

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Študijný program: Geografie

Študijný odbor: Fyzická geografie a geoinformatika



Michal Lörinc

UAV fotogrametria ako nástroj pre hodnotenie fluviálne morfológických zmien vodných tokov

Bakalárska práca

Vedúci práce: doc. RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Praha, 2015

Zadanie bakalárskej práce

Téma práce: UAV fotogrametria ako nástroj pre mapovanie fluvialne morfológických zmien vodných tokov

Anotácia: Bakalárska práca je zameraná na analýzu potenciálu UAV fotogrametrie pre hodnotenie zmien koryt vodných tokov. V rámci práce bude spracovaná rešerš metód UAV fotogrametrie a prístupov, vhodných pre analýzu fluvialne morfológických procesov a zmien v koryte toku a pobrežnej zóne. Teoretické východiská budú aplikované na vybraný príklad toku, kde budú vyhodnotené zmeny koryta.

Jazyk práce: slovenčina

Akademický rok: 2014/2015

Dátum zadania: 3.12.2014

Riešiteľ práce: Michal Lörinc

Podpis riešiteľa:

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Podpis vedúceho práce:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 26.6.2015

.....
Michal Lörinc

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som chcel pod'akovať vedúcemu práce, doc. RNDr. Jakubovi Langhammerovi, Ph.D., za venovaný čas, odborné vedenie a tiež za dáta poskytnuté pre praktickú časť práce. Za časť dát a tiež možnosť zúčastniť sa mapovania v teréne sa chcem pod'akovať RNDr. Jakubovi Miřijovskému, Ph.D. V neposlednom rade ďakujem aj svojej rodine za podporu počas celého štúdia.

Abstrakt

Táto práca je zameraná na technológiu, ktorá je pomerne nová a tiež populárna v geovedných aplikáciách, vrátane výskumu fluvialnej dynamiky. Bezpilotné letecké zariadenia (UAV) sa vo viacerých geografických subdisciplínach presadili vďaka svojim vlastnostiam a výhodám, ktoré má UAV snímkovanie oproti ostatným metódam diaľkového prieskumu. Tieto výhody, no aj limitácie sú spolu so všeobecnou charakteristikou UAV sumarizované v druhej kapitole práce. Ďalšie teoretické kapitoly sa zaoberajú základmi UAV fotogrametrie a osobitne potenciálom UAV snímkovania vo fluvialnej geomorfológii. Piata kapitola obsahuje prípadovú štúdiu, v ktorej je zhodnotený potenciál využitia bezpilotného zariadenia vybaveného nemeračskou kamerou na rekonštrukciu riečneho prostredia. Snímky Javořího potoka tak boli spracované v programoch Agisoft PhotoScan a ArcGIS a na výstupoch boli indikované geomorfologické zmeny, ktoré sa na koryte toku udiali počas piatich mesiacov od novembra 2014 do apríla 2015.

Kľúčové slová: UAV; fotogrametria; fluvialna geomorfológia; hydrológia; koryto

Abstract

This thesis is focused on a use of a technology that is relatively new and popular in geoscience applications, including the fluvial dynamics research. Unmanned aerial vehicles are becoming widely used in numerous geographical subdisciplines due to their capabilities and advantages of UAV imaging in comparison with other remote sensing techniques. These advantages and also limitations together with general characterization of UAVs are summarized in the second chapter of the thesis. The following theoretical chapters deal with basics of UAV photogrammetry and also evaluate the potential of UAV imaging in fluvial geomorphology. The fifth chapter of the thesis comprises a case study that evaluates the use of an UAV equipped with a non-metric camera for fluvial environment reconstruction. Images of Javoří potok have been processed in Agisoft PhotoScan and ArcGIS to indicate geomorphological changes of the stream channel that happened during a 5 month period from November 2014 to April 2015.

Keywords: UAV; photogrammetry; fluvial geomorphology; hydrology; channel

Zoznam použitých skratiek

ATZ	aerodrome traffic zone = letisková prevádzková zóna
EXIF	Exchangeable image file format
ft	foot = stopa
GCP	ground control point = pozemný kontrolný bod
GNSS	Global Navigation Satellite System = globálny navigačný satelitný systém
GPS	Global Positioning System
MTOW	maximum takeoff weight = maximálna vzletová hmotnosť
LiDAR	Light Detection and Ranging
Mpx	megapixel
RC model	radio controlled model = rádiom ovládaný model
RMSE	Root Mean Square Error = stredná kvadratická chyba
RPAS	remotely piloted aircraft system = diaľkovo ovládaný letecký systém
RTK	Real time kinematic
SfM	Structure from Motion
UAV	Unmanned aerial vehicle = bezpilotné letecké zariadenie
UAS	Unmanned aerial system = bezpilotný letecký systém
ÚCL	Úřad civilního letectví
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
WGS 84	World geodetic system 1984 = Svetový geodetický systém 1984

OBSAH

1 ÚVOD	8
2 BEZPILOTNÉ LETECKÉ ZARIADENIA	9
2.1 Terminológia	9
2.2 Historický vývoj	9
2.3 UAV platformy	10
2.3.1 Bezmotorové UAV	12
2.3.2 Paraglidy	14
2.3.3 UAV s pevným krídlom	14
2.3.4 Helikoptéry.....	15
2.3.5 Multirotorové helikoptéry.....	16
2.4 Prínosy a limitácie UAV	17
2.4.1 Prínosy	17
2.4.2 Limitácie	18
2.5 UAV a legislatíva	19
3 UAV FOTOGAMETRIA	22
3.1 Základy fotogrametrie	22
3.1.1 Rozdelenie fotogrametrie	22
3.1.2 Geometria snímkovania	23
3.1.3 Prvky vnútornej a vonkajšej orientácie.....	24
3.2 Spracovanie snímok z UAV fotogrametrie	25
3.2.1 Stereofotogrametrická metóda.....	25
3.2.2 Structure from motion.....	26
4 UAV VO FLUVIÁLNEJ GEOMORFOLÓGII	28
4.1 Využitie distančných dát vo fluviálnej geomorfológii.....	28
4.1.1 Nové technologické postupy	28
4.2.1 Porovnanie UAV so satelitným a leteckým snímkaním.....	28
4.2 Produkty UAV fotogrametrie	26
4.2.1 Ortofotosnímka, digitálny model terénu	29
4.2.2 Model batymetrie koryta	30
4.3 Mapovanie morfológických zmien pomocou UAV.....	33
4.3.1 Zmeny pôdorysu koryta.....	34
4.3.2 Erózne tvary.....	34
4.3.3 Akumulačné tvary.....	35

5 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA	36
5.1 Metodika práce	36
5.1.1 Zdroj dát	36
5.1.2 Spracovanie dát	37
5.2 Výsledky	40
5.3 Diskusia	44
6 ZÁVER	47
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	48
ZOZNAM PRÍLOH	51

1 ÚVOD

Človek sa prakticky už od vynálezu fotografie snažil zachytávať zemský povrch z vtáčej perspektívy. Táto snaha sa preniesla aj do geografie a príbuzných vedných odborov, pretože pohľad na krajinu z výšky priniesol nové možnosti jej skúmania. Postupne sa technológia leteckej fotogrametrie zdokonaľovala a cenným zdrojom informácií o Zemi sa stali aj družicové snímky. Pritom sa nikdy neupustilo od terénnych meraní, ktoré boli vždy najpresnejšie vďaka blízkosti pozorovaného objektu. V posledných rokoch sme mohli byť svedkami ďalšieho technologického pokroku, pretože sa vo väčšej miere začali vo výskume krajinej sféry používať bezpilotné letecké zariadenia, tzv. UAV z anglického *unmanned aerial vehicles*. V širokej verejnosti sú známe skôr ako *drony*, pričom toto označenie bolo až donedávna typické hlavne pre UAV využívané na vojenské účely. Dnes už sú však drony rozšírené vo viacerých oblastiach a sú využívané aj bežnými ľuďmi na rekreačné, resp. športové účely.

V geografických disciplínach nachádza využitie UAV fotogrametria, ktorá kombinuje viaceré výhody doposiaľ používaných metód diaľkového prieskumu s blízkosťou skúmaného objektu, má však samozrejme aj svoje limitácie. Jej využitie vo fluvialnej geomorfológii dokumentovalo viacero domácich, no hlavne zahraničných štúdií, ktoré budú v ďalších kapitolách predstavené.

Jedným z cieľov tejto práce bude komplexne predstaviť bezpilotné letecké zariadenia, ich vlastnosti a príklady použitia, pričom osobitne sa bude práca venovať aj základom fotogrametrie s dôrazom na aplikáciu UAV v tomto odbore. Ďalej budú predstavené teoretické východiská využitia UAV fotogrametrie na mapovanie riečneho koryta a pobrežnej zóny a osobitne na analýzu fluvialne morfológických zmien. Cieľom praktickej časti práce bude osvojiť si prácu so softvérom určeným na spracovanie snímok z UAV metódou Structure from motion a tiež dokázať potenciál využitia malého bezpilotného modelu s nemeračskou kamerou vo fluvialnej geomorfológii. Výstupom bude identifikácia morfológických zmien na koryte vybraného vodného toku.

2 BEZPILOTNÉ LETECKÉ ZARIADENIA

2.1 Terminológia

V súčasnosti sa pre bezpilotné letecké prostriedky používa viacero označení. V zahraničnej literatúre je najčastejšie používanou skratka UAV – *Unmanned aerial vehicle* a na ňu nadväzujúce pojmy, napr. UAV fotogrammetria. Používa sa však aj skratka UAS, teda *Unmanned aircraft system*. Toto označenie, ktoré sa dá preložiť ako bezpilotný letecký systém, zahŕňa nielen samotné letecké zariadenie - *unmanned aircraft* s jeho užitočným nákladom, ale aj tzv. pozemnú kontrolnú stanicu – *ground control station* (Eisenbeiss, 2009). Colomina a Molina (2014) ako tretiu súčasť systému uvádzajú *communication data link*, teda zložku, ktorá zabezpečuje komunikáciu medzi zariadením a stanicou. Medzinárodnou organizáciou pre civilné letectvo (ICAO, 2011) bolo ďalej zavedené označenie RPAS – *remotely piloted aircraft system*, teda diaľkovo ovládaný letecký systém, ako časť bezpilotných systémov, ktoré sú priamo pod kontrolou pilota z určitej vzdialenosti. Tým sa odlišujú od ostatných zariadení, ktoré sú plne autonómne a pohybujú sa podľa vopred naprogramovaných inštrukcií. Skratka RPAS je používaná aj Európskou komisiou v oficiálnych dokumentoch, venujúcich sa stratégii rozvoja technológie a pripravovanému legislatívnemu rámcu, ktorý má za cieľ integrovať diaľkovo ovládané letecké systémy do civilného vzdušného priestoru (Európska komisia, 2014). Ďalším výrazom pre bezpilotné zariadenia, používaným bežne aj v zahraničných i domácich médiách je *dron*.

2.2 Historický vývoj

Zachytávanie snímok z vtáčej perspektívy sa stalo cieľom nadšencov prakticky už od vynálezu fotografie, pričom prvou snímkou zachytenou zo vzduchu bola fotografia Paríža z pilotovaného balónu v roku 1858 (Miřijovský, 2013). Neskôr sa pre fotografovanie z výšky začali používať i nepilotované platformy, najmä šarkany a balóny, no využité boli dokonca i holuby. Prvé fotografie zachytené kamerou pripevnenou na šarkanovi vznikli ešte počas 19. storočia, pričom na spustenie uzávierky kamery sa používali malé výbušniny (Aber, et al., 2010). Pre fotogrametrické účely bolo malé nepilotované lietadlo po prvýkrát použité až v roku 1979, modelová helikoptéra v roku 1980 (Eisenbeiss, 2009).

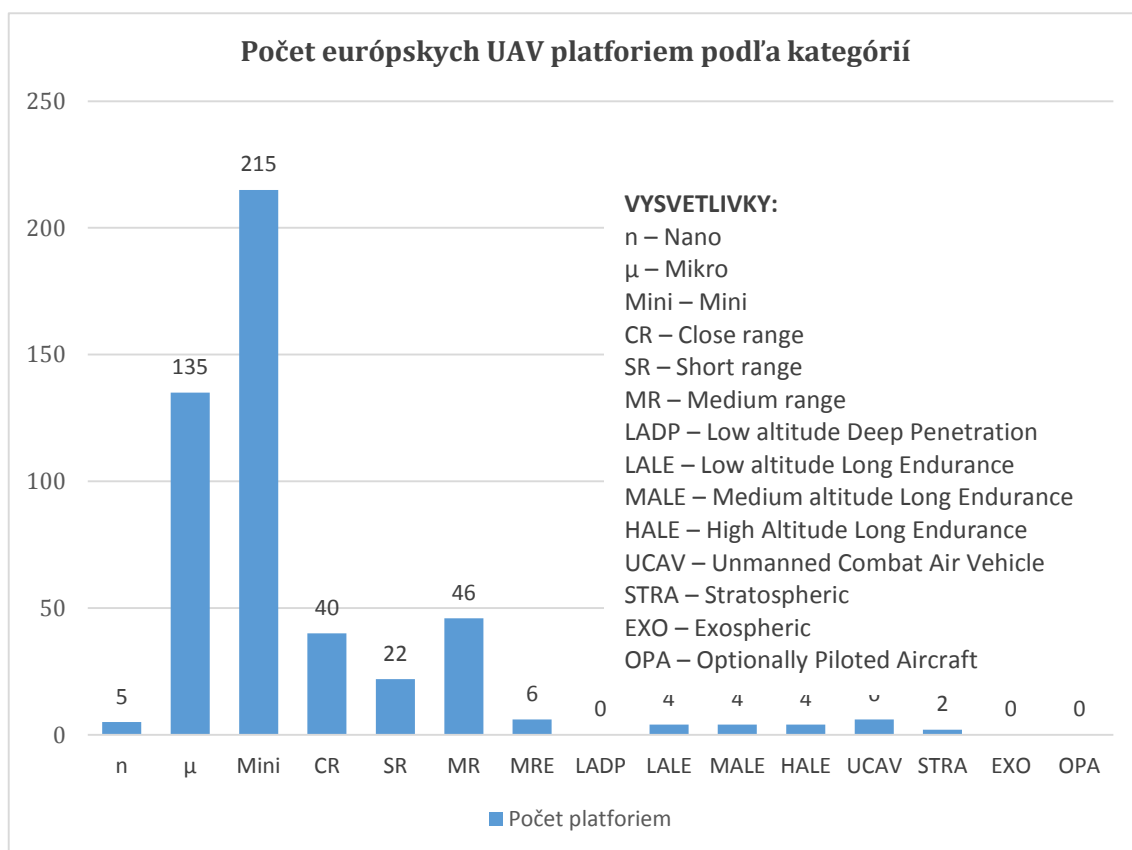
Bezpilotné prostriedky sa v minulosti presadzovali hlavne vo vojenskej oblasti, kde boli využívané predovšetkým na prieskum nepriateľského územia. Významným impulzom pre rozvoj bezpilotných platforiem, kamier či objektívov bola druhá svetová vojna, kde mala letecká fotografia svoje nezastupiteľné miesto v stratégii všetkých bojujúcich strán. Dnes sú

drony vo výzbroji viacerých armád veľmi dôležitým prvkom, dokonca sa celé vojenské operácie vedú len na úrovni nepilotovaných strojov, aby sa čo najviac zabránilo stratám na ľudských životoch.

