

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů



Bakalářská práce

**Využití bezpilotních prostředků v monitoringu porostů
polních plodin**

Autor práce: Aleš Tříška

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

© 2020 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Aleš Tříška

Zemědělské inženýrství
Zemědělská technika

Název práce

Využití bezpilotních prostředků v monitoringu porostů polních plodin

Název anglicky

Utilization of unmanned aerial vehicles in field crops monitoring

Cíle práce

Cílem práce je:

1. vypracování literární rešerše na téma využití bezpilotních prostředků, resp. použitých kamerových systémů používaných pro spektrální snímkování,
2. vyhodnocení reálných dat, pořízených bezpilotním prostředkem během vegetace.

Metodika

Práce bude zaměřena na využívání metod dálkového průzkumu Země s využitím bezpilotních prostředků.

1. formou literární rešerše budou popsány možnosti využití bezpilotních prostředků a kamerových systémů pro bezpilotní prostředky v zemědělství, jejich přínosy, nedostatky a oblast uplatnění,
2. pomocí multispektrálních kamer a RGB kamer, umístěných na bezpilotních prostředcích, budou pořízeny snímky zájmových ploch,
3. z nazbíraných dat bude vytvořena mozaika a následně budou spočítány vegetační indexy,
4. jednotlivé indexy budou porovnávány s daty z pozemního průzkumu a hledány vzájemné vztahy mezi soubory dat.

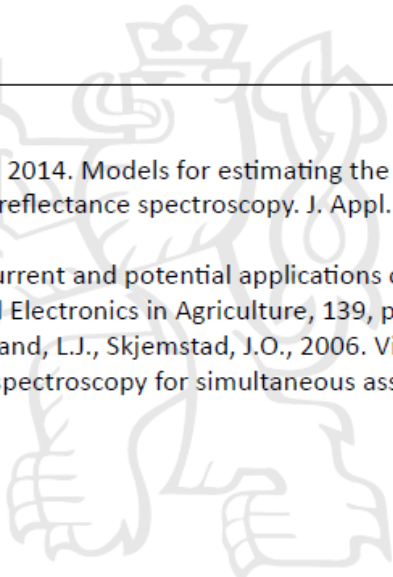
Doporučený rozsah práce

30 stran včetně příloh

Klíčová slova

vegetační index, UAV, stres rostlin, variabilita

Doporučené zdroje informací

- Gholizadeh, A., Amin, M.S.M., Boruvka, L., Saberioon, M.M., 2014. Models for estimating the physical properties of paddy soil using visible and near infrared reflectance spectroscopy. *J. Appl. Spectrosc.*, 81 (3), 534–540.
- Khanal, S., Fulton, J. and Shearer, S., 2017. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, pp.22-32.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janikand, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59–75.
- 

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zemědělských strojů

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2020

prof. Dr. Ing. František Kumhála

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 12. 03. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci "Využití bezpilotních prostředků v monitoringu porostů polních plodin" vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce pana doc. Ing. Milana Kroulíka, Ph.D. Použitá odborná literatura a další informační zdroje, které jsou citovány v práci, jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Pečkách dne 6.4.2020

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Milanu Kroulíkovi, Ph.D. za odborné konzultace a cenné rady, které mi poskytl v průběhu psaní této práce.

Rád bych také poděkoval své rodině a přátelům za podporu během mého studia.

Využití bezpilotních prostředků v monitoringu porostů polních plodin

Abstrakt

V oblasti precizního zemědělství jsou kladeny čím dál tím větší požadavky na přesné a detailní informace o půdě a stavu plodin na ní pěstovaných. Tyto požadavky jsou spojeny se snahami o zefektivnění pěstování rostlin a s ekonomickými a ekologickými aspekty zemědělské výroby. Bepilotní systémy se staly významnými nástroji pro získávání těchto informací, zejména pro svou univerzálnost, nízkou finanční náročnost a možnost rychlého sběru dat, která mohou být snadno zpracována a použita.

První část této práce se věnuje teorii získávání užitečných dat, jejich zpracováním a možnostmi UAV v této oblasti. Uvedeny jsou i konkrétní příklady využití těchto dat v zemědělství. Druhou částí práce je popis měření provedeného pomocí UAV na České zemědělské univerzitě v Praze v rámci výzkumné činnosti.

Klíčová slova: precizní zemědělství, UAV, bezpilotní létající prostředek, bezpilotní systém, dálkový průzkum země, vegetační index, polní porost, odrazová spektroskopie

Utilization of unmanned aerial vehicles in field crops monitoring

Abstract

In the field of precision agriculture there is an ever-growing demand for precise and detailed information about soil properties and the condition of crops. These requirements are linked to efforts to make plant cultivation more efficient and to the economic and ecologic aspects of agricultural production. Unmanned aircraft systems have become important tools for obtaining such information, especially due to their versatility, low cost and the ability to quickly collect data, which can be easily processed and used.

The first part of this thesis is devoted to theory of data acquisition and processing, as well as capabilities of UAVs in this area. Specific examples of the use of these data in agriculture are also listed. The second part describes measurement done by UAV at the Czech University of Life Sciences in Prague as a part of research activities.

Keywords: precision agriculture, UAV, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft system, remote sensing, vegetation index, field crops, reflectance spectroscopy

Obsah

1 Úvod	10
2 Cíle a metodika práce	11
2.1 Cíl práce	11
2.2 Metodika	11
3 Bezpilotní létající prostředek	12
3.1 Vlastnosti bezpilotních prostředků	13
3.1.1 Přednosti	13
3.1.2 Nedostatky a omezení.....	13
3.2 Právní úprava provozu	14
4 Letecká fotogrammetrie	16
5 Odrazová spektroskopie a DPZ.....	17
6 Precizní zemědělství.....	19
6.1 Využití bezpilotních prostředků v oblasti zemědělství.....	20
6.1.1 Vybavení UAV pro účely zemědělství.....	21
6.1.2 Spolehlivost dat získaných pomocí UAV.....	22
6.2 Sledování polních porostů.....	22
6.3 Vegetační indexy a jejich využití.....	22
6.3.1 Jednoduchý poměrový vegetační index (RVI)	23
6.3.2 Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI)	24
6.3.3 Index vegetačního stavu (VCI).....	25
6.3.4 Optimalizovaný půdě přizpůsobený vegetační index (OSAVI)	26
6.3.5 Transformovaný chlorofylový absorpční a reflektanční index (TCARI) .	27
6.3.6 Tasseled Cap.....	28
6.4 Stres rostlin	29
6.5 Zavlažování a hospodaření s vodou	30
6.6 Monitoring zaplevelení polních porostů	32
6.7 Další aplikace bezpilotních prostředků v rostlinné a živočišné produkci.....	33
6.7.1 Sledování stád a zvěře	33
6.7.2 UAV v lesnictví	34
7 Využití bezpilotních prostředků na katedře zemědělských strojů TF ČZU	35
8 Závěr	39
9 Seznam použitých zdrojů	40

Seznam použitých zkratek

<u>Zkratka</u>	<u>Význam</u>
UAV	Bezpilotní létající prostředek
UA	Bezpilotní letadlo
UAS	Bezpilotní systém
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
EU	Evropská unie
GPS	Globální polohový systém
RTK	Kinematické měření v reálném čase
PPK	Kinematické měření s následným zpracováním
DPZ	Dálkový průzkum Země
VIS	Viditelné spektrum
NIR	Blízké infračervené záření
MIR	Střední infračervené záření
IR	Infračervené záření
RVI	Poměrový vegetační index
LAI	Index listové plochy
NDVI	Normalizovaný diferenční vegetační index
VCI	Index vegetačního stavu
OSAVI	Optimalizovaný půdě přizpůsobený vegetační index
TCARI	Transformovaný chlorofylový absorpční a reflektanční index
TCT	Tasseled cap transformation
LiDAR	Light detection and ranging

1 Úvod

Na zemědělskou produkci jsou kladeny stále větší požadavky, jak z hlediska stále se zvyšující spotřeby potravin rostoucí lidskou populací, tak i z hlediska požadavků na ekologičnost produkce. Zemědělské podniky jsou v tomto ohledu nuceny stále zdokonalovat své postupy, aplikovat nové technologie, hledat způsoby zvyšování výnosů a minimalizovat negativní dopady na životní prostředí.

V této souvislosti je nejčastěji skloňováno „precizní zemědělství“. To aplikuje moderní způsoby zjišťování heterogenity vlastností půdy, monitoring stavu polního porostu a analýzy výnosů k řízení zemědělských operací s ohledem na lokálně rozdílné podmínky. Precizní zemědělství je tak zcela závislé na datech získaných analýzami zájmové plochy. Jejich pořizování je však časově i finančně náročné, zejména co se týče laboratorních testů půdních vzorků.

Za těmito účely jsou do zemědělství zaváděny bezpilotní létající prostředky jako nástroj pro rychlé získávání informací ze zájmových ploch. O jejich vlastnostech informuje první část této práce, spolu s tím se věnuje i přednostem a nedostatkům v oblasti jejich použití. V první části je také podkapitola zaměřená na právní úpravu provozu těchto prostředků na našem území.

Bezpilotní prostředky jsou v precizním zemědělství využívány převážně jako nosiče multispektrálních, hyperspektrálních apod. kamer pro pořizování snímků zemědělských pozemků. Tato práce se věnuje především této aplikaci. Jsou v ní zmíněna spektra, která jsou využívána pro sběr informací o polních plodinách i půdě a také vegetační indexy, které tato data překládají v užitečné aplikovatelné podobě.

Hlavním obsahem práce jsou informace, které je možné získat analýzou snímků pořízených bezpilotními prostředky osazenými multispektrálními kamerami a jejich konkrétní aplikace v zemědělství.

V závěrečné části práce bude ukázána výzkumná činnost na TF ČZU, při které byla sledována vlhkost porostu kukuřice na siláž za účelem vhodného načasování termínu sklizně. S ohledem na variabilitu pozemku, tedy i rozdílného stupně zralosti, bude stanoven termín sklizně na základě dosažení vhodné vlhkosti, resp. sušiny porostu.

2 Cíle a metodika práce

2.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je vypracování literární rešerše na téma využití bezpilotních prostředků, respektive použitých kamerových systémů, používaných pro spektrální snímkování v oblasti zemědělství. Uvedeny budou také praktické příklady v různých aspektech rostlinné a živočišné výroby. V závěrečné části práce bude ukázáno vyhodnocení reálných dat, která byla pořízena bezpilotním prostředkem za účelem stanovení optimálního termínu sklizně kukuřice.

2.2 Metodika

Práce se bude skládat ze dvou částí. Teoretická část bude zpracována formou literární rešerše z vědeckých článků, prací a odborných knih. Na základě rozboru těchto zdrojů budou popsány možnosti využití bezpilotních prostředků a jejich přínos v zemědělství. Závěrečná část bude zaměřena na charakter dat získaných pomocí UAV, vegetační indexy a jejich hodnoty, kterými byla sledována vlhkost porostu kukuřice. Nasbíraná data budou porovnána s daty z pozemního průzkumu a ze sensorů sklízecí řezačky.

3 Bezpilotní létající prostředek

Za bezpilotní létající prostředek se označují letouny, na jejichž palubě se nenachází lidská posádka a jsou řízeny dálkově operátorem ze stanoviště na zemi, nebo autonomně dle předem naprogramovaného letového plánu. Pro tyto letouny se používá označení UAV, což je akronym pro Unmanned Aerial Vehicle, neboli bezpilotní létající prostředek.

Úřad pro civilní letectví v souvislosti s bezpilotní technikou definuje tři pojmy. Bepilotní letadlo (UA), tedy letadlo určené k provozu bez pilota či posádky. Bepilotní systém (UAS), tedy systém, který zahrnuje všechny prvky nezbytné k umožnění letu, jako například řídicí stanice, zařízení k vysílání a přijímání signálů spojených s řízením, zařízení pro vypuštění a návrat stroje a podobně. Třetím pojmem je „model letadla“, který není schopný nést člověka a je určený pro soutěžní, sportovní, nebo rekreační účely, a není vybaven zařízením umožňujícím automatický let. (Úřad pro civilní letectví, 2020)

Bepilotní prostředky lze dělit dle celé řady parametrů a účelů do kategorií pro snadnou identifikaci. Například na motorové či nemotorové. Motorové lze dále dělit dle druhu pohonu na vrtulové, turbovrtulové, pístové a proudové. Dle konstrukce je možno rozlišovat UA na letouny, vrtulníky a multikoptéry. Multikoptéry, tedy rotorové vrtulníky s více než jedním motorem se také často dělí dle počtu motorů (nejčastěji sudé počty, například kvadrokoptéry, hexakoptéry apod.). Dalšími parametry, podle kterých by bylo možno bezpilotní prostředky kategorizovat jsou dolet, maximální letová výška, rychlost, hmotnost, nosnost, účel atd.



*Obrázek 1: Bepilotní prostředky KZS TF ČZU. Létající křídlo Parrot DISCO-Pro AG osazen multispektrálním snímačem Parrot Sequoia (vlevo) a hexakoptéra DJI Matrice 600 osazená termokamerou Wiris (vpravo).
Zdroj: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D. KZS TF ČZU, upravil Tříška*

Od dob počátků bezpilotních létajících prostředků, jež vznikly primárně pro dálkový průzkum či bojové nasazení, se tato technologie přesunula i do civilní sféry. V dnešní době je možné zakoupení bezpilotního letadla pro účely vlastního snímkování pozemků, ale i pro zábavu. Právě rostoucí cenová dostupnost bezpilotních prostředků byla hlavním faktorem pro rozšíření těchto prostředků na civilním trhu v posledních letech.

3.1 Vlastnosti bezpilotních prostředků

3.1.1 Přednosti

Hlavní předností bezpilotních systémů (UAS) je jejich versatilita. Na jeden pořízený letoun je možno nainstalovat mnoho různých fotogrammetrických prostředků a provádět s ním různá měření. Mnoho UAS na trhu se zaměřuje na nízkorozpočtové systémy a vytváří tak cenově dostupné alternativy. Nízká cena systému však nemusí nutně znamenat stejnou měrou zhoršenou kvalitu dat oproti dražším variantám. Další úsporou je absence posádky na palubě a náklady s ní spojené. Absence posádky také poskytuje možnost provozu v podmínkách, které by byly pro piloty nebezpečné. (Eisenbeiss, 2009)

Další předností je možnost pořizovat data na těžko dosažitelných místech a tam, kde by využití pilotovaného letounu bylo neekonomické či nebezpečné. Může se jednat o pralesy, pouště, nebo odlehlé oblasti bez letištních ploch. U vrtulníků a multikoptér je také výhodou možnost zastavení a setrvání na místě ve vzduchu, což je v oblasti sběru dat vítanou předností.

Data získaná pomocí UAS mohou být v průběhu letu odesílána operátorovi a přímo vyhodnocována v reálném čase. Nepopíratelnou výhodou bezpilotních prostředků, v porovnání s pilotovanými letadly, je také možnost letu a sbírání dat za zvýšené oblačnosti, protože tyto prostředky mohou létat v menších výškách pod oblačností. (Eisenbeiss, 2009)

Právě rychlé vyhodnocení dat je ideální pro oblast zemědělství při sledování polních porostů, půdy, či při posuzování škod způsobených například zvěří nebo počasím. Ze stejných důvodů je možné nasadit bezpilotní prostředky i v místech katastrof či nehod jako pomoc záchranným složkám.

3.1.2 Nedostatky a omezení

Navzdory neustávajícím inovacím v oblasti bezpilotních technologií stále existuje mnoho nedostatků a omezení, se kterými se musí uživatelé potýkat. Ty lze rozdělit do dvou hlavních skupin: konstrukční a legislativní.

Do konstrukčních nedostatků lze zařadit problémy spojené s konstrukcí letounu. Jedná se o nízkou nosnost některých, převážně levnějších modelů, maximální možnou dobu letu a závislost provozuschopnosti na počasí.

Malá nosnost je problémem zejména u levnějších variant letounů. Ty jsou konstruovány s ohledem právě na nízkou pořizovací cenu a menší nosnost je častým kompromisem k jejímu dosažení. Toto ovlivňuje vybavení, jaké je možné na letounu použít.

Maximální možná doba letu souvisí s druhem pohonu letounu a zásobou paliva/energie. Při projektování snímkovacího letu musí být toto omezení zohledněno a u větších oblastí je třeba zvažovat více letů, či případné pořízení stroje s větším doletem. Potřeba většího počtu letů je také spjata s letovou výškou a možnostmi použitých kamer. Jak uvádí Turner et al. (2012), UAV letící ve výšce 50 m nad zemí se standardně konfigurovanou kamerou, pořídí snímek terénu o ploše 50 m × 40 m. Tím vzniká potřeba pořídít více snímků k pokrytí zájmové plochy v požadovaném rozlišení (například na 2 ha bylo potřeba 150-200 snímků).

Počasí hraje při plánování měření ještě větší roli. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.1 bezpilotní letouny mají tu výhodu oproti pilotovaným strojům, že mohou létat pod oblačností, ovšem je třeba sledovat, mimo jiné, hlavně povětrnostní podmínky. Vzhledem k nízké hmotnosti některých bezpilotních prostředků jsou tyto stroje náchylnější vůči silnému větru. Ten může značně ovlivnit dráhu stroje, kvalitu pořízených snímků a v nejhorším případě způsobit i havárii stroje. Tedy přesto, že pro bezpilotní letouny je během roku mnohem více vhodných dní k letu, je třeba bedlivě sledovat meteorologické předpovědi. Roli také hrají světelné podmínky, které mohou velice ovlivnit kvalitu snímků. (Miřijovský, 2013)

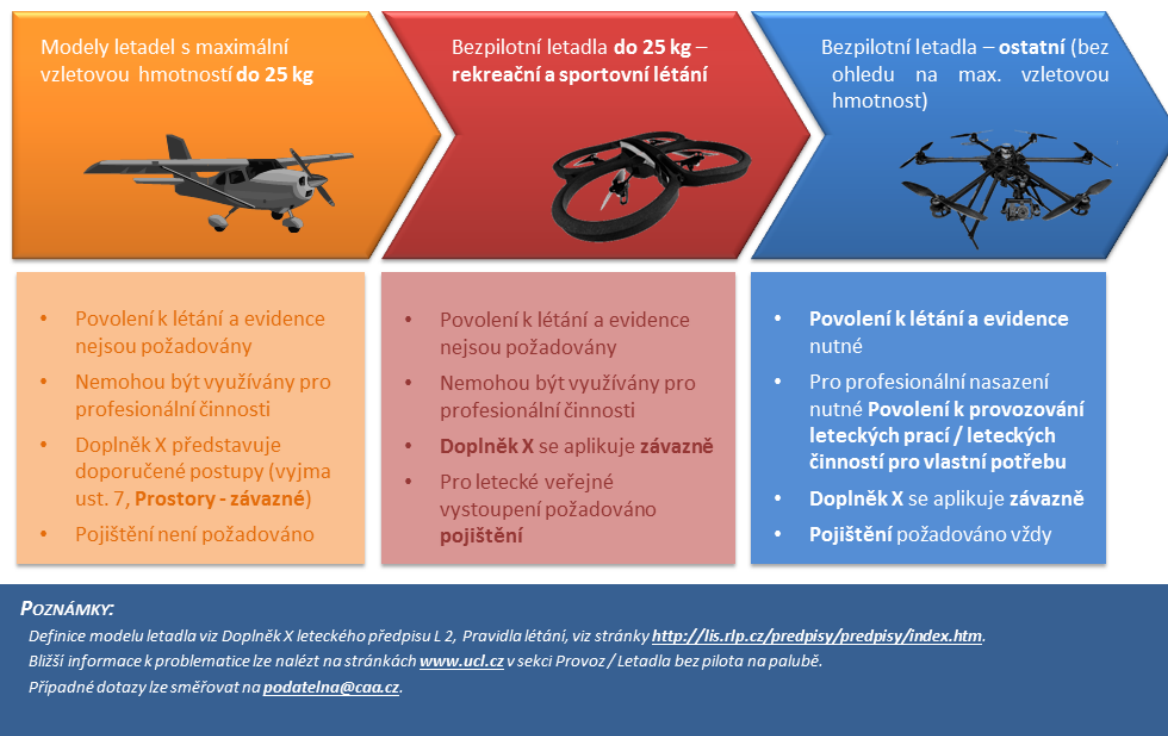
3.2 Právní úprava provozu

Provoz bezpilotních prostředků také upravuje zákon o civilním letectví, konkrétně Doplněk X leteckého předpisu Pravidla létání L2 zákona č. 49/1997 Sb. Ten se zabývá provozem bezpilotních prostředků na území České republiky od předletové kontroly, přes let, až po přistání. Upravuje také bezpečnost, odpovědnosti provozovatele, vzdušné prostory a letové hladiny pro provoz a užívání bezpilotních létajících prostředků. (Zákon č. 49/1997 Sb., 1997)

Za zmínku stojí hlavně § 52 zákona o civilním letectví. Ten zní: „(Létání letadel bez pilota). Letadlo způsobilé létat bez pilota může létat nad územím České republiky jen na

základě povolení vydaného Úřadem pro civilní letectví a za podmínek v tomto povolení stanovených. Úřad povolení vydá, nebudou-li ohroženy bezpečnost létání ve vzdušném prostoru, stavby a osoby na zemi a životní prostředí.“ (Zákon č. 49/1997 Sb., 1997)

PŘEHLED ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ NA BEZPILOTNÍ SYSTÉMY



Obrázek 2: Přehled základních požadavků na bezpilotní systémy
 Zdroj: (Úřad pro civilní letectví, 2020), upravil Tříška

Pro využití bezpilotního prostředku uživatelem ke komerčním účelům je nejdříve nezbytné získat povolení Úřadu pro civilní letectví (dále jen ÚCL). Po podání žádosti a předložení veškerých požadovaných dokumentů, k nimž je také nutné mít uzavřené pojištění odpovědnosti z provozu bezpilotního prostředku, má ÚCL lhůtu na vyhodnocení dodaných dokumentů. S vydáním povolení je spojena řada poplatků. Tím prvním je správní poplatek, který činí 4000,- Kč. Žadateli je nejdříve vydáno rozhodnutí o vydání povolení k létání letadla bez pilota s omezením „pilot – žák“ a po nabytí právní moci dochází k vydání samotného povolení. Pro odstranění omezení spojených s tímto povolením je nutno podat žádost o změnu povolení. V rámci této žádosti je žadatel přezkoušen z teoretických znalostí a praktických dovedností pilota a je nutno zaplatit další správní poplatek, tentokrát ve výši 400,- Kč. Po úspěšném složení zkoušek získává žadatel povolení k létání letadla bez pilota bez omezení. (Úřad pro civilní letectví, 2020)

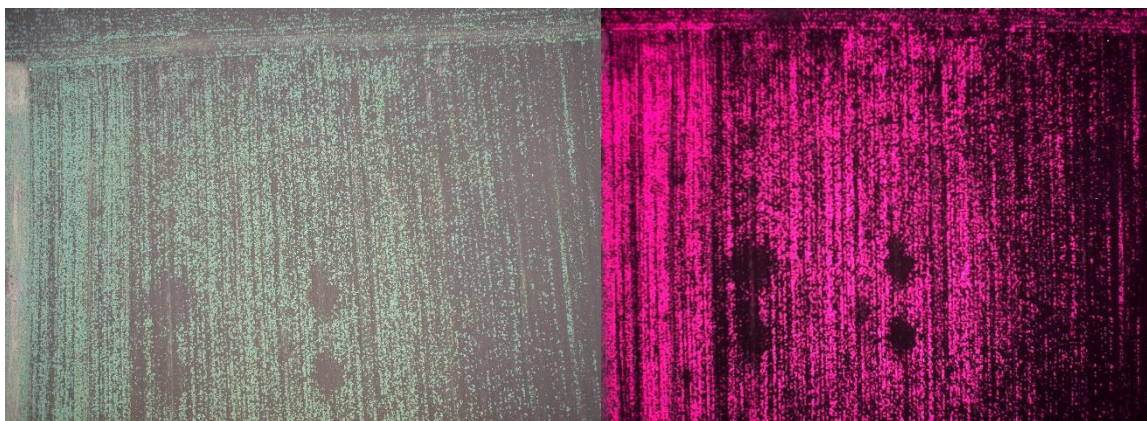
V případě, že chce uživatel využít bezpilotní systém k leteckým pracím, je třeba zvláštního povolení. Získání tohoto povolení také obnáší podání žádosti, k této je však třeba dodat množství příloh, mimo jiné i doklady o odborné praxi, podnikatelský plán a provozní příručku (dokument popisující veškerá hlediska provozu bezpilotních letadel v rámci činnosti podniku). Správní poplatek spojený s tímto povolením činí 10 000,- Kč. (Úřad pro civilní letectví, 2020)

Počátkem roku 2020 vstoupí v platnost nová pravidla a nařízení upravující provoz bezpilotních prostředků v rámci celé Evropské unie, konkrétně Prováděcí nařízení komise (EU) 2019/947. Snahou je sjednotit pravidla ve všech zemích EU, což je jeden z důvodů, proč je evropská legislativa nově upravována. Hlavní změnou oproti stávající české legislativě je zavedení minimální věkové hranice pro piloty UAV a to 16 let. Další zásadní změnou je povinná registrace bezpilotního prostředku se vzletovou hmotností nad 250 gramů. Pro registraci bude nutné složení testu. Takto registrovanému stroji bude přidělena registrační značka, kterou bude majitel povinen stroj vybavit. (Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví, 2020)

4 Letecká fotogrammetrie

Fotogrammetrie je, jak uvádí Pavelka (2003), vědní obor zabývající se získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického, záznamu.

Oproti pozemní fotogrammetrii, jejíž stanoviště je zpravidla statické a umístěné na zemi, má letecká fotogrammetrie řadu výhod. Tou největší je, že snímky z letadla, či jiného létajícího prostředku, je zabrána větší plocha a je možno snímkovat i těžko dosažitelná místa. Během jednoho letu je tak možné pořídit snímky i desítek hektarů zájmových ploch. Spojením s technologií GPS jsou tato data snadno dále zpracovatelná a velmi přesná. Bepilotní prostředky mohou létat i relativně nízko nad terénem, zatímco stále zachovávají výhodu pozorovací pozice oproti zemi. V kombinaci s neustále se rozvíjející technologií záznamových zařízení, ať už se jedná o zvyšování rozlišení kamer, či o multispektrální technologie, je perspektiva integrace bezpilotních systémů zjevná. (Pavelka, 2003)



Obrázek 3: Pokryvnost a zapojení plochy rostlinami řepky. Snímek pořízený RGB a snímek pořízený v nepravých barvách v NIR spektru.

Zdroj: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D. KZS TF ČZU, upravil Tříška

Bezpilotní létající prostředky mohou být využity jako platformy pro celou řadu fotogrammetrických měřicích prostředků od fotoaparátů, přes termokamery, infračervené kamery, až po LiDAR sensory. Jediným omezením v této oblasti je nosnost letounu. (Eisenbeiss, 2011)



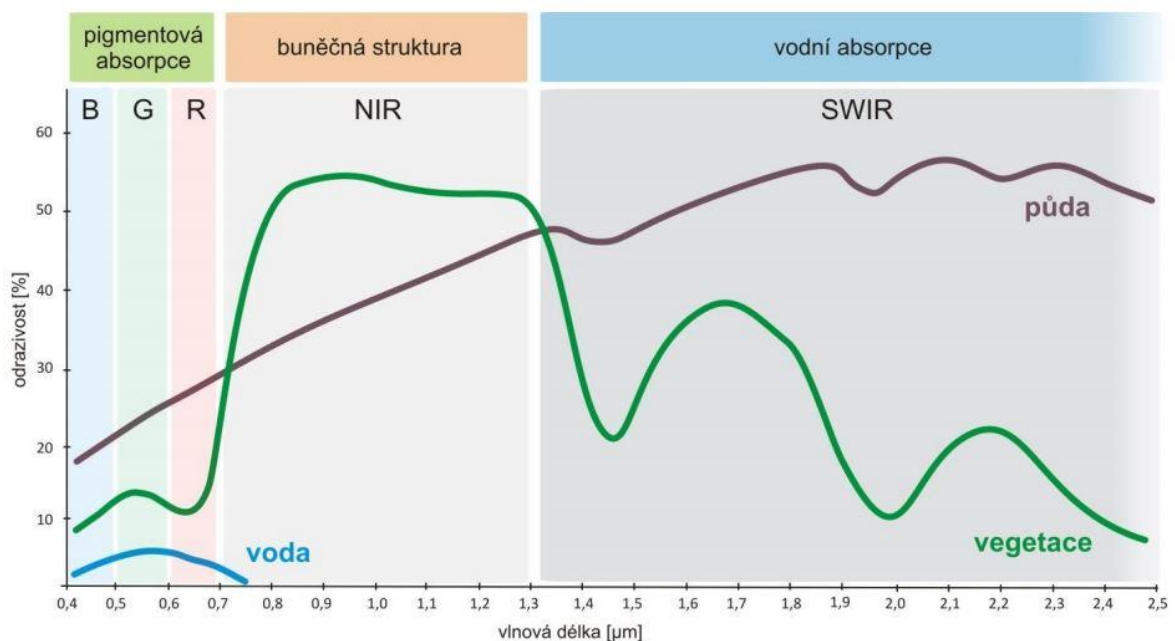
Obrázek 4: Oktokoptéra vybavená digitálním fotoaparátem Canon 550D. Tuto konfiguraci použili ve své práci Turner et al. (2012), ve které prezentovali techniku geometrické korekce a mozaikování snímků pořízených pomocí UAV.

Zdroj: (Turner et al. 2012)

5 Odrazová spektroskopie a DPZ

Dálkový průzkum Země je metoda získávání informací o objektech a jevech bezkontaktními metodami. (Halounová a Pavelka, 2008) Při dálkovém průzkumu Země (DPZ) může být pro posouzení různých vlastností vegetace či půdy použita odrazová spektroskopie. Ta posuzuje odrazivost různých částí spektra od sledovaných povrchů. Jedná se o část viditelnou (VIS), blízkou infračervenou (NIR), střední infračervenou (MIR), infračervenou (IR)

nebo o kombinované části spektra. Pro lepší analýzu těchto spektrálních dat pro účely zemědělství byly zavedeny tzv. vegetační a půdní indexy. Jedná se o kombinace hodnot odrazivosti v rozdílných částech spektra. Vegetační indexy jsou, jak uvádí Fang a Liang (2014), navrženy tak, aby maximalizovaly citlivost na vlastnosti vegetace, zatímco minimalizují rušivé faktory jako jsou odrazivost půdy, směrové nebo atmosférické efekty. Z těchto indexů lze tvořit mapy, které lze aplikovat v oblasti precizního zemědělství, například jako aplikační mapy pro řízení přesného hnojení. Tímto způsobem je možno sledovat biomasu a její přírůstky, zdravotní stav vegetace, ale i odhadovat výnosy. (Mulla, 2013)



Obrázek 5: Spektrální chování vegetace, půdy a vody ve vybrané části elektromagnetického záření (400–2500 nm)

Zdroj: (Lukas et al. 2011)

Celosvětově existují snahy o vývoj levného a rychlého způsobu analýzy půd z důvodu růstu poptávky po velkém množství kvalitních a finančně nenáročných dat k použití v monitorování prostředí a v precizním zemědělství. (Rossel et al. 2006; Brown et al. 2006)

Odrazovou spektroskopií k určení různých půdních vlastností se zabývali např. Rossel et al. (2006). Cílem jejich práce bylo ověření, zda mohou být data z odrazové spektroskopie přínosná pro analýzu půdních vlastností a zda mohou tyto metody nahradit laboratorní zkoušky půdy jako jejich levnější a dostupnější varianta.

Jejich práce spočívala v odebrání vzorků ze zemědělského pozemku v Kelso NSW v Austrálii a jejich konvenční laboratorní analýzy a zároveň spektrální analýzy těchto vzorků

ve viditelné, blízké infračervené, střední infračervené části spektra a jejich kombinaci. Sledované půdní vlastnosti byly pH_{Ca} , pH_w (dva způsoby stanovení), potřeba vápníku, organická hmota, zrnitostní složení (jíl, prach, písek), kationtová výměnná kapacita, výměnná forma vápníku, výměnná forma hliníku, nitrátová forma dusíku, dostupný fosfor, výměnná forma draslíku a vodivost půdy. Střední infračervené spektrum se ukázalo jako vhodné pro přesné odhady pH, potřeby vápníku, organické hmoty, kationtové výměnné kapacity, zrnitostního složení, dostupného fosforu a vodivosti půdy. Blízké infračervené spektrum zase přineslo přesnější odhady v oblastech výměnné formy hliníku a vápníku než ostatní spektra. (Rossel et al. 2006)

Studie demonstrovaly potenciál odrazové spektroskopie v charakterizaci půdních vlastností díky jejich korelaci s odrazivostí různých spekter. Za hlavní výhodu bylo označeno to, že z jediného spektra bylo možno určit mnoho vlastností a tím metoda nabízí značné úspory a zvýšenou efektivitu oproti konvenčním laboratorním analýzám. Metody se ukázaly být aplikovatelné pro on-the-go polní využití. (Rossel et al. 2006; Brown et al. 2006) Kombinovaná NIR-MIR odrazová spektroskopie nabízí alternativu ke konvenčním metodám hodnocení půdních vlastností a úrodnosti. (Johnson et al. 2019)

6 Precizní zemědělství

Precizní zemědělství, také nazývané „lokálně cílené hospodaření“, je přístup k zemědělství, který neuvažuje obhospodařovanou plochu jako celek s homogenními vlastnostmi půdy a vegetace, nýbrž aplikuje data zjištěná odběrem vzorků nebo například právě dálkovým průzkumem a k ploše přistupuje jako k oblasti s lokálně různými vlastnostmi. (Mulla, 2013)

Nakládat s jednotlivými obhospodařovanými plochami jako s homogenními celky je přístup, který v zemědělství dosud převládá a jehož negativní dopady se odrážejí nejen na výnosech, ale také na životním prostředí. V rámci tohoto přístupu je na celou plochu aplikováno stejné množství herbicidů či hnojiv, což znamená vyšší než nutnou spotřebu těchto látek, ale hlavně nevhodné dávkování na některých místech obhospodařované plochy.

Lokálně cílené hospodaření tedy v praxi znamená „provádět pěstební zásahy na správném místě, se správnou intenzitou a ve správný čas“ (Lukas et al. 2011, Mulla, 2013). Jinými slovy se jedná o aplikaci znalostí o lokální různosti podmínek v rámci pěstebních

operací. Znalost variability půdních vlastností a stavu porostu jsou základním předpokladem pro precizní zemědělství. Ovšem jsou-li v rámci pozemku vlastnosti velmi podobné až nerozdílné, není užití lokálně cíleného hospodářství vhodné. (Lukas et al. 2011)

Mezi hlavní přínosy precizního zemědělství patří zvýšení výnosů a snížení dopadu hospodaření na životní prostředí. K tomu dochází snížením spotřeby hnojiv a herbicidů. S tím je spojené snížení nákladů na tyto látky, což je dalším přínosem tohoto přístupu.

Dálkový průzkum Země (DPZ) pomocí UAV vstupuje do oblasti precizního zemědělství jako zcela nový způsob sběru dat, který významně mění zavedené postupy. Poskytuje bezprecedentní spektrální, prostorové i časové rozlišení, ale může také poskytnout data o vzrůstu vegetace. Lze očekávat, že vývoj této technologie bude pokračovat, což bude dále rozšiřovat možnosti použití v precizním zemědělství. Lze také očekávat, že současný trend zvyšování kvality a uživatelské přívětivosti UAV a sensorů povede k umožnění využití hyperspektrálních a teplotních sensorů pro rutinní provoz i neexpertními uživateli. (Maes a Steppe, 2019)

Precizní zemědělství je zcela závislé na datech získaných ze zájmové plochy. Tato práce se zaměřuje na získávání těchto dat pomocí analýzy fotografií pořízených multispektrálními kamerami za pomoci bezpilotních prostředků, avšak data lze získat například i pomocí plošného odběru a analýzy vzorků. Sledování zdravotního stavu rostlin a jejich potřeb z hlediska hnojení a zavlažování je nezbytnou součástí precizního zemědělství.

6.1 Využití bezpilotních prostředků v oblasti zemědělství

Bezpilotní systémy v kombinaci s multispektrálními kamerami a RGB kamerami poskytují možnost nedestruktivní dálkové analýzy půdy a vegetace. Takto získaná data lze rychle zpracovat a využít v oblasti precizního zemědělství. Tradiční letecké a satelitní snímky již nevyhovují dnešním požadavkům na vysoké rozlišení a kvalitu snímků. Ve fázi vzcházení je požadavek na prostorové rozlišení v řádech milimetrů až jednotek centimetrů. (Hengl, 2006)

UAS nabízí v porovnání s konvenčními platformami (jako jsou pilotovaná letadla a satelity) řadu výhod. Mezi ně se řadí let v malých výškách, což umožňuje pořizovat snímky s ultra vysokým rozlišením, na nichž už lze rozeznat záhony i jednotlivé rostliny, a to i v raných fázích růstu, což předtím nebylo možné. Nízká letová výška dovoluje také snímkování za zvýšené oblačnosti; letová hladina UAS je obvykle pod oblačností. Čas potřebný k přípravě

letu a zahájení letu je krátký, čímž UAS umožňují větší flexibilitu při plánování snímkovacích misí. Další z výhod je nižší cena letounu i jeho provozu, což umožňuje častější monitorování zájmových ploch. Široká paleta možností konfigurace dovoluje využití a testování nízkonákladových sensorů, mezi které patří například konvenční digitální fotoaparáty. Tyto charakteristiky dávají UAS jasnou perspektivu v roli účinného prostředku pro sběr dat v precizním zemědělství. (Xiang a Tian, 2011; Gago et al. 2015)

Bezpilotní prostředky v kombinaci s multispektrálními kamerami a sensory svou funkcí nahrazují satelitní snímání, které bylo pro zemědělské podniky finančně i časově náročné. Zpracování získaných dat z UAS je daleko rychlejší a jednodušší. Vzniká tedy možnost pořízení a zpracování dat v reálném čase, což dává získaným datům mnohem větší hodnotu. Nízká finanční zátěž na zemědělské podniky a snadná dostupnost děl z UAS lukrativní prostředky pro získávání kvalitních dat o pozemcích a rostlinách na nich pěstovaných.

6.1.1 Vybavení UAV pro účely zemědělství

Do výbavy UAV pro zemědělské účely patří, mimo kamer a sensorů, navigační počítač schopný navádět letoun po naprogramované dráze a systém zaznamenávání polohy. Protože GPS je svou přesností v řádech metrů až desítek metrů zcela nevyhovující dnešním požadavkům precizního zemědělství, je nutno zavést tzv. korekční signály. Korekce může být provedena buďto přes satelitní korekční systém, nebo před pozemní korekční systém. Takto upravená data o pozici dosahují přesnosti v řádech centimetrů. (Rataj et al. 2014)

K uspokojení požadavků na přesné zaznamenávání polohy byl zaveden systém RTK (Real-Time Kinematic). Signál polohy je zpřesňován za pomoci korekčních signálů ze stanic, které mají přesnou a neměnnou polohu. Mezi tyto stanice patří buďto neustále operující referenční stanice (CORS), nebo soukromé stanice. RTK během letu připojuje k pořízeným snímkům údaje o poloze, ve které byly zaznamenány, čímž odstraňuje potřebu následného zpracovávání. Více robustní možností je použití mobilního internetu pro připojení k sítím CORS. Automatickým přiřazením dat o pozici k obrázkům se systém liší od systému PPK (Post-Processing Kinematic), u kterého je nutné přiřadit data o poloze ze souborů RINEX (Receiver Independent Exchange Format). (Freeland et al. 2019)

Avšak i UAV bez tohoto vybavení mohou získat přesná poziční data a to za pomoci kalibračních bodů umístěných na zemi GCPs (Ground Control Points). Pomocí těchto bodů, jejichž poloha je známá, se v následném zpracování snímků zkalibrují data o poloze na

geodetický souřadný systém. Přesné určení polohy těchto bodů ovšem vyžaduje použití RTK/PPK. GCPs jsou výhodné tam, kde se létá méně často. (Freeland et al. 2019)

6.1.2 Spolehlivost dat získaných pomocí UAV

Mírou spolehlivosti vegetačních indexů počítaných ze snímků pořízených pomocí UAV a případnými nedostatky se zabývali Rasmussen et al. (2016). Jejich cílem bylo zjistit, zda se vegetační indexy získané ze snímků pořízených pomocí bezpilotních prostředků liší od vegetačních indexů založených na snímcích ze země. Při studii byly použity RGB fotoaparát (jedna maska pro každou ze tří základních barev), CIS fotoaparát (barevný infračervený), spektrometr a mobilní multispektrální zobrazovací platforma.

Studie ukázala, že vegetační indexy z leteckých snímků dosahují stejných hodnot jako indexy z pozemních dat. Nicméně u leteckých snímků existují nedostatky, které je třeba brát v úvahu. Kvalitu leteckých snímků mohou do značné míry ovlivnit světelné podmínky při snímkování a úhlová odchylka odrazivosti. Snímky je třeba seskládat do celku, přičemž může také dojít k chybám. Zvolený fotoaparát, ani výška letu nebyly příliš podstatné, zato již zmíněným nedostatkům je třeba se v budoucnu věnovat. (Rasmussen et al. 2016)

6.2 Sledování polních porostů

Snímky pořízené multispektrálními kamerami a zpracované pomocí vegetačních indexů mohou přinést významné informace o stavu půdy i polního porostu. Protože se zdravotní stav porostu promítá na jeho odrazivost v blízké infračervené a červené části spektra, je možné odhalit změny zdravotního stavu dříve, než by se projevíly při pozemním průzkumu. Na změně odrazivosti se také podílí obsah vody. Se zvyšujícím se obsahem vody se snižuje odrazivost v infračervené části spektra. Tímto způsobem lze zjistit míru vlhkosti půdního substrátu, nebo vlhkost vegetace. Je tedy možné sledovat například poškození suchem. Protože změnou odrazivosti se může projevit i chemické poškození rostlin, lze tímto způsobem regulovat například aplikace hnojiv. (Dobrovolný, 2001; Gitelson, 2004; Heege, 2013; Mulla, 2013)

6.3 Vegetační indexy a jejich využití

Pro analýzu snímků zájmových ploch pořízených ve viditelné VIS nebo infračervené IR (NIR, MIR, FIR) části spektra byly zavedeny takzvané Vegetační indexy. Ty vyjadřují vztahy mezi odrazivostí těchto spekter od vegetace a jejím stavem. Na základě těchto indexů lze tedy získat představu o hustotě i zdravotním stavu vegetace. Protože zdravé rostliny má vliv na jejich

odrazivost v infračervené části spektra, je možno zjistit jisté znaky, jako například stres rostlin, chemické poškození či poškození mrazem, dříve, než by se projevíly při pozemním průzkumu. (Dobrovolný, 2001; Gitelson, 2004; Mulla, 2013)

Vztahů pro výpočet Vegetačních indexů vznikla celá řada, z nichž většina je ovšem funkčně stejná. Tyto indexy se dle vztahů dají dělit na poměrové a ortogonální.

Mezi poměrové patří například: Jednoduchý poměrový vegetační index (RVI – Ration Vegetation Index), Transformovaný vegetační index (TVI – Transformed Vegetation Index) nebo Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index). Tyto vztahy jsou dány různými poměry mezi viditelnou červenou a blízkou infračervenou částí spektra. (Dobrovolný, 2001)

Ortogonální indexy jsou tvořeny transformací nebo kombinací původních pásem. Řadí se mezi ně, mimo jiné, takzvaný Tasseled Cap, tedy čepice Santa Clause. Tento název pochází z podobenství hodnot vykreslených do grafu s tvarem připomínajícím právě čepici. Tasseled Cap transformuje původní pásma multispektrálního odrazu pomocí empiricky odvozených koeficientů, čímž vznikají tři nová pásma TC1, TC2, TC3, z nichž každé má jinou vypovídací hodnotu a na jejichž základě lze sledovat změny v etapách vegetačních cyklů. (Dobrovolný, 2001)

6.3.1 Jednoduchý poměrový vegetační index (RVI)

Jednoduchý poměrový vegetační index (RVI) je nejjednodušším vegetačním indexem, který je dán poměrem hodnot odrazivosti v blízkém infračerveném (NIR) a viditelném červeném pásmu (RED).

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

Tento index umožňuje rozlišit místa zájmových ploch, kde se nachází vegetace a kde je pouze holá půda. Index RVI je využíván k přípravě podkladů pro řízení hnojení a postřikování.

RVI a LAI (Leaf area index neboli index listové plochy) byly použity Zhou et al. (2017) ke sledování stavu dusíku v rostlinách brambor. Z jejich měření vyplynulo, že RVI/LAI je možno použít k identifikaci N stresu sledovaných rostlin, tedy stresu rostliny vyvolaném nedostatkem dusíku. Analýzou těchto indexů je možno identifikovat situace nedostatku i

optimálního množství dusíku a vznikly tak nástroje vhodné k řízení strojů schopných lokálně diferencovaného dávkování hnojiva.

6.3.2 Normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI)

Jedním z nejvíce používaných indexů je Normalizovaný diferenční vegetační index. Tento index ukazuje velmi dobře oblasti husté i řídké vegetace a také umožňuje rozeznat vodu a led. K identifikaci vegetace využívá tento index záření o vlnových délkách 800 a 670 nm. Výpočtem je podobný indexu TVI, avšak podíl se skládá z rozdílu pásem v čitateli a součtu pásem ve jmenovateli. (Lukas et al. 2012; Heege, 2013)

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

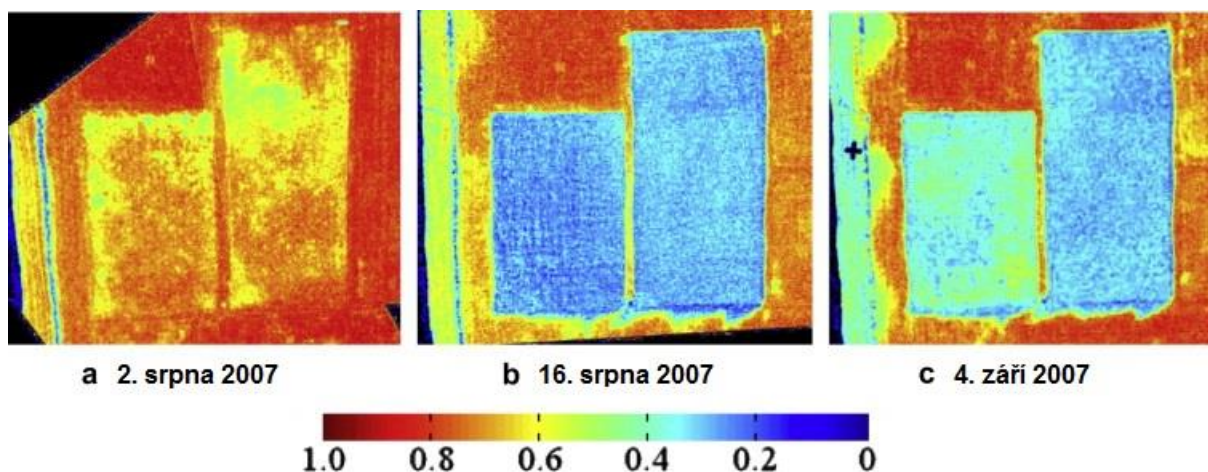
NDVI může nabývat hodnot od -1 do 1. Dle hodnoty je pak možné určit například travnaté plochy (0,2 – 0,3), rostoucí vegetaci a lesní porosty (>0,5). (Heege, 2013) Platí, že vyšší hodnoty znamenají hustší vegetaci, nižší hodnoty korelují se zeminou a záporné hodnoty se sněhem, ledem a kapalnou vodou. (Lukas et al. 2012)

NDVI je vhodný pouze do určitých hodnot hustoty porostu. Při hustějším pokryvu vegetací nastává tzv. nasycení, přičemž dále se zvyšující hustota již není NDVI indikovatelná. Hustotu porostu nejlépe hodnotí index listové plochy (LAI), který udává plochu listů rostlin na m² půdy. Jev nasycení nastává při hodnotách indexu LAI mezi 1-3, popřípadě 2-6, v závislosti na typu vegetace. (Lukas et al. 2012)

Duan et al. (2017) při své práci použili snímkování pomocí nízkolétajícího UAV pro monitoring šlechtění pšenice. Pořízená NDVI data poté upravovali a zpřesňovali pomocí snímků pořízených kamerou ze země. NDVI sloužil k monitoringu biomasy jednotlivých kulturů v průběhu jejich růstu. Výsledkem jejich práce bylo prokázání silné korelace NDVI a finálního výnosu. Za hlavní přínos UAV v této studii byla označena rychlost sběru dat a jejich silná korelace s daty pořízenými ze země.

Xiang a Tian (2011) se ve své práci zaměřené na rozvoj UAV v zemědělství věnovali také snímkování a použití indexu NDVI. Pomocí UAV snímkovali dvě testovací parcely s travním porostem, na které byl aplikován herbicid. Snímky byly pořízeny z výšky šedesáti metrů 2. srpna, 16. srpna a 4. září. 1. srpna byl aplikován herbicid a 15. srpna, poté co veškerá tráva uhynula, byl jeden z pozemků znovu zaset. Již při prvním snímkování, jeden den po

aplikaci herbicidu, byly patrné změny v hodnotách NDVI (a). Na snímcích ze 16. srpna je vidět pouze holá zemina; všechna tráva byla zahubena (b). 4. září je na znovu zasazeném pozemku patrná vzcházející nová tráva (c).



Obrázek 6: Index NDVI dvou testovacích pozemků s trávou
Zdroj: (Xiang a Tian 2011), upravil Tříška

Ihuoma a Madramootoo (2019) zkoumali citlivost spektrálních vegetačních indexů na vodní stres rostlin rajčat (*Solanum Lycopersicum L.*). Dle jejich měření se NDVI zařadil mezi indexy nejvíce citlivé na vodní stres rostlin.

6.3.3 Index vegetačního stavu (VCI)

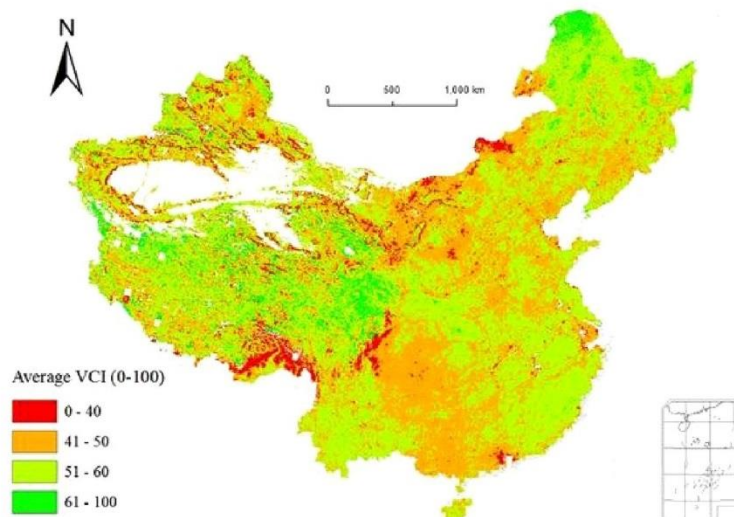
Index vegetačního stavu VCI (vegetation condition index) se ukázal být vhodným nástrojem pro detekci sucha, jeho trvání a dopadu na vegetaci. VCI přináší informace nejen o dlouhotrvajících obdobích intenzivního sucha, ale i o krátkodobých lokálních suchách. VCI vychází z dat NDVI, která v sobě zahrnují jak ekologické signály, tak i signály související s počasím. Protože signál počasí je podstatně slabší, je třeba ho separovat. VCI upravuje data tak, aby se odfiltrovaly efekty související s přírodními podmínkami lineární stupnicí od 0, minimální NDVI, do 100, maximální NDVI hodnoty za určitou periodu sledování. Tímto vzniká separace dopadu počasí na stav vegetace. (Kogan, 1995)

$$VCI = 100 \cdot \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

Vyšší hodnoty NDVI indikují dobře hydratovanou vegetaci bez vodního stresu. Nižší hodnoty NDVI značí méně zelené hmoty, což souvisí s teplotním a vodním stresem vyvolaným suchem. Za snížení odrazivosti v zelené části spektra může odpovídat i slanost, choroby či

napadení hmyzem. Tyto vlivy jsou však většinou lokálně omezeny na rozdíl od vlivu sucha, který je velkoplošný. (Bokusheva et al. 2016)

VCI aproximuje složku počasí z NDVI. Ta nabývá hodnot od 0 do 100, přičemž tato stupnice koresponduje s extrémně špatnými až optimálními podmínkami. Hodnoty 0 až 35 byly stanoveny jako VCI – odvozený indikátor sucha. (Kogan, 1995)



Obrázek 7: Průměrné hodnoty VCI v Číně za období 1982-2013
Zdroj: (Pei et al. 2018), upravil Tříška

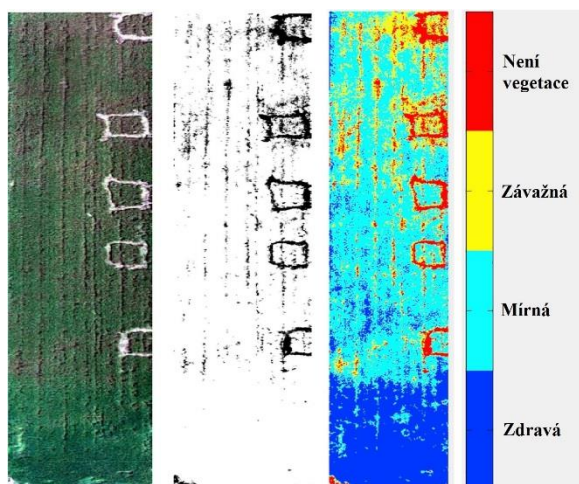
6.3.4 Optimalizovaný půdě přizpůsobený vegetační index (OSAVI)

OSAVI je vegetační index složený z odrazivosti v blízkém infračerveném a červeném pásmu, v jehož vztahu je přímo zařazen koeficient pro minimalizaci vlivu půdního pozadí. Tento index se řadí do skupiny SAVI, tedy do skupiny indexů upravených vzhledem k půdě. Zbývající odchylky způsobené půdou jsou rovnoměrně rozdělené po celém rozsahu indexu (od 0 do 1), čímž je tento index obzvlášť vhodný pro zemědělské účely. OSAVI je vhodný k monitoringu širokořádkových plodin. (Steven, 1998)

$$OSAVI = \frac{(1 + 0,16)(NIR - RED)}{NIR + RED + 0,16}$$

Vztah pro OSAVI byl definovaný Haboudane et al. (2002). Tento index byl navržen tak, aby se mohlo pracovat bez předešlých znalostí vlhkosti a fyzikálních vlastností půdy. (Haboudane et al. 2002)

OSAVI byl použit k odfiltrování pixelů bez vegetace při zkoumání použitelnosti multispektrálních snímků pořízených pomocí UAV k monitoringu chorob pšenice. Za použití pětispásmové multispektrální kamery byly pořízeny snímky testovacího pole, které byly dále zpracovány programem Pix4D. (Su et al. 2018)



Obrázek 8: Experimentální pole s pšenicí – mapa závažnosti napadení chorobou (žlutá rzivost obilnin); vlevo snímek v pravých barvách (RGB); uprostřed segmentace pixelů bez vegetace pomocí indexu OSAVI; vpravo klasifikační mapa
Zdroj: (Su et al. 2018), upravil a přeložil Třiška

6.3.5 Transformovaný chlorofylový absorpční a reflektanční index (TCARI)

Obsah chlorofylu v listech je dobrý ukazatel fotosyntetické aktivity, mutací, stresu a nutričního stavu rostliny. Jako takový má zvláštní význam pro precizní zemědělství. (Zarco-Tejada et al. 2004; Wu et al. 2008)

TCARI se řadí mezi takzvané chlorofylové indexy, tedy indexy citlivé na koncentrace chlorofylu. Aby se omezil vliv půdního pozadí, využívá TCARI poměr R_{700}/R_{670} pouze na rozdíl $R_{700} - R_{550}$. (Haboudane et al. 2002) Výsledný vztah je definován takto:

$$TCARI = 3 \cdot \left[(R_{700} - R_{670}) - 0,2 \cdot (R_{700} - R_{550}) \cdot \left(\frac{R_{700}}{R_{670}} \right) \right]$$

R je odrazivost v dané vlnové délce.

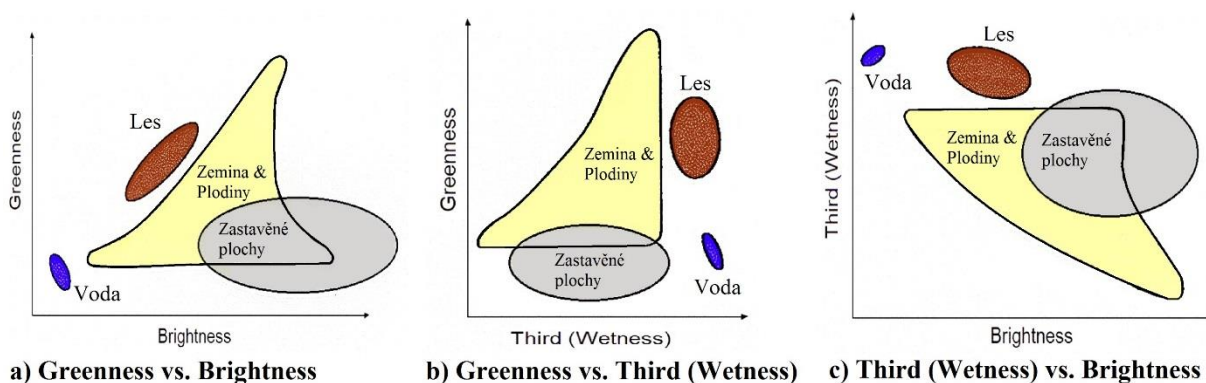
Navzdory značnému zlepšení vůči vlivu nezelené biomasy, je tento index stále citlivý na odrazové vlastnosti půdy, zejména v případech nízkého LAI (Index listové plochy, tedy v podstatě index pokryvu vegetací). Za účelem dalšího odfiltrování pozadí a zlepšení citlivosti na chlorofyl byl index TCARI zkombinován s indexem OSAVI. OSAVI byl pro tento účel vybrán pro svou jednoduchost, snadné použití a nezávislost na informacích o půdních optických

vlastnostech. Jejich poměr je mnohem méně citlivý na vliv pozadí, a to i za velmi nízkých hodnot LAI. (Haboudane et al. 2002)

TCARI/OSAVI použili Gago et al. (2015) při svém výzkumu aplikace UAV při monitoringu vodního stresu. Jak se ukázalo, různé indexy jsou vhodné pro různé rostliny. TCARI/OSAVI poskytl požadovaná data související s obsahem vody v rostlinách na vinici, kterou zkoumal ve své práci Bajula et al. (2012), avšak méně koreloval s daty z citronovníků. Bajula et al. (2012) porovnávali tepelné a multispektrální snímky pořízené z UAV pro určení rozložení hodnot vlhkosti půdy v deštěm zalévané vinici. Dle jeho zjištění ukazovaly tepelné snímky spíše krátkodobou odezvu rostlin na stav vody, zatímco TCARI/OSAVI odráželo kumulativní vodní deficity, tedy dlouhodobé odezvy.

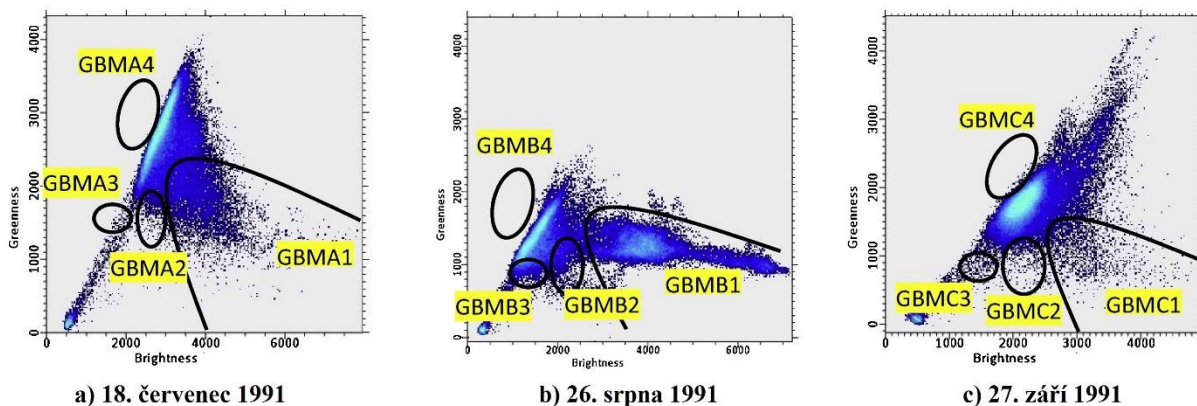
6.3.6 Tasseled Cap

Tasseled cap transformation (TCT) je ortogonálním indexem, který je založen na transformaci původních pásem. Vznikají tak nová pásma, každé se svou vypovídající hodnotou pro posuzování vlastností vegetace. TC1 vyjadřuje odrazivost půdy a je označován jako Brightness index. TC2 je ukazatelem kvantity zelené hmoty, který je nazýván Greenness index. Index TC3 je vztažen k vlhkosti půdy a vegetace a je označován jako Wetness index. (Dobrovolný, 2001)

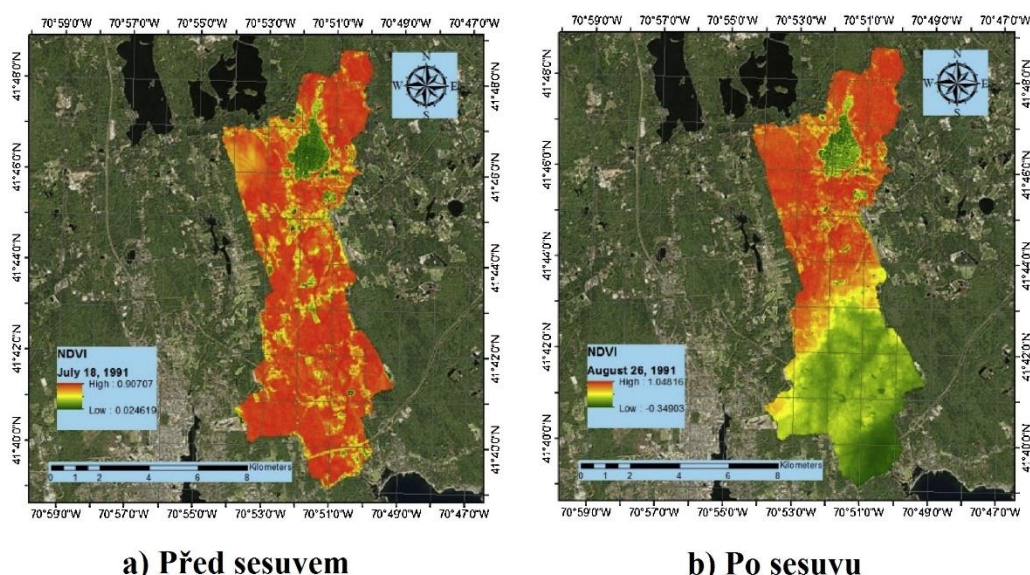


Obrázek 9: Tasseled cap transformace pro interpretaci krajiny
Zdroj: (Mostafiz a Chang 2018), upravil a přeložil Tříška

TCT může být také použit pro analýzu následků přírodních katastrof, jak uvádí Mostafiz a Chang (2018). Ti se ve své práci zabývali použitím TCT k analýze multispektrálních snímků sesuvu půdy ze satelitu Landsat, ke kterému došlo po zasažení Nové Anglie hurikánem Bob (1991).



Obrázek 10: Graf Greenness vs. Brightness. a) znázorňuje oblast před sesuvem půdy, b) jeden týden po sesuvu, c) měsíc po sesuvu. GBMA1 je zastavěná plocha, GBMA2 je zakalená voda, GBMA3 je čistá voda a GBMA4 je zalesněná oblast
Zdroj: (Mostafiz a Chang, 2018), upravil a přeložil Tříška



Obrázek 11: Ve stejné oblasti ukazuje index NDVI jasný úbytek zelené biomasy
Zdroj: (Mostafiz a Chang, 2018), upravil a přeložil Tříška

6.4 Stres rostlin

Nepříznivé podmínky prostředí mohou u rostlin vyvolávat obranné reakce. Rostlina tak reaguje na ztížení životních podmínek, buď přizpůsobením, nebo v krajním případě uhynutím. Tyto nepříznivé vnější vlivy se nazývají stresory. Stresory se mohou dělit do dvou skupin, a to na vlivy abiotické (chemického či fyzikálního charakteru) a vlivy biotické (organického charakteru). Mezi abiotické vlivy se řadí například sucho, vysoké teploty, UV záření, nedostatek/toxicita živin, nedostatek kyslíku, slanost a toxicita prostředí. Biotické vlivy mohou zahrnovat bakterie, houby, viry a hmyz. (Mohanta et al. 2017; Hakim et al. 2018)

Působení těchto stresorů vyvolává u rostliny takzvané stresové reakce. První nastává poplachová fáze, k té dochází v řádu minut po kontaktu se stresorem, při kterém dochází

k poškození rostliny. Pokud nedojde k úhynu rostliny, následuje fáze restituční, ve které jsou spuštěny kompenzační mechanismy rostliny, kterými se rostlina snaží o zvýšení své odolnosti vůči stresoru. Tato fáze přechází do fáze resistance, tedy fáze nejvyšší odolnosti rostliny. Při dlouhodobějším působení stresorů může ovšem dojít k vyčerpání rostliny, kdy dochází ke opětovnému snížení odolnosti. (Larcher, 2003)

Stres rostlin je možné detekovat analýzou multispektrálních snímků pomocí vegetačních indexů, protože zdraví rostliny se promítá na její odrazivosti v různých částech spektra. Tímto způsobem je možné odhalit možné ohrožení zdravotního stavu rostlin dříve, než by tak bylo možné pozemním průzkumem. (Dobrovolný, 2001; Gitelson, 2004)

6.5 Zavlažování a hospodaření s vodou

Inovace v oblasti hospodaření s vodou a v systémech zavlažování jsou nutné k optimalizaci zemědělského využívání vody obzvláště v sušších regionech světa. Fyziologické reakce rostlin na vodní stres jsou přímými indikátory nesprávných postupů a jejich včasné rozpoznání může vést k nápravě ještě před vznikem škod. Dálkové snímání indikátorů stresu rostlin založené na viditelných a blízkých infračervených oblastech spektra poskytují alternativu k tradičním polním měřením. (Ihuoma a Madramootoo, 2019) Zatímco Maes a Steppe (2019) se přiklání spíše k použití termokamer.

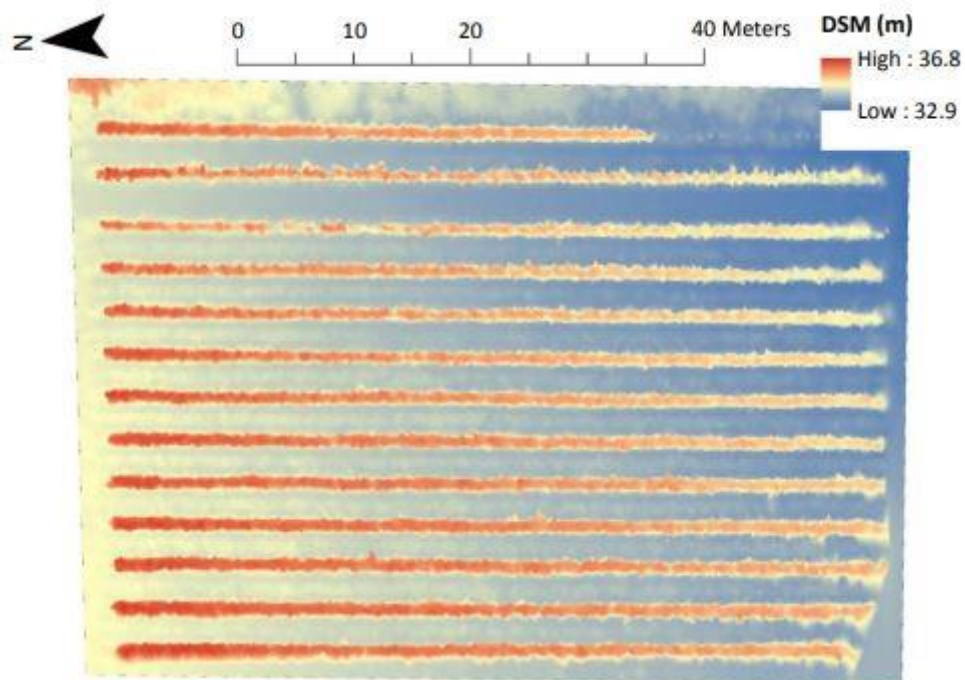
Pro monitorování sucha a řízení zavlažování se používá mnoho vegetačních indexů. Mezi ně patří například již zmíněné NDVI, VCI, TCARI a OSAVI (viz kapitoly 6.3.2, 6.3.3, 6.3.4 a 6.3.5), Perpendicular drought index (PDI), Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI) nebo také crop water stress index (CWSI).

Index CWSI souvisí se spotřebou vody a vodním stresem rostliny. Je navržen na bázi rozdílů teplot povrchu rostliny, vzduchu a sytostním doplňku, zároveň bere v úvahu dolní a horní limit vodního stresu rostliny. Tento index se úspěšně používá pro řízení zavlažování již řadu let. (Kirnak et al. 2019; Nielsen, 1990)

Monitorování plodin pomocí hyperspektrálních sensorů může vést k automatizovaným technikám pro rychlé, nedestruktivní a spolehlivé odhady stavu vody v rostlinách. Analýza v reálném čase a poskytování kvalitativních a kvantitativních informací pěstitelům mohou pomoci optimalizovat spotřebu vody a zároveň zvýšit výnosy. (Ihuoma a Madramootoo, 2019)

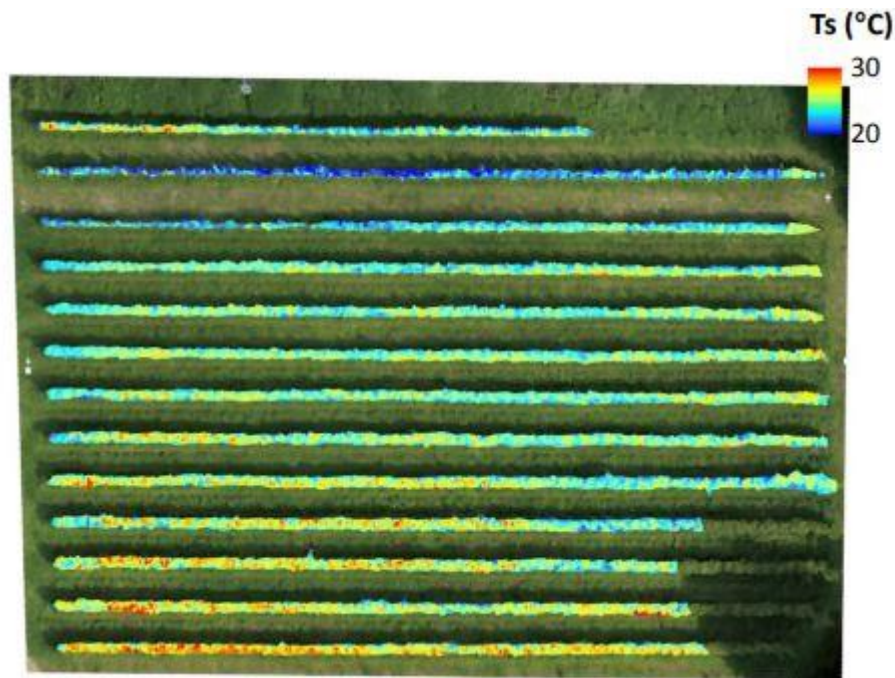
Gago et al. (2015) se zabývali využitím bezpilotních prostředků k posouzení vodního stresu rostlin v oblasti udržitelného zemědělství. Pomocí vegetačních indexů jako NDVI, TCARI/OSAVI a PRInorm ukázali potenciál bezpilotních prostředků k určování heterogenity podmínek na polích.

Při zkoumání perspektiv dálkového snímání pomocí UAV v precizním zemědělství Maes a Steppe (2019) porovnali infračervenou termografii a snímky ve viditelném spektru. Cílem jejich práce bylo posoudit možnosti dálkového snímání pro detekci vodního stresu. Ze snímků bylo patrné, že ačkoli vinice vypadala homogenně na snímcích ve viditelném spektru, teplotní mapy odhalily výrazně významné rozdíly v dostupnosti vody rostlinám. Příčinou byl svažité reliéf terénu. Dle autorů se UAV vybavené termokamerami ukázaly jako vhodný nástroj k detekci sucha a řízení zavlažování.



Obrázek 12: Možnosti infračervené termografie. Digital surface model (DMS) ukazující reliéf terénu vinice Affligem, Belgie.

Zdroj: (Maes a Steppe 2019), upravil Tříška

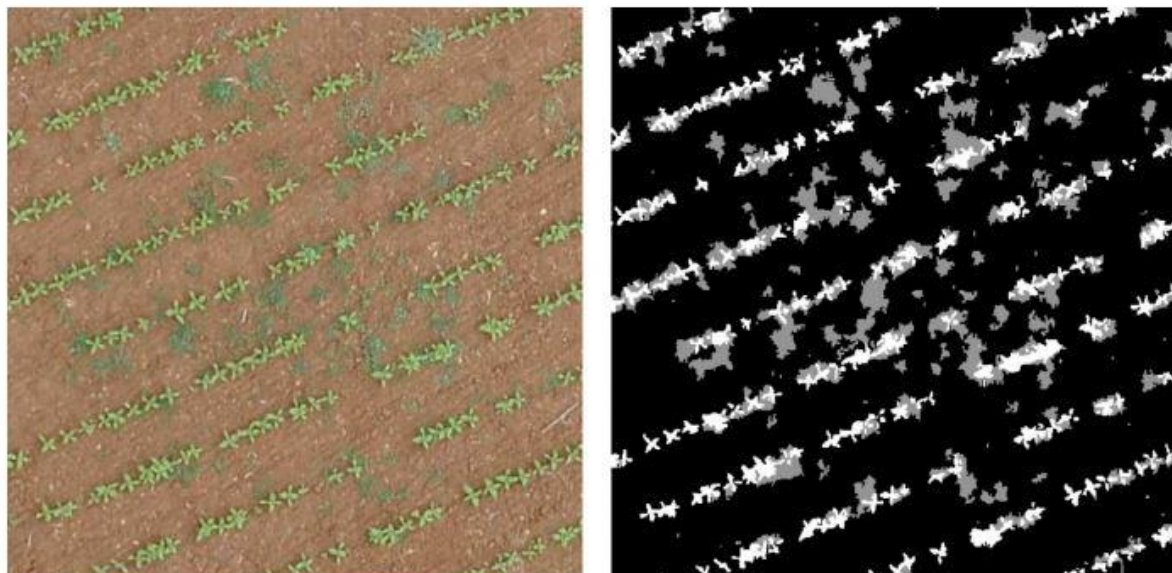


Obrázek 13: Možnosti infračervené termografie. RGB fotografie překrytá teplotní mapou. Vinice Affligem, Belgie. Teplota vzduchu 22.2 °C

Zdroj: (Maes a Steppe 2019), upravil Tříška

6.6 Monitoring zaplevelení polních porostů

Snímkování ve vysokém rozlišení nabízí možnost identifikace plevelů v polním porostu. Tato metoda však skrývá mnoho úskalí. Hlavním z nich je právě identifikace plevelů. V rámci řádkových plodin je identifikace plevelů mimo řádky jen otázkou manuálně definovaných pravidel. Identifikace plevelů v řádcích je však problematická, a to zejména ve fázi vzházení, kdy jsou si rostlinky plevelu a pěstované plodiny často velmi podobné. Za tímto účelem se ve své práci Pérez-Ortiz et al. (2016) věnovali aplikaci strojového učení (machine learning) pro identifikaci plevelů v řádcích. Na snímcích pozemku pořízených pomocí UAV, kde se pěstovala slunečnice, se jim podařilo s dostatečnou přesností rozlišit rostliny slunečnice a plevelů. Jejich práce směřovala k vytvoření map pro lokálně cílené postřiky, což je velmi perspektivní část precizního zemědělství.



Obrázek 14: Reprezentace výsledků z vybrané části experimentálního slunečnicového pole. Nalevo původní snímek. Napravo snímek po aplikaci zkoušené metody SVM. Černá reprezentuje zeminu, bílá plodinu a šedá reprezentuje identifikovaný plevel.

Zdroj: (Pérez-Ortiz et al. 2016)

6.7 Další aplikace bezpilotních prostředků v rostlinné a živočišné produkci

6.7.1 Sledování stád a zvěře

Při sklizni polních plodin v oblastech výskytu divokých zvířat může dojít ke zranění zvířat zemědělskou technikou. Mimo plašení těchto zvířat psy existuje možnost jejich odhalení v porostu pomocí UAV vybavených termokamerami, jak uvádí (Dronpro, 2020). Použití dronů v tomto případě šetří čas jinak nutný k prohlídce pole před započítím sklízecích operací. Taková technologie se může použít i k předcházení poškození polního porostu zvěří.

V živočišné produkci, zejména na farmách s volným výběhem, mohou UAV sloužit k monitorování stád. Drony umožňují pokrytí velkých ploch a zaznamenání polohy jednotlivých zvířat. Za použití termokamer je možné tato stáda sledovat nejen ve dne, ale i v noci. Nízká hlučnost UAV a možnost monitorování i ze značné vzdálenosti stáda nevyrušuje a nestresuje tak zvířata. Přínosem je tak ušetření lidské práce, popřípadě i pohonných hmot, jinak potřebné k této činnosti. (Airborne Drones, 2020)

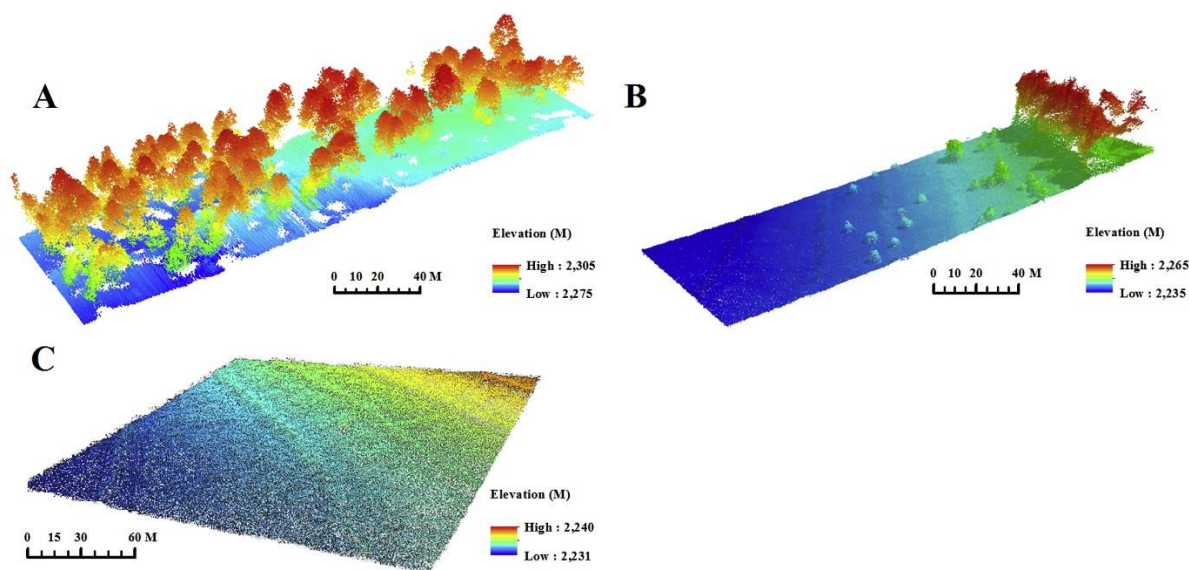
Stejné technologie mohou být použity v zemích afrického kontinentu pro monitorování divokých zvířat a jejich ochraně před pytláky. (Airborne Drones, 2020)

Hlavní problematikou v této oblasti je vývoj algoritmů schopných detekovat a správně započítat zvířata na snímcích. Van Gemert et al. (2015) se zabývali ve své práci použitím bezpilotních prostředků v kombinaci s automatickou detekcí objektů s cílem sledování zvířat. Jejich práce odhalila problémy spojené s algoritmy pro počítání zvířat, avšak detekce zvířat ukázala slibné výsledky.

6.7.2 UAV v lesnictví

Bezpilotní prostředky a jejich možnosti mapovat rozsáhlá území jsou aplikovatelné i v lesnictví. Pomocí UAV je možno mapovat kalamity, holiny i zdravotní stav lesního porostu. Je také možné sbírat data o vertikální a horizontální struktuře porostu. Získaná data se odvíjí od použité sensoriky a je z nich možno určit například druhové smíšení porostů nebo úspěšnost zalesnění. Používáno je viditelné a blízké infračervené spektrum ale i LiDAR. (Surový, 2015)

Sankey et al. (2017) skloubili data z LiDAR a hyperspektrálních snímků za účelem identifikace a klasifikace jednotlivých stromů v borových lesích v Arizoně, USA. Protože satelitní snímky postrádají dostatečné prostorové rozlišení, které by umožnilo identifikaci jednotlivých stromů, pořídili snímky pomocí UAV. LiDAR poskytl data o hustotě stromů, jejich individuální výšce a průměru. Hyperspektrální data pak pomohla s klasifikací druhů. Tato kombinace se ukázala být zvláště užitečná v oblastech, které mohou obsahovat směs stromů, keřů a luk. Použití UAV tyto výhody zvyrazňuje díky možnostem pořizování snímků v jemnějším prostorovém rozlišení.

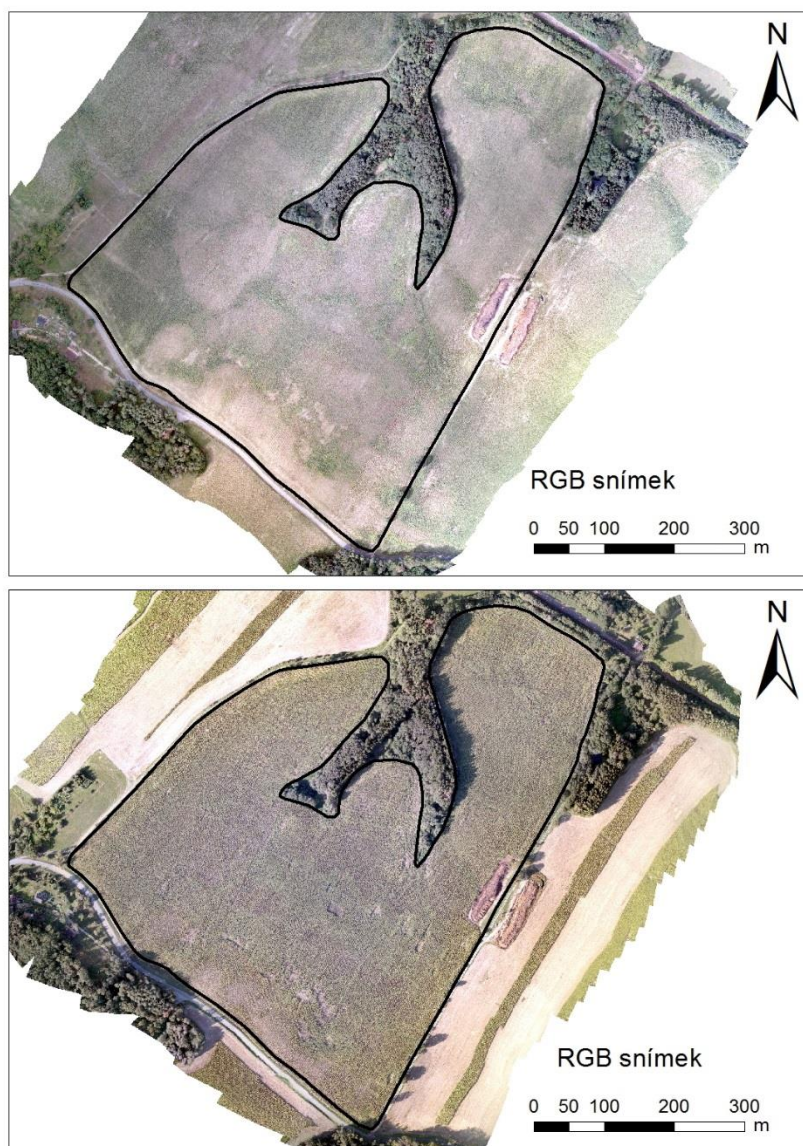


Obrázek 15: Příklad dat pořízených oktokoptérou s LiDAR nad zalesněným územím (A) data SfM (structure from motion) pořízené pomocí UAV s pevným křídlem ukazující ekoton (B) a SfM data ze stejného UAV z travnatého území s mikrotopografickou variabilitou tvořenou malými umělými brázdami (C)

Zdroj: (Sankey et al. 2017), upravil Tříška

7 Využití bezpilotních prostředků na katedře zemědělských strojů TF ČZU

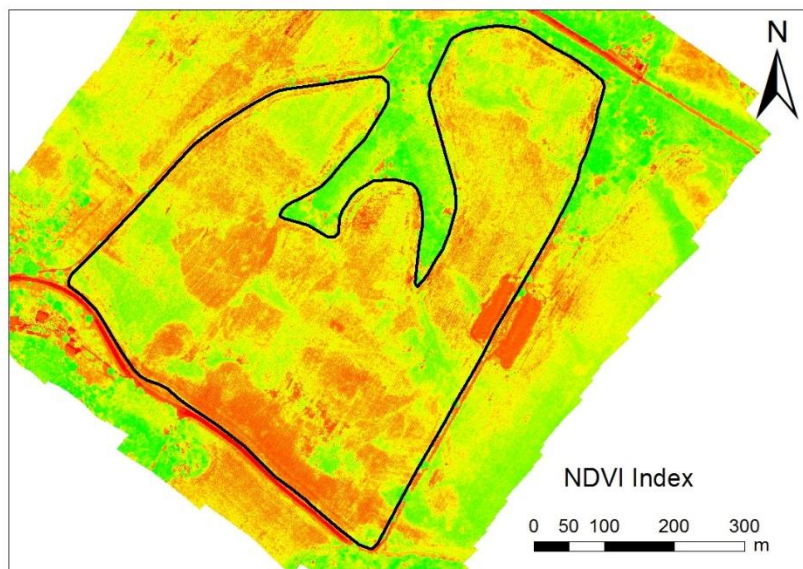
Výzkum v oblasti použití bezpilotních prostředků k optimalizaci zemědělské činnosti probíhá i na České zemědělské univerzitě v Praze. V rámci této výzkumné činnosti je pozornost zaměřována i na využití bezpilotních prostředků v monitoringu porostů polních plodin. Jedním z provedených měření bylo pravidelné sledování pozemku s porostem kukuřice za účelem stanovení optimálního termínu sklizně, a to jak z pohledu sušiny, tak s ohledem na variabilitu pozemku.



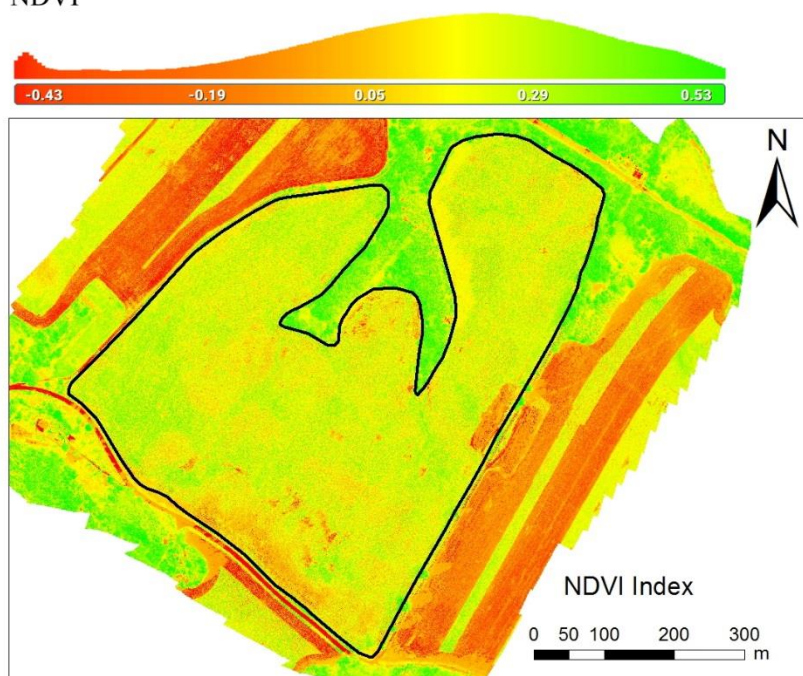
Obrázek 16: Na snímcích porostu kukuřice ve viditelném pásmu je patrná variabilita porostu. Snímky byly pořízeny ve dvou termínech, 19.8.2019 (nahore), 4.9.2019 (dole).

Zdroj: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D. KZS TF ČZU, upravil Tříška

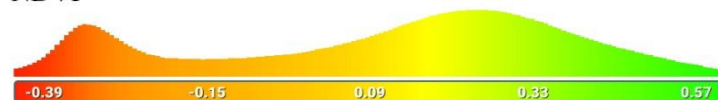
Před každým snímkováním byly z vybraných ploch odebrány vzorky rostlin pro stanovení hodnot sušiny hmoty. Tyto hodnoty byly následně použity pro určení závislosti mezi těmito parametry a snímky pořízenými pomocí UAV Parrot DISCO-Pro AG, který byl osazen multispektrálním snímačem Parrot Sequoia. Snímky byly pořízeny ve viditelném a blízkém infračerveném pásmu a byly použity pro výpočet vegetačních indexů.



NDVI



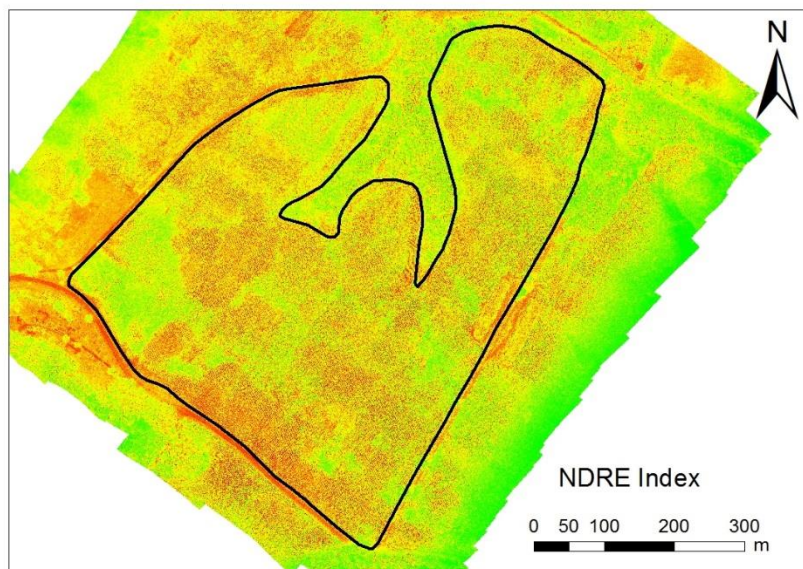
NDVI



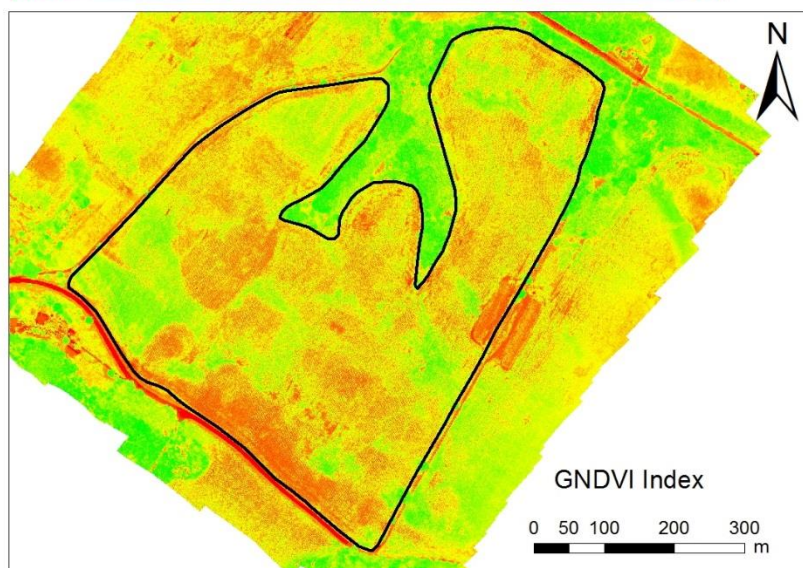
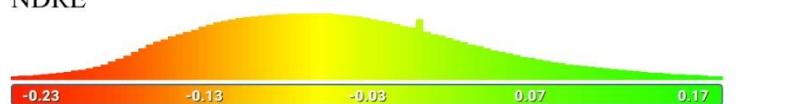
Obrázek 17: NDVI index ve dvou zmíněných termínech. Jsou zde patrné změny, vyjádřené barevnou škálou, které dokládají postupné dozrávání porostu a nárůst sušiny.

Zdroj: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D. KZS TF ČZU, upravil Tříška

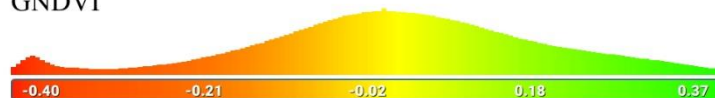
Kromě indexu NDVI byl dále stanoven index NDRE (Normalized Difference Red Edge). Ten je využíván pro porosty ve vyšším stádiu zralosti tam, kde již dochází k přesycení NDVI. Dalším použitým indexem byl index GNDVI (Green NDVI), ten je podobný NDVI, avšak místo červeného kanálu využívá zelený, díky čemuž je citlivější na obsah chlorofylu v listech.



NDRE

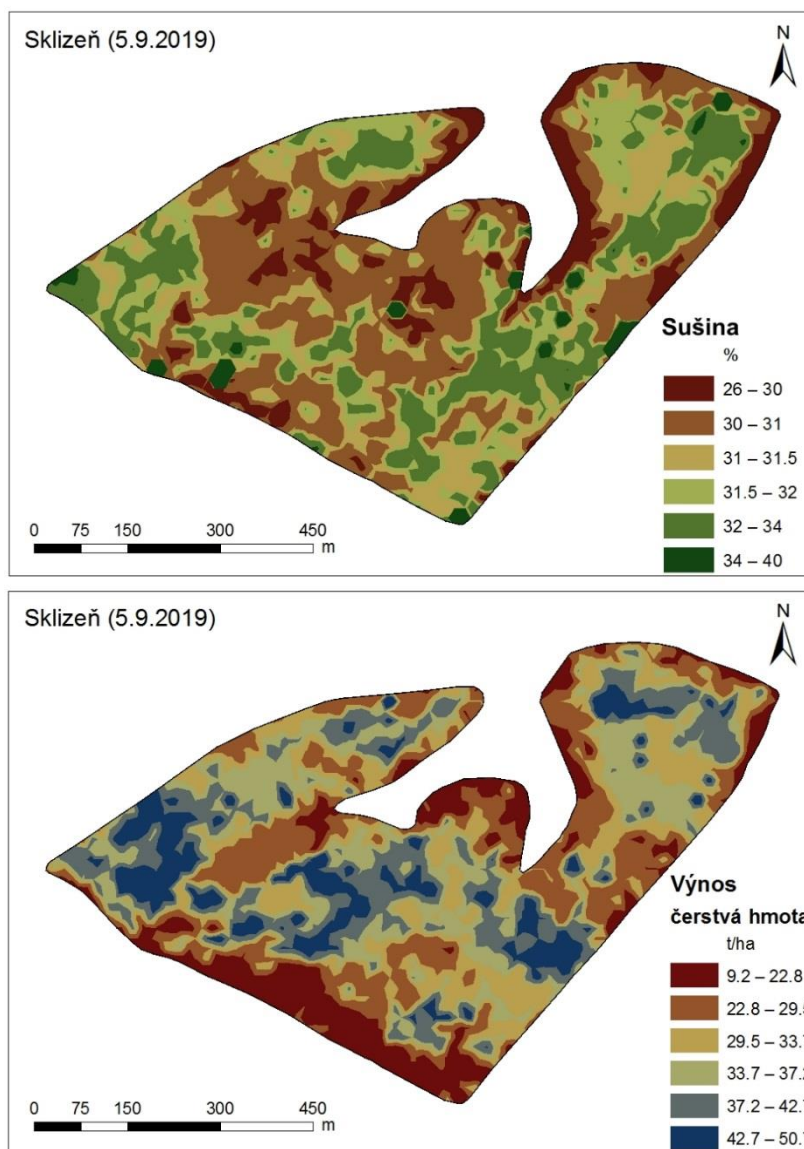


GNDVI



Obrázek 18: Indexy NDRE a GNDVI pro termín 19.8.2019
Zdroj: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D. KZS TF ČZU, upravil Tříška

Sklizeň byla provedena 5.9.2019. K operaci byla použita sklízecí řezačka vybavená senzorovou technikou pro kontinuální sběr dat o výnosu a kvalitativních parametrech siláže. Mapy, které vytvořila, jsou přiloženy níže.



Obrázek 19: Mapy vytvořené během sklizně sensorovou technikou sklízecí řezačky.
Zdroj: doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D. KZS TF ČZU, upravil Tříška

Na mapách je jasně patrná variabilita dozrání porostu. Zřetelná je také korelace mezi použitými vegetačními indexy a daty naměřenými senzory řezačky. Stanovení optimálního termínu sklizně je klíčové pro zajištění co nejvyššího možného výnosu. Sledované parametry mají také vliv na kvalitu siláže. Tato data lze využít i dále k zhodnocení variability pozemku a vycházet z výsledků do dalšího roku. Toho lze využít k řízení variabilní sítě, hnojení apod.

8 Závěr

Rozborem odborné literatury a vědeckých publikací byl učiněn náhled na současné využití bezpilotních prostředků v zemědělství. V teoretické rovině byl definován bezpilotní prostředek, jeho výhody a nevýhody vůči konvenčním metodám dálkového průzkumu Země, stejně tak jako byla věnována pozornost legislativní úpravě provozu na území České republiky.

Bezpilotní prostředky našly uplatnění v oblasti precizního zemědělství. Ukázaly se jako vhodný prostředek pro sběr informací o půdách a plodinách, díky vztahu mezi stavem vegetace a její odrazivostí v různých pásmech elektromagnetického spektra. Bezpilotní prostředky v kombinaci s multispektrálními, hyperspektrálními, ale i konvenčními fotoaparáty poskytují možnost rychlé nedestruktivní analýzy zájmových ploch a umožňují zemědělcům podávat informace v reálném čase, což je v moderním pojetí precizního zemědělství klíčovým prvkem. Mimo toho nabízí bezpilotní prostředky oproti konvenčním platformám výhodu lepšího prostorového rozlišení, díky kterému je možno rozeznat rostliny už ve stádiu vzcházení, což není ze satelitních nebo leteckých snímků možné.

Za účelem analýzy spektrálních dat pro účely zemědělství byly zavedeny vegetační indexy. Mapy vytvořené za pomoci těchto indexů jsou používány jako aplikační mapy pro řízení hnojení a zavlažování, k analýze napadení porostu škůdci, ke sledování zdravotního stavu vegetace, nebo jako podklady k odhadům výnosů. Díky dostupnosti těchto dat lze snižovat ekologický dopad zemědělské činnosti na prostředí, optimalizovat tyto činnosti a snižovat náklady a současně zvyšovat výnosy.

V rámci této práce byla také představena měření provedená na České zemědělské univerzitě v Praze. Provedené měření, které bylo popsáno, ukázalo, že UAV lze efektivně použít k odhadu optimálního termínu sklizně a tím zajistit vyšší výnosy. Data pořízená pomocí UAV byla porovnána s daty pořízenými odebráním vzorků a sběrem dat při sklizni pomocí sklízecí řezačky vybavené senzorovou technikou.

Vědecká činnost v oblasti využívání UAV v zemědělství stále pokračuje a neustále jsou zkoumány nové možnosti využití spektrálních dat, která lze pomocí UAV získat. Pozornost je také zaměřena na zjednodušování analýz těchto dat a zlepšení uživatelské přívětivosti bezpilotních prostředků.

9 Seznam použitých zdrojů

Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví. Prováděcí nařízení Komise (EU) 2019/947. [Online] 2020. [Citace: 17. únor 2020.] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1560266370703&uri=CELEX:32019R0947>.

Airborne Drones. Wildlife & game monitoring. *Airborne Drones.* [Online] 2020. [Citace: 23. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.airboredrones.co/wildlife-and-game/>.

BAJULA, Javier, DIAGO, Maria P., ZORER, Roberto, MEGGIO, Franco, MORALES, Fermin a TARDAGUILA, Javier. 2012. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science.* 2012, Sv. 20, stránky 511-522.

BOKUSHEVA, R., KOGAN, F., VITKOVSKAYA, I., CONRADT, S. a BATYRBAYEVA, M. 2016. Satellite-based vegetation health indices as a criteria for insuring against drought-related yield losses. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2016, Sv. 220, stránky 200-206.

BROWN, David J., SHEPHERD, Keith D., WALSH, Markus G., DEWAYNE MAYS, M. a REINSCH, Thomas G. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma.* 2006, Sv. 132, stránky 273-290.

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.

DRONPRO. Drony v zemědělství a lesnictví. *Dronpro.cz.* [Online] 2020. [Citace: 27. únor 2020.] Dostupné z: <https://dronpro.cz/drony-v-zemedelstvi-a-lesnictvi>.

DUAN, T., CHAPMAN, S. C., GUO, Y. a ZHENG, B. 2017. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research.* 2017, Sv. 210, stránky 71-80.

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 : autor neznámý, 2009. Disertační práce.

FANG, H. a LIANG, S. 2014. Leaf area index models. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2014.

FREELAND, Robert, ALLRED, Barry, EASH, Neal, MARTINEZ, Luis a WISHART, DeBonne. 2019. Agricultural drainage tile surveying using an unmanned aircraft vehicle paired with Real-Time Kinematic positioning—A case study. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019, Sv. 165.

GAGO, J., DOUTHE, C., COOPMAN, R.E., GALLEGO, P.P., RIBAS-CARBO, M., FLEXAS, J., ESCALONA, J. a MEDRANO, H. 2015. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*. 2015, Sv. 153, stránky 9-19.

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.

HABOUDANE, Driss, MILLER, John R., TREMBLAY, Nicolas, ZARCO-TEJADA, Pablo J. a DEXTRAZE, Louise. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 2002, Sv. 81, stránky 416-426.

HAKIM, ULLAH, Abid, HUSSAIN, Amjad, SHABAN, Muhammad, KHAN, Aamir Hamid, ALARIQI, Muna, GUL, Summia, JUN, Zhang, LIN, Sun, LI, Jianying, JIN, Shuangxia a MUNIS, Muhammad Farooq Hussain. 2018. Osmotin: A plant defense tool against biotic and abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2018, Sv. 123, stránky 149-159.

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.

IHUOMA, Samuel O. a MADRAMOOTOO, Chandra A. 2019. Sensitivity of spectral vegetation indices for monitoring water stress in tomato plants. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2019, Sv. 163.

JOHNSON, Jean-Martial, VANDAMME, Elke, SENTHILKUMAR, Kulimuthu, SILA, Andrew, SHEPHERD, Keith D. a SAITO, Kazuki. 2019. Near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for assessing soil fertility in rice fields in sub-Saharan Africa. *Geoderma.* 2019, Sv. 354.

KIRNAK, H., IRIK, H. A. a UNLUKARA, A. 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.

KOGAN, F.N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research.* 1995, Sv. 15, stránky 91-100.

LARCHER, Walter. 2003. *Physiological plant ecology: Ecophysiology and stress physiology of functional groups.* 4. ed. Berlin : Springer Science & Business Media, 2003. ISBN 3-540-58116-2.

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, 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.

MAES, Wouter H. a STEPPE, Kathy. 2019. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in plant science*. 2019, Sv. 24, stránky 152-164.

MIŘIJOVSKÝ, Jakub. 2013. *Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních*. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci. Přírodovědecká fakulta, 2013. Disertační práce (Ph.D.).

MOHANTA, Kumar Tapan, BASHIR, Tufail, HASHEM, Abeer a ABD_ALLAH, Elsayed Fathi. 2017. Systems biology approach in plant abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017, Sv. 121, stránky 58-73.

MOSTAFIZ, Chandan a CHANG, Ni-Bin. 2018. Tasseled cap transformation for assessing hurricane landfall impact on a coastal watershed. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018, Sv. 73, stránky 736-745.

MULLA, David J. 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: *Biosystems Engineering*. 2013, Sv. 114, stránky 358-371.

NIELSEN, D. C. 1990. Scheduling Irrigations for Soybeans with the Crop. *Field Crops Research*. 1990, Sv. 23, stránky 103-116.

PAVELKA, Karel. 2003. *Fotogrammetrie 10*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN: 80-01-02649-3.

PEI, Fengsong, WU, Changjiang, LIU, Xiaoping, LI, Xia, YANG, Kuiqi, ZHOU, Yi, WANG, Kun, XU, Li a XIA, Gengrui. 2018. Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018, Sv. 248, stránky 215-227.

PÉREZ-ORTIZ, María, PEÑA, José Manuel, GUTIÉRREZ, Pedro Antonio, TORRES-SÁNCHEZ, Jorge, HERVÁS-MARTÍNEZ, César a LÓPEZ-GRANADOS, Francisca. 2016. Selecting patterns and features for between- and within- crop-row weed mapping using UAV-imagery. *Expert Systems With Applications*. 2016, Sv. 47, stránky 85-94.

RASMUSSEN, Jesper, NTAKOS, Georgios, NIELSEN, Jon, SVENSGAARD, Jesper, POULSEN, Robert N. a CHRISTENSEN, Svend. 2016. Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*. 2016, Sv. 74, stránky 75-92.

RATAJ, Vladimír, GALAMBOŠOVÁ, Jana, MACÁK, Miroslav a NOZDROVICKÝ, Ladislav. 2014. *Presné poľnohospodárstvo: systém - stroje - skúsenosti : vysokoškolská učebnica*. miesto neznámé : Profi Press, 2014. ISBN 8086726649.

ROSSEL, Viscarra R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J. a SKJEMSTAD, J. O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*. 2006, Sv. 131, stránky 59-75.

SANKEY, Temuulen, DONAGER, Jonathon, MCVAY, Jason a SANKEY, Joel B. 2017. UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. *Remote Sensing of Environment*. 2017, Sv. 195, stránky 30-43.

STEVEN, Michael D. 1998. The Sensitivity of the OSAVI Vegetation Index to Observational Parameters. *Remote Sensing of Environment*. 1998, Sv. 63, stránky 49-60.

SU, Jinya, LIU, Cunjia, COOMBES, Matthew, HU, Xiaoping, WANG, Conghao, XU, Xiangming, LI, Qingdong, GUO, Lei a CHEN, Wen-Hua. 2018. Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018, Sv. 155, stránky 157-166.

SUROVÝ, Petr. 2015. Drony a jejich využití v lesnictví. *Silvarium.cz*. [Online] 2015. [Citace: 28. únor 2020.] Dostupné z: <http://www.silvarium.cz/lesnictvi/drony-a-jejich-vyuziti-v-lesnictvi>.

TURNER, Darren, LUCIEER, Arko a WATSON, Christopher. 2012. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics. *Remote Sensing*. 2012, Sv. 4, stránky 1392-1410.

Úřad pro civilní letectví. 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. Letadla bez pilota na palubě. [Online] 2020. [Citace: 17. únor 2020.] Dostupné z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube>.

VAN GEMERT, Jan C., VERSCHOOR, Camiel R., METTES, Pascal, EPEMA, Kitso, KOH, Lian Pin a WICH, Serge. 2015. Nature Conservation Drones for Automatic Localization and Counting of Animals. *Computer Vision - ECCV 2014 Workshops*. 2015, Sv. 8925, stránky 255–270.

WU, Chaoyang, NIU, Zheng, TANG, Quan a HUANG, Wenjiang. 2008. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008, Sv. 148, stránky 1230-1241.

XIANG, Haitao a TIAN, Lei. 2011. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems Engineering*. 2011, Sv. 108, stránky 174-190.

Zákon č. 49/1997 Sb., ze dne 6. března 1997. Zákon o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů. *Sbírka zákonů České republiky*. 1997, částka 17, stránky 1266-1296. ISSN: 1211-1244.

ZARCO-TEJADA, P. J., MILLER, J. R., MORALES, A., BERJÓN, A. a AGÜERA, J. 2004. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll. *Remote Sensing of Environment*. 2004, Sv. 90, stránky 463-476.

ZHOU, Zhenjiang, PLAUBORG, Finn, THOMSEN, Anton G. a ANDERSEN, Mathias Neumann. 2017. A RVI/LAI-reference curve to detect N stress and guide N fertigation using combined information from spectral reflectance and leaf area measurements in potato. *European Journal of Agronomy*. 2017, Sv. 87, stránky 1-7.