

**Univerzita Palackého v Olomouci**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra geoinformatiky**

**FOTOGRAMMETRICKÝ PŘÍSTUP  
PŘI SBĚRU GEODAT POMOCÍ  
BEZPILOTNÍCH LETECKÝCH ZAŘÍZENÍ**

**Disertační práce**

**RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ**

**Vedoucí práce: Prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.**

**Olomouc 2013**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci doktorského studia oboru Geoinformatika a kartografie vypracoval samostatně pod vedením Prof. RNDr. Víta Voženíleka, CSc.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví.

Všechna poskytnutá i vytvořená digitální data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci 30. ledna 2013

---

Děkuji vedoucímu práce prof. RNDr. Vítovi Voženílkovi, CSc. za podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji Mgr. Lubošovi Bělkovi, Ph.D. za cenné rady během zpracování práce. V neposlední řadě děkuji kolegům z Katedry geoinformatiky za pomoc při práci v terénu.

Speciální poděkování patří manželce Martě za její trpělivost, pomoc a podporu.

# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	6
ÚVOD .....	8
<b>1 CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>10</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>12</b>
2.1 Fotogrammetrie.....	12
2.1.1 Dělení fotogrammetrie .....	13
2.1.2 Matematické řešení stereofotogrammetrie .....	15
2.2 Historie UAV .....	19
2.3 UAV platformy .....	20
2.4 UAV fotogrammetrie .....	23
2.5 Aplikační oblasti UAV systémů .....	24
<b>3 KONCEPT NAsAZENÍ UAV TECHNOLOGIÍ .....</b>	<b>26</b>
3.1 Návrh konceptu.....	26
3.2 Koncept.....	26
3.3 Struktura práce a popis konceptu.....	27
<b>4 VÝCHODISKA UAV FOTOGramMETRIE .....</b>	<b>30</b>
4.1 Letecký nosič .....	30
4.1.1 Povolené frekvence .....	30
4.1.2 První experimenty .....	30
4.1.3 Paraglidový model PIXY .....	31
4.1.4 Hexakopter XL.....	33
4.2 Software.....	35
4.3 Kamera a její kalibrace.....	36
4.3.1 Kamera .....	36
4.3.2 Kalibrace.....	37
4.4 Personál a znalosti.....	43
<b>5 LEGISLATIVA PRO PROVOZ UAV .....</b>	<b>44</b>
5.1 Provoz bezpilotních systémů .....	44
5.2 Prostory pro provádění letu .....	45
<b>6 PLÁN LETU A PŘÍPRAVA NA SNÍMKOVÁNÍ.....</b>	<b>48</b>
6.1 Kontrola lokality a povolení k letu .....	48
6.2 Stanovení parametrů pro snímkování.....	50
6.3 Waypointy a letové osy .....	55
6.4 Meteorologická situace a světelné podmínky.....	57
6.4.1 Meteorologická situace.....	58

6.4.2	Světelné podmínky .....	61
<b>7</b>	<b>TERÉNNÍ PRÁCE A SNÍMKOVÝ LET .....</b>	<b>65</b>
7.1	Shromáždění a kontrola vybavení .....	65
7.2	Vlícovací body .....	66
7.2.1	Typy vlícovacích bodů .....	66
7.2.2	Rozmístění a počet vlícovacích bodů .....	68
7.2.3	Zaměření vlícovacích bodů .....	72
7.3	Nastavení kamery .....	74
7.3.1	Expoziční parametry .....	75
7.3.2	Ostření kamery .....	76
7.4	Snímkový let .....	78
7.4.1	Předletová příprava .....	78
7.4.2	Start .....	78
7.4.3	Let .....	79
7.4.4	Přistání .....	81
7.4.5	Kontrola dat .....	82
<b>8</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ DAT .....</b>	<b>85</b>
8.1	Stereofotogrammetrické zpracování dat .....	85
8.1.1	Aerotriangulace .....	85
8.1.2	Extrakce bodů .....	88
8.1.3	Tvorba 3D modelu .....	92
8.1.4	Ortogonalizace snímku .....	97
8.2	Zpracování dat metodou „Structure from Motion“ .....	97
<b>9</b>	<b>PŘESNOST VÝSTUPŮ .....</b>	<b>101</b>
9.1	Referenční datový zdroj .....	101
9.2	Stereofotogrammetrie a SfM .....	102
9.2.1	Přesnost digitálních 3D modelů .....	102
9.2.2	Přesnost ortogonalizovaných snímků .....	104
9.3	Porovnání s leteckým laserovým skenováním .....	105
9.3.1	Laserové skenování .....	106
9.3.2	Porovnání 3D modelů s laserovým skenováním .....	106
<b>10</b>	<b>PŘÍPADOVÉ STUDIE .....</b>	<b>108</b>
10.1	Fluviální geomorfologie .....	108
10.1.1	Kenický meandr .....	108
10.1.2	Břehová nátrž – Štěpánov .....	116
10.1.3	Břehová nátrž – Moravičany .....	122
10.2	Archeologie .....	127

