

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování



Využití bezpilotních systémů pro sběr dat v zemědělských aplikacích

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Komárek

Autor: David Mařák

2018

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

David Mařák

Vodní hospodářství

Název práce

Využití bezpilotních systémů pro sběr dat v zemědělských aplikacích

Název anglicky

Use of unmanned aerial systems for agricultural applications

Cíle práce

Cílem práce je zpracovat literární rešerši využití bezpilotních prostředků ve specifických odvětvích zemědělských aplikací. Autor se v rešerši zaměří na několik konkrétních odvětví a popíše danou problematiku.

Metodika

Bakalant zpracuje literární rešerši, ve které se zaměří na konkrétní odvětví zemědělských aplikací, kde se v současné době využívají bezpilotní prostředky. Každé odvětví podloží literaturou v podobě odborných studií, ze kterých popíše a zhodnotí použitou metodiku. Součástí práce bude i zhodnocení dostupnosti odborných publikací na toto téma.

Doporučený rozsah práce

30-40 normostran textu

Klíčová slova

Formulace vhodných klíčových slov je úkolem řešitele.

Doporučené zdroje informací

- Baluja, Javier, et al. "Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV)." *Irrigation Science* 30.6 (2012): 511-522.
- Gonzalez-Dugo, Victoria, et al. "Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard." *Precision Agriculture* 14.6 (2013): 660-678.
- Guillén-Climent, M. Luz, et al. "Mapping radiation interception in row-structured orchards using 3D simulation and high-resolution airborne imagery acquired from a UAV." *Precision agriculture* 13.4 (2012): 473-500.
- Mathews, Adam J., and Jennifer LR Jensen. "Visualizing and quantifying vineyard canopy LAI using an unmanned aerial vehicle (UAV) collected high density structure from motion point cloud." *Remote Sensing* 5.5 (2013): 2164-2183.
- Pajares, Gonzalo. "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 81.4 (2015): 281-329.
- Turner, D., A. Lucieer, and C. Watson. "Development of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery." *Proceedings of 34th International symposium on remote sensing of environment*. 2011.
- Zarco-Tejada, Pablo J., et al. "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* 55 (2014): 89-99.
-

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jan Komárek

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 16. 3. 2018

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2018

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem napsal sám, pod vedením Ing. Jana Komárka, a že jsem uvedl veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Dále prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze dne 20. 4. 2018

Poděkování

Děkuji Janu Komárkovi za podnětné připomínky a rady, které mi poskytl při vedení této bakalářské práce.

V Praze dne 20. 4. 2018

Abstrakt

Miniaturizace elektroniky, narůstající výpočetní výkon počítačů, pokrok ve výzkumu a vývoji bezpilotních systémů a pokles jejich ceny v posledních letech otevírá v zemědělství nové horizonty. Využití UAV (Unmanned Aerial Vehicle) se vhodným sensorovým vybavením nabízí četné možnosti využití, přičemž cílem této práce je zmapovat jejich aplikace napříč různými obory. Čtyři obsažené kapitoly nastíní možnosti nasazení nejběžnějších snímačů – multispektrální či hyperspektrální kamery, termokamery, fotoaparátu a LiDARu (Light Detection And Ranging). Mezi zkoumanými obory je k nalezení precizní vinařství, zkoumání půdní eroze, lesnictví i vodní hospodářství. Práce nabízí srovnání výstupů, technik zpracování i vhodnost nasazení jednotlivých typů UAV pro rozdílná prostředí v závislosti na rozloze nebo požadované detailnosti. Objevují se srovnání s tradičními způsoby sběru dat, negativa i pozitiva jednotlivých přístupů i limity vyplývající z konstrukce či výkonu použité techniky. Práce přináší ucelený přehled o aktuálním stavu a trendech v oboru.

Klíčová slova: precizní vinařství, UAV, SfM, eroze, lesnictví, mokřady

Abstract

The miniaturisation of electronics, increasing computing power, progress in research and development of unmanned systems and their decreasing price opens new horizons in agriculture. Usage of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) with suitable sensor equipment offers broad opportunities to the field. The goal of this thesis is to map the applications throughout different fields. Four included chapters outline the usage of most popular sensors – multispectral and hyperspectral camera, thermal imaging camera, photo camera and LiDAR (Light Detection And Ranging). Fields included in the thesis are precise viticulture, soil erosion control, forestry and water management. Different outputs are described, as well as techniques of data processing and capabilities of different types of UAVs and their applications based on the size of the studied area or demanded detail level. Also, comparison with traditional techniques can be found, just like pros and cons of described approaches and limits given by the construction or performance of the systems. This thesis brings complex summary of current state, trends and future heading of the field.

Keywords: precision viticulture, UAV, SfM, erosion, forestry, wetlands

Obsah

1. Úvod	9
2. Literární rešerše	10
2.1. Precizní vinařství a využití termální a multispektrální kamery	10
2.1.1. Úvod	10
2.1.2. Zájmové území, metody a technické vybavení	10
2.1.3. Popis území, sběr a zpracování dat	11
2.1.4. Vyhodnocení výsledků	11
2.1.5. Diskuze nad výsledky, jiné studie	13
2.1.6. Zhodnocení	13
2.2. Využití fotogrammetrie ke měření půdní eroze	14
2.2.1. Popis území a problematiky	14
2.2.2. Snímkování, použitá technika	15
2.2.3. Výsledky měření	17
2.2.4. Další studie	17
2.2.5. Shrnutí	19
2.3. Fotogrammetrie, LiDAR a jejich využití v lesnictví	20
2.3.1. Průzkum změny lesa pomocí LiDAR	20
2.3.2. Zpracování dat	21
2.3.3. Výsledné modely a jejich porovnání	21
2.3.4. Kombinace LiDARu, hyperspektrální a multispektrální kamery	22
2.3.5. Shrnutí	24
2.4. Nasazení UAV při sběru dat v mokřadech	25
2.4.1. Pozorování vývoje výšky hladiny vody pomocí fotogrammetrie	25
2.4.2. Výsledky studie	28
2.4.3. Odhad výšky hladiny podzemní vody	29
2.4.4. Shrnutí studií	32
3. Diskuze a závěr	32
Přehled literatury a použitých zdrojů	35

1. Úvod

Bylo to vždy zemědělství, obor, který definoval vyspělost jednotlivých civilizací. Již od neolitické revoluce rozhodovala znalost životního prostředí, schopnost obhospodařovat půdu, aniž by docházelo k její degradaci a zajištěnost státu před přírodními katastrofami o jeho budoucnosti, či zániku. I dnes, v 21. století, jde o vysoce aktuální téma. Podstatná část světa má problémy s nasycením svých obyvatel, změna klimatu je globálním tématem a vzniká řada způsobů, jak zefektivnit zemědělskou výrobu nebo porozumět a omezit dopady narůstajícího množství extrémních projevů počasí, ať už jde o sucha, záplavy, či devastující bouře.

Významným milníkem byl v tomto ohledu dálkový průzkum země. S rozmachem satelitů v 70. letech 20. století začaly být prvně k dispozici přesnější meteorologické předpovědi a také satelitní snímky zemského povrchu v pravidelných intervalech. Ne vždy je ovšem satelitní snímek vhodným zdrojem informací. Aplikace zmíněné v této práci pracují s měřítkem, kterého satelity nejsou schopny dosáhnout. Dalším významným omezením je, navzdory periodicitě přeletů, nepředvídatelnost počasí, kdy oblačnost nad zájmovým územím může snímky zcela znehodnotit. Nasazení letadel vybavených potřebnými senzory tyto nedostatky částečně kompenzuje, ovšem nese s sebou značnou zátěž v podobě nákladů na výpravu.

V posledních letech dochází v oboru dálkového průzkumu země k nasazení bezpilotních letounů (UAV). Pro svou nízkou hmotnost, možnosti vzlétnout téměř odkudkoliv, jednoduchou obsluhu a rozmanitost přístrojového vybavení si je pro efektivní sběr dat a experimenty oblíbili zemědělci i vědci po celém světě. V pár příkladech následuje výčet rozličných studií: Ambrosia V. G. et al. (2010) popisuje techniku analýzy lesních požárů pomocí multispektrálních kamer. Monitorování lesních požárů pomocí termální kamery se věnuje i Merino L. et al. (2011), či Hinkley E. et Zajkowski T. (2011). Multispektrální a termální kamery také nalézají nepřeberné využití při monitorování rostlin. Nabízí se Gonzáles-Dugo V. et al. (2013) a Park S. et al. (2015), zjišťující vodní režim stromů v ovocných sadech nebo Ortega-Farías S. et al. (2016) se věnuje energetické bilanci zavlažovaného olivového háje. Lovitt J. et al. (2018) využívá mikrotopografie a hloubky hladiny podzemní vody pro odhad emisí metanu v mokřadních biotopech.

Část širokého spektra témat, kterými se zabývá odborná literatura, tvoří obsah této rešerše. Rozebráno je zde nasazení v odvětví precizního zemědělství: precizní vinařství, kde UAV napomáhá k získání přesných map monitorujících vitalitu vinné révy, další kapitola shrnuje využití fotogrammetrie při odhalování důsledků půdní eroze. Další kapitola představuje analýzu lesního porostu a terénu pomocí LiDARu a fotogrammetrie, kapitola závěrečná pak nabídne průřez pracemi tematicky zaměřenými na odhad hladiny podzemní vody ve vřesovištích.

Cílem práce je detailně rozebrat rozličné aplikace UAV v zemědělství, nikoliv zmapovat a detailně popsat jednotlivé typy UAV, snímací vybavení, limity a techniky zpracování dat. Každá kapitola se věnuje odlišné aplikaci UAV, čemuž odpovídá i samotná struktura. Jednotlivé studie pracují s odlišným vybavením, postupem sběru i zpracováním dat a tyto poznatky jsou součástí daných kapitol. Separací postupů, přehledu využití techniky, softwaru atd. do teoretické části práce by došlo ke ztrátě konzistentnosti a přehlednosti, proto jsou vždy tyto oddíly zakomponovány do kapitol samotných.

2. Literární rešerše

2.1. Precizní vinařství a využití termální a multispektrální kamery

2.1.1. Úvod

Bezpilotní systémy v posledních letech zažívají v oboru precizního zemědělství (a vinařství) značný boom. Obor, jehož rozmach propukl po zrušení odchylky GPS (Global Positioning System) systémů pro civilní využití, nalézá v dálkovém průzkumu země velkou oporu, jelikož v pravidelných intervalech sbírat manuálně data v terénu v rozsahu, jaký nasazení UAV dovoluje, není v lidských silách. Možnost přesně klasifikovat fyzické, chemické a biologické parametry asociované s produktivitou vinic a zpracovat je v GIS (Geographic Information System) softwaru přináší vinařům rychlou a efektivní analýzu vinice, vedoucí k efektivnější péči o rostliny a jejich plody. V této kapitole jsou rozebrány studie mapující tento obor ve spojení s UAV, a to v celosvětovém kontextu. Porovnány jsou studie například z Tasmánie, Španělska, i italského Toskánska. Témata studií jsou vesměs podobná – jde o analýzy vodního stresu rostlin, vlhkosti půdy, povrchových teplot a jiných charakteristik ovlivňujících zdraví vinné révy.

2.1.2. Zájmové území, metody a technické vybavení

Turner D. et al. (2011) k experimentu využil vinici Frogmore Creek nacházející se v jižní Tasmánii, nedaleko města Richmond. Proměnná topografie a rozličnost odrůd zde pěstovaných z lokality činí ideální prostředí pro sběr experimentálních dat. Vlhkost půdy je značně proměnlivá, což se odráží v úrodnosti jednotlivých keřů révy. K experimentu byl použit dron Oktocopter, osmimotorový letoun firmy Multicopter navrhnutý za účelem leteckého snímání, jehož nosnost je 1 kg vybavení. To má na následek, že jednotlivé senzory nelze na letoun namontovat dohromady a je nutné s každým provést snímání zvlášť. Snímací vybavení čítá tři kamery. První je digitální zrcadlovka Canon 550D. Na poměry kamer běžně montovaných na podobně velká UAV jde o poměrně velkou kameru, neboť pouze tělo bez objektivu váží 530 g. Použitý objektiv není v tomto případě specifikován, obecně se pro fotogrammetrii používají širokoúhlé objektivy s fixní ohniskovou vzdáleností (Aber, J. et al., 2010).

Dalším nepostradatelným vybavením je multispektrální kamera Tetracam mini-MCA (Multi Camera Array). Podle použitého filtru může snímat šest rozdílných vlnových délek (Tetracam, ©2017). Třetí kamerou je potom infračervená termokamera FLIR. Slouží k mapování povrchové teploty.

K navigaci dronu slouží GPS přijímač, který spolupracuje s předpřipraveným letovým plánem. Ten se vytváří na PC a automaticky zohledňuje rozestupy snímků a rozložení orientačních bodů. Snímkování je běžně vysokofrekvenční (časté opakované snímkování), aby bylo možné nahradit snímky pořízené se špatnou expozicí, při velkém náklonu, či rozmazané důsledkem pohybu letounu.

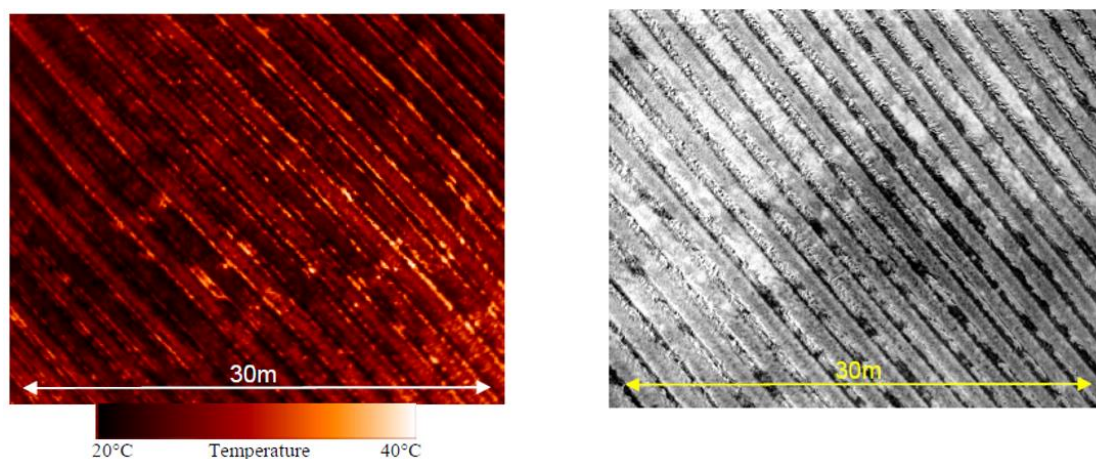
2.1.3. Popis území, sběr a zpracování dat

Množství dat uložených při sběru není možné zpracovat bez automatizace. Nejinak je tomu i při tomto měření, autoři vyvinuli polo-automatizovaný systém, jež rektifikuje obrazová data s kontrolními body (GCP – Ground Control Point).

Nejdříve jsou ručně vybrány nejlepší snímky. Ty následně jsou zpracovány softwarem Bundler, který hledá společné prvky napříč snímky. Ze snímků následně vytvoří mračno bodů (point cloud) s vlastním souřadnicovým systémem (souřadnice x, y, z). K mračnu bodů jsou potom přiřazeny RGB (Red-Green-Blue) kanály z originálních snímků. Pokud jsou GCP přítomny ve snímcích, je použit algoritmus vyhledávající oranžovou barvu (barva GCP). Ty jsou ověřeny na místě pomocí geodeticky přesné GPS. Souřadnice jsou pak v softwaru k bodům přidány. Přesnost modelu v tomto případě dosahuje odchylky cca 10 cm. V případě nepřítomnosti GCP jsou data doplněna o souřadnice zaznamenané GPS modulem letounu, leč jde spíše o orientační údaj, což je dáno malou přesností použitého modulu. Odchylka je zde až 2 m.

2.1.4. Vyhodnocení výsledků

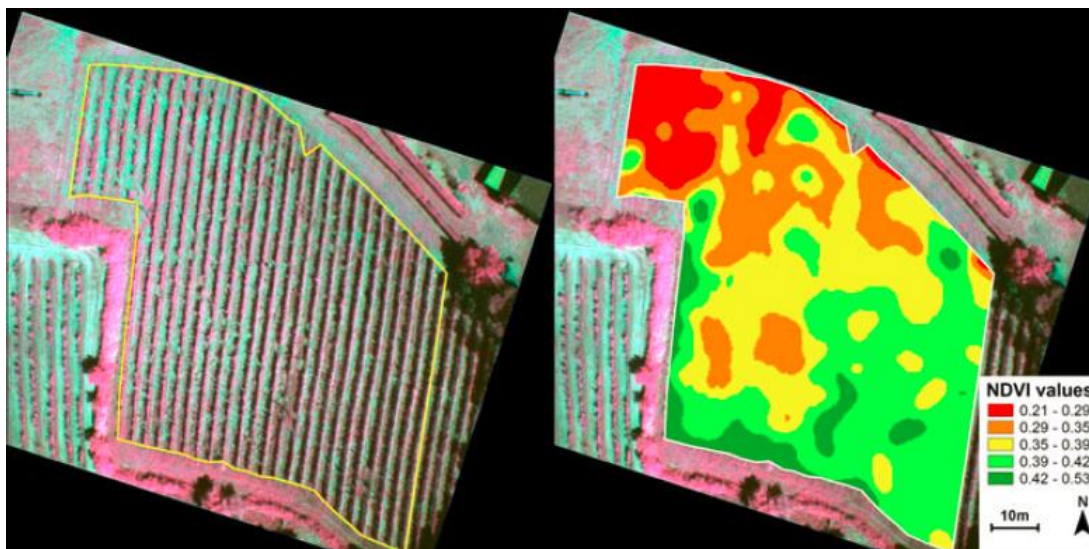
Snímky z TIR (Thermal Infrared Camera) vypovídají o povrchové teplotě půdy, která obecně souvisí s půdní vlhkostí. Na pravé části obrázku č. 1 lze vidět zvýšenou teplotu půdy oproti levé části. Průzkum oblasti ve vinici ukazuje, že réva je zde méně vitální, s menším množstvím olistění i plodů, což propouští více slunečního svitu na zem a půda je teplejší.



Obrázek 1: Vlevo je zobrazen výstup z TIR kamery, napravo NDVI mapa stejného místa.
Zdroj: Turner D. et al. (2011)

Běžně používaným indexem pro měření biomasy a živosti vegetace je NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Tento index je vytvořen ze záběrů multispektrální kamery, využívá viditelné červené a NIR (Near Infrared) spektrum a zaznamenává odraz uvedených pásem světla od vegetačního pokryvu. Výhodou poměrových indexů, jako je NDVI, je, že pokud je snímáný objekt ve stínu, odráží přibližně stejné množství světla v celém spektru. Přestože dojde ke snížení přesnosti NDVI kvůli celkovému nižšímu odrazu světla, poměr dvou spektrálně podobných prvků by měl zůstat stejný. To samozřejmě při měření na vinici pomáhá snížit nepřesnost měření mezi lány, v prostoru, který zůstává stinný. Odlišnost v hustotě vegetace je zde taktéž patrná.

Primicerio J. et al. (2012) zvolil odlišný postup. Letoun vystoupal na pět minut do výšky 150 m nad střed malé vinice v Toskánsku, kde zůstal na jednom místě a kontinuálně snímal vinici, načež slétnul do výšky 25 m, odkud bylo manuálně provedeno přistání. Tento přístup poskytuje nadbytek obrazového materiálu, jenže kvůli vibracím, náklonům způsobených větrem a „rolling shutter“ efektu CMOS senzoru je kvalita snímků omezená. (Rolling shutter je způsoben sekvenčním čtením dat z čipu fotoaparátu, kdy se scéna mezi začátkem a koncem expozice čipu změní, což díky prodlevě mezi začátkem a koncem čtení z čipu deformuje výsledný obraz, viz. Liang C.K. et al. (2008)) Pro analýzu byl poté manuálně selektován nejlepší snímek. Byla získána pouze data z multispektrální kamery, jejíž přesnost byla porovnána se spektrometrem sebranými daty. NDVI byl poté škálován v softwaru ArcGIS do pěti kategorií.



Obrázek 2: Vlevo vinice v nepravých barvách, vpravo klasifikovaný NDVI
Zdroj: Primicerio J. et al. (2012)

Jak je z obrázku č. 2 patrné, vyšší hodnoty indexu, a tedy i bujnější vegetační pokryv nalezneme ve východní části vinice. Potvrzuje se tím domněnka místního vinaře, jenž rozdělil území na dvě poloviny – na východě je zapotřebí jiná správa a vinice zde poskytuje lepší víno. Mapa nicméně poskytuje mnohem detailnější údaje, které mohou přínosně ovlivnit sklizeň, její kvalitu a samozřejmě tedy i zisk vinaře.

2.1.5. Diskuze nad výsledky, jiné studie

Baluja J. et al. (2012) nabízí opět odlišný pohled na věc. V práci je využito stejných senzorů jako v předchozích dvou pracích, zpracování dat a použité indexy se ovšem mírně liší.

Práce je v první řadě zaměřena na vegetaci, nikoliv půdu, na které roste, hlavní rozdíl ve zpracování dat tedy spočívá v extrakci pixelů týkajících se pouze vegetačního pokryvu. Data o půdním podkladu byla smazána při zpracování v programu GRASS GIS za pomoci algoritmu r.watershed, čímž jsou data efektivně zbavena informací o zemském povrchu a zůstává jen vegetace. To umožňuje analýzu odlišných indexů, např. stomatální (průduchovou) vodivost, která udává množství přijatého CO₂ a odparu H₂O z rostliny a pomáhá rostlině reagovat na měnící se atmosférické podmínky (Univerzita Karlova, ©2017). Průduchová vodivost souvisí s fyziologií vinného keře a dlouhodobým stavem zdraví rostliny.

2.1.6. Zhodnocení

Závěry zpracovaných studií končí obdobně – přínos multispektrálních a termálních kamer ve vztahu k preciznímu vinařství je hodnocen pozitivně. Baluja J. et al. (2012) přináší obsáhlou a detailní studii, která naznačuje rozdíly ve využití snímků multispektrálních a snímků z termokamery, kdy multispektrální snímky

mají vyšší výpovědní hodnotu především při zjišťování dlouhodobých vlivů a trendů ve vinici, termokamera je potom schopna nabídnout aktuální údaje týkající se vodního stavu. Primicerio J. et al. (2012) potvrzuje průzkumem předpoklad vinaře o rozdělení vinice a potřebu odlišné péče o jednotlivé části, Turner et al. (2011) nabízí podobné závěry. Malá plocha zkoumaných vinic umožňuje vinaři stav vegetace odhadnout, ovšem snímání pomocí UAV preciznost takovýchto odhadů značně zpřesňuje. Aplikace výsledků v praxi se může projevit v odlišném způsobu hnojení, vytvoření sítě automatických závlah, či odlišné péči o révu v závislosti na úrodnosti půdy.

2.2. Využití fotogrammetrie ke měření půdní eroze

Intenzifikace zemědělství a s ní spjaté využívání pesticidů, využití nevhodných zemědělských plodin na erozí ohrožených půdách, změna klimatu a nárůst extrémních projevů počasí jsou faktory mající za následek degradaci zemědělské půdy, její odnos, znehodnocování, případně desertifikaci.

Existuje množství efektivních metod zajišťujících odhad a výpočet množství erodované půdy, např. rovnice USLE (Universal Soil Loss Equation) vyvinutá v 60. letech v USA, která slouží k výpočtu dlouhodobé ztráty půdy. Chceme-li se ovšem zabývat jevy krátkodobými, vznikajícími i během jednotlivých srážkových událostí, daleko vhodnější metodou je zaměření takového území. Aplikace UAV je v tomto případě efektivnější metodou než využití satelitů. Stejně jako v kapitole zabývající se precizním vinařstvím, i zde narážíme na podrobnost získaných dat – rozlišení satelitních snímků nedostačuje požadované přesnosti měření a data jsou v mnohých případech dostupná se zpožděním.

Nabízejí se možnosti jako zaměřit zájmové území pomocí TLS (Terrestrial Laser Scanning), ovšem tato metoda je časově náročná, nehledě na nejistotu exaktnosti výsledků takového měření. Analýzou území pomocí UAV vybaveného kamerou či LiDAREm a vhodně zvoleným letovým plánem lze ovšem takové území zaměřit mnohem přesněji a v kratším čase. V této kapitole je uvedeno několik experimentů souvisejících s tímto tématem.

2.2.1. Popis území a problematiky

V zemědělsky intenzivně využívané oblasti na jihozápadě Maroka, v údolí řeky Souss, panují přírodní podmínky vhodné pro intenzivní pěstování zemědělských plodin. Rozsáhlá území pokrytá fóliovníky i sady s ovocnými stromy pokrývají rozsáhlá území v okolí Soussu. Kromě místního trhu nachází místní výpěstky odbyt v Evropě, což do země přináší potřebný kapitál. Rozvoj zemědělství a bohatnutí regionu s sebou nese průvodní jev – migraci obyvatelstva (Tagma T. et al, 2009). Zvyšují se tak nároky na využití území. Kromě zemědělské půdy přibývá plocha zastavěného území a dochází ke změně terénu a odvodnění území. Původní soutěsky jsou buldozery zasypány za účelem rozšíření stavební plochy a kvůli intenzivnímu čerpání vody pro zavlažování klesá hladina podzemní vody. Tyto faktory

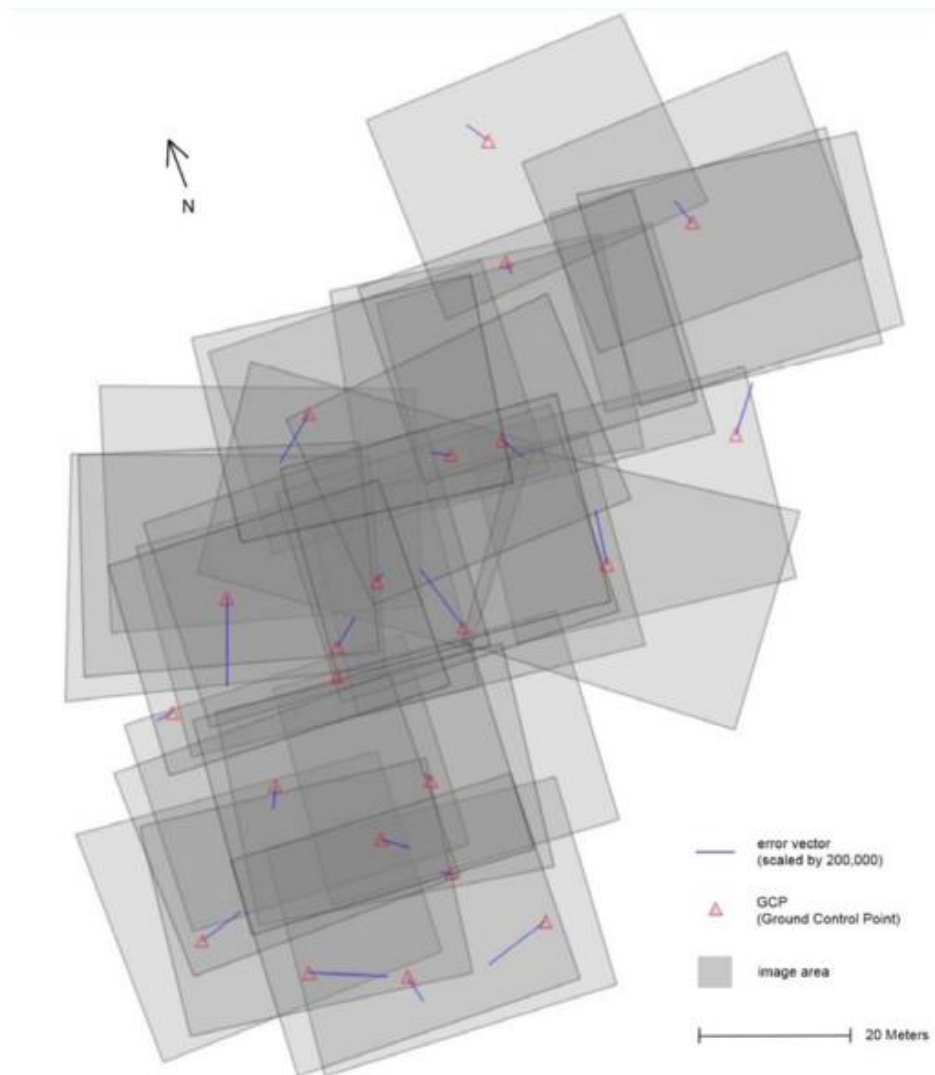
urychlují vysychání území a s ním přicházející odnos půdy. D'Oleire-Oltmanns S. et al. (2012) v území okolo města Taroudant prováděli v letech 2010 a 2011 průzkum s účelem zjistit rychlost a význam tohoto jevu.

2.2.2. Snímkování, použitá technika

Letounem je v tomto případě jednomotorový stroj s fixním křídlem Sirius I od německé firmy MAVinci. Váha letadla bez nákladu je 2,3 kg a užitečné zatížení činí 550 g. Užitečným zatížením je v tomto případě amatérský kompaktní fotoaparát s vyměnitelným objektivem Panasonic Lumix GF1. Doba letu je až 40 minut, kvůli absenci podvozku je letadlo „hozeno“, o nabrání výšky, rychlosti a let samotný se stará autopilot. Ten vyhodnocuje údaje z vnitřní GPS a IMU (Inertial Measurement Unit), letová dráha je předem nakonfigurována v softwaru dodávaném též výrobcem, jako letoun samotný. Po dokončení předdefinované trasy zůstane letadlo kroužit v okruhu 200 metrů okolo počátečního bodu a čeká na manuální převzetí kontroly pilotem. Ve složitém terénu, kde není možno letounu automaticky přistát, přebírá kontrolu stroje pilot a provede přistání manuálně za účelem snížení rizika destrukce letounu (MAVinci, ©2018). Pokud to terén dovoluje, je letoun schopen plně automatického přistání

Na palubě letounu umístěný fotoaparát Panasonic disponuje senzorem s rozlišením 12 megapixelů. Ten snímá obraz přes nasazený objektiv s ohniskovou vzdáleností 20 mm. Výsledné snímky jsou ukládány v bezztrátovém formátu RAW. Ten umožňuje s fotografiemi manipulovat v post-procesu, a tak získat z nasnímaného materiálu maximum informací. Kamera je také svázána s plánovacím softwarem, který v pravidelných intervalech snímá fotografie a zároveň ukládá informace o poloze z GPS jednotky a náklon letounu z IMU.

Na povrchu zájmového území s pomocí totální stanice výzkumný tým rozmístil síť kontrolních bodů – černých krabic s bílým terčem. Počítá se s tím, že mnohé body nevydrží do příštího snímkování, a to kvůli narušení jejich přesné pozice místními dětmi či zemědělci. Z toho důvodu jsou některé body zakryty vegetací či vrstvou půdy. Dají se posléze použít jako referenční a dle jejich souřadnic lze vybudovat novou síť GCP pro příští měření.



Obrázek 3: Distribuce GCP a snímků terénu. Zdroj: D'Oleire-Oltmanns S. et al. (2012)

Snímkování i zpracování dat autoři rozdělili do dvou rozdílných postupů. Pro monitorování konkrétní soutěsky vznikla výše popsaná síť GCP, díky které lze snímky triangulovat a dosáhnout přesnosti DTM (Digital Terrain Model) 0,5 cm (osa X/Y) a 1 cm (osa Z). Aby bylo dosaženo vysoké detailnosti snímků, letový plán navádí letadlo po vytyčené trase ve výšce 70 m. Jelikož se letadlo během letu naklání, vzniká spousta snímků, u kterých náklon nelze kompenzovat manipulací snímku v post-procesu. Je tedy vhodné pořídit větší množství snímků a pro vytvoření modelu terénu manuálně selektovat na základě náklonu letadla (a snímku) a vhodném překryvu s ostatními vybranými snímky. Je ovšem potřeba brát v potaz i výpočetní výkon počítače, který model terénu zpracovává. S nárůstem množství snímků se prodlužuje čas, za který je DTM vytvořen. Tento způsob měření byl aplikován celkem na 3 soutěsky.

Druhý způsob zpracování snímků je použit pro rozměrné území a slouží především k zasazení výsledků do prostorového kontextu. Snímkování probíhá z výšky 400 m a rozsah měřeného území je tří až pětinasobný oproti detailně snímkovaným soutěskám. Jako zdroj souřadnic jsou použity údaje z GPS letounu –

ty reprezentují bod (pixel) ve středu fotografie, doplněny jsou údaji o náklonu letadla z IMU. Autor zmiňuje, že přesnost těchto údajů je neznámá. To je dáno jak odchylkou měření samotné GPS, tak prodlevou mezi zápisem souřadnic a pořízením snímku. Naměřená odchylka tak může dosahovat až několika metrů, či stupňů od reálných hodnot. Proces triangulace spočívá v porovnání pořízených snímků se snímky satelitu Quickbird, při kterém byly nalezeny vhodné body (křížovatky, keře apod.), jejichž souřadnice byly manuálně přidány do zpracovávaných snímků.

2.2.3. Výsledky měření

K monitorování změn v objemu odnesené půdy slouží generované modely terénu. Ty samotné ovšem výsledky neposkytnou, srovnání s modelem terénu, který by zachytil stav před erozivní událostí, je kruciólní. Zde autoři naráží na nedostatek vycházející z neexistence takového modelu. Plošné snímkování za účelem vytvoření modelu terénu Maroka neexistuje, a tak nezbývá než vycházet ze satelitních snímků. Autoři systém soutěsek identifikovali již na snímcích satelitu Corona – šlo o americké vojenské satelity snímající povrch země v letech 1960–1972 (Dashora A. et al., 2007). Dále je soutěska identifikována na snímcích satelitu SPOT (r. 2004), ovšem v roce 2009 došlo k jejímu zahrnutí za účelem zvětšení zemědělsky obdělávané půdy. Autor poté uvádí, že ke znovuvyvoření zkoumané soutěsky poté zřejmě stačila jedna silná srážková událost zraje roku 2010.

Byl porovnán změřený model terénu a model, kde byla soutěska softwarově „po okraj zaplněna“. Výsledný rozdíl v objemech, tedy množství odnesené půdy, činí 720 m³. Vezmeme-li v potaz, že jde o množství transportované během jediné srážkové události, je patrné, jak enormní dynamiku a důsledky může eroze mít, pokud dochází k nesprávnému zacházení s půdou.

2.2.4. Další studie

Eltner A. et al. (2015) se na rozdíl od výše zmíněné studie zaměřuje na prostorově méně rozsáhlé erozivní procesy. V rovinném terénu německého Saska zkoumá proces vzniku a prohlubování stružek na experimentálním poli. To je zoráno a ponecháno ladem pro lepší pochopení účinků vodní eroze na zemědělské půdě.



Obrázek 4: Experimentální pole. Na snímku vidíme vytyčené GCP. Zdroj: Eltner A. et al. (2015)

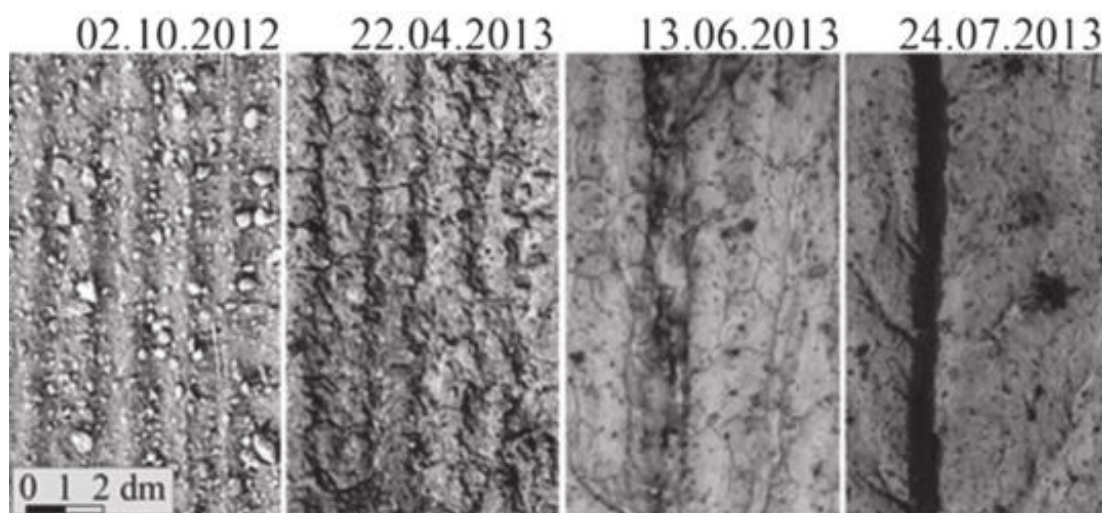
Na rozdíl od výše rozebrané práce je zde použito jiných metod sběru dat. Letadlo nahradila oktokoptéra a jako referenční model terénu posloužil

DSM (Digital Surface Model) snímány pomocí TLS (Terrestrial Laser Scanning). Prostředí, respektive členitost terénu, ve kterém sběr dat probíhá, je diametrálně odlišná a volba metody sběru dat s tím úzce souvisí. Rozloha experimentálního pole je cca 600 m², plocha rozsahem vhodná na použití oktokopty, která dokáže ve vzduchu vydržet cca. 15-30 minut a z malé výšky při nízké rychlosti pořizovat detailní snímky. Referenční DSM vznikl pomocí laserového snímače připevněného na 4 m vysoký stativ. Pro oba typy snímování byla vytvořena síť referenčních bodů (viz. Obrázek 4)

Za zmínku stojí také přístrojové vybavení. Snímky pro vytvoření modelu terénu byly pořízeny dvěma různými fotoaparáty – první z nich je kompaktní kamera Panasonic DMC-LX3. Její objektiv má ohniskovou vzdálenost od 5,1 do 12,8 mm (zoomovací objektiv), po dobu sběru snímků je nastaven na nejširší ohnisko. Kamera Sony NEX-5 je vybavena širokoúhlým objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností 16 mm. Připevnění kamer ke konstrukci oktokopty zajišťuje stabilizátor. Přínosem je nižší náchylnost ke zhoršení kvality snímků v důsledku náklonů a vibrací letounu, daní za to je pochopitelně nárůst hmotnosti, a tedy kratší doba letu.

Modely terénu jsou poté zpracovány pomocí softwaru Pix4D, u TLS modelu je dodatečně odstraněna vegetace pomocí open source softwaru CANUPO a snížen šum pomocí PCL (Point Cloud Library).

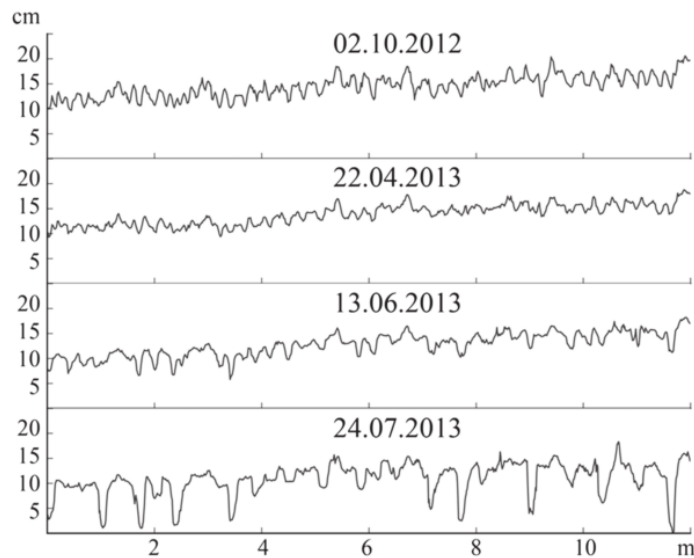
Mračna bodů jsou pro zjištění přesnosti porovnány programem CloudCompare, přičemž směrodatná odchylka rozdílů se pohybuje mezi 4-8 mm. Referenční DSM má přesnost cca 1 cm, proto lze modely vytvořené UAV snímáním označit za přesné.



Obrázek 5: Cca desetiměsíční trvání průzkumu ukazuje rozdíly mezi čerstvě zoranou půdou a postupným vývojem stružek působením deště a sněhu. Zdroj: Eltner A. et al. (2015)

Obrázek č. 5 zobrazuje výřezy ze snímků terénu, na obrázku č. 6 je poté zpracován vzorový příčný profil a průběh hloubení stružek. Autorka v práci poukazuje na rozdílný vývoj terénu v průběhu času. Proces tvorby stružek a jejich prohlubování počíná až v období intenzivních dešťů od května do července, předtím dochází spíše k poklesu nakypřeného povrchu pole. Mezi měřeními v červnu a červenci dojde k rozšíření ze 17 na 23 cm (Jde o zprůměrované údaje u stružek delších než 15 m)

a k prohloubení ze 2 na 4 cm. Vyjádřeno procentuálně, jde o prohloubení o 100 % a rozšíření o 35 %.



Obrázek 6: Příčný profil terénu a jeho změna v čase. Zdroj: Eltner A. et al. (2015)

2.2.5. Shrnutí

Kapitola naznačuje široké možnosti využití UAV fotogrammetrie při měření půdní eroze. Značný pokrok zde přinesl rozvoj SfM (Structure from Motion) softwaru (Westoby M. et al., 2012), zjednodušující proces identifikace snímků a následnou tvorbu DEM (Digital Elevation Model), a to bez obětování kýžené detailnosti.

Uvedené studie ukazují diverzitu prostředí, kde lze využít rozličné metody snímání. Na rozsáhlá, několikahektarová území je praktičtější nasadit letoun s delším doletem, pro potřeby např. menšího pole naopak bohatě postačí dron. Z toho vyplývají i limity jednotlivých UAV. Důležitou roli hraje užitečné zatížení – hmotnost, jakou je letoun schopný unést, z čehož vyplývá mimo jiné volba fotografického vybavení, potažmo kvality obrazového výstupu. Napříč studii se opakuje použití bezzrcadlových fotoaparátů s vyměnitelnými objektivy. Při nižší hmotnosti poskytují vhodnou obrazovou kvalitu s lepší možností kontroly datového výstupu oproti většině kompaktních kamer (RAW snímky), zároveň je lze vybavit objektivem vhodným pro fotogrammetrii. V kapitole je zároveň zmíněno použití stabilizátoru obrazu. Vzhledem k nutnosti jej zavěsit pod letoun odpadá možnost využít jej na letadlech, z čehož plyne horší kvalita obrazového výstupu, což při nevhodných povětrnostních podmínkách může znehodnotit celé měření.

2.3. Fotogrammetrie, LiDAR a jejich využití v lesnictví

LiDAR je technologie průzkumu terénu pomocí laserového skenování povrchu. Vzhledem k rozměrům a hmotnosti zařízení pro sběr dat je nasazení LiDARu v sektoru UAV značně komplikovanější než UAV s kamerou. Rostoucí rozměry a hmotnost snímače vyžadují letoun s větší vzletovou hmotností, a to se neblaze podepisuje na délce letu, z čehož vyplývá zásadní limit – omezená plocha analyzovaného území.

LiDAR na rozdíl od letecké fotogrammetrie nabízí nespornou výhodu – prostorovost dat (Lisein J. et al., 2013). Fotogrammetrické postupy popsané v této práci pracují na principu SfM, tedy vytvoření modelu terénu z překrývajících se dvourozměrných fotografií, LiDAR vytváří přímo mračna bodů, v nichž lze extrahovat nejen model terénu, ale také kýžená data o vegetaci, její hustotě a výšce. Využití těchto dat, jejich srovnání s fotogrammetrickými modely a úskalí jejich sběru nastíní experimenty v této kapitole.

2.3.1. Průzkum změny lesa pomocí LiDAR

Wallace L. et al. (2012) popisuje nasazení UAV-LiDARu při zkoumání změn ve vývoji eukalyptové plantáže na jihu Tasmánie, nedaleko města Franklin. V tomto případě jde o populaci *Eucalyptus Nintes* ve věku 5 let, rostoucí v kopcovitém terénu v nadmořské výšce cca 450 m. n. m. Jejich výška dosahuje okolo 10 metrů.

Použitý hardware zahrnuje oktokoptéru Mikrokopter AD-8 od společnosti OktoKopter Droidworx, schopnou po dobu 3-4 minut unést náklad o hmotnosti až 2,8 kg. To postačí na měření území ve vzdálenosti cca. 100 m okolo místa vzletu. Oktokoptéra je vybavena autopilotem, jenž na základě předdefinované letové trasy efektivně využije čas letu ke sběru dat. Ten můžeme rozdělit na dvě části. První zahrnuje HD (High Definition) video kameru, IMU a modul GPS. Tyto přístroje jsou pro zkvalitnění výstupních snímků a k nim přiřazených údajů o náklonu, rychlosti a pozici stroje izolovány od vibrací osmi motorů pomocí silikonových bloků. Dále na stroji usazen laserový skener Ibeo LUX, měřící ve čtyřech skenovacích vrstvách, přičemž dokáže zaznamenat až 22000 odrazů za sekundu. Dosah laseru je až 200 m. Příčná rozbíhavost paprsku je 0,08° a podélná 1,6°. U každého pulzu dokáže snímač odečíst tři odrazy paprsku a jejich příslušné vzdálenosti.

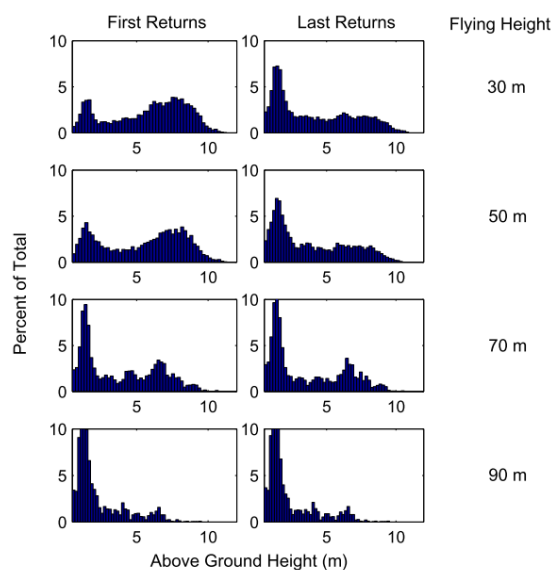
Čtyřmi lety v různých výškách byla zaměřena sekce plantáže o délce 120 m, přičemž během každého letu probíhalo měření v obou směrech letu – tam i nazpět. Letoun při snímání držel konstantní rychlost 4 m/s. Z měřeného pásu byly následně selektovány čtyři kruhy o průměru 12,62 m pro detailní analýzu.

2.3.2. Zpracování dat

Generování mračen bodů poté probíhalo individuálně pro každý analyzovaný kruh a každý přelet, ve výsledku vzniklo 8 mračen bodů pro každý z kruhů. Všechna mračna bodů byla následně filtrována pro odlišení pozemních bodů (DTM) a nepozemních (AGH – Above Ground Height) bodů. AGH modely vznikly z bodů, jejichž nadzemní výška byla větší než 0,5 m. Tyto body vznikly odrazem od vegetace a jsou podrobeny dalšímu zpracování – redukci hustoty. Upravená mračna bodů jsou dále podrobena kvantitativní i kvalitativní analýze zkoumající výstupy z různých letových výšek a vliv výšky snímání na kvalitu a strukturu dat.

2.3.3. Výsledné modely a jejich porovnání

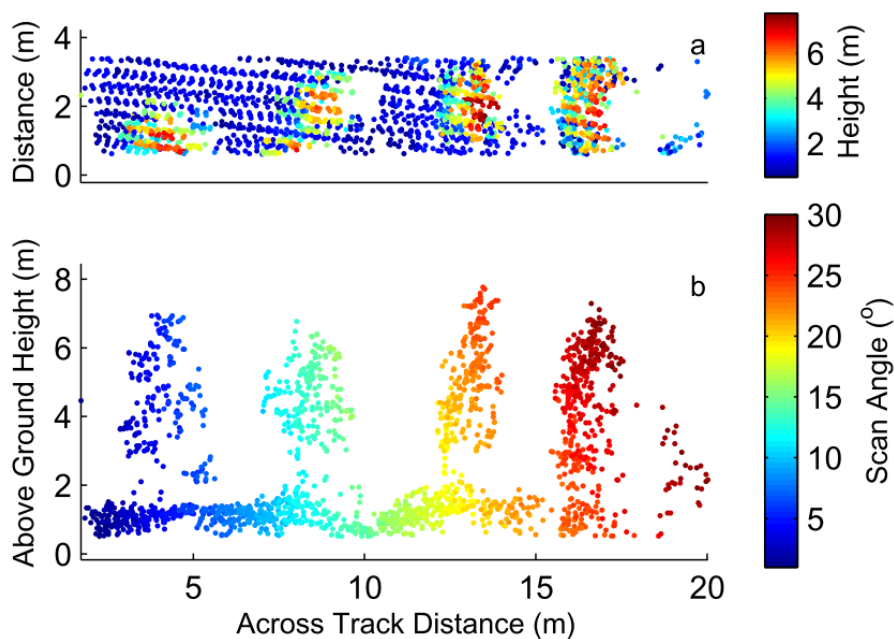
Distribuce bodů v mračnu se značně odvíjí od výšky letounu při sběru dat. Obrázek č. 7 ukazuje distribuci bodů pro různé výšky letu v histogramu. Do 50 m výšky je distribuce bodů poměrně podobná pro všechny modely, se vzrůstající výškou ovšem narůstá množství odrazů od povrchu a značné snížení odrazů ve výškách mezi 5–10 m, v nevyšší výšce letu, 90 m, dochází v tomto intervalu k signifikantní redukci odrazů.



Obrázek 7: Histogram prvních a posledních odrazů laserového paprsku. Zdroj: Wallace L. et al. (2012)

Pokles odrazů od vrchního patra vegetace se projevuje i třeba odlišností kvantilů jednotlivých měření. U modelů AGH mají kvantily pro všechna měření do 50 m výšky odchylku pod 7 %, ta ovšem naroste až na 120 % při srovnání těchto a modelů snímáných ze 70, případně 90 m. Autor uvádí, že z těchto výsledků lze odvodit nereálnou strukturu vegetace u modelů nasnímaných ze 70 a 90 m, tudíž pro další analýzy nejsou použity. Podobný jev se objevuje i u Lin Y. et al. (2011). Nabízí srovnání leteckého a UAV LiDARu a i v tomto případě je u leteckého LiDARu citelná ztráta dat v nejvyšší vrstvě vegetace. Autorka uvádí, že cca. 0,6 m výšky stromů není registrováno.

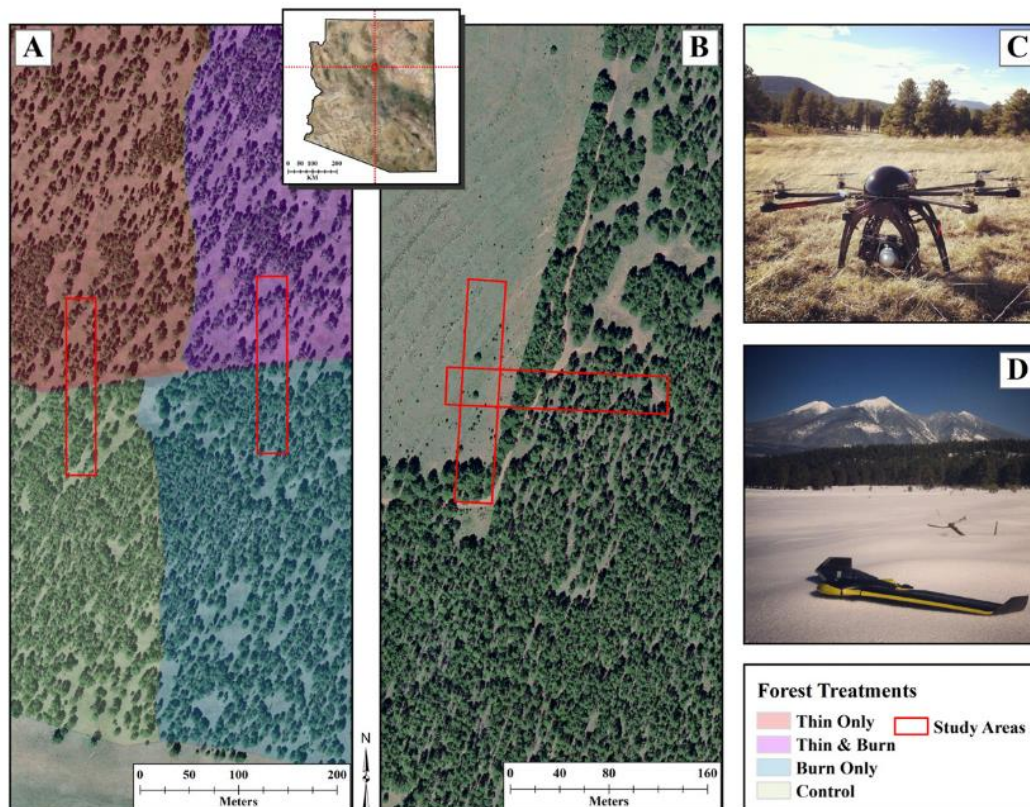
Dále je posuzována horizontální přesnost modelu, spočívající ve výběru 50 náhodných stromů a porovnání jejich lokalizací. Po vyřazení snímků ze 70 a 90metrové výšky zůstávají k porovnání 4 modely. Průměrná odchylka mezi modely činí 0,36 m a směrodatná odchylka 0,24 m. Největší rozdíl byl nalezen u letů v 50 metrech, a to 0,96 m. Úhel skenu byl v tomto případě kolem 20° u obou letů, což naznačuje, že přesnost je negativně ovlivněna narůstajícím úhlem skenu a výškou letu. Větší úhel skenu se zároveň promítá vznikem stínů v modelu. Distribuce bodů ve vegetaci přestává být rovnoměrná a s tím klesá použitelnost dat pro exaktní statistické zpracování. Situaci znázorňuje obrázek č. 8.



Obrázek 8: Vliv úhlu dopadu paprsku na distribuci snímaných bodů. Zdroj: Wallace L. et al. (2012)

2.3.4. Kombinace LiDARu, hyperspektrální a multispektrální kamery

Sankey et al. (2017) kromě nasazení dronu s LiDAREm a hyperspektrální kamerou používá také multispektrální kameru připevněnou na samokřídlo FlyBee. Hlavní témata studie zahrnují výzkum vlivu lesního hospodářství na hustotu korun stromů, rozlišení kleneb, jejich strukturu a klasifikaci druhů. Měření probíhalo v severní Arizoně, USA na pomezí monokulturního jehličnatého lesa (hlavní dřevina: *Borovice těžká*, *Pinus ponderosa*) a přehlých luk. Situace a použité vybavení jsou k vidění na obrázku č. 9.



Obrázek 9: Přehled zájmových území (vlevo) a použité techniky (vpravo). Na snímku úplně vlevo jde vidět členění lesa podle různých způsobů hospodaření. Zdroj: Sankey et al. (2017)

Kromě průzkumu leteckého autoři manuálně za pomoci ručního laserového dálkoměru měřili výšku a měřickým pásmem délku/šířku všech 429 stromů. Zároveň je GPS přijímačem Trimble GeoXH mapována poloha jednotlivých stromů. Pro důkladnější analýzu je nasazen také TLS skener. Při softwarovém zpracování je poté vytvořena čtvercová mřížka o délce hrany 10 m/buňka pro kvantifikaci výsledků.

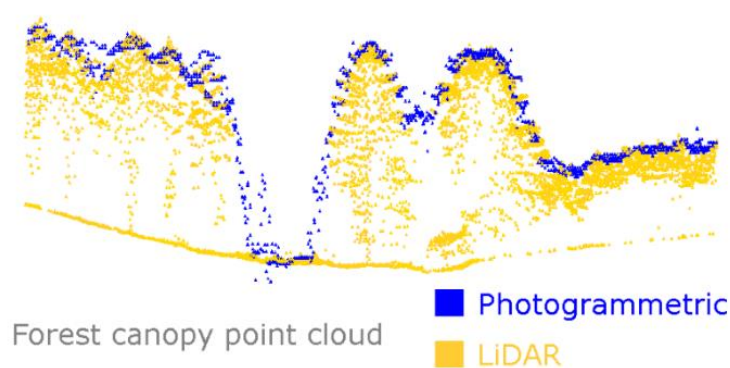
Mračno bodů z LiDARU je stejně jako v předchozí studii klasifikováno na pozemní a vegetační body. S manuálně sbíranými údaji při srovnání autor uvádí vysokou korelaci výšky stromů $R^2 = 0,90$ (při porovnání mřížky). Korelace klesá ($R^2 = 0,79$) při porovnání pouze lesních území. Hustá vegetace, znesnadňující průstupu laserových paprsků, nesprávně zachytává odrazy od nižších stromů, a ty tak často nejsou registrovány. Dále je srovnáván průměr korun stromů, kde v řídké porostlých plochách je korelace $R^2 = 0,72$ při srovnání s manuálně sebranými daty, ovšem v hustých částech lesa klesá na $R^2 = 0,46$. Dobré jsou výsledky u srovnání leteckého a TLS LiDARu – $R^2 = 0,92$, ovšem autor neuvádí, zda jde o hustě zalesněná území, či všechny plochy dohromady.

Hyperspektrální kamera použitá na oktokoptyře snímá 272 spektrálních pásem v rozmezí 400-1000 nm. Ze samotných hyperspektrálních snímků byla při klasifikaci vegetace dosažena přesnost 76 %.

Autoři dále vytvořili databázi referenčních pixelů reprezentujících různé druhy vegetace (50-100 pixelů na druh) a algoritmy, které na základě tvaru a lokace

a podobnosti s databází referenčních pixelů pomocí klasifikačního algoritmu (technika využívající stromový model rozhodnutí a jejich případných následků, využívaná např. při strojovém učení) provedli fúzi hyperspektrálních snímků a LiDAR dat. Oproti použití samotných hyperspektrálních snímků narůstá přesnost odhadu na 88 % při třídění jednotlivých druhů vegetace.

Výška letu samokřídla FlyBee byla 120 m nad terénem. DTM z multispektrální kamery na jeho palubě byl pak vytvořen v rozlišení 15 cm/pixel. Po klasifikaci bodů na povrchové a vegetační je DSM komparován s manuálně nasbíranými daty. Podobnost kleneb stromů je v zóně ekotonu velmi vysoká ($R^2 = 0,93$), méně už v hustě zarostlých zónách ($R^2 = 0,64$). Pro neexistenci bodů zevnitř vegetace (pro ilustraci obrázek č. 10) lze očekávat nízkou korelaci dat při dělení prostoru do mřížky. V lesní zóně jde o $R^2 = 0,53$, resp. $R^2 = 0,36$ v ekotonu.



Obrázek 10: Rozdílná distribuce bodů v mračnu podle způsobu snímání. Zdroj: Lisein J. et al. (2013)

2.3.5. Shrnutí

Napříč studii lze vysledovat pozitivní přínos sběru prostorových dat s UAV v lesním hospodářství, zaměříme-li se ovšem výhradně na LiDAR, nelze nezmínit nedostatek plynoucí z hmotnosti a energetické náročnosti skeneru. Za krátkou dobu, po kterou je schopen stroj letět s LiDARem na palubě, zdaleka není možné nasnímat rozsáhlejší lesní celky a využití je tak limitováno. Provoz větších UAV s delší výdrží a doletem je více legislativně limitován, což neumožňuje masové nasazení, jako například u precizního zemědělství, kde lze snáz využít malých dronů. Fotogrammetrie a tvorba SfM modelů naráží na detailnost vegetačního pokryvu a jeho pohyb způsobený např. větrem, navíc jsou tyto modely ochuzeny o prostorovost dat ve stromovém pásmu. Miniaturizace, a zlepšující se energetická účinnost výpočetní techniky v budoucnosti tyto nedostatky při používání LiDARu pravděpodobně odstraní, ovšem v současnosti je jeho praktické využití komplikované.

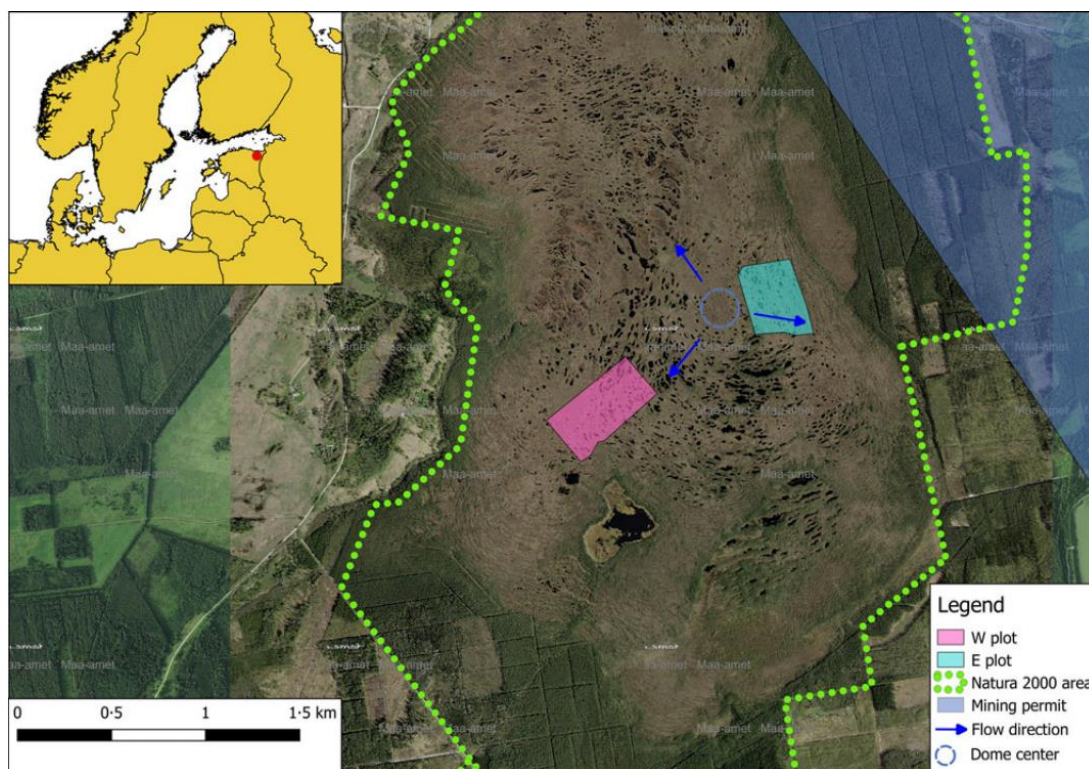
2.4. Nasazení UAV při sběru dat v mokřadech

Mokřadní ekosystémy poskytují nejen útočiště pro celé spektrum živočichů a rostlin, ale jakožto deponitáře uhlíku vázaného ve skleníkových plynech hraje jejich ochrana a zachování podstatnou roli při minimalizaci dopadů na změnu klimatu. Schopnost mokřadů zadržet vodu v krajině má vliv na ochranu krajiny před povodněmi, umělé, konstruované mokřady pak mohou sloužit jako kořenové čistírny odpadních vod (IPCC, ©2018). Změna zásoby vody v mokřadu promění podmínky nejen pro život rostlin a zvířat. Trvalý pokles hladiny s sebou například nese i větší riziko požáru, vedoucí k zásadní proměně tohoto biotopu (Kettridge N. et al., 2015). Ochrana a obnovování mokřadů jsou v zájmu zachování klimatické stability, úzce související se schopností lidstva obhospodařovat půdu a produkovat potraviny pro narůstající světovou populaci.

Pro lepší pochopení dějů v mokřadech, ať už se zaměříme na chemismus, hydrologii, či vývoj a stav vegetace, lze použít dálkový průzkum Země. UAV fotogrammetrie díky své přesnosti přináší možnost zabývat se v rašeliništích kupříkladu odhadem výšky hladiny podzemních vod. Hladina podzemní vody, pokud nevystupuje na povrch, může být pomocí dálkového průzkumu prakticky nezjistitelná, v této kapitole jsou ukázány metody využívající výšky hladin jezírek a tůňek v prostředí mokřadů a jejich souvislost s hloubkou podzemní vody.

2.4.1. Pozorování vývoje výšky hladiny vody pomocí fotogrammetrie

Předchozí kapitola, zaměřená na lesní hospodářství, poukazuje na omezené možnosti fotogrammetrie v zalesněném území. Rašeliniště jsou také zalesněná území, stromy jsou zde ovšem spíše solitéry, nevytvářející souvislý zákryt země a zde panující podmínky jim nedovolují značný vzrůst. Vodou nasáklá rašeliniště, fragmentovaná četnými jezírky, jsou typickým prostředím pro rovinaté Pobaltí, skýtající rozsáhlá území pokrytá mokřady. V důsledku intenzifikace zemědělství, extrakce rašeliny a těžby ropných břidlic se jejich plocha zejména v minulosti značně zmenšila. Těžbu břidlic provází další jev – čerpání podzemní vody, jejíž pokles lze zaznamenat i vzdáleně od oblasti těžby. Kohv M. et al. (2017) usuzuje, že následkem odčerpávání by měl být právě pokles hladiny vody v jezerních systémech. Hladina podzemních vod mezi jezírky je provázána s horninou v podloží, ze které je v důsledku nedaleké těžby ropné břidlice odčerpávána voda. Pomocí hexakoptéry vybavené digitálním fotoaparátem jsou dvě vybrané plochy v rašeliništi Selisoo na severovýchodě Estonska třikrát nasnímány, a to na podzim 2015 a poté na jaře a na podzim r. 2016. Jak píše Reeve A. et al. (2000), kvůli postupnému přirůstání porostu se rašeliniště stává vypouklým, což se odráží ve směru odtoku vody. S ohledem na to byly vybrány plochy na opačných stranách rašeliništního "dómu". Více napoví obrázek č. 11, ze kterého je morfologie patrná.

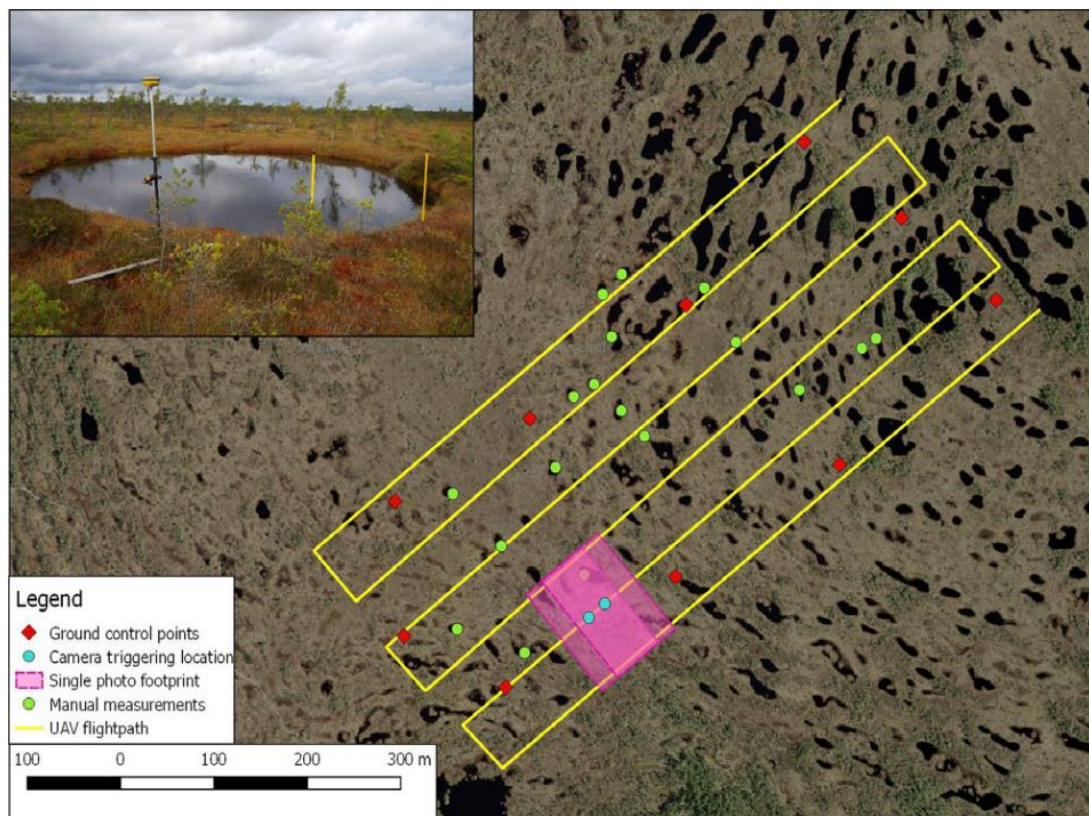


Obrázek 11: Přehledová mapa. Modré šipky ukazují směr odtoku, kruh mezi nimi pak vrcholek dómu. Lze pozorovat také překryv chráněného území a plochy těžby ropných břidlic.
Zdroj: Kohv M. et al. (2017)

Autoři použili hexakoptéru vlastní výroby, vybavenou bezzrcadlovým fotoaparátém Sony A5100 s 16 mm objektivem. Fotoaparát je připevněn na stabilizátor, výstupní formát snímků je RAW – snímky jsou dále upraveny v softwaru Adobe Lightroom. Let je plánován pomocí programu ArduPilot Mission Planner tak, aby docházelo k překrytí snímků ze 70 % čelně a 55 % z boku. První snímkování probíhá z výšky 100 m, u dvou pozdějších snímkování je snížena na 80 m. Lety trvaly v průměru kolem 20 minut. Ke georeferencování slouží několik bodů označených bílým papírem o rozměrech 10x10 cm, jejichž souřadnice s přesností 2 cm horizontálně a 5 cm vertikálně jsou určeny GPS snímačem Topcon HiPer V. Plocha snímání je 14,8 hektaru pro západní území a 11,6 ha pro území na východě.

Dva dny po prvním měření bylo zájmové území skenováno pomocí leteckého LiDARu, přesnost byla určena na 15 cm horizontálně a 9 cm vertikálně. Mračno bodů má hustotu 2,1 bodů/m², porovnání s manuálně naměřenými body pomocí GPS ukázalo rozdíl ve výškách 0,004 m se směrodatnou odchylkou 0,037 m.

Digitální model povrchu (DSM) byl vytvořen softwarem AgiSoft z georeferencovaných snímků formátu GeoTIFF a jeho přesnost je 10 cm/bod.



Obrázek 12: přehled trasy letu, znázornění překryvu fotografií, polohy GCP a místa manuálních měření
Zdroj: Kohv M. et al. (2017)

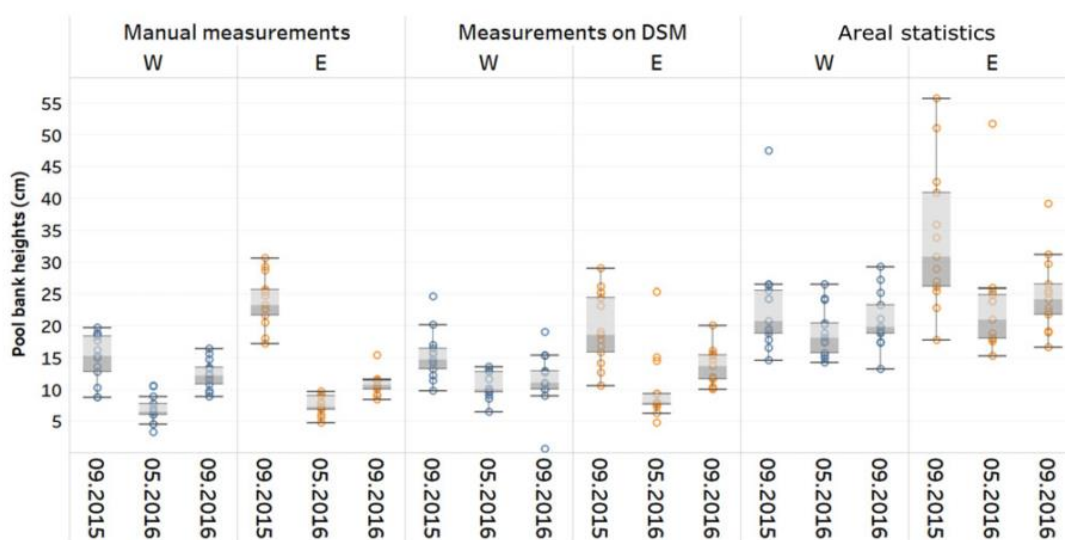
V programu ArcGIS jsou dále snímky klasifikovány. Bylo zapotřebí klasifikovat jezírka, k čemuž byla využita metoda maximum likelihood. Na základě ručně určených bodů a barev byly u všech šesti DSM body rozřazeny vodní povrch a jiné. Vygenerované polygony reprezentující jezírka po ruční korektuře prošly ještě odstraněním ostrůvků, neboť klíčové jsou pro analýzu břehy s pevninou. SfM technika trpí špatnou kvalitou výstupu u odrazivých či uniformních ploch, pro odečet výšky hladiny je tedy výrazně lepší použít výšky břehů, což podotýká i Javernick L. et al. (2014). 3D model i ortofotosnímek byly vygenerovány na počítači s dvacetijádrovým procesorem a 128 GB RAM, vytvořit jeden model trvalo cca. 5 až 6 hodin.

Pro každé měření a pro obě stanoviště byly vytvořeny DSM model a ortofotosnímek; ve výsledku tedy 6 modelů povrchu a ortofotosnímků. V rašeliništi ovšem nelze najít stálé referenční body, jediné rozpoznatelné prvky jsou samotná jezírka. Dle autorů nedochází mezi modely k detekovatelné změně v planimetrii. Prostorové změny spočívají hlavně v chybné klasifikaci, či v přirozených změnách daných fluktuací výšky hladiny vody.

Dva dny po prvním snímkování je použito leteckého LiDARu pro srovnání se SfM DSM modelem. Jak usuzují autoři studie, krátká časová prodleva umožňuje přímé srovnání.

2.4.2. Výsledky studie

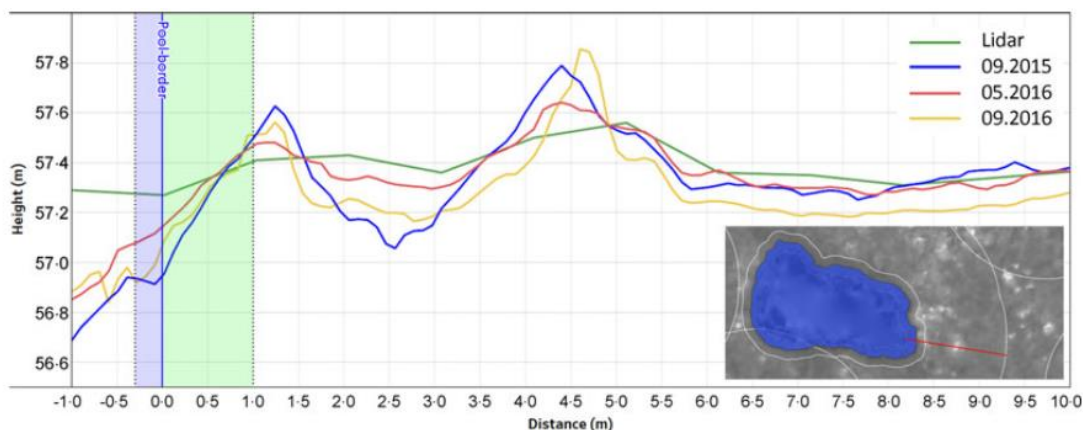
Zprůměrovaná, manuálně nasbíraná data pomocí GPS snímače, ukazují průměrnou výšku břehů 24,6 cm (SD = 7,6 cm) u měření na podzim 2015, a to v zájmovém území na východě, naopak nejnižší na jaře 2016 v západním území – průměr 6,8 cm, SD = 3,6 cm. Boxplot na obrázku č. 13 nabízí porovnání manuální metody, přímé výšky břehů a buffer zónu 1 m u 13 vybraných jezírek v obou územích.



Obrázek 13: Boxplot ukazující rozdíly v datových souborech. Zleva: ruční sběr dat, přímá výška z DSM, buffer zóna 1 m od břehu. Zdroj: Kohv M. et al. (2017)

Dále byly srovnány modely LiDARu a SfM DSM, vzniklé na podzim 2015. Srovnání přináší poznatek, že SfM DSM má v průměru negativní odchylku – chybou zpracování je povrch níže od LiDAR dat. U západního stanoviště jde o -2,2 cm, na východě pak -6,6 cm, další analýza ukázala jistou míru korelace s hustotou stromů. Pokud pokrývají více než 25-30 %, narůstá negativní vliv na přesnost výsledků.

Mračno bodů z LiDARu, navzdory vyšší přesnosti, nenabízí použitelné výsledky. Kvůli nízké hustotě bodů (2,1 bodů/m²) jsou břehy, na základě kterých je usuzována výška hladiny, příliš vyhlazené a nenabízí dostatečnou přesnost pro odečet rozdílu mezi hladinou a pevninou. Jelikož břehy jezírek mají velmi strmý břeh, SfM DSM je pro hustotu bodů mnohem vhodnějším zdrojem informací. Na obrázku č. 14 je řez jedním břehem znázorňující výšku DSM během všech měření. Patrné je vyhlazení u LiDAR DSM, při srovnání se SfM DSM si lze všimnout výše zmíněného faktu o celkově nižší nadmořské výšce SfM modelu.



Obrázek 14: Řez vybraným břehem. Jednotlivé modely terénu ukazují vývoj profilu v čase, i srovnání s LiDAR daty. Zdroj: Kohv M. et al. (2017)

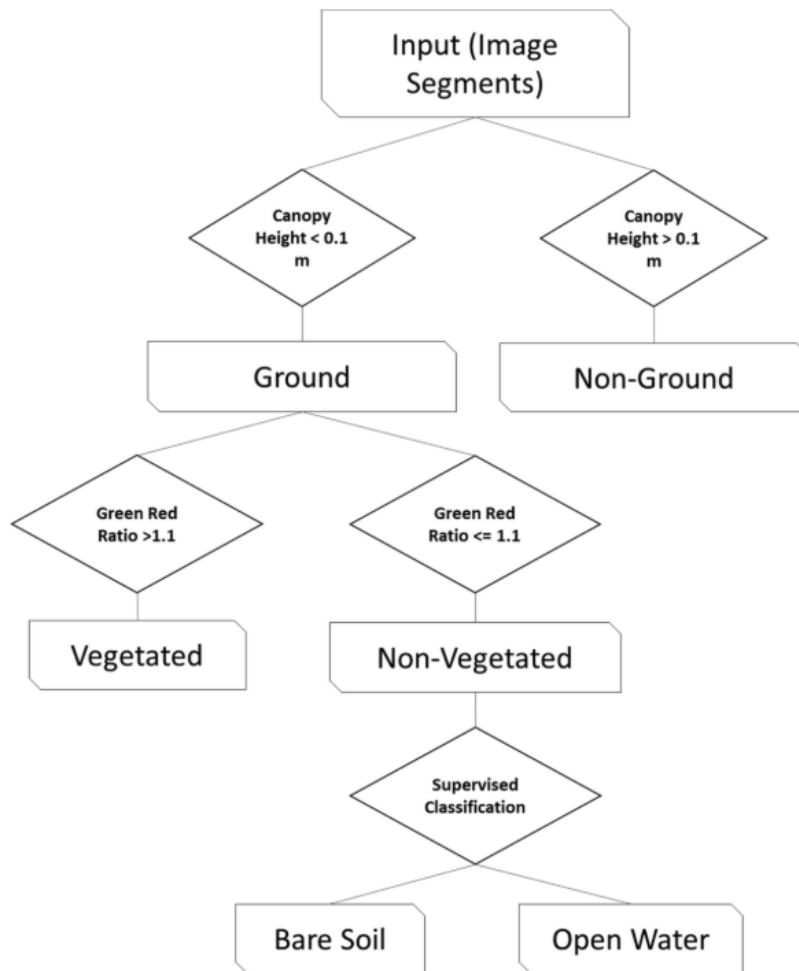
Ze závěrů studie vyplývá, že sezónní fluktuace vody je v případě tohoto rašeliniště kolem 20 cm. Odčerpávání vody z nedalekého dolu pak pravděpodobně má vliv na nižší hloubku podzemní vody v západní části, která je dolu blíže. SfM modely generované z fotografií pořízenými UAV mají dostatečnou přesnost ke zjištění sezónních fluktuací hladiny mokřadních jezírek.

2.4.3. Odhad výšky hladiny podzemní vody

Rahman M. et al. (2017) také pracuje s tezí, že četná jezírka, vyskytující se v rašeliništích, mohou v těchto prostředích s pórovitou strukturou a jemným sklonem dobře posloužit jako indikátor hladiny podzemní vody. Metodu demonstruje v 61hektarovém rašeliništi, nacházejícím se v Kanadě, v provincii Alberta.

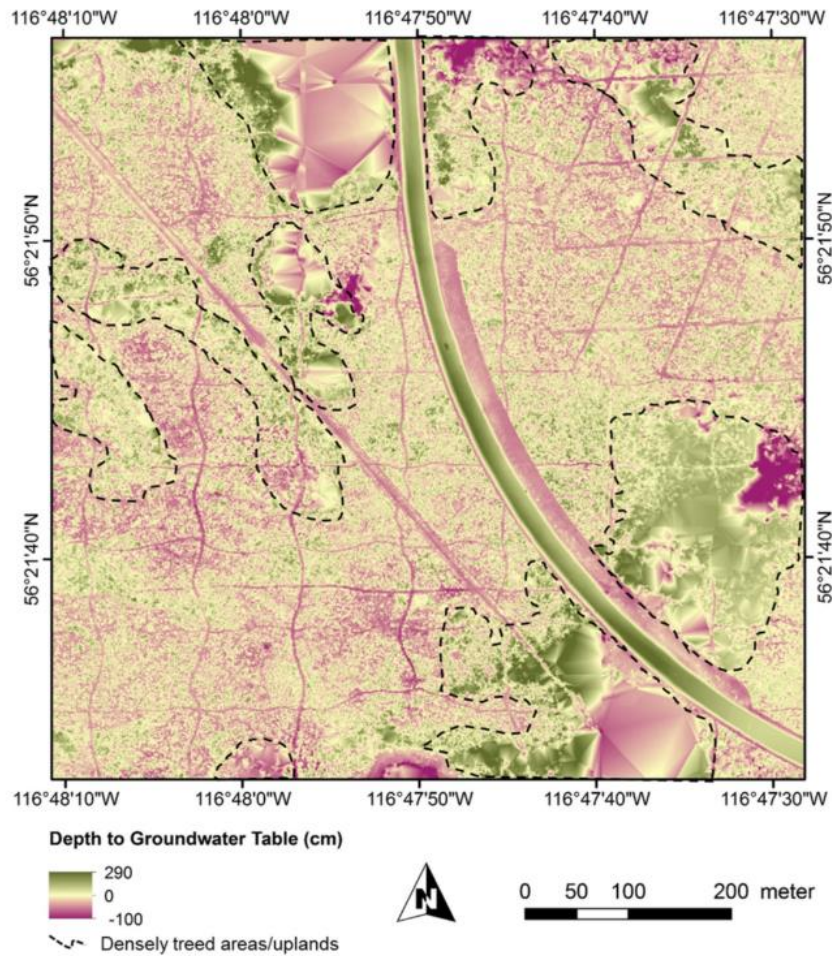
Pro zjištění přesnosti výsledků je území podrobené průzkumu sondováno 31 studnami, z nichž jsou v době sběru snímků odečteny výšky hladin, pomocí GPS snímače jsou pak tradičně zaznamenány souřadnice GCP pro rektifikaci ortofotosnímků. Ke snímkování byla použita kvadrokoptéra Aeryon Skyranger s 20megapixelovým fotoaparátem stejného výrobce. Letový plán byl vytvořen na základě požadavků na přesnost 2 cm/pixel a překrytí snímků z 80 % ve směru letu a 60 % ze stran. Letová výška byla 110 m, rychlost letu 4 m/s. Pro sběr snímků byl vybrán den s vhodnými atmosférickými podmínkami, rychlost větru nepřesahovala 3 m/s a oblačno poskytlo rozptýlené světlo, nevrhající na povrch ostré stíny.

Pro zpracování snímků byl použit software ENVI. Klasifikační algoritmus na základě vzorových objektů, které byly ručně vybrány autory, identifikoval jednotlivé body v mračnu SfM DSM. Postup klasifikace je uveden na obrázku č. 15.



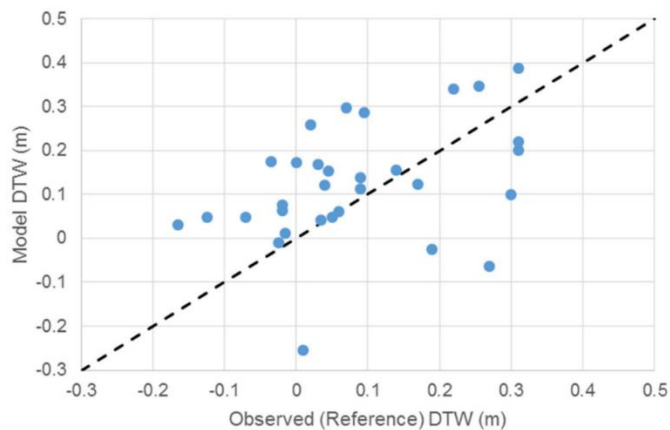
Obrázek 15: Grafické znázornění postupu klasifikačního algoritmu. Zdroj: Rahman M. et al. (2017)

Pro odhad výšky vody ve vodních tělesech z DSM autoři použili odlišnou metodu. Celou oblast rozdělili do buněk o ploše 50 m^2 a každé buňce přiřadili jeden bod vodní hladiny, reprezentující výšku v dané buňce. Bod nebyl vybrán náhodně, použita byla mediánová hodnota pro jednotlivé buňky. Celkově bylo vygenerováno 214 bodů, z nichž byla interpolována mapa výšky hladiny podzemních vod. Odečtením výšky podzemní vody od DSM vznikl model vzdálenosti hladiny podzemní vody od povrchu DTW (Distance To Water), zobrazený na obrázku č. 16.



Obrázek 16: Mapa DTW, vzniklá z rozdílu povrchu a hladiny podzemní vody.
Zdroj: Rahman M. et al. (2017)

Korelační koeficient DTW s údaji z kontrolních studen je mírně kladný ($R = 40$), na obrázku č. 17 je pak zobrazen korelační diagram. Z něj je patrný i negativní odhad hladiny podzemní vody u DTW modelu v místech, kde voda vystupuje na povrch. Nejde o chybu, vezmeme-li v potaz, že v místech zatopených vodou nelze pomocí zvolené techniky povrch nasnímat. Stojí též za zmínění, že i zde platí, že nejlepší shoda v měřeních je z oblastí s řídkou vegetací.



Obrázek 17: Korelační diagram ukazující vztah mezi referenčními daty ze studen a DTW modelem.
Zdroj: Rahman M. et al. (2017)

Horší odhad vzdálenosti hladiny od povrchu však nutně není způsoben jen snížením přesnosti odhadu ve vegetací porostlém terénu, ale také faktem, že půda v tomto prostředí není tak pórovitá jako v otevřeném rašeliništi, od čehož se odvíjí rozdílné hydrologické podmínky a zvolená metoda zde neposkytuje akurátní data.

2.4.4. Shrnutí studií

Citované studie hodnotí využití UAV k průzkumu mokřadů vesměs pozitivně, snad kromě schopnosti SfM při rekonstrukci povrchových bodů. Studie by vhodně doplnilo nasazení UAV LiDARu, zmíněn v pracích ovšem není. Rahman M. et al. (2017) zmiňuje možnost detailně analyzovat rozsáhlé plochy, kde ruční sběr není v silách výzkumných týmů.

Aktuální podmínky jako období sucha, kdy voda nevystupuje nad povrch ve větší hojnosti, či v rašeliništích s řidší hustotou vodních těles, může učinit měření neuskutečnitelným. Stejně tak po intenzivní srážkové události nebude hladina vodních těles ustálená s hladinou podzemní vody, vstřebávající přibylé množství vody. Na klasifikaci vodních bodů z ortofotosnímků může mít vliv kalnost vody, respektive její čistota. U mělkých tůňek by mohlo dojít k záměně za terén. Správné klasifikaci pomáhá také vodní vegetace, plovoucí na povrchu. Celkově jde o vhodný doplňující prvek pro analyzování mokřadů, ovšem za náhradu tradičních metod jej považovat nelze.

3. Diskuze a závěr

Z bezpilotních letounů se v posledních letech stal nenahraditelný nástroj průzkumu zemského povrchu. Vzhledem k mladému věku tohoto oboru nedošlo k ustálení metod průzkumu a zpracování dat a většina autorů používá své postupy a procesy. I napříč zkoumanými studii lze ovšem najít jistý posun. Příkladem budiž Turner D. et al. (2011), využívající SfM software Bundler, ovšem tento volně šiřitelný nástroj vyšel naposledy ve verzi 0.4, a to roku 2010 (Bundler, ©2018). Úspěšnějším projektem na poli open-source softwaru je MicMac, jehož cílem je nabídnout bezplatně kvalitní nástrojovou sadu pro tvorbu DTM (Rupnik E. et al., 2017). MicMac ve své studii používá např. Lisein J. et al. (2013). Široké použití naopak nalézá komerční software. Pix4D – například Eltner et al. (2015), větší oblibě se ovšem těší Agisoft PhotoScan: Kohv M. et al. (2017), Sankey T. et al. (2017) aj. Použití komerčního softwaru převládá pro jeho jednodušší využití výsledků v praxi, kdy konkrétně Pix4D nabízí komplexní řešení, kde na základě multispektrálních snímků může vhodně uzpůsobená zemědělská technika přímo pracovat s mapami upravujícími dávkování hnojiv v terénu (Pix4D, ©2018). Souhrnně řečeno, je to právě standardizace a zjednodušení postupů, co ovlivňuje široké nasazení a využití jakékoliv technologie (UAV nevyjímaje) nejen ve vědě, ale i v praxi.

Nejde však jen o vývoj softwaru. UAV i používané senzory se vývojem času také stávají všestrannější. Nárůst kapacity baterií spolu se zmenšováním snímacích

prvků zřejmě v budoucnosti nabídnou podstatně lepší časy výdrže stroje ve vzduchu, a tedy nárůst rozsahu potenciálního zájmového území. V tomto ohledu nejvíce strádají senzory LiDAR. Studie v této práci, týkající se průzkumu lesa, se často pohybují v příliš teoretické rovině na to, aby byly uvedeny do praxe. Představa, že někdo po 100metrových úsecích snímá a kategorizuje les s rozlohou v řádech jednotek nebo desítek hektarů, je poměrně tristní. Neznamena to ale, že by metoda byla naprosto nepoužitelná už v této podobě, viz. Wallace L. et al. (2012) ve své studii analyzuje pásmo stromů připravené k prořezání.

UAV vybavené kamerou, a to jak hyper/multispektrální, tak fotoaparátem, jsou podstatně praktičtější a více nasazovaným prostředkem sběru dat. Snad s výjimkou hustého lesního porostu a vodních ploch, kde má SfM software problémy s hledáním klíčových bodů, se ukazují jako všestranný pomocník. V kontextu digitálních fotoaparátů patří mezi jejich úskalí používání přístrojů primárně cílených pro běžné spotřebitele, jejichž objektivy nejsou vyvíjeny pro použití ve fotogrametrii, což má za následek optické zkreslení vytvořených fotografií. Z nich tvořené modely povrchu lze samozřejmě zpřesnit tvorbou většího množství GCP, ovšem to není vždy možné, a to buď z časových důvodů, anebo to zkrátka nedovoluje zkoumané prostředí. Z důvodů miniaturizace je do těchto kamer také ve většině případů montován senzor CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor). V kapitole o precizním vinařství je zmíněn jeho nedostatek v podobě degradace snímků vlivem vibrací letounu, tzv. Rolling Shutter Effect. U CCD (Charge-coupled device) snímačů se neobjevuje, jenže ty jsou pro svou větší prostorovou náročnost montovány do třídy fotoaparátů použitých v těchto výzkumech zcela sporadicky (Moyinham T., 2011). Mimo jednu studii (Primicerio J. et al., 2012), se ovšem stížnost na deformaci snímků vlivem Rolling Shutter efektu v rozsahu zpracované literatury neobjevuje. Částečně to může být následkem výstupu v bezztrátovém RAW formátu, který dovoluje v post-procesu pomocí vhodného softwaru u fotografií upravit nejen kontrast, expozici a další prvky ovlivňující vizuální kvalitu, ale také napravit chyby v geometrii způsobené optickými nedostatky objektivů.

Svůj podíl na použitelnosti bezpochyby hraje i použití stabilizátoru fotografických prvků na UAV. Pozitivní přínos v podobě snížení náklonů kamery při větrných poryvech, případně tlumení vibrací od motorů, s sebou nicméně nese nárůst vzletové hmotnosti, s čímž souvisí kratší výdrž letounu ve vzduchu. Neoddiskutovatelným faktem také je, že z konstrukčních důvodů je možné takové zařízení zavěsit jen pod drony; u letadla musí být absence stabilizátoru nahrazena větší frekvencí při sběru fotografií, s čímž souvisí potřeba vhodný fotografický materiál pro tvorbu DTM důkladněji selektovat.

Vyjma limitů na straně technického vybavení lze zmínit i externí vlivy na sběr dat. Prostředí, v němž měření probíhá, má nezanedbatelný vliv na kvalitu produkovaného výstupu. Vliv větru, slunečního světla nebo probíhající srážky mohou značně ovlivnit, jak bude vypadat výsledek. Sluneční světlo, pokud není rozptýleno vrstvou mraků, vrhá na povrch stíny, které nepříjemně ovlivňují tvorbu SfM modelů. Lovitt J. et al. (2017) problém řeší dvojitým snímáním – ráno a večer, kdy atmosféra do jisté míry světlo rozptyluje sama. Při vytváření DSM jsou následně využity oba soubory snímků. Jak zmiňuje Turner D. et al. (2010), o něco lépe na tom jsou poměrové indexy, využívající jako zdroj dat multispektrální kamery.

Způsob, jak zmírnit poryvy větru, je zmíněn v odstavci výše, srážky však studie neřeší. Autoři si tak pro své snímání vybírali dny s vhodnými atmosférickými podmínkami, to však může způsobit problém při nedostatku času. I změna území v čase může měření ovlivnit. Eltner A. et al. (2013) poukazuje na pohyb GCP důsledkem erozivních srážek, D'Oleire-Oltmanns et al. (2012) uvádí nutnost kontrolní body skrývat před destrukcí místním obyvatelstvem.

Při rešerši měl autor práce možnost seznámit se s velkým množstvím tematické literatury. Stojí za zmínku podotknout, že žádný z citovaných zdrojů není v českém jazyce. Angličtina dobře funguje jako „lingua franca“ a je respektovaným komunikačním prostředkem naskrz studovanou literaturou. Ve výběru témat přeci jen nebylo jedno k nalezení. Nasazení UAV ke sledování chmelnic je téma, které není diskutováno ani v angličtině, češtině, či němčině. To autorovi otevírá otevřený prostor pro zpracování takového tématu například formou diplomové práce.

Tato práce pojednává o využití UAV napříč zemědělskými obory. Jsou rozebrány a diskutovány studie zabývající se UAV ve spojitosti s precizním vinařstvím, lesnictvím, erozí a mokřady. V některých oborech se ukázala být použitelnost UAV silnější, jmenovitě jde o precizní vinařství, erozi a částečně nasazení v mokřadech, v lesnictví je praktičnost tohoto způsobu sběru dat stále limitovaná. Přínos práce leží v solidní rešerši zahraniční literatury, utvářející přehled o trendech v tomto odvětví. Obsah kapitol nepostrádá informace jak o způsobech měření, technickém vybavení, tak o výsledcích, jichž jednotliví autoři dosáhli.

Přehled literatury a použitých zdrojů

Aber J. S., Marzloff I., Ries J., 2010: Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications. Elsevier, Nizozemsko, 268 s.

Ambrosia V., Wegener S., Zajkowski T., Sullivan D., Buechel S., Enomoto F., Lobitz B., Johan S., Brass J., Hinkley E., 2010: The Ikhana unmanned airborne system (UAS) western states fire imaging missions: from concept to reality (2006–2010). *Geocarto International* 26: 85-101.

Baluja J., Diago M. P., Balda P., Zorer R., Meggio F., Morales F., Tardaguila J., 2012: Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Irrigation Science* 30: 511-522.

Bundler, ©2018: Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections (online) [cit. 2018.04.16], dostupné z <http://www.cs.cornell.edu/~snaveily/bundler/>.

Dashora A., Lohani B., Malik J. N., 2007: A repository of earth resource information–CORONA satellite programme. *Current Science* 92: 926-932.

D'Oleire-Oltmanns S., Marzloff I., Peter K. D., Ries J. B., 2012: Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing* 4: 3390-3416.

Eltner A., Baumgart P., Maas H. G., Faust D., 2015: Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms* 40: 741-755.

Eltner A., Mulsow C., Maas H. G., 2013: Quantitative measurement of soil erosion from TLS and UAV data. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 1: 119-124.

González-Dugo V., Zarco-Tejada P., Nicolás E., Nortes P.A., Alarcón J. J., Intrigliolo D. S., Fereres E., 2013: Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture* 14: 660–678.

Hinkley E., Zajkowski T., 2011: USDA forest service–NASA: unmanned aerial systems demonstrations – pushing the leading edge in fire mapping. *Geocarto International* 26: 103-111.

IPCC, ©2018: Wetlands Management (online) [cit. 2018.03.15], dostupné z https://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=196.

Javernick L., Brasington J., Caruso B., 2014: Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213: 166-182.

Kettridge N., Turetsky M. R., Sherwood J. H., Thompson D. K., Miller C. A., Benscoter B. W., Flannigan M. D., Wotton B. M., Waddington J. M., 2015: Moderate drop in water table increases peatland vulnerability to post-fire regime shift (online) [cit. 2018.04.15], dostupné z <https://www.nature.com/articles/srep08063>.

Liang C. K., Chang L. W., Chen H. H., 2008: Analysis and compensation of rolling shutter effect. *IEEE Transactions on Image Processing* 17: 1323-1330.

Lin Y., Hyyppä J., Jaakkola A., 2011: Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 8: 426-430.

Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P., 2013: A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests* 4: 922-944.

Lovitt J., Rahman M. M., McDermid G. J., 2017: Assessing the Value of UAV Photogrammetry for Characterizing Terrain in Complex Peatlands. *Remote Sensing* 9: 715.

Lovitt J., Rahman, M. M., Saraswati S., McDermid G. J., Strack M., Xu B., 2018: UAV Remote Sensing Can Reveal the Effects of Low-Impact Seismic Lines on Surface Morphology, Hydrology, and Methane (CH₄) Release in a Boreal Treed Bog. (online) [cit. 2018.04.04], dostupné z <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JG004232>.

MAVinci, ©2018: The workflow – 6 steps to completion (online) [cit. 2018.03.14], dostupné z <http://www.mavinci.de/useful-information/mission-sequence/>.

Merino L., Caballero F., Martínez-de-Dios R., Maza I., Ollero A., 2011: An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 65: 533–548.

Moyinham T., 2011: CMOS Is Winning the Camera Sensor Battle, and Here's Why (online) [cit. 2018.04.15], dostupné z <https://www.techhive.com/article/246931/security-cameras/cmos-is-winning-the-camera-sensor-battle-and-heres-why.html>.

Ortega-Farías S., Ortega-Salazar S., Poblete T., Kilic A., Allen R., Poblete-Echeverría C., Ahumada-Orellana L., Zuñiga M., Sepúlveda D., 2016: Estimation of Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Olive Orchard Using Thermal and Multispectral Cameras Placed on a Helicopter-Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing* 8: 638.

Park, S., Nolan, A., Ryu, D., Fuentes, S., Hernandez, E., Chung, H., O'connell, M., 2015: Estimation of crop water stress in a nectarine orchard using high-resolution imagery from unmanned aerial vehicle (UAV) (online) [cit. 2018.04.04], dostupné z https://www.researchgate.net/profile/Mark_Oconnell/publication/286780667_Estimation_of_crop_water_stress_in_a_nectarine_orchard_using_high-resolution_imagery_from_unmanned_aerial_vehicle_UAV/links/566e1c5908ae430ab50020e2.pdf.

Pix4D, ©2018: Agriculture – Pix4D (online) [cit. 2018.04.15], dostupné z <https://pix4d.com/industry/agriculture>.

Primicerio J., Di Gennaro S. F., Fiorillo E., Genesio L., Lugato E., Matese A., Vaccari F. P., 2012: A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture* 13: 517-523.

Reeve A. S., Siegel D. I., Glaser P. H., 2000: Simulating vertical flow in large peatlands. *Journal of Hydrology* 227: 207-217.

Rupnik E., Daakir M., Deseilligny M. P., 2017: MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 2: 14.

Sankey T., Donager J., McVay J., Sankey J. B., 2017: UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. *Remote Sensing of Environment* 195: 30-43.

Tagma T., Hsissou Y., Bouchaou L., Bouragba L., Boutaleb S., 2009: Groundwater nitrate pollution in Souss-Massa basin (south-west Morocco). *African journal of environmental science and technology* 3: 301-309.

Tetracam, ©2017: Tetracam Mini-MCA (online) [cit. 2017.03.14], dostupné z <http://www.tetracam.com/Products-Mini_MCA.htm>.

Turner D., Lucieer A., Watson C., 2011: Development of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery (online) [cit. 2017.04.06], dostupné z <<https://pdfs.semanticscholar.org/e783/bb830fc89c832cbbbbdc037acc9fcf16155d.pdf>>.

Univerzita Karlova, ©2017: Vodní režim rostlin (online) [cit. 2017.03.14], dostupné z <<http://kfrserver.natur.cuni.cz/studium/prednasky/VP/vodapruduchy1w.pdf>>.

Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M., 2012: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314.

Wallace L. O., Lucieer A., Watson C. S., 2012: Assessing the feasibility of UAV-based LiDAR for high resolution forest change detection (online) [cit. 2018.04.06], dostupné z <<http://www.academia.edu/download/30717793/isprsarchives-XXXIX-B7-499-2012.pdf>>.