

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů



Diplomová práce

**Podpora rozhodovacích procesů v rostlinné
výrobě na základě monitoringu pozemků**

Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D.

Autor práce: Bc. Aleš Tříška

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Aleš Tříška

Zemědělské inženýrství
Zemědělská technika

Název práce

Podpora rozhodovacích procesů v rostlinné výrobě na základě monitoringu pozemků

Název anglicky

Support of decision-making processes in crop production based on land monitoring

Cíle práce

Hypotéza: „Efektivita výroby vede přes sběr a využití datových podkladů“.

Na základě monitoringu porostů navrhnou a přijmou opatření pro variabilní zásahy, které náležitě podpoří využití moderních technických prvků strojů.

Metodika

Zpracování literární rešerše na téma sběru dat, dálkového průzkumu Země, telematiky a Smart Farming.

Sběr dat s využitím bezpilotních prostředků a analýza snímků.

Hodnocení variability pozemků na základě terénního průzkumu.

Návrhy vhodných agrotechnických opatření v souladu s technickými možnostmi aplikační techniky.

Zpracování dat a ekonomické zhodnocení opatření.

Diskuse výsledků a závěr.

Doporučený rozsah práce

50 až 60 stran včetně tabulek, obrázků a grafů

Klíčová slova

UAV; sběr dat; variabilní aplikace

Doporučené zdroje informací

- BRANT, V. – KROULÍK, M. – KRČEK, V. – KRÁSA, J. – KAPIČKA, J. – HAMOUZ, P. – LUKÁŠ, J. – ZÁBRANSKÝ, P. – ŠKEŘÍKOVÁ, M. – ŠKEŘÍK, J. – JOB, Z. – LANG, J. – LANG, J. – PETRUS, D. Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby. České Budějovice: Kurent, s.r.o., 2020, 284s. ISBN 978-80-87111-81-9.
- HEEGE, H J. Precision in crop farming : site specific concepts and sensing methods: applications and results. Dordrecht: Springer, 2013. ISBN 978-94-007-6759-1.
- KROULÍK, M. – BRANT, V. – ZÁBRANSKÝ, P. – ŠKEŘÍKOVÁ, M. Implementace navigačních technologií a aplikací s podporou GPS. 2019, Praha: Agrární komora České republiky, 56 s. ISBN: 978-80-88351-04-7.
- ZHANG, Q. Precision agriculture technology for crop farming. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 9781482251081.

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zemědělských strojů

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2021

prof. Dr. Ing. František Kumhála

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 16. 02. 2021

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci "Podpora rozhodovacích procesů v rostlinné výrobě na základě monitoringu pozemků" vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Milana Kroulíka, Ph.D. Veškeré použité prameny, které cituji, jsem uvedl v seznamu informačních pramenů a použité literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Milanu Kroulíkovi, Ph.D. za odborné konzultace, cenné rady a připomínky, které mi poskytl v průběhu psaní této práce. Zároveň bych rád poděkoval své rodině a přátelům za jejich podporu během mého studia.

Podpora rozhodovacích procesů v rostlinné výrobě na základě monitoringu pozemků

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá tématem podpory rozhodovacích procesů v rostlinné výrobě na základě monitoringu pozemků. Teoretická část práce se věnuje definicím základních pojmů a jejich souvislostí. Je charakterizována variabilita v rámci pozemků a proč je její znalost důležitá. Dále jsou uvedeny možnosti a příklady mapování této variability se zvláštní pozorností věnovanou bezpilotním prostředkům a optickým sensorům. Zmíněno je také zapojení mechanizace a robotů v procesu monitoringu pozemků.

V praktické části je pomocí snímků z bezpilotního prostředku analyzováno napadení porostu řepky hrabošem polním. Pomocí vegetačního indexu NDVI je vytvořena aplikační mapa. Dále jsou zpracována data sklízecí řezačky pořízená při sklizni kukuřice na siláž. Porovnána je kvalita siláže v závislosti na výšce strniště. V závěru práce je zhodnocení a diskuse.

Klíčová slova: monitoring; dálkový průzkum země; bezpilotní systém; vegetační index; půdní vzorkování

Support of decision-making processes in crop production based on land monitoring

Abstract:

This diploma thesis deals with the topic of support of decision-making processes in crop production based on land monitoring. The theoretical portion of this thesis focuses on basic terms and their context. Variability of field conditions is characterized, and importance of its knowledge is emphasized. Following are possibilities and examples of mapping this variability with special attention given to the usage of unmanned aircraft and optical sensors. The involvement of agricultural mechanization and robots in land monitoring is also mentioned.

In practical part of this thesis, damage of rapeseed field done by field voles is examined via the use of drone imaging. Using the NDVI vegetation index, an application map is created. Furthermore, data from harvester obtained during the harvest of corn silage is analyzed. Quality of silage with relation to stubble height is compared. The conclusion consists of evaluation and discussion.

Keywords: monitoring; remote sensing; unmanned aircraft system; vegetation index; soil sampling

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíle a metodika práce	2
2.1 Cíle práce	2
2.2 Metodika	2
3 Precizní zemědělství a Smart farming	3
3.1 Variabilita půdy v rámci půdního bloku	5
3.2 Variabilita porostů	7
4 Dálkový průzkum Země	8
4.1 Odrazivost vegetace, půdy a vody	9
4.2 Dostupné prostředky	12
4.2.1 Družice.....	12
4.2.2 Bezpilotní systémy	14
4.3 Vegetační indexy	17
4.3.1 Jednoduchý poměrový index RVI.....	18
4.3.2 Normalizovaný diferenční vegetační index NDVI.....	19
4.3.3 Plodinový vodní stresový index CWSI	20
4.3.4 Půdě přizpůsobený vegetační index SAVI	23
4.3.5 Vylepšený vegetační index EVI a EVI2.....	25
5 Terénní průzkum	28
5.1 Nepřímé metody pozemního sběru dat	30
5.2 Zapojení moderní mechanizace	31
5.2.1 Optické senzory	33
5.3 Využití robotů	34
6 Návrhy vhodných agrotechnických opatření v souladu s technickými možnostmi aplikační techniky	36
6.1 Variabilní ošetření porostu na základě monitoringu.....	36
6.1.1 Metodika.....	36
6.1.2 Parrot Disco-Pro AG	39
6.1.3 Naměřená data	39
6.1.4 Zhodnocení	42
6.2 Variabilní výška strniště při sklizni kukuřice na siláž	45
6.2.1 Metodika.....	45
6.2.2 HarvestLab.....	46
6.2.3 Naměřená data	46
6.2.4 Zhodnocení	52
7 Závěr	53
8 Seznam informačních pramenů a použité literatury	54

Seznam obrázků

Obrázek 1: Slučování pozemků. Situace v roce 1953 a v roce 2000.....	6
Obrázek 2: Oblasti různé pravděpodobnosti výskytu vegetace detekované indexem NDVI.....	9
Obrázek 3: Spektrální chování vegetace, půdy a vody ve vybrané části elektromagnetického záření (400–2500 nm).....	11
Obrázek 4: Infografika povinných a nezbytných úkonů pro provoz dronů od 31.12.2020.....	15
Obrázek 5: Hexakoptéra DJI Matrice 600 osazená termokamerou Wiris využívaná KZS TF ČZU	17
Obrázek 6: NDVI pokusných pozemků s dvaceti čtyřmi kultivary pšenice (po dvou v každé zóně s rozdílnou dávkou dusíku).....	20
Obrázek 7: Termální snímek sadu olivovníků zobrazený v indexu CWSI	22
Obrázek 8: Časový vývoj indexu SAVI v sezónách 2013 (a), 2014 (b), 2015 (c) a 2016 (d)..	24
Obrázek 9: Porovnání vegetačních indexů EVI, EVI2 a NDVI	26
Obrázek 10: Vliv hustoty a stylu rozmístění (schéma) vzorkování pH půdy na pozemku o rozloze 52 ha. (EC... elektrická vodivost půdy; DPZ... dálkový průzkum Země; ESAP-RSSD... program pro optimalizaci odběrových bodů)	29
Obrázek 11: Přehled komerčně užívaných půdních senzorů a jejich uplatnění	30
Obrázek 14: Ukázka letového plánu nad pozemkem 6601/4 a částí pozemku 6601/6	37
Obrázek 15: Snímek porostu řepky na pozemku 6601/6 v nepravých barvách pořízený bezpilotním prostředkem Parrot Disco-Pro AG	38
Obrázek 16: Detail ukazující míru poškození. Přiložené měřítko dokládá velikost poškozených ploch	38
Obrázek 17: Parrot Disco-Pro AG, který využívá KZS TF ČZU.....	39
Obrázek 18: Vegetační index NDVI pozemku 6601/6.....	40
Obrázek 19: Polygon s ohraničenými ohnisky poškození.....	41
Obrázek 20: Postřikovač John Deere R4150i během selektivního ošetření porostu.....	42
Obrázek 21: Záznam z aplikace v rozhraní Field Analyzer	42
Obrázek 22: Mapa výnosového potenciálu pozemku 3309/7.....	46
Obrázek 23: Dráhy pohybu sklízecí rezačky John Deere 9600i spolu s měřenými body a vyznačená oblast variabilní výšky strniště	47
Obrázek 24: Detail oblasti s variabilní výškou strniště	48

Seznam grafů

Graf 1: Závislost obsahu škrobu na výnosovém potenciálu	49
Graf 2: Závislost obsahu škrobu na výnosovém potenciálu při různých výškách strniště	49
Graf 3: Závislost obsahu Acido detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu	50
Graf 4: Závislost obsahu Acido detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu při různých výškách strniště.....	50
Graf 5: Závislost obsahu Neutrálně detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu	51
Graf 6: Závislost obsahu Neutrálně detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu při různých výškách strniště.....	51

Seznam tabulek

Tabulka 1: Výběr družic využívaných pro dálkový průzkum a jejich základní údaje. (MS... multispektrální senzor; HS... hyperspektrální senzor; T... termální senzor; Pan... panchromatický senzor).....	14
Tabulka 2: Vybrané přípravky chemické ochrany řepky olejky	43
Tabulka 3: Vybraná hnojiva pro řepku olejku.....	44

Seznam použitých zkratek

<u>Zkratka</u>	<u>Význam</u>
DPZ	Dálkový průzkum Země
UAS	Bezpilotní systém
UA	Bezpilotní letadlo
UGV	Bezosádkové pozemní vozidlo
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
EU	Evropská unie
VIS	Viditelné spektrum
IR	Infračervené záření
NIR	Blízké infračervené záření
MIR	Střední infračervené záření
FIR	Vzdálené infračervené záření
GPS	Globální polohový systém
RTK	Kinematické měření v reálném čase
PPK	Kinematické měření s následným zpracováním
RVI	Jednoduchý poměrový index
NDVI	Normalizovaný diferenční vegetační index
CWSI	Plodinový vodní stresový index
SAVI	Půdě přizpůsobený vegetační index
EVI	Vylepšený vegetační index
CARI	Chlorofylový absorpční index
MODIS	Spektroradiometr se středním rozlišením

1 Úvod

Zemědělství je oborem, který se potýká s úbytkem pracovní síly a klesající výměrou zemědělsky využívané půdy, zároveň jsou kladeny požadavky na navyšování produkce potravin, vlivem stále rostoucí lidské populace. Současně je tu ekologická stránka volající po minimalizaci dopadů produkce na životní prostředí. To a řada dalších faktorů pohání zemědělství ke změnám technologií a zdokonalování způsobů hospodaření.

Jedním ze způsobů, jak splnit tyto požadavky, je změna přístupu k hospodaření na nevyrovnaných pozemcích z celoplošně uniformního na lokálně cílený. Tento přístup je také znám jako precizní zemědělství. Precizní zemědělství skrze zjištěnou variabilitu upravuje pěstební zásahy tak, aby bylo optimalizováno využití materiálních vstupů a zároveň maximalizován výnos. Vzhledem k proměnlivosti v prostoru i čase je vhodné monitorování agronomicky významných ukazatelů během celé sezóny.

Kombinací moderních komunikačních a informačních technologií a precizního zemědělství vzniká tzv. smart farming. Tyto moderní technologie umožňují sběr a zpracování velkého množství dat, což umožňuje monitoring pozemků v měřítku jednotlivých rostlin. Zásahy konané na základě získaných dat jsou tak efektivní a zároveň úsporné.

Pro účely monitorování jsou dnes s výhodou používány prostředky dálkového průzkumu Země. Mezi ně patří i bezpilotní prostředky, které mají pro tyto účely velký potenciál. Díky schopnosti nést nejrůznější sensorové vybavení v kombinaci s nízkou letovou výškou poskytují data s vysokým spektrálním i prostorovým rozlišením. Právě spektrální data jsou v posledních letech stále více využívána pro svůj nedestruktivní a vypovídající charakter. Tato data je možné využít nejen k identifikaci vegetace, ale také k monitorování jejího stavu.

První část této práce je zaměřena na různé možnosti získávání informací o variabilitě, které jsou v současné době k dispozici, se zaměřením na příklady využití bezpilotních prostředků. Ve druhé části budou zpracovány snímky z bezpilotního prostředku pořízené v rámci monitoringu porostu řepky poškozeného hrabošem polním. Snímky budou následně zpracovány do podoby aplikační mapy pro variabilní zásahy. Dále budou zpracována data sklízecí rezačky získaná během sklizně kukuřice na siláž. Z dat bude analyzován vliv výšky strniště na kvalitu siláže ve vztahu k výnosovému potenciálu.

2 Cíle a metodika práce

2.1 Cíle práce

Hypotéza: „Efektivita výroby vede přes sběr a využití datových podkladů.“

Cílem práce je seznámení s problematikou variability pozemků a možnostmi jejího zjišťování formou literární rešerše. Uvedeny budou současné technologie a metody využívané k monitoringu pozemků se zaměřením na bezpilotní prostředky a optické senzory.

Dalším cílem práce je na základě monitoringu porostů navrhnout a přijmout opatření pro variabilní zásahy, které náležitě podpoří využití moderních technických prvků strojů.

2.2 Metodika

Teoretická část práce bude zpracována formou literární rešerše na téma precizního zemědělství, smart farming, sběru dat, dálkového průzkumu Země a telematiky. V praktické části budou zpracovány snímky porostu řepky, která byla napadena hrabošem polním. Snímky pořízené bezpilotním prostředkem budou použity k tvorbě aplikační mapy pro postřikovač. Zhodnocena bude úspora při variabilním zásahu oproti celoplošnému. Dále budou zpracována data sklízecí rezačky John Deere pořízená při sklizni kukuřice na siláž. Zhodnocen bude vliv výšky strniště na kvalitu siláže.

3 Precizní zemědělství a Smart farming

Dosud převládající celoplošně uniformní přístup k obhospodařovaným plochám, který uvažuje tyto plochy jako homogenní celky, sebou může nést řadu negativních dopadů. Není-li pozemek homogenní nebo homogenitě blízký, může v rámci tohoto přístupu docházet například k nevhodnému dávkování hnojiv nebo pesticidů, či špatnému hospodaření s vodou. To může mít negativní dopady nejen na výnosy, ale také na životní prostředí. (Heege, 2013; Lukas et al., 2011)

Tam, kde není uplatňován celoplošně uniformní přístup, jsou uplatňovány lokální znalosti a zkušenosti zemědělců, které byly sbírány za celou dobu existence a užívání daného pozemku. Znalosti půdy, počasí sezónního i stálého charakteru, ale i výnosů z minulých sklizní, jsou brány při hospodaření v potaz. Tento způsob je z hlediska hospodaření s danými prostředky a zdroji výhodnější. Precizní zemědělství je možné brát jako moderní verzi tohoto přístupu, která nutně nevyžaduje zkušenosti získané na pozemku časem a předávané z generace na generaci, ale má potenciál je upravit a doplnit využitím moderních technologií. (Levy, 2017)

Precizní zemědělství, také označované jako „lokálně cílené hospodaření“, je způsob hospodaření založený na lokalizaci a identifikaci heterogenity pozemku a upravení pěstebních operací na základě zjištěných informací. Precizní zemědělství respektuje přirozenou variabilitu krajinného prostoru a je základem pro trvalé zemědělské využívání krajiny za snížení negativních dopadů činnosti a zlepšení hospodaření se zdroji. Tento způsob přístupu k rostlinné a živočišné výrobě zaznamenal největší rozmach s rapidním vývojem výpočetní techniky. Ta umožnila zpracování velkého množství dat i z velkých pozemků, což by bylo do té doby náročné a nerentabilní. (Lukas et al., 2011, Brant et al., 2020)

Zásadou precizního zemědělství je tedy aplikace znalostí variability stavu porostu a vlastností půdy ve formě provádění potřebných zásahů na správném místě a ve správný čas. Cílem je přizpůsobit pěstební operace zjištěným podmínkám. Hlavním elementem podpory rozhodovacích procesů je detailní monitoring, včasná signalizace problémů a tvorba modelů, což umožňuje optimalizaci vstupů dle jejich skutečné potřeby. Z obhospodařované plochy tak dostáváme jistou formu zpětné vazby, která nám umožňuje včas reagovat na změny, ať už žádoucí či nežádoucí. (Lukas et al., 2011; Mulla, 2013; Brant et al., 2020)

Smart farming je možno považovat za další stupeň technologie precizního zemědělství. Zatímco precizní zemědělství je technologií na bázi zpětné vazby od obhospodařované plochy, podle které se řídí zásahy, smart farming klade důraz na zavádění informačních a komunikačních technologií. (Wolfert et al., 2017)

Dnešní úroveň informačních a komunikačních technologií umožňuje vytvořením sítě senzorů téměř nepřetržité sledování obhospodařovaného prostoru. Zároveň jsou mapovány souvislosti mezi stavem plodin, půdy i zvířat a jejich potřebami produkčních vstupů, jako jsou voda, hnojiva a pesticidy. Díky těmto znalostem se spotřeba těchto vstupů snižuje na míru nepřekračující maximální potřeby, stejně tak jako tomu je u precizního zemědělství. (Walter et al., 2017)

Smart farming integruje do jednoho systému veškeré aspekty spojené se zemědělskou výrobou: agronomii, nákupy, logistiku, skladování, údržbu zařízení, řízení lidských zdrojů, marketing atd. (Brant et al., 2020). Smart farming sleduje také využití techniky a umožňuje maximalizovat efektivitu jejího nasazení. Užívá k tomu širokou řadu techniky ke sběru dat, ať už se jedná o senzory umístěné přímo na traktorech a sklízecích strojích, nebo o senzory umístěné na robotech či bezpilotních prostředcích. (Levy, 2017)

Celkově vývoj směřuje k digitalizaci výrobních procesů, vytváření databází spojujících informační hladiny z více zdrojů a k vytváření algoritmů, které by vycházely z naměřených dat a nahrazovaly tradiční formu rozhodování založenou na zkušenostech farmáře. Informační technologie také umožní propojení zemědělství s širokým okruhem dalších oborů. Detailní monitoring, tvorba modelů a predikce umožní mnohem snadněji aplikovat zásady precizního zemědělství a dále je rozvíjet. (Brant et al., 2020) Jak uvádí Brant et al., (2020) tyto vývojové směry jsou realizovány telematickým sběrem dat, vzdálenými uložišti, tříděním a správou dat a možnostmi vzdáleného přístupu.

Dalším přínosem smart farmingu je, že umožňuje zemědělcům pěstovat plodiny, se kterými nemají zkušenosti s vyšší efektivitou, díky přístupu do rozsáhlých databází sdílených informací, do kterých by přispíval větší počet podniků. To by mohlo přinést větší různorodost do osevních postupů. Další myšlenou budoucí výhodou má být možnost zákazníka nahlédnout do procesů, které stály za produktem, o který má zájem. Právě kontrola kvality a původu potravin, stále více skloňované téma, digitalizaci a smart farming podporuje. (Brant et al., 2020; Walter et al., 2017)

3.1 Variabilita půdy v rámci půdního bloku

Půdní blok je zákonem č.252/1997 definován jako základní jednotka evidence půdy o minimální výměře 0,01 ha. Dle tohoto zákona půdní blok představuje souvislou plochu zřetelně v terénu oddělené (lesním porostem, zpevněnou cestou, pozemní komunikací, vodním útvarem atd.) zemědělsky obhospodařované půdy, souvislou vodní plochu využívanou pro účely chovu ryb, vodních živočichů a pěstování rostlin ve vodním útvaru povrchových vod, pro účely provozování rybářství, nebo souvislou plochu zalesněné půdy. (Zákon č. 252/1997 Sb.)

Brant et al., 2020 uvádějí, že půdní blok lze chápat jako základní klasifikační jednotku hodnocení v precizním zemědělství z hlediska optimalizace agrotechnických opatření. V rámci půdního bloku lze hodnotit celou řadu měřených a kalkulovaných parametrů, na jejichž základě je možno optimalizovat prováděné zemědělské operace. Variabilita těchto parametrů v rámci daného bloku je přitom primární informací. Variabilita může být chápána jak v prostorovém, tak i v časovém směru. Sledované parametry se tedy mohou měnit nejen v prostoru (včetně hloubky), ale také v čase vlivem různých lidských nebo přírodních příčin.

Parametry zemědělsky využívaných půdních bloků, stejně tak jako jejich prostorové rozmístění jsou dány nejen historickým vývojem krajiny a vlastnických vztahů, ale odráží také vývoj systémů a přístupů k hospodaření. Zásadní roli přitom hraje vývoj mechanizačních prostředků. (Brant et al., 2018) Jak uvádí Brant et al. (2020), umístění půdního bloku v krajinném prostoru často nerespektuje historii vývoje krajiny a na ní vázaných ekosystémů. Dochází nejen ke spojování heterogenních částí krajinného prostoru, ale také naopak k záborům zemědělské půdy pro nezemědělské využití (například výstavbou pozemních komunikací). Od roku 1948 docházelo v České republice k nárůstu výměry půdních bloků a slučování pozemků bez přihlížení k přirozené variabilitě krajinného prostoru (viz obrázek 1). V pozdějších letech byl tento trend veden hlavně nárůstem výkonu tažných prostředků a s ním spojený nárůst pracovních záběrů zemědělských strojů. V posledních letech vyvolávají změny v přístupu k půdním blokům hlavně legislativní opatření spojená se systémem ochrany půdy, která obsahují například protierozní vyhlášky zaměřené na ochranu půdy proti vodní erozi (Vyhláška č. 240/2021 Sb., 2021), a systémy dotací, které v povinných požadavcích na hospodaření například upravují velikost souvislé plochy jedné plodiny na 30 ha (Státní zemědělský intervenční fond, 2021). Tyto neustálé změny tvarových a velikostních parametrů vedou také ke zvyšující se variabilitě půdních podmínek v rámci půdních bloků. Variabilita půdních

vlastností určuje hraniční podmínky pro pěstování polních plodin. (Brant et al., 2018; Brant et al., 2020)

Obrázek 1: Slučování pozemků. Situace v roce 1953 a v roce 2000



Zdroj: Kroulík

Jak uvádí Lukas et al. (2011) půdní mapy jsou jedním ze základních zdrojů informací o variabilitě půdy. O tom, jak moc jsou informace z těchto map využitelné, rozhoduje hlavně jejich aktuálnost, dostupnost v digitální podobě a úroveň detailů. Kromě map mohou být k identifikaci příčin heterogenity pozemků využity také údaje o jejich užívání. Tyto údaje lze získat z Registru půdy (LPIS) a z katastru nemovitostí (KN). Oba tyto zdroje jsou dostupné na internetu v rámci Portálu farmáře. (Lukas et al., 2011)

Mezi ty vlastnosti, které jsou z hlediska zemědělství podstatné, můžeme zařadit například množství obsažené vody a její potenciál, vlhkost půdy, utužení nebo obsah živin (Heuvelink a Webster, 2001; Mulla, 2012; Brant et al., 2020). Řada půdních vlastností se ale v čase mění tak pomalu, že je z praktického hlediska lze považovat za neměnné. Například zrnitostní složení, u kterého jsou podstatné změny v průběhu dekad nepravděpodobné, ovšem v horizontu milénií již nemůžeme neměnnost předpokládat. (Heuvelink a Webster, 2001)

Pro úplné zmapování vlastností půdy je třeba zavádět modely a uspokojit se s vědomím, že žádný z těchto modelů nebude nikdy úplný. Kvůli proměnlivosti půdních vlastností dává

mapování s konečným počtem měřených míst jen neúplný obrázek. Mezi těmito místy je třeba zavádět odhady a aproximace v závislosti na použitém modelu. (Heuvelink a Webster, 2001)

3.2 Variabilita porostů

Variabilita porostů je oproti variabilitě půdy mnohem více proměnlivá, a to jak v prostoru, tak v čase. Vzhledem k vysoké časové proměnlivosti variability je třeba její mapování provádět i několikrát za vegetační období. Jak uvádí Lukas et al. (2011) k variabilitě přispívají nejen půdní podmínky a jejich vlastní heterogenita, ale také rozdílná intenzita obhospodařování (nevhodné zakládání porostů, hnojení či aplikace pesticidů), zaplevelení, škůdci, choroby a další stresové faktory. Mezi nejvíce významné vlastnosti porostu patří jeho hustota, výživný stav rostlin, zaplevelení a poškození. (Lukas et al., 2011)

Monitoring nežádoucích změn dává zemědělcům možnosti zasáhnout včas a ve správném rozsahu, což zefektivňuje využívání materiálových vstupů. To je základním předpokladem precizního zemědělství. (Lukas et al., 2017)

Do tradičních metod zjišťování variability vlastností porostu řadíme, podobně jako u mapování půdních vlastností, odběr a laboratorní analýzu vzorků rostlinného materiálu, avšak vzhledem k požadavkům na mapování jsou více využívány nepřímé senzorové metody. Nepřímé metody poskytují vyšší plošnou výkonnost, časové rozlišení i nižší náklady. Významnou roli v mapování pozemků hraje dálkový průzkum Země. (Lukas et al., 2011; Lukas et al., 2017)

4 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) se řadí mezi geoinformační technologie, které umožňují sbírat informace o objektech či zemském povrchu prostřednictvím dat získaných bezkontaktními metodami. Jádrem DPZ je přenos informací pomocí elektromagnetického záření. Vzájemné působení elektromagnetického záření s přírodními a jinými povrchy, stejně tak jako s atmosférou, závisí hlavně na frekvenci jeho vln. Tímto vzájemným působením dochází ke změnám v odraženém záření, které jsou měřitelné a ze kterých je možno získat o daných objektech informace. Zdrojem tohoto záření je při pasivní podobě dálkového průzkumu Slunce nebo Země. Je-li zdroj záření umělého charakteru, je DPZ označován jako aktivní. (Halounová a Pavelka, 2008)

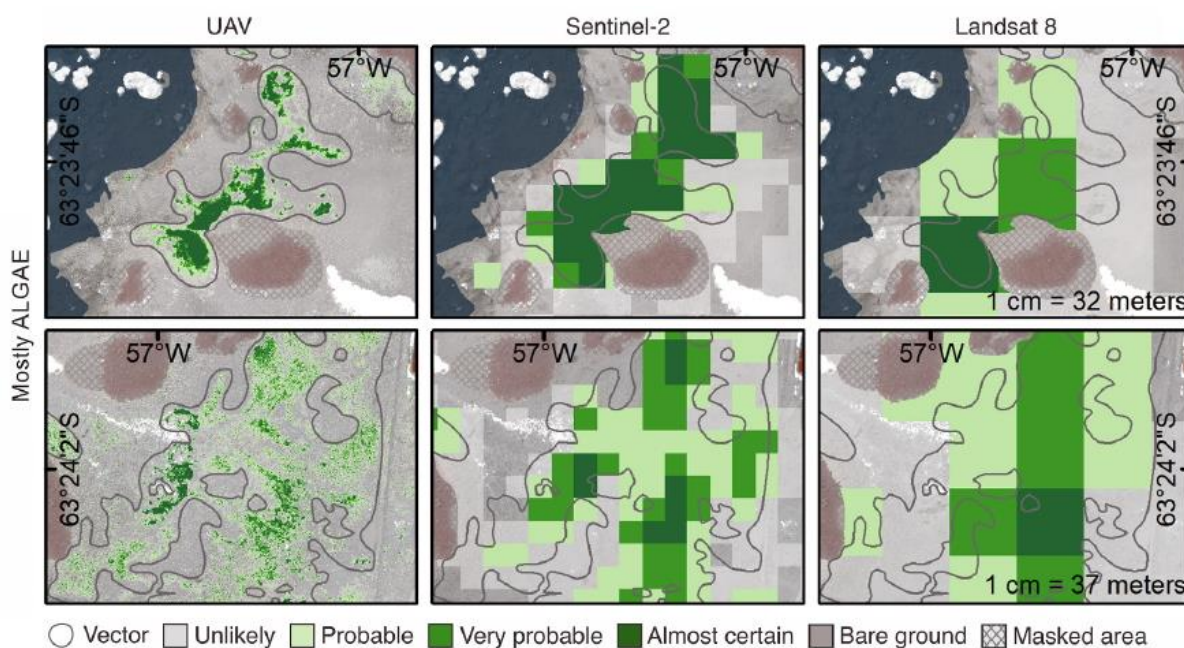
Hlavní předností dálkového průzkumu je vysoká plošná výkonnost. Pro dálkový průzkum je specifické využití leteckého a družicového snímkování. Nevýhodou těchto prostředků z hlediska využití v oblasti zemědělství je však nutnost využití specializovaných služeb a časová prodleva mezi měřením, zpracováním dat a jejich aplikací. V posledních letech se k leteckým a družicovým prostředkům přidává i snímkování pomocí bezpilotních systémů (UAS). Ty mohou poskytovat snímky pomocí konvenčních i multispektrálních kamer s mnohem vyšším prostorovým rozlišením, což je pro účely moderního precizního zemědělství klíčové. (Hengl, 2006; Lukas et al., 2011)

Lukas et al. (2017) vyzdvihuje významnou roli dálkového průzkumu Země v precizním zemědělství jako nástroje pro identifikaci variability. Analýzou multispektrálních dat je možno získat informace o vlastnostech půdy či vegetace, což je hlavním důvodem rozšíření DPZ do oblasti zemědělství. K analýze těchto dat je používána odrazová spektroskopie, která posuzuje odrazivost různých částí spektra od objektů a povrchů. (Mulla, 2013) Na multispektrálních snímcích, které obsahují jak viditelné pásmo, tak i blízké infračervené pásmo, je možné rozlišovat i stav vegetace, neboť rostliny vykazují specifickou odrazivost v jednotlivých pásmech elektromagnetického záření, která je ovlivněná jejich stavem. Je tedy možno rozlišit zdravou vegetaci od vegetace trpící stresem, který může způsobovat nedostatečná výživa, vodní stres, napadení škůdci nebo chorobami. (Lukas et al., 2011)

Dobrym porovnáním kvality snímků pořízených pomocí satelitů a snímků pořízených pomocí UAS je studie Sotille et al. (2020). Ti chtěli nalézt vhodné řešení sledování šíření vegetace v oblasti Hope Bay na špicí Antarktického poloostrova. Tento rozmach vegetace je

spojen se změnami podnebí v regionu, které jsou způsobovány globálními změnami klimatu (Turner et al., 2014). Sotille et al. (2020) použili k identifikaci vegetace ve sledovaných oblastech satelity Sentinel-2 a Landsat 8 a bezpilotní letoun eBee vybavený GPS systémem a barevno-infačervenou kamerou Canon S110 NIR. Velkou roli hrálo prostorové rozlišení jednotlivých prostředků. Zatímco vysoké rozlišení kamery a relativně nízká letová hladina UAS nabízela prostorové rozlišení téměř 5 cm, prostorové rozlišení satelitu Sentinelu-2 bylo 10 m, a u Landsatu 8 30 m pro vybraná pásma. Pro detekci vegetace byl vybrán vegetační index NDVI pracující s červeným a blízkým infračerveným pásmem. Oblasti byly rozčleněny podle pravděpodobnosti výskytu vegetace (viz obrázek 2).

Obrázek 2: Oblasti různé pravděpodobnosti výskytu vegetace detekované indexem NDVI



Zdroj: (Sotille et al., 2020), upravil Tríska

4.1 Odrazivost vegetace, půdy a vody

Získ informací pomocí DPZ je založen na analýze změn elektromagnetického záření. Tyto změny nastávají vzájemným působením s okolím, atmosférou a povrchem, na který záření dopadá a od kterého je odraženo (nebo pohlceno). Tzv. odrazivost je rozdílná pro půdu, vegetační pokryv i vodu. Tyto povrchy odráží (popř. vyzařují) elektromagnetické záření s rozdílnou intenzitou, čehož využívají při měření optické senzory. Odrazivost je závislá na řadě faktorů, mezi které patří chemické složení sledovaného objektu (hmoty), interakce

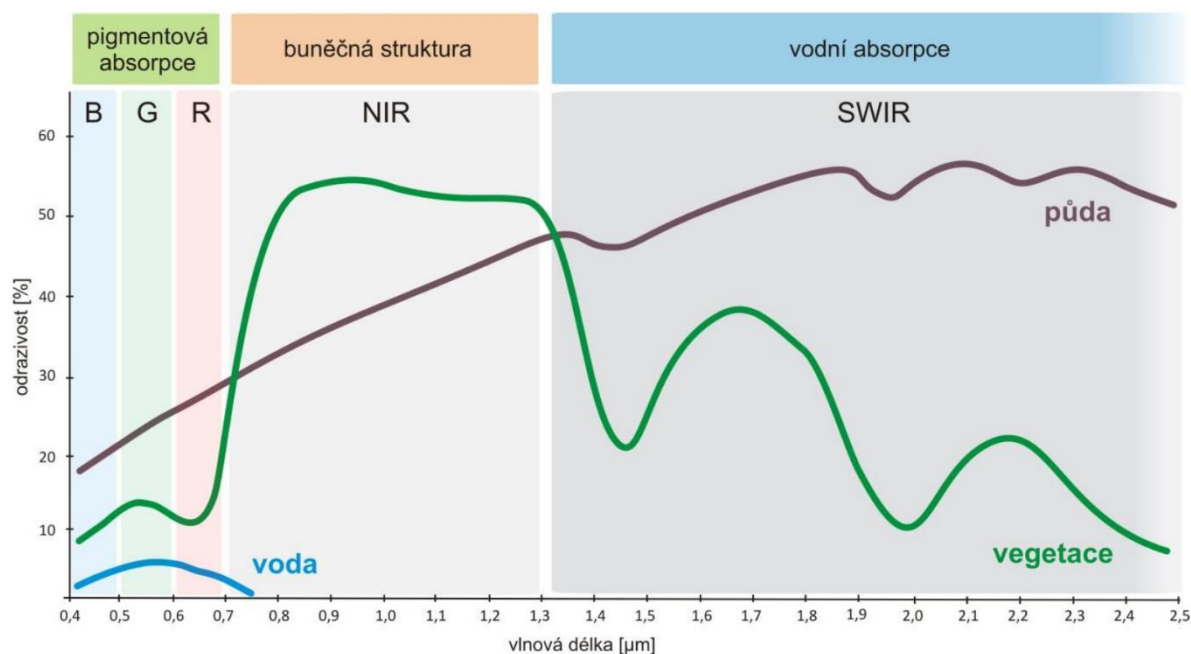
s atmosférou, ale také druh rostlin a jejich stav. Tato skutečnost je pro relevantnost využití DPZ v zemědělství klíčová. (Brant et al., 2020, Halounová a Pavelka, 2008)

Průchod atmosférou ovlivňuje záření změnou jeho směru, rychlosti, ale i intenzity a spektrálního složení (část záření může být atmosférou pohlcena). Mechanické znečištění v atmosféře pohlcuje viditelnou část spektra, zatímco na absorpci infračervené části má největší vliv vodní pára a plyny. Sběr dat je zúžen na ty části spektra, které atmosférou prochází ovlivněny jen minimálně – tzv. atmosférická okna. Pro snímání vybraných částí spektra se potom volí příslušná optická čidla, skenery nebo multispektrální skenery. Důležitá je rovněž citlivost vybraných senzorů. (Brant et al., 2020)

Měření odrazivosti rostlin, ať už platformami na zemi, či ve vzduchu, může poskytnout cenné informace například o úrovni dusíku ve vegetaci. Rostliny transformují světelnou energii na chemickou energii absorpcí červené (630-680 nm) a modré (450-520 nm) vlnové délky viditelné části spektra, zelená (520-600 nm) je absorbovaná méně (díky čemuž se rostliny jeví zelené). Proto snímání odrazivosti těchto tří vlnových délek poskytuje informace o míře aktivního rostlinného chlorofylu. (Kitchen a Goulding, 2001) Podle Lukase et al., 2017 lze říci, že odrazivost ve viditelném spektru dává informaci o fotosyntetickém aparátu rostlin, zatímco odrazivost v blízké infračervené části spektra o množství biomasy.

Odrazivost rostlin je dle definice poměr světla, které je od rostliny odraženo ku světlu dopadajícímu. Pro správné měření je nejdříve třeba zkalibrovat používané senzory a kamery standardizovaným referenčním panelem. Toto je nutné z toho důvodu, že se použité přístroje mohou lišit v citlivosti a schopnosti rozlišování příslušných vlnových délek. V rámci měření úrovně dusíku lze také jako referenční použít oblasti se známou úrovní dusíku a porovnat jí s měřenou oblastí. (Kitchen a Goulding, 2001)

Obrázek 3: Spektrální chování vegetace, půdy a vody ve vybrané části elektromagnetického záření (400–2500 nm)



Zdroj: (Lukas et al., 2011)

Z obrázku 3 jsou patrné rozdíly ve spektrálním chování vegetace, půdy a vody. Odrazivost půdy se zvyšuje rovnoměrně se zvyšující se vlnovou délkou ve viditelné a blízké infračervené části spektra. Odrazivost rostlin je oproti tomu ve viditelné části spektra definována absorpcí vlnových délek vhodných pro fotosyntézu. Při přechodu z viditelné části spektra na blízkou infračervenou část (NIR) dochází k prudkému nárůstu odrazivosti vlivem absence absorpce. Tato přechodová oblast je označována jako red-edge. (Heege, 2013)

Tak, jako se odrazivost půdy různí dle textury, obsahu organických hmot a chemického složení, různí se i odrazivost samotné vegetace v závislosti na typu rostliny a jejím chemickém složení. Nejpodstatnější rozdíly pro vegetaci vyvstávají z chlorofylu a biomasy. (Heege, 2013)

Za účelem efektivní analýzy spektrálních dat pro použití v zemědělství byly zavedeny tzv. spektrální a vegetační indexy. Ty jsou navrženy tak, aby zvýraznily vlastnosti vegetace, zatímco potlačují nežádoucí rušivé faktory okolí, jak ve své práci uvádí Fang a Liang, (2014). Díky nim je možné z dat získávat efektivněji využitelné informace. Vegetační indexy mohou být využity k tvorbě map pozemků, na jejichž základě je možné aplikovat principy precizního zemědělství. (Mulla, 2013; Lukas et al., 2017)

4.2 Dostupné prostředky

Nosiče měřicí aparatury lze obecně rozdělit na letecké a družicové. Do leteckých se řadí pilotovaná a nepilotovaná letadla a balóny. Pilotovaná letadla mohou nést celou řadu fotogrammetrického vybavení. Nevýhodou těchto letadel je nesnadné dodržování výšky letu, zejména v horském terénu. Pohyb letadla je podle Halounové a Pavelky (2008) zdrojem řady chyb a zkreslení, které je třeba při pozdějším zpracování vzít v úvahu. (Halounová a Pavelka, 2008; Liang a Wang, 2020) Bezpilotní prostředky prochází v posledních letech intenzivním vývojem. Zvyšující se dostupnost a nízkonákladovost bezpilotních prostředků z nich dělá perspektivní technologii s potenciálem radikálně změnit přístup k dálkovému průzkumu. Jsou vhodné i k provozu v obtížném nebo pro pilotovaný let nebezpečném terénu. (Eisenbeiss, 2009) Družicové nosiče nabízí výhody vysoké plošné snímací kapacity a stability spojené s jejich vzdáleností od zemského povrchu.

4.2.1 Družice

Družice jsou standartním nástrojem pro globální a systematické snímání zemského povrchu. Dle oběžných drah lze většinu rozdělit na družice geostacionární a družice s polárními drahami. (Halounová a Pavelka, 2008; Horning, 2018) Družice geostacionární dovolují nepřetržitě sledovat vybrané území díky tomu, že obíhají Zemi se stejnou oběžnou periodou, jako je zemská rotace. Drží si tak pevnou pozici nad určitým bodem zemského povrchu. Nevýhodou geostacionárních satelitů je vysoká výška jejich dráhy (cca 36 000 km), což představuje vyšší požadavky na rozlišovací schopnosti skenerového vybavení. Výhodou pro DPZ je ovšem možnost snímání stejného území ve velmi krátkých časových intervalech. Geostacionární dráhy jsou využívány hlavně pro spojové, televizní, meteorologické a výstražné družice. Družice na polárních drahách mají výrazně lepší rozlišení dané daleko nižší výškou dráhy (600–1200 km). Tyto družice snímají zájmovou oblast periodicky v závislosti na jejich oběžné periodě. Jedná-li se o systém družic, mohou se pohybovat na stejné dráze za sebou, čímž se zkrátí doba mezi pozorováními. (Halounová a Pavelka, 2008; Horning, 2018)

Družice jsou pro účely zemědělství využívány od sedmdesátých let. První družicí využívanou pro DPZ se stal Landsat 1, který pracoval v od roku 1972 do roku 1978. Družice Landsat 1 byla vybavena třemi multispektrálními RBV (Return Beam Vidicon, vidikonové televizní kamery) a skenerem MSS (Multispectral scanner, multispektrální mechanický skener), který měl rozlišení 80 m. MSS byl jedním z prvních specializovaných zařízení pro DPZ a umožňoval multispektrální analýzu zájmových oblastí. Landsat 1 sbíral data ve čtyřech

pásmech: v zeleném, červeném a dvou infračervených. (Halounová a Pavelka, 2008; Mulla, 2013)

Data Landsatu 1 využili Bauer a Cipra (1973) ke klasifikaci zemědělské krajiny Amerického středozápadu na kukuřičná nebo sójová pole. Studie dokázala, že data z družic lze použít k identifikaci plodin s přesností až 83 %. Následovníci Landsatu 1, ať už ze stejného (nejnovějším je Landsat 9 vypuštěn 27. září 2021), či jiných programů, se stali nedílnou součástí DPZ. Aplikace v konvenčním zemědělství brzo vedly k aplikacím v precizním zemědělství. První aplikací pro precizní zemědělství byla studie, ve které Bhatti et al. (1991) použili snímky holé půdy z družic programu Landsat k odhadu rozložení organické hmoty v půdě. Tato pomocná data poté použili spolu s pozemním odběrem vzorků k odhadu variability fosforu v půdě a k následnému odhadu výnosů pšenice. Zvyšující se požadavky na prostorové a spektrální rozlišení a přesnost dat vedly v průběhu let k intenzivnímu vývoji satelitních senzorů. Požadavkem precizního zemědělství byly také častější přelety.

Družice se staly nosiči nejen multispektrálních ale i hyperspektrálních senzorů, radarů a LiDARů (Mulla, 2013). Významným senzorem se stal skener MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), kterým byly vybaveny družice Terra a Aqua mise NASA EOS (Earth Observing System). MODIS snímá 36 spektrálních pásem s prostorovým rozlišením 250, 500 a 1000 m. Data senzoru MODIS jsou použitelná ke studii zemského povrchu, oceánů i atmosféry. (NASA, 2022)

V současnosti je možné využívat data z družic mnoha světových vesmírných agentur i soukromých firem. Některé družicové programy nabízí přístup k datům zdarma (například Sentinel a Landsat). Nevýhodou těchto dat je ale jejich časové rozlišení, které nemusí odpovídat potřebám konkrétní aplikace.

*Tabulka 1: Výběr družic využívaných pro dálkový průzkum a jejich základní údaje.
(MS... multispektrální senzor; HS... hyperspektrální senzor; T... termální senzor; Pan... panchromatický senzor)*

Družice	Země	Rok vypuštění	Perioda přeletů [d]	Financování	Senzor	Počet pásem	Prostorové rozlišení [m]
Terra	USA Japonsko Kanada	1999	16	Vládní	MS	14	15
					HS	36	90
					T	1	30
Aqua	USA	2002	1-2	Vládní	HS	36	250 500 1000
SPOT 6	Francie	2012	1-3	Komerční	Pan MS	1 4	1,5 6
SPOT 7	Francie	2014	1-3	Komerční	Pan MS	1 4	1,5 6
Landsat-7	USA	1999	16	Vládní	Pan	1	15
					MS	6	30
					T	1	60
Landsat-8	USA	2013	16	Vládní	Pan	1	15
					MS	8	30
					T	2	100
Sentinel-1	EU	2014	12	Vládní	Radar	1	5
		2016	6				5 × 20 20 × 40
Sentinel-2	EU	2015	10	Vládní	MS	13	10 20 60
Sentinel-3	EU	2015	1-2	Vládní	MS	21	300
		2017			MS	11	500
					(T)	3	500-1000

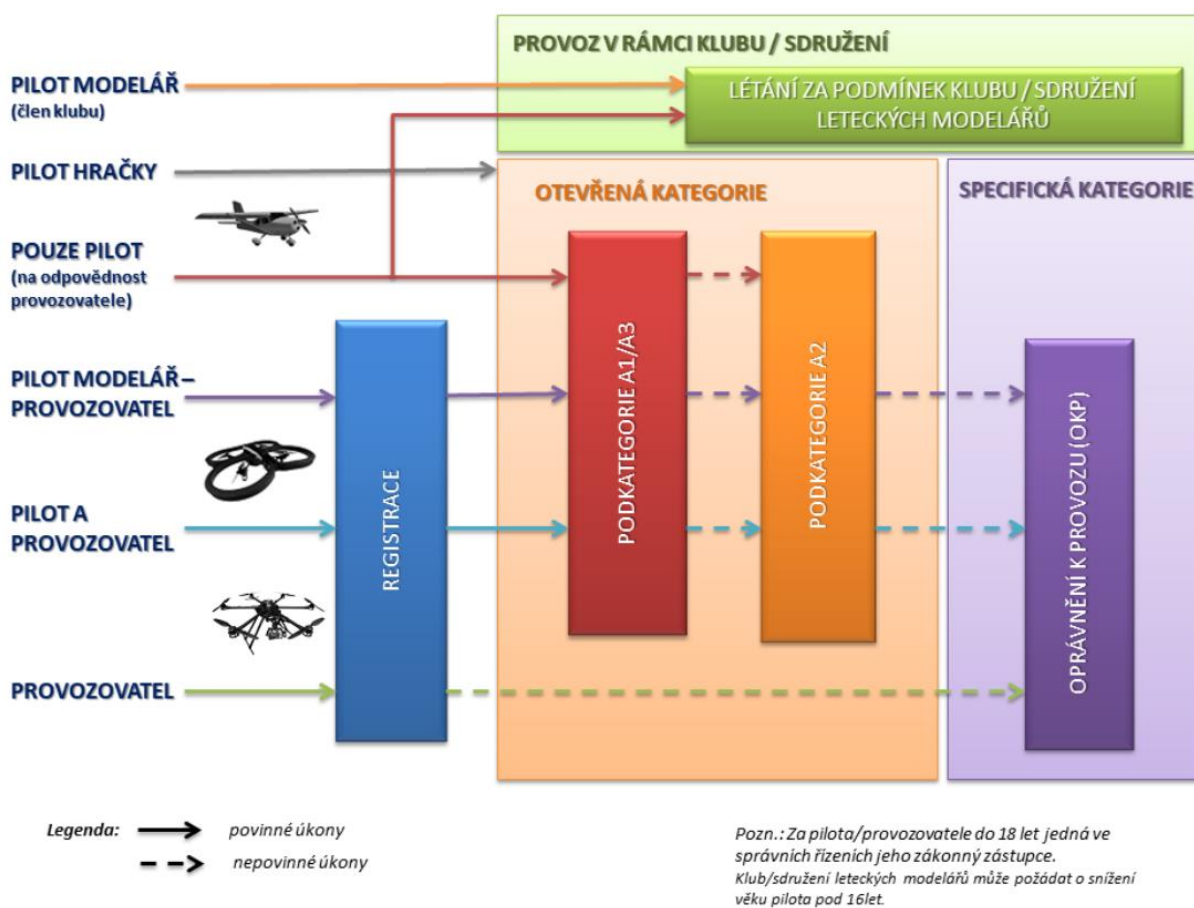
4.2.2 Bezpilotní systémy

Bezpilotní systém je Úřadem pro civilní letectví definován jako systém, který v sobě zahrnuje nejen bezpilotní letadlo (UA), ale také vybavení používané k jeho provozu (pozemní řídicí stanice a popřípadě zařízení pro vypuštění a podobně). Bezpilotní letadlo je takové letadlo, na jehož palubě se nenachází pilot a jehož provoz je řešen autonomně nebo řízením na dálku. V této definici jsou zahrnuty všechny typy letadel bez pilota na palubě, včetně modelů řízených rádiem bez ohledu na to, zda jsou vybaveny palubní kamerou. (Úřad pro civilní letectví, 2022) Označení UA (Unmanned Aircraft) nahradilo starší označení UAV (Unmanned Aerial Vehicle), se kterým je stále možné se v literatuře setkat. Používán je také pojem „dron“.

Od 31. prosince 2020 se provoz těchto prostředků řídí nařízením Evropské unie 2019/947, které upravuje pravidla a postupy pro provoz bezpilotních prostředků. Nařízení zavádí tři kategorie provozu: otevřená (open), specifická a certifikovaná. Kategorie otevřená je dále rozdělena dle provozních rizik na podkategorie A1, A2 a A3. Nově je také povinná registrace provozovatele, kterému je poté přiděleno registrační číslo, které musí uvést na všech vlastněných dronech. Piloti dronů musí absolvovat povinný výcvik a složit online zkoušku teoretických znalostí. Povinnost registrace a složení testů platí nejen pro rekreační létání, ale i komerční činnosti. (Úřad pro civilní letectví, 2020; Evropská komise, 2019)

Orientaci v nových pravidlech pro provoz usnadňuje web ÚCL, na kterém je možno dohledat veškeré informace a odkazy. Na obrázku 4 je vyobrazena infografika povinných a nezbytných úkonů pro provoz dronů.

Obrázek 4: Infografika povinných a nezbytných úkonů pro provoz dronů od 31.12.2020



Zdroj: (Úřad pro civilní letectví, 2020)

V rámci precizního zemědělství vyhovují bezpilotní systémy požadavkům na sběr dat pro svou flexibilitu, všestrannost a možnost monitorování pozemků či zájmového území

v reálném čase. Nabízí kombinaci výhod perspektivy leteckého snímkování a vysokého rozlišení pozemních prostředků. Další jejich výhodou oproti ostatním prostředkům DPZ jsou možnosti sběru dat i za zvýšené oblačnosti díky letu v nižších výškách. (Eisenbeiss, 2009; Eiesenbeiss, 2011; Brant et al., 2020)

Pro účely precizního zemědělství mohou být UAS nést celou řadu vybavení. Je však nutno brát v úvahu jedno z hlavních omezení UAS, a to jejich nosnost. Je tedy nutno vybírat takové přístroje, které nejen poskytnou požadovaná data, ale jsou také váhově a rozměrově vhodná pro zvolený prostředek. Toto „užitečné zatížení“ lze rozdělit na sensorové a ostatní. (Evropská komise, 2019) Nejčastějším sensorovým vybavením bezpilotních prostředků jsou kamery. Může se jednat o multispektrální, hyperspektrální nebo termokamery. Dalším sensorovým vybavením může být například radar, LiDAR, chemické, biologické nebo meteorologické senzory. Do kategorie ostatní patří například aplikační zařízení. (Radoglou-Grammatikis et al., 2020; Eesenbeiss, 2011)

Díky propojení se systémy přesného určování polohy mohou být data z UAS přímo přiřazována k poloze na pozemku, což značně urychluje jejich následné zpracovávání. V opačném případě je možné k datům polohu přidat během jejich zpracovávání. (Eesenbeiss, 2011)

Bezpilotní systémy mohou efektivně nahradit letadla a satelity převážně při použití v malých oblastech. Za těmito účely se využívají hlavně nízkonákladové UAS, které dosahují v posledních letech kvality, spolehlivosti a profesionality zcela adekvátní pro tyto účely. (Eisenbeiss, 2011)

UAS prochází neustálým vývojem, díky kterému se stávají dostupnější a efektivnější. Zároveň prochází intenzivním vývojem také fotogrammetrické měřicí prostředky, počínaje fotoaparáty, přes multispektrálními kamery až po senzory typu LiDAR. (Eisenbeiss, 2009; Hengl, 2006; Lukas et al., 2011; Pajares, 2015)

Obrázek 5: Hexakoptéra DJI Matrice 600 osazená termokamerou Wiris využívaná KZS TF ČZU



Zdroj: Kroulik

4.3 Vegetační indexy

Vegetační indexy byly zavedeny za účelem analýzy multispektrálních snímků. Jsou to matematické kombinace naměřených hodnot odrazivostí, vypočtené tak, aby vypovídaly o stavu vegetace. Lze je chápat jako klíče, kterými lze z naměřených dat vytvářet snáze analyzovatelné a vypovídající vizualizace. Snímky pořízené ve viditelné (VIS) nebo infračervené (IR) (popř. NIR, MIR, FIR) části spektra lze pomocí vegetačních indexů zpracovat a přiřadit k naměřeným údajům odpovídající parametry. Vegetační indexy vyjadřují vztahy mezi odrazivostí částí spektra od vegetace a jejím stavem. Ten je přímo spjat s její odrazivostí v infračervené části spektra a díky této spojitosti je možné detekovat některé změny stavu dřívě, než se projeví ve viditelné části spektra, tedy než jsou pozorovatelné pouhým okem, například při pozemním průzkumu. Tímto způsobem je ze snímků sledovatelná nejen hustota, ale i zdravotní stav vegetace, či její potřeby, zejména co se týče živin a vody. Jejich pomocí lze také sledovat přírůstky biomasy, odhadovat výnosy a určovat ideální čas sklizně. (Mulla, 2013; Gitelson, 2004; Dobrovolný, 2001)

Naměřená odrazivost je matematicky zpracována, čímž jsou získány vegetační indexy. Vztahů pro jejich výpočty vznikla již celá řada. Tyto vztahy určují takzvanou citlivost indexu a tím i jeho použití. (Mulla, 2013) Fang a Liang (2014) ve své práci uvádějí, že vegetační indexy

jsou navrženy tak, aby maximalizovaly citlivost na vlastnosti vegetace, zatímco minimalizují rušivé faktory. Za rušivé faktory se považuje odrazivost půdy pod vegetací, vliv směru, ze kterého byl snímek pořízen a atmosférické efekty.

Dle charakteru vztahů lze vegetační indexy rozdělit na poměrové a ortogonální. Poměrové vztahy jsou dány různými poměry hodnot odrazivosti částí spektra. Takto vznikají jednoduché indexy schopné rozlišovat na zájmové ploše místa s vegetací, či jen s holou půdou, nebo sledovat úroveň dusíku v rostlinách. Ortogonální jsou tvořeny transformacemi nebo kombinacemi původních pásem. (Dobrovolný, 2001)

4.3.1 Jednoduchý poměrový index RVI

RVI (Ratio Vegetation Index) je mírou mezi odrazivostí v malém rozsahu blízkého infračerveného (NIR) a červeného (RED) pásma. Je vypočítán jako jednoduchý poměr těchto dvou pásem. (Jacobsen et al., 1998)

$$RVI = \frac{R_{NIR}}{R_{RED}}$$

Jak rostliny rostou, zvyšuje se pokryv zájmové oblasti a s ním se zvyšují hodnoty RVI. To je způsobeno vyšší odrazivostí v blízkém infračerveném pásmu (NIR) a nižší odrazivostí v červeném pásmu (RED) (viz obrázek 3). (Jacobsen et al., 1998)

Zhu et al. (2006) ve své práci prokázal, že indexy RVI v pásmech 760, 810, 870, 950 a 1100-660 nm lineárně korelovaly s obsahem dusíku v listech LNA (leaf nitrogen accumulation) pšenice. Tyto výsledky naznačují, že pro správné určení LNA je třeba vhodně zvolit spektrální pásma. Ty se totiž mohou lišit v závislosti na druhu plodiny a podmínkách jejího růstu. Metody spektrální analýzy se ukázaly vhodnými k určování akumulace dusíku v rostlinách pšenice i rýže, což jsou plodiny v Číně často řazené v sledech za sebou. Nalezení vhodných spektrálních pásem a vegetačních indexů pro sledování LNA pro obě tyto plodiny by bylo užitečné pro vývoj nedestruktivních monitorovacích technik s nasazením přenosného vybavení pro pozemních odběry dat nebo i leteckých snímků.

Vztah mezi RVI a obsahem dusíku předpovídal už Jacobsen et al., (1998), když při sledování rostlin Merlíku čilského (*Chenopodium quinoa*) zjistil, že RVI reagoval dříve na rozdílné hladiny dusíku než index listové plochy LAI (Leaf Area Index) a obsah sušiny. Na základě silné korelace mezi RVI a výnosem semene a časně reakci na hladiny dusíku by podle

Jacobsena mělo být možné dopředu předpovědět výnos a odhadnout dávkování i načasování aplikace hnojiv k dosažení optimálních výnosů.

4.3.2 Normalizovaný diferenční vegetační index NDVI

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) neboli normalizovaný diferenční vegetační index je jedním z nejznámějších poměrových vegetačních indexů. (Tucker et al., 1985) Oblíbený je zejména pro svou jednoduchost a vypovídající vlastnosti při monitoringu biomasy. Tento index využívá vlnových délek 800 a 670 nm, tedy odrazivost v blízké infračerveném (NIR) a červeném pásmu (RED). Mimo hustoty vegetace umožňuje rozeznat i vodu a led. (Rouse et al., 1974; Lukas et al., 2012; Heege, 2013) Nevýhodou indexu NDVI je jeho citlivost na optické vlastnosti půdního pozadí a neúplný pokryv vegetací. (Huete et al., 1985; Huete, 1988)

Normovaný výpočet indexu umožňuje redukovat nežádoucí vliv osvětlení a atmosféry díky tomu, že jejich působení je zpravidla stejné napříč různými pásmy. Jsou-li ovšem zpracovávány snímky pořízené v různých termínech, je již za potřebí radiometrických korekcí. (Lukas et al., 2012)

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

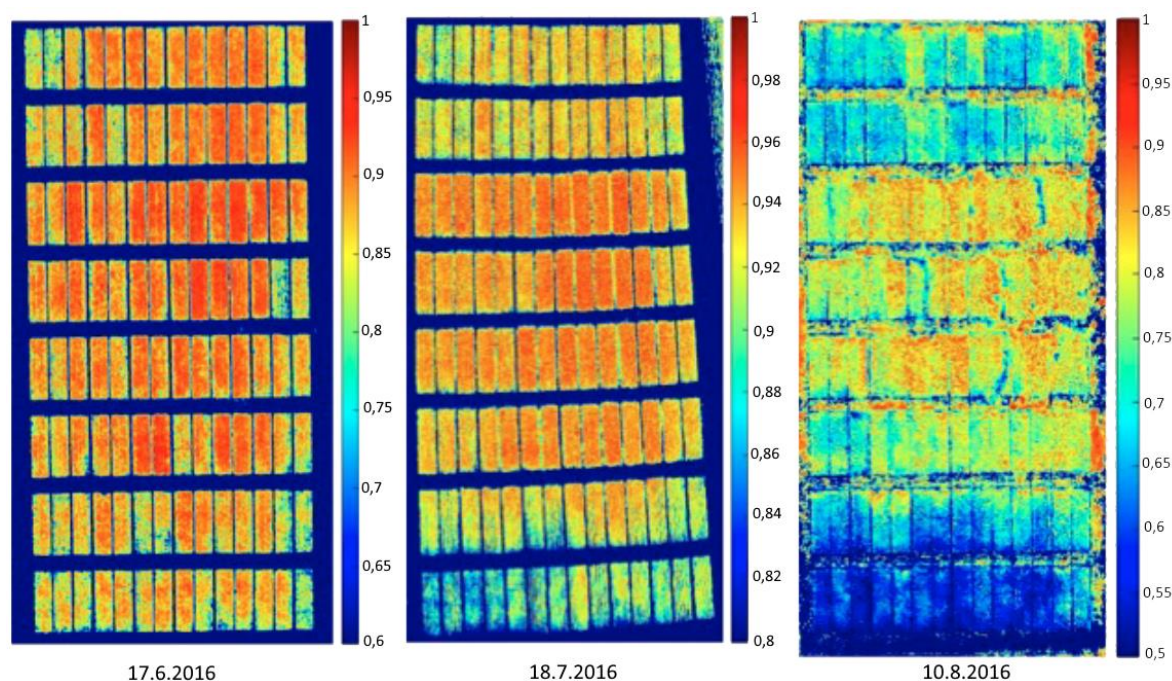
Výsledkem výpočtu je bezrozměrná veličina v rozmezí od -1 do 1. Vyšší kladné hodnoty odpovídají husté a zdravé vegetaci (>0,5), střední hodnoty odpovídají travním porostům a loukám (přibližně 0,2 až 0,3), nižší hodnoty odpovídají řídkšímu pokrytí vegetací až holé zemi či zastavěné oblasti (<0,1). Záporné hodnoty potom představují vodní plochy nebo led. NDVI také koreluje s biomasou a obsahem vody a chlorofylu v rostlinách. (Lukas et al., 2012; Heege, 2013)

Ačkoliv je index NDVI vhodný k identifikaci a kvantifikaci biomasy, je vhodný pouze do určité hustoty porostu. Při vyšší hustotě nastává efekt tzv. nasycení. Po překročení mezní hustoty se již hodnoty NDVI nemění. Tato hustota porostu je hodnocena indexem listové plochy LAI. Index LAI udává plochu horní strany všech listů rostlin na metru čtverečním půdy. Jako takový se tedy v průběhu vegetace mění. Hodnota LAI se pohybuje u dobře vyvinutého porostu obilnin mezi 5–9, přičemž nasycení NDVI nastává mezi 1–3 (příp. 2-6). (Lukas et al., 2012)

Díky možnosti rozlišení mezi půdou a vegetací je index NDVI použitelný například u postřikovačů při takzvaném bodovém postřiku. Tato technika umožňuje v porovnání s plošným postřikem značně snížit náklady snížením spotřeby pesticidů. (Heege, 2013)

Burud et al. (2017) použili index NDVI během vyhodnocování použití bezpilotního prostředku a robotu pro fenotypizaci. Cílem práce bylo také porovnat snímky z UAS a robotu a zjistit, jak se mohou vzájemně doplňovat. Pozorováno bylo také spektrální chování různých kultivarů vystavených dvěma režimům hnojení dusíkem (75 a 150 kg N/ha). Snímky pokusných pozemků byly pořízeny ve třech termínech 17.6.2016 (vlevo), 18.7.2016 (uprostřed) a 10.8.2016 (vpravo) (viz obrázek 6). Na snímcích jsou patrné rozdíly mezi kultivary i mezi režimy hnojení (zóny s vyšší dávkou uprostřed, s nižší dávkou nahoře a dole). Snímek z 10.8.2016 byl ovlivněn poléhavostí na pozemcích s delšími a slabšími stébly.

Obrázek 6: NDVI pokusných pozemků s dvaceti čtyřmi kultivary pšenice (po dvou v každé zóně s rozdílnou dávkou dusíku)



Zdroj: (Burud et al., 2017), upravil Trška

4.3.3 Plodinový vodní stresový index CWSI

CWSI (Crop Water Stress Index) je vegetačním indexem, který na stupnici od 0 do 1 udává míru vodního stresu sledovaného porostu. Pracuje na základě rozdílů teplot mezi povrchem rostlin a vzduchem s odkazem na VPD (rozdíl v tlaku par) a pro danou rostlinu specifické hraniční hodnoty stresu. (Jackson et al., 1981)

Ehrler (1973) za pomoci termočlánků vložených v listech bavlníku došel k závěru, že snímání teploty listů a okolního vzduchu by bylo možné využít k plánování zavlažování. Idso (1977) a Jackson (1977) použili teplotu listů T_c , od které odečetli teplotu vzduchu T_a , jako index stavu vody v rostlinách, který poté spojili s potřebou vody i s výnosem. V návaznosti na jejich práci došli Jackson et al. (1981) ke vztahům, kterými definovali index CWSI. Tento index byl poté stanoven empiricky podle doporučení Idso et al. (1981) následovně:

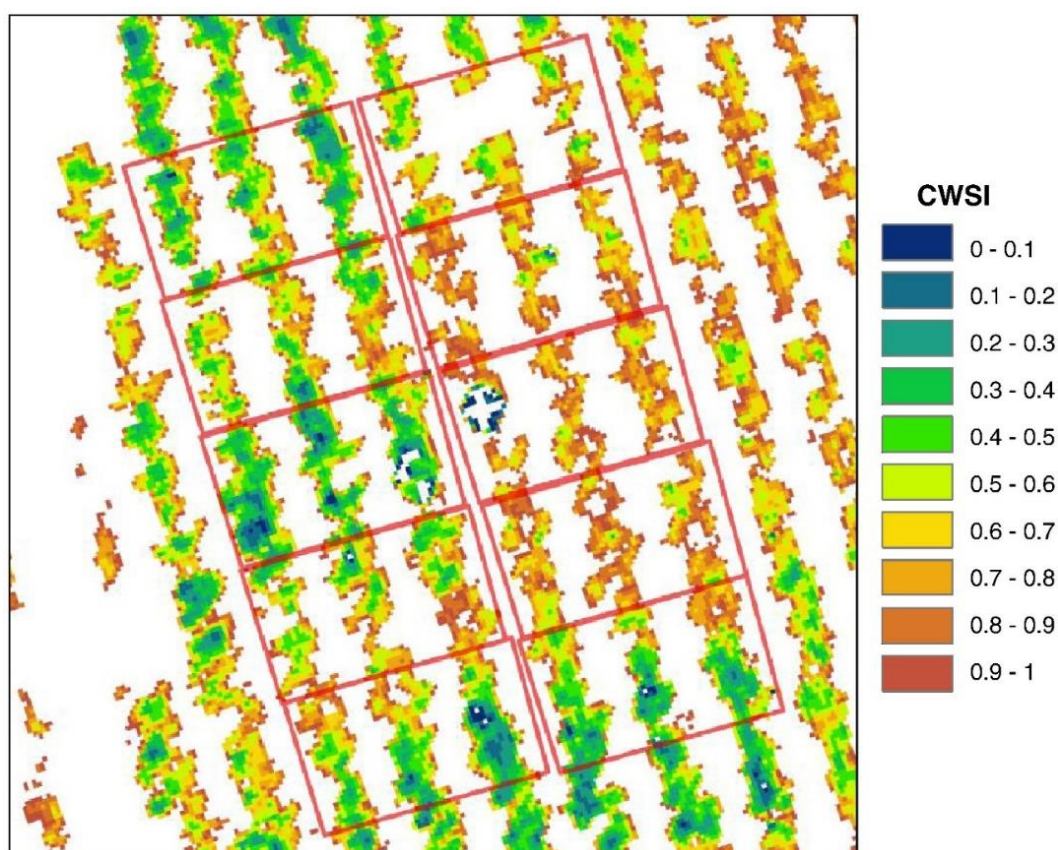
$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}]}{[(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}]}$$

V této rovnici je T_c teplota listů, T_a teplota vzduchu, výraz $(T_c - T_a)_{LL}$ je dolní limit vodního stresu dané rostliny a $(T_c - T_a)_{UL}$ představuje horní limit, tedy plný vodní stres.

Hodnota indexu CWSI stoupá s tím, jak stoupá vodní stres rostliny. Rozsah hodnot CWSI je od 0 do 1, kdy 0 udává žádný vodní stres a 1 maximální stres. Při pokusech Jackson et al. (1981) pozorovali reakci indexu na zavlažování pšenice. Od posledního zavlažování testované parcely se index CWSI pomalu zvyšoval. Po zavlažení neklesly hodnoty indexu okamžitě na očekávanou nulu, ale během 5-6 dnů klesaly až na nenulové minimum. Tato doba se zdála být nutná k tomu, aby se plodina zotavila ze stresového stavu (proces, při kterém se rehydratovaly listy a dorostla kořenová soustava). Podobnou zotavovací dobu pozoroval Ehrler (1973) u rostlin bavlníku.

Obrázek 7 předkládá termální snímek sadu olivovníků v jižním Španělsku pořízený pomocí UAV, který byl zpracován do podoby indexu CWSI. Termální snímky byly pořízeny pomocí UAV, které bylo vybaveno hyperspektrálním skenerem AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) s vysokým rozlišením, který umožňoval odlišení jednotlivých korun olivovníků. Výsledná mapa je použitelná pro plánování zalévání a ukazuje potenciál bezpilotních prostředků a jejich senzorových možností. (Jimenez-Berni et al., 2009)

Obrázek 7: Termální snímek sadu olivovníků zobrazený v indexu CWSI



Zdroj: (Jimenez-Berni et al., 2009)

Snímkování termálního pásma ze satelitů nebo leteckých nosičů dovoluje analyzovat velké plochy, přičemž prostorové rozlišení závisí na použitém prostředku. Komerčně jsou také nabízena zařízení, která bezkontaktně snímají a okamžitě vypočítávají CWSI. Získaná data lze následně využít k naplánování ideálního zavlažování za předpokladu určení mezní hodnoty CWSI pro danou plodinu (Jackson et al., 1977; Jackson et al., 1981; Kirnak et al., 2019)

Kirnak et al. (2019) zkoumali využití indexu CWSI k řízení kapkové závlahy dýně. Poukázali, že správné řízení zavlažování je klíčové zejména v suchých a polosuchých oblastech, kde je voda omezeným zdrojem. Správné zavlažování bylo spojeno se zvýšenými výnosy. Pro správné využití indexu CWSI byly stanoveny dolní a horní limity vodního stresu pro dýně. Ve své studii došli k závěru, že CWSI silně koreloval s výnosem, indexem LAI, listovým vodním potenciálem LWP a s obsahem olejů a proteinů. Dle jejich závěrů lze CWSI spolehlivě využít k řízení zavlažování a odhadu výnosů dýně.

4.3.4 Půdě přizpůsobený vegetační index SAVI

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) neboli půdě přizpůsobený vegetační index je modifikací indexu NDVI, která má za cíl omezit citlivost na odrazivost půdy. Tato citlivost je problematická zejména v případech neúplného pokryvu zájmové oblasti vegetací. (Huete, 1988)

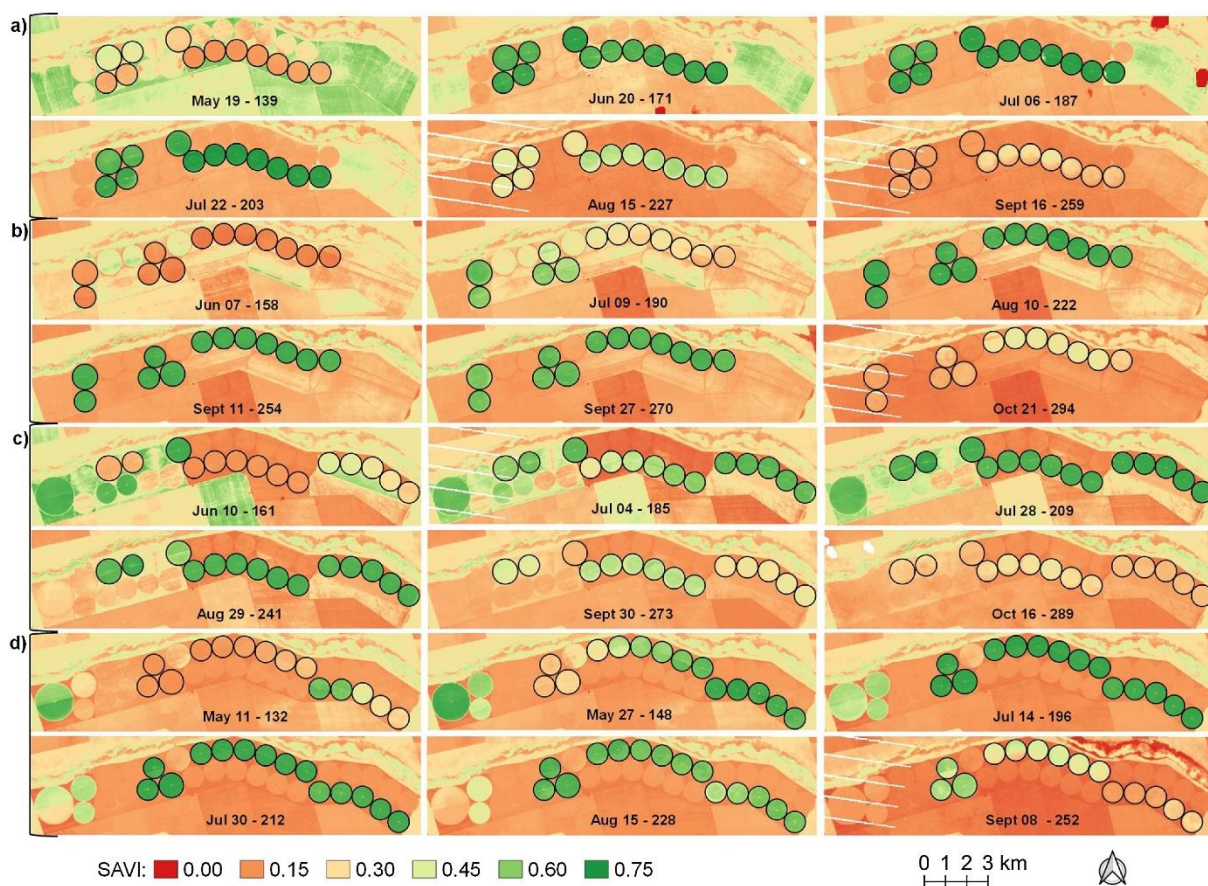
$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + L} \times (1 + L)$$

Odrazivost půdy může značně ovlivnit hodnoty vegetačních indexů. SAVI využívá k utlumení vlivu půdy opravný součinitel L pro rovnici NDVI. Tento součinitel může nabývat hodnot od 0 do 1 a je ovlivněn hodnotami LAI, tedy pokrytím sledované plochy vegetací. Pro řídké pokrytí vegetací se ukázala být vhodná hodnota $L = 1$, se zvyšující se hustotou vegetace se optimální hodnota L snižovala. Z rovnice je patrné jádro indexu NDVI upravené o součinitel L. Faktor $(1 + L)$ byl přidán, aby byly zachovány hranice hodnot NDVI (-1 až +1).

Z dat vyplynulo, že je vhodné používat dvě až tři hodnoty součinitele L na základě toho, zda je sledována řídká vegetace ($L = 1$), středně hustá vegetace ($L = 0,5$), nebo hustší vegetace ($L = 0,25$). Univerzálně, není-li předem známa hustota vegetace, se užívá hodnota $L = 0,5$. (Huete, 1988)

Správné zvolení součinitele L je kritické pro minimalizaci vlivu odrazivosti půdy. V mnoha empirických studiích byla skutečně vyzkoušena lepší výkonnost SAVI oproti NDVI, zejména pro zemědělské účely a u homogenního hustého pokryvu vegetací. (Boschetti et al., 2007; Venancio et al., 2019) Některé studie ovšem ukázaly, že v suchých oblastech, jako jsou například pouštní stepi, SAVI NDVI nepřekonal. Půdní pozadí má významný dopad na spektrální chování vegetačního pokryvu právě v oblastech, kde je tento pokryv řídký. (Ren et al., 2011) Tento nedostatek vyřešili ve své studii Ren et al. (2018) zavedením negativní hodnoty koeficientu L ($L = -0,2$).

Obrázek 8: Časový vývoj indexu SAVI v sezónách 2013 (a), 2014 (b), 2015 (c) a 2016 (d)



Zdroj: (Venancio et al., 2019)

Během zkoumání různých metod predikce výnosů kukuřice seté (*Zea mays* L.) použili Venancio et al. (2019) vegetační index SAVI, získaný ze snímků družic Landsat 7 a 8, ke sledování vývoje kukuřice seté a ke kalkulaci bazálního plodinového koeficientu (K_{cb}). Pokusy prováděli během čtyř sezón (2013, 2014, 2015, 2016) na testovacích pozemcích s pivotovými zavlažovacími systémy v oblasti Bahia v Brazílii (viz obrázek 8). Během sledovaných období byl pozorován vývoj hodnot SAVI v souladu se čtyřmi hlavními vývojovými fázemi kukuřice, s rychlým nárůstem na počátku, obdobím stabilních hodnot a rychlým úbytkem na konci sezóny. Bazální plodinový index sloužil k dalším výpočtům pro odhady výnosů. Z jejich výsledků vyplývá, že využití družicových dat k odhadování výnosů je provozně proveditelné. Družicová data lze snadno získat z bezplatných služeb a snadná je také implementace použitého modelu. Prognózy založené na datech dálkového průzkumu mohou podle Venancia et al. (2019) pomoci zemědělcům při zajišťování potravinové bezpečnosti, v rozhodovacích procesech a při formulaci exportních strategií. Výnosové mapy mohou dále sloužit k identifikaci problémových oblastí a sloužit jako podklady pro úpravu postupů.

Vegetační index SAVI se stal základem pro řadu modifikací, jejichž cílem je dále omezit působení odrazivosti půdy a zlepšení citlivosti na vegetaci. Mezi tyto indexy se řadí například Transformovaný půdě přizpůsobený vegetační index TSAVI (Transformed SAVI) (Baret et al., 1989), Modifikovaný půdě přizpůsobený vegetační index MSAVI (Modified SAVI) (Qi et al., 1994) a Optimalizovaný půdě přizpůsobený vegetační index OSAVI (Optimized SAVI) (Rondeaux et al., 1996)

4.3.5 Vylepšený vegetační index EVI a EVI2

EVI (Enhanced Vegetation Index) byl vyvinut s cílem optimalizovat signál vegetace se zlepšenou citlivostí v oblastech s velkým množstvím biomasy a zlepšení monitorování vegetace prostřednictvím odrušení pozadí vegetačního pokryvu a snížení vlivů atmosféry. K tomuto účelu využívá tři pásma (NIR, RED a BLUE) upravená o opravné koeficienty. (Huete et al., 2002)

$$EVI = G \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + C_1 \times R_{RED} - C_2 \times R_{BLUE} + L}$$

Pro tento algoritmus byly pro EVI odvozeny hodnoty koeficientů $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$ a $G = 2,5$, přičemž L je koeficient přizpůsobení pozadí, C_1 a C_2 jsou koeficienty aerosolové odolnosti, které využívají červeného a modrého pásma ke korekci působení aerosolů na červené pásmo a G je takzvaný přírůstkový faktor. R jsou naměřené hodnoty jednotlivých odrazivostí se zahrnutými úplnými nebo částečnými atmosférickými korekcemi. (Huete et al., 2002)

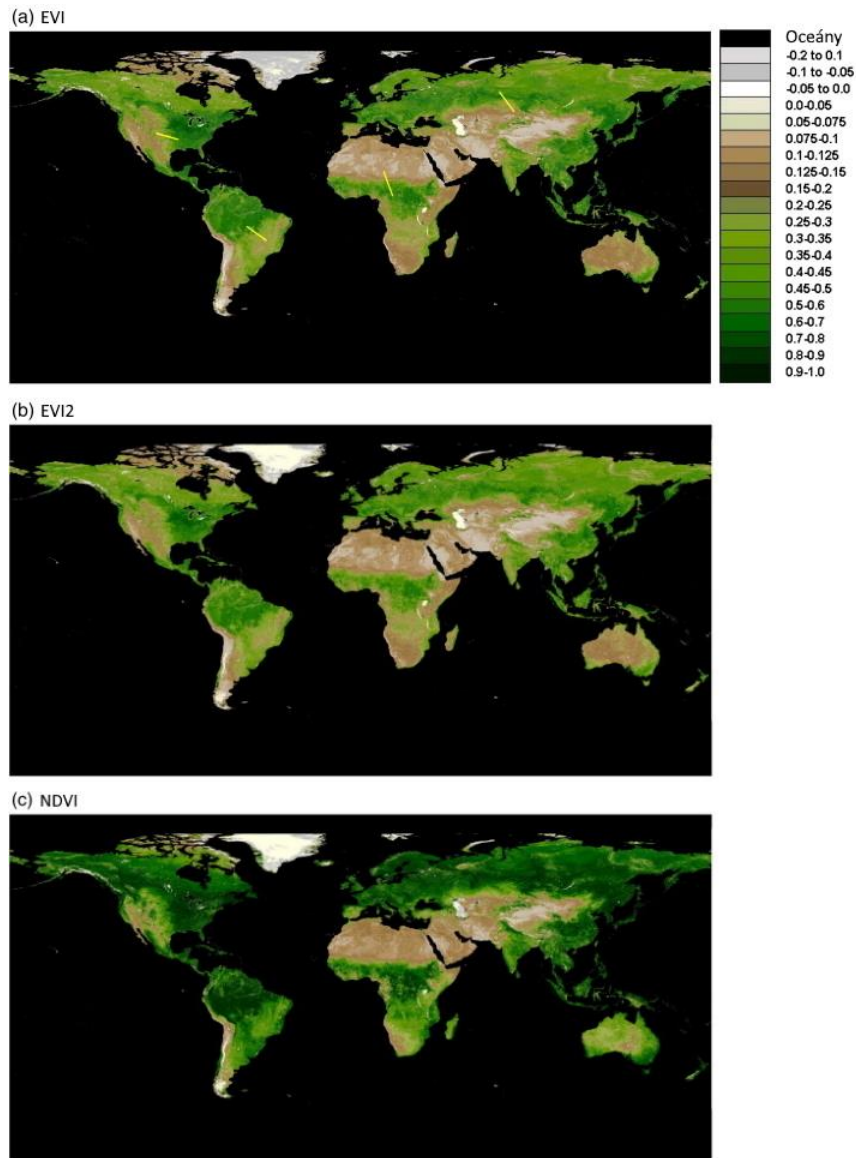
Využití modrého pásma ovšem představilo omezení pro EVI ze strany použitelných senzorů. Některé senzory požadavky na snímání modrého pásma zároveň s červeným a blízkým infračerveným nesplňují, čímž znesnadňují využití EVI pro generování dlouhodobých časových řad. Za tímto účelem navrhli Jiang et al. (2008) odvozenou dvoupásmovou verzi EVI bez modrého pásma. Ta využívá pro potlačení půdního pozadí koeficient L převzatý z indexu SAVI. Výsledný index nazvali EVI2, jeho rovnice po úpravách vypadá následovně:

$$EVI2 = 2,5 \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + 2,4 \times R_{RED} + 1}$$

Obrázek 9 předkládá porovnání vegetačních indexů EVI, EVI 2 a NDVI z globálních dat MODIS. Jedná se o šestnáctidenní kompozit pořízený během 27. července až 11. srpna

2000. EVI2 se od EVI liší jen minimálně. Odchylky se pohybují nejčastěji v rozmezí -0,02 až 0,02, méně časté vyšší odchylky se přisuzují zbytkové oblačnosti, která ovlivňuje odrazivost v modrém pásmu a způsobuje EVI artefakty. EVI2 si zachovává výhody EVI včetně lepšího rozlišení vegetace oproti NDVI. U NDVI jsou jasně patrné oblasti přesycení (tmavě zelená). (Jiang et al., 2008)

Obrázek 9: Porovnání vegetačních indexů EVI, EVI2 a NDVI



Zdroj: (Jiang et al., 2008), upravil Tříska

Huete et al. (2002) poukazují na to, že zatímco index NDVI reaguje spíše na chlorofyl, index EVI reaguje lépe na strukturu, typ a architekturu vegetačního pokryvu a fyziognomii porostu. Ve své práci zmiňují znatelný rozdíl hodnot indexu EVI mezi jehličnatými a listnatými stromy, přičemž hodnoty jehličnatých stromů byly přibližně poloviční oproti listnatým, což má

za následek ostrý kontrast mezi těmito dvěma druhy dřevin. Výhodou indexu EVI oproti NDVI je také to, že u něj nedochází k přesycení v oblastech s hustou vegetací.

Index EVI použili například Sun et al. (2021) ke klasifikaci pastvin v okolí řeky Kashi, v regionu Xinjiang, Čína. EVI umožnil klasifikaci oblastí pastvin do čtyř skupin podle míry pokrytí: vysoké pokrytí, střední, nízké a ostatní. Multispektrální data satelitu Landsat 7 zpracované do podoby indexu EVI korelovala s daty pořízenými na odběrových místech v oblasti s přesností 90,32 %.

EVI2 byl využit Rahmanem et al. (2013) a Berlanga-Roblesem a Ruiz-Lunou (2020) k monitoringu mangrovníků. EVI2 byl pro tyto účely vybrán právě pro svou schopnost eliminovat nežádoucí vliv atmosféry, převážně oblačnosti, která je v oblastech mangrovníků běžná, a vlivu půdního pozadí. Protože EVI2 indikuje lépe zelenou vegetaci, když je půdní pozadí tmavé, je vhodný pro použití v tropických mangrovníkových oblastech, kde je vysoká pravděpodobnost tmavého půdního pozadí. (Rahman et al., 2013)

5 Terénní průzkum

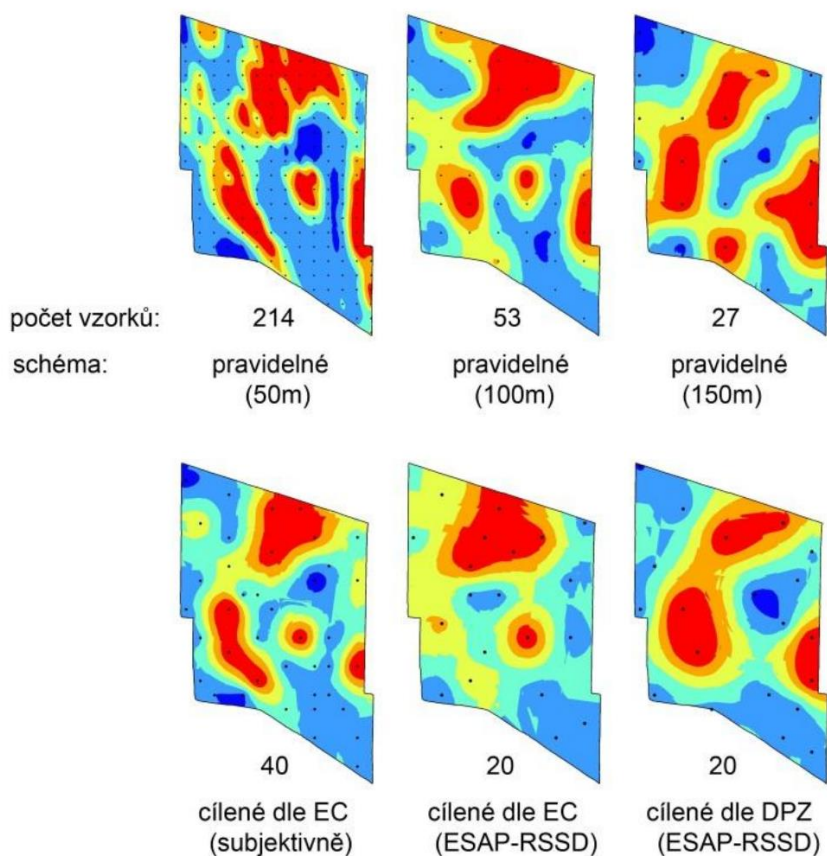
Základní podobou terénního průzkumu je půdní vzorkování. Přestože je terénní průzkum časově i finančně náročnější, může podat o zájmové oblasti úplnější informace než dálkový průzkum. Mapována je především variabilita těch parametrů, které jsou z hlediska agronomického rozhodování podstatné. Pro co nejpřesnější zachycení variability je přitom zásadní hustota a rozmístění odběrových bodů. Vyšší hustota znamená detailnější mapu, ale také vyšší náklady. Nižší hustota nemusí zachytit skutečnou úroveň variability, je tedy třeba hledat kompromis. (Lukas et al., 2011; Brant et al., 2020)

Jak uvádějí Lukas et al. (2011), pro účely precizního zemědělství se zpravidla hustota vzorkování pohybuje v rozmezí jeden vzorek na 1 až 5 ha. Rozmístění odběrových bodů může být pravidelné nebo cílené. Pravidelné rozmístění má podobu rastru, který překrývá zájmovou oblast. Je voleno hlavně tam, kde není předem ani přibližně známa úroveň variability. Cílené rozmístění se snaží optimalizovat počet odběrových míst. Předpokladem je určitá znalost variability, která slouží jako podklad.

Podkladem mohou být i letecké nebo družicové snímky, topografie pozemku, historie užívání pozemku, výnosové mapy, či záznamy provozních parametrů zemědělských strojů. Díky této optimalizaci je možné snížit počet půdních vzorků, zatímco je zachována vypovídající hodnota zhotovené mapy daného parametru. (Lukas et al., 2011; Brant et al., 2020) K vytvoření celoplošné mapy použitelné v precizním zemědělství je třeba aplikovat na bodová data prostorové interpolace. Jedná se o metody odhadu sledovaných hodnot mezi odběrovými body. Metod prostorových interpolací je více a výsledná podoba mapy závisí na vybraném postupu. (Lukas et al., 2011)

Obrázek 10 ukazuje rozdíly pravidelného a cíleného vzorkování pH půdy tak, jak bylo v rámci výzkumu Ústavu agrosystémů a bioklimatologie Mendelovy univerzity v Brně porovnáváno. První tři mapy znázorňují rozdíly hustoty vzorkování za použití pravidelného rastru. Další tři znázorňují rozmístění odběrových bodů na základě výsledků měření elektrické vodivosti půdy (EC) a leteckých snímků (DPZ). Subjektivní optimalizace vedla k 25 % redukci půdních vzorků, rozmístění na základě dálkového průzkumu Země vedlo až k 48 % redukci. Programem použitým k optimalizaci odběrových bodů byl ESAP-RSSD, který je volně dostupný. (Lukas et al., 2011)

Obrázek 10: Vliv hustoty a stylu rozmístění (schéma) vzorkování pH půdy na pozemku o rozloze 52 ha. (EC... elektrická vodivost půdy; DPZ... dálkový průzkum Země; ESAP-RSSD... program pro optimalizaci odběrových bodů)



Zdroj: (Lukas et al., 2011), upravil Tříška

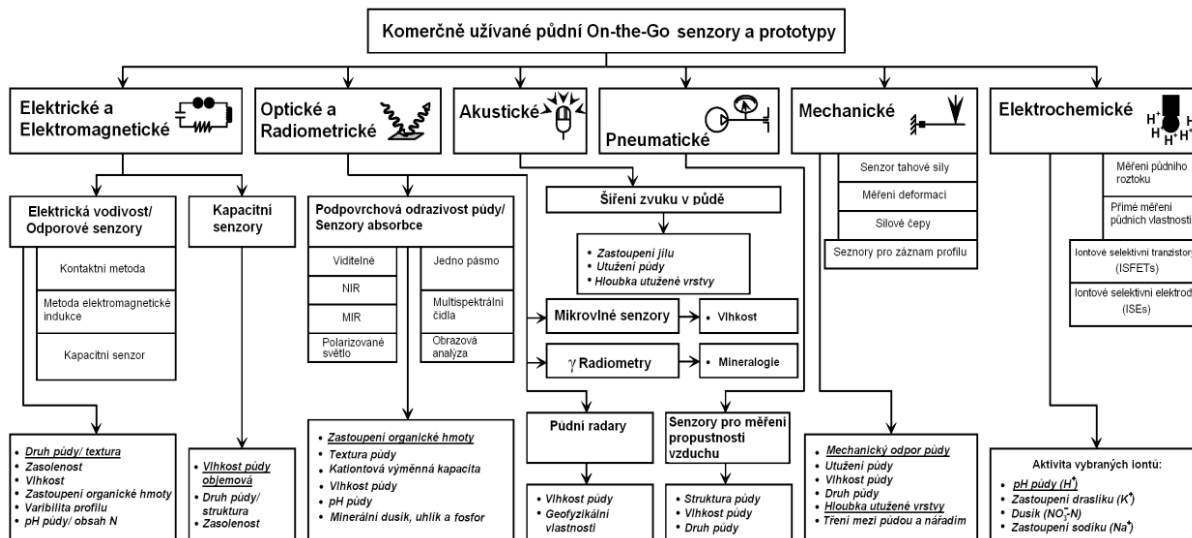
Na rozdíl od řady půdních vlastností, které se z krátkodobého hlediska příliš nemění, jsou parametry porostů daleko více variabilní v čase. Existují tedy požadavky na systémy, které by tyto parametry dokázaly sledovat a podávat o nich informace tak, aby měli zemědělci čas na reakci. Variabilita porostu je ovlivněna řadou faktorů a jejich vzájemných interakcí, jejichž pochopení je předmětem studií. (Lukas et al., 2011) Lukas et al. (2011) rozdělil metody mapování variability porostů na tradiční a nepřímé. Tradiční se skládají například z odběrů vzorků rostlin a jejich laboratorní analýzy, ze sledování a kontroly růstu a vývoje rostlin a mapování zaplevelení formou terénního průzkumu. Vzhledem k časové a finanční náročnosti je vhodné tyto metody provádět, stejně jako vzorkování půdy, pouze v rámci sítě bodů. Nepřímé metody využívají nejčastěji spektrálních vlastností porostů. (Lukas et al., 2011; Lukas et al., 2017; Brant et al., 2020)

5.1 Nepřímé metody pozemního sběru dat

Nepřímé metody identifikace variability využívají pro sběr dat senzory. Tyto senzory mohou pracovat na nejrůznějších principech. Vzhledem ke zmíněným nevýhodám vzorkování jsou snahy vyvinout prostředky, které by dovolovaly průběžné měření s vyšší hustotou vzorkování a nižší poměrné ceně za pořízená data. Řada těchto senzorů je vyvíjena tak, aby mohla být nesena mechanizací a zaznamenávat data během vykonávaných operací. Některé tyto senzory jsou již standardem, jiné se nachází v různých fázích vývoje. Pro senzory pro průběžné měření se zavedlo označení on-the-go. (Lukas et al., 2011; Brant et al., 2020)

Půdních on-the-go senzorů vznikla celá řada. Podle principu měření je lze rozdělit do šesti skupin: elektrické a elektromagnetické, optické a radiometrické, mechanické, akustické, pneumatické a elektrochemické. Každý z těchto principů se ukázal být vhodný pro některou z půdních vlastností. (Adamchuk, 2008; Lukas et al., 2011; Brant et al., 2020) Klasifikaci půdních on-the-go senzorů provedl Adamchuk a Rossel (2010) a vytvořil přehled senzorů, principů, na kterých fungují, a jejich uplatnění (viz obrázek 11).

Obrázek 11: Přehled komerčně užívaných půdních senzorů a jejich uplatnění



Zdroj: (Adamchuk a Rossel, 2010), upravil (Brant et al., 2020)

Elektrické a elektromagnetické senzory patří v současnosti mezi nejvyužívanější. Tyto senzory využívají geofyzikálních vlastností půdy, které ovlivňují průchod elektrického proudu nebo magnetického pole. Pomocí elektrického obvodu, jehož součástí je půda, jsou měřeny schopnosti půdy vést, případně akumulovat elektrický náboj. Lokální změny půdních vlastností ovlivňují procházející signál, jehož změny jsou zaznamenávány a ukládány. (Lukas et al., 2011;

Brant et al., 2020) Měření elektrické vodivosti půdy se stalo standardem a byla vyvinuta řada přístrojů s rozličným konstrukčním provedením. Jak uvádějí Brant et al. (2020), měření elektrické vodivosti výrazně koreluje s půdními vlastnostmi, které mají vazbu na výnos, jako je zrnitostní složení, vodní kapacita, kationtová výměnná kapacita, obsah organické hmoty, pH, hloubka půdního profilu a další. Corwin et al. (2003) ve své práci označují měření elektrické vodivosti jako vhodné pro navrhování schémat půdního vzorkování. Získaná data mohou být také použita při návrhu tzv. management zón, tedy menších homogenních bloků. (Brant et al., 2020)

Optické senzory a radiometrické senzory využívají toho, že rozdílné povrchy odráží nebo pohlcují elektromagnetické záření s rozdílnou intenzitou. Spektrální chování vegetace bylo popsáno v předchozích kapitolách. Spektrální chování půdy je ovlivněno vlhkostí zrnitostním složením, drsností povrchu, a obsahem organické hmoty. Při vyšším podílu těchto složek se odrazivost půdy snižuje, proto se půdy s vyšší vlhkostí, či humózní půdy jeví jako tmavší. (Lukas et al., 2011) Stejně jako při monitorování vegetace, i zde lze využít dálkového průzkumu Země a jeho výhod. Nevýhodou může být nutnost absence vegetačního krytu a fakt, že tyto způsoby nabízí informace pouze ze svrchní části půdy. Gama spektrometrie, metoda založená na měření koncentrací prvků s přirozenou radioaktivitou, je také metodou vhodnou pro měření variability půdy pro účely precizního zemědělství. Měření přírodního radioaktivního záření, které vykazují všechny půdy, lze využít k mapování půdních živin, či fyzikálních vlastností půdy. Gama spektrometrie poskytuje informace do hloubky cca 30 cm. (Lukas et al., 2011; Brant et al., 2020) Znalost půdních vlastností odvozených z měření gama spektrometrem může přinést řadu výhod, jak dokládají výsledky práce Van Egmond et al. (2010). Ti uvádějí výhody v aplikacích jako je variabilní hnojení, kde bylo zaznamenáno až 60 % úspory hnojiv a navýšení výnosu konzumních brambor, variabilní aplikace kompostu, která vedla ke zlepšení půdní struktury a variabilní zpracování půdy, kde došlo ke snížení nákladů na zpracování půdy o 31 % a další. Používány jsou také půdní radary. Jejich fungování je založeno na odrazivosti radarových vln vyslaných do půdy. Změny v této odrazivosti mohou indikovat variabilitu složení půdy, výskyt překážek, nebo obsah vody. (Adamchuk, 2008; Brant et al., 2020)

5.2 Zapojení moderní mechanizace

Jak již bylo řečeno, pro nové zemědělské vývojové směry jsou klíčové informační a komunikační technologie. V této souvislosti jsou stále častěji skloňovány pojmy jako

Internet věcí (IoT), Big data, autonomní systémy a cloudové zpracovávání dat. Od těchto technologií lze očekávat, že podpoří další vývoj Smart farmingu a mají potenciál zvýšit zemědělskou produktivitu do roku 2050 až o 70 %. (Wolfert et al., 2017; Brant et al., 2020) Pojem Internet věcí vznikl na základě rostoucího počtu propojených produktů, označovaných také jako smart. IoT bezdrátově spojuje jednotlivé objekty a zařízení a umožňuje jim vzájemné interakce. Nabízí množství dat přístupných v reálném čase takřka odkudkoliv, což zemědělcům otevírá zcela nové možnosti řízení procesů. (Porter a Heppelmann, 2014) Big data je fenoménem široké škály velkého množství dat, která mohou být získána, analyzována a použita v rozhodovacích procesech. (Wolfert et al., 2017) Objem získaných dat může být často nad rámec konkrétní potřeby nebo chápání. Historicky nebyl problém data získávat, ale porozumět jim a souvislostem s nimi spojeným. Teprve moderní výpočetní technika v kombinaci s řadou výzkumných prací zaměřených na interpretaci těchto získaných dat s nimi umožnila efektivně pracovat. Moderní senzory a monitorovací zařízení umožňují sledovat plodiny s vysokou přesností, podávat informace o jejich potřebách (vstupech) a predikovat výnosy (výstupy). (Brant et al., 2020)

Nejvíce využitelná jsou ta data, která jsou získána přímo na místě a v reálném čase. Za tímto účelem jsou prostředky zemědělské mechanizace vybavována telematikou (měřicími senzory a komunikační technikou, která sběr takových dat umožňuje) a pokročilými navigačními systémy v kombinaci s korekčními stanicemi RTK (Real-Time Kinematic). Současná podstata telematiky v zemědělství spočívá v inovaci a modernizaci managementu zemědělské výroby. Ta se zakládá na přesném sledování strojů, jejich pohybu i časovém využití a výkonnosti, a to v reálném čase. Mimo dat o poloze jsou získávána data o rychlosti, spotřebě (paliv i aplikovaných dávek), pracovním režimu stroje, tedy o vstupech a výstupech dané operace. Tento typ komunikace může být oboustranný. Provozní data plynou jedním směrem, zatímco opačným může být zajištěno vzdálené řízení, zasílání aplikačních map, či úpravy nastavení různých parametrů spojených s danou operací. Toto spojení je zajištěno bezdrátovou formou, z níž nejmodernější jsou mobilní komunikační sítě 5G, schopné přenosu velkého objemu dat s krátkou dobou odezvy. (Brant et al., 2020)

Z provozních parametrů měřených během práce stroje lze také vytvářet mapy variability. Parametry, jako je tahová síla, prokluz nebo spotřeba paliva se v rámci pozemku liší. Mezi naměřenými změnami a například vlastnostmi půdy lze nalézt spojitosti. Samotná data o pohybech strojů mohou ukázat zátěž a zhutňování, kterému je půda vystavena. Ze studií

vyplývá, že i nedostatečná pracovní kázeň vnáší na pozemek variabilitu, kterou lze takto zachytit.

V rámci přístupu k variabilním podmínkám pozemku lze, jak uvádí Zhang et al. (2002), mluvit o dvou postupech: mapově založený postup a senzorově založený postup. Postup založený na mapách vyžaduje síťový odběr vzorků, jejich laboratorní analýzu, vytvoření map ze zjištěných vlastností a konečně využití těchto map k řízení variabilního aplikátoru. Požadavkem přitom je přesné zaznamenávání polohy. Při tomto postupu je měření vlastností a reakce na ně oddělené delším časovým horizontem. To dovoluje i hlubší analýzu dat, ovšem může přinášet problémy, co se týče včasnosti následného zásahu. Tento postup je vhodnější ke sledování faktorů, které se příliš rychle nemění v průběhu vegetačního období. Druhý postup založený na senzorech, měří vlastnosti půdy či vegetace v reálném čase a přímo ovládá variabilní aplikátor na základě vykonaných měření. Tento způsob lze označovat jako reaktivní. Rozhodování v reakci na dané podmínky probíhá okamžitě. Jako takový je tento způsob vhodný zejména pro ty aplikace, kde se vlastnosti v průběhu vegetace mohou měnit a je třeba na ně rychle reagovat. Oba postupy mají své opodstatnění, zvláště pro výzkumné účely je vhodné je využívat souběžně. (Zhang et al., 2002; Kroulík et al., 2019)

5.2.1 Optické senzory

Senzorové vybavení zemědělských strojů je předmětem neustálého vývoje. Pro aplikace precizního zemědělství jsou vyhledávány nízkonákladové robustní systémy, schopné snímání v reálném čase. Senzorové vybavení lze rozdělit do skupin podle účelu na: výnosové senzory, půdní senzory, plodinové senzory a senzory anomálií (převážně plevelů). (Zhang et al., 2002)

Plodinové senzory jsou nejčasněji založené na snímání, vyhodnocení a následné interpretaci snímků. Patří mezi ně mimo jiné například optické senzory, LIDAR, laser, termometry a 3D scannery. Optické senzory využívají odrazivosti elektromagnetických vln od snímaného objektu (v tomto případě půdy nebo rostlin). Pracovat mohou v široké škále pásem elektromagnetického záření, od viditelného světla (VIS), přes blízké infračervené (NIR), střední infračervené (MIR) a dalších. Jedná se o nedestruktivní metody měření spektrálního chování půdy či vegetace, které bylo již mnoha studiemi spojeno s jejich vlastnostmi. Tyto senzory s výhodou pracují tzv. „on-line“. Příkladem použití optických senzorů je variabilní dávkování hnojiv na základě stavu porostu. (Zhang et al., 2002; Halounová a Pavelka, 2008; Lukas et al., 2011; Brant et al., 2020)

Optických senzorů je na trhu celá řada. Všechny používají viditelnou a blízkou infračervenou část spektra, ale konkrétní použité vlnové délky se liší podle výrobce a modelu. Z těchto naměřených vlnových délek se následně stanovují vegetační indexy. (Brant et al., 2020)

Za senzory anomálií považuje Zhang et al. (2002) sensorovou a výpočetní techniku schopnou mapovat zaplevelení. Systémy pro pozemní detekci plevelů lze rozdělit na skupinu, která za pomoci senzorů monitoruje množství biomasy v dané části půdního bloku, druhá skupina zastupuje metody, při kterých je oblast snímkována a tyto snímky jsou podrobně analyzovány. První skupina systémů může vycházet například z analýzy odrazivosti k určení přítomnosti zelené vegetace. Na základě této analýzy pak mohou být ovládány trysky postřikovače. (Wartenberg a Dammer, 2002; Brant et al., 2020) Jedná se o rychlý a jednoduchý způsob, často používaný on-line bez ukládání dat. Druhá skupina uplatňuje podrobnou analýzu snímků, přičemž využívá algoritmů nejen k odlišení plevelů od plodin, ale také k určení druhu plevelů nebo alespoň jejich skupiny. Jedná se o náročný a zdlouhavý způsob, ale na jeho základě lze tvořit mapy zaplevelení. Tento způsob také umožňuje použití konkrétních herbicidů. (Gerhards et al., 2000; Brant et al., 2020)

5.3 Využití robotů

Zemědělství je neustále se vyvíjejícím odvětvím s vysokými nároky na zdroje a pracovní sílu. Počty pracovníků v zemědělství přitom v České republice stále ubývají. Ve snaze čelit těmto problémům a zároveň plnit požadavky na ochranu životního prostředí se zemědělci snaží implementovat nové technologie a postupy. V tomto směru se jeví rozvoj automatizace a robotizace jako další očekávaný krok od mechanizace. Samotná mechanizace byla přitom označována americkou National Academy of Engineering jako sedmý největší úspěch dvacátého století, což významnost tohoto kroku ještě vyzdvihuje. (Constable a Somerville, 2003; Nof, 2009) Nástup zemědělských robotů má potenciál zvýšit kvalitu produkce, snížit náklady, snížit požadavky na lidskou práci a kompenzovat nedostatek pracovní síly. (Bechar, 2010; Bechar a Vigneault, 2017)

V kombinaci s pokročilou sensorovou technikou, navigačními systémy a strojním viděním mohou být roboty využity pro management řady polních prací od zpracování půdy, sledování stavu porostů a chemických aplikací, až po stanovení parametrů pro sklizeň. (Brant et al., 2020)

Auat Cheein a Carelli (2013) určili čtyři nejvíce důležité skupiny schopností autonomních robotů: navádění (způsob, jakým se robot naviguje), detekce (schopnost získávání informací), akce (schopnost vykonávat zadané úkoly), mapování (vytváření map zájmových oblastí). Roboty pro zemědělské účely lze rozdělit do dvou hlavních skupin: monitorovací a pracovní.

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, monitoring porostů je důležitou součástí precizního zemědělství. Různé přístupy nabízí různé výhody. Robotické systémy kombinují přednosti optických senzorů, blízkosti terénního průzkumu a pokročilé výpočetní techniky, přičemž díky své vysoké míře autonomie šetří lidskou práci. Díky své blízkosti k porostu pracují s daleko větším prostorovým rozlišením než například bezpilotní prostředky. To jim umožňuje analýzu porostu na úrovni jednotlivých částí rostlin.

Autonomní robotické systémy mohou zastávat řadu polních prací. Mimo monitoringu mohou být použity k chemickým aplikacím, zpracování půdy nebo ke sklizni. Vzhledem k vysokému potenciálu robotických systémů jsou tyto aplikace intenzivně zkoumány. Pokroky v programování umožňují robotům zastávat i manuálně náročnější nestandardizované úkony, jako je sběr ovoce nebo zeleniny, selektivní likvidace plevelů a snímání jednotlivých rostlin, dříve vyhrazených pro lidské pracovníky. (Decker et al., 2017)

Řada prací demonstrovala rozličné aplikace robotů v zemědělství. Navržené stroje se liší zvolenými cíli, designem a konstrukcí, ale také přístupem, použitými metodami, technologiemi a senzory. Klíčová je přitom schopnost spolehlivě plnit úkoly v neustále se měnících podmínkách, aniž by byly ohroženy výsledky dosud vykonané práce. Důraz je přitom kladen na bezpečnost lidí, ochranu životního prostředí a nízkou nákladovost systémů. (Bechar a Vigneault, 2016; Bechar a Vigneault, 2017)

Přes vyhlídky do budoucna je vývoj robotů použitelných v polních podmínkách stále ve svých počátcích. Aby mohly být robotické systémy začleněny do zemědělské výroby, je třeba překonat výzvy, jako je detekce překážek ve velmi proměnlivém prostředí, ve kterém se mohou pohybovat lidé, navádění v řádcích, samotná detekce plodin (nebo plevelů), vlastní vyměřování variabilního dávkování, pohyb mimo pole (na pozemních komunikacích), komunikace a její zabezpečení a další. Očekává se, že robotika bude mít komplexní etické, legislativní i sociální dopady. V současné době je tedy mimo technické stránky řešena také legislativní stránka nasazení robotů. (Reina et al., 2016; Marinoudi et al., 2019; Brant et al., 2020)

6 Návrhy vhodných agrotechnických opatření v souladu s technickými možnostmi aplikační techniky

6.1 Variabilní ošetření porostu na základě monitoringu

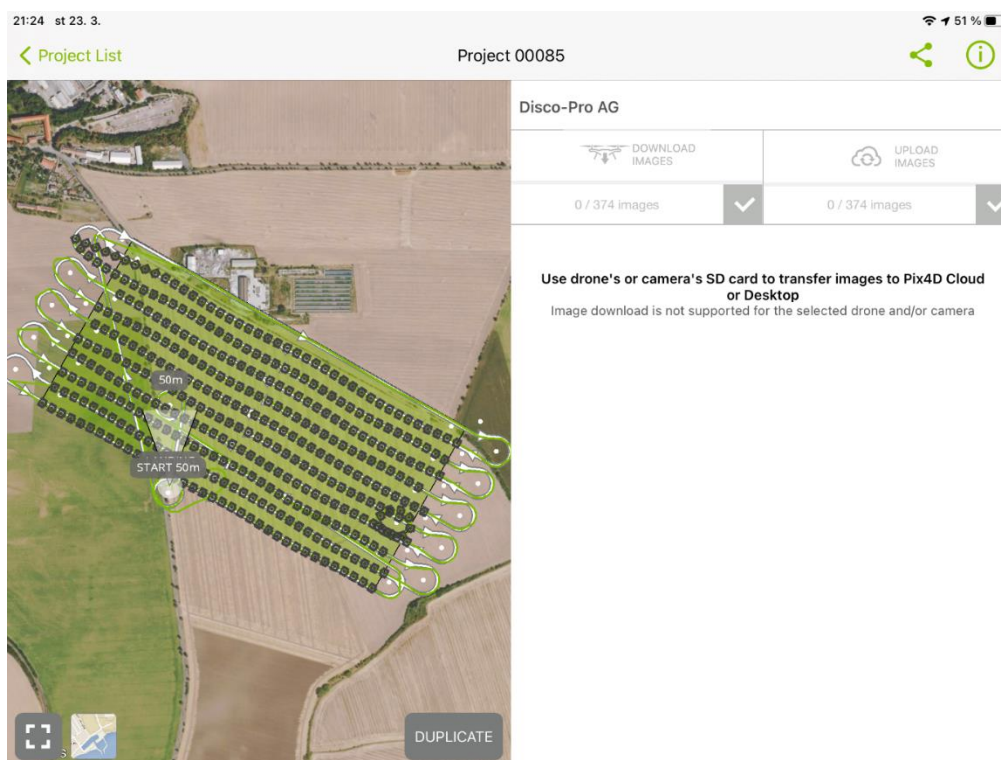
Monitoring porostu poskytuje informace pro variabilní zásahy, zatímco moderní aplikační technika dovoluje tyto zásahy provádět. Variabilní zásahy jsou jedním z nástrojů precizního zemědělství k dosažení cíle zefektivnění materiálových vstupů. Variabilní aplikace hnojiva či ochranných prostředků také splňuje požadavky na ochranu životního prostředí. (Karásková, 2021)

Snížení spotřeby těchto vstupů také přináší nezanedbatelné úspory. Jsou-li například detekována problémová místa v rámci pozemku v kontrastu s místy zcela bez problémů, je možné aplikovat ochranné prostředky pouze tam, kde jsou potřeba v porovnání s celoplošně stejnou dávkou. Moderní postřikovače jsou pro účely variabilních aplikací vybaveny ovládatelnými sekcemi, nebo dokonce možnostmi ovládat jednotlivé trysky. Dále jsou řešeny kompenzace při zatačení (nevyrovnanost vzniklá například rozdílnou obvodovou rychlostí ramen). V kombinaci s aplikačními mapami, které byly vytvořeny na základě dat monitoringu, je tedy možné provádět „správné zásahy na správném místě, se správnou intenzitou a ve správný čas“. (Lukas et al., 2011; Mulla, 2013)

6.1.1 Metodika

Pomocí bezpilotního prostředku Parrot Disco-Pro AG bude nasnímán pozemek 6601/6 s porostem řepky o výměře 28,98 ha, která byla poškozena hrabošem polním. Analyzována bude možnost úspory na základě variabilního zásahu oproti celoplošnému. Snímky porostu byly pořízeny multispektrální kamerou Parrot Sequoia. Pro stanovení míry poškození a lokalizace ohnisek bude použit vegetační index NDVI. Tento index je vhodný díky své schopnosti rozlišit mezi vegetací a půdou (viz kapitola 4.3.2).

Obrázek 12: Ukázka letového plánu nad pozemkem 6601/4 a částí pozemku 6601/6



Zdroj: Kroulík

Na obrázku 14 je zobrazen letový plán v aplikaci Pix4Dcapture. Po definici zájmové plochy a požadované letové výšky program vytvoří optimální letové dráhy tak, aby byla plocha pokryta snímky v požadovaném překrytí a kvalitě. Program také automaticky provádí předletovou kontrolu. Protože se jedná o mobilní aplikaci, je možné vše sledovat a kontrolovat pomocí chytrého mobilního telefonu.

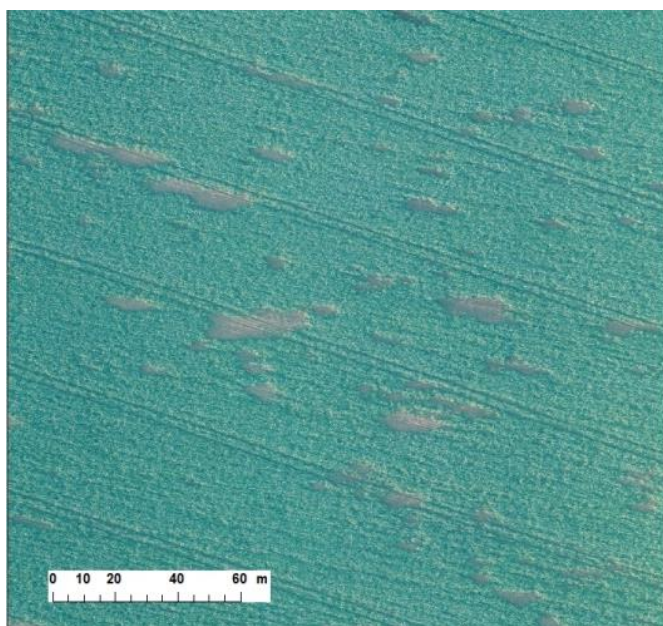
Obrázek zájmové plochy byl složen v programu Pix4D z jednotlivých fotografií pořízených během přeletu nad pozemkem (obrázek 15). Poškození porostu je patrné ihned z tmavých skvrn značících absenci porostu. Detail na obrázku 16 dokládá velikost poškozených ploch. Cílem zpracování snímku bude aplikační mapa, na které budou tyto plochy vyseparovány. Tuto mapu pak bude možné převést do terminálu postřikovače s s možnostmi variabilní aplikace.

Obrázek 13: Snímek porostu řepky na pozemku 6601/6 v nepravých barvách pořízený bezpilotním prostředkem Parrot Disco-Pro AG



Zdroj: Kroulik

Obrázek 14: Detail ukazující míru poškození. Přiložené měřítko dokládá velikost poškozených ploch



Zdroj: Kroulik

6.1.2 Parrot Disco-Pro AG

Bezpilotní prostředek Parrot Disco-Pro AG je multifunkční UA vhodné pro zemědělské využití. Jedná se typ pevného křídla s tlačnou vrtulí. K základnímu vybavení letounu patří snímač Parrot Sequoia. Ten v sobě zahrnuje multispektrální senzor snímající zelené, červené, red edge a blízké infračervené pásmo spolu se slunečním senzorem. Sluneční senzor umožňuje provádět radiometrickou kalibraci pro zajištění konzistentního měření. Pro práci s tímto UA je k dispozici balíček aplikací Pix4D. Plánování misí je možné v mobilní aplikaci Pix4Dcapture, která pro zájmovou oblast vytvoří optimální letový plán. V Pix4D je také možno zpracovat pořízené snímky.

Obrázek 15: Parrot Disco-Pro AG, který využívá KZS TF ČZU



Zdroj: Kroulík

6.1.3 Naměřená data

Multispektrální data z pozemku byla pořízena 29.10.2020. Prostorové rozlišení snímků bylo 12,7 cm/pix. Tato data byla zpracována do podoby vegetačního indexu NDVI v programu ArcGIS 10.7. Díky charakteru odrazivosti porostu a půdy v červeném (RED) a blízkém infračerveném (NIR) pásmu lze tyto povrchy od sebe indexem odlišit. Vegetace se projeví vyššími hodnotami NDVI, zatímco holá půda nižšími (viz kapitola 4.3.2).

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

Výsledný zpracovaný snímek (obrázek 18) ukazuje vyšší hodnoty NDVI jako světlejší a nižší hodnoty jako tmavší odstín šedi. Na okolních polích je zřetelné, že plochy holé půdy jsou černé. Černá se objevuje i ve skvrnách v porostu, což indikuje poškození. Pro tvorbu aplikační mapy následoval proces převodu rastrového formátu na vektorový. Určeny byly mezní hodnoty pro vyloučení příliš malých ploch.

Obrázek 16: Vegetační index NDVI pozemku 6601/6

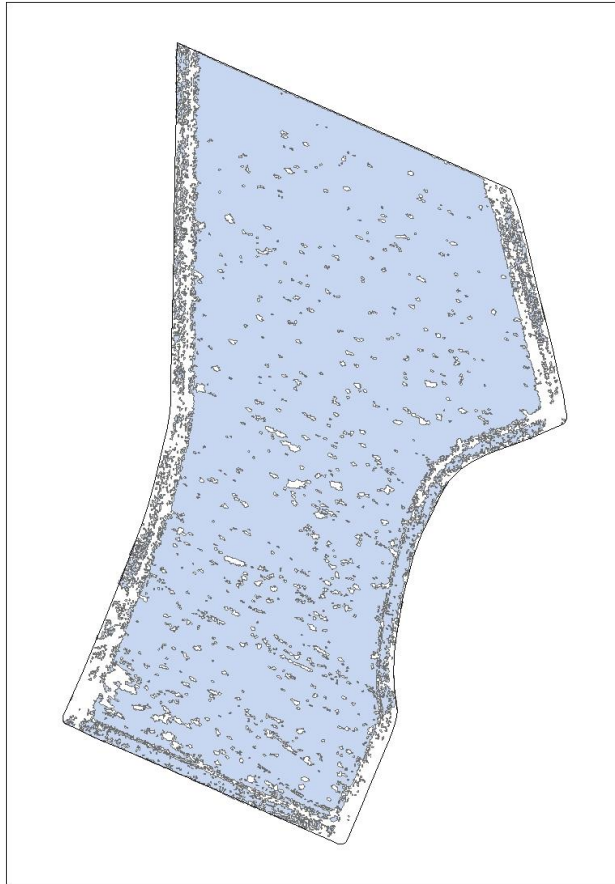


Zdroj: Kroulik

Analýzou snímku byla stanovena úroveň poškození, která činila 15 % z celkové plochy pozemku. Mimo poškození hrabošem polním se do celkové úrovně promítlo i poškození na souvratích, kde dochází ke kombinaci škodlivých činitelů.

Výsledkem převodu na vektorový formát a vyloučení malých ploch je polygon, který je zároveň aplikační mapou (obrázek 19). Ohniska poškození byla jasně ohraničena. Takto vytvořenou aplikační mapu lze převést do terminálu postřikovače. Jasně odlišené poškozené plochy od ploch nepoškozených dovolují podle zvolené aplikace ošetřovat pouze porost, nebo pouze ohniska poškození.

Obrázek 17: Polygon s ohraničenými ohnisky poškození



Zdroj: Kroulik

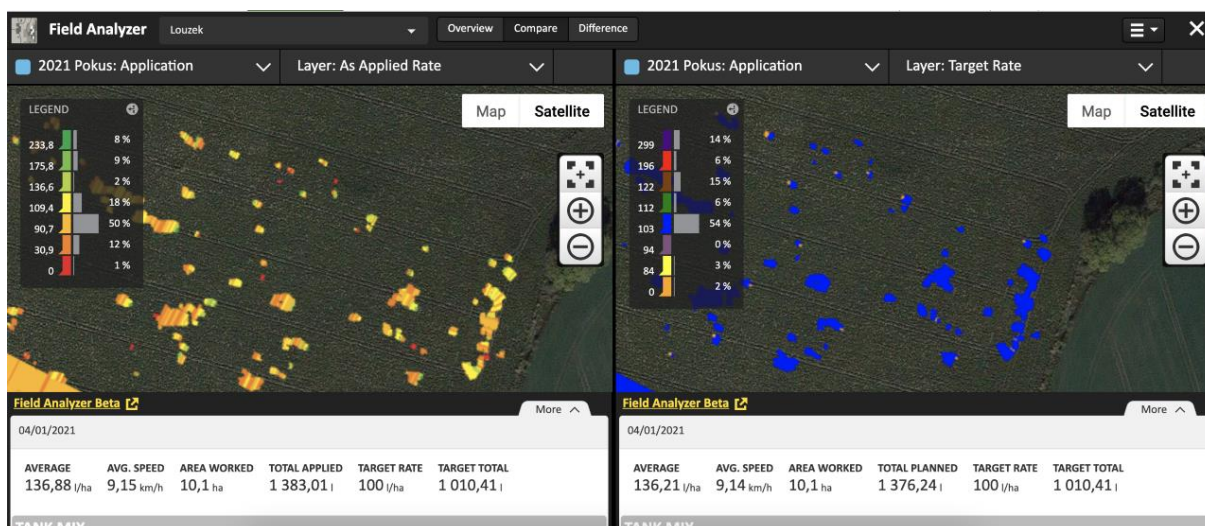
Pro selektivní ošetření porostu byl použit samojízdný postřikovač John Deere R4150i s vybavením ExactApply. Postřikovač při práci je zobrazen na obrázku 20. Tento stroj je schopen nejen automaticky nastavovat výšku a geometrii ramen podle terénu, je také schopen variabilních dávek dle nahraných aplikačních map. Řízení dávkování zajišťuje systém GreenStar 3, který je ve standardní výbavě. Zapínání a vypínání jednotlivých trysek je dobře zřetelné díky osvětlení ramen. Záznam z aplikace může sloužit pro další práci s daty (viz obrázek 21).

Obrázek 18: Postřikovač John Deere R4150i během selektivního ošetření porostu



Zdroj: Kroulik

Obrázek 19: Záznam z aplikace v rozhraní Field Analyzer



Zdroj: Kroulik

6.1.4 Zhodnocení

Práce demonstrovala využití bezpilotních prostředků při tvorbě aplikačních map. Získaná vysoce aktuální data jsou pro tento účel mimořádně vhodná. Tyto mapy jsou klíčové při lokálně cíleném ošetřování porostů. Využití moderních technologií má potenciál vést k výrazným úsporám. V uvedeném případě byla identifikována poškozená plocha 15 % z celkové plochy pozemku.

V rámci ekonomického zhodnocení byly provedeny kalkulace úspor spojených s aplikací ochranných přípravků a hnojiv pouze na porost, tedy s vynecháním poškozených

míst. Vybrány byly takové přípravky a hnojiva, která bylo možno aplikovat postřikovačem John Deere R4150i. Při aplikaci přípravku Propulse (přípravek proti hlízelce obecné) by celoplošná dávka na celých 28,98 ha pozemku stála přibližně 50 752,96 Kč (pouze za přípravek). Při vynechání poškozených míst, tedy 15 % plochy, dochází k úspoře 7 612,94 Kč. Spolu s použitím smáčedla Silwet Star se tedy úspora za ošetření pohybuje okolo 8 268,90 Kč. Další vybrané přípravky jsou v tabulce 2. Při aplikaci hnojiv je situace podobná. Kalkulace za vybraná hnojiva je v tabulce 3.

Je nutno podotknout, že tyto kalkulace počítají s jednotnou dávkou přípravku na celé ploše nepoškozeného porostu. Při zmapování plevelů a určení ekonomických prahů škodlivosti je možné dále ušetřit vytvořením aplikačních map s aplikací přípravků pouze na místa s výskytem plevelů. Stejně tak může být variabilní aplikace hnojiv na základě zjištěných deficitů. K obou těmto postupům lze s výhodou použít bezpilotní prostředky.

Tabulka 2: Vybrané přípravky chemické ochrany řepky olejky

Přípravky na ochranu rostlin								
Přípravek	Dodavatel	Účel	Dávka [l/ha]	Plocha [ha]	Celkové množství [l]	Cena za litr [Kč]	Cena při celoplošné aplikaci [Kč]	Úspora při variabilní aplikaci [Kč]
Propulse	Bayer	Hlízelka obecná	0,99	28,98	28,69	1 769,00	50 752,96	7 612,94
Silwet Star	UPL	Smáčedlo	0,10	28,98	2,90	1 509,00	4 373,08	655,96
Teppeki	Belchim	Mšice broskvoňová	0,09	28,98	2,61	7 279,00	18 985,09	2 847,76
VOODO	BASF	Krytonosci	0,10	28,98	2,90	1 249,00	3 619,60	542,94
DelCaps 050 CS	INNVIKO	Krytonosci	0,10	28,98	2,90	639,00	1 851,82	277,77

Zdroj: (RWA Czechia, s.r.o., 2022), Kroulík

Tabulka 3: Vybraná hnojiva pro řepku olejku

Hnojiva							
Přípravek	Dodavatel	Dávka [l/ha]	Plocha [ha]	Celkové množství [l]	Cena za litr [Kč]	Cena při celoplošné aplikaci [Kč]	Úspora při variabilní aplikaci [Kč]
BOROSAN Forte	ADAMA	0,41	28,98	11,88	105,00	1 247,59	187,14
RETAFOS prim	AGRA GROUP	0,84	28,98	24,34	117,00	2 848,15	427,22
Síra 165	AGRA GROUP	0,41	28,98	11,88	41,00	487,15	73,07
Bór 150	AGRA GROUP	0,50	28,98	14,49	148,00	2 144,52	321,68
DAM 390	AGRO ZETA	300	28,98	8694,00	5,60*	48 686,40	7 302,96

*cena v roce 2021

Zdroj: (BENAGRO s.r.o., 2022, AGRO ZETA s.r.o., 2021), Kroulík

6.2 Variabilní výška strniště při sklizni kukuřice na siláž

Kukuřičná siláž je nejvýznamnějším sacharidovým krmivem skotu. Tato siláž tvoří největší objem krmné dávky dojnic (až z poloviny podílu sušiny). Představuje významný zdroj energie, která je obsažena v cukrech, škrobu a vláknině. Kvalita kukuřičné siláže proto hraje zásadní roli pro dojnice při dnešních požadavcích na zvyšování užitkovosti. Při zohlednění omezení v podobě kapacity trávícího traktu skotu je pro tvorbu kvalitního krmiva tedy klíčová koncentrace energie. Kvalitní krmivo je tak základním kamenem ekonomické výroby mléka. (Otrubová, 2018) Důležité je ale také zohlednit úroveň stravitelnosti složek. Ta může být ovlivněna klimatickými faktory, agronomickými okolnostmi (zvolený hybrid a stádium sklizně) a technologií sklizně a silážování. Stravitelnost lze zlepšit například narušením zrna (kukuřičné adaptéry corn-cracker). (Poštulka a Folta, 2020)

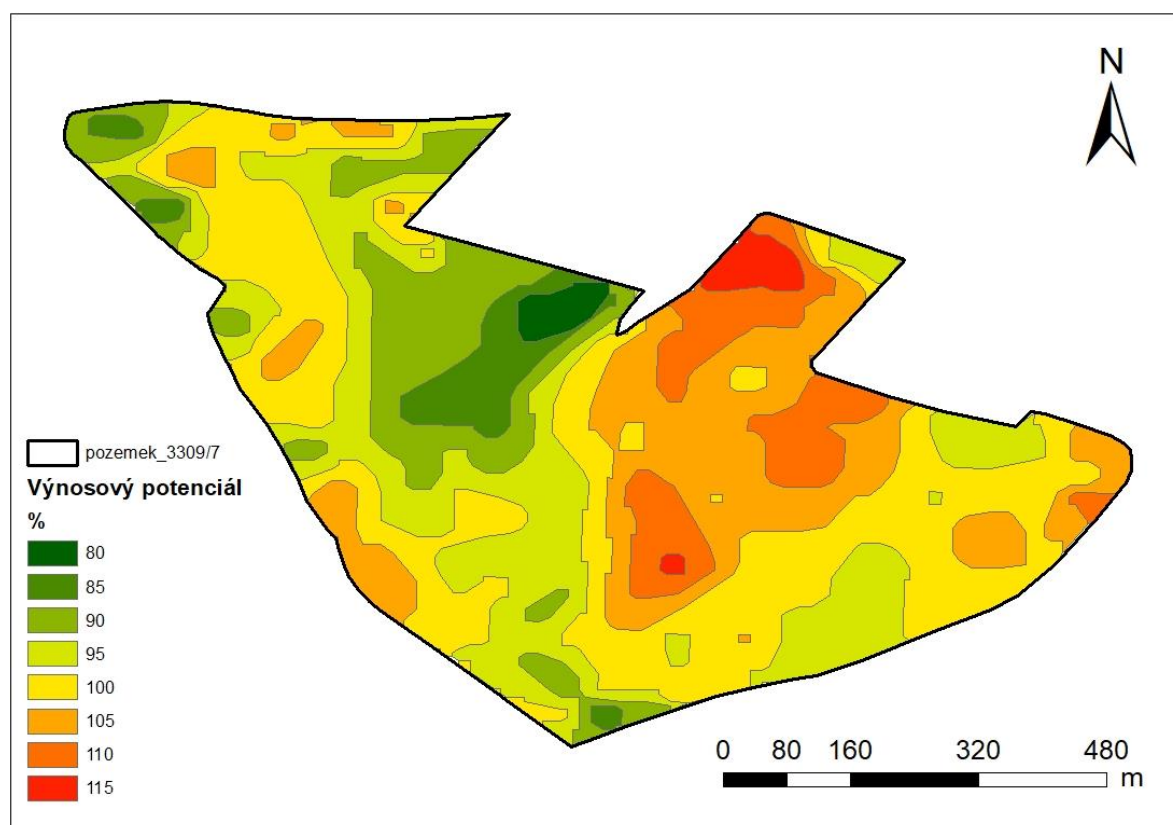
Kvalitu siláže lze ovlivnit výškou strniště. Ta totiž ovlivňuje koncentraci živin a obsah ligninu. S výškou strniště koncentrace živin roste a obsah ligninu se zmenšuje. Lignin je sice podstatný z hlediska své úlohy v pevnosti a tuhosti stébla, ovšem pro zvířata je prakticky nestravitelný. Lignin dále snižuje stravitelnost využitelných složek vlákniny, čímž snižuje kvalitu krmiva. (Tyrolová, 2021)

6.2.1 Metodika

Během pokusu byly během sklizně měřeny parametry siláže kukuřice. Byl sledován vliv výšky strniště na kvalitu siláže. Pokus byl prováděn na pozemku 3309/7 o výměře 35,1 ha. Sklizeň proběhla od 18.10.2021 do 19.10.2021. Na části pozemku byla měněna výška strniště. Zvoleny byly výšky 15, 30, 45, 60 a 75 cm. Naměřené hodnoty z této části byly porovnány s hodnotami ze zbytku pozemku, které sloužily jako základní linie.

K měření kvality siláže byl použit senzor HarvestLab firmy John Deere osazený na sklízecí rezače John Deere 9600i. Data byla spojena s mapou výnosového potenciálu (obrázek 22). Pro variabilní výšku strniště zasahovala data s uspokojivou četností do oblastí výnosového potenciálu 85, 90, 85 a 100 %, zbytek pozemku se pohyboval od 80 do 115 % (viz obrázek 23).

Obrázek 20: Mapa výnosového potenciálu pozemku 3309/7



Zdroj: Kroulik

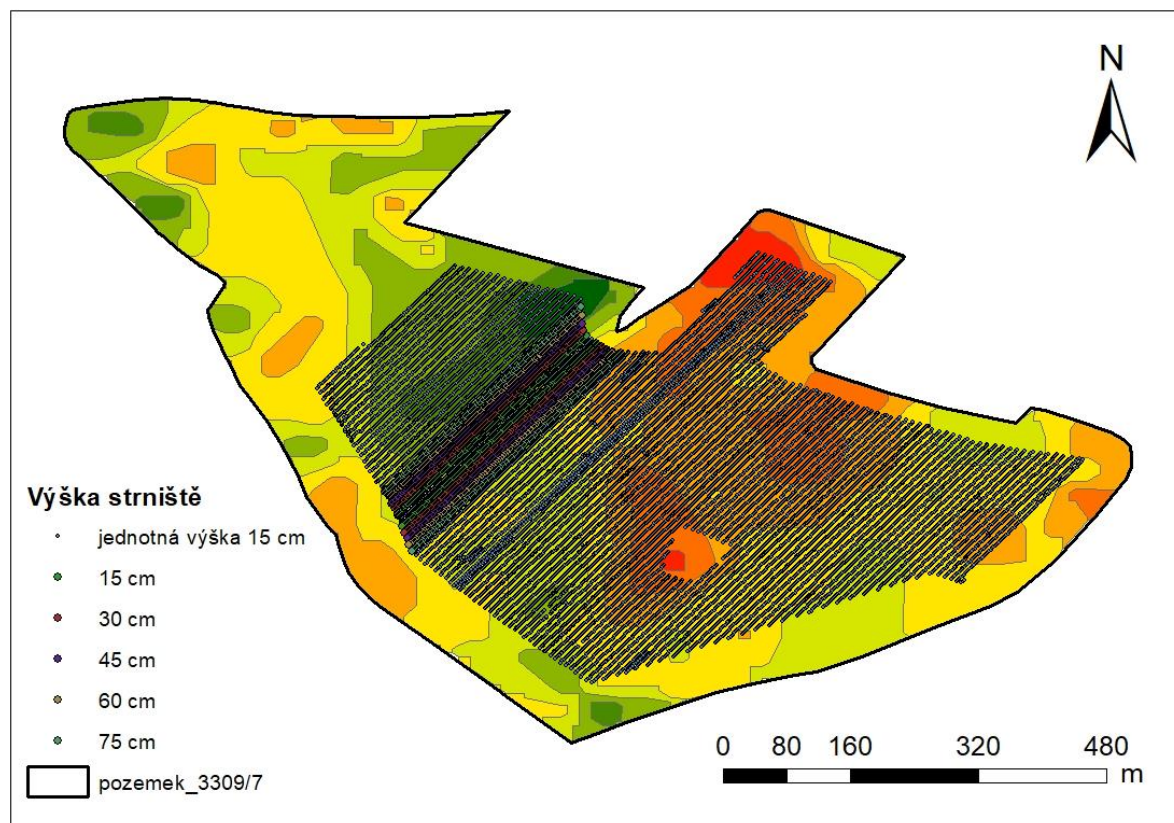
6.2.2 HarvestLab

Senzor HarvestLab využívá blízké infračervené spektroskopie k analýze sklizených plodin, siláže nebo kejdy. Získávají jsou hodnoty sušiny, cukru, dusíkatých látek, vlákniny, NDF a ADF složek a popelovin. Využití tohoto senzoru nese řadu výhod. Největší výhodou je, že odpadá potřeba zdlouhavé laboratorní analýzy vzorků. Díky vysoké frekvenci snímání jsou tato data získána na každých zhruba 50 kg siláže. Výhodou je také možnost práce s daty v reálném čase, což například umožňuje úpravu nastavení stroje přímo na poli. HarvestLab může být také využit jako přenosná laboratoř. (John Deere 2022)

6.2.3 Naměřená data

Výstupem senzoru HarvestLab byla tabulka dat, která obsahovala jak údaje o parametrech siláže, tak i údaje o pohybu stroje na pozemku. Do získaných parametrů siláže patřil výnos v t/ha, čerstvá hmota v t/ha, vlhkost v %, obsah škrobu v %, obsah cukru v %, ADF a NDF v % a obsah dusíkatých látek v %.

Obrázek 21: Dráhy pohybu sklízecí řezačky John Deere 9600i spolu s měřenými body a vyznačená oblast variabilní výšky strniště

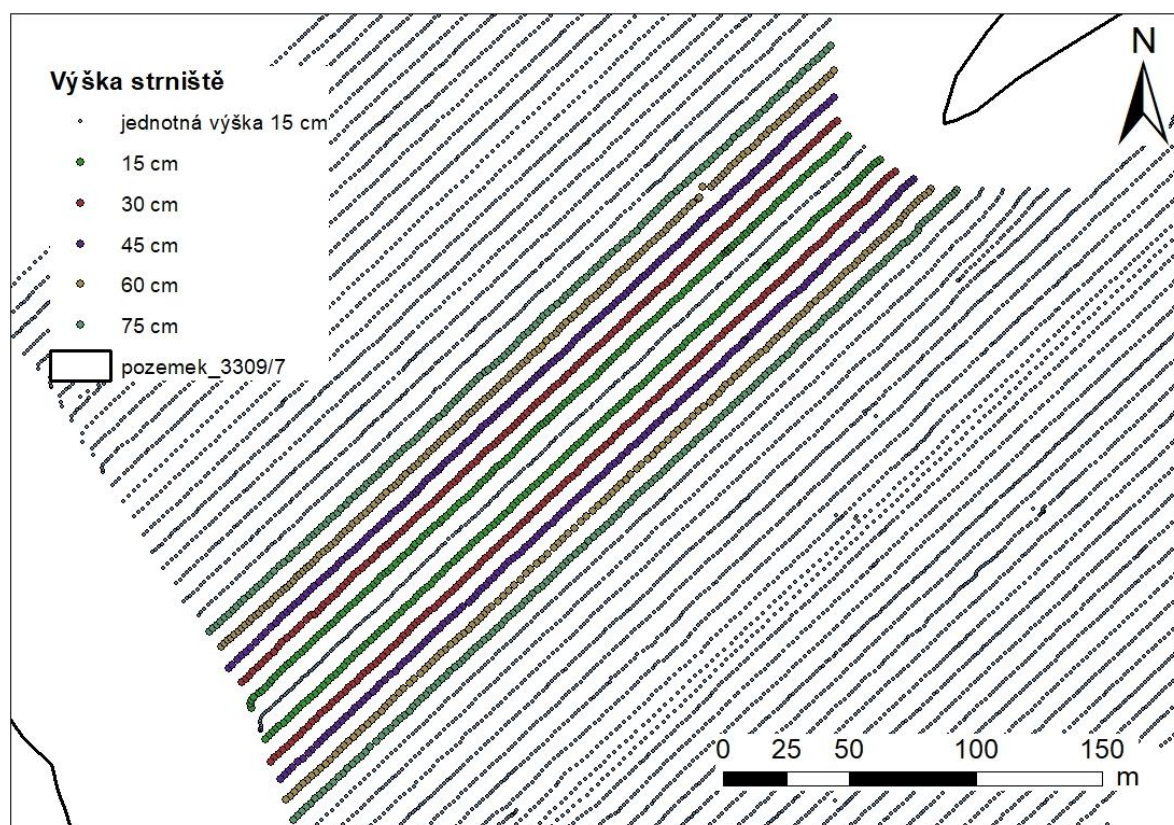


Zdroj: Kroulík

Z naměřených dat byla pro analýzu vyřazena data ze souvratě, neboť hodnoty z míst otáčení stroje by zkreslovaly výsledky. V rámci analýzy byly také vyříděny extrémy spojené s chybami v záznamu. Pro názornost je na obrázku 23 výsledná mapa analyzovaných bodů překrytá přes mapu výnosového potenciálu.

Malé body označují měřené body v základním nastavení jednotné výšky strniště, která byla 15 cm. Silnější body různých barev označují rozdílné zvolené výšky strniště, 15, 30, 45, 60 a 75 cm (viz obrázek 24). Pro každý z těchto bodů poskytl HarvestLab data o kvalitě siláže. Pro posouzení kvality siláže budou vybrány tři hlavní parametry, obsah škrobu v %, obsah NDF a ADF vláknin v %.

Obrázek 22: Detail oblasti s variabilní výškou strniště



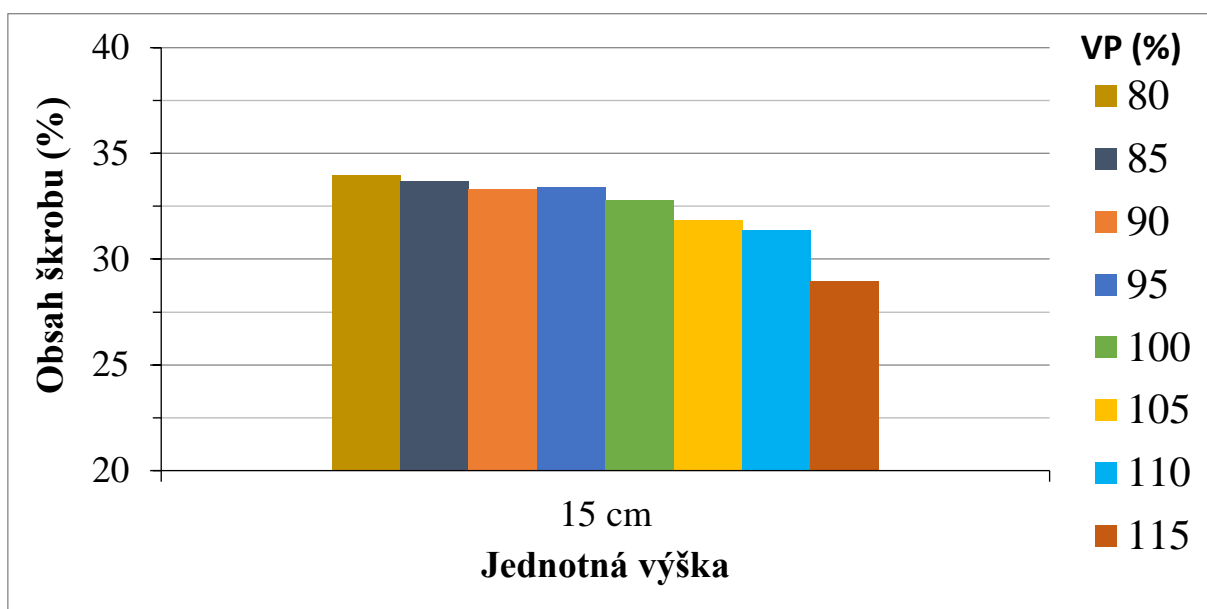
Zdroj: Kroulik

Detail (obrázek 24) ukazuje rozložení rozdílných výšek strniště na pozemku.

Graf 1 ukazuje závislost mezi výnosovým potenciálem (VP) a obsahem škrobu. S vyšším výnosovým potenciálem klesá procentuální obsah škrobu v siláži, protože roste celkový objem siláže, tedy výnos. Při výnosovém potenciálu 80 % dosahuje obsah škrobu 33,96 %, zatímco při výnosovém potenciálu 115 % je to jen 28,94 %.

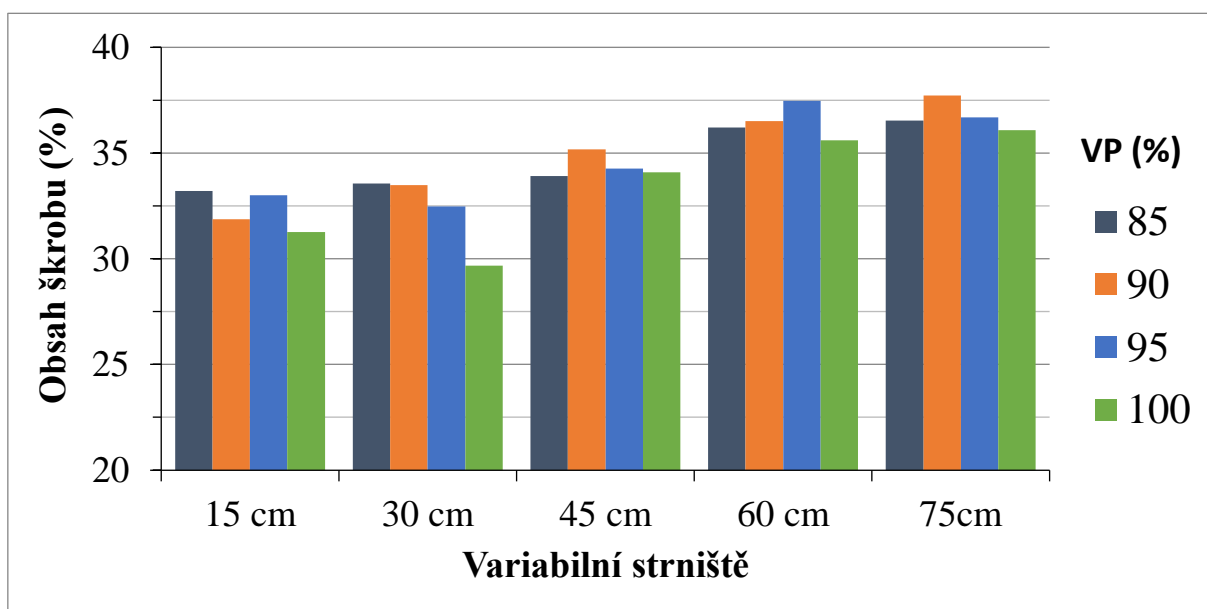
Škrob v kukuřičné siláži hlavním zdrojem energie v krmných dávkách skotu. Jeho obsah je závislý na zralosti zrna a za normálních podmínek se pohybuje mezi 30 a 40 % (záleží ovšem také na zvoleném hybridu a klimatických podmínkách v období vegetace). Škrob jako živina v siláži zajišťuje až 45 % energie. (Tyrolová, 2021)

Graf 1: Závislost obsahu škrobu na výnosovém potenciálu

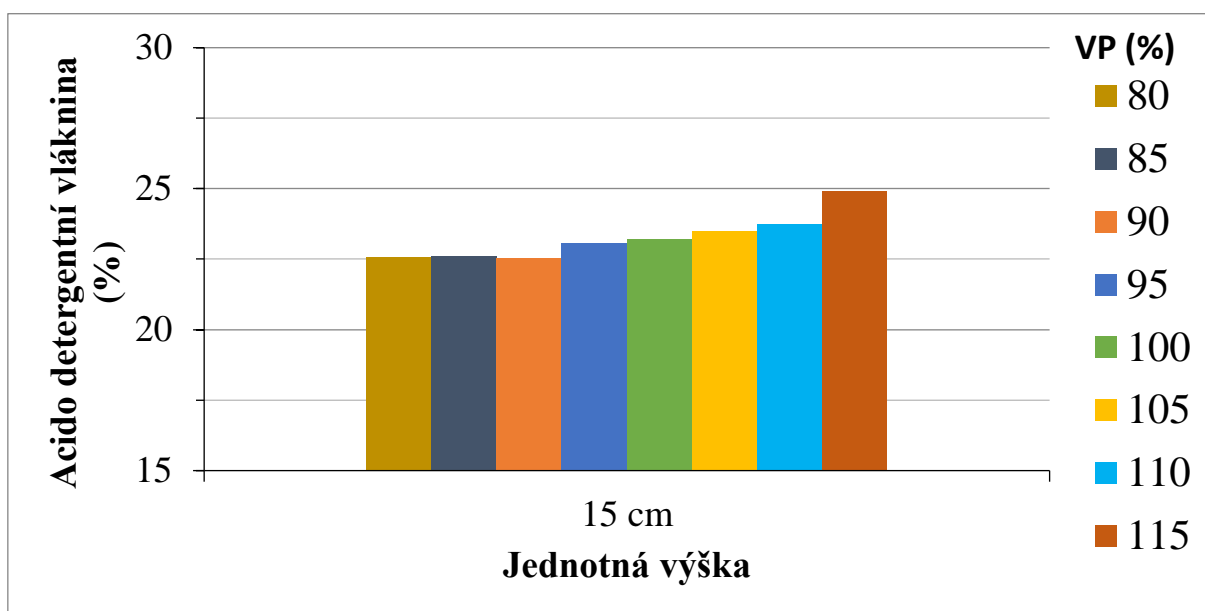


Na grafu 2 je patrné, že s větší výškou strniště narůstá procentuální obsah škrobu (pokles u strniště 30 cm a VP 100 % způsoben menším počtem měření). Zvýšením strniště je tedy možné zvýšit obsah škrobu v siláži napříč výnosovými potenciály.

Graf 2: Závislost obsahu škrobu na výnosovém potenciálu při různých výškách strniště

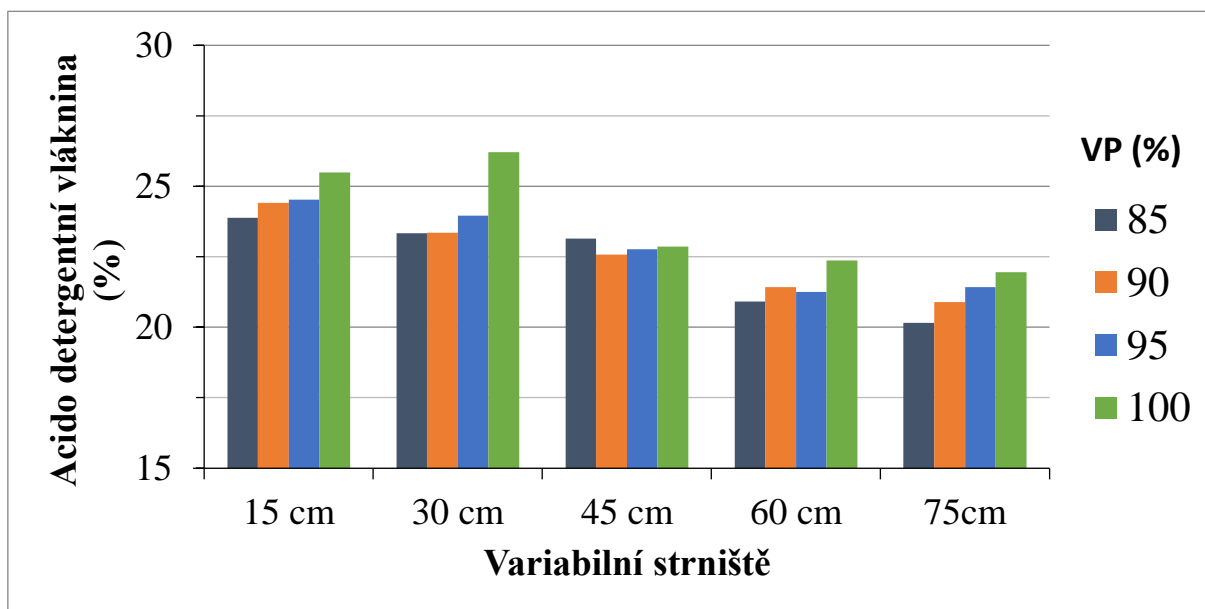


Graf 3: Závislost obsahu Acido detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu



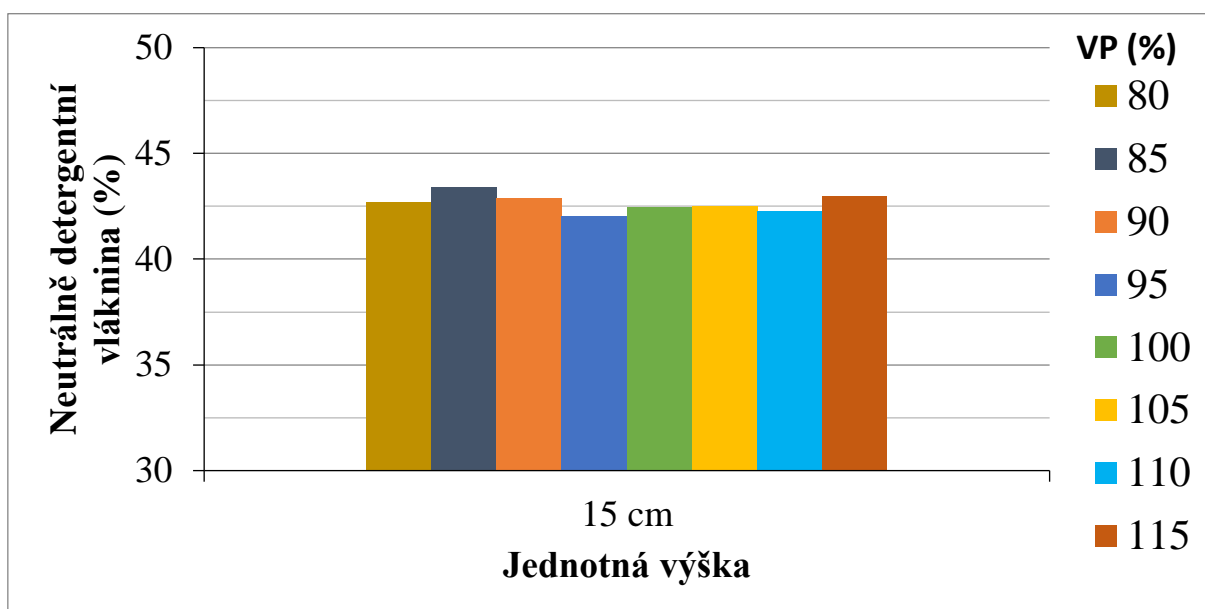
Procentuální obsah ADF (Acido detergentní vlákniny) se napříč výnosovými potenciály pro jednotnou výšku strniště mění od 22,53 % do 24,93 %, tedy v rozmezí 2,4 % (viz graf 3). Obsah této vlákniny se běžně pohybuje od 18 do 24 %. (Otrubová, 2018)

Graf 4: Závislost obsahu Acido detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu při různých výškách strniště



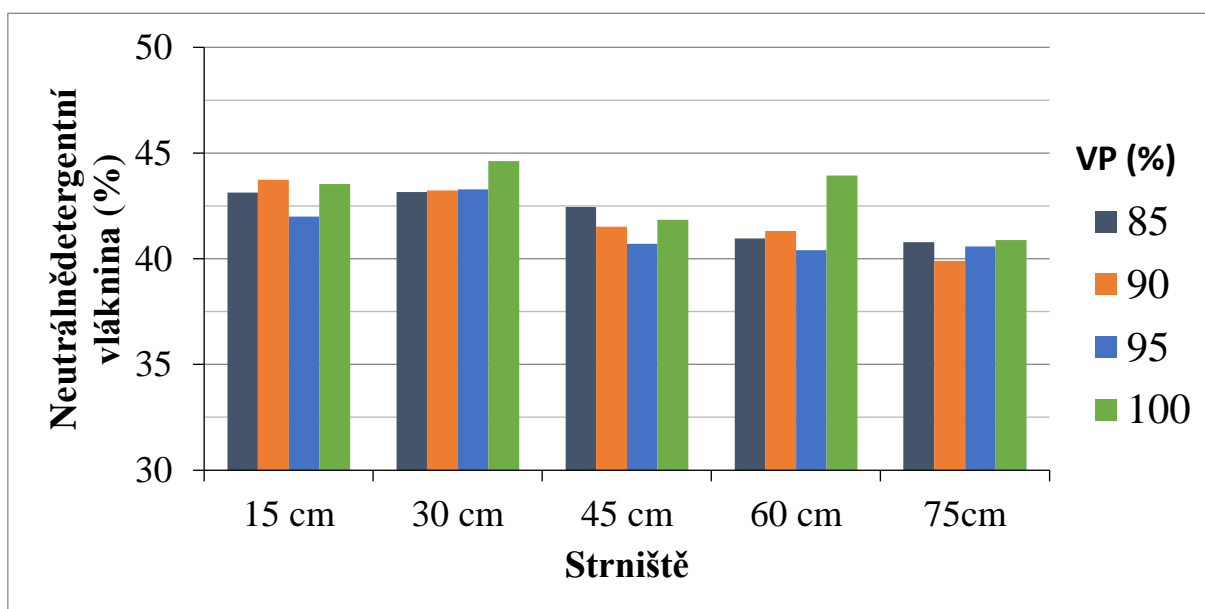
Snižující se obsah ADF, jak je vidět z trendu na grafu 4, lze přisuzovat menšímu podílu stébel v siláži.

Graf 5: Závislost obsahu Neutrálně detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu



Procentuální obsah NDF (Neutrálně detergentní vláknina) se napříč výnosovými potenciály pro jednotnou výšku strniště mění jen minimálně, jak dokládá graf 5. Pohybuje se od 42 do 43,4 %. Běžný obsah NDF se pohybuje od 40 do 50 %. (Otrubová, 2018)

Graf 6: Závislost obsahu Neutrálně detergentní vlákniny na výnosovém potenciálu při různých výškách strniště



Pro variabilní strniště je opět možno sledovat klesající trend podobně jako u ADF (viz graf 6). Zde je však nutno podotknout, že s vyšším strništěm klesá obsah ligninu, který je koncentrován na bázi stébla kukuřice. Lignin snižuje stravitelnost komplexu využitelných složek vlákniny, jeho redukce je tedy žádoucí. (Tyrolová, 2021)

6.2.4 Zhodnocení

Data prokázala, že délka strniště má vliv na kvalitu siláže z hlediska koncentrace živin. Vyšší strniště mělo jednoznačný vliv na obsah škrobu v siláži. S vyšším strništěm sice mírně klesl obsah ADF a NDF, lze však argumentovat, že vyšším strništěm je zajištěn nižší obsah ligninu, obsažená vláknina je tedy stravitelnější, což je z hlediska krmné dávky podstatné. Tato data je možno využít k prokázání kvality siláže, což může být použito jako argument při vyjednání vyšší výkupní ceny. Siláž s vyšším obsahem škrobu, cukru a vlákniny lze z výživového hlediska označit za kvalitnější zejména pro dojnice. Kvalitnější krmivo má potenciál zvyšovat užitkovost.

7 Závěr

V diplomové práci byla nastíněna problematika variability pozemků. Byly zmíněny některé příčiny této variability a proč je vhodné ji monitorovat. Představeny byly současné možnosti monitorování a principy, na kterých pracují. Zvláštní pozornost byla věnována bezpilotním prostředkům a optickým sensorům. Představeny byly příklady využití bezpilotních prostředků, družicových snímků i dat z terénního průzkumu.

Moderní přístupy k hospodaření pracují se znalostmi nevyrovnanosti pozemků a používají je k úpravě pěstebních zásahů dle potřeby. Variabilní aplikace mohou vést k úsporám vstupů i vyšším výnosům, jak dokázala řada výzkumných prací. Optické senzory jsou stále více populární pro monitoring nevyrovnanosti pozemků díky své plošné výkonosti, stále lepšímu prostorovému rozlišení a nízké ceně za pořízená data. Mezi stále více využívaný způsob monitoringu pozemků patří snímkování pomocí bezpilotních prostředků. Ty nabízejí v porovnání s jinými způsoby výhody hlavně v podobě rychlé nedestruktivní analýzy velkých ploch. Právě rychlost může být rozhodující, jedná-li se například o chemickou ochranu porostu či určení optimálního data sklizně.

Monitoring pozemků může být také prováděn s využitím moderní mechanizace. Data získaná během práce strojů mohou být ihned zúžitkována (tzv. režim online). Za tímto účelem byla vyvinuta celá řada sensorového vybavení. Mimo mechanizace se výzkum zaměřil také na využití robotů.

V praktické části této práce byla zpracována data pořízená bezpilotním prostředkem. Hodnoceno bylo poškození porostu řepky hrabošem polním a možnosti variabilního ošetření porostu a hnojení na základě vytvořené aplikační mapy. Práce ukázala, že sběr a využití datových podkladů může vést k menší spotřebě ochranných látek a hnojiv a tím i k úsporám.

Dále byla analyzována data sklízecí řezačky, který byla pořízena během sklizně kukuřice na siláž pomocí senzoru HarvestLab. Data sloužila k porovnání kvality siláže při rozdílných výškách strniště. Z dat vyplynulo, že výška strniště ovlivňuje koncentraci živin a tím tedy kvalitu siláže. Využitím dat naměřených během sklizně lze tuto kvalitu prokázat a ovlivnit tak cenu.

8 Seznam informačních pramenů a použité literatury

ADAMCHUK, Viacheslav I. a ROSSEL, Raphael A. V. 2010. Development of On-the-Go Proximal Soil Sensor Systems. *Proximal Soil Sensing*. 2010, stránky 15-28. ISBN 978-90-481-8859-8

ADAMCHUK, Viacheslav I. 2008. *Development of On Development of On-the-Go. First Global Workshop on High Resolution First Global Workshop on High Resolution*. Sydney, Austrálie: University of Nebraska-Lincoln, 2008.

AGRO ZETA s.r.o. 2021. Aktuální ceník zemědělských hnojiv. *agrozetaservis.cz*. [Online] AGRO ZETA s.r.o., 1. březen 2021. [Citace: 25. březen 2022.] Dostupné z: <https://agrozetaservis.cz/aktualni-cenik-zemedelskych-hnojiv>.

AUAT CHEEIN, Fernando A. a CARELLI, Richardo. 2013. Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2013, Sv. 7, 3, stránky 48-58. ISSN 1941-0115. Dostupné z: doi: 10.1109/MIE.2013.2252957

BARET, Frédéric, GUYOT, G. a MAJOR, D. J. 1989. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 1989, stránky 1355-1358. Dostupné z: doi: 10.1109/IGARSS.1989.576128

BAUER, Marvin E. a CIPRA, Jan E. 1973. Identification of agricultural crops by computer processing of ERTS MSS data. *LARS Technical Reports*. 1973, Sv. Paper 20.

BECHAR, Avital a VIGNEAULT, Clément. 2017. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*. 2017, Sv. 153, stránky 110-128. Dostupné z: doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004

BECHAR, Avital a VIGNEAULT, Clément. 2016. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*. 2016, Sv. 149, stránky 94-111. Dostupné z: doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014

BECHAR, Avital. 2010. Robotics in horticultural field production. *Stewart Postharvest Review*. 2010, Sv. 6, 3, stránky 1-11. Dostupné z: doi: 10.2212/spr.2010.3.11

BENAGRO s.r.o. 2022. Ceníky. *benagro.cz*. [Online] BENAGRO s.r.o., 2022. [Citace: 25. březen 2022.] Dostupné z: https://www.benagro.cz/upload/library/hnojiva_2022_V2.pdf.

BERLANGA-ROBLES, César A. a RUIZ-LUNA, Arturo. 2020. Assessing seasonal and long-term mangrove canopy variations in Sinaloa, northwest Mexico, based on time series of enhanced vegetation index (EVI) data. *Wetlands Ecology and Management*. 2020, Sv. 28, stránky 229-249. Dostupné z: doi: 10.1007/s11273-020-09709-0

BHATTI, Aman U., MULLA, David J. a FRAZIER, Bruce E. 1991. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. *Remote Sensing of Environment*. 1991, Sv. 37, 3, stránky 181-191.

BOSCHETTI, Mirco, BOCCHI, Stefano a BRIVIO, Pietro Alessandro. 2007. Assessment of pasture production in the Italian Alps using spectrometric and remote sensing information. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007, Sv. 118, 1-4, stránky 267-272. Dostupné z: doi: 10.1016/j.agee.2006.05.024

BRANT, Václav a kol. 2018. Půdní blok a jeho parametry ve vztahu k obhospodařování (1) - Obecné principy. [Online] Kurent, s.r.o., 2018. [Citace: 26. leden 2022.] Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/pudni-blok-a-jeho-parametry-ve-vztahu-k-obhospodarovani-1-obecne-principy>.

BRANT, Václav, KROULÍK, Milan, KRČEK, Vítězslav, KRÁSA, Josef, KAPIČKA, Jiří, HAMOUZ, Pavel, LUKÁŠ, Jan, ZÁBRANSKÝ, Petr, ŠKEŘÍKOVÁ, Michaela, ŠKEŘÍK, Josef, JOB, Zdeněk, LANG, Jan a PETRUS, David. 2020. *Implementace principů precizního zemědělství do rostlinné výroby*. České Budějovice: Kurent, s.r.o., 2020. str. 284. ISBN 978-80-87111-81-9.

BURUD, Ingunn, LANGE, Gunnar, LILLEMO, Morten, BLEKEN, Eivind, GRIMSTAD, Lars, FROM, Pål J. 2017. Exploring Robots and UAVs as Phenotyping Tools in Plant Breeding. *IFAC-PapersOnLine*. 2017, Sv. 50, 1, stránky 11479-11484.

CONSTABLE, George a SOMERVILLE, Bob a další. 2003. *A century of innovation: Twenty engineering achievements that transformed our lives*. Washington, DC: Joseph Henry Press, 2003. ISBN 0-309-08908-5

CORWIN, Dennis L., LESCH, Scott M., SCHOUSE, Peter J., SHOPPE, R., AYARS, James E. 2003. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. *Agronomy Journal*. 2003, Sv. 95, stránky 352–364. ISSN 0002-1962

DECKER, Michael, FISCHER, Martin a OTT, Ingrid. 2017. Service Robotics and Human Labor: A first technology assessment of substitution and cooperation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017, Sv. 87, stránky 348-354. Dostupné z: doi: 10.1016/j.robot.2016.09.017

DOBROVOLNÝ, Petr. 2001. Mapování vegetace s využitím družicových snímků. *Výuka krajinné ekologie a DPZ*. [Online] 2001. [Citace: 17. leden 2020.] Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html.

EHLER, William L. 1973. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal*. 1973, Sv. 65, 3, stránky 404-409.

EISENBEISS, Henri. 2011. The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping. [editor] Dieter Fritsch (Ed.). *Photogrammetric Week*. 2011, 11, stránky 135-145.

EISENBEISS, Henri. 2009. *UAV photogrammetry*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, 2009. Disertační práce. Dostupné z: doi: 10.3929/ethz-a-005939264

Evropská komise. 2019. PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel (Text s významem pro EHP). *eur-lex.europa.eu*. [Online] 2019. [Citace: 13. únor 2022.] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=BG>.

FANG, H. a LIANG, S. 2014. Leaf area index models. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2014. Dostupné z: doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.09076-X

GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., TIMMERMANN, C., KROHMANN, P., KÜHBAUCH, W. 2000. Precision Weed Control – more than just saving herbicides. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz: Sonderheft*. 2000, Sv. 17, stránky 179-186.

GITELSON, Anatoly A. 2004. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of plant physiology*. 2004, Sv. 161, stránky 165-173. Dostupné z: doi: 10.1078/0176-1617-01176

- HALOUNOVÁ, Lena a PAVELKA, Karel. 2008.** *Dálkový průzkum Země*. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-03124-7.
- HEEGE, Hermann. 2013.** *Precision in crop farming. Site specific concepts and sensing methods: applications and results*. New York: Springer, 2013. ISBN 978-94-007-6759-1.
- HENGL, Tomislav. 2006.** Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*. 2006, Sv. 32, stránky 1283-1298. Dostupné z: 10.1016/j.cageo.2005.11.008
- HEUVELINK, Gerard B.M., WEBSTER, Richard M. 2001.** Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*. 2001, Sv. 100, 3-4, stránky 269-301. Dostupné z: doi: 10.1016/S0016-7061(01)00025-8
- HORNING, Ned. 2018.** *Remote Sensing*. New York, United States : Elsevier Inc., 2018. Dostupné z: doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10607-4 .
- HUETE, Alfredo R. 1988.** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988, Sv. 25, 3, stránky 295-309. Dostupné z: doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
- HUETE, Alfredo R., DIDAN, Kamel, MIURA, Tomoaki, RODRÍGUEZ, Edna P., GAO, Xiang, FERREIRA, Laerte G. 2002.** Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002, Sv. 83, 1-2, stránky 195-213. Dostupné z: doi: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- HUETE, Alfredo R., JACKSON, Ray D., POST, D. F. 1985.** Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing of environment*. 1985, Sv. 17, 1, stránky 37-53.
- IDSO, Sherwood B., JACKSON, Ray D. a REGINATO, Robert J. 1977.** Remote-Sensing of Crop Yields: Canopy temperature and albedo measurements have been quantitatively correlated with final harvests of wheat. *Science*. 1977, Sv. 196, 7285, stránky 19-25. Dostupné z: doi: 10.1126/science.196.4285.19
- IDSO, Sherwood B., JACKSON, Ray D., PINTER, Paul J., REGINATO, Robert J., HATFIELD, Jerry L. 1981.** Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*. 1981, Sv. 24, 4, stránky 45-55. Dostupné z: doi: 10.1016/0002-1571(81)90032-7
- JACKSON, Ray D., a další. 1981.** Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research*. 1981, Sv. 17, 4, stránky 1133-1138.

JACKSON, Ray D., REGINATO, Robert J. a IDSO, Sherwood B. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*. 1977, Sv. 13, 3, stránky 651-656.

JACOBSEN, Sven-Erik, REDERSEN, Helena, JENSEN, Christian R. 1998. Reflectance measurements, a quick and nondestructive technique for use in agricultural research. *International conference on sustainable agriculture in tropical and subtropical highlands with special reference to Latin America (SATHLA)*. 1998, stránky 1-5.

JIANG, Zhangyan, HUETE, Alfredo R., DIDAN, Kamel a MIURA, Tomoaki. 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 2008, Sv. 112, 10, stránky 3833-3845. Dostupné z: doi: 10.1016/j.rse.2008.06.006

JIMENEZ-BERNI, Jose A., ZARCO-TEJADA, Pablo J., SEPULCRE-CANTÒ, Guadalupe, FERERES, E., VILLALOBOS, Francisco J. 2009. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2009, Sv. 113, 11, stránky 2380-2388. Dostupné z: doi: 10.1016/j.rse.2009.06.018

John Deere. 2022. HarvestLab 3000. *deere.cz*. [Online] Deere & Company, 2022. [Citace: 19. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.deere.cz/cs/precizni-rizeni-zemedelskych-praci/presne-zemedelstvi/harvestlab-3000/>.

John Deere. 2022. Technologie precizního zemědělství. *www.deere.cz*. [Online] 2022. [Citace: 10. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.deere.cz/assets/publications/index.html?id=b1abdbf8#48>.

KARÁSKOVÁ, Martina. 2021. Precizní zemědělství a variabilní zásahy. *mechanizaceweb.cz*. [Online] Profi Press s.r.o., 24. květen 2021. [Citace: 21. březen 2022.] Dostupné z: <https://mechanizaceweb.cz/precizni-zemedelstvi-a-variabilni-zasahy/>.

KIRNAK, Halil, IRIK, Hasan Ali a ÜNLÜKARA, Ali. 2019. Potential use of crop water stress index (CWSI) in irrigation scheduling of drip-irrigated seed pumpkin plants with different irrigation levels. *Scientia Horticulturae*. 2019, Sv. 256. Dostupné z: doi: 10.1016/j.scienta.2019.108608

KITCHEN, N. R. a GOULDING, K. W. T. 2001. On-Farm Technologies and Practices to Improve Nitrogen Use Efficiency. [editor] R. F. FOLLETT a J. L. HATFIELD. *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems and Management.*: Elsevier Science, 2001, 13, stránky 335-369.

KROULÍK, Milan, BRANT, Václav, ZÁBRANSKÝ, Petr, ŠKEŘÍKOVÁ, Michaela. 2019. *Implementace navigačních technologií a aplikací s podporou GPS.*: Agrární komora České republiky, 2019. ISBN 978-80-88351-04-7.

LEVY, Wendy. 2017. PRECISION AGRICULTURE: A smart farming approach. *Spore*. červen - srpen 2017, 185, stránky 4-7. Dostupné z: jstor.org/stable/44242663

LIANG, Shunlin a WANG, Jindi. 2020. *Chapter 1 - A systematic view of remote sensing.* : Academic Press, 2020. stránky 1-57. ISBN 9780128158265.

LUKAS, Vojtěch, NEUDERT, Lubomír a KŘEN, Jan. 2011. *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství. Metodika pro praxi.* Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2011. ISBN 978-80-7375-562-1.

LUKAS, Vojtěch, NEUDERT, Lubomír a KŘEN, Jan. 2017. Využití dálkového průzkumu pro lokálně cílenou agrotechniku. *Mechanizaci zemědělství.* 2017, Sv. 67, 5, stránky 60-601.

LUKAS, Vojtěch, RYANT, Pavel, NEUDERT, Lubomír, DRYŠLOVÁ, Tamara, GNIP, Pavel a SMUTNÝ, Vladimír. 2012. *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství. Metodika pro praxi.* Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2012. ISBN 978-80-7375-686-4.

MARINOUDI, Vasso, a další. 2019. Robotics and labour in agriculture. A context consideration. *Biosystems Engineering.* 2019, Sv. 184, stránky 111-121. ISSN 1537-5110 Dostupné z: doi: [10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.013)

MULLA, David J. 2012. Chapter 20 - Modeling and Mapping Soil Spatial and Temporal Variability. *Hydropedology.* 2012, stránky 637-664. ISBN 9780123869418 Dostupné z: doi: [10.1016/B978-0-12-386941-8.00020-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00020-4)

MULLA, David J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture:.. *Biosystems Engineering.* 2013, Sv. 114, stránky 358-371. ISSN 1537-5110 Dostupné z: doi: [10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009)

NASA. 2022. Terra & Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov*. [Online] NASA, 2022. [Citace: 22. únor 2022.] Dostupné z: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/>.

NOF, Shimon Y. 2009. *Springer handbook of automation*. Berlín, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-78831-7

OTRUBOVÁ, Marcela. 2018. Základ úspěchu? Kvalitní kukuřičná siláž! *Agropress.cz*. [Online] Agropress.cz, 22. srpen 2018. [Citace: 19. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.agropress.cz/zaklad-uspechu-kvalitni-kukuricna-silaz/>.

PAJARES, Gonzalo. 2015. Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2015, Sv. Volume 81, 4, stránky 281-329. Dostupné z: doi: 10.14358/PERS.81.4.281

PORTER, Michael E., HEPPELMANN, James E. 2014. How smart, connected products are transforming competition. *Harvard business review*. 2014, Sv. 92, 11, stránky 64-88.

POŠTULKA, Roman a FOLTA, Marek. 2020. Kvalita kukuřičné siláže vyrobená pomocí řezačky Krone Big X 530 s diskovým crackerem z pohledu vyvážené krmné dávky. *Agroportal24h.cz*. [Online] Agroportal24h.cz, 12. květen 2020. [Citace: 19. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.agroportal24h.cz/clanky/kvalita-kukuricne-silaze-vyrobena-pomoci-rezacky-krone-big-x-530-s-diskovym-crackerem-z-pohledu-vy vazene-krmne-davky>.

QI, J., CHEHBOUNI, A., KERR, Y. H., SOROOSHIAN, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 1994, Sv. 48, 2, stránky 119-126. Dostupné z: doi: 10.1016/0034-4257(94)90134-1

RADOGLU-GRAMMATIKIS, Panagiotis, SARIGIANNIDIS, Panagiotis, LAGKAS, Thomas, MOSCHOLIOS, Ioannis. 2020. A Compilation of UAV Applications for Precision Agriculture. *Computer Networks*. 2020. Dostupné z: doi: 10.1016/j.comnet.2020.107148

RAHMAN, Abdullah F., DRAGONI, Danilo, DIDAN, Kamel, BARRETO-MUNOZ, Armando, HUTABARAT, Joseph A. 2013. Detecting large scale conversion of mangroves to aquaculture with change point and mixed-pixel analyses of high-fidelity MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 2013, Sv. 130, stránky 96-107. Dostupné z: doi: 10.1016/j.rse.2012.11.014

REINA, Giulio, MILELLA, Annalisa, ROUVEURE, Raphaël, NIELSEN, Michael, WORST, Rainer, BLAS, Morten R. 2016. Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. *Biosystems Engineering*. 2016, Sv. 146, stránky 114-132. Dostupné z: doi: doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.010

REN, Hongrui, ZHOU, Guangsheng, ZHANG, Feng. 2018. Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment*. 2018, Sv. 209, stránky 439-445. Dostupné z: doi: 10.1016/j.rse.2018.02.068

REN, Hongrui, ZHOU, Guangsheng, ZHANG, Xinshi. 2011. Estimation of green aboveground biomass of desert steppe in Inner Mongolia based on red-edge reflectance curve area method. *Biosystems Engineering*. 2011, Sv. 109, 4, stránky 385-395. Dostupné z: doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.05.004

RONDEAUX, Geneviève, STEVEN, Michael, BARET, Frédéric. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote sensing of environment*. 1996, Sv. 55, 2, stránky 95-107. Dostupné z: doi: 10.1016/0034-4257(95)00186-7

ROUSE, John W., HASS, Rüdiger H., DEERING, Donald. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*. 1974, Sv. 351.

RWA Czechia, s.r.o. 2022. Ochrana rostlin. *rwa-sro.cz*. [Online] RWA Czechia, s.r.o., 17. března 2022. [Citace: 25. března 2022.] Dostupné z: <https://rwa-sro.cz/wp-content/uploads/2021/04/RWA-Cenik-2021-TISK-1.pdf>.

SOTILLE, Maria E., BREMER, Ulisses F., VIEIRA, Gonçalo, VELHO, Luiz F., PETSCH, Carina, SIMÕES, Jefferson C. 2020. Evaluation of UAV and satellite-derived NDVI to map maritime Antarctic vegetation. *Applied Geography*. 2020, Sv. 125. ISSN: 0143-6228 Dostupné z: doi: 10.1016/j.apgeog.2020.102322

Státní zemědělský intervenční fond. 2021. Příručka Průvodce zemědělce Kontrolou podmíněnosti platný pro rok 2021. *www.szif.cz*. [Online] 1. srpna 2021. [Citace: 27. leden 2022.] Dostupné z: https://www.szif.cz/cs/CmDocument?rid=%2Fapa_anon%2Fcs%2Fdokumenty_ke_stazeni%2Fnepub%2F1610096699167%2F1610096738344.pdf.

SUN, Yaqi, LIU, Hailong, GUO, Zhengqiang. 2021. Capsule network-based approach for estimating grassland coverage using time series data from enhanced vegetation index. *Artificial Intelligence in Geosciences*. 2021, Sv. 2, stránky 26-34. Dostupné z: doi: doi.org/10.1016/j.aiig.2021.08.001

TUCKER, C. J., VANPRAET, C. L., SHARMAN, M. J., VAN ITTERSUN, G. 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*. 1985, Sv. 17, 3, stránky 233-249. Dostupné z: doi: 10.1016/0034-4257(85)90097-5

TURNER, John et al. 2014. Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*. 2014, Sv. 50, 3, stránky 237–259. Dostupné z: doi: 10.1017/S0032247413000296

TYROLOVÁ, Yvona. 2021. Co ovlivňuje kvalitu kukuřice pro siláž. *Agromanual.cz*. [Online] Agromanual.cz, 1. březen 2021. [Citace: 19. březen 2022.] Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/index.php?page=clanky%2Fsklizeni-a-skladovani%2Fsklizeni%2Fco-ovlivnuje-kvalitu-kukurice-pro-silaz>.

Úřad pro civilní letectví. 2022. BEZPILOTNÍ SYSTÉMY - Školící materiál ÚCL ve formě FAQ - nejčastěji kladených dotazů k problematice. *www.caa.cz*. [Online] 2022. [Citace: 12. únor 2022.] Dostupné z: https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2022/01/FAQ-DRONES_CS.pdf?cb=ef52f5e331420c75d4b61e4a98e3d3bf.

Úřad pro civilní letectví. 2019. Co je to bezpilotní letadlo, bezpilotní systém, model letadla? [Online] 2019. [Citace: 31. říjen 2019.] Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/letadla-bez-pilota-na-palube/provoz-ostatnich-letadel-bez-pilota-na-palube/co-je-to-bezpilotni-letadlo-bezpilotni-system-model-letadla/>.

Úřad pro civilní letectví. 2020. Základní informace k regulačnímu rámci EU pro bezpilotní systémy. *https://www.caa.cz*. [Online] 2020. [Citace: 13. únor 2022.] Dostupné z: <https://www.caa.cz/provoz/bezpilotni-letadla/zakladni-informace-k-regulacnimu-ramci-eu-pro-bezpilotni-systemy/>.

VAN EGMOND, Fenny M., a další. 2010. Gamma-ray sensor for topsoil mapping; the Mole. *Proximal Soil Sensing*. 2010, stránky 323-332. Dostupné z: doi: 10.1007/978-90-481-8859-8_27

VENANCIO, Luan Peroni, MANTOVANI, CHARTUNI, Everardo, do AMARAL, Cibele Hummel, NEALE, Christopher M. U., GONÇALVES, Ivo Zution, FILGUEIRAS, Roberto, CAMPOS, Isidro. 2019. Forecasting corn yield at the farm level in Brazil based on the FAO-66 approach and soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Agricultural Water Management*. 2019, Sv. 225. Dostupné z: doi: 10.1016/j.agwat.2019.105779

Vyhláška č. 240/2021 Sb. 2021. Vyhláška o ochraně zemědělské půdy před erozí. 2021. ISSN 1211-1244.

WALTER, Achim, FINGER, Robert, HUBER, Robert a BUCHMANN, Nina. 2017. Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 13. červen 2017, Sv. 114, 24, stránky 6148-6150. Dostupné z: doi: 10.1073/pnas.1707462114

WARTENBERG, G. a DAMMER, K. H. 2002. Erfahrungen bei der Verfahrensentwicklung zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung in Echtzeit. *Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz: Sonderheft*. 2002, Sv. 18, stránky 443-450.

WOLFERT, Sjaak, GE, Lan, VERDOUW, Cor a BOGAARDT, Marc-Jeroen. 2017. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*. 2017, 153, stránky 69-80. Dostupné z: doi: doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Zákon č. 252/1997 Sb. Zákon o zemědělství, ve znění pozdějších předpisů. ISSN 1211-1244.

Zákon č. 334/1992 Sb. 1992. Zákon České národní rady o ochraně zemědělského půdního fondu. 1992.

ZHANG, Naiqian, WANG, Maohua, WANG, Ning,. 2002. Precision agriculture - a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002, Sv. 36, stránky 113-132. Dostupné z: doi: 10.1016/S0168-1699(02)00096-0

ZHU, Yan, LI, Yingxue, FENG, Wei, TIAN, Yongchao, YAO, Xia, CAO, Weixing,. 2006. Monitoring leaf nitrogen in wheat using canopy reflectance spectra. *Canadian Journal of Plant Science*. 2006, 86, stránky 1037-1046. Dostupné z: doi: 10.4141/P05-157