10.2.1 Přeložka silnice I/44.....	127
10.2.2 Hrad Tepenec.....	130
<b>11 VÝSLEDKY .....</b>	<b>134</b>
<b>12 DISKUZE .....</b>	<b>140</b>
<b>13 ZÁVĚR .....</b>	<b>143</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE</b>	
<b>SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA</b>	
<b>SEZNAM ILUSTRACÍ</b>	
<b>SEZNAM TABULEK</b>	
<b>SUMMARY</b>	
<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
AAT	Automatic Aerial Triangulation
AFIS	Aerodrome Flight Information Service
AGL	Above Ground Level
ASPRS	American Society of Photogrammetry and Remote Sensing
ATZ	Aerodrome Traffic Zone
BL-Ctrl	Brushless Control
CTR	Control Zone
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSAV	Československá akademie věd
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DMP	Digitální model povrchu
DN	Digital Number
DPZ	Dálkový průzkum Země
ETRS-89	European Terrestrial Reference System 1989
FL	Flight Level
GND	Ground
GSD	Ground Sample Distance
CHKO	Chráněná krajinná oblast
I2C	Eye-Squared Cee
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMU	Inertial Navigation Unit
INS	Inertial Navigation System
MK-GPS	MikroKopter - Global Positioning System
Navi-Ctrl	Navigation Control
NOTAM	Notice To Airmen
NPR	Národní přírodní rezervace
OSD	On-Screen Display
PPM	Pulse-Position Modulation
PR	Přírodní rezervace
RGB	Red, Green, Blue
RMSE	Root Mean Square Error

RTCM	Real Time Correction Messages
RTK	Real Time Kinematics
ŘLP	Řízení letového provozu
SFAP	Small Format Aerial Photography
SfM	Structure from Motion
SMO-5	Státní mapa 1 : 5 000, odvozená
TMA	Terminal Control Area
TRA	Temporary Reserved Area
TSA	Temporary Segregated Area
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USM	Ultra Sonic Motor
VFR	Visual Flight Rules
VGHMúř	Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad
WGS-84	World Geodetic System 1984
WMS	Web Map Service
ZABAGED	Základní báze geografických dat



## ÚVOD

V dnešní době je naprosto běžné používat v geovědním výzkumu data dálkového průzkumu Země (DPZ). Jde o neustále se rozvíjející obor, který nachází uplatnění v mnoha oborech a odvětvích, ať už vědecké či komerční sféry. Snímkování se v DPZ provádí v různých výškových hladinách. Lze snímkovat z výšky 700 km nad zemským povrchem, ale také z plošin, které mají výšku nižší než 30 m nad povrchem terénu. Každá úroveň sběru dat pomocí DPZ má své opodstatnění. Zatímco data o vývoji atmosférických frontálních systémů je nutné pořizovat z velmi vysoké výšky, tak naopak pro potřeby snímkování archeologické lokality malých rozměrů je vhodné volit velmi malou výšku letu. A právě snímkování z nízkých výšek letu je středem zájmu této disertační práce.

Při snímkování z výšek maximálně 30 metrů nad povrchem je možné použít visutých plošin, případně snímkovat z vysokých budov a věží. Pokud je nutné získat snímky z větší výšky, je potřeba použít modelů letadel nebo jiných platforem schopných snímkovat ve výškách kolem 100 m. Dle Úřadu pro civilní letectví se totiž běžný letecký provoz může pohybovat až od výšky 100 m nad povrchem terénu. Proto pro výšky nižší než zmiňovaných 100 m může být s úspěchem použito dálkově ovládaných modelů, ať už v manuálním, nebo automatickém režimu. Horní výšková hranice, ve které lze model ve většině případů legálně použít, je 300 m nad terénem. Všechny úrovně a mechanismy sběru dat mají své nesporné klady a zápory. I snímkování s pomocí dálkově řízených modelů má své výhody a nevýhody.

