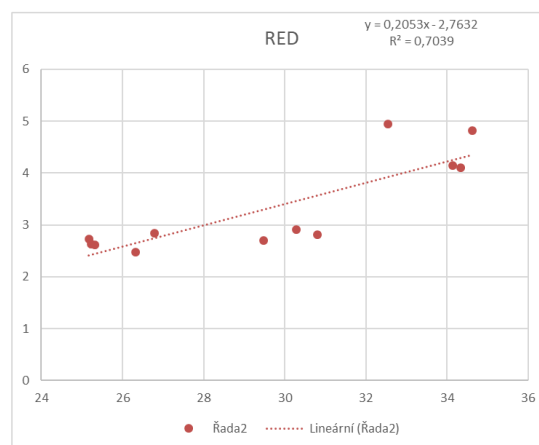
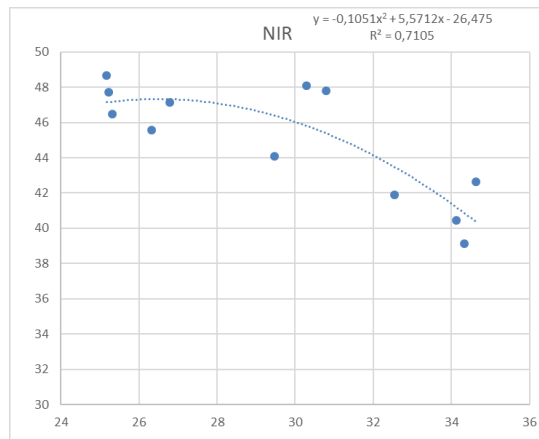
Přílohové grafy 27-30: Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny v průměru za všechny sledované hybridy kukuřice



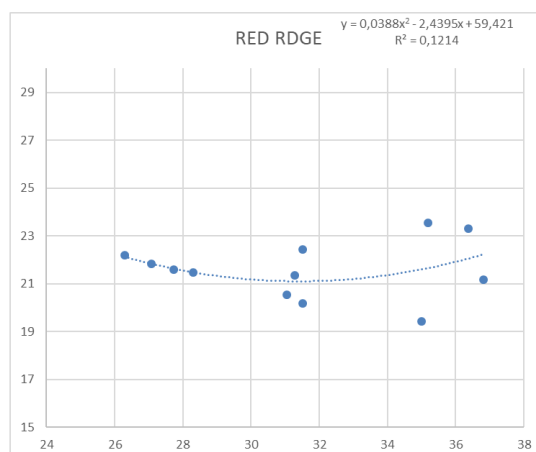
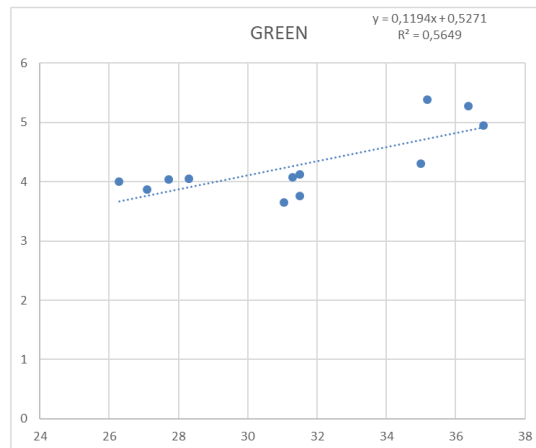
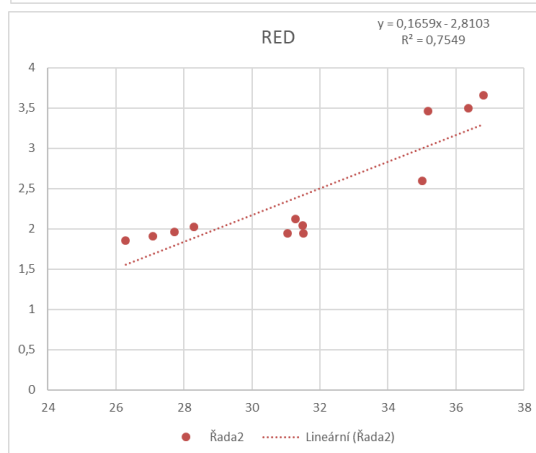
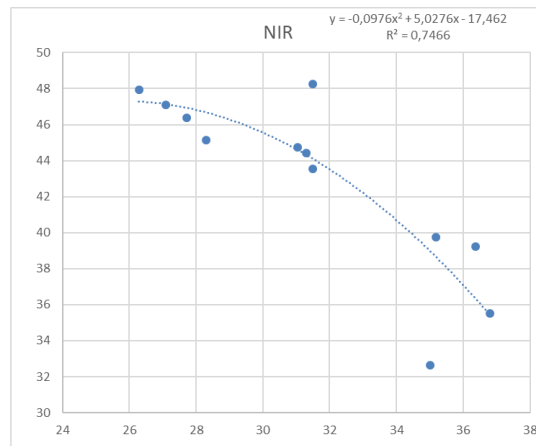
Přílohové grafy 31-34: Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u hybridu ES Katmandu



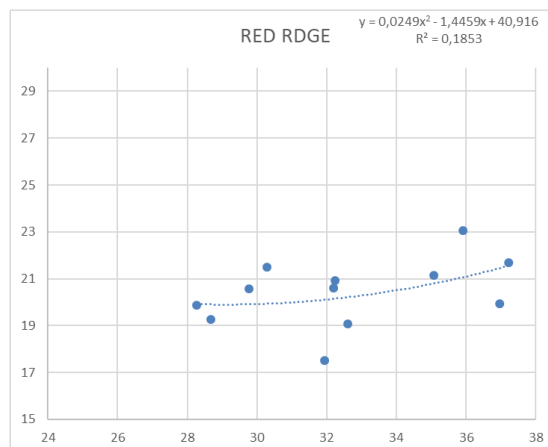
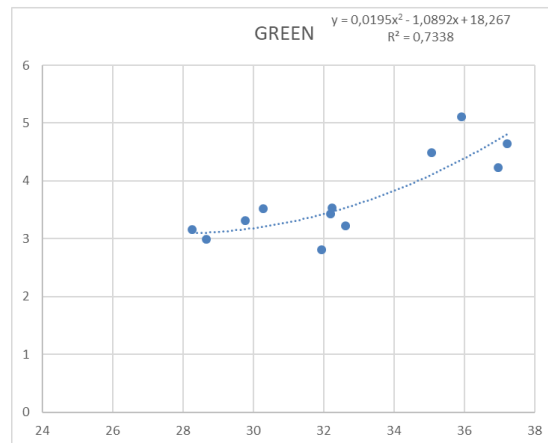
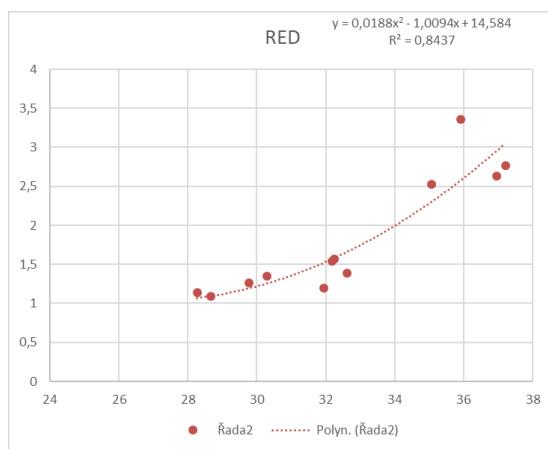
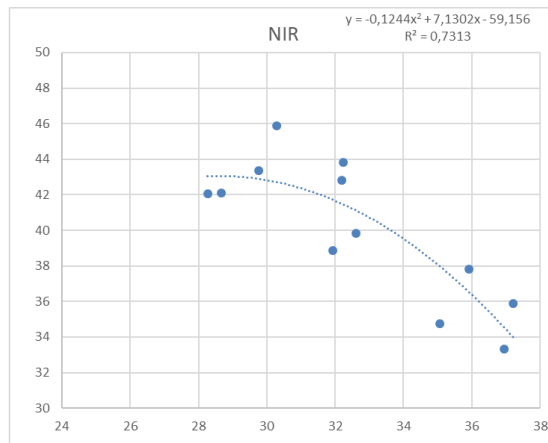
Přílohové grafy 35-38: Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u hybridu ES Faraday



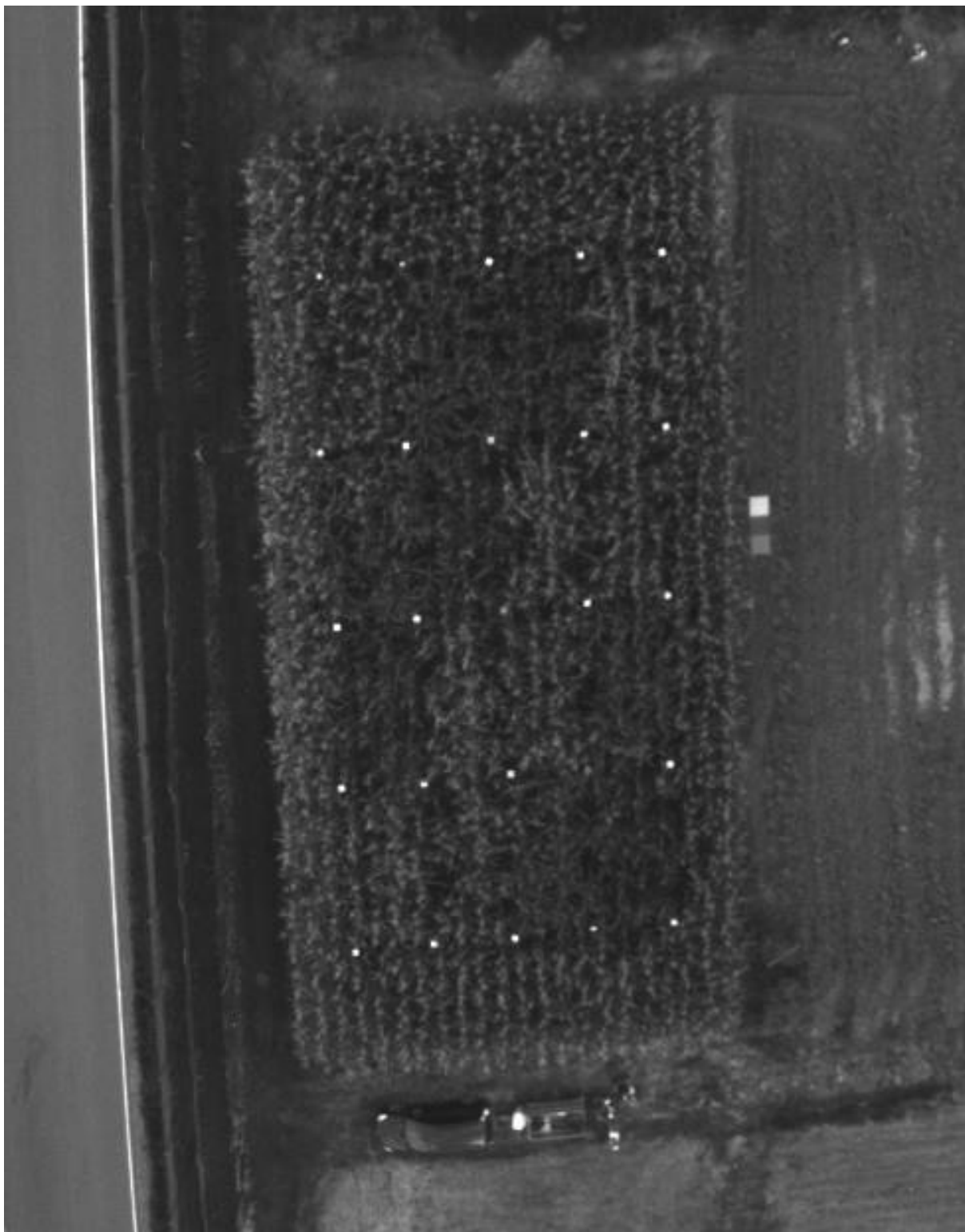
Přílohové grafy 39-42: Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u hybridu ES Skywalker



Přílohové grafy 43-46: Závislost hodnot spektrální odrazivosti na hodnotě sušiny u hybridu ES Joker



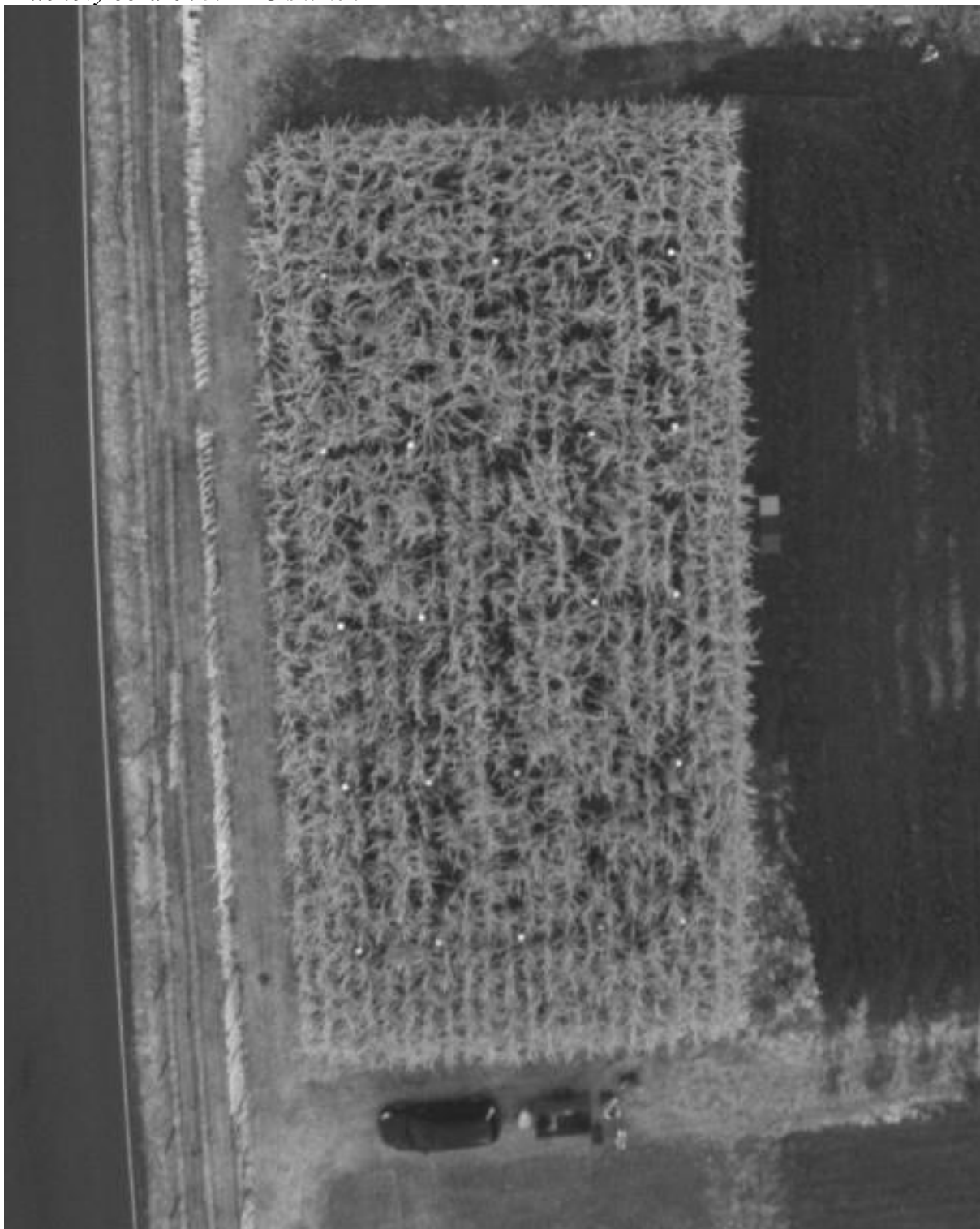
Přílohový obrázek 1: Snímek z oblasti červeného spektra záření



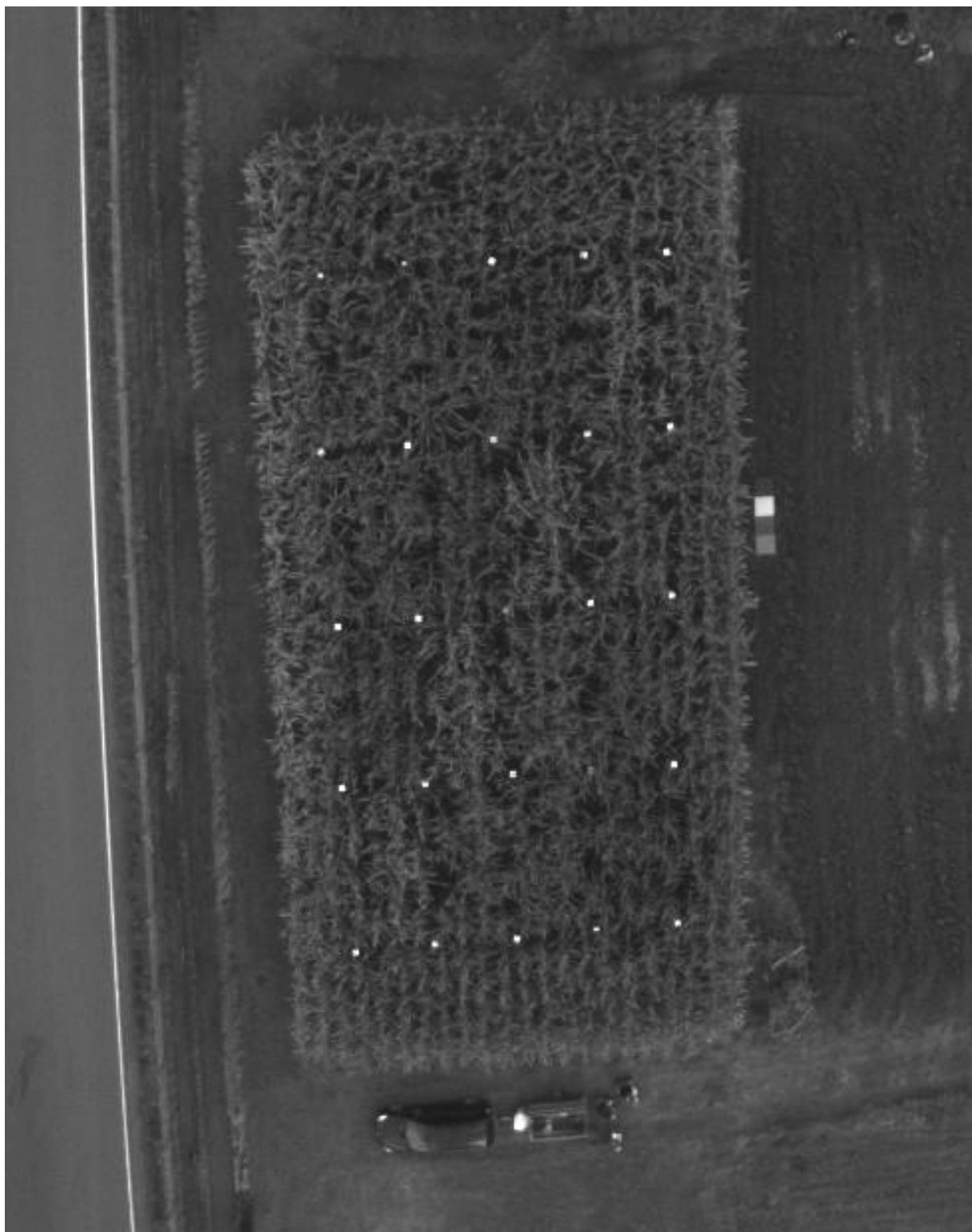
Přílohový obrázek 2: RGB snímek



Přílohový obrázek 3: REG snímek



Přílohový obrázek 4: Snímek ze zeleného spektra



Přílohový obrázek 5: Snímek z NIR spektra