Použitie bezpilotných platforiem ako prostriedkov pre vedecké účely sa začalo presadzovať až v sedemdesiatych rokoch minulého storočia. Ako Colomina a Molina (2014) ďalej uvádzajú, idea využitia UAV na vytváranie snímok s vysokým rozlíšením si spočiatku vo vedeckej komunite nenašla veľa priaznivcov, čo naznačuje veľmi nízky počet publikácií či konferencií k tejto téme. Počet článkov, týkajúcich sa využitia UAV technológie vo fyzickej geografii, publikovaných po roku 1990, vo svojej bakalárskej práci sumarizovala Křížová (2014). Podľa jej výsledkov, počet publikovaných článkov dosahuje dvojciferné hodnoty len posledných desať rokov, predtým sa objavovali veľmi sporadicky. Nárast počtu vedeckých článkov v rôznych disciplínach, vrátane fluvialnej geomorfológie (Lejot, et al., 2007; Marcus, Fonstad, 2008; Flener, et al., 2013 atď.) súvisí s nevídaným rozšírením samotných bezpilotných zariadení, ktoré sa v posledných rokoch dostávajú do mnohých oblastí ľudskej činnosti. Ako uvádza Miřijovský (2013), podstatným faktorom pre rozvoj UAV bol v uplynulých rokoch vývoj inerciálnych meracích jednotiek - IMU (*inertial measurment unit*) a pokročilých GPS systémov.

2.3 UAV platformy

V súvislosti s ich prudkým rozvojom sa na trhu objavilo veľké množstvo rôznych UAV platforiem, ktoré sa od seba líšia v rôznych charakteristikách, či už ide o veľkosť, hmotnosť, nosnosť, dolet, typ pohonu, maximálnu letovú výšku, alebo typ aplikácie, na ktoré sú určené. Colomina a Molina (2014) upozorňujú na veľké množstvo rôznych kategorizácií UAV platforiem, ktoré berú do úvahy jednotlivé spomenuté charakteristiky alebo ich kombinácie. Mnohé výskumné články, ktoré sa samotnej technológii UAV venujú len okrajovo v rámci úvodu do konkrétnej aplikácie, si dokonca vytvárajú pre zjednodušenie vlastné rozdelenia platforiem, čo môže čitateľa ešte viac zmiasť. Vyčerpávajúci zoznam všetkých aktuálne vyrábaných UAV platforiem spolu s ich špecifikáciou je možné nájsť v publikácii **RPAS Yearbook** (van Blyenburgh, 2014), vydávanej každoročne. Obsahuje však všetky typy UAV, vrátane tých, ktoré sú určené napr. na vojenské účely. Jednotlivé produkty sú tu rozdelené do štrnástich kategórií (viď graf č.1) zostavených podľa viacerých kritérií. Colomina a Molina (2014) dopĺňajú, že tieto kategórie sa dajú zúžiť na 3 väčšie skupiny: *nano-micro-mini*; *close-short-medium range* a skupinu ostatných zariadení s väčším doletom schopnosťou letieť vo väčších výškach. Práve do prvej z týchto skupín spadá najväčší počet aktuálne vyrábaných platforiem.



Graf č. 1: Počet UAV platforiem aktuálne vyrábaných v Európe podľa kategórií, uvedených v RPAS Yearbook. Zdroj: van Blyenburgh, (2014)

Eisenbeiss (2009) ponúka často citovanú kategorizáciu UAV platforiem používaných na fotogrametrické účely na základe ich konštrukcie, toho, či sú poháňané motorom a toho, či sú ľahšie, resp. ťažšie ako vzduch (vid' tabuľka č. 2).

Tab. č. 1: Klasifikácia UAV platforiem (Eisenbeiss, 2009 in Miřijovský, 2011; upravené)

	Ľahšie ako vzduch	Ťažšie ako vzduch		
		Nepevné krídlo	Pevné krídlo	Rotujúce krídlo
Bezmotorové	Balón Vzducholod'	Rogalo Paraglidge Šarkan	Klzák	-
Motorové	Vzducholod'	Paraglidge	Vrtuľové lietadlo Prúdové lietadlo	Jednorotorové Multirotorové

Colomina a Molina (2014) uvádzajú, že v súčasnosti sa vo fotogrametrii a diaľkovom prieskume používajú najčastejšie 3 základné konštrukčné typy UAV, pričom všetky z nich patria do kategórie motorom poháňaných modelov:

- lietadlá s pevným krídlom - *fixed-wing aircraft*
- jednorotorové helikoptéry - *rotary-wing aircraft*
- multirotorové helikoptéry - *multi-rotor aircraft*

2.3.1 Bezmotorové UAV

Vďaka absencii zložitých technologických prvkov v konštrukciách vzducholodí, balónov, šarkanov či padákových krídel stáli tieto bezmotorové platformy pri samotných začiatkoch UAV fotografie a po desaťročia boli prevládajúcim typom, pričom svoje využitie nachádzajú i dnes. Niektoré typy bezmotorových UAV platform sú s používateľom spojené pomocou lana – jedná sa o balóny a šarkany, prípadne vzducholode. Tým pádom je obmedzená ich letová výška a vzdialenosť od miesta upevnenia na zemi, čo značne limituje rozsah územia, ktorý sú schopné jednorazovo nasnímať. Snímacie zariadenie je spravidla umiestnené na závesnom systéme pod samotným zariadením.

Vzducholode a balóny sú platformy, ktoré sú ľahšie ako vzduch, čo je možné dosiahnuť ich naplnením teplým vzduchom alebo héliom. Ich najväčšou limitáciou je zlá manévrovateľnosť za nepriaznivého počasia (Řehák, 2012). Pohybujú sa veľmi pomaly a dokážu na dlhšiu dobu zostať na jednom mieste, čo môže byť výhodou pri potrebe snímať fotografie s dlhším expozičným časom. Taktiež kvôli absencii motoru nie sú vystavené vibráciám, ktoré by mohli fotografie rozostriť. Aber, et al. (2010) ako nevýhodu balónov guľového tvaru uvádzajú aj ich veľkú náchylnosť k nekontrolovateľnej rotácii už pri slabom vetre, naopak vzducholode sa vďaka svojmu aerodynamickému tvaru dokážu podľa smeru vetra vyrovnávať. Autori túto vlastnosť považujú za hlavný dôvod, prečo balóny ako fotogrametrické nosiče už takmer upadli do zabudnutia aj napriek tomu, že vôbec prvá letecká fotografia bola zachytená práve z balónu. Stále sú však bežne využívané napr. v meteorológii ako aerologické sondy. Vzducholode sú ako platformy stále používané (Aber, et al., 2010), tiež sú využívané ako reklamné pútače alebo ako nosiče pre kamery pri rôznych televíznych prenosoch. Výrobná cena týchto modelov nemusí byť vysoká, no náklady stúpnu pri použití hélia, ktoré je pomerne drahé. Prechodným typom medzi balónom a vzducholodou je tzv. **nevystužená vzducholod'**, v angličtine *blimp*, ktorej chýba vnútorná výstužná konštrukcia a svoj tvar udržiava vďaka pretlaku nosného plynu vnútri obalu. Kombinuje tak konštrukčnú jednoduchosť balónu a stabilizačné prvky vzducholode.

Tento typ nepilotovaného prostriedku viackrát použili Marolff a Ries na monitoring stržovej erózie vo východnom Španielsku (2007) alebo v severnej Afrike (Ries a Marzolff, 2003).



Obr. č. 1: Príklady nevystužených vzducholodí plnených héliom (vľavo) a teplým vzduchom (vpravo) použitých na fotogrametrické účely. Kamera je umiestnená na závesnom zariadení. Zdroj: Aber [online].

Šarkany (angl. *kite*) sú špecifickým modelom, pretože na svoju prevádzku potrebujú vietor, ktorý je pri väčšine ostatných modelov nežiaduci. Aber et al. (2010) uvádzajú, že sú veľmi ľahko prenosné, relatívne bezpečné a tiež najlacnejšie spomedzi platforiem pre maloformátovú fotogrametriu. Autori podrobne popisujú ich používanie a uvádzajú termín *Kite aerial photography* ako samostatné odvetvie leteckej fotografie, ktoré často nachádza využitie v geovedách. Vhodnosť použitia šarkanov na zber dát s vysokým rozlíšením dokazujú viaceré štúdie, napr. Smith, et al. (2009), kde autori mapovali rôzne typy terénu vrátane glaciofluviálnych akumulácií v Škótsku.



Obr. č. 2: Príklad šarkana (vľavo) a detail závesného systému (vpravo). Zdroj: Smith et al. (2009).

2.3.2 Paraglide

Ďalším často používaným UAV nosičom v geovedách je paraglide. Jeho základom je paraglidové (padákové) krídlo a gondola obsahujúca motor, ovládaciu jednotku a snímkovacie zariadenie (Řehák, 2012). Nevýhodou je podľa autora potreba dlhšej štartovacej dráhy a tiež horšia manévrovateľnosť. Príkladom využitia paraglidu je snímkovanie povodia rieky Drôme v juhozápadnom Francúzsku, kde Hervouet et al. (2011) použili paraglidový model Pixy drone. Výskum bol zameraný na rozširovanie vegetácie na akumuláciách sedimentov v koryte divočiacej rieky po povodňových udalostiach. Ten istý model využili aj Lejot, et al. (2007) pri mapovaní morfológie a hĺbky koryta vodného toku. Pixy drone je poháňaný ľahkým motorom a dokáže sa pohybovať rýchlosťou v rozmedzí 15–25 km.h⁻¹ vo výškach 50 až 500 m. Podrobnú charakteristiku tohto modelu spolu s praktickými príkladmi použitia v geovedách predstavili Miřijovský, et al. (2012). Okrem iného je možné do gondoly zariadenia umiestniť viacero senzorov súčasne vďaka maximálnej nosnosti až 6 kg. Pixy sa tiež vyznačuje jednoduchou pilotážou a transportom i vysokou odolnosťou celého zariadenia.



Obr. č. 3: Paraglidový model Pixy používaný na Univerzite Palackého v Olomouci. Zdroj: UPOL [online].

2.3.3 UAV s pevným krídlom

Bezpilotné lietadlá s pevným krídlom sú vo fotogrametrii veľmi často používaným konštrukčným typom, pričom Řehák (2012) dodáva, že i v rámci tejto kategórie je možné vyčleniť viaceré typy, od klasických lietadiel, cez dvojplášniky až po tzv. delta krídla, označované aj ako samokrídla. Množstvo z týchto zariadení bolo vyvinutých z RC modelov používaných leteckými modelármi. Eisenbeiss (2009) uvádza viaceré výhody lietadlových modelov UAV. Podľa neho dokážu dlhšie zostať vo vzduchu v porovnaní napr. s helikoptérmi a dokážu tak zmapovať väčšie územia. Miřijovský (2013) udáva nevýhody použitia lietadla: vysoká rýchlosť letu znemožňujúca dlhšiu expozíciu a tiež obťažnosť umiestnenia kamery s ohľadom na konštrukciu lietadla tak, aby nedošlo k jej poškodeniu

pri vzlete alebo pristátí. Z tohto dôvodu sú kamery už často zabudované výrobcom v dolnej časti UAV a nie je možné ich meniť.

Príkladom použitia UAV modelu s pevným krídlom je monitorovanie stržovej erózie v západnom Maroku (d'Oleire-Oltmanns, 2012). Autori využili model Sirius I od nemeckej firmy MaVinci s dĺžkou 120 cm a rozpätím krídel 163 cm (na obrázku č. 4). Lietadlo vydrží vo vzduchu len cca 50 minút, no dokáže letieť pomerne veľkou rýchlosťou, 45 až 85 km.h⁻¹ a preto dokáže zmapovať veľké územie. V dolnej časti lietadla je výrobcom integrovaný fotoaparát s rozlíšením 12 Mpx.



Obr. č. 4: UAV modely s pevným krídlom. Vľavo model Sirius I. (Zdroj: MaVinci SIRIUS UAS [online]), vpravo model eBee (Zdroj: Tamminga, et al. (2015b))

2.3.4 Helikoptéry

Klasické helikoptéry sa vyznačujú hlavným nosným rotorom, ktorý zabezpečuje vztlak a ťah, a menším vyrovnávacím rotorom, spravidla umiestneným v zadnej časti stroja, ktorý slúži na vyrovnávanie krútiaceho momentu (Eisenbeiss, 2009). Medzi hlavné výhody helikoptér sa zaraďuje schopnosť vertikálneho vzletu a pristátia a taktiež schopnosť stáť na mieste počas letu. To je možné využiť napr. na dlhšie expozičné časy pri snímaní. Rovnaký autor tiež uvádza, že výhodou UAV s rotujúcim krídlom je ich schopnosť dostať sa bližšie k objektu v porovnaní s lietadlom. Miřijovský (2009) však poukazuje i na nevýhody vrtuľníkových modelov UAV, a to predovšetkým ich pomerne obťažné ovládanie, ktoré si vyžaduje dlhú prax, a tiež vyššiu cenu v porovnaní s ostatnými modelmi.

Príkladom použitia helikoptér je fínska štúdia (Flener, et al., 2013), v ktorej autori vytvorili bezšvíkový model riečného koryta a nivy pre krátky úsek rieky Pulmanki vo fínskom Laponsku. Dáta boli získané kombináciou pozemného laserového skenovania a leteckej fotogrametrie s využitím helikoptér Minicopter Maxi-Joker 3DD, resp. Align T-Rex 700E, na ktorých boli upevnené digitálne zrkadlovky. Modely tohto typu sa radia medzi drahšie modely UAV a vzhľadom na množstvo ďalších použitých metód, napr. mobilného

skeneru, bol tento konkrétny výskum finančne náročný. Vyššie náklady však vyvažuje veľmi vysoká presnosť získaných výstupov, ktoré autori uvádzajú vo výsledkoch výskumu. Na vhodnosť využitia helikoptér pre mapovanie riečnej nivy a pobrežnej vegetácie ukázali aj Nagai, et al. (2013), použitý bol japonský model RPH 2 (viď obr. č. 4).



Obr. č. 5: Bezpilotná helikoptéra RPH2 a detail užitočného nákladu. Zdroj: Nagai, et al., (2013).

2.3.5 Multirotorové helikoptéry

Ako multirotorové helikoptéry, resp. multikoptéry sa označujú modely s rotujúcimi krídlami, ktoré majú viacero nosných rotorov. Najčastejšie ide o počet 4, 6 alebo 8, podľa toho sa tieto modely nazývajú kvadro-, hexa-, resp. oktokoptéry. Podstatou ich pohybu a ovládania je zmena otáčok jednotlivých motorov (Řehák, 2012). Vyznačujú sa veľkou manévrovateľnosťou, no sú ľahko ovplyvniteľné nepriaznivým počasím (Eisenbeiss, 2009).

Tamminga, et al. (2015) využili malú kvadrokoptéru s názvom Aeryon Scout pri charakterizovaní morfológie koryta rieky Elbow v Kanade. Medzi hlavné výhody jej použitia zaradili nízku cenu, vysokú operabilitu a efektívnosť použitia. Jej vlastnosti dovolili naprogramovať dráhu letu pozdĺž vodného toku a pri letovej rýchlosti 5 m.s⁻¹ tak efektívne zmapovať záujmové územie.



Obr. č. 6: Príklad hexakopteru od nemeckej spoločnosti MikroKopter. (vlastná tvorba)

2.4 Prínosy a limitácie UAV

2.4.1 Prínosy

Bezpilotné prostriedky sa stali veľmi vhodnou platformou pre získavanie geodát na menších územiach, pričom ich vývoj dovolil snímkovať krajinu pomocou rôznych typov senzorov. Ich výhodou v porovnaní s inými distančnými metódami – družicovým a leteckým snímkovaním je ich relatívne **nízka cena**, pričom ide nielen o nízke vstupné, ale aj prevádzkové náklady. Úspora času, práce a kontinuálnosť dát sú zase argumentmi v prospech UAV pri porovnaní s tradičnými metódami získavania dát o polohe a výškopise pomocou prostriedkov technickej geodézie. Pomerne nízka finančná náročnosť používania bezpilotných prostriedkov dovoľuje viacnásobné snímkovanie i viackrát do roka a umožňuje tak analyzovať temporálne zmeny skúmaného javu. UAV sú často využívané aj preto, že ich nasadenie je veľmi operatívne. Používateľ si sám môže vybrať miesto, čas či frekvenciu snímania, nastaviť expozičné parametre kamery ako clona, čas uzávierky, taktiež ohniskovú vzdialenosť objektívu a pod., pričom do úvahy môže brať aktuálne poveternostné podmienky. Tiež môže pomocou špeciálneho softvéru nastaviť parametre samotného letu, ako je predovšetkým jeho trasa alebo letová výška, ktorá potom zásadne ovplyvňuje rozlíšenie výsledných dát. Eisenbeiss (2009) ďalej uvádza ďalšiu vlastnosť niektorých bezpilotných prostriedkov – *real time capability*, čo znamená okamžitý prenos snímok, resp. videa alebo dát o orientácii do pozemnej kontrolnej stanice.

Významným benefitom UAV oproti leteckému alebo družicovému snímkovaniu je vyššia **rozlišovacia schopnosť**. Tá súvisí s nižšou letovou výškou, ktorá spravidla dosahuje niekoľko desiatok až stoviek metrov nad povrchom terénu. Maximálna letová výška závisí od konkrétneho modelu zariadenia a taktiež môže byť obmedzená legislatívne. V mnohých štúdiách zameraných na využitie UAV v hydromorfológii autori prezentujú výsledné dáta s horizontálnym rozlíšením rádovo v jednotkách centimetrov (Marcus, Fonstad, 2008; Flener, et al., 2013). Je však vhodné poukázať aj na to, že vyššia rozlišovacia schopnosť v tomto prípade nie vždy znamená aj vyššiu presnosť. To súvisí predovšetkým s používaním nemeračských kamier, niekedy aj jednoduchých kompaktných fotoaparátov. Dôležité sú potom okrem samotného snímania ďalšie práce v teréne a postprocessing v počítači tak, aby sa dosiahli čo najpresnejšie výsledky. Podľa Miřijovského (2015) výslednú presnosť najviac ovplyvňuje polohová presnosť bodov GCP, *ground control points*, preto je potrebné im venovať dostatočnú pozornosť. Pomerne nízka letová výška tiež znamená, že drony sú vhodné skôr na snímkovanie menších objektov, resp. oblastí, pretože sú limitované svojim doletom alebo nutnosťou byť v dohľade používateľa. Práve pri takýchto úlohách najviac vyniknú ich výhody v porovnaní s pilotovanými lietadlami alebo družicami.

Ďalšou výhodou bezpilotných prostriedkov je možnosť ich nasadenia v **rizikových oblastiach** a všade tam, kde hrozí určité nebezpečenstvo. Ako príklady je možné uviesť mapovanie zosuvov a nestabilných svahov (Niethammer et al., 2010), oblastí postihnutých záplavami, eróziou, monitoring lesných požiarov, alebo dokonca analyzovanie zloženia toxických sopečných plynov in-situ (NASA, 2013). Drony je možné využiť i v nedostupných oblastiach, kam je prístup sťažený alebo až znemožnený, tzn. v horských oblastiach v náročnom teréne alebo napr. nad veľkými vodnými plochami. Zároveň môžu byť jedinou alternatívou leteckého prieskumu všade tam, kde sa klasické pilotované stroje nedokážu pohybovať, alebo kde nie je možné získať povolenie na ich prelet.

Autori publikácie *Small format aerial photography* v úvode uviedli, že bezpilotné prostriedky na maloformátovú fotogrametriu nezačali používať len preto, že by boli nadšencami púšťania šarkanov, alebo budovania lietajúcich modelov – „*Leteckú fotografiu sme začali používať z nevyhnutnosti, pretože sme potrebovali zachytiť krajinu, jej formy a štruktúru v detaile a dokumentovať jej časové zmeny.*“ (Aber, et al., 2010). To približne sumarizuje hlavné dôvody, prečo používanie UAV vo vedeckej oblasti tak rýchlo napreduje. Spomenuté výhody UAV v porovnaní s ostatnými distančnými metódami zberu dát, tzn. letecké, resp. družicové snímkovanie, samozrejme **neznamenajú, že UAV majú potenciál tieto metódy úplne nahradiť**. Ako uvádzajú napr. Miřijovský (2013) alebo Aber, et al. (2010), každá z týchto hlavných metód diaľkového prieskumu má svoje opodstatnenie. Vhodnosť použitia konkrétnej metódy závisí na charaktere a cieľoch daného výskumu, parametroch skúmaného územia či finančných možnostiach spracovateľov. Viaceré štúdie (Hervouet, et al., 2011; d'Oleire-Oltmanns, S., et al., 2011) dokonca využívajú syntézu dvoch prístupov, konkrétne UAV fotogrametrie a družicového snímkovania na dosiahnutie lepších výsledkov. Viac o nevýhodách a limitáciách UAV v ďalšej podkapitole.

2.4.2 Limitácie

Významnou limitáciou používania bezpilotných prostriedkov je ich **nosnosť**, ktorá je nízka predovšetkým pri menších, lacnejších modeloch. Väčšia záťaž tiež negatívne vplyva na **výdrž batérie**. Tieto faktory potom ovplyvňujú výber senzoru neseného zariadením, pričom často sú používané neprofesionálne kamery. To môže podľa Eisenbeissa (2009) spôsobiť zníženú kvalitu snímok a teda i výsledných produktov. Autor ďalej uvádza, že UAV s nižšou nosnosťou sú často vybavené ľahšou navigačnou jednotkou, ktorej kvalita môže negatívne ovplyvniť výslednú presnosť. Zároveň je však možné povedať, že súčasný technologický pokrok, vývoj nových platforiem či navigačných jednotiek pomôže zmenšiť alebo eliminovať tieto problémy. Navyše, ako už bolo spomenuté, problémy s nosnosťou sa

týkajú malých modelov, na zariadenia s väčšou nosnou kapacitou je možné upevniť i profesionálne snímače. Tiež sa uskutočnilo množstvo experimentov s laserovými skenermi upevnenými na UAV, prehľad týchto štúdií zhrnuli Yan, et al. (2014).

Nízka hmotnosť jednotlivých modelov tiež zapríčiňuje jeden z ďalších nedostatkov UAV, a to je ich pomerne vysoká **citlivosť na meteorologické podmienky** (Miřijovský, 2009). Pri silnejšom vetre môžu byť niektoré menšie modely vratké a nestabilné, čo môže spôsobiť nielen napr. haváriu stroja, ale aj výrazne ovplyvniť kvalitu získavaných dát. Pri labilitate stroja totiž snímanie nemusí byť vertikálne, resp. sa môže meniť jeho náklon, a dokonca môže dôjsť k vychýleniu požadovanej trasy. Dôležitým meteorologickým faktorom je aj intenzita slnečného žiarenia. To, ako bude vyzerat' na snímke pozorovaný objekt, totiž závisí hlavne na pozícii kamery voči objektu a na jeho osvetlení (Aber, et al., 2010). Osvetlenie objektu a tieň, ktoré vrhá, ďalej významne ovplyvňuje denná doba. Autori ďalej usudzujú, že najvhodnejšou dennou dobou na snímkovanie v malom formáte je z tohto hľadiska niekoľkohodinový interval okolo poludnia. Významným, a často premenlivým prvkom, je oblačnosť. Ako uvádza Eisenbeiss (2009), pokiaľ to dovoľujú ostatné faktory, bezpilotné prostriedky môžu lietať a snímkoval' i pod oblakmi narozdiel od pilotovaných lietadiel, ktoré často využívajú vyššie letové výšky. Výsledné snímky sa však vyznačujú redukciami tieňov a tiež celkovo nízkym kontrastom (Aber, et al., 2010). V prípade vertikálne mohutnej oblačnosti môže príliš nízky kontrast snímok a úplná absencia tieňov jednotlivých objektov znemožniť ich efektívnu interpretáciu.

Limitáciou UAV môže byť aj ich **dolet**. Ten závisí od technických špecifikácií konkrétneho modelu. Pre šarkany, resp. balóny je limitujúcim prvkom dĺžka lana, ktorým sú spojené s používateľom. Pri väčšine moderných dronov sa samozrejme používa rádiové spojenie, pri menších modeloch najčastejšie s frekvenciou 2,4 GHz (Colomina a Molina, 2014), pričom Eisenbeiss (2009) uvádza, že frekvencie používané na spojenie s dronom môžu byť predmetom interferencie spôsobenej externým zdrojom. Čas, ktorý môže dron stráviť vo vzduchu a teda aj jeho dolet limituje už spomínaná výdrž batérii, resp. veľkosť palivovej nádrže. Dolet potom limituje veľkosť oblasti, ktorú je možné pomocou UAV nasnímať počas jedného letu a pri väčšej záujmovej oblasti je nutné uskutočniť viacero letov.

2.5 UAV a legislatíva

Prevádzku bezpilotných systémov výrazne ovplyvňuje legislatíva. Úprava pravidiel pre UAV je v kompetencii jednotlivých štátov Európskej únie, preto sa často v rôznych

štátoch líšia. V Českej republike sa používatelia musia riadiť leteckými predpismi, ktoré sú uverejňované Ministerstvom dopravy ČR, pričom ich znenie pripravuje *Úřad pro civilní letectví* (ÚCL). Dôležitým je hlavne *Doplněk X – Bezpilotní systémy* leteckého predpisu L2, ktorý nadobudol platnosť 1.3.2012. Doplnok vymedzuje nasledujúce pojmy:

- *autonómne lietadlo* – bezpilotné lietadlo, ktoré neumožňuje zásah pilota do riadenia letu,
- *model lietadla* – lietadlo, ktoré nie je schopné niesť človeka na palube, je používané pre súťažné, športové alebo rekreačné účely, nie je vybavené žiadnym zariadením umožňujúcim automatický let na zvolené miesto,
- *bezpilotné lietadlo (UA)* – lietadlo určené k prevádzke bez pilota na palube, rozumie sa ním každé bezpilotné zariadenie okrem modelov lietadiel s maximálnou vzletovou hmotnosťou nepresahujúcou 20 kg
- *bezpilotný systém (UAS)* – systém skladajúci sa z UA, riadiacej stanice a akéhokoľvek ďalšieho prvku nevyhnutného pre umožnenie letu.

Doplnok X obsahuje všeobecné ustanovenia napr. o tom, že let bezpilotného lietadla smie byť uskutočnený len takým spôsobom, aby nedošlo k ohrozeniu bezpečnosti lietania vo vzdušnom priestore, osôb, majetku na zemi a životného prostredia. Lietadlo ďalej musí byť počas trvania letu **v priamom dohľade pilota**. Doplnok ďalej vymedzuje priestor, kde je povolené s UAV operovať, ide o nasledujúce zóny:

- *vzdušný priestor triedy G* – v Česku do 1000 ft nad povrchom (cca 300 m) mimo riadených letísk, ide o neriadený priestor
- *zóna ATZ (okolie neriadeného letiska)* – výhradne pri splnení podmienok prevádzkovateľa letiska a na základe koordinácie s letiskovou letovou informačnou službou alebo prevádzkovateľom
- *riadený okrsok (okolie riadeného letiska)* – len do výšky 100 m a v minimálnej vzdialenosti 5,5 km od vzťažného bodu letiska

V riadenom okrsku je ďalej možné získať rôzne výnimky napr. v čase konania verejných vystúpení. Špecifické postavenie majú lietadlá s max. vzletovou hmotnosťou (MTOW) do 0,91 kg – tie môžu lietať aj v blízkosti letísk bez koordinácie, no iba do výšky 100 m nad povrchom a mimo ochranných pásem letiska. Doplnok X ďalej definuje viaceré požiadavky v závislosti od využitia bezpilotného stroja, ich výber je uvedený v tab. č. 2. Celkovo je možné zhodnotiť, že aktuálna legislatíva je priaznivá pre ľudí, ktorí UAV využívajú na rekreačné a športové účely. K využitiu vo vedeckej sfére však nie je ústretová a pred uskutočnením fotogrametrického letu je nutné získať viaceré povolenia.

Tab. č. 2: Vybrané legislatívne požiadavky pri prevádzke UAV v ČR. Zdroj: Ministerstvo dopravy ČR [online].

Skupina (MTOW)	Modely lietadiel rekreačné a športové využitie (do 20 kg)	Bezpilotné lietadlá rekreačné a športové využitie (do 20 kg)	Bezpilotné lietadlá komerčné, experimentálne, výskumné využitie (do 20 kg) + všetky typy nad 20 kg
Platnosť Dodatku X	doporučená, okrem ust. 7	záväzná	záväzná
Evidencia lietadla	nie	nie	áno
Evidencia pilota	nie	nie	áno
Testovanie pilota	nie	nie	áno
Povolenie k lietanu	nie	nie	áno

Súčasnú roztrieštenosť európskej legislatívy v oblasti regulácie bezpilotných zariadení by mali zmeniť nové štandardy, ktoré pripravuje Európska komisia. Tie by mali vstúpiť do platnosti v roku 2016 a platiť pre celú Európsku úniu. Komisia v oficiálnom komuniké z apríla 2014 (European commission, 2014) predstavila stratégiu, podľa ktorej bude podporovať vývoj trhu civilných dronov, no zároveň bude riešiť potenciálne riziká. Stratégia má 3 hlavné body:

- dôsledná integrácia bezpilotných zariadení do európskeho leteckého systému
- opatrenia na zabezpečenie bezpečnosti občanov
- opatrenia pre podporu trhu a podnikov

Zároveň predpokladá rozvoj využívania bezpilotných zariadení v najrôznejších oblastiach od poľnohospodárstva cez monitoring prírodných zdrojov až po médiá a kultúru.

3 UAV FOTOGRAMETRIA

3.1 Základy fotogrametrie

UAV fotogrametria je relatívne nový pojem, ktorý bol zrejme po prvýkrát použitý Eisenbeissom (2009). Podľa neho označuje novú fotogrametrickú metódu, operujúcu s bezpilotným, diaľkovo ovládaným zariadením, ktoré môže byť vybavené rôznymi senzormi. Vychádza z klasickej fotogrametrie, preto budú v tejto kapitole predstavené základné princípy fotogrametrie s ohľadom na špecifiká pri použití UAV. Podrobné informácie o fotogrametrii a jej princípoch sú však nad rámec tejto práce a je ich možné dohľadať v odbornej literatúre, napr. v publikácii Pavelku (2003).

Fotogrametria je podľa Pavelku (2003) „*veda, spôsob a technológia, ktorá sa zaoberá získavaním ďalej využiteľných meraní, máp, digitálneho modelu terénu a ďalších produktov, ktoré je možné získať z obrazového, najčastejšie fotografického záznamu*“. Aber, et al. (2010) uvádzajú, že fotogrametria je primárne zameraná na presné merania trojrozmerných objektov a terénu z dvojrozmerných fotografií. Aplikácie zahŕňajú meranie súradníc, dĺžok, výšok, plôch a objemov, tvorbu máp, modelov terénu apod.

3.1.1 Rozdelenie fotogrametrie

Pavelka (2003) uvádza, že fotogrametrické metódy sa používajú už 150 rokov, teda prakticky od vynálezu fotografie. Za ten čas prešli výrazným vývojom od analógových metód pozemnej priesekovej fotogrametrie až po dnešné digitálne metódy. Významnými posunmi boli napr. začiatok používania princípu stereoskopie, rozvoj leteckého snímokovania či počítačové spracovanie snímok. Vývoj neobišiel ani oblasť nosičov snímacích zariadení, pričom UAV sa stali výhodnou alternatívou ku konvenčne používaným platformám. Fotogrametriu je možné rozdeliť podľa viacerých hľadísk:

Podľa polohy stanoviska, z ktorej je snímok zachytený:

- *Pozemná (blízka) fotogrametria* – stanovisko je spravidla nepohyblivé, umiestnené na Zemi a jeho geodetické súradnice je pomerne ľahké určiť. Jej nevýhodou je, že jednotlivé objekty sa vzájomne zakrývajú a má preto obmedzený dosah. Pavelka (2003) a Aber, et al. (2010) uvádzajú aj termín *Close range photogrammetry*, ktorý zahŕňa pozemné snímokovanie objektov spravidla bližších ako 200 m.

- *Letecká fotogrametria* – snímacie zariadenie je umiestnené v lietadle alebo inom lietajúcom zariadení. Zo vzduchu je tak možné zachytiť oveľa väčší priestor. Nevýhodou je obťažné zistenie súradníc stanoviska pri zachytení snímky. *UAV fotogrametria* sa teda z technického hľadiska zaraďuje do druhej skupiny, no Aber et al. (2010) pripomína, že maloformátová letecká fotogrametria stojí akoby na pomedzí, kombinujúc tak výhodné letecké postavenie, no zároveň blízkosť objektu a teda väčší detail vo výsledných dátach.

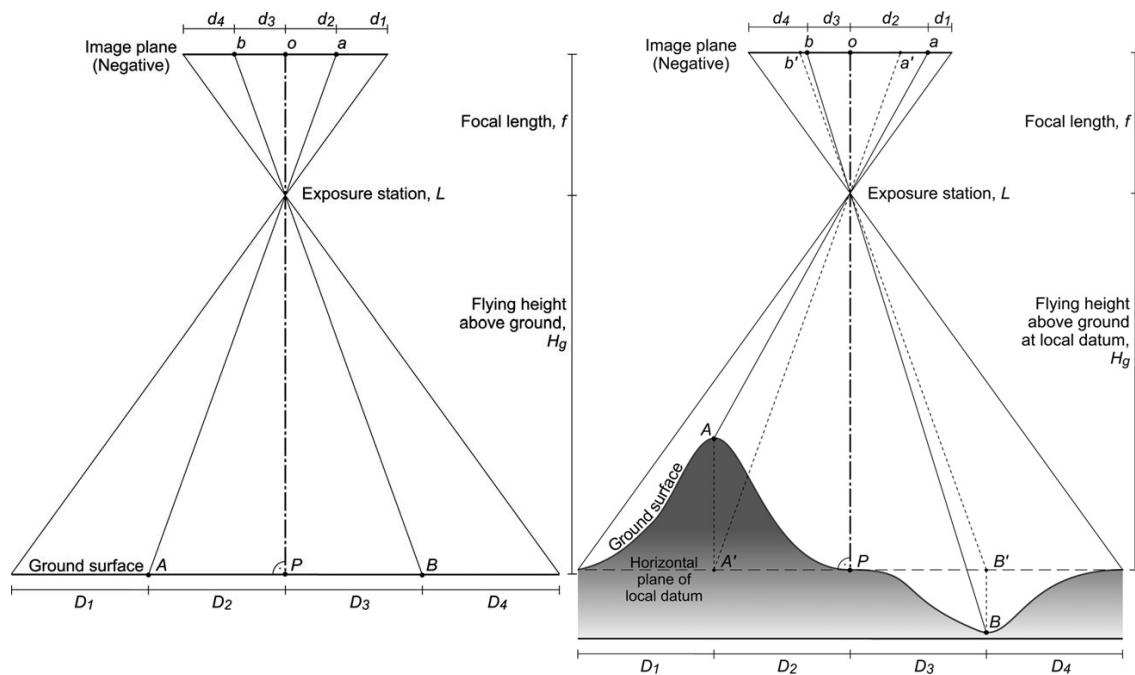
Podľa počtu vyhodnocovaných snímok:

- *Jednosnímková fotogrametria* – využíva len jednotlivé snímky, z ktorých je možné zistiť len rovinné súradnice objektov a ich rozmery.
- *Viacsnímková fotogrametria* – slúži na trojrozmerné spracovanie objektov, pričom využíva prekrývajúce sa snímky. Patrí sem *stereofotogrametria*, ktorá využíva stereoskopický vnem a je často používaná pre svoju univerzálnosť. Zahŕňa aj *priesekovú fotogrametriu*, ktorá vyhodnocuje snímky s konvergentnými osami záberu.

Snímky zachytené z UAV sa najčastejšie spracovávajú pomocou klasických stereofotogrametrických metód alebo pomocou metódy *Structure from motion*, ktorá kombinuje výhody stereofotogrametrie a priesekovej fotogrametrie (Miřijovský, 2013).

3.1.2 Geometria snímkovania

Každá fotografia je výsledkom **centrálnej projekcie** (Aber, et al., 2010). Vzťah medzi predmetom a jeho podobou na snímke definuje zväzok lúčov zachytený kamerou a poznanie vlastností tohto zväzku je kľúčové pri rekonštruovaní tvaru a rozmerov daného objektu. Miesto, kde sa jednotlivé lúče zbiehajú, sa nazýva stred premietania. Ten sa v ideálnom prípade nachádza v strede objektívu, no pri dnešných zložitých optických sústavách objektívov môže byť pomerne obťažné jeho polohu určiť (Miřijovský, 2013). Z centrálneho bodu premietania sa potom lúče rozbiehajú pod tým istým uhlom a dopadajú na fotografickú vrstvu, v súčasnosti skôr na snímacie čipy. Princíp centrálnej projekcie pri leteckej fotogrametrii je graficky znázornený na obr. č. 250. V ľavej časti je zobrazenie ideálneho prípadu, kedy je snímacia os kolmá k terénu, ktorý je úplne rovný. V pravej časti obrázku je ale znázornený reálny príklad, kde je vidieť i rôznorodosť terénu, ktorá spôsobuje radiálne posuny na snímke.



Obr. č. 7: Ideálny príklad centrálnej projekcie (vľavo). Vpravo je ukážka reálneho príkladu. V praxi fotografia nezobrazuje úplne rovný terén, jej os navyše nie je úplne vertikálna a centrálna projekcia je nedokonalá kvôli distorzii objektívu. (Zdroj: Aber, et al., 2010)

3.1.3 Prvky vnútornej a vonkajšej orientácie

Pokiaľ chce užívateľ fotogrametricky spracovať zachytené snímky, je dôležité poznať vybrané charakteristiky kamery i snímok. Najdôležitejšie sú 2 skupiny charakteristík: prvky **vnútornej a vonkajšej orientácie** (Miřijovský, 2013).

Prvky vnútornej orientácie sa týkajú predovšetkým samotnej kamery, pričom určujú vzťah projekčného centra a roviny snímky. Patria medzi ne:

- *Hlavný snímkový bod H'* – podľa Pavelku (2003) je definovaný ako priesečník roviny snímky s lúčom prechádzajúcim v predmetnom priestore stredom premietania a ktorý je kolmý na rovinu snímky. Jeho poloha je určená v snímkových súradniciach.
- *Konštanta komory f* – je vzdialenosť od hlavného snímkového bodu H k stredú premietania v predmetovom priestore (stredú výstupnej pupily). Konštanta komory sa značí zvyčajne f alebo c . Konštanta komory približne odpovedá ohniskovej vzdialenosti objektívu a často sa s ňou zamieňa. Konštanta komory sa najčastejšie udáva v milimetroch a platí, že čím je menšia, tým je uhol záberu kamery väčší.

- *Distorzia objektívu* – označujú sa tak vady objektívu, ktoré pôsobia na geometriu zobrazenia a majú teda rozhodujúci vplyv na presnosť merania. Spôsobené sú jeho konštrukčnými vlastnosťami. Kvôli nim sa poloha zobrazovaného bodu na snímke s drobnými odchýlkami líši od správnej polohy. Distorziu rozlišujeme *radiálnu* a *tangenciálnu*.

Prvky vonkajšej orientácie určujú vzťah projekčného centra k vonkajším súradniciam a orientáciu osi záberu voči súradnicovým osiam a tým pádom umiestňujú fotogrametrický zväzok lúčov v priestore. Patria medzi ne:

- Priestorové súradnice fotogrametrického stanoviska (x,y,z) .
- Uhly rotácie snímky voči trom súradnicovým osiam, ω, φ, κ .

Zatiaľ čo profesionálne meračské fotogrametrické kamery sú obvykle kalibrované pri ich výrobe, v UAV fotogrametrii sa vzhľadom na vlastnosti bezpilotných nosičov často používajú neprofesionálne kamery, kde nepoznáme prvky vnútornej, ani vonkajšej orientácie. Ide často o jednoduché kompaktné fotoaparáty alebo zrkadlovky, ktoré disponujú kvalitnejšími objektívmi, prípadne dokonca o jednoduché fotoaparáty priamo zabudované do UAV modelu. Najčastejšie používanou metódou určenia prvkov vonkajšej orientácie je v tomto prípade použitie vlícovacích bodov so známymi súradnicami (Miřijovský, 2013). Navyše sú v súčasnosti vyvíjané spoľahlivé GPS/IMU moduly, ktoré dokážu určovať prvky vonkajšej orientácie už počas letu priamo pri zachytení snímky. Prvky vnútornej orientácie kamery je možné dodatočne určiť laboratórne alebo svojpomocne v špecializovaných programoch (napr. Agisoft Lens, PhotoModeler), možnosti svojpomocnej kalibrácie podrobnejšie popisuje Miřijovský (2013). Niektoré programy, napr. Agisoft PhotoScan, dokážu kalibráciu uskutočniť automaticky pri spracovaní snímok.

3.2 Spracovanie snímok z UAV fotogrametrie

3.2.1 Stereofotogrametrická metóda

Stereofotogrametria je hlavnou používanou metódou spracovania leteckých snímok. Pri týchto snímkach spravidla nie sú známe prvky vonkajšej orientácie, ktoré je pri potrebe presného spracovania snímok nutné vypočítať. K tomu slúži tzv. aerotriangulácia. Je to matematická metóda, do ktorej vstupujú vlícovacie body a pomocou nich je možné určiť súradnice stredov premietania snímok a ich natočenie. V súčasnosti je možné získať prvky vonkajšej orientácie už počas letu priamo pri zachytení snímky, čo zabezpečujú pokročilé GNSS systémy a tzv. inerciálne meracie jednotky (IMU), čo sú zariadenia obsahujúce gyroskopy a akcelerometre, ktoré nazávisle na priestorovej polohe senzoru určujú jeho

uhlové prvky vonkajšej orientácie voči prijateľnému súradnicovému referenčnému systému (VÚGTK [online]). Ich použitie v UAV fotogrametrii je však značne limitované predovšetkým kvôli nízkej nosnosti bezpilotných zariadení. Prvky vonkajšej orientácie následne vstupujú do tzv. rovnic kolinearity, ktoré zabezpečujú prevod snímky zo snímkových súradníc na súradnice geodetické. Matematické pozadie výpočtov v stereofotogrametrii je možné dohľadať v špecializovanej literatúre, napr. Pavelka (2003).

3.2.2 Structure from motion

Relatívne nová metóda spracovania snímok *Structure from Motion* (SfM) kombinuje výhody metód stereofotogrametrie a priesekovej fotogrametrie a stáva sa veľmi často využívanou v UAV fotogrametrii. SfM pomocou moderných algoritmov rekonštruuje trojrozmerné objekty a terén tak, že automaticky páruje súhlasné body na snímkach, ktoré boli zachytené z rôznych uhlov. Do procesu spracovania teda vstupujú nielen snímky s rovnobežnými osami záberu, ale aj s osami konvergentnými (Miřijovský, 2013). Metódy SfM fotogrametrie sa stali jednou z hlavných výskumných oblastí v odvetví tzv. počítačového videnia (*computer vision*) v poslednej dekáde. Ich úspech pritom stojí na pokročilých algoritmoch, ktoré boli prvýkrát vyvinuté už pred tromi desaťročiami (Woodget, et al., 2015). Dáta sú spracovávané do podoby veľmi hustých, trojrozmerných mračien bodov a je tak možné rekonštruovať najrôznejšie objekty. Metóda SfM nebola primárne určená pre použitie v geovedách a ani v UAV fotogrametrii, napriek tomu sa v týchto oblastiach veľmi rozšírila. V konvenčnej fotogrametrii je na stanovenie 3D pozície bodov terénu potrebné poznať buď súradnice a orientáciu kamier, alebo súradnice skupiny kontrolných bodov. Naopak v prípade metódy SfM nie je potrebné poznať dopredu pred samotnou rekonštrukciou terénu spomínané údaje, pretože pozícia kamery a geometria povrchu sú rekonštruované simultánne pomocou automatickej identifikácie súhlasných objektov na viacerých prekrývajúcich sa snímkach (Westoby, et al., 2012). Mračno bodov potom ale neobsahuje reálnu polohovú informáciu. Pozemné kontrolné body, *ground control points (GCP)*, sú potrebné iba vtedy, keď užívateľ potrebuje generované trojrozmerné mračno bodov bez polohovej informácie a mierky transformovať do mapových súradníc.

Celkovo metóda obsahuje viacero parciálnych krokov. Westoby et al. (2012) popisujú ako dôležitý krok lokalizáciu súhlasných objektov na viacerých prekrývajúcich sa snímkach. To najčastejšie zabezpečuje algoritmus *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) alebo jeho variácie. Ten vyhľadáva na snímkach objekty, ktorých vlastnosti sa so zmenou mierky alebo natočenia nemenia. Zároveň je čiastočne robustný voči zmenám osvetlenia na jednotlivých

snímkach. Ďalším dôležitým prvkom je algoritmus, ktorý na základe súhlasných objektov počíta geometriu kamier a skúmaného objektu a vytvára tak základné mračno bodov. Zrejme najčastejšie používaným je algoritmus Bundler. Metóda SfM je dnes súčasťou viacerých komerčných programov, ktoré ponúkajú vysoko automatizovanú rekonštrukciu 3D objektov a sú často veľmi prívetivé pre bežného užívateľa. Limitáciou môžu byť vysoké hardvérové nároky z dôvodu výpočtovej náročnosti, predovšetkým pri spracovaní s vysokou kvalitou.

4 UAV VO FLUVIÁLNEJ GEOMORFOLÓGII

4.1 Využitie distančných dát vo fluviálnej geomorfológii

4.1.1 Nové technologické postupy

Nedávny technologický pokrok umožnil zavedenie nových, moderných metód diaľkového prieskumu aj do hydromorfologického výskumu. Tamminga et al. (2015) medzi najdôležitejšie z týchto metód zaraďujú letecké laserové skenovanie (*LiDAR – Light detection and ranging*), leteckú fotogrametriu s využitím algoritmu SfM (*Structure from motion*) a pozemné laserové skenovanie (*TLS – terrestrial laser scanning*). Marcus a Fonstad (2010) dokonca hovoria o diaľkovom prieskume vodných tokov ako o novej, dôležitej hydrologickej subdisciplíne. Podľa nich veľké množstvo aplikácií v tejto oblasti nebolo výsledkom koordinovaného postupu či všeobecne prijímaného konsenzu, ale skôr šlo o individuálne experimenty výskumných tímov, snažiacich sa pochopiť a vysvetliť rôzne vlastnosti riečneho systému a jeho funkcie pomocou nových metód. Tento rozdrobený prístup viedol k veľkej rozmanitosti prístupov a aplikácii diaľkového prieskumu pri štúdiu vodných tokov, pričom ide jednak o rozmanitosť na úrovni použitých snímačov (LiDAR, radar, multispektrálne snímače, snímanie viditeľného spektra), ale aj na úrovni nosičov týchto zariadení, resp. spôsobu, akým sú snímky zachytávané. Nové technologické postupy priniesli iný pohľad na povodie prostredníctvom priestorovo kontinuálnych dát pri vysokom rozlíšení. Tým sa líšia od tradičných, predtým používaných metód, prostredníctvom ktorých je možné získať (Marcus a Fonstad, 2008):

- *lokálne intenzívne* dáta získané na malých úsekoch vodného toku,
- *priestorovo extenzívne* dáta, no s malou hustotou, resp. malým rozlíšením.

4.1.2 Porovnanie UAV so satelitným a leteckým snímkaním

UAV fotogrametria priniesla možnosť mapovať koryto vodného toku, jeho pribrežnú zónu a údolnú nivu na podrobnejšej úrovni v porovnaní so snímkaním družicami či letecky. Družice vzhľadom na svoje rozlišovacie možnosti nie sú schopné identifikovať niektoré hydromorfologické útvary a charakteristiky menších vodných tokov – veľmi úzke korytá, menšie jazerá, mŕtve ramená, akumulácie sedimentov, rôzne typy substrátov atď. Preto sa hydromorfologické štúdie využívajúce satelitné snímky podľa Lejot, et al. (2007) venovali skôr väčším riekam v menších mierkach, príkladom je napr. Hossain (2014). Autori tiež dodávajú, že vypustenie družíc QuickBird a Ikonos umožnilo analyzovať snímky

s rozlíšením pixelu menej ako 1 m, no aj napriek tomu zostáva využitie satelitných snímok vo fluvialnej geomorfológii pomerne vzácne. Lepšie rozlíšenie snímok v porovnaní so satelitným snímokovaním ponúka konvenčné letecké snímkovanie, kde rozmer 1 pixelu dosahuje rádovo centimetre až decimetre. Letecké snímky boli v mnohých štúdiách použité napr. na mapovanie akumulácií sedimentov, brehovej erózie, a pod. (Lejot, et al., 2007; Flener, et al., 2013). Obidva spôsoby získavania dát, satelitný a letecký, sú ale pomerne drahé. Lepšie rozlíšenie snímok zachytených z UAV, ktoré súvisí s nižšou letovou výškou, teda prináša možnosť zachytiť aj veľmi malé detaily mikroforiem a mezoforiem v koryte vodného toku a taktiež zachytiť jeho morfológický vývoj. Fluvialna geomorfológia sa totiž často zaoberá veľmi dynamickým prostredím vodného toku. UAV sa vďaka pomerne nízkym prevádzkovým nákladom naskytá ako kompromisné riešenie všade tam, kde chceme tieto relatívne rýchle morfológické zmeny zaznamenávať s dostatočnou presnosťou, no zároveň efektívne a za prijateľnú cenu. Samozrejme však nemôžeme paušálne povedať, že by bola UAV metóda najlepšia. Využitie nachádza hlavne pri skúmaní malých povodí alebo len úsekov vodných tokov. Vyplýva to z vlastností UAV a legislatívnych obmedzení ich používania.

4.2 Produkty UAV fotogrametrie

4.2.1 Ortofotosnímka, digitálny model terénu

Bezpilotné prostriedky sú vďaka svojim výhodám, ktoré sú uvedené v kapitole 2.3, vhodným nástrojom na tvorbu veľmi presných **digitálnych modelov reliéfu údolnej nivy**. Tie sú veľmi užitočné pri identifikácii rôznych fluvialných foriem reliéfu vo veľkej mierke. Pri mapovaní výškopisu vo veľkých mierkach má napr. satelitné a letecké snímkovanie len malú použiteľnosť (Tamminga, et al., 2015). Dáta o výškopise boli tradične získavané pomocou geodetických metód priamo v teréne, no tento spôsob, aj keď je veľmi presný, je časovo veľmi náročný a nepokrýva celé územie, ako tomu je pri diaľkovom prieskume. Modely terénu sú kľúčové pri štúdiu morfológických zmien koryta a využitie nachádzajú i pri hydrologickom modelovaní (Flener, et al., 2013; Tamminga, et al., 2015). Môžu tiež poslúžiť pri rôznych interdisciplinárnych výskumoch. Tamminga, et al. (2015) uvádzajú, že použitie UAV fotogrametrie na tvorbu vysoko kvalitných modelov terénu „*je ideálnou metódou, ktorou je možné adresovať otázky dynamických väzieb medzi geomorfologickými procesmi a vodným prostredím v troch dimenziách*“.

4.2.2 Model batymetrie koryta

Dôležité sú však aj poznatky o **morfológii dna** koryta vodného toku. Tie sú podobne základným komponentom v mnohých hydrologických a environmentálnych aplikáciách, ako je napr. modelovanie povodní alebo mapovanie vodných ekosystémov (Flener et al., 2013). Autori pritom dodávajú, že vytvorenie presnej a kontinuálnej reprezentácie zaplaveného dna koryta je pri mapovaní vodného toku najväčšou výzvou. Menšie úseky plytších vodných tokov je možné zmapovať pomocou tachymetrie alebo systému RTK-GNSS. Tieto metódy dokážu najpresnejšie zmerať vybrané body, no presnosť výsledného interpolovaného modelu opäť závisí na hustote týchto bodov. Na zistenie batymetrie dna sa dnes často používa sonar. Použitie sonaru nie je limitované na plytké úseky toku, naopak, jeho limitáciou je požiadavka minimálnej hĺbky, cca 1 m (Flener, et al. 2013). Viacero autorov (Lejot, et al., 2007; Flener, et al., 2013; Woodget, et al., 2015) však za poslednú dekádu poukázalo na možnosť modelovať morfológiu dna menších vodných tokov pomocou diaľkového prieskumu, s využitím bezpilotných zariadení. Je tak možné zmapovať dlhší úsek vodného toku bez požiadavky minimálnej hĺbky.

Niektorí autori, napr. Flener, et al., (2013) poukazujú na dôležitosť vytvárania bezšvíkových modelov terénu, ktoré zahŕňajú nielen nivu, ale aj dno koryta. To by malo podľa nich zabezpečiť správne pochopenie, resp. presnejšie modelovanie skúmaných hydrologických a geomorfologických procesov. Na mapovanie nivu i zaplaveného koryta môže byť použitá výlučne UAV fotogrametria (Lejot, et al., 2007), alebo kombinácia viacerých prístupov. Napr. Flener et al. (2013) vytvorili bezšvíkový model spojením modelu terénu riečnej nivu z mobilného laserového skenovania a batymetrického modelu vytvoreného pomocou UAV fotogrametrie. Kombinovanie rôznych metód je výsledkom snahy o potlačenie nevýhod jednotlivých prístupov.

Prístupy k modelovaniu batymetrie

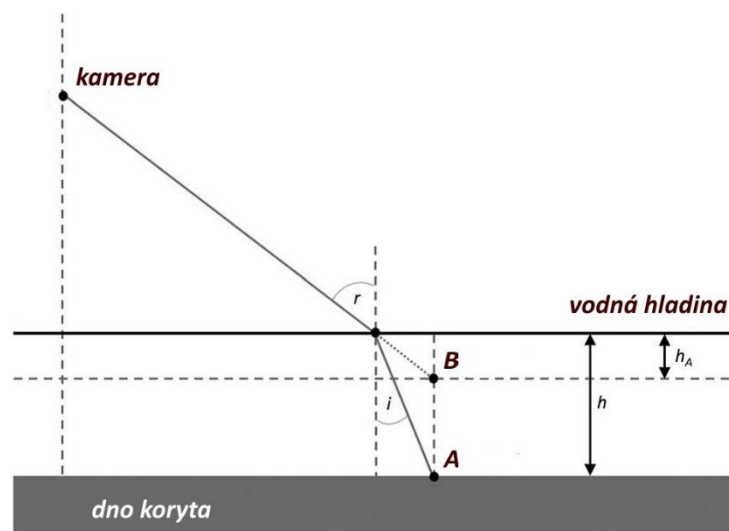
Pre mapovanie batymetrie vodného toku pomocou UAV sa používa viacero prístupov. Často používaným je metóda **korelácie spektrálnych vlastností a hĺbky** (Lejot, et al., 2007, Flener, et al., 2013). Jej princípom je stanovenie empirickej korelácie medzi dátami o hĺbke, ktoré sú získané meraním priamo v teréne, a medzi spektrálnymi vlastnosťami snímky na zodpovedajúcich súradniciach. Korelácia je potom aplikovaná na zvyšnú časť snímky a tým je možné získať súvislé dáta o predpokladanej hĺbke pre celé koryto. Tieto dáta potom môžu byť konvertované na údaje o výške ako súčasť digitálneho modelu terénu. Nevýhodou tohto prístupu je však potreba väčšieho množstva empiricky získaných dát

z terénu, ktoré by mali pokryť rôznorodosť hĺbok v záujmovej oblasti (Woodget, et al., 2015). Množstvo práce v teréne je možné znížiť použitím moderných technológií. Napr. Flener, et al. (2013) použili na meranie hĺbok diaľkovo ovládaný čln, na ktorom bol umiestnený sonar a zároveň systém RTK-GNSS pre presné umiestnenie zameraných hĺbok. Metóda korelácie je použiteľná len pri relatívne plytkých vodných tokoch, napr. Woodget, et al. (2015) uvádzajú, že jej úspešné použitie je možné do hĺbky 1 m pri čistej vode.

Ďalšia metóda využíva tzv. **refrakčné korekcie**. Fotogrametria je totiž vhodným a odskúšaným nástrojom na mapovanie terénu riečnej nivy, no jej využitie pre samotné riečne koryto je výrazne obmedzené vlastnosťami optického rozhrania medzi vzduchom a vodou. Snímka z UAV sítě pri čistej vode a malej hĺbke dokáže zachytiť až samotné dno vodného toku a teda pri spracovaní takýchto snímok je možné vytvoriť bezšvíkový model terénu, model však v mieste zaplaveného koryta nebude úplne zodpovedať realite kvôli lomu svetla pod hladinou. Tento fenomén vyjadruje jednoduchý Snellov zákon:

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{n_1}{n_2}$$

kde i je uhol odrazu lúča od dna koryta, r je lomený uhol nad vodnou hladinou, n_2 je index lomu vzduchu (rovný 1) a n_1 index lomu vo vode. Situácia je schematicky zobrazená na obr. č. 8, kde h je skutočná hĺbka a h_A je hĺbka zdanlivá. Bez uplatnenia korekcií, ktoré boli odvodené napr. v práci Westaway et al. (2001), by došlo k podceneniu skutočnej hĺbky.



Obr. č. 8: Schéma zobrazujúca nepresnosť merania hĺbky kvôli lomu svetla na rozhraní voda - vzduch. Zdroj: Woodget, et al., 2015 (upravené).

Sľubným sa zdá byť využitie **laserového skenovania**. Pri ňom je najčastejšie využívaná blízka infračervená časť spektra, ktorá je vo vode silne absorbovaná a tým pádom nepoužiteľná pre zistenie hĺbok. Nedávno sa však začal používať tzv. *blue-green laser scanner*, nazývaný aj zelený alebo batymetrický lidar (Woodget, et al., 2015), ktorý používa najmä zelenú časť spektra. Táto technológia je však stále vo vývoji a jej používanie vo fluvialnej geomorfológii je výrazne obmedzené jej nedostupnosťou, príp. vysokou cenou.

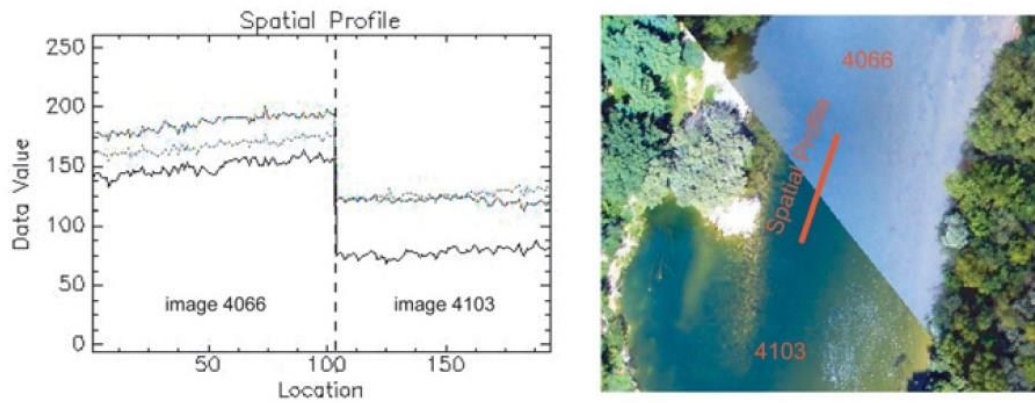
Limitácie

Pri využití UAV nosičov na stanovenie batymetrie sú limitácie podobné ako pri ostatných metódach, ktoré na tento účel využívajú diaľkový prieskum. Voda vo vodnom toku musí byť aspoň primerane čistá, tak, aby bolo možné vidieť dno koryta. Problémy môže spôsobovať aj rôznorodosť substrátov, alebo tieňe pobrežnej vegetácie (Lejot, et al., 2007). Tamminga et al. (2015) medzi komplikujúce faktory zaraďujú refrakciu na rozhraní voda – vzduch, vlny na vodnej hladine, či spenenú vodu, pričom tieto faktory môžu vyústiť v podceňovanie skutočnej hĺbky a k veľkým chybám.



Obr. č. 9: Komplikujúce faktory pri mapovaní batymetrie pomocou UAV na príklade Javořího potoka: farebná rôznorodosť substrátu (vľavo) a spenená vodná hladina (vpravo). (vlastná tvorba)

Pri použití dronov sa vzhľadom na nízku letovú výšku tiež predpokladá požitie viacerých snímok tak, aby sa pokrylo celé záujmové územie, čo môže zvýšiť nároky na geoprocessing, ale aj radiometrické korekcie (Hervouet, 2011). Jas či kontrast jednotlivých fotografií sa totiž môže výrazne líšiť kvôli zmenám meteorologických podmienok. Lejot, et al. (2007) vo svojej štúdiu uvádzajú, že napriek použitiu kamery s jednotným nastavením clony a rýchlosti uzávierky sa kvôli zmenám osvetlenia vyskytli významné rozdiely v jase jednotlivých snímok (vid' obr. č. 10). Pred vytvorením batymetrického modelu preto museli vykonať štandardizáciu jasu snímok pomocou úpravy histogramu. Problematike svetelných podmienok pri maloformátovom snímkovaní sa širšie venujú Aber, et al. (2010).



Obr. č. 10: Zmena rádiometrického signálu na rozhraní 2 snímok vyjadrená v hodnotách kanálov R,G,B. Zdroj: Lejot, et al., (2007).



Obr. č. 11: Príklad UAV snímky nevhodnej na určovanie batymetrie vodného toku (vľavo) kvôli odrazom na hladine. Vpravo snímka toho istého úseku z iného uhla (dáta poskytol doc. Langhammer)

4.3 Mapovanie morfológických zmien pomocou UAV

Fluviálne procesy sú významným reliéftvorným činiteľom. Demek (1987) dokonca uvádza, že vývoj krajiny je na intenzite fluvialných pochodov a vývoji riečnej siete priamo závislý. Tento systém je veľmi dynamický a morfológické zmeny riečnych korýt a nív môžu prebiehať pomerne rýchlo. Intenzita fluvialných procesov je podmienená množstvom zrážok, ich trvaním a plochou, ktorú zasiahli, pričom pre vývoj georeliéfu majú najväčší význam extrémne zrážky, predovšetkým prívalové dažde, ktoré majú spravidla krátke trvanie a zasahujú menšie oblasti (Demek, 1987). Vilímek (2007) uvádza, že okrem hydro-meteorologických príčin povodní sú pre charakter morfológických zmien dôležité aj ďalšie charakteristiky povodia, medzi ktoré patria napr. litologické vlastnosti hornín, sklonitosť svahov, sklon spádovej krivky toku, šírka údolia, množstvo a zrnitosť sedimentov a iné. Ďalším významným faktorom, ktorý ovplyvňuje nielen priebeh ale aj následky povodní je antropogénna upravenosť korýt toku a údolnej nivy (Langhammer, 2008). Využitie údolnej nivy a jej antropogénna transformácia podľa rozsiahleho výskumu následkov povodne

2002 v povodí Otavy (Křížek a Engel, 2008) významne ovplyvňuje geomorfologické prejavy povodní. Autori konštatujú, že v tomto konkrétnom prípade boli na tokoch, ponechaných v prírodnom alebo prírode blízkom stave, pozorované minimálne geomorfologické prejavy povodní, pretože tok mal možnosť sa rozlítať do okolitej krajiny. Antropogénne ovplyvnenie následkov povodní je stále predmetom rozsiahlych výskumov.

Na zaznamenávanie rýchlych morfologických zmien v malých povodiach alebo na úrovni údolnej nivy je užitočné mať flexibilný nástroj, ktorý ich dokáže efektívne zmapovať. Jedným z cieľov tejto práce je poukázať na potenciál použitia UAV na tento účel. V predchádzajúcich kapitolách boli opísané prínosy použitia UAV a tiež produkty, ktoré je možné snímkovaním údolnej nivy získať. Pomocou týchto produktov je možné nielen veľmi podrobne zmapovať dané územie, no v prípade existencie časovej rady snímaní je možné určiť a charakterizovať aj temporálne zmeny. V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené **vybrané príklady** využitia UAV na hodnotenie morfologických zmien koryt.

4.3.1 Zmeny pôdorysu koryta

Miřijovský (2013) aplikoval bezpilotné zariadenie pri výskume fluvialnej dynamiky v Litovelskom Pomoraví, pričom toto územie je predmetom ďalšieho hydromorfologického výskumu (Miřijovský, 2015). Významnou lokalitou je hlavne Kenický meander, ktorý bol podľa autora objektom záujmu i botanikov, ekológov či krajinných inžinierov. Vo februári 2012 došlo k pretrhnutiu šije meandru a bolo tak možné v krátkom čase zaznamenávať významné **skrátene koryta**.

Sládek a Rusnák (2013) dokumentovali **avulziu** koryta rieky Ondava na východnom Slovensku. Na tento účel využili ortofotosnímku, vytvorenú zo záberov zachytených z bezpilotnej platformy HexaKopter XL od nemeckej spoločnosti MikroKopter. Zachytili tak proces, ktorého príčinou bola séria povodní od mája do júla 2013 s veľkosťou 1 až 5 ročného prietoku. Výsledkom bola erózia ornej pôdy a tiež predpoklad postupného presunu prúdenia do nového koryta pri ďalších väčších povodňových udalostiach.

4.3.2 Erózne tvary

Vo viacerých zahraničných výskumoch boli UAV použité na monitoring **stržovej erózie**. D'oleire-oltmanns, et al. (2011) využili bezpilotné lietadlo s pevným krídlom na monitoring stržovej erózie v povodí rieky Souss v západnom Maroku. Táto oblasť je k erózii veľmi náchylná z dôvodu nevhodného spôsobu obhospodarovania pôdy. Pomocou stereofotogrametrických metód zo snímkov autori vytvorili digitálny model terénu, na

ktorom bolo skúmané rozširovanie, resp. prehlbovanie strží. Na georeferencovanie autori použili dvojité metódy – pre menšie strže metóda bodov GCP zameraných totálnou stanicou, resp. RTK GPS, no na väčšie oblasti boli pri väčšej letovej výške použité menej presné informácie o orientácii snímok, získané GPS a IMU modulom lietadla priamo pri snímaní. Druhá spomenutá metóda bola použitá kvôli veľkému rozsahu oblasti, kde by bolo nutné rozmiestniť a zmerať veľmi veľké množstvo bodov GCP. Monitoring stržovej erózie je veľmi prínosný, pretože môže slúžiť na presnú objemovú kvantifikáciu erózie a následne na vypracovanie efektívnych stratégií, ako zabrániť škodám s ňou súvisiacim.

Miřijovský (2013) tiež uvádza aplikáciu UAV na monitoring **bočnej erózie** rieky Moravy v Litovelskom Pomoraví. Jedná sa konkrétne o mohutnú 60 m dlhú brehovú nátrž pri obci Štěpánov a podobnú 65m nátrž pri obci Moravičany. Autor uskutočnil pre obidve nátrže 2 snímokovacie lety. Získané snímky spracoval metódou Structure from Motion a kvantifikoval plošný rozsah erózie i objem materiálu erodovaného počas obdobia medzi doma snímokovacími termínmi. Výskum má aj významný aplikačný rozmer. Brehová erózia v týchto miestach je pomerne významná a obsah plochy erodovanej od roku 2003 dosahuje stovky m². To má významné dopady na využiteľnú výmeru priľahlých pozemkov. Vzniknutú situáciu podľa autora môže vyriešiť premeranie hraníc pozemkov a pozemková úprava s kompenzáciou výmery stratenej na postihnutom brehu.

4.3.3 Akumulačné tvary

UAV nachádza využitie pri monitorovaní veľmi rýchlych zmien koryt divočiackich vodných tokov. Zaujímavý výskum predstavili Hervouet et al. (2011). Autori analyzovali vývoj vegetácie na **korytových uloženiách** divočiaceho toku Drôme v južnom Francúzsku, pričom porovnávali vlastnosti výsledkov UAV snímokovania oblasti s družicovými snímkami zo satelitu SPOT. UAV snímky umožnili veľmi podrobnú a dôslednú analýzu vývoja vegetácie, ktorá citlivo reagovala na morfológické zmeny vo vnútri koryta. Mnohé akumulácie sedimentov totiž boli veľmi malé, takže na satelitných snímkach nebolo možné plôšky pionierskej vegetácie rozlíšiť. Na druhej strane po porovnaní výsledkov z UAV a SPOT skonštatovali, že obe metódy vo výsledkoch napriek určitým odchýlkam vykazujú podobné trendy a tým pádom je využitie družicových snímok na tento účel vhodné v regionálnej mierke, naopak pri potrebe dôkladného mapovania vo veľkých mierkach je vhodné použitie bezpilotného prostriedku.

5 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA

5.1 Metodika práce

V rámci praktickej časti práce boli vytvorené ortomozaiky a digitálne modely terénu pre cca 150 m dlhý úsek **Javořího potoka** tesne pred sútokom s Roklanským potokom v Národnom parku Šumava. Ako podkladové dáta boli na tento účel použité letecké snímky zachytené z bezpilotného zariadenia 25.11.2014 a 27.4.2015, ktoré boli poskytnuté doc. Langhammerom. Spracované boli v programe Agisoft PhotoScan a následne boli identifikované morfológické zmeny koryta Javořího potoka v prostredí programu ArcGIS. Pri spracovaní boli využité teoretické východiská, uvedené v predošlých kapitolách. Zaujímavé územie sa nachádza v nadmorskej výške okolo 1020 m n. m., cca 4 km západne od obce Modrava medzi Javoří Pilou a sútokom Javořího a Roklanského potoka. Územie, ktoré patrí do horného povodia Vydry má charakter náhornej plošiny s relatívne zarovnaným povrchom, vysokými úhrnmi zrážok a chladným podnebím. Podľa Čurdu, et al. (2011) povodie Vydry, kam spadá aj zaujímavé územie, patrí do oblasti s častým výskytom povodňových udalostí. To spolu s ďalšími faktormi prispieva k tomu, že fluvialná činnosť je tu pomerne dynamická. Táto kapitola sa ale primárne zaoberá overením použitia metódy UAV snímokovania a zmapovaním fluvialne morfológických zmien, nie však príčinami ich vzniku a širšími súvislosťami, preto nebude uvedená podrobná charakteristika zaujímavého územia. Použitá metodika korešponduje s metódami použitými v článku Miřijovský a Langhammer (2015).

5.1.1 Zdroj dát

Použité dáta pozostávajú z dvoch skupín snímok, ktoré boli zachytené z bezpilotného zariadenia **DJI Phantom 2 Vision+**, patriaceho Katedre fyzickej geografie a geoekológie na Prírodovedeckej fakulte UK v Prahe. Ide o relatívne malú kvadrokoptéru s hmotnosťou 1242 g, na ktorej je upevnený vstavaný fotoaparát s rozlíšením 14 Mpx so širokouhlým objektívom. Vlastnosti objektívu sa na snímkach prejavujú veľkými distorziami na okrajoch snímok, preto už na začiatku spracovávania bola očakávaná znížená presnosť výsledných produktov. Na druhej strane je práve jedným z cieľov tejto práce overiť potenciál nízkonákladových platforiem a senzorov a aj nemeračských snímok, preto je charakter dát vzhľadom na ciele primeraný. Kvôli svojej malej hmotnosti môže byť celé zariadenie nestabilné pri zhoršených poveternostných podmienkach, no závesný systém fotoaparátu je na druhej strane vybavený robotickým stabilizačným systémom, ktorý dokáže udržať

vertikálnu os snímania. Zariadenie ďalej dokáže stúpať maximálnou rýchlosťou 6 m.s⁻¹, maximálna horizontálna rýchlosť letu je 15 m.s⁻¹ (DJI [online]).



Obr. č. 12: Bezpilotné zariadenie DJI Phantom 2 Vision+. Zdroj: DJI [online].

Zariadenie je tiež vybavené GPS snímačom, ktorý snímkam automaticky priraduje koordináty v súradnicovom systéme WGS 84. Ide však len o veľmi hrubé určenie polohy na úrovni turistických GPS snímačov s presnosťou rádovo v metroch. Pre fotogrametrické spracovanie tieto údaje nie sú dostatočne presné a pri výpočtoch neboli brané do úvahy. Snímky boli zachytené v dvoch termínoch – **25.11.2014** a **27.4.2015**, takže bolo možné identifikovať viaceré temporálne zmeny koryta, ku ktorým došlo za 5 mesiacov. V prípade prvého termínu boli snímky zachytené z výšky cca 25 m, druhého približne 30 m.

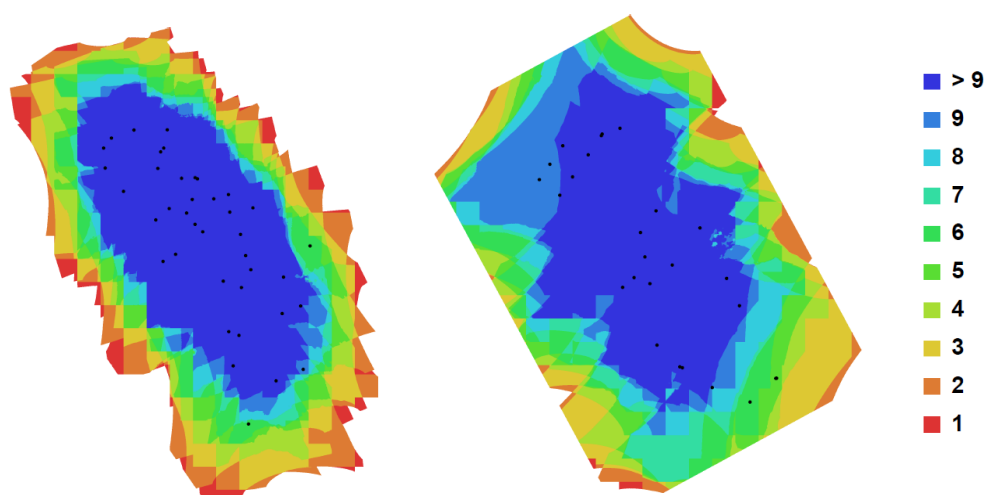
Na obnovenie prvkov vonkajšej orientácie bola použitá metóda bodov GCP, ktoré boli viditeľné na jednotlivých snímkach. Ide o **fixné kontrolné body** v podobe štandardných geodetických bodov, pričom pri spracovaní dát ich bolo využitých celkovo 8. Na snímkach sú rozoznateľné ako štvorce žltej, resp. oranžovej farby s rozmerom strany cca 10 cm s kontrastným stredom štvorca. Dáta o presnej polohe bodov boli poskytnuté RNDr. Jakubom Miřijovským, Ph.D., pričom ich zameranie bolo uskutočnené prostredníctvom prístroja RTK GNSS Topcon Hiper II, patriaceho Univerzite Palackého v Olomouci, s horizontálnou presnosťou do 2 cm a vertikálnou do 5 cm. Dáta majú podobu textového súboru, kde sú v súradnicovom systéme S-JTSK uvedené pre každý bod súradnice X,Y a tiež nadmorská výška.

5.1.2 Spracovanie dát

Spracovanie oboch skupín snímok prebehlo v programe **Agisoft PhotoScan Professional Edition** v 64-bitovej verzii 1.1.16 2038, určeného na rekonštrukciu 3D

objektov pomocou metódy SfM. Pre oba snímkovacie termíny boli vygenerované ortofotosnímky a digitálne modely terénu. Prvým krokom pre spracovanie bol import fotografií pomocou príkazu **add photos**. Pre prvý termín bolo po vyradení duplicitných alebo nevhodných snímok (viď obr. č. 11) použitých 39, pre druhý termín 26 snímok. Ďalším krokom bolo usporiadanie snímok a vytvorenie základného, resp. riedkeho mračna bodov (*sparse point cloud*) z tzv. *tie points*, teda viazacích bodov, príkazom **align photos**. V tomto kroku program vypočíta pozíciu kamery a tiež orientáciu každej snímky, tzn. prvky vonkajšej orientácie (Agisoft LLC, 2014). Na obr. č. 13 je znázornený tzv. *image overlap*, tzn. vzájomný prekryv snímok. Čierne body na obrázku zobrazujú pozície kamery.

Prvé usporiadanie bolo len pomocným krokom pre stanovenie polohy bodov GCP, preto bola nastavená len nízka presnosť výpočtu. Nasledovalo teda označenie vlíčovacích bodov na každej snímke, pričom pre požiadavku čo najvyššej presnosti bolo potrebné dôkladne označiť stred každého bodu umiestnením tzv. *markeru*. Po označení markeru na aspoň 2 snímkach ho program vďaka predchádzajúcemu usporiadaniu približne lokalizuje na všetkých snímkach, na ktorých sa daný bod nachádza. Potom stačí polohu markeru na každej snímke len opraviť posunutím myšou, čo značne uľahčuje prácu. Na niektorých snímkach bolo vplyvom zlého osvetlenia a distorzií na okrajoch pomerne obťažné identifikovať stredy niektorých kontrolných bodov, príklady umiestnení markerov sú na obr. č. 14. Problematický bol aj bod č. 15, pretože bol počas druhého snímkovacieho termínu čiastočne zakrytý kameňom, ktorý sa tam zrejme dostal počas zvýšeného vodného stavu v období medzi snímkovacími termínmi. Situácia je znázornená na obr. č. 15.



Obr. č. 13: Schematické znázornenie počtu prekrývajúcich sa snímok pre prvý (vľavo) a druhý termín.



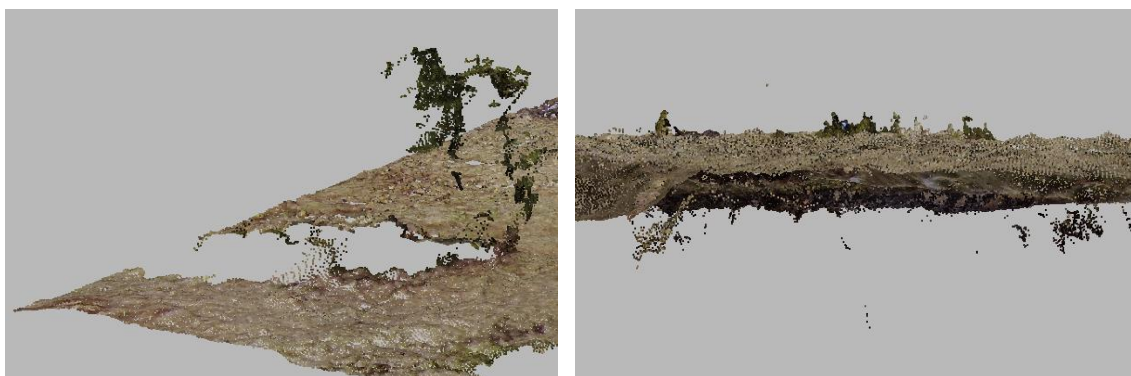
Obr. č. 14: Príklady priradenia markerov k bodom GCP.



Obr. č. 15: Kontrolný bod č. 15 na snímke z prvého (vľavo) a druhého (vpravo) termínu.

Po označení bodov GCP na všetkých snímkach im boli priradené súradnice X,Y,Z importovaním textového súboru a následne boli snímky opäť usporiadané, tentokrát s najvyššou presnosťou. Ďalej boli skontrolované RMS chyby jednotlivých vlícovacích bodov. Najväčšie chyby dosahovali hlavne body na okrajoch snímok postihnuté veľkými distorziami. Po úprave polohy, resp. vylúčení niektorých markerov z výpočtu bola ešte použitá funkcia *Optimize*, pri ktorej program optimalizuje a spresňuje výpočet prvkov vonkajšej orientácie a súradníc *tie points* v mračne bodov (Agisoft LLC, 2014). Poloha a rozmiestnenie jednotlivých GCP je znázornená v prílohe č. 1.

Následne bolo vygenerované husté mračno bodov pomocou príkazu ***build dense cloud***, pričom ide o časovo najnáročnejší výpočet. Manuál Agisoftu (Agisoft LLC, 2014) uvádza, že program je schopný generovať veľmi husté mračno, ktorého hustota je porovnateľná s mračnami z laserového skenovania. Hustota závisí od nastavenia parametra *Quality* od *Lowest* až po *Ultra High*, pričom v tomto prípade bola vzhľadom na výpočtovú náročnosť zvolená stredná kvalita (*medium*). Ešte pred vytvorením 3D modelu je žiaduce odstrániť z hustého mračna bodov nesprávne generované body, ktoré môžu vzniknúť pod farebne homogénnymi plochami (napr. vodná hladina), alebo na okrajoch mračna (vid' obr. č. 16). Chybné body je možné označiť v pracovnom prostredí najjednoduchšie voľným výberom a vymazať, vďaka čomu nebudú brané do úvahy pri tvorbe 3D modelu.



Obr. č. 16: Príklad chybně generovaných bodov v dense point cloud.

Ďalším krokom je vytvorenie 3D modelu – **build mesh**. Program z bodov hustého mračna generuje spojené polygónové plôšky. Dovoľuje pritom nastaviť dvojaký postup spracovania – *arbitrary* a *height field*, pričom prvý z nich je vhodný na modelovanie 3D objektov, napr. sôch či budov, naopak druhý spomenutý je vhodný práve pre plošné povrchy a je odporúčaný pre spracovanie leteckých snímok (Agisoft LLC, 2014). Okrem tejto možnosti sa dá opäť nastaviť aj úroveň kvality, pričom bola nastavená najvyššia možná. Vytvorený *mesh* môže byť následne texturovaný príkazom **build texture**. Ten opäť ponúka viaceré parametre, pričom bola vybraná možnosť spracovania ako *adaptive orthophoto*, pri ktorom program vytvára textúru osobitne pre ploché povrchy s využitím ortografickej projekcie, ale osobitne aj pre vertikálne povrchy, aby si v týchto oblastiach textúra zachovala svoju presnosť.

Záverečným krokom spracovania v Agisofte PhotoScan bol export výsledných produktov pre obidve sady snímok, tzn. rektifikovanej ortofotosnímkou a digitálneho modelu terénu, obidve vo formáte TIFF. Z programu je ešte možné vygenerovať reporty, kde sú zhrnuté parametre spracovania vrátane chýb jednotlivých GCP. Ďalšie spracovanie produktov prebiehalo v programe ArcGIS.

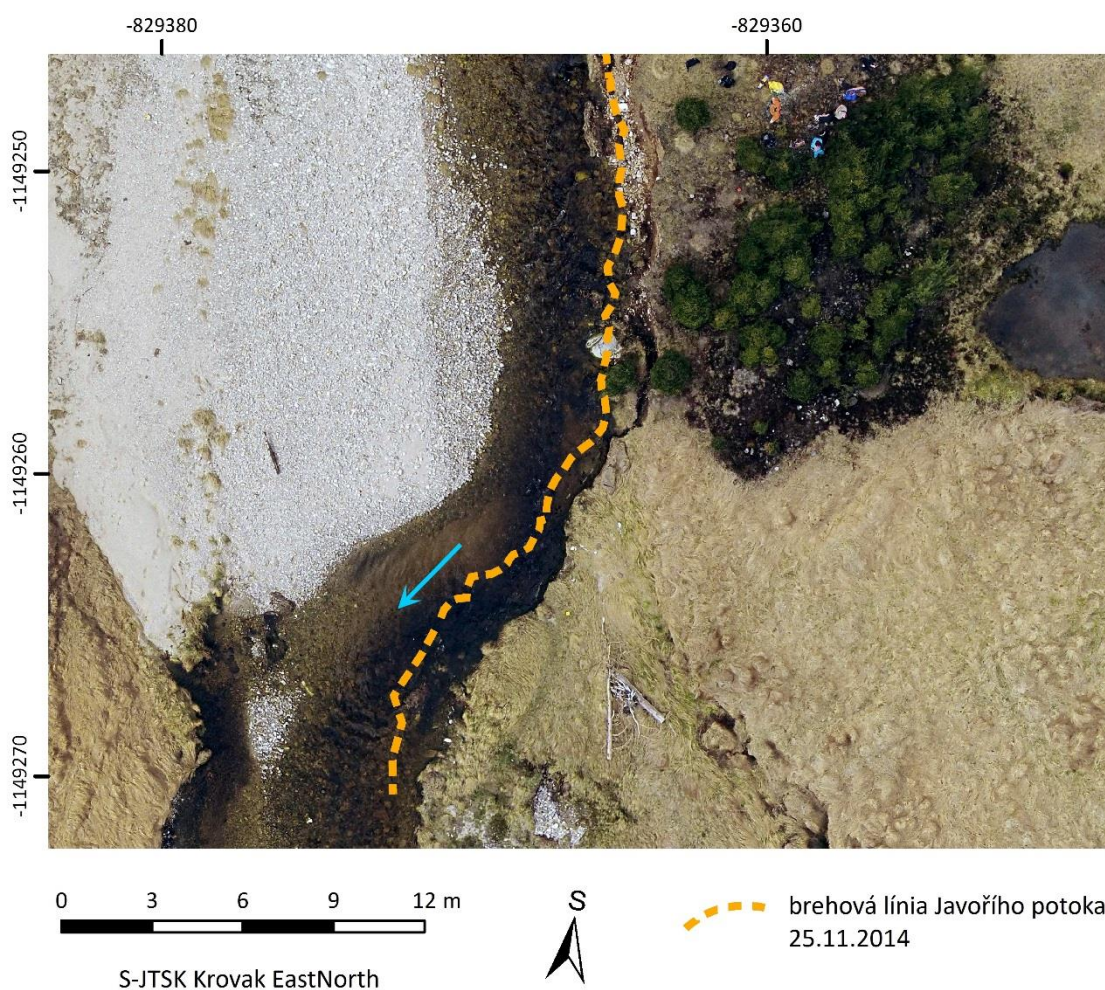
5.2 Výsledky

Pre obidva snímkovacie termíny boli z Agisofu PhotoScan úspešne exportované ortofotosnímkou i digitálne modely terénu. Hodnotenie ich presnosti je zobrazené v tab. č. 3. Podarilo sa vygenerovať produkty so subdecimetrovou presnosťou jednotlivých súradníc, čo je vzhľadom na charakter použitých dát uspokojivé. Rozmer jedného pixelu ortofotosnímkou pre prvý snímkovací termín je 0,72 cm, pre druhý termín je to 1,14 cm. Horšie rozlíšenie v druhom prípade je spôsobené vyššou letovou výškou UAV, napriek tomu je rozlíšenie oboch produktov mimoriadne vysoké.

Tab. č. 3: Presnosť spracovania snímok.

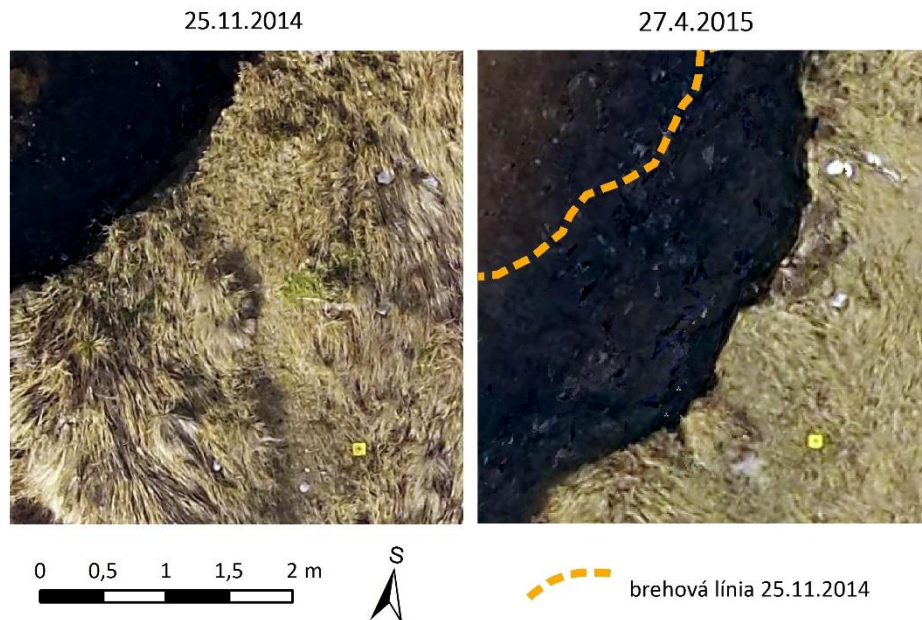
Snímkovací termín	Počet snímok	Počet GCP	RMSE				
			X [m]	Y [m]	Z [m]	celková	[pix]
25.11.2014	39	8	0,0329	0,0549	0,0258	0,069	0,78
27.4.2015	26	8	0,0728	0,0456	0,0645	0,1075	0,55

Pri porovnaní ortofotosnímkov a digitálnych modelov reliéfu bolo možné identifikovať viaceré geomorfologické zmeny. Na niekoľkých miestach sú rozpoznateľné výrazné erózne tvary v podobe brehových nátrží a tiež zmeny rozmerov korytových akumulácií. Brehová línia počas prvého snímkovacieho termínu bola zvektorizovaná a použitá v niekoľkých mapách. Pre lepšiu orientáciu boli vyčlenené dva úseky, kde sa fluvialna činnosť prejavuje najvýraznejšie. Boli označené ako úseky A a B, ich lokalizácia je znázornená v prílohe č. 2.



Mapa č. 1: Detail úseku A na ortofotosnímkovke z 27.4.2015.

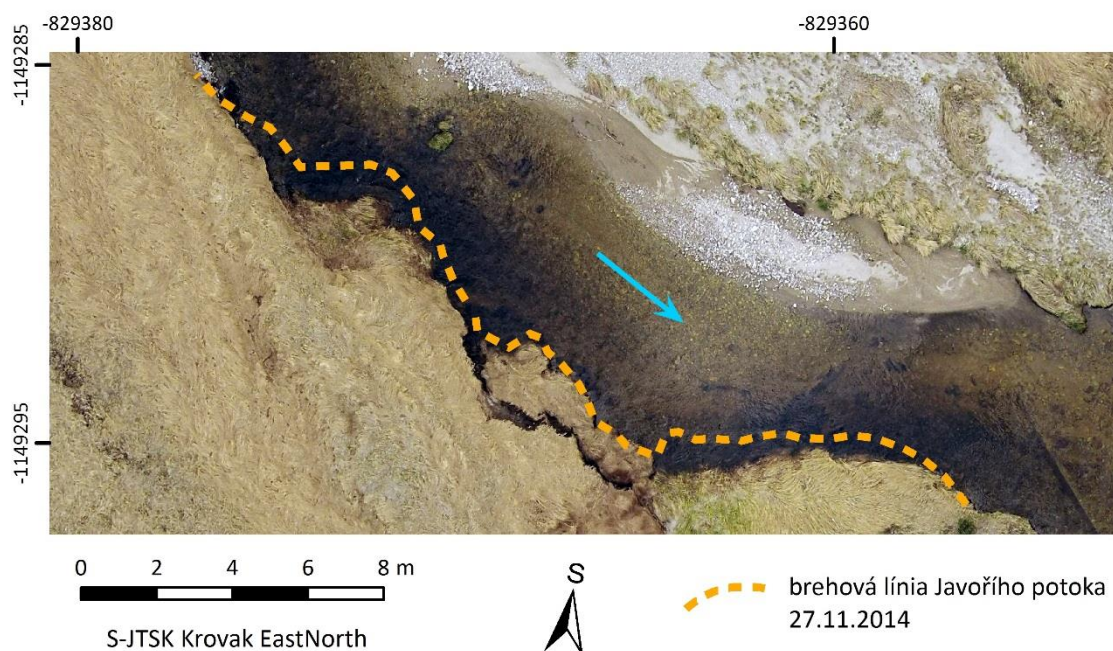
Na mape č. 1 je znázornený detail ortofotosnímků z 27.4.2015, kde je vyznačený priebeh brehovej línie Javořího potoka z prvého snímkovacieho termínu. Vodný tok na týchto miestach destabilizuje svoj ľavý breh (tok tečie južným smerom), čo má za následok zrútenie blokov pôdy a hornín do koryta (obr. č. 17). Časť z tohto erodovaného materiálu zostáva v koryte, a to najmä v severnejšej časti, kde je tok širší a plytší. Naopak z miest o pár metrov ďalej, kde tok bočí doprava a koryto sa prehĺbuje, je erodovaný materiál už transportovaný ďalej po prúde. V týchto miestach sa bočná erózia toku v rámci celého záujmového územia prejavuje najvýraznejšie, pretože tu v priebehu 5 mesiacov došlo k posunutiu brehovej línie maximálne až o 2 m. Zároveň je na tomto mieste činnosťou toku ohrozený aj jeden z fixných kontrolných bodov, ktorý sa už v súčasnosti nachádza len 1 m od brehu. V prípade pokračovania erózných procesov preto môže tento bod už v priebehu budúceho roka zaniknúť. Situácia je názorne ukázaná na mape č. 2, kde je daný kontrolný bod viditeľný ako malý žltý štvorec v pravom dolnom rohu výrezov.



Mapa č. 2: Približovanie koryta k fixnému bodu č. 02.



Obr. č. 17: Brehová nátrž na úseku A. (vlastná tvroba)



Mapa č. 4: Detail úseku B na ortofotosnímke z 27.4.2015.

5.3 Diskusia

V rámci praktickej časti práce boli spracované dve sady snímok úseku Javořího potoka z 25.11.2014 a 27.4.2015. Spracovanie prebehlo metódou Structure from Motion v programe Agisoft PhotoScan. Prostredie tohto programu je užívateľsky veľmi priaznivé. V spracovaní boli použité snímky z nekalibrovanej kamery s tým, že prvky vnútornej a vonkajšej orientácie mali byť zistené automaticky v programe PhotoScan. Ten na rekonštrukciu 3D modelu potrebuje informácie z EXIF súboru každej snímky o ohniskovej vzdialenosti (Agisoft LLC, 2014). Spracovanie snímok z nekalibrovaných kamier bolo však prevedené skôr v experimentálnej rovine. Autori venujúci sa problematike odporúčajú pri UAV fotogrametrii používať kalibrované kamery (Miřijovský, 2013, Řehák, 2012), čo by malo zabezpečiť čo najlepšiu presnosť. Presnosť spracovania, ktorá bola dosiahnutá v praktickej časti tejto práce je ale vzhľadom na charakter dát veľmi dobrá, keďže stredná kvadratická chyba súradníc GCP bodov dosahuje subdecimetrové hodnoty. Rozlíšenie výsledných produktov je taktiež na výbornej úrovni, čo bolo spôsobené nízkou letovou výškou, ktorá činila priemerne okolo 25, resp. 30 m pre prvý, resp. druhý termín.

Na cca 150 m dlhom úseku Javořího potoka boli identifikované viaceré zmeny, pričom na ich kvantifikáciu boli použité nástroje programu ArcGIS. Podrobnejšie boli opísané dva úseky v rámci riešeného územia, na ktorých boli zistené brehovú nátrže. V úseku

A maximálny rozsah laterálnej erózie dosiahol až 2 m. Zároveň je porovnaním digitálnych modelov terénu možné identifikovať miesta ukladania sedimentov. Je pravdepodobné, že erózia výsekových brehov i sedimentácia bude ďalej pokračovať. Určitými neistotami sú postihnuté časti digitálneho modelu terénu, ktoré sú zaplavené riečnym korytom, pretože z dôvodu nedostatku potrebných dát neboli použité žiadne špeciálne metódy na modelovanie batymetrie. Reliéf koryta bol teda ponechaný v stave, ako ho spracoval Agisoft PhotoScan. Vzhľadom na malú hĺbku Javořího potoka však nie sú predpokladané veľké chyby spôsobené lomom svetla na rozhraní vody a vzduchu.

Spracovanie dát teda potvrdilo, že použitie nízkonákladových, neprofesionálnych prostriedkov a malých UAV je využiteľné v hydromorfológii pri zachovaní uspokojivej presnosti. Pokiaľ však požadujeme maximálnu presnosť, je potrebné uvažovať o využití kvalitnejších kamier. Pre polohovú presnosť výsledných produktov je kľúčová presnosť zamerania vlčovacích bodov, ktoré musia byť zamerané pokročilými prístrojmi.

6 ZÁVER

Bezpilotné letecké prostriedky sa stali pomerne často využívaným nástrojom získavania dát v rôznych geografických disciplínach. Za svoj úspech vďaka aj tomu, že dokázali využiť voľný priestor „na trhu“ medzi pozemnými meraniami a leteckým snímokovaním. Poskytli tak účinnú možnosť, ako riešené územie zmapovať za pomerne krátky čas pri vysokom rozlíšení. Neznamená to však, že majú doterajšie metódy zberu geodát nahradiť. Vývoj UAV a nástrojov, ktoré môže niest, stále prebieha. Perspektívne môže byť napr. použitie leteckého LiDARu, ktoré bolo doteraz limitované malou nosnosťou platforiem. Nosnosť je významnou limitáciou, pretože núti používateľa používať neprofesionálne snímače, čo má dopady na presnosť spracovania dát.

Potenciál využitia vo fluvialnej geomorfológii dokazuje množstvo zahraničných i domácich výskumov. Je možné nielen mapovať stav riečneho prostredia, ale pri existencii časovej rady snímaní aj vyhodnotiť geomorfologické prejavy fluvialnej činnosti. V praktickej časti práce bola úspešne otestovaná rekonštrukcia úseku Javořího potoka a jeho nivy pomocou metódy Structure from Motion. Tá sa javí ako veľmi efektívny a perspektívny nástroj.

Ciele práce stanovené v úvode boli splnené a zistené teoretické východiská môžu poslúžiť ako odrazový mostík pre ďalšie štúdium problematiky.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- ABER, J. S., MARZOLFF, I., RIES, J. B. (2010). *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience applications*. 1. vyd. Elsevier Science. 268 s.
- COLOMINA, I., MOLINA, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, s. 79–97.
- ČURDA, J., JANSKÝ, B., KOCUM, J. (2011). Vliv fyzickogeografických faktorů na extremitu povodní v povodí Vydry. *Geografie*, 116, č. 3, s. 335–353.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. (2011). Monitoring soil erosion in the Souss basin, Morocco, with a multiscale object-based remote sensing approach using UAV and satellite data. *Proceedings of the 1st World Sustainability Forum*, 1-30 November 2011, 13 s.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., PETER, K.D., RIES, J.B. (2012). Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4, č. 11, s. 3390–3416.
- EISENBEISS, H. (2009). UAV photogrammetry. Dissertation thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 199 s.
- EISENBEISS, H. (2011). The Potential of Unmanned Aerial Vehicle for Mapping. *Photogrammetrische Woche*, Dieter Fritsch (Ed.), Wichmann Verlag, Heidelberg, s. 135–145.
- FLENER, C. et al. (2013). Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography. *Remote Sensing*, Vol. 5, issue 12, s. 6382-6407.
- FLENER, C., LOTSARI, E., ALHO, P., KÄYHKÖ, J. Comparison of empirical and theoretical remote sensing based bathymetry models in river environments. *River research and applications*, 28, s. 118-133.
- HERVOUET, A., et al. (2011). Analysis of Post-flood Recruitment Patterns in Braided-Channel Rivers at Multiple Scales Based on an Image Series Collected by Unmanned Aerial Vehicles, Ultra-light Aerial Vehicles, and Satellites. *GIScience & Remote Sensing*, 48, s. 50-73.
- HOSSAIN, A., GAN, T.Y., BAKI, A.B. (2013). Assessing morphological changes of the Ganges River using satellite images. *Quaternary International*, vol. 304, s. 142-155.
- ICAO (2011). Unmanned aircraft systems. International Civil Aviation Organization circular 328, AN/190. Dostupné na:
<<http://www.icao.int/Meetings/UAS/Pages/UAS-Documents.aspx>> [cit. 1.4.2015]
- KŘÍŽEK, M., ENGEL, Z. (2008). Geomorfologické projevy povodní. Příkladová studie povodně 2002 v povodí Otavy. In Langhammer, J. (editor): Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní. Praha, UK v Praze, s. 194-213.
- KŘÍŽOVÁ, A. (2014). UAV snímkování a jeho aplikace ve fyzické geografii: Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 70 s.

- LANGHAMMER, J. (2008). Mapování upravenosti toků, údolní nivy a následků povodní v povodí Opavy. In Langhammer, J. (editor): Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní. Praha, UK v Praze, s. 194-213.
- LEJOT, J., et al. (2007), Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, s. 1705–1725.
- MARCUS, W.A., FONSTAD, M.A. (2008). Optical remote mapping of rivers at sub-meter resolutions and watershed extents. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 33, s. 4-24.
- MARCUS, W.A., FONSTAD, M.A. (2010). Remote sensing of rivers: the emergence of a subdiscipline in the river sciences. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, s. 1867-1872.
- MARZOLFF, I., RIES, J. B. (2007). Gully monitoring in semi-arid landscapes. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51/4, s. 405–425.
- MÍŘIJOVSKÝ, J. (2013). Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení: Disertační práce. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. 144 s.
- MÍŘIJOVSKÝ, J. et al. (2015). Spatiotemporal evolution of a unique preserved meandering system in Central Europe — The Morava River near Litovel. *Catena*, 127, s. 300-311.
- MÍŘIJOVSKÝ, J., LANGHAMMER, J. (2015). Multitemporal monitoring of the morphodynamics of a mid-mountain stream using UAS photogrammetry. *Remote Sensing*. 25 s. (in print).
- MÍŘIJOVSKÝ, J., PECHANEC, V., BURIAN, J. (2012): Using the Remote-Controlled Drone PIXY for Capturing Landscape Images. *Informace ČGS*, 31, č. 1, s. 11–17.
- NAGAI, M., CHEN, T., AHMED A., SHIBASAKI, R. (2013). UAV Borne Mapping System for River Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, č. 3, s. 701–708.
- NIETHAMMER, U. et al. (2010). UAV-based remote sensing of landslides. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, s. 496–501.
- PAVELKA, K. (2003). Fotogrammetrie 10. 2 vyd. Praha: ČVUT, 194 s.
- RIES, J. B., MARZOLFF, I. (2003) Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp. *Catena*, vol. 50, s. 309-328.
- ŘEHÁK, M. (2012). Využití bezpilotních prostředků ve fotogrametrii: Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. 91 s.
- SLÁDEK, J., RUSNÁK, M. (2013). Nízkonákladové mikro-UAV technologie v geografii (Nová metoda zberu priestorových dát). *Geografický časopis*, 65, s. 269-285.
- SMITH, M. J., CHANDLER, J., ROSE, J. (2009). High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 34, s. 155–161.

TAMMINGA, A., et al. (2015). Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. *River research and applications*, vol. 31, s. 379-391.

TAMMINGA, A., EATON, B.C., HUGENHOLTZ, C.H. (2015b). UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event. *Earth Surface Processes and Landforms*. Dostupné na: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3728/epdf>>

VAN BLYENBURGH, P. (2014). 2014 RPAS Yearbook – The Global Perspective. 12th edition, Blyenburgh & Co. 240 s.

VILÍMEK, V. (2007). Vliv extrémních povodní na reliéf krajiny. In Langhammer, J. (editor): *Povodně a změny v krajině*. Praha: PřF UK a MŽP ČR, s. 199-207.

WESTAWAY, R. M., LANE, S. N., HICKS, D. M. (2001). Remote sensing of clearwater, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, No. 11, s. 1271–1281.

WESTOBY, M.J. et al. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, s. 300-314.

WOODGET, A.S., CARBONNEAU, P.E., VISSER, F., MADDOCK, I.P. (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, s. 47-64.

YAN, W.Y., SHAKER, A., EL-ASHMAWY, N. (2014). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote sensing of Environment*, 158, s. 295-210.

Internetové zdroje

ABER, J.S. [online]. Helium Blimp for SFAP. Dostupné na:
<<http://academic.emporia.edu/aberjame/airphoto/blimp/blimp.htm>> [cit. 20.5.2015]

Agisoft LLC (2014) [online]. Agisoft PhotoScan User Manual. Dostupné na:
<http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_1_en.pdf> [cit. 20.6.2015]

DJI [online]. Phantom 2 Vision+. Dostupné na:
<<http://www.dji.com/product/phantom-2-vision-plus>> [cit. 20.6.2015]

European comission (2014) [online]. Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Dostupné na: <<http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/aerospace/uas/>> [cit. 3.1.2015]

Európska komisia (2014) [online]. Nová éra letectva. Oznámenie komisie európskemu parlamentu a rade. 9 s. Dostupné na:
<[http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/com\(2014\)207_sk.pdf](http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/com(2014)207_sk.pdf)> [cit. 20.6.2015]

MaVinci SIRIUS UAS [online]. *UAVGlobal*. Dostupné na:
<<http://www.uavglobal.com/mavinci-sirius-uas/>> [cit. 1.5.2015]

Ministerstvo dopravy ČR [online]. Doplněk X – Bezpilotní systémy. Letecké předpisy řady L. Dostupné na: <<http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>> [cit. 1.6.2015].

NASA (2013). NASA Flies Dragon Eye Unmanned Aircraft Into Volcanic Plume. Dostupné na:
<http://www.nasa.gov/topics/earth/earthmonth/volcanic-plume-uavs.html> [cit. 1.4.2015].

UPOL [online]. Pixy Drone pro letecké snímkování krajiny. Katalog přístrojů a služeb. Univerzita Palackého v Olomouci. Dostupné na:
<<http://www.upol.cz/struktura-up/univerzitni-zarizeni/vedeckotechnicky-park/katalog/?ctl=device&ctlid=224&idLng=cz>> [cit. 10.6.2015]

VÚGTK [online]. Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí. Dostupné na: <<http://www.vugtk.cz/slovník/index.php>> [cit. 10.6.2015]

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č. 1: Ortofotosnímka úseku Javořího potoka, 25.11.2014.

Príloha č. 2: Ortofotosnímka úseku Javořího potoka, 27.4.2014.