Mezi nejdůležitější nevědecké přínosy pro odborníky z různých oborů patří cena a operabilita. Velmi cenné vědecké poznatky přináší zejména kombinace pozemních metod s přidáním vizuální informace ze snímkování z modelů. Vlastní tvorba leteckých fotografií nabízí maximální operabilitu jak časovou, tak i technickou. Technické parametry kamery a nosiče umožňují volit nejen čas a místo snímkování, ale také úhel snímkování, šířku záběru nebo nastavení expozice. Vlastní snímkování přináší velké výhody při výzkumu v oblastech, kde je nezbytné použít letecké snímky s velmi vysokým rozlišením a vysokou geometrickou kvalitou. V takovém případě se snímky z nízkých výšek stávají neocenitelným zdrojem dat. S potřebou získávat velmi přesné a geometricky kvalitní snímky vyvstává celá řada vědeckých otázek kolem kalibrací kamer, rozmístění vličovacích bodů nebo letových vlastností modelů samotných. Výsledné produkty pak nacházejí uplatnění v širokém spektru odborných disciplín od geomorfologie, přes zemědělství až po archeologii. Věda získává nový nástroj a metody pro získávání velmi přesných leteckých dat. Nástroj se tak stává součástí geoaplikací, ve kterých může pomoci při hledání odpovědí na geografické a analytické otázky.

Každý systém, každá technologie má nejen výhody, ale i nevýhody. Největší nevýhodou je omezení letového prostoru. Snímkování z malých výšek pomocí modelů je proto využitelné a efektivní zejména pro snímkování oblastí malého prostorového rozsahu. Další nevýhodou modelů je poměrně vysoká citlivost na meteorologické podmínky (zejména za silného větru není možné létat). Neudržení přímého směru při

silném větru způsobuje nedodržení jak horizontální, tak vertikální osy letu, což má za následek složitější zpracování v laboratoři. Na druhou stranu při srovnání snímkování pomocí bezpilotních modelů s konvenčním leteckým snímkováním nabízí snímkování z modelů podstatně více letových dní. V případě dodržení pravidel a podmínek specifických pro oblast blízké letecké fotogrammetrie lze získat vynikající výsledky s vysokou geometrickou přesností a fotografickou kvalitou. Snímkování pomocí bezpilotních leteckých zařízení nelze v žádném případě chápat jako prostředek, který může nahradit letecké nebo dokonce družicové snímkování či skenování. Tato relativně nová technologie musí být vždy chápána pouze jako doplněk různých úrovní sběru dat. Bepilotní systémy vyplňují prostor mezi leteckým snímkováním a pozemním geodetickým měřením.

Bepilotní letecká zařízení se běžně v odborné literatuře označují zkratkou UAV (Unmanned Aerial Vehicle). UAV technologie je založená na používání leteckých modelů bez lidské posádky v zařízení (Dunford, 2009). První bepilotní zařízení bylo vypuštěno již v roce 1916 (Rango et al., 2006). Tehdejší prostředky a technologie ovšem neumožňovaly použití v oboru fotogrammetrie. S postupným rozvojem techniky však UAV modely pronikly i do této oblasti. V současné době lze tedy UAV fotogrammetrii chápat jako relativně nový fotogrammetrický nástroj pro velmi přesné měření.

SFAP (Small Format Aerial Photography) je maloformátové letecké snímkování, které používá filmové materiály o velikosti 35 nebo 70 mm, nebo jejich ekvivalenty v podobě digitálních kamer. Aber, et al. (2010) uvádí, že maloformátových filmových materiálů či digitálních čipů v kamerách lze využít jak v pilotních, tak i v bepilotních zařízeních. Poměrně široká definice UAV zahrnuje mnoho platforem jako jsou letadla, vrtulníky, heliové balóny, motorové paraglidy apod. Pokud se použije pojem UAV fotogrammetrie, je nutné doplnit, že je absolutně nezbytné, aby všechny výše zmíněné platformy měly dostatečnou schopnost získávat fotogrammetrická data, a to buď manuálně, v poloautomatickém či zcela automatickém režimu.

Hlavní motivací autora byla v doktorském studiu a při psaní disertační práce snaha o zpřístupnění nových technologií, metod a postupů z oboru fotogrammetrie do jiných oblastí výzkumu. Aby k tomu mohlo dojít, bylo nezbytné sestavit koncept nasazení UAV technologií a ověřit jej na testovacích datech i na případových studiích.

# 1 CÍLE PRÁCE

Disertační práce si klade za cíl sestavit koncept nasazení UAV technologií ve fotogrametrii pro velmi přesný sběr geodat a ověřit jej na případových studiích aplikovaného výzkumu. Vytvořený koncept (kapitola 3) představuje systematicky uspořádaný soubor dílčích technologických a metodologických procedur, realizovaných při průběhu práce s UAV systémem. Jedná se zejména o:

- určení základních parametrů kamery pro použití v UAV fotogrametrii, které souvisí s použitím neprofesionálních leteckých komor (kapitola 4.3),
- analýzu míry přesnosti kalibrace kamery ve vztahu k celkové přesnosti výstupu (kapitola 8.1.1),
- volbu správného výpočtu prvků vnější orientace při absenci GPS/IMU přístroje (kapitola 8.1, 8.2),
- vliv rozmístění vřícovacích bodů na přesnost výpočtu (kapitola 7.2.2),
- analýzu vlivu atmosférických a světelných podmínek na kvalitu výstupu (kapitola 6.4),
- kvantifikování a kvalifikování všech možných prostorových chyb vstupujících do systému sběr – vyhodnocení dat (kapitoly 7, 8, 9).

K nalezení řešení předcházejících úkolů je nezbytné detailně analyzovat UAV platformy (kapitola 2.3, 4.1), které jsou výhradně provozovány s pomocí dálkového ovládání nebo v automatickém režimu. V technické části se řeší problematika frekvencí pro přenášení dat (kapitola 4.1.1). Musí být zvolena taková zařízení a frekvence, které vyhovují platné legislativě (kapitola 5) a podmínkám Českého telekomunikačního úřadu. Pozornost musí být věnována také metodám fotogrametrie, ať už v části letecké nebo zpracovatelské (kapitoly 6.2, 6.3, 8). Aerotriangulaci či kalibraci kamery nelze opomenout (kapitoly 4.3, 8.1.1). Nejvýše nezbytné je zhodnocení vhodnosti a použitelnosti vybraných platforem pro UAV fotogrametrii, které jsou schopny sestavený koncept plně realizovat v aplikovaném výzkumu. Je nutné se velmi detailně zaměřit na motorový paraglidový model a multirotorový systém, které jsou vybaveny zařízením schopným pořizovat fotogrammetrická data (kapitoly 4.1, 6.3). Zajištění správné funkčnosti zařízení vyžaduje všechny části soustavy řádně otestovat. Dílčí část výzkumu zahrnuje vypracování pěti případových studií v aplikovaném výzkumu (kapitola 10).

Výše jsou uvedeny pouze ty nejdůležitější otázky v rámci celého konceptu, které v případě nevyřešení mohou zcela znemožnit použití snímků pro fotogrammetrické zpracování. K tomu všemu je nutné řešit telemetrii, samotné technické nastavení a vybavení modelu, plán letu, expoziční parametry kamery a v neposlední řadě platnou legislativu. Pro získání fotogrammetricky a geometricky kvalitních snímků je nezbytné výše uvedené otázky analyzovat a navrhnout optimální variantu, která v co největší míře nedostatky eliminuje, což povede k získání kvalitních výstupů (kapitola 9).

První tři případové studie (kapitola 10.1) jsou součástí geomorfologického výzkumu, a to konkrétně fluviální geomorfologie. V rámci výzkumu probíhá od roku 2011 snímkování části koryta vodního toku Moravy, je zaznamenáván morfologický stav a jsou prováděny prostorové analýzy vývoje vybraných břehových nátrží. V přírodní rezervaci Kenický se sleduje meandr, u kterého došlo v průběhu trvání výzkumu k protržení.

Dvě případové studie (kapitola 10.2) jsou z oblasti archeologie, pro kterou jsou UAV platformy rovněž ideálním prostředkem pro pořizování dat. První část je věnována archeologickému výzkumu prováděnému v rámci stavby obchvatu obce Zvole. Další část se věnuje sběru dat pro záchranný archeologický průzkum lokality Tepenec, kde se v minulosti nacházel hrad. Lokalita je v současné době ohrožena těžbou kamene.

Výstupem vybraných částí případových studií jsou 3D modely terénu či povrchu lokalit, ortogonalizované snímky, fotoplány a mapy, které jsou vytvořeny na základě sběru, zpracování a vyhodnocení dat s pomocí UAV platforem za použití odborného softwarového vybavení a metod. V závěru disertační práce jsou diskutovány problémy, navrhnuty další možnosti využití, zlepšování systému a metod sběru dat pro fotogrammetrické účely.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Fotogrammetrie

UAV fotogrammetrie vychází z principů a postupů fotogrammetrie klasické a dále je upravuje pro své použití. Obor fotogrammetrie je téměř stejně starý jako fotografie samotná. Fotogrammetrii lze zařadit mezi vědní obory, zabývající se získáváním informací o předmětech na základě přesného měření bezkontaktním způsobem. Existuje více definic fotogrammetrie, ale jejich znění se v průběhu času mění v závislosti na použitých technologiích a metodách, které se stále zlepšují a zdokonalují a v závislosti na využití a zpracování výsledků. Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického materiálu (Pavelka, 2002).

Jak je zmíněno v definici fotogrammetrie, fotografie se stává prostředkem pro zaznamenání aktuálního stavu krajiny nebo objektů. Je tedy velmi důležitá a musí být na ni kladeny velmi vysoké požadavky. Slovo fotografie vychází ze složení dvou řeckých slov fotos (světlo) a graphos (kresba). Klasická fotogrammetrie vycházela v celé své dlouhé historii z analogového fotografického záznamu. Obraz je v tomto případě ukládán na světlocitlivé vrstvy filmu, které jsou následně vyvolány v laboratoři a zvětšeny na fotografický papír. Snímkovalo se na velkoformátové komory a výsledný snímek měl nejčastěji velikost 23 x 23 cm. V dnešní době se již téměř výhradně používají v mnoha ohledech výhodnější digitální kamery. Pro získání fotografie lze použít zařízení s různou výstupní přesností, od běžných digitálních fotoaparátů až po speciální měřické komory určené pro fotogrammetrické snímkování. V případě použití digitální fotogrammetrické komory slouží pořízený snímek jako digitální reprezentace reality. Fotogrammetrie se zabývá měřičským vyhodnocením bodů na snímku, kdy na základě jejich polohy na snímku lze odvozovat tvar, velikost, umístění objektu v prostoru, vzájemnou prostorovou polohu jednotlivých bodů, vyhodnotit polohopis a výškopis a zjišťovat jejich další vlastnosti.

Pojem fotogrammetrie, který se skládá se ze slov fotos - světlo, gramma - záznam a metrie - měření, byl prvně použit v roce 1858 německým inženýrem Albrechtem Meydenbauerem. V roce 1861 Francouz Aimé Laussedat, který byl průkopníkem letecké fotogrammetrie a její aplikace v kartografii, použil fotografie povrchu k tvorbě topografických map. Od okamžiku, kdy bylo poprvé fotogrammetrie použito, uběhlo více než 150 let a během této doby prošla různorodým vývojem (Šimíček, 2012). První půlstoletí bylo ve znamení hledání uplatnění nové metody, zkoumání matematických základů a pořizování snímků. Z matematického hlediska se využívalo jen principu pozemní průsekové fotogrammetrie. Další metody v té době známy nebyly. V první polovině 20. století začal být využíván princip stereoskopie a leteckého snímkování. Jejich aplikace vedla ke konstrukci řady důmyslných analogových přístrojů pro vyhodnocení snímků a dalších inovací, které vedly ke zdokonalení fotogrammetrie.

V této době již nebyly využívány postupy průsekové fotogrammetrie, ale velmi rozšířené byly metody analogové stereofotogrammetrie. Jak uvádí Pavelka (2002) za posledních 50 let se změnila koncepce fotogrammetrie díky velkému rozvoji počítačů. Postupně, v druhé polovině 20. století, se upustilo od analogových metod a používaly se metody analytické. S ještě větším rozvojem výpočetní techniky se přešlo na metody čistě digitální, které znamenaly zásadní technologickou změnu a v současnosti jejich využití zcela převládlo. Vznikem družicové fotogrammetrie a laserového skenování ve spojení s digitální fotogrammetrií se zcela mění pohled na 3D dokumentaci objektu a prostoru.

### **2.1.1 Dělení fotogrammetrie**

Fotogrammetrii lze dělit podle různých kritérií. Pavelka (2002) používá dělení podle:

- polohy stanoviště,
- počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků,
- technologického způsobu zpracování,

#### **Dělení podle polohy stanoviště**

Z geodetického hlediska je stanoviště bod zemského povrchu, nad kterým je stroj centrován. Při aplikaci na fotogrammetrii je to v podstatě pozice kamery vůči objektu při snímání. Dle polohy stanoviště rozdělujeme fotogrammetrii na pozemní (blízkou) a leteckou.

V pozemní fotogrammetrii je stanoviště zpravidla nepohyblivé, umístěné na zemi. Při fotografování je dostatek času přesně geodeticky určit souřadnice stanoviště i prostorovou orientaci snímku. Rovněž jsou k tomu k dispozici potřebné přístroje. Zpracování pořízených snímků se tak stává jednodušší. Nedostatkem pozemní fotogrammetrie je, že jednotlivé předměty zájmu mohou být vzájemně překryty přes sebe a snímek obsahuje často značnou část nevyhodnotitelných oblastí. Pozemní fotogrammetrie je vhodná pro dokumentaci objektů, které jsou přibližně ve stejné vzdálenosti (fasády domů, strmé břehy říčních koryt apod). Její dosah záleží na konstantě komory a je maximálně 500 metrů (Böhm, 2002). Trendem poslední doby jsou speciální aplikace pozemní fotogrammetrie, které lze najít v mnoha odlišných oborech od designu až po strojírenství. Velký rozvoj v oblasti dokumentace objektů je dán cenově dostupnými digitálními kamerami a zpracovatelskými programy. Význam blízké fotogrammetrie opět stále vzrůstá a do popředí se také opětovně dostávají metody průsekové fotogrammetrie.

Při použití letecké fotogrammetrie je stanoviště pro snímání umístěno v letadle nebo na jiném pohyblivém se leteckém prostředku. Na snímku je zobrazena větší plocha území než u pozemní fotogrammetrie. Letecká fotogrammetrie má nevýhodu v podobě obtížného určení geodetických souřadnic polohy snímku v době jeho pořízení a tím pádem jsou i způsoby zpracování komplikovanější. Existují matematické postupy pro výpočet polohy a orientace snímku v době fotografování. S rozvojem techniky vznikají dokonce nové metody pro přímé georeferencování snímků už za letu. V této oblasti jsou ale ještě nedostatky, a proto je početní zpřesnění stále využíváno. Pro správné zpracování

a vyhodnocení snímků musí mít stereodvojice snímků rovnoběžnou osu záběru a směr snímkování musí směřovat do nadiru. Rovněž vzdálenost kamera - terén by měla být přibližně stejná u všech snímků.

Družicová fotogrammetrie nachází uplatnění v tvorbě fotomap. Civilní uplatnění této metody bylo umožněno po startu družice SPOT-1 v roce 1984 (Pavelka, 2002). Nejčastěji se využívá družic letících tzv. v tandemu, kdy dvě blízko sebe letící družice snímají stejné místo z rozdílných poloh. Tím je získána stereodvojice a snímky mohou být zpracovány klasickými metodami fotogrammetrie. Pro zpracování je však vyžadováno speciálních programů, které mají ve své databázi definován geometrický model snímacího zařízení. Tato metoda je považována za speciální a prostorová rozlišovací schopnost komerčních družic může dosahovat lepších hodnot než jeden metr.

### **Dělení podle počtu vyhodnocovaných snímků**

Jednosnímková fotogrammetrie je nejjednodušším typem fotogrammetrie. Při měření je využíváno přímo pořízených snímků. Na snímcích lze měřit pouze rovinné souřadnice. Nelze vytvořit stereo vjem a tím pádem není možné vyhodnocovat polohu objektů se souřadnicí Z. Z toho důvodu lze jednosnímkovou fotogrammetrii určit jen rovinné souřadnice předmětu měření. Jednosnímkovou fotogrammetrii lze použít a doporučit pouze pro objekty rovinné nebo blízké rovině. V pozemní fotogrammetrii se využívá jednosnímkových metod pro tvorbu fotoplánů rovinných objektů (např. málo členité fasády domů). V letecké fotogrammetrii, kde bývá osa záběru svislá, lze jednosnímkovou metodou vyhodnocovat polohopisnou složku mapy rovinného území.

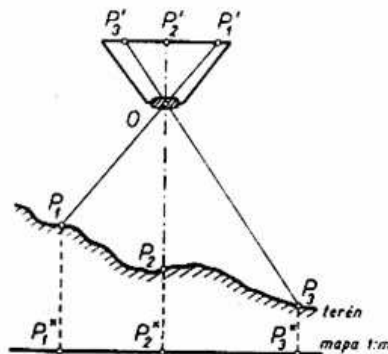
Vícesnímková fotogrammetrie slouží pro zpracování území či objektů, které nejsou rovinné. Základním požadavkem je mít alespoň dva vzájemně se překrývající snímky, přičemž předmět měření musí být zobrazen na obou snímcích. Pak lze ze snímkových souřadnic na fotografiích vypočítat jeho prostorovou složku a určit tak souřadnice X, Y a Z objektu. Využije-li se k vyhodnocení stereoskopického vjemu, jedná se o tzv. stereofotogrammetrii. Vzhledem ke své univerzálnosti je stereofotogrammetrie nejvíce využívána. Patří však zde i průseková fotogrammetrie, zabývající se zjišťováním geometrických vlastností objektů. Základním principem průsekové fotogrammetrie je protínání os měřických snímků pod velkým konvergentním úhlem.

### **Dělení podle technologického způsobu zpracování**

Podle technologického zpracování snímků lze fotogrammetrii, respektive metody zpracování, dělit na metody analogové, analytické a digitální. Hlavním rozdílem je, že se různé vstupy v podobě snímků (analogového či digitálního) zpracovávají různými přístroji. Například při analogové metodě je k vyhodnocení snímku využíváno mechanických či optických metod a u digitální metody je veškeré vyhodnocení provedeno v počítači. Rovněž početní postupy jsou odlišné. Detailní informace o matematickém řešení jednotlivých metod lze nalézt např. v Pavelka (2002) a Pavelka (2003).

## 2.1.2 Matematické řešení stereofotogrammetrie

Každá kamera využívá principu centrální projekce. Obraz reality, tedy fotografie vzniká centrální projekcí. V ideálním případě je středem promítání střed objektivu, ale v dnešní době, kdy objektivy jsou velmi složité a skládají se z několika skupin optických členů je poměrně složité určit přesný střed promítání. Poměrně jednoduché určení středu centrální projekce je u tzv. kamery obskury, která nemá žádný objektiv. Je to ve své podstatě nejčastěji dřevěná krabice, která má na jedné straně malý otvor a na protější straně je filmový materiál. Otvor reprezentuje střed centrální projekce a všechny paprsky se sbíhají do jednoho místa v tomto bodě. Z centrálního bodu se paprsky opět rozbíhají pod stejným úhlem a dopadají na filmovou podložku. V dnešních moderních digitálních kamerách je filmová podložka nahrazena CCD nebo jinými čipy. Princip centrální projekce je ukázán na obrázku 2.1. Paprsky od předmětových bodů  $P_1$ ,  $P_2$  a  $P_3$  snímaného objektu procházejí středem objektivu a pokračují na fotografickou vrstvu, na které tvoří obraz  $P'_1$ ,  $P'_2$  a  $P'_3$ .



Obr. 2.1 Centrální projekce (zdroj: Böhm, 2002).

### Prvky vnitřní a vnější orientace

V případě požadavku fotogrammetrického zpracování snímků musí být známy a matematicky popsány vybrané charakteristiky kamery a výsledného snímku. Nejdůležitější jsou dvě skupiny charakteristik, a to prvky vnitřní orientace a prvky vnější orientace.

Prvky vnitřní orientace se týkají především kamery samotné, resp. jejího objektivu. Určují vztah projekčního centra a roviny snímku. Mezi prvky vnitřní orientace patří:

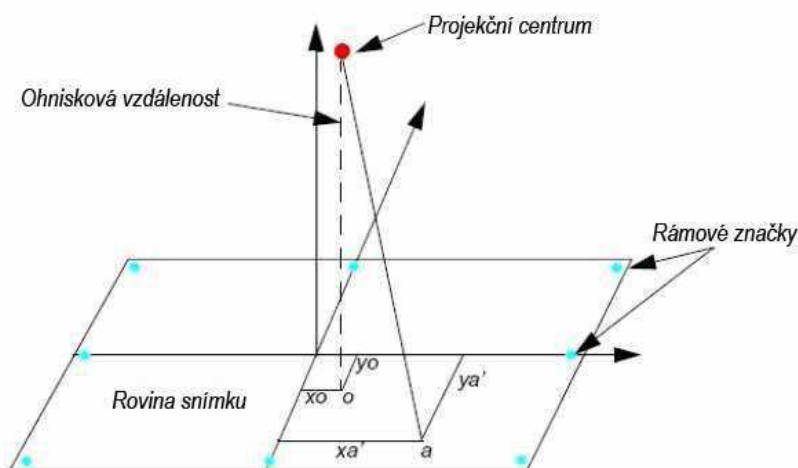
- konstanta komory,
- poloha hlavního snímkového bodu,
- průběh radiální, případně tangenciální distorze.

Konstanta komory nebo také ohnisková vzdálenost se značí malým písmenem „ $f$ “ nebo „ $c$ “. Je to údaj, který říká, jak daleko je střed optické soustavy objektivu od polohy hlavního snímkového bodu. Konstanta kamery se nejčastěji udává v milimetrech a platí, že čím je hodnota ohniskové vzdálenosti menší, tím je úhel záběru kamery větší. V konvenční letecké fotogrammetrii se nejčastěji používají ohniska kolem 150 mm.



Dalším prvkem je poloha hlavního bodu. Nejčastěji se značí písmenem „H“. Böhlm (2002) uvádí, že se jedná o polohu paty kolmice, která představuje paprsek procházející v předmětovém prostoru středním promítáním, na obrazové rovině. Podobnou definici hlavního snímkového bodu uvádí také Pavelka (2002), která říká: hlavní snímkový bod H' je definován jako průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím v předmětovém prostoru středem promítání a který je kolmý na rovinu snímku. V praxi se však většinou při zpracování dat ve fotogrammetrických aplikacích nezadáva poloha hlavního snímkového bodu, ale jeho tzv. offset, neboli vzdálenost skutečného bodu, kterým prochází průsečík od bodu ideálního.

Posledním prvkem je distorze objektivu. Distorze objektivu je významná vada, která má zásadní vliv na přesnost měření. Z hlediska typu distorze lze rozlišit distorzi radiální a tangenciální. Jedná se o vadu, která je způsobena nepřesným urovnáním konstrukčních prvků objektivu do ideální optické osy, protože dnešní objektivy se skládají z velkého množství optických prvků, které nelze přesně urovnat do ideální optické osy (Pavelka, 2002). Z tohoto důvodu dochází k rozdílu úhlu vstupujícího paprsku a úhlu vystupujícího paprsku, tzn. ohyb paprsků, a poloha zobrazovaného bodu na snímku se s drobnými odchylkami liší od správné polohy. Ohniskovou vzdálenost a polohu hlavního bodu lze vidět na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Prvky vnitřní orientace (upraveno podle Erdas, 2010).

Radiální distorze je posun bodu, který je v radiální vzdálenosti  $r'$  posunut o hodnotu  $\Delta r'$ . U moderních fotogrammetrických objektivů by hodnota radiální distorze neměla přesáhnout 10  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k rotační symetrii stačí průběh radiální distorze předpokládat (Pavelka, 2002). Tangenciální distorze je v kolmém směru na směr radiální distorze. Je způsobena především chybným sestavením a nepřesnou centrací čoček objektivu. Hodnoty tangenciální distorze u objektivů jsou většinou malé a výpočet velmi složitý. Proto se ve fotogrammetrické praxi tangenciální zkreslení zanedbává.

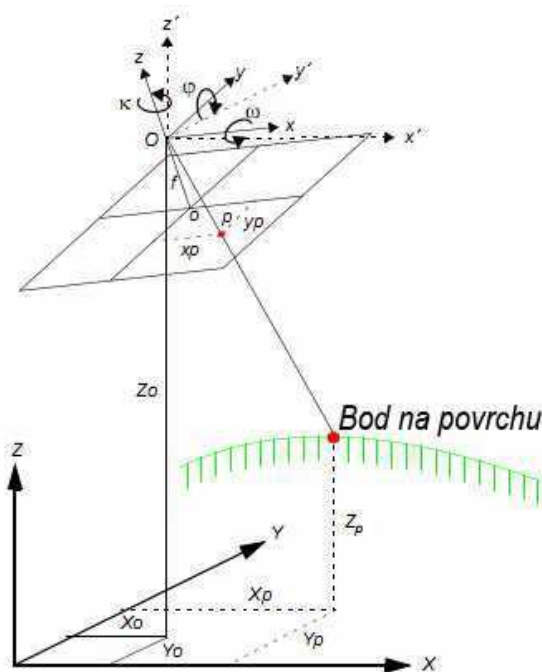
Prvky vnější orientace určují vztah projekčního centra k vnějším souřadnicím a orientaci osy záběru vůči souřadnