

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra zemědělských strojů

**Využití bezpilotních prostředků pro rozhodovací procesy
v zemědělství**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D.

Autor diplomové práce: Bc. Jaroslav Holub

PRAHA 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra zemědělských strojů

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Holub Jaroslav

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Využití bezpilotních prostředků pro rozhodovací procesy v zemědělství

Anglický název

Utilization of unmanned aerial vehicles for decision making in agriculture

Cíle práce

Představit možnosti využití bezpilotních prostředků pro zemědělství a ochranu krajiny.

Metodika

Pomocí řízeného bezpilotního prostředku budou snímkovány zájmové oblasti a území. Na těchto oblastech bude probíhat pozemní průzkum, který bude sloužit ke klasifikaci a hodnocení pořízených snímků.

Osnova práce

Literární rozbor

Cíl práce

Metodika práce

Výběr pozemků

Snímkování zájmových oblastí

Pozemní průzkum snímkané oblasti

Zpracování naměřených hodnot a snímků

Výsledky a diskuse

Závěr

Rozsah textové části

50 - 60 stran včetně obrázků , tabulek a grafů.

Klíčová slova

DPZ, bezpilotní prostředky, obrazová analýza

Doporučené zdroje informací

Sborník 5th European Conference on Precision Agriculture. 1. vydání. Wageningen: Wageningen Academic Publishers The Netherlands, 2007. 878 s. ISBN: 978-90-8686-024-1

Sborník 6th European Conference on Precision Agriculture. 1. vydání. Wageningen: Wageningen Academic Publishers The Netherlands, 2009. 992 s. ISBN: 978-90-8686-113-2

Sborník 8th European Conference on Precision Agriculture. 1. vydání. Praha: Czech Centre for Science and Society, Praha, Česká republika, 2011. 644 s. ISBN: 978-80-904830-2-6.

Vedoucí práce

Kroulík Milan, doc. Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2013

Termín odevzdání

duben 2015

doc. Ing. Adolf Rybka, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 23.1.2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Využití bezpilotních prostředků pro rozhodovací procesy v zemědělství“ vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury a po odborných konzultacích s Doc. Ing. Milanem Kroulíkem, Ph.D.

V Praze dne 7. dubna

.....

Jaroslav Holub

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Milanu Kroulíkovi, Ph.D. za odborné konzultace a za vedení při psaní této diplomové práce.

Abstrakt: Letecké snímkování, potažmo celý dálkový průzkum Země, je velice užitečným nástrojem pro moderní zemědělské podniky, především v precizním zemědělství. Bezpilotní prostředky v tomto směru díky rychlému vývoji hrají významnou roli. Precizní zemědělství prodělává v poslední době rozmach a vzhledem k nutnosti přesných a co nejkonkrétnějších dat v této oblasti dochází i k tlaku na rozvoj i v oblasti pořizování obrazových dat. Formou literární rešerše jsou popsány základní konstrukční části, ve kterých se bezpilotní prostředky mohou lišit, a metody využití dat pořízených z bezpilotních prostředků. Ve výsledkové části jsou pak již konkrétní příklady využití obrazových dat a následné měření zjišťující vztah mezi obrazovými daty a vodivostí půdy měřenou pomocí vodivostní sondy na pozemku ZD Dolany. Následuje ekonomické zhodnocení pořízení vlastního bezpilotního prostředku a zhodnocení výsledků.

Klíčová slova: bezpilotní prostředky, UAV, precizní zemědělství, průzkum

Summary: Aerial photography, by extension, the entire remote sensing is a very useful tool for agribusiness, especially in precision agriculture. Unmanned Aerial Vehicles in this direction due to the rapid development play an important role. Precision farming is undergoing a boom in recent years and due to the need of accurate and the most specific data in this area there is also pressure on the development and acquisition of image data. Through literature review there are described the basic components in which UAVs may vary, and methods of using data taken from UAVs. In the result part there are already specific examples of image data and subsequent measurement investigating the relationship between image data and soil conductivity measured using a conductivity probe on the field of ZD Dolany. Following is the economic evaluation of acquisition of UAV and evaluation of the results.

Key words: unmanned aerial vehicle, UAV, precision farming, sensing

Obsah

Obsah	1
1 Úvod	1
2 Bezpilotní prostředky	3
2.1 Historie bezpilotních prostředků	3
2.2 Rám	6
2.2.1 Letadlo	6
2.2.2 Helikoptéra	7
2.2.3 Multikoptéra	7
2.3 Pohony	8
2.3.1 Spalovací motory	8
2.3.2 Elektromotory	9
2.3.3 Hybridní pohony	10
2.4 Autopilot	12
2.5 RC	13
2.6 Možnosti přistání	13
2.6.1 Na ruku	14
2.6.2 Na zem	14
2.6.3 Padák	15
2.7 Nesené přístroje	15
2.8 GPS	16
3 Využití v zemědělství	18
3.1 NDVI	19
3.2 REIP (REP)	21
3.3 PRI	24
3.4 Tepelné snímkování	24
3.5 Zaplevelení	26
3.6 Monitorování variability půdy	26
4 Cíl práce	28
5 Metodika	28
6 Výsledky a diskuse	31
7 Ekonomické zhodnocení	45
8 Závěr	50
9 Citovaná literatura	52
10 Seznam Obrázků	55

1 Úvod

Dálkový průzkum Země je v současné době dynamicky se rozvíjejícím se odvětvím a je v hojné míře využíván i v rámci zemědělské produkce. z technologií po pořizování dat dálkového průzkumu se v současné době jeví jako nejperspektivnější bezpilotní letouny. Letecké snímky lze použít pro širokou škálu zemědělských činností. Nejtěsněji spjaté je s využitím bezpilotních prostředků především precizní zemědělství, které závisí na přesných datech o celém pozemku či jeho okolí. Bepilotní prostředky je schopny tato data poskytnout rychle a pro celé zájmové území v krátkém časovém úseku, takže se minimalizuje vliv času na výsledky měření (množství půdních i rostlinných faktorů se v průběhu dne mění). Jedná se především o snímky ve viditelném, blízkém infračerveném a infračerveném pásmu, které jsou dobrými ukazateli některých půdních charakteristik a vlastností porostu. Lze z nich vyčíst množství cenných dat pro zemědělský podnik.

Úvodní kapitola je věnována představení různých typů konstrukčních řešení bezpilotních prostředků a s nimi spjatého vybavení potřebného pro plnění daných úkolů. Jsou popsány rozdíly mezi základními třemi používanými řešeními rámu a možné pohonné jednotky. Dále pak význam a možnosti autopilotu a možnosti autonomie současných bezpilotních prostředků. Zmíněno je i radiové řízení, různé varianty přistání a s nimi související konstrukce, přehled možného palubního sensorového vybavení a jednotky GPS s možností korekce přijímaného signálu.

Další kapitola se zabývá především osvětlením toho, jak se v obrazových datech identifikují podstatné informace a jak tyto informace z obrazových dat získat. Dále jsou zmíněny vybrané vegetační indexy, které lze získat z dat dálkového průzkumu Země, konkrétně jde o normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI) a red edge index (REIP) se zmínkou o green NDVI. Následně je pojednáno o dalších důležitých možnostech využití snímků pořízených z bezpilotních prostředků, jako je tepelné snímkování, monitorování zaplevelení nebo monitorování variability půdy.

Ve výsledkové části jsou pak již konkrétní praktická využití dat z bezpilotních prostředků. Snímkování pozemků za účelem optimalizace vzorkovací sítě pro odběry půdních vzorků, kontrolu poškození porostu zvěří či přírodními živly, snímkování pro výzkumné účely na zkušebních pozemcích (rozdílnost herbicidní ochrany či hnojení), zkoumání utužení půdy dané intenzivním hospodářským využitím pozemku, dané především přejezdy, možnosti 3D

modelace terénu či porostu, snímky pořízené pro kontrolu práce a stavu zájmových území. v neposlední řadě pak snímky měřeného pozemku ZD Dolany, které bylo snímáno i vodivostní sondou, s následným zpracováním získaných obrazových dat a porovnáním s výsledky měření vodivosti pro nalezení a potvrzení závislosti.

Nakonec je zhodnoceno vlastní pořízení bezpilotního prostředku ze strany zemědělského podniku a je srovnáno nákupem družicových a leteckých dat a nákupem snímků z bezpilotního prostředku.

V závěru práce je zhodnocení přínosu bezpilotních prostředků s nástinem možného budoucího využití a vyhodnocení prováděného měření na pozemku ZD Dolany.

2 Bezpilotní prostředky

Bezpilotní prostředky, anglicky unmanned aerial vehicles (UAV) jsou létající stroje bez pilota na palubě. Ty lze dále rozdělit na prostředky autonomní a na dálku ovládané.

Vývoj postupuje takovým směrem, že se stále zvyšuje stupeň autonomie bezpilotních prostředků.

Bezpilotní prostředky byly od počátku především vojenskou technologií a tak není divu, že jejich vývoj úzce koresponduje s moderním válečnictvím.

2.1 Historie bezpilotních prostředků

Záznamy prokazují, že bezpilotních prostředků se využívalo již v devatenáctém století, především v armádě, ale poté i ve vědecké praxi. Nejstarším popsáním případem jsou draky pouštěné z bitevní lodi HMS Pallas roku 1806, které měly dopravit letáky s propagandou na francouzské pobřeží. (1)

Další, taktéž vojenské využití již bylo poněkud sofistikovanější. Roku 1849 použila rakouská armáda k potlačení vzpoury v Benátkách bezpilotních balónů s výbušninami. Balóny byly vybaveny časovou spouští, která po půl hodině uvolnila nálož. Přes minimální efektivnost této metody šlo o posun v technologii. Ta byla však stále silně závislá na povětrnostních podmínkách. (1)

První radiově ovládaný stroj, jehož použití již nebylo závislé na počasí, byl roku 1916 Ruston Proctor Aerial Target, tedy malé letadlo, které využívalo rádiové ovládání vyvinuté profesorem A. M. Lowem. Následně vývoj vedl k Hewitt-Sperry Automatic Airplane, známému též jako létající bomba, které už na rozdíl od původního letadla došlo určitého praktického využití. Řízení zajišťovaly gyroskopy. (2)

Poté již šel vývoj v oblasti bezpilotních letounů rychle dopředu, jelikož armáda docenila jejich praktické možnosti a posléze se vývoj rozdělil na drony a naváděné střely. Drony byly používány, zejména po druhé světové válce, především jako cvičné cíle. Teprve v padesátých letech 20. století došlo k prvnímu využití dronu k průzkumné misi. Šlo tehdy o model RP-71 (Obrázek 1), který dokázal zaznamenávat obraz nebo video z výšky až šesti kilometrů. Stroj byl odpalován z mobilního katapultu a byl poháněn spalovacím motorem. i přes určité nedostatky se již toto zařízení významně podobalo dnešním dronům. (3)



Obrázek 1: RP-71 na katapultu

Zdroj: (3)

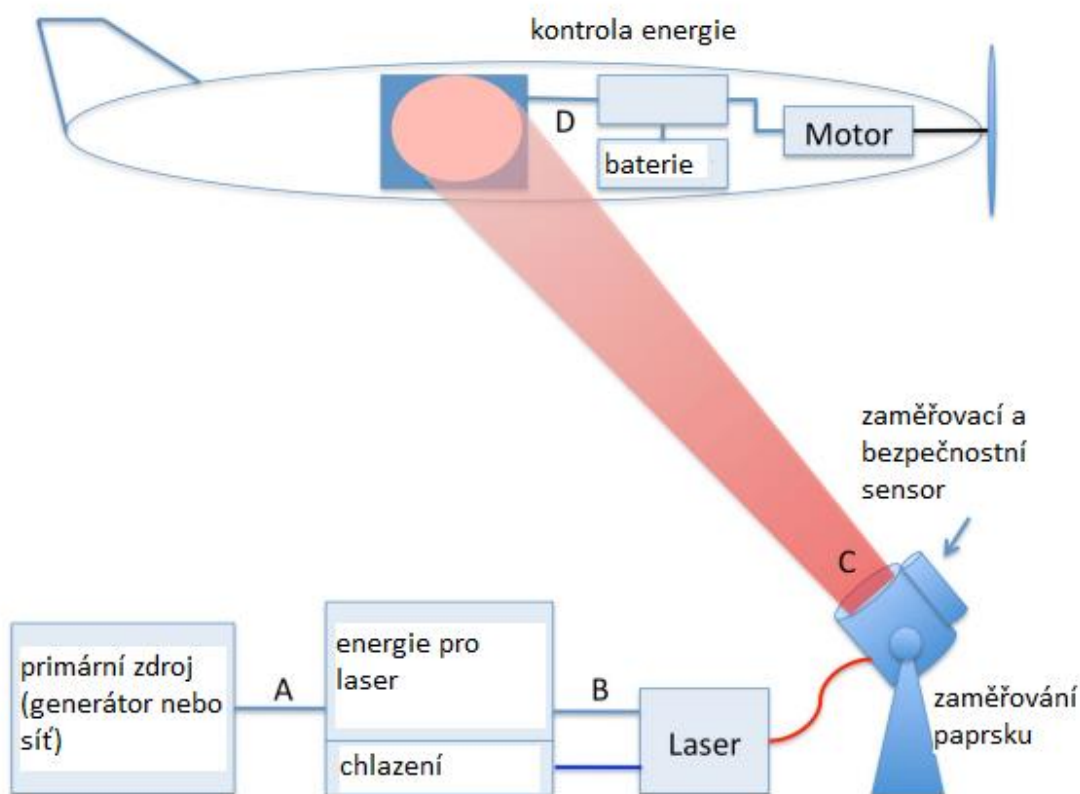
Od sedmdesátých let dochází k intenzivnímu výzkumu v oblasti soběstačných prostředků, které budou schopny nad bojištěm létat velmi dlouho a nebude třeba každou hodinu dobíjet baterie nebo doplňovat palivo. Nabízelo se několik alternativ, z nichž nejslibnější představovala možnost využití solární energie. Prvním solárně poháněným UAV se stal AstroFlight Sunrise, který využíval v roce 1974 foto-voltaických článků s 10% účinností. v současnosti dosahují foto-voltaické články účinnosti i až 46% (v laboratorních podmínkách). Jedním ze současných průkopníků je Helios (Obrázek 2). (4) (5)



Obrázek 2: Helios

Zdroj: (6)

Druhou, taktéž zajímavou možností, je bezdrátové napájení. Zatímco solárně poháněná UAV dosáhla zatím nejdelšího letu 336 hodin 22 minut (QinetiQ Zephyr Solar Electric), jsou příliš velká (rozpětí v desítkách metrů) a jak ukázal projekt Helios, také velice křehká. Naproti tomu lze laserem přenášet energii do UAV ze země a tím významným způsobem prodloužit letový čas stroje. Externí energie (baterie, generátor či rozvodná síť) je laserem přeměněna na monochromatický paprsek světla o konkrétní vlnové délce. Pro současné využití se nejvhodnější možností zdají být pole laserových diod emitující blízké infračervené světlo. Konstantní napájení není praktické vzhledem k možnosti přerušení paprsku, proto je tato technologie spíše využívána v kombinaci s baterií. Schéma využití laserového dobíjení viz Obrázek 3. (7)



Obrázek 3: Schéma dodávání energie pomocí laseru vyslaného ze Země.

Zdroj: (7) upravil Holub

2.2 Rám

UAV lze roztrdit podle rámu, tedy především podle tvaru rámu na tři základní skupiny, z nichž každá má svá pro a proti. Buď konstrukčně připomínají letadlo, helikoptéru nebo multikoptéru.

2.2.1 Letadlo

Tento typ má jeden zásadní nedostatek, není schopen kolmého startu ani vznášení se na jednom místě. To do určité míry prodlužuje čas, který je třeba vynaložit na pořízení snímků, jelikož letadlo musí postupně vystoupat do určité výšky po šikmé dráze, kde teprve může začít pořizovat snímky. Navíc ke startu je zapotřebí mít buď startovací dráhu, jedná li se o model s podvozkovými koly a nebo ve většině případů katapult, pokud model neobsahuje podvozek. Vzhledem k aerodynamickému tvaru, má tento rám nejnižší vzdušný odpor a let je tedy nejsnazší. Obecně mají tyto modely množství mechanických součástí, což zvyšuje možnost závady. Zato obsahují minimum elektroniky. Aerodynamický rám také dává těmto modelům výhodu v doletu a v čase letu. Dosahují taktéž nejvyšší rychlosti letu a nejsou tak náchylné ke změnám počasí. Také mají vyšší nosnost. (8)

Požizovací cena je nižší než u ostatních konstrukcí i náklady na opravy a jejich náročnost je nízká. Standardní cena za samotný rám se pohybuje kolem 4 000 korun. Na Obrázku 4 je rám New Skywalker s celkovou nosností 3 kg a cenou 3 600 korun. (9)



Obrázek 4: New Skywalker UAV

Zdroj: (9)

2.2.2 Helikoptéra

Tato konstrukce umožňuje kolmý start i přistání, vznášení se na pozici i rychlé vystoupení do požadované snímkovací hladiny. Let je však náročnější. Veškerá energie je využita na vertikální pohyb a k vodorovnému pohybu je zapotřebí naklonění stroje. Rám této konstrukce má nejhorší aerodynamické vlastnosti. Navíc je mechanicky nejsložitější. Je náročný i na elektronické systémy. Má střední dolet i čas letu, ale dosahuje nízkých rychlostí. Téměř ve všech parametrech je horší než rám ve tvaru letadla. s tím, že je i velmi náročný na údržbu a má horší výkonové parametry souvisí i fakt, že je nejméně používaným řešením UAV. Příklad konstrukce na Obrázku 5.

Cena odpovídá složitosti konstrukce a i náklady a náročnost oprav jsou výrazně vyšší. (8)



Obrázek 5: Zala 421-06 v letu

Zdroj: (10)

2.2.3 Multikoptéra

Nejběžnější konstrukcí pro malé stroje, které se v zemědělství používají nejvíce, jsou multikoptéry. Jedná se o několika vrtulové stroje podobné helikoptérám, nicméně více vrtulí zajišťuje rámu větší stabilitu a tím pádem nejsou tak konstrukčně náročné jako helikoptéry. Stejně jako předešlá kategorie umožňují vertikální start i přistání a vznášení se nad pozicí. Let není tak náročný jako u helikoptér, ale aerodynamické vlastnosti multikoptéry nedosahují vlastností letadla. Tato konstrukce obsahuje minimum mechanických částí, většina je

především řešeno elektronicky a tak jsou multikoptéry spíše náročné na elektronickou výbavu. Bohužel ale trpí dosah, letový čas i rychlost letu. (8)

Na druhou stranu jsou v současné době pořizovací náklady na multikoptéru již relativně nízké (řádově v desítkách až stovkách tisíc) a náklady na opravy a údržbu jsou taktéž minimální. Na Obrázku 6 je hexakoptéra DJI S900, jejíž pořizovací cena je 24 000 korun. (8)
(11)



Obrázek 6: Hexakoptéra DJI S900

Zdroj: (11)

2.3 Pohony

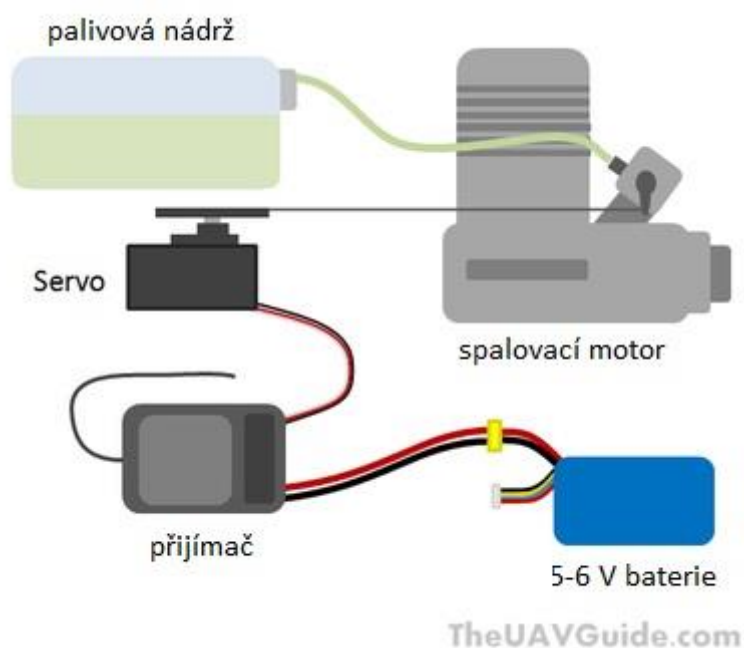
Moderní UAV lze pohánět několika možnými způsoby, z nichž každý má své výhody a nevýhody.

2.3.1 Spalovací motory

UAV jsou velmi často poháněna spalovacím motorem, schéma je na Obrázku 7. Jde především o stroje s hmotností od 25 kg výše. Spalovací motor také vyžaduje nádrž na

pohonné látky, většinou se jedná o benzín. Motor i nádrž významným způsobem zatěžují nosnost rámu a proto se používá spalovací motor především u větších UAV.

Motory se používají jak dvou, tak čtyř taktní. Obecně jsou spalovací motory náročnější na údržbu a seřízení. Jsou také hlučnější, což při snímkování zemědělských ploch příliš nevadí. Ale bohužel jsou i méně spolehlivé a nelze je ovládat tak přesně jako elektrické pohony. To už je při snímkování zásadní nedostatek, možnost, že veškerá nasnímaná data budou pořízena v rozdílných snímkovacích hladinách nebo že některé části snímaného území nebudou na snímcích zachyceny, je velmi limitující pro využití spalovacích motorů v UAV pro zemědělské účely. v neposlední řadě generují spalovací motory konstantní vibrace, které zvyšují již tak vysoké nároky na snímkovací zařízení. Navíc i UAV se spalovacím motorem vyžadují zdroj elektrické energie pro přijímač signálu, případně i pro snímací zařízení nebo vysílač.



Obrázek 7: Schéma pohonu pomocí spalovacího motoru

Zdroj: (8) upravil Holub

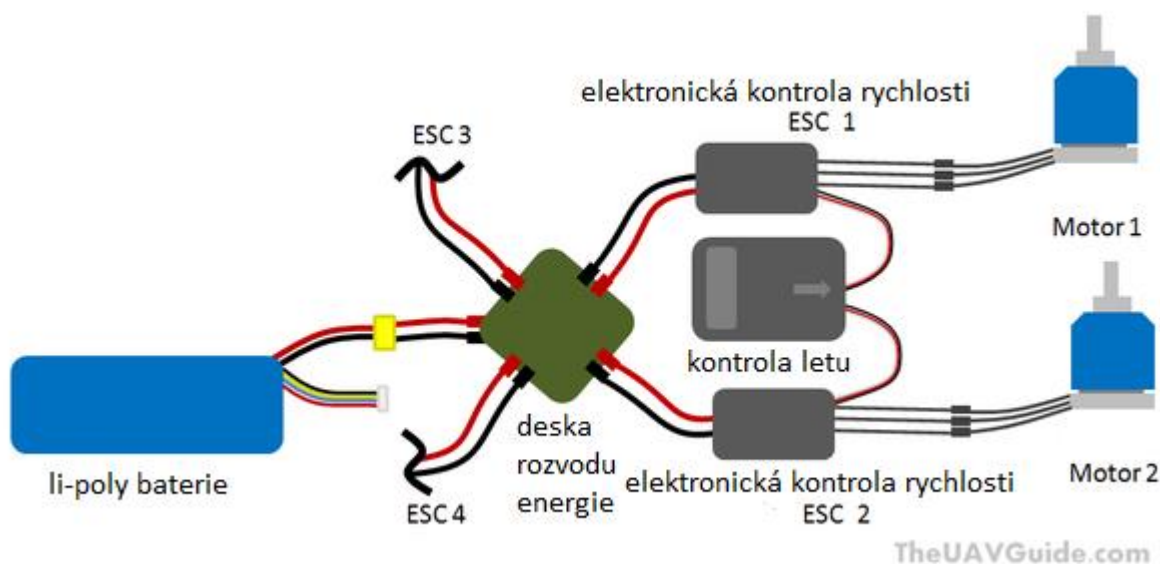
2.3.2 Elektromotory

V dnešní době je nejpoužívanějším typem elektromotoru pro UAV střídavý elektromotor. Na rozdíl od stejnosměrného elektromotoru však nemá ten střídavý komutátory a tak je potřeba, aby UAV bylo vybaveno jednotkou elektrické kontroly rychlosti (ESC), to zajistí

konverzi napětí z baterie na standardních 5 v pro elektroniku UAV. Tento díl navíc je však vyvážen lepším poměrem tahu a hmotnosti, vyšší účinností, zvýšenou spolehlivostí, vyšším poměrem točivého momentu k váze a tiším chodem. (12)

ESC má však tendenci se přehřívat, proto je třeba zajistit tomuto dílu dostatečný přísun vzduchu a již při konstrukci dbát na to, aby byl výstupní proud z ESC o 50-80% vyšší než vstupní proud do motoru. (12)

Další nezbytně nutnou částí u elektrického pohonu je baterie. v současnosti je nejpoužívanější lithium polymerová baterie (Li-poly), která se vyznačuje vysokou hustotou energie (100-265 Wh/kg). Naneštěstí jsou tyto baterie náchylné k poškození a mohou způsobit i požár při nesprávném zacházení. Životnost Li-poly baterie se pohybuje v rozmezí 50 a 500 nabíjecích cyklů. (8)



Obrázek 8: Schéma pohonu pomocí elektromotorů

Zdroj: (8) upravil Holub

Na Obrázku 8 je zobrazena i rozvodná deska, zajišťující dostatečný příkon pro každou ESC jednotku. Ty je navíc třeba propojit s jednotkou kontroly letu kvůli zajištění stability letu.

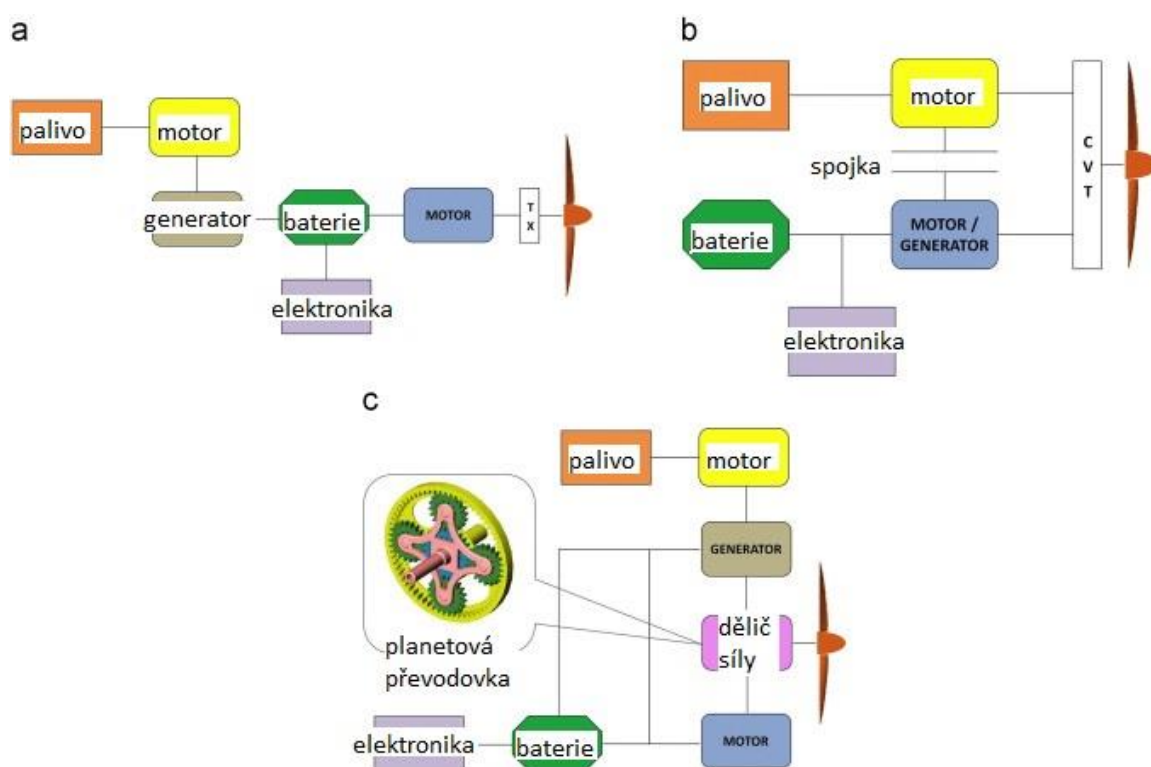
2.3.3 Hybridní pohony

Hybridní pohony jsou možností jak využít silných stránek obou předchozích a zároveň minimalizovat dopady jejich slabých stránek. Spalovací motory mají velký dolet i dlouhou dobu letu, zato jsou hlučné, nespolehlivé a s maximální účinností kolem 40%. Elektromotory

jsou naproti tomu tiché, spolehlivé a účinné, zato dnešní baterie však neumožňují dlouhý let ani velký dolet. Podobný problém se řeší i v automobilovém průmyslu, který táhne celý sektor hybridních motorů. (13)

Hybridní pohon představuje kombinaci spalovacího motoru a elektromotoru, které lze zapojit buď sériově či paralelně, případně konfiguraci rozdělení síly. (viz Obrázek 9) (13)

Sériové zapojení (Obrázek 9 a) je vhodnější pro aplikace, kdy dostačuje nízká rychlost a je zapotřebí vysoký točivý moment (autobusy a jiné prostředky městské hromadné dopravy). Ale díky tomu, že je nejprve generována mechanická energie ze spalovacího motoru, ta je následně konvertována na energii elektrickou a uložena do baterie a nakonec je opět elektrická energie zpět přeměněna na mechanickou v elektromotoru, dochází k významným konverzním ztrátám. Sériové zapojení představuje pro malé UAV zhruba 8% zvýšení hmotnosti bez změny nosnosti. (13)



Obrázek 9: Možnosti realizace hybridního pohonu. (A) sériově, (B) paralelně, (C) rozdělení síly

Zdroj: (13) upravil Holub

Paralelní zapojení (Obrázek 9 b) umožňuje pohánět vrtuli buď samostatným spalovacím motorem, samostatným elektromotorem nebo oběma najednou v závislosti na okolnostech.

Tato konfigurace je využita například u automobilů Honda Insight a Civic s hybridními motory. Nevýhodou této konfigurace je, že brání spalovacímu motoru operovat co neúčinněji, jelikož je vývodová hřídel motoru přes převodovku připojena na hřídel vrtule. Tento negativní vliv by se dal omezit nahrazením převodovky variátorem (CVT), to ale představuje další problémy s kombinací jednotlivých motorů pro maximální účinnost celkového pohonu. (13)

Testy prokázaly, že paralelní zapojení malého spalovacího motoru a elektromotoru s lithium iontovou baterií, vykazovalo o až o 52% nižší spotřebu při hodinovém letu oproti samostatnému čtyřtaktému spalovacímu motoru. (13)

Konstrukci s rozdělením síly podle dostupných zdrojů (Obrázek 9c) nepoužívá žádné UAV a je uvedena pouze v zájmu plného výčtu možností. Elektromotor a spalovací motor nemají v tomto případě žádné pevné propojení a jsou propojeny pouze planetovou převodovkou. Tato konstrukce nabízí srovnatelnou účinnost spalovacímu motoru a přináší pouze snížení emisí. Vlastní konstrukce však přináší řadu obtíží při výrobě a zvedá i pořizovací náklady. Dá se předpokládat, že ani v budoucnu nebude pro sektor UAV nijak perspektivní. (13)

2.4 Autopilot

Autopilot je jednou z velice zásadních součástí, má-li být UAV co platné v zemědělském podniku. Většina komerčních UAV je dodávána s autopilotem i se softwarem, ve kterém lze naprogramovat celý let, interval snímání, letovou hladinu a další parametry (Obrázek 10). Některé programy, například k multikoptérám AiBotix je dodáván firemní software AiProFlight, který dokáže program letu sám navrhnout na základě vstupních parametrů, jako je letová hladina, rychlost letu, překrytí snímků, a zajistit prostorové rozlišení pixelu v rozmezí 1 – 4 mm. (14)

Dají se však sehnat i kvalitní Open Source autopiloty, ať už jde pouze o softwarové vybavení pro některou z běžných programovatelných desek (např. Revolution, CopterControl) nebo přímo pro vlastní zařízení (např. APM). (15) (16)

Autopilot většinou funguje v různých módech autonomie UAV od manuálního ovládání, kdy zajišťuje pouze stabilitu letu, po plně autonomní průběh letu od startu po přistání. Při autonomním letu jde většinou naprogramovat velké množství záchytných bodů (až stovky), kterými stroj musí proletět a s množstvím záchytných bodů roste i možná komplexita trasy snímání. (16)



Obrázek 10: Příprava letového plánu pro autonomní let

Zdroj: Kroulík

2.5 RC

Rádiově řízená (RC) UAV jsou dnešním standardem. Vždy se jedná o kombinaci vysílače, který má v ruce obsluha, a přijímače, který je na palubě UAV. Primárně se dnes setkáváme s 2,4 GHz systémy. Ty oproti starším krystalovým provedením nabízejí velkou míru komfortu pro uživatele. Mají k dispozici široké spektrum frekvencí a dokáží je za chodu dynamicky měnit, což přispívá k bezpečnému provozu UAV. Nemůže se tedy stát, aby signál radiového řízení byl rušen jiným vysílačem. Zemědělsky využívané plochy jsou často cílem modelářů s RC modely letadel, což by jinak velice ztěžovalo práci při snímkování, když by docházelo ke vzájemnému rušení signálů. Tento systém však automaticky přeskočí na jinou vlnou frekvenci a snímkování může nerušeně pokračovat. Běžný dosah RC systémů se pohybuje kolem 4 000 m, což je dostatečná vzdálenost pro většinu menších zemědělských subjektů. Nutno podotknout, že signál RC je potřeba pouze pro manuální ovládání UAV. Pokud je autopilot plně naprogramován na autonomní let, tak může RC vysílač sloužit pouze k aktivaci a deaktivaci zařízení.

2.6 Možnosti přistání

Přistání UAV je zásadní moment letu. Je nutné stroj nijak nepoškodit a bezpečně ho dostat na zem.

2.6.1 Na ruku

Menší UAV mohou z ruky vzlétat i na ni přistávat (Obrázek 11). Přesto že se spíše používá start z ruky je při špatných podmínkách možné použít i přistání do ruky pokud porost nebo terén nedovoluje z nějakého důvodu přistání na zemi. Tato možnost výrazným způsobem zvyšuje flexibilitu v nasazení těchto prostředků.



Obrázek 11: Přistání na ruku u měřeného pozemku

Zdroj: Vlastní

2.6.2 Na zem

Pokud je UAV vybaveno nějakou formou podvozku, tak jakákoliv konstrukce může přistát na zemi. Ať už půjde o letadlo nebo multikoptéru. Letadlo bude potřebovat rovnou přistávací dráhu s relativně rovným povrchem a bez hustého porostu. v případě užití v zemědělství lze významným způsobem využít především silnice a příjezdové cesty u vlastního snímaného pozemku.

Multikoptéra nevyžaduje prostor nikterak velký, vzhledem k vertikálnímu startu i přistání si obsluha vystačí s prostorem jen o málo větším než je multikoptéra sama. Případně se dá přistát na jakékoliv rovné ploše, tedy opět silnice a příjezdová cesta, případně i střecha dopravního prostředku.

2.6.3 Padák

UAV, která potřebují padák pro své bezpečné přistání, jsou v zásadě ta, která nemají žádnou formu podvozku a jsou tedy většinou odpalována z katapultu nebo z ruky, jde tedy především o rámy tvaru letadla. Padák silným způsobem ovlivňuje sílu nárazu při dopadu UAV na zem, nicméně pro zvýšení bezpečnosti lze stroj vybavit i přistávacími airbagy (Obrázek 12). Padák se většinou používá dvoustupňový. První kruhový padák o menším průměru pomůže vytáhnout hlavní kruhový padák, který se postará o bezpečné přistání UAV.



Obrázek 12: Přistání CL-289 s padákem a dvěma airbagy

Zdroj: (17)

2.7 Nesené přístroje

Samozřejmě je zapotřebí jistého vybavení, aby mohla UAV plnit nějakou užitečnou roli v zemědělském sektoru. Především je nutné, aby bylo vybaveno snímacím zařízením. Tím bývají především multi a hyperspektrální sensory. Používají se ale i běžné fotoaparáty či

fotoaparáty snímající viditelné a blízké infračervené spektrum. Dále se používají sensory chemických a biologických látek, LIDAR a SAR.

Chemické senzory využívají metody laserové spektroskopie k určení přítomnosti a obsahů jednotlivých prvků a sloučenin v okolním prostředí. Biologické sensory zase dokážou detekovat přítomnost různých mikroorganismů.

SAR (synthetic aperture radar) představuje variantu radaru, která dokáže vytvořit dvou nebo třírozměrný obraz objektu. Proces využívá pohybu antény radaru, což umožňuje získat mnohem detailnější obraz než s klasickým radarem se stejně velkou anténou. SAR vyžaduje relativní pohyb antény a objektu po dostatečně dlouhou dobu, proto se většinou montuje např. na letadla. Pohybem antény dochází k umělému zvětšení antény a u radarů obecně platí, že čím větší anténa, tím lepší rozlišení a tím větší detail.

LIDAR je technologie dálkového průzkumu, při které dochází k ozařování objektu laserem, odražené světlo je pak analyzováno a na základě výsledků je vytvořen trojrozměrný obraz objektu.

2.8 GPS

GPS (Global Positioning System) modul je klíčovým prvkem pro veškeré operace bezpilotních systémů. Zcela zásadní význam pro pořizování snímků má přiřazení přesné souřadnice ke snímku. Čím přesnější jsou souřadnice a výška, tím přesněji lze přiřadit data v softwaru. Navíc je tento modul využíván i při naprogramovaném letu pro kontrolu záchytných bodů.

Modul přijímá radiový signál vysílaný družicemi a ten pak podle pozice družic nad horizontem, jejich počtu a časové značky převede do souřadnicového systému globálního polohovacího systému a určí tak polohu a nadmořskou výšku. Základní využití GPS bez jakýchkoliv korekcí není ze zemědělského pohledu příliš vypovídající, jelikož dosahuje i větší než 10m chyby měření.

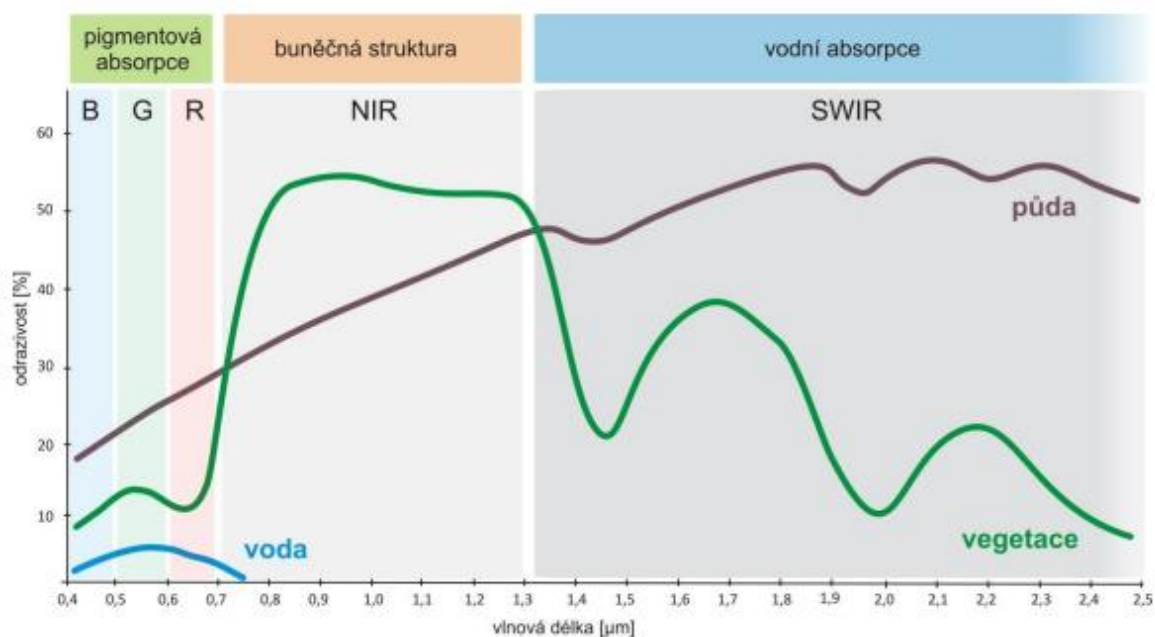
Pro aplikaci v zemědělství se proto používá většinou systém diferenciálního GPS (DGPS), který rozšiřuje výpočet o signál z referenčních stanic. Referenční stanice je vysílač se známými souřadnicemi a jeho signál je využit ke korekci chyb vzniklých efemeridami družic, vlivem relativistických efektů na družicové hodiny, ionosférickými a troposférickými reakcemi a vícecestným šířením signálu. Dokáže tak snížit chybu na 1 m, což už je reálně použitelná hodnota pro přesné mapování.

Další možností zpřesnění GPS signálu je RTK (Real Time Kinematic), který využívá jeden jediný referenční bod, ke kterému dopočítává korekce na základě měření změny fáze signálu. Navíc jako zdroj souřadnic nevyužívá informaci obsaženou v signálu z družic systému GPS, nebo kteréhokoliv jiného pozičního systému, ale využívají nosnou vlnovou délku signálu. Například C/A kód vysílaný v pásmu L1 má frekvenci 1,023 MHz, zatímco nosný signál 1575,42 MHz, to znamená, že vlnová délka nosného signálu je zhruba 19 cm a při 1% chybě to tedy představuje odchylku 1,9 mm zatímco C/A kód má při stejné chybě odchylku 3 m. Tato technologie má však jiný problém, správně vyrovnat signály. Navigační signál je úmyslně kódovaný tak, aby bylo vyrovnání jednoduché, ale cykly nosného signálu jsou si vzájemně velice podobné, je proto náročné odlišit zda je signál vyrovnán správně nebo je vyrovnán na jeden vedlejší, což představuje chybu 20 cm. To se v praxi dá řešit statistickými metodami, které porovnávají výsledek s měřením C/A signálu z více satelitů, nicméně žádná metoda nedokáže tuto chybu spolehlivě odstranit. Ve výsledku lze docílit velice přesného určení pozice s horizontální přesností až dvou centimetrů, což je dostačující pro prakticky všechny aplikace v precizním zemědělství. (18)

3 Využití v zemědělství

Ke snímání Zemského povrchu se podobně, jako u řady dalších sensorových systémů pro hodnocení stavu zemědělských porostů, využívají rozdíly ve spektrálním chování v jednotlivých pásmech elektromagnetického záření. Rostliny totiž vykazují specifickou odrazivost (viz Obrázek 13). Červené a modré spektrum je převážně spotřebováno během procesu fotosyntézy, část zeleného spektra se odráží (tím je dáno, že vidíme rostliny jako zelené). Blízké infračervené spektrum (NIR) se z velké části odráží, nicméně NIR je pro lidské oko neviditelné a je tedy zapotřebí k jeho záznamu použít speciálního detekčního zařízení. (18)

Letecké snímky pozemků bez porostů také poskytují cenné informace, především jako vstupní data do systémů, které by měly bojovat s erozí půdy, která je v České Republice stále větším problémem.



Obrázek 13: Spektrální chování vody, půdy a vegetace v pásmu elektromagnetického záření 400 – 2500 nm

Zdroj: (19)

Jednoduše jde říct, že viditelné spektrum nám podává informaci o stavu fotosyntetického aparátu, zatímco blízké infračervené spektrum nás informuje o množství biomasy. Při pohledu na multispektrální snímek, který obsahuje všechna tato pásma, se bude porost jevit v červené a modré části jako velmi tmavý až černý, v zelené části spektra bude šedý a v NIR bude světlý

až bílý. Tomuto popisu odpovídá zdravá vegetace. Vegetace postižená stresem (či stárnoucí vegetace) vykazuje změny v odrazivosti, konkrétně přibývá odrazivost v červeném spektru (žloutnutí listů) a naopak v NIR se odrazivost snižuje. Spektrální měření dokáže relativně spolehlivě detekovat porostní rozdíly – napadení rostlin, nedostatečnou výživu či vodní stres. Příčinu stresu však většinou neodhalí. (18)

Diskutovaným problémem je citlivost porostu na hnojení dusíkem. Dá se říct, že aplikace dusíku má na odrazivost rostlin dvojí efekt. Má vliv na množství biomasy a zároveň zvyšuje množství chlorofylu. Úspěšné využití leteckého snímkování závisí na zachycení obou těchto parametrů. Používají se například vegetační indexy, které jsou výsledkem jednoduchých aritmetických operací s odrazivostí v několika částech elektromagnetického spektra. v zemědělství jsou nejpoužívanějšími vegetačními indexy NDVI a REIP. (18)

Snímků pořízených bezpilotními systémy je však možné využít i k dalším aplikacím, nevypovídají pouze o stavu dusíku v porostu. Tyto snímky najdou uplatnění při

- detekci chorob a škůdců,
- monitorování zaplevelení,
- monitorování LAI,
- monitorování odezvy na hnojení,
- detekci stresu spojeného s vodou,
- kontrole porostu,
- snímání samotné půdy,
- plánování zavlažování či vysychání pozemku,
- monitorování a odhady výnosů,
- a výzkumu. (21)

3.1 NDVI

Normalizovaný diferenční vegetační index (Normalized Difference Vegetation Index) je nejznámějším vegetačním indexem, který byl původně vyvinut pro stanovování dynamických vegetačních dějů u širokopásmých satelitních snímků. Normovaný výpočet umožňuje redukovat rušivé prvky jako například rozdíl v osvětlení scény, vliv atmosféry a stíny, protože jejich působení je v různých pásmech zpravidla stejné. Při porovnávání různých termínů snímkování je ale zapotřebí použít radiometrické korekce pro standardizaci světelných podmínek. (18)

Rovnice pro výpočet NDVI pro širokopásmé senzory je následující,

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

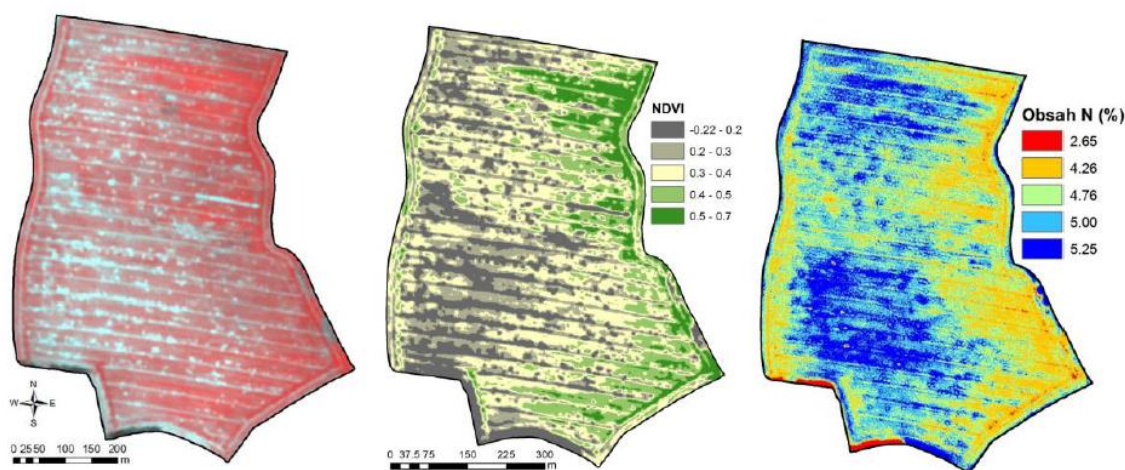
kde R_{NIR} je odrazivost v blízkém infračerveném pásmu a R_{RED} je odrazivost v červeném pásmu. (18)

Při snímání modernějšími úzkopásmovými senzory se NDVI počítá jen z pásem určitých vlnových délek. Rovnice pak může vypadat takto,

$$NDVI = \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670}},$$

Kde R_{800} představuje odrazivost v oblasti 800 nm. (18)

Výsledkem je bezrozměrná veličina v intervalu od -1 do 1. Výše indexu koreluje s obsahem zelené hmoty v pixelu a umožňuje tak její kvantifikaci. Hodnoty blízké nule značí většinou holou zem, záporné hodnoty zastavěnou oblast a kladné hodnoty odpovídají biomase. Výsledky řady odborných prací prokazují vysoké korelace NDVI s množstvím biomasy, veličinou LAI (Leaf Area Index), obsahem chlorofylu a vody v rostlinách. Vyšší hodnoty NDVI indikují větší množství biomasy, hmotnost rostlin, větší počet rostlin na m^2 počet odnoží na rostlinu a vyšší obsah chlorofylu (výživnou hodnotu rostlin). Aplikace NDVI (viz Obrázek 14). (18)

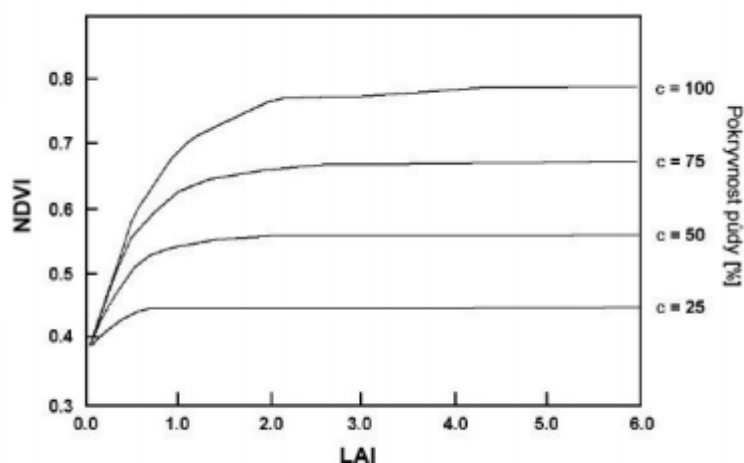


Obrázek 14 Multispektrální snímek prostoru ozimé pšenice (DC 37) na 38 ha pozemku v nepravých barvách (vlevo), klasifikovaný NDVI snímek (uprostřed) a predikce obsahu N v rostlinách na základě NDVI a NIR

Zdroj: (18)

Vztah mezi NDVI a hustotou porostu má však nevýhodu, takzvané nasycení, při vysoké hustotě porostu. Ta je většinou hodnocena pomocí indexu listové plochy (LAI). Ten udává plochu horní strany všech listů porostu v m² na jednom metru čtverečním půdy. LAI se v průběhu vegetačního období zvyšuje, u dobře vyvinutého obilného porostu může dosáhnout až hodnot 5 – 9. Ale při dosažení určitého LAI se už NDVI téměř nemění (viz Obrázek 15) a dojde k nasycení. k tomu dochází při hodnotách LAI 1 až 3, případně 2 až 6 podle typu vegetace, (viz Obrázek 15) příčinou je nedostatečná citlivost NDVI změny v obsahu na střední a vyšší koncentrace chlorofylu. Nárůstem biomasy vstupuje množství chlorofylu na jednotce plochy, tím pádem je vysoká absorpce červeného záření a k saturaci dochází už při nižších koncentracích chlorofylu. Klem et al. (2011) na tuto skutečnost poukazují a navrhují modifikaci NDVI na green NDVI kdy se ve výpočtové rovnici červený kanál nahradí zeleným (kolem 550 nm) a NIR záření o délce 750 nm. Rovnice by tedy vypadala takto, (18)

$$gNDVI = \frac{R_{750} - R_{550}}{R_{750} + R_{550}}$$

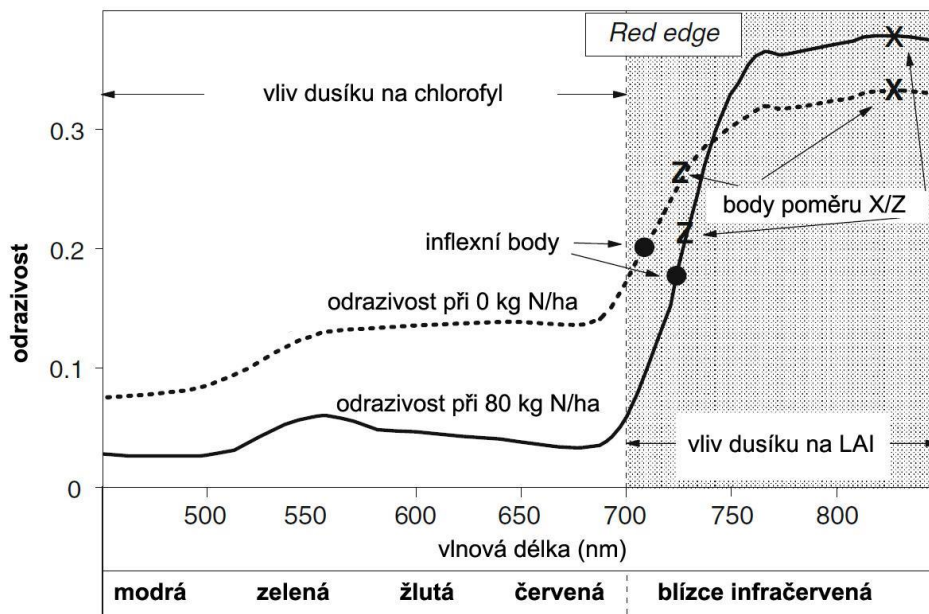


Obrázek 15 Závislost NDVI na LAI a pokryvnosti prostoru

Zdroj: (18)

3.2 REIP (REP)

Red Edge Index známý i jako Red Edge Inflection Point či Red Edge Position udává vlnovou délku inflexního bodu spektrální křivky v red edge oblasti. REIP se pohybuje většinou v oblasti 680 – 750 nm a jeho vlnová délka souvisí s parametry prostředí. Zvýšení biomasy nebo koncentrace chlorofylu zapříčiňuje jeho vyšší vlnovou délku (Obrázek 16) (18).



Obrázek 16 Závislost odrazivosti ozimého žita a pozice REIP v období produkčního hnojení po uplynutí sedmi dní

Zdroj: (18)

Pozitivní vlastností REIP je, že není tak citlivý na rušení, jako třeba záření odražené od půdy a atmosférické vlivy, Zároveň vykazuje vysokou citlivost k požadovaným charakteristikám porostu (koncentrace chlorofylu a hustota porostu). Navíc na rozdíl od NDVI nedochází k saturaci při vysokém LAI. Nevýhodou však je nutnost využívat speciální sensorovou techniku pro zachycení odrazivosti v přesně definovaných úzkých pásmech elektromagnetického záření. (18)

Výsledkem výpočtu REIP je vlnová délka inflexního bodu a samotný výpočet může být proveden dvěma způsoby. (18)

Zprv numerickým výpočtem druhé derivace křivky odrazivosti porostu a určením vlnové délky s výsledkem rovným nule (některé publikace uvádějí výpočet pomocí první derivace),

$$\frac{d^2R}{d\lambda^2} = 0,$$

kde R je reflektance dané vlnové délky λ . (18)

Zadruhé lineární interpolací podle přibližné empirické rovnice podle Guyotem (1988) ze čtyř spektrálních pásem (670, 700, 740, 780 nm), (18)

$$REIP = 700 + 40 \frac{\frac{R_{670} + R_{780}}{2} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} [nm].$$

První způsob vyžaduje podrobně stanovenou spektrální křivku sledované oblasti s dostatečným spektrálním rozlišením. Ten lze získat s pomocí spektrometru, který poskytne jeden výsledek (křivku) ve sledované oblasti. Dalším způsobem je hyperspektrální skener, který nám dodá obraz se spektrální křivkou pro každý pixel. Druhá metoda v podobě lineární interpolace je početně jednodušší a méně náročná na technické vybavení jelikož se sleduje pouze odrazivost v úzkých pásmech vlnových délek. (18)

Citlivost vegetačních indexů na rozdíly v hnojení dusíkem se sledovala v množství odborných studií. z tabulky Tab. 1 vyplývá, že nejvyšší koeficient determinace byl dosažený u REIP vypočteného lineární interpolací. Vztah mezi úrovní výživy a REIP je většinou lineární, změna indexu REIP o 1 nm indikuje rozdíl 15 kg N dodaného hnojením 6 týdnů před měřením. Určení výchozí dávky v porostu však musí předcházet kalibrace, která se provádí na dvou kontrastních v porostu zjištěním jejich výživového stavu tradičními metodami se současným zaznamenáním vegetačního indexu. Kalibrace se musí provádět pro jednotlivé odrůdy, plodiny, vegetační fáze a půdní podmínky. (18)

	Rovnice pro odrazivost R ve vlnových délkách (nm)	Koeficient determinace
Odrazivost v zeleném pásmu (R)	$R550$	0.910
Odrazivost v červeném pásmu (G)	$R670$	0.884
Odrazivost v NIR	$R800$	0.569
Poměr NIR a R	$\frac{R800}{R670}$	0.911
Poměr NIR a G	$\frac{R800}{R550}$	0.943
NDVI	$\frac{R800-R670}{R800+R670}$	0.914
SAVI	$\frac{1.5(R800-R670)}{R800+R670+0.5}$	0.907
REIP (diferenciální výpočet)	$\frac{d^2 R}{d\lambda^2} = 0$	0.932
REIP (numerický výpočet)	$700 + 40 \frac{(R670+R780)/2 - R700}{R740-R700}$	0.970

Tab. 1 Koeficient determinace mezi vegetačními indexy a úrovní výživy dusíkem

Zdroj: (18)

3.3 PRI

Photochemical Reflectance Index (PRI) je další metodou hodnocení snímků porostů. Tento index je citlivý na změny v karotenoidových pigmentech (např. n xantofylech). Karotenoidy indikují efektivitu využití světla při fotosyntéze, nebo-li míru nárůstu CO₂ za jednotku absorbované energie. Pro výpočet PŘI lze využít vztahu

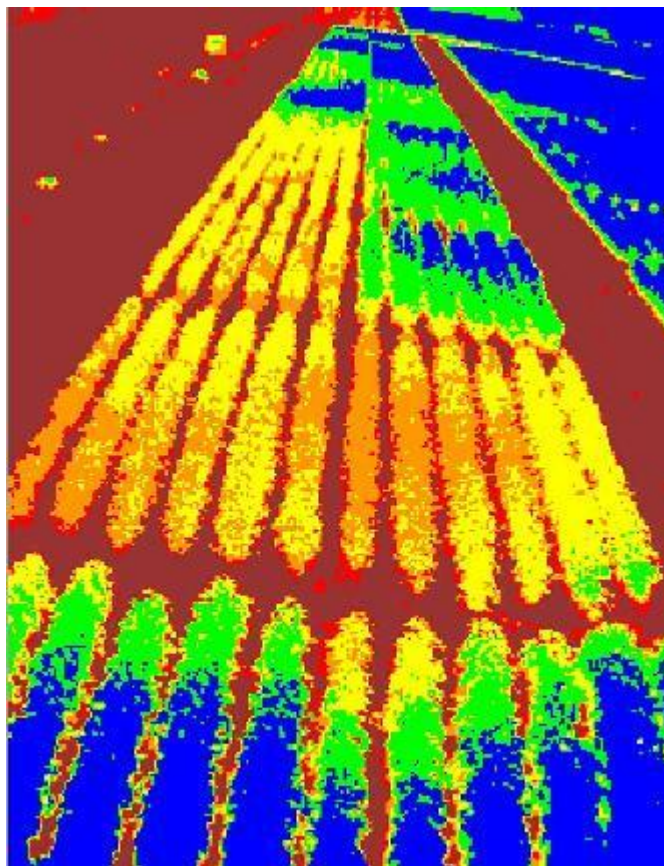
$$PRI = \frac{(R531 - R570)}{(R531 + R570)},$$

kde reflektance na 531 nm indikuje změnu karotenoidů a naopak reflektance na 570 nm vlnové délky je ke krátkodobým změnám karotenoidů necitlivá. (22)

3.4 Tepelné snímkování

Tepelné snímky představují data z oblasti LWIR (Long Wavelength Infra Red), tedy s vlnovými délkami 7 až 14 μm. Technicky lze tepelně snímkovat již od NIR spektra (tedy od zhruba 750 nm), ale množství vyzařované tepelné energie na tak nízké vlnové délce je příliš malé, a tak se dá reálně měřit tepelné záření od 3 do 14 μm. Avšak v pásmu 5 až 7 μm je většina energie záření absorbována vodní párou v atmosféře a tak se prakticky měří až od sedmi nebo osmi mikrometrů. (23)

Tepelné snímkování má sice určité využití při snímkování porostů, ale mnohem širší využití mají termokamery v živočišné produkci. Bezpilotní prostředky vybavené touto technologií jsou často využívány ke kontrole stáda, zejména při snížené viditelnosti, kdy by konvenční metody zvířata zbytečně stresovaly. Dále se z nich pak dá usoudit, zda nějaké zvíře netrpí nějakou chorobou či zraněním. Navíc lze tímto způsobem odhalit predátory v blízkosti stáda, což nenajde velké využití v regionu České Republiky, ale v jiných podmínkách je tepelného snímání využíváno k ochraně před vlky či kojoty. (24)



Obrázek 17: Mapování obsahu vody v listech

Zdroj: (25)

Mapa zavodnění pozemku je dalším důležitým využitím leteckého snímkování v zemědělské praxi. Pro její tvorbu je zapotřebí snímku v tepelném pásmu, ale pomůže zemědělskému podniku zjistit rozložení vodních zásob na pozemku a upravit tak zavlažování, aby byl rovnoměrně irigován celý pozemek. Rozdíly mohou vzniknout například množstvím slunečního záření, kterého se jednotlivým částem pozemku dodává. Část pole vedle lesa, kde je přes poledne stín nebude potřebovat stejnou dávku jako část, která je celý den vystavena přímému slunečnímu svitu. Opět to otevírá prostor pro úspory a zvýšení výnosu pozemku. Data z tepelného pásma navíc nepotřebují žádný zvláštní výpočet, podle barvy je vidět jak moc porost v dané oblasti trpí odparem. Tmavá modrá barva, reprezentující nízké teploty, znamená, že porost má dostatek vláhy (Obrázek 17). Naopak světlejší barvy jako zelená a žlutá reprezentují vyšší teploty a tím i porost, který trpí nedostatkem vody, kde by bylo potřeba zavlažit, aby nedošlo u uschnutí části porostu a tím ztrátám na výnosech.

3.5 Zaplevelení

Význam má i snímkování mladého či vzrostlého porostu z hlediska odhalení ložisek plevelu. Toho se dá s bezpilotními prostředky dosáhnout hned několika různými způsoby. Je možné vytvořit 3D obraz pozemku, ze snímků pak poznáme, že kulturní plodina má stále relativně stejnou výšku, zato extrémní odchylky ve výšce, ať už kladné či záporné, značí, že se jedná o jiný druh porostu, případně může jít i o změnu výšky danou konkrétními lokálními půdními podmínkami, ale v tom případě budou snímky korelovat s některým z měřených indexů či s výnosovou mapou.

Další možností je odhalení plevelu na základě analýz odraženého světla. Jako klíčová jsou pro tuto metodu čtyři pásma záření, 440 nm (modré), 530 nm (zelené), 650 nm (červené) a nad 730 nm (blízké infračervené). Rozlišitelnost porostu je při této metodě také velmi důležitá a bylo zjištěno, že je rozlišitelnost lepší, když je pixel 150 x 150 mm než při 10 x 10 mm. Po aplikaci bilineárních metod je tato metoda schopna rozpoznat rozdíly mezi kulturní plodinou a plevelem s 80-90% úspěšností na mladém porostu. (25)

Třetí možností je využít speciální rozpoznávací software, ve kterém jsou vloženy vzhledové charakteristiky kulturní plodiny a plevelu. Software pak porovnává, zda se mladá rostlinka podobá kulturní plodině nebo ne a s jakou určitostí. Tato data lze pak využít pro cílené odstranění hrozby zaplevelení. Tato metoda ale vyžaduje vysoké prostorové rozlišení, nejlépe s pixelem menším než 1 mm, což vyžaduje velmi nízké přelety a tedy i úměrně více času na nasnímkování pozemku. (26)

3.6 Monitorování variability půdy

Další významnou oblastí využití bezpilotních prostředků je monitorování variability na zájmovém pozemku. z pořízených snímků lze vyčíst velké množství údajů a to nejen pro následné využití při zpracování půdy. Nevýhodou této metody však je, že dojde k získání dat pouze ze svrchní vrstvy pozemku, zatímco pár centimetrů pod povrchem již mohou být půdní vlastnosti odlišné.

Ze snímků je možné zjistit jaká zem na pozemku ve kterých oblastech je a i když podnik i agronom většinou mají představu o půdě ve zvolené lokalitě, tak snímky dokážou odhalit i rozměrově menší oblasti, které se odlišují a jsou třeba písčitéjší než zbytek pozemku. a i když se může jednat pouze o jednotky či desítky metrů velké oblasti, je možné tomu přizpůsobit následné zpracování půdy, chemické ošetření či zavlažování.

Dále je možné ze snímků vyčíst hrudovitost pozemku. Ať už z tradičních RGB snímků pořízených s prostorovým rozlišením kolem jednoho centimetru nebo za pomoci 3D snímkování LIDARem, případně SARem. Hrudovitost ovlivňuje rovnoměrnost vzcházení rostlin a je tedy nutné jí věnovat pozornost pro dosažení co nejhomogennějšímu postupu dozrávání, aby v okamžik sklizně bylo dosaženo vyšší kvality sklizené plodiny.

4 Cíl práce

Představit možnosti využití bezpilotních prostředků pro zemědělství a ochranu krajiny.

5 Metodika

Pomocí řízeného bezpilotního prostředku budou snímkovány zájmové oblasti a území. Na těchto oblastech bude probíhat pozemní průzkum, který bude sloužit ke klasifikaci a hodnocení pořízených snímků.

Ke snímkování pozemků byl použit osmivrtulový bezpilotní letoun Asctec Falcon 8 (Obrázek 18), který má k dispozici Katedra zemědělských strojů na Technické fakultě ČZU a se kterým probíhala měření k této práci. Letadlo může být vybaveno buď multispektrální kamerou, která umožňuje snímání v blízkém infračerveném spektru, nebo klasickým RGB fotoaparátem. Kombinací snímků z viditelného spektra a blízkého infračerveného spektra můžeme přistoupit k vlastnímu výpočtu vegetačních indexů, které mohou být dále využity v zemědělském podniku.



Obrázek 18: Osmivrtulový bezpilotní prostředek Asctec Falcon 8

Zdroj: Vlastní

Během snímkování povrchu půdy nebo porostu je prostředek schopen autonomního letu podle předem definovaného letového plánu. Ten se připraví s předstihem, kdy je možné dopředu zvážit požadované rozlišení snímku, dané letovou výškou, směry snímkování nebo například překrytí snímků.

Výhodou technického řešení letadla je určitě možnost zastavení během letu a setrvání nad sledovaným územím v předem definované výšce.

Byly pořízeny snímky rozdílných zájmových území. z důvodu rozmanitosti aplikací, byly představeny rozdílné situace, ke kterým je výhodné pořídit snímky zájmové oblasti.

Za účelem kombinace a porovnání informací o variabilitě půdního prostředí byly pořízeny snímky bezpilotním prostředkem a sbírána data při pozemním pozemního průzkumu. Byl vybrán pozemek, který obhospodařuje ZD Dolany. Pozemek spadá do katastrálního území Dolany u Jaroměře. Výměra pozemku je 14,25 ha. Na pozemku převládá půdní typ hnědozem modální. Jedná se o svažité pozemek. Rovinatá severní část pozemku se postupně svažuje k jihovýchodu, kde přechází opět v rovinu. Nadmořská výška pozemku se pohybuje mezi 300 až 325 m. n. m.

Snímky byly pořizovány ve viditelném spektru. Výšky snímkování se odvíjely od požadavku pořídit na jeden záznam celé, nebo podstatné zájmové území. Fotoaparát byl natočen kolmo k povrchu pozemku, aby se minimalizovalo zkreslení snímků.

Na uvedeném pozemku byla po zasetí jarní pšenice měřena vodivost půdy pomocí sondy EM 38 MK2. Sonda EM 38 MK 2 od společnosti Geonics Limited představuje geofyzikální přístroj ze skupiny tzv. „on-the-go“ senzorů. Výstupy ze sondy jsou používány pro popis variability půdního prostředí. Při měření je sonda tažena pomocí terénní čtyřkolky a data jsou ukládána do ústředny společně s informacemi o poloze přístroje (obrázek 19).



Obrázek 19: Sonda EM 38 MK2 (vlevo), terénní čtyřkolka s datovou ústřednou, GPS a saněmi pro uchycení sondy (vpravo)

Zdroj: Vlastní

Získaná data byla následně podrobena zpracování v programové balíčce ArcGIS 10.2 (ESRI, Redlands, USA), ENVI (Exelis VIS, McLean, VA, USA) a Statistica 12 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

6 Výsledky a diskuse

Pro sledování variability porostu nebo variability půdních vlastností se čím dál více využívají možnosti dálkového průzkumu Země. Potenciál využití senzorových systémů je v možnosti zajištění vysoké hustoty vzorkování za přijatelných nákladů. Ze spektra technologií dálkového průzkumu je v současné době nejdostupnější jak pro praktické využití v podniku, ale i ve výzkumu, využití bezpilotních prostředků, především multikoptér. Tyto stroje jsou navíc velice flexibilní v nasazení a je tedy možné jich využít prakticky všude, s velmi nízkými provozními náklady a to při celoplošném snímkování zájmového území. a vzhledem k vývoji v této oblasti se bezpilotní prostředky posunuly od modelů letadel, které vyžadovaly značnou zkušenost a pozornost pozemního pilota, až k autonomním systémům, které se dokáží do jisté míry postarat o řízení, let i sběr dat, zatímco pozemní pilot jen kontroluje, zda vše probíhá jak má.

Jako primární aplikace bezpilotních systémů se nabízí hodnocení variability pozemků (Obrázek 20). Na obrázku je zachycen pozemek Školního zemědělského podniku v Lánech o výměře přibližně 9 ha. Na pozemku jsou ve viditelném spektru zachyceny rozdíly v zabarvení povrchu půdy. Tyto rozdíly dále vynikají na členitém pozemku. Nasnímkováním povrchu půdy získáme přehled o míře variability půdy. Snímkováním získáváme celoplošnou informaci o daném pozemku a z těchto snímků lze vycházet pro další využití nasbíraných dat, například vhodného zvolení vzorkovací sítě pro pozemní vzorkování půdy a následné laboratorní testy. Optimalizováním sítě nejenže může podnik snížit finanční a časovou náročnost na samotné odběry, ale může tak předejít i situaci kdy dochází k odběru množství vzorků na velké homogenní části pozemku a silně variabilní menší plochy nemusí být vzorkovací sítí vůbec postihnuty.

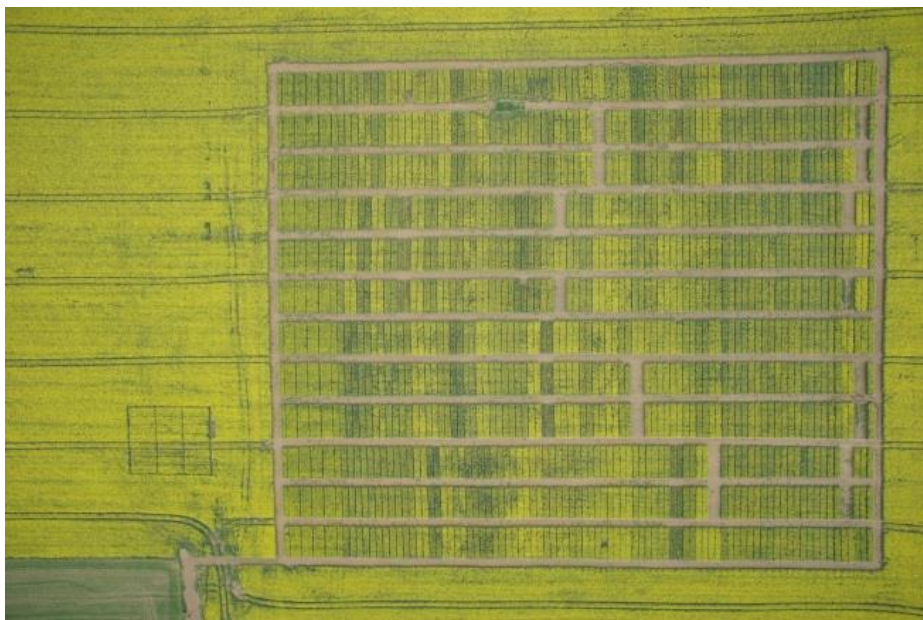
To potvrzuje ve své práci i Penížek a kol. (2014), použití metody stratifikace vzorkovací sítě v rámci pozemku pro účely prostorové predikce půdních vlastností může vést k výraznému snížení bodů ve vzorkovací síti, aniž by došlo k poklesu přesnosti predikce půdních vlastností. To může být využito při snižování nákladů jak finančních tak pracovních.

(28)



Obrázek 20: Celoplošný snímek pozemku pro hodnocení variability

Tyto snímky najdou využití nejen na komerčně využívaných pozemcích, ale také na pokusných pozemcích výzkumných ústavů. Lze pozorovat variabilitu porostu způsobenou různou aplikací herbicidní ochrany (Obrázek 21), nebo variabilitu porostu danou odlišnou úrovní hnojení na plochách (Obrázek 22). Variabilita je vždy patrná z odlišné barvy porostu.



Obrázek 21: Rozdíly způsobené odlišnou herbicidní ochranou porostu



Obrázek 22: Rozdíly v porostu způsobené rozdílnou úrovní hnojení

Další aplikaci představuje nutnost monitorování a kvantifikování míry poškození způsobeného nepřízní počasí, ať už jde o vodu, vítr, kroupy, či cokoliv jiného (Obrázek 23).



Obrázek 23: Chmelnice poškozená silným větrem

Škody na porostu však nezpůsobuje pouze počasí. v zemědělství se také často setkáváme s případy, kdy je potřeba monitorovat pohyb zvěře. Důsledkem hospodaření také dochází k poškození, především jde o utužení půdy, ale také o erozi půdy, která je v našich podmínkách zásadním problémem.

Israel a kol. 2010 ve své práci uvádějí, že každoročně je usmrceno množství kolouchů při sečení píce, protože systém vyhánění a plašení zvěře před sečením je málo účinné. Představují možnost vyžití bezpilotního prostředku, který pomocí IR kamery odhalí přítomnost zvěře v porostu. (29)

Opačnou situací je, když přítomnost černé zvěře způsobila rozsáhlé poškození porostu (Obrázek 24).



Obrázek 24: Poškození porostu zvěří

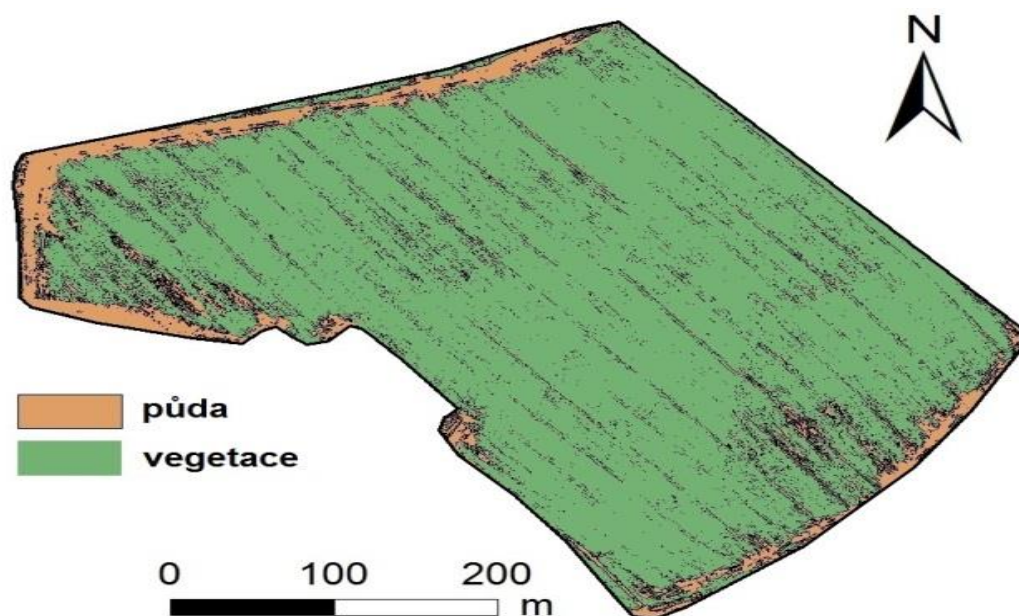
Zemědělská půda je v různé míře vystavována tlakům vyvíjeným pojezdovými ústrojími traktorů, sklizňových strojů a dopravních prostředků. Přejezdy po pozemcích jsou v současném zemědělství nevyhnutelné. Jako hlavní dopad náhodných přejezdů po pozemku je považováno zhutnění, i když se jedná o obtížně měřitelnou vlastnost. Nežádoucí utužení půdy vlivem přejezdů zemědělskými soupravami se stává celosvětovým problémem. Nejedná se rovněž o problém sezónní, ale stopy nežádoucího zhutnění je možné pozorovat i s odstupem několika let. (30)

Na Obrázku 25 je zachycen porost, kde jsou jasně patrné stopy po opakovaných přejezdech, zejména na souvratích, kde je pokrývnost půdy minimální. Tuto situaci rovněž dokládá mapa (Obrázek 26), zpracovaná řízenou klasifikací, kde byly hodnoceny 2 třídy půda a vegetace.



zájmová plocha

Obrázek 25: Letecký snímek zájmové oblasti pořizený z bezpilotního prostředku



Obrázek 26: Obrazová analýza leteckého snímku dokumentuje poškození a absenci porostu na okrajových plochách pozemku

Bezpilotní prostředky také mohou mimo jiné pomoci zemědělskému podniku v kontrole přesnosti práce zaměstnanců. Například špatné navazování a velké vynechávky postřikovačem znamenaly nedostatečné ošetření výdrolu (viz Obrázek 27). Podnik tímto způsobem může získat podklady, na jejichž základě dojde k opatření, které zajistí, aby byl porost v budoucnu lépe ošetřen.

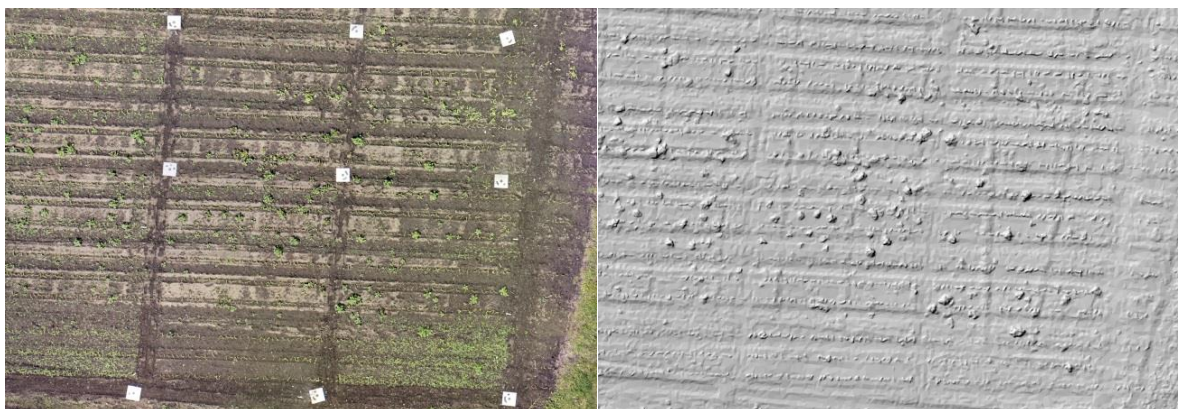


Obrázek 27: Chyby při desikaci

Aplikace, která je v současné době na vzestupu je 3D modelace terénu za pomoci laserového snímání Země, známého jako LIDAR, případně pomocí stereoskopických snímků. Například výška porostu je důležitý parametr potřebný k hodnocení, monitorování a činnosti v oblasti modelován. Jedná se o prostředek, který poskytuje základní informace týkající se ekologických, hydrologických, biofyzikálních, micro-meteorologických a agronomických procesů u přirozené vegetace nebo zemědělských plodin. (31)

Stávající prostorová data poskytují jen málo informací o výšce vegetace., případně vrstevnicové modely často nevyhovují speciálním aplikacím, kdy potřebujeme znát velice přesně reliéf zájmového území. Ve druhém případě je území snímáno z více úhlů a výškopisný vjem získáme spojením snímků do jedné vrstvy. Tímto postupem vytvoříme velmi podrobné, detailní modely terénu s měřítkem v řádu milimetrů nebo centimetrů. Dostáváme se tak na měřítko, kdy můžeme sledovat jednotlivé rostliny, kolejové stopy, hrudovitost, erozní rýhy a podobně. Výhodou nasazení bezpilotních přístrojů je opět jejich operativnost v nasazení, kdy potřebujeme zajistit přesný termín snímání v návaznosti na předchozí zásahy na pozemku, nebo v období bez vegetace. Ukázku z uvedeného postupu přináší Obrázek 28. Na dvojici obrázků můžeme porovnat snímek zájmové oblasti a výškopisný model shodného území, pořízený složením snímků s vysokým stupněm překrytí. Na výsledném modelu jsou patrné řádky kukuřice v časně fázi růstu, trsy brambor, které

zaplevelují založený porost a také stopy po mechanizaci. Snímky byly pořízeny z výšky 20 m a překryv snímků činil 60 %. Jednotlivé značky na zájmové ploše byly rozmístěny v pravidelných rozstupech a zaměřeny GPS s korekcí RTK. i přes počáteční fáze růstu jsou na pozemku patrné řádky kukuřice, trsy brambor a stop po vjezdu mechanizace. Podobný postup lze využít i pro modelování výšky stromů. (32)



Obrázek 28: Snímek pozemku (vlevo) a výškopisný snímek stejného území (vpravo)

Dalším možným využitím je snímkování objektů, což může být pro zemědělský podnik také velice důležité. Ať už jde o kontrolu stavu objektů, například po kalamitách, pořizování dokumentace pro pojišťovnu, pořizování snímků za účelem vlastní propagace. Škála možností využití snímků z bezpilotních prostředků je neomezená.

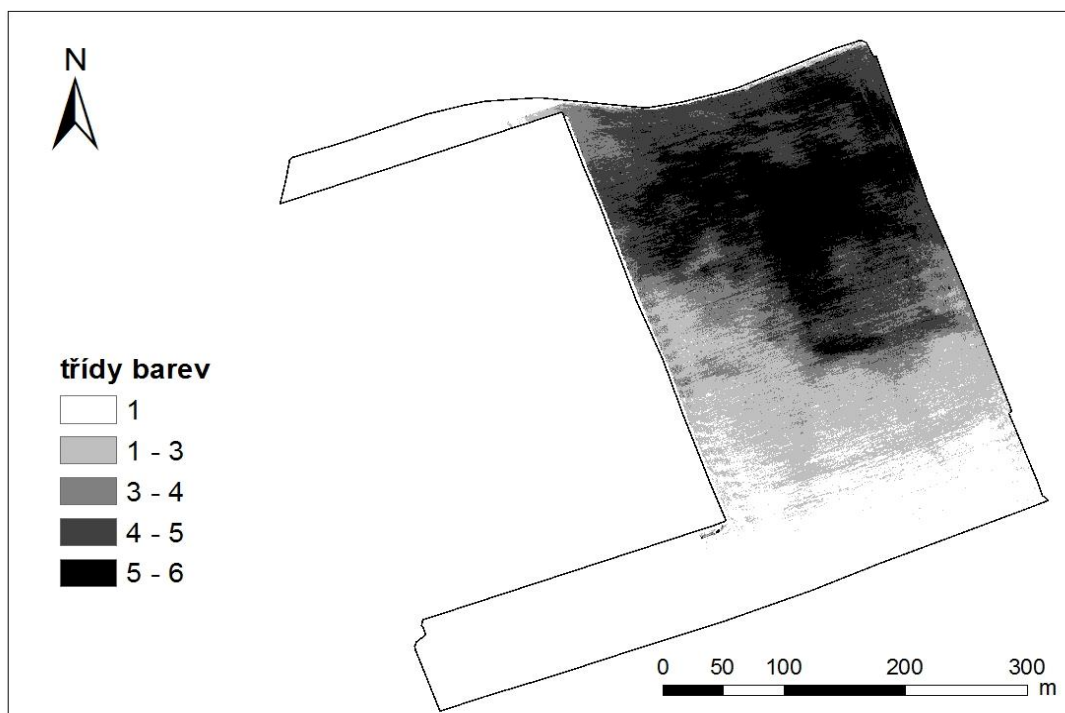
Měření pozemek

Obrázek 29 zachycuje pozemek po zasetí jarní pšenice. Jedná se o pozemek obhospodařovaný zemědělským družstvem Dolany. Snímek byl pořízen z výšky 300 m opět na kameru RGB. Pozemek vykazuje značnou variabilitu v zabarvení půdy. Před samotným zpracováním byl snímek vlícován do hranic pozemku, které byly získány z veřejného registru půd – LPIS.



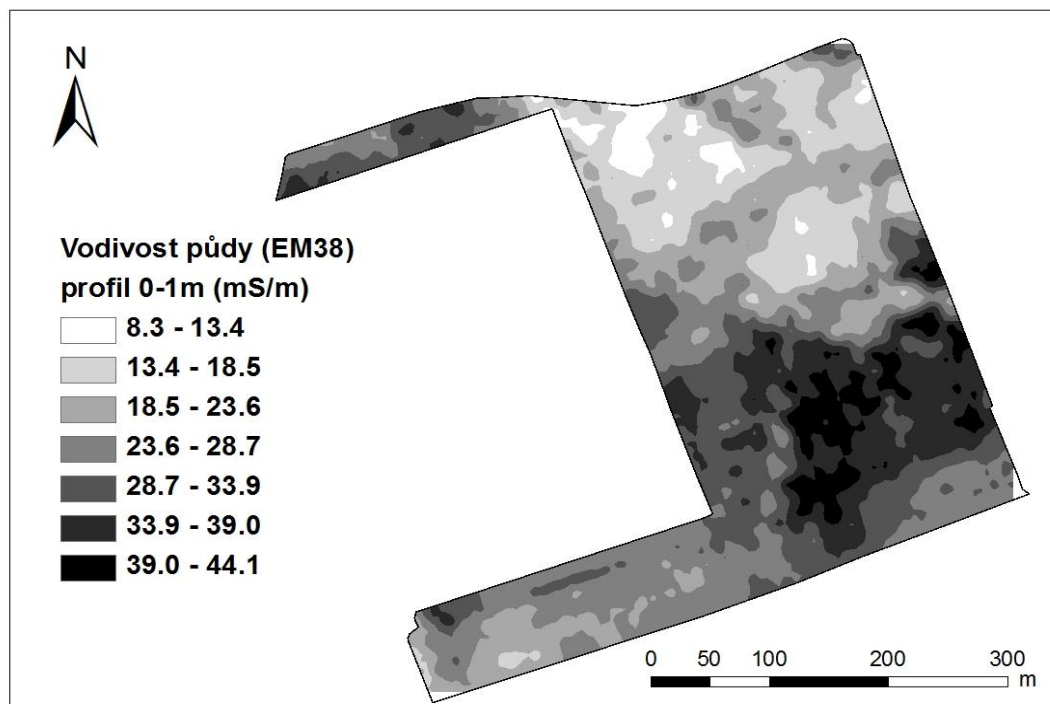
Obrázek 29: Snímek zájmového území před rektifikací

Pro klasifikaci pozemku byla uplatněna neřízená klasifikace. Barvy byly rozděleny do 6 stupňů šedi a každý stupeň byl značen indexem. v tomto případě byl nižší index přiřazen tmavšímu zbarvení půdy a naopak. Výsledek neřízené klasifikace přináší Obrázek 30.



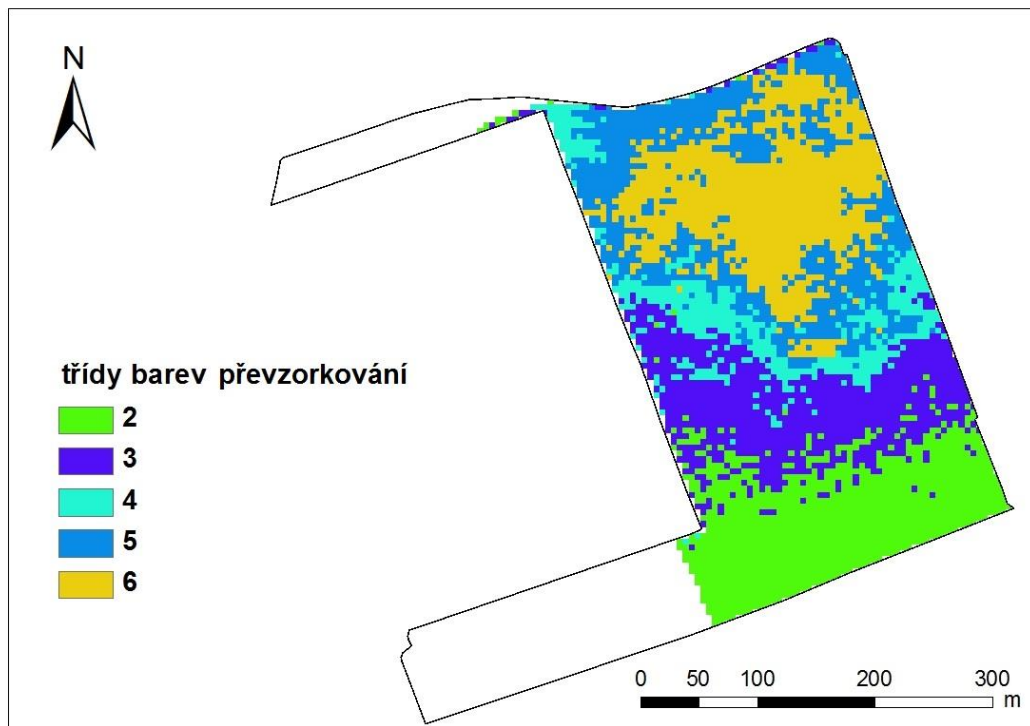
Obrázek 30: Neřízená klasifikace

Po zasetí bylo na pozemku provedeno měření půdní vodivosti pomocí sondy EM 38. Při zpracování dat byla využita interpolační metoda Ordinary Kriging. Praktickým výstupem interpolace je mapa, která znázorňuje prostorové rozložení měřené veličiny. Obrázek 31 přináší mapu vodivosti pro horizont 0-1m. Před samotným zpracováním byly ze souboru vodivosti půdy odstraněny extrémní hodnoty a rovněž bylo provedeno vyhlazení datové řady pomocí váženého průměru, vždy ze tří hodnot.

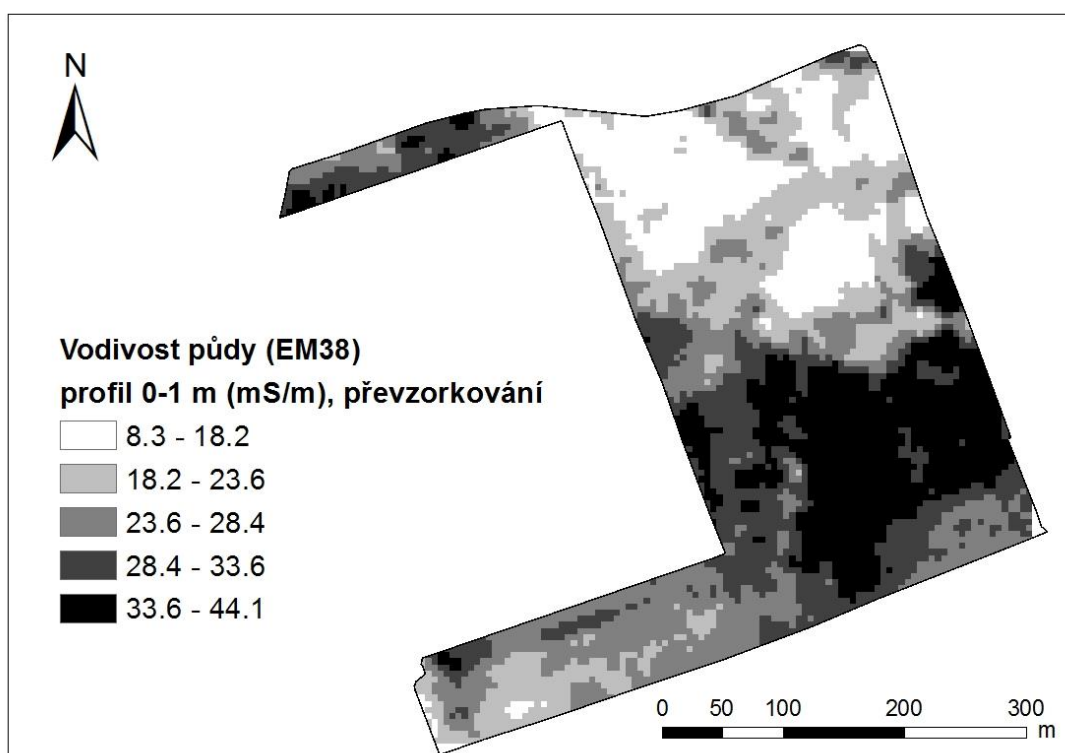


Obrázek 31: Vodivost půdy naměřená sondou EM 38

Za účelem porovnání byly provedeny úpravy obou map. Jednalo se především o převzorkování rastrové mapy, aby byly získány mapy se shodným rozlišením a jednotlivé buňky se navzájem překrývaly. Byl zvolený shodný rastr 5 m. Takto upravené mapy jsou na Obrázcích 32 a 33.

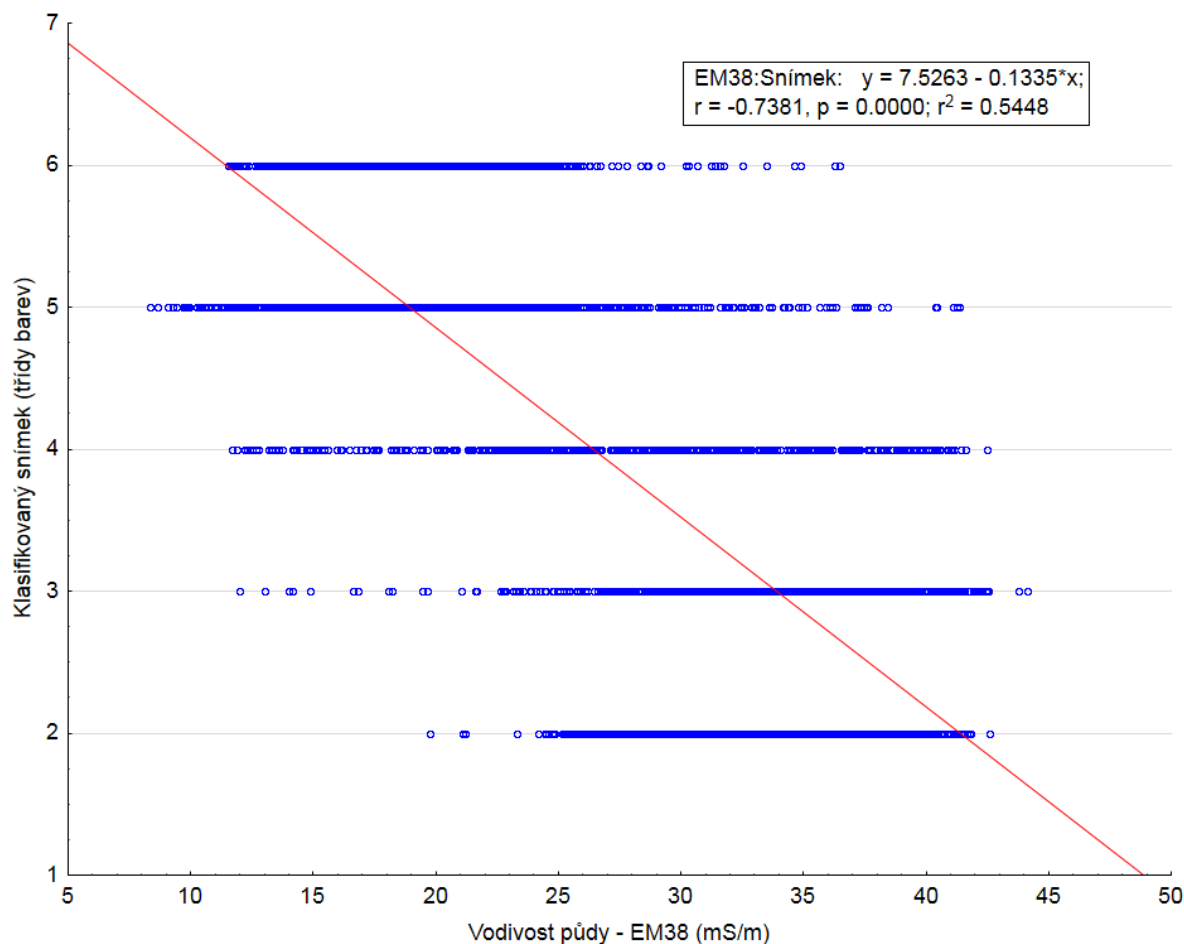


Obrázek 32: Převzorkovaný letecký snímek



Obrázek 33: Převzorkovaná mapa půdní vodivosti

Po tomto kroku bylo možné získat tabulku hodnot, kde byly hodnoty pro jednotlivé buňky spárovány. k posouzení závislosti mezi hodnotami získanými ze sondy EM38 a snímkem byla použita analýza regrese a korelace. Graf na Obrázku 34 doplňuje výsledky uvedené analýzy.



Obrázek 34: Průběh závislosti hodnot získaných ze snímku a sondy EM 38

V tabulce grafu je možné odečíst hodnoty koeficientu determinace ($R^2 = 0,54$) a koeficientu korelace ($R = -0,74$) včetně jeho testu významnosti. Hodnota p je v uvedeném případě výrazně nižší než zvolená hladina významnosti $\alpha = 0,05$, můžeme tedy hovořit o statisticky významném koeficientu korelace. Celkově byl regresní model shledán jako statisticky významný. v grafu rovněž nalezneme rovnici regrese.

Je tedy možné sledovat vodivost pozemku za využití bezpilotních prostředků bez zvláštních nároků na drahé sensorové vybavení, jelikož jako vstup byl použit běžný RGB snímek. Takto pořízená data jsou díky silnému koeficientu korelace relativně přesnou

náhradou za časově i finančně náročné polní měření, které vyžaduje nepoměrně delší přípravu vybavení a vyšší provozní náklady.

7 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické hledisko je velice důležité pro každý podnikatelský subjekt a především v zemědělských podnicích je nutné, aby se technologie vyplatila, nejen co se jejího přínosu týče, ale aby se vyplatila i finančně. Zemědělský sektor je specifický tím, že drtivá většina technologií je dostupná jako služba a podnik ji tedy nemusí sám vlastnit. Dále je pak také ekonomický rozdíl mezi využitím bezpilotních prostředků, klasického leteckého snímkování a dat pořízených družicemi.

Je tedy nutné porovnat vlastní cenu pořízení bezpilotního systému a související náklady na údržbu a provoz s cenou ve službách, cenou nákupu dat z družice a z letadla. Náklady spojené s pořízením bezpilotního systému silně závisí na zamýšleném využití v podniku. Jaké bude chtít agronom prostorové rozlišení, jak velké pozemky podnik obhospodařuje, zda bude monitorovat vegetační indexy, variabilitu půdy, detekovat ložiska plevelů, monitorovat škody po zvěři nebo cokoliv jiného. Vzhledem k velké flexibilitě využití bezpilotních systémů většinou podniky přistupují k nákupu celého balíčku vybavení, který kromě dronu s ovládáním většinou zahrnuje několik přídavných baterií, nabíječky, RGB a multispektrální senzor, tím zajistí širokou možnost využití. Takováto sada pak stojí zhruba 500 000 korun a představuje tak nezanedbatelnou investici. Za tuto cenu však podnik získá přístup k datům o rozličných půdních a rostlinných veličinách a na jejich základě může dosáhnout lepší optimalizace vstupů.

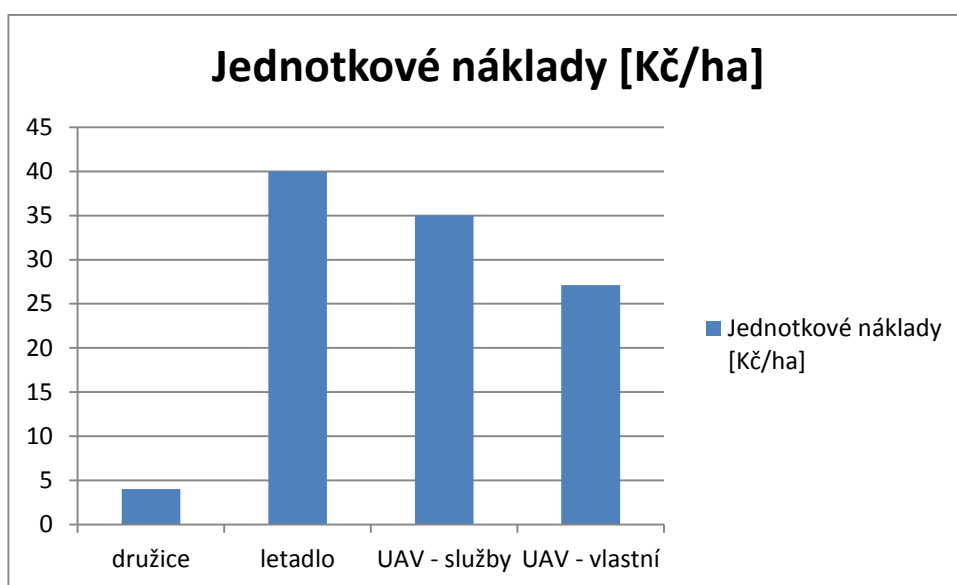
Provozní náklady spojené s bezpilotními systémy jsou relativně nízké, představují spotřebu elektrické energie zhruba 0,1 Kč/ha a náklady na opravy a údržbu vyjádřené koeficientem oprav. Náklady na obsluhu pak jsou při 200 Kč/h asi 17 Kč/ha.

Vzhledem k nutnosti nabíjení akumulátorů podnik může za pětiletou morální životnost systému nasnímat více než 50 000 ha, což představuje celkové jednotkové náklady 27,10 Kč/ha.

Družicové snímky představují pravděpodobně nejlevnější variantu. 25 km² družicových dat s prostorovým rozlišením 0,5 m stojí kolem 10 000 Kč (20 USD/km²) za archivní data, což představuje pouhé 4 Kč/ha. Takto nízká jednotková cena je však zavádějící, jelikož je nutné koupit celý 25 km² čtverec v případě archivovaných dat a při požadavku na nové snímkování je minimální plocha 100 km². Navíc aktualita snímků je výrazně horší, nižší je i přesnost, jelikož snímky jsou zkresleny průchodem silnou vrstvou atmosféry. (ceny viz (33))

Letecké snímky jsou aktuálnější a není nutné kupovat tak velkou oblast, přesto se zde jednotková cena pohybuje kolem 40 Kč/ha. Letecké snímky nejsou zatíženy tak výraznou chybou měření jako družicové snímky, jelikož světlo neprochází tak mohutnou vrstvou atmosféry. Přesto je možné, že snímky budou obsahovat nízkou oblačnost, která znemožní jejich využití. (ceny viz (34))

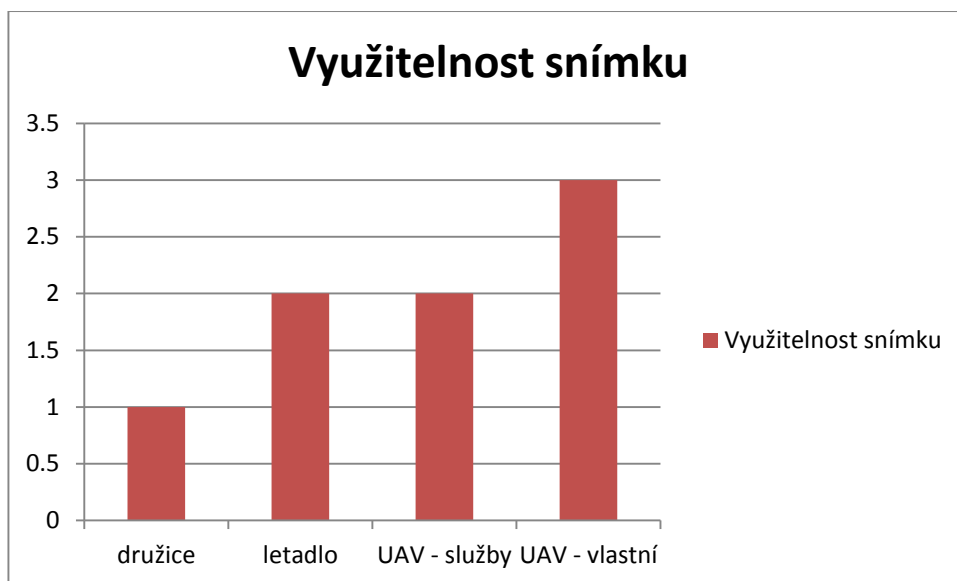
Pouhý nákup dat nasnímaných pomocí bezpilotního stroje se svými náklady podobá snímkům pořízeným konvenčním leteckým snímkováním, jsou mírně nižší, ale i tak jsou na úrovni kolem 35 Kč/ha. Snímky jsou svou užitnou hodnotou stejné jako pořízené vlastním bezpilotním strojem.



Obrázek 35: Jednotkové náklady [Kč/ha]

Zdroj: Vlastní

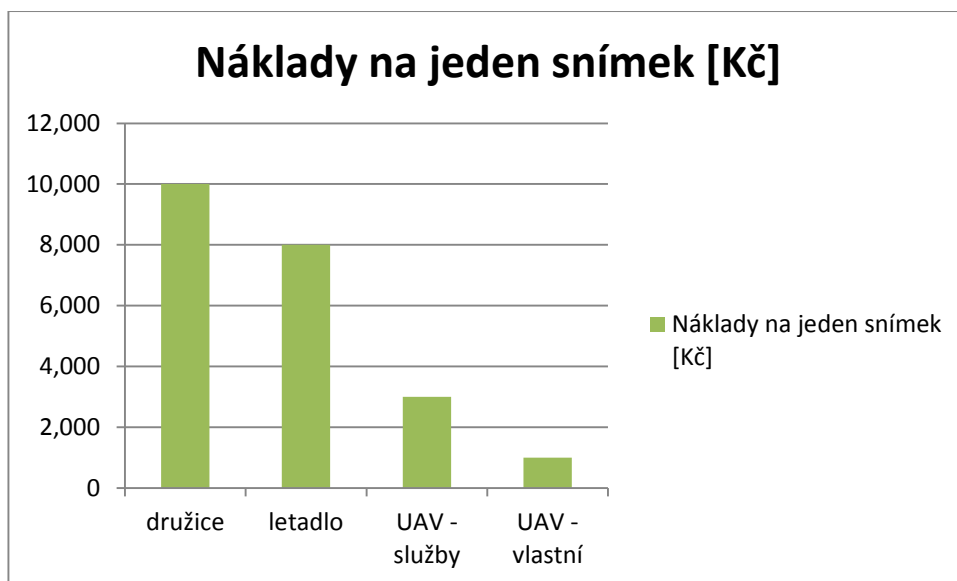
Jednotkové náklady na jeden hektar jsou podle grafu na Obrázku 35 bezkonkurenčně nejnižší v případě družicových snímků. Ostatní technologie se nákladově pohybují o řád výše, přesto jsou z nich snímky z vlastního bezpilotního letounu nejlevnější, následují s odstupem snímky z bezpilotního stroje ve službách. Nejdražší je pak nákup snímků pořízených z letadla.



Obrázek 36: Využitelnost snímků. Hodnocení 1 – nejnižší, 2 – střední, 3 – nejvyšší využitelnost snímků

Zdroj: Vlastní

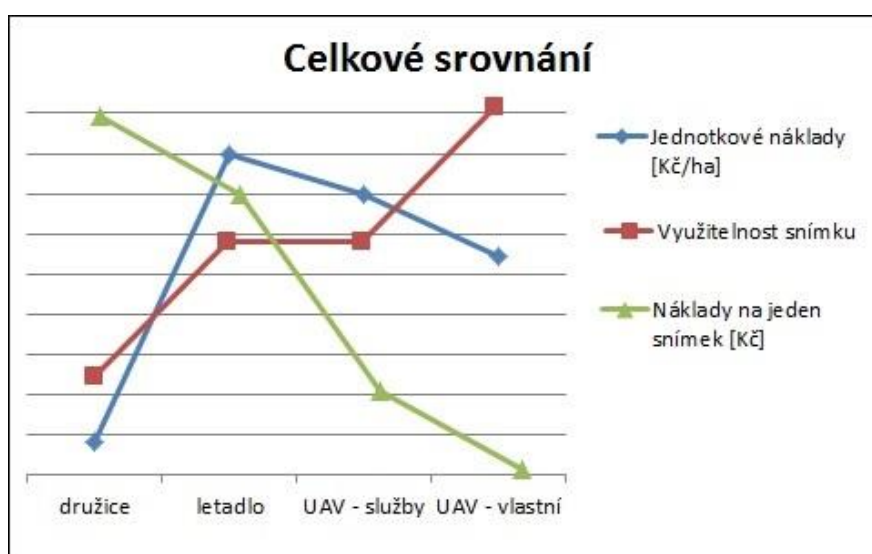
Využitelnost snímků je dalším zvoleným parametrem pro hodnocení vybraných technologií. Družicové snímky mají několik nevýhod, které limitují jejich užitek. Zaprvé jsou zatíženy největší chybou, jelikož světlo prochází největší vrstvou atmosféry, kde dochází ke zkreslení. Zadruhé vzhledem k výšce nemusí být část nebo celý pozemek vidět díky oblačnosti. Komerčně dostupné prostorové rozlišení kolem 0,5 m sice vyhovuje pro využití v některých aplikacích, avšak zdaleka ne pro všechny. a v neposlední řadě jsou pak data z družice nejméně aktuální. Snímky z letadla jsou pak stejně aktuální jako snímky ze služeb, nicméně jsou zatíženy větší chybou vlivem atmosféry. Na druhou stranu bezpilotní prostředky jsou limitovány svou nosností a proto je možné do letadla namontovat robustnější, ale zato výkonnější senzorické přístroje, navíc jich může snímkovat více najednou. Snímky z vlastního bezpilotního prostředku jsou bezkonkurenčně nejaktuálnější a s nejmenším zkreslením atmosférou, viz graf na Obrázku 36.



Obrázek 37: Náklady na jeden snímek [Kč]

Zdroj: Vlastní

Náklady na jeden snímek pak hrají také zásadní roli při výběru technologie, pro kterou se zemědělský podnik rozhodne. Nejdražší jsou, dle grafu na Obrázku 37, snímky z družice, jde totiž o to, že se kupuje alespoň čtverec 5 x 5 km. Snímky z letadla jsou pak o něco levnější, také zpravidla zabírají větší území, ale musí se v jejich ceně odrazit jak cena paliva, tak ostatní náklady spojené s provozem letadla a jeho pořízením pro provozovatele. Snímek z bezpilotního prostředku ve službách je nutně dražší než z vlastního bezpilotního prostředku už jen proto, že je nutné započítat marži pro společnost, která prostředek provozuje.



Obrázek 38: Celkové srovnání faktorů

Zdroj: Vlastní

Z celkového srovnání všech výše hodnocených faktorů (Obrázek 38) lze vyčíst, že nejlépe vychází pořídit a provozovat vlastní bezpilotní letoun. Nejlépe dopadá ve dvou ze tří kategorií a to ve využití snímků a v nákladech na jeden snímek. k tomu to podporuje i řada dalších okolností, jako je třeba flexibilita v nasazení a pohotovost, se kterou je možné ho nasadit.

8 Závěr

Práce nastínila základní technická řešení v oblasti bezpilotních prostředků používaných nejen v zemědělství. Zhodnotila jednotlivé konstrukční varianty, aby našla ten nejvhodnější pro zemědělský podnik, který doposud vlastní bezpilotní prostředek nevlastní. Nejpraktičtější a zároveň nejekonomičtější variantou jsou vícerotorové stroje, takzvané multikoptéry, jejichž obliba stále vstoupá nejen mezi modeláři, ale především v řadách zemědělských pracovníků.

Dále pak práce představila různé způsoby využití dat pořízených bezpilotními prostředky a jejich možné využití pro zemědělský podnik. Počínaje výpočtem vegetačních indexů jako jsou REIP, NDVI či PRI, přes tepelné snímkování plodin či využití termokamery pro hlídání hospodářských zvířat až po kontrolu zaplevelení či monitorování variability půdy.

Byly předvedeny konkrétní situace, kdy bylo pomocí bezpilotních prostředků dosaženo požadovaných úkolů v kratším čase a s nižšími náklady než za pomoci konvenčních metod, pokud vůbec jiné metody než využití leteckých snímků pro dané podmínky byly možné. Optimalizace vzorkovací sítě pro odběr půdních vzorků se dá provést na základě leteckých snímků mnohem rychleji a laciněji než kdyby bylo nutné velmi hustě pozemek ovzorkovat a podle výsledků laboratorních rozborů roztřídit homogenity a heterogenity na pozemku. Využití snímků pro kontrolu pokusných a výzkumných pozemků je také výrazně rychlejší a podstatně levnější než in situ měření a laboratorní rozborů pro identifikaci rozdílů na rostlinách. Škody způsobené počasím nebo zvěří se dají kvantifikovat ze země jen velice obtížně, pokud nedojde k úplné devastaci pozemku, naproti tomu snímky pořízené bezpilotními prostředky ukazují míru škod prakticky okamžitě. Navíc mohou bezpilotní prostředky snížit úmrtnost zvěře, kterou se nepodaří vyplašit, během sklizně. Stejně tak přinášejí letecké snímky nedocenitelný zdroj informací pro kontrolu stavu půdy a především lokalizaci oblastí, které jsou vlivem intenzivního hospodaření výrazně utužené a ztěžují tak vzcházení rostlin. Celoplošná informace by opět bez použití leteckých snímků byla velice zdoluhavá, jelikož by bylo nutné velmi hustě měřit utužení, ale všechna potřebná data jsou viditelná na jediném snímku mladého porostu. 3D model je pak z výšky, při tak velkém zájmovém území, výrazně přesnější než model, který by bylo možné připravit bez leteckých snímků a opět je možné ho sestavit za zlomek času, který by zabral 3D model vytvářeny laserovým snímáním pozemní technologií.

Z měření vodivosti půdy na pozemku ZD Dolany jsme se pokusili získat míru shody mezi RGB snímky pořízenými bezpilotním letounem Asctec Falcon 8 z výšky 300 m nad pozemkem a daty z vodivostní sondy EM 38. Při porovnání naměřených hodnot bylo zjištěno, že výsledný koeficient korelace je statisticky významný a dosahuje hodnoty $R = -0,74$, což značí relativně silnou negativní závislost obou měřených veličin. Vzhledem k silnému vztahu obou veličin je tedy možné i měření vodivosti půdy sondou doplnit, může například představovat prostředek pro zahuštění informací na místech, kde se neměřilo, vhodným zpracováním snímků pořízených pomocí bezpilotních prostředků, čímž opět dojde k úspoře na straně financí i časové náročnosti.

V závěru je zhodnocena ekonomická výhodnost nákupu bezpilotního letounu do zemědělského podniku v porovnání s jeho užitnou hodnotou a cenou za snímek nebo za hektar. Došlo k porovnání nákupu stroje, nákupu dat z bezpilotního letounu ve službách, nákupu snímků z letadla a z družice. Nejvýhodnějším se zdá být nákup vlastního bezpilotního prostředku, čímž podnik získá nejaktuálnější snímky, má nejvyšší pohotovost v nasazení, získá prostředek s vysokou flexibilitou při nasazení a velmi nízké náklady na snímání jednoho hektaru.

V následujících letech pravděpodobně dojde i k rozšíření možností bezpilotních prostředků jak ve vývoji senzorických zařízení, tak v rozsahu autonomie letu a především v prodloužení doby letu a tedy i času snímání zájmové oblasti.

9 Citovaná literatura

1. **Naughton, Russel.** Remote piloted aerial vehicles. *Remote piloted aerial vehicles: An anthology*. [Online] C'TIE, 2. Únor 2003. [Citace: 21. Prosinec 2014.] http://www.ctie.monash.edu/hargrave/rpav_home.html#Beginnings.
2. —. Remote piloted aerial vehicles. *The 'Aerial Target' and 'Aerial Torpedo' in Britain*. [Online] C'TIE, 22. Říjen 2002. [Citace: 25. Prosinec 2014.] http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav_britain.html.
3. **Janes, Paul N.** Pilotless Photo Drone Takes Aerial Pictures. *Popular Mechanics*. 1956, Sv. January, 1.
4. **Boucher, Roland.** Project Sunrise. *Flight of the Worlds First Solar Powered Aircraft*. [Online] 2009. [Citace: 30. Prosinec 2014.] http://www.projectsunrise.info/First_Solar_Powered_Aircraft.html.
5. **Buckley, Paul.** French-German collaborators claim solar cell efficiency world record. *EE Times Europe*. [Online] European Business Press SA., 2. Prosinec 2014. [Citace: 2. Leden 2015.] http://www.electronics-eetimes.com/en/french-german-collaborators-claim-solar-cell-efficiency-world-record.html?cmp_id=7&news_id=222923159.
6. NASA releases report on crash of Helios solar plane. *U.S. Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy*. [Online] U.S. Department of Energy, 8. Zář 2004. [Citace: 1. Leden 2015.] http://apps1.eere.energy.gov/news/news_detail.cfm/news_id=8139.
7. **Nugent, T. J. a Kare, J. T.** LaserMotive White Paper – Power Beaming for UAVs. *Laser Motive*. [Online] Květen 2010. [Citace: 2. Leden 2015.] <http://lasermotive.com/wp-content/uploads/2010/04/Wireless-Power-for-UAVs-March2010.pdf>.
8. Propulsion System. *TheUAVGuide*. [Online] TheUAVGuide, 19. Duben 2014. [Citace: 3. Leden 2015.] http://www.theuavguide.com/wiki/Propulsion_System.
9. SkyWalker 2014 (1.900mm) FPV/UAV Airplane KIT. *OneDrone*. [Online] OneDrone.com, 2013. [Citace: 4. Leden 2015.] <http://onedrone.com/store/skywalker-2014-1900mm-fpv-uav-airplane-kit.html>.
10. **Oldsailor.** Ship Borne Test Flights of Russian UAVs in Arctic Conducted. *MarineBuzz.com*. [Online] MarineBuzz.com, 14. Červenec 2008. [Citace: 4. Leden 2015.] <http://www.marinebuzz.com/2008/07/14/ship-borne-test-flights-of-russian-uavs-in-arctic-conducted/>.
11. DJI S900 Multicopter. *OneDrone.com*. [Online] OneDrone.com, 2013. [Citace: 5. Leden 2015.] <http://onedrone.com/store/multi-copters/dji-s900-multicopter.html>.
12. **FoamboardRC.** Beginners Guide to Connecting Your RC Plane Electronic Parts. *Instructables*. [Online] Autodesk Inc., 2014. [Citace: 5. Leden 2015.] <http://www.instructables.com/id/Beginners-Guide-to-Connecting-Your-RC-Plane-Electr/step3/ESC-Electronic-Speed-Controller/>.
13. **Hung, J. Y. a Gonzalez, L. F.** On parallel hybrid-electric propulsion system for unmanned aerial vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*. 2012, Sv. Květen, 51.
14. Aerial surveying and geo-mapping. *Aibotix*. [Online] Part of Hexagon, 2015. [Citace: 6. Leden 2015.] <https://www.aibotix.com/en/surveying.html>.

15. OpenPilot. *OpenPilot*. [Online] Openpilot Foundation, 2014. [Citace: 6. Leden 2015.] <http://www.openpilot.org/>.
16. APM. *3DR*. [Online] 3D Robotics Inc., 2014. [Citace: 6. Leden 2015.] <http://3drobotics.com/apm/>.
17. CL-289 Reconnaissance UAV, Germany. *army-technology.com*. [Online] Kable Intelligence Limited, 2015. [Citace: 7. Leden 2015.] <http://www.army-technology.com/projects/cl289/>.
18. Real-Time Kinematic (RTK). *NovAtel*. [Online] NovAtel Inc. [Citace: 8. Březen 2015.] <http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-4-advanced-gnss-concepts/real-time-kinematic-rtk/>.
19. **Lukas, Vojtěch, a další, a další.** *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství*. Brno : Mendelova univerzita v Brně, 2012. ISBN 978-80-7375-686-4.
20. **Lukas, Vojtěch, Neudert, Lubomír a Křen, Jan.** *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství*. Brno : Mendelova univerzita v Brně, 2011. ISBN 978-80-7375-562-1.
21. Unmanned aerial vehicles (UAVs): the basics. *HGCA*. [Online] HGCA. [Citace: 3. Březen 2015.] <http://hgca.com/media/11424/UAV%20paper%20web%20ready.pdf>.
22. **Garbulsky, Martín F., a další, a další.** The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: a review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*. 2011, Sv. Issue 2, Volume 115, stránky 281-297.
23. Infrared Cameras: How They Work. *Thermal Imaging Cameras*. [Online] IEC Infrared Systems, 2008. [Citace: 20. Leden 2013.] <http://www.iecinfrared.com/how-infrared-cameras-work.html>.
24. Thermal Surveillance Drones on Track to Improve Agriculture. *SPI Infrared*. [Online] SPI Corp, 2014. [Citace: 4. Březen 2015.] <http://www.x20.org/thermal-surveillance-drones/>.
25. **Alchanatis, Victor, a další, a další.** Thermal Imaging for Mapping the Water Status of Grape Vines and Cotton: To Guide Irrigation by Temporal and Spatial Needs. *ISRAEL AGRICULTURE*. 2009.
26. **Borregaard, T., a další, a další.** Crop-weed Discrimination by Line Imaging Spectroscopy. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2000, Sv. Volume 75, Issue 4, stránky 389-400.
27. *Crop and Weed Image Recognition by Morphological Operations and ANN model*. **Jiazhi, Pan, a další, a další.** Warsaw : IEEE, 2007. 1-4244-0588-2.
28. **Penížek, V., a další, a další.** *Optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastostí v rámci půdních bloků*. Praha : ČZU, 2014.
29. **Israel, M., a další, a další.** Study on wildlife detection during pasture mowing. *Agricultural Engineering*. Land-Technik 2010, 27. 10 2010.
30. **Chamen, W. C. T., a další, a další.** Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2: Equipment and field practices. *Soil & Tillage research*. 2003, Sv. 73, 1-2, stránky 161-174.

31. **Selkowitz, D. J., a další, a další.** a multisensor LIDAR, multispectral and multi-angular approach for mapping canopy height in boreal forestregions. *Remote Sensing of Enviroment*. 2012, Sv. 121, stránky 458-471.
32. **Zarco-Tejeda, P. J., a další, a další.** Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*. 2014, Sv. 55, stránky 89-99.
33. Buying Satellite Imagery: Pricing Information for High Resolution Satellite Imagery . *landinfo*. [Online] Land info worldwide mapping, 2015. [Citace: 2. duben 2015.] <http://www.landinfo.com/satellite-imagery-pricing.html>.
34. ceník. *Letecké fotografie*. [Online] LETECKÁ FOTOGRAFIE, 2015. [Citace: 2. duben 2015.] <http://letecka-foto.cz/akce/>.

10 Seznam Obrázků

<i>Obrázek 1: RP-71 na katapultu</i>	4
<i>Obrázek 2: Helios</i>	4
<i>Obrázek 3: Schéma dodávání energie pomocí laseru vyslaného ze Země.</i>	5
<i>Obrázek 4: New Skywalker UAV</i>	6
<i>Obrázek 5: Zala 421-06 v letu</i>	7
<i>Obrázek 6: Hexakoptéra DJI S900</i>	8
<i>Obrázek 7: Schéma pohonu pomocí spalovacího motoru</i>	9
<i>Obrázek 8: Schéma pohonu pomocí elektromotorů</i>	10
<i>Obrázek 9: Možnosti realizace hybridního pohonu. (A) sériově, (B) paralelně, (C) rozdělení síly</i>	11
<i>Obrázek 10: Příprava letového plánu pro autonomní let</i>	13
<i>Obrázek 11: Přistání na ruku u měřeného pozemku</i>	14
<i>Obrázek 12: Přistání CL-289 s padákem a dvěma airbagy</i>	15
<i>Obrázek 13: Spektrální chování vody, půdy a vegetace v pásmu elektromagnetického záření 400 – 2500 nm</i>	18
<i>Obrázek 14 Multispektrální snímek prostoru ozimé pšenice (DC 37) na 38 ha pozemku v nepravých barvách (vlevo), klasifikovaný NDVI snímek (uprostřed) a predikce obsahu N v rostlinách na základě NDVI a NIR</i>	20
<i>Obrázek 15 Závislost NDVI na LAI a pokryvnosti prostoru</i>	21
<i>Obrázek 16 Závislost odrazivosti ozimého žita a pozice REIP v období produkčního hnojení po uplynutí sedmi dní</i>	22
<i>Obrázek 17: Mapování obsahu vody v listech</i>	25
<i>Obrázek 18: Osmivrtulový bezpilotní prostředek Asctec Falcon 8</i>	28
<i>Obrázek 19: Sonda EM 38 MK2 (vlevo), terénní čtyřkolka s datovou ústřednou, GPS a saněmi pro uchycení sondy (vpravo)</i>	30
<i>Obrázek 20: Celoplošný snímek pozemku pro hodnocení variability</i>	32
<i>Obrázek 21: Rozdíly způsobené odlišnou herbicidní ochranou porostu</i>	32
<i>Obrázek 22: Rozdíly v porostu způsobené rozdílnou úrovní hnojení</i>	33
<i>Obrázek 23: Chmelnice poškozená silným větrem</i>	33
<i>Obrázek 24: Poškození porostu zvěří</i>	34
<i>Obrázek 25: Letecký snímek zájmové oblasti pořizený z bezpilotního prostředku</i>	35
<i>Obrázek 26: Obrazová analýza leteckého snímku dokumentuje poškození a absenci porostu na okrajových plochách pozemku</i>	36
<i>Obrázek 27: Chyby při desikaci</i>	37
<i>Obrázek 28: Snímek pozemku (vlevo) a výškopisný snímek stejného území (vpravo)</i>	38
<i>Obrázek 29: Snímek zájmového území před rektifikací</i>	39
<i>Obrázek 30: Neřízená klasifikace</i>	40
<i>Obrázek 31: Vodivost půdy naměřená sondou EM 38</i>	41
<i>Obrázek 32: Převzorkovaný letecký snímek</i>	42
<i>Obrázek 33: Převzorkovaná mapa půdní vodivosti</i>	42
<i>Obrázek 34: Průběh závislosti hodnot získaných ze snímku a sondy EM 38</i>	43
<i>Obrázek 35: Jednotkové náklady [Kč/ha]</i>	46
<i>Obrázek 36: Využitelnost snímků. Hodnocení 1 – nejnižší, 2 – střední, 3 – nejvyšší využitelnost snímků</i>	47
<i>Obrázek 37: Náklady na jeden snímek [Kč]</i>	48
<i>Obrázek 38: Celkové srovnání faktorů</i>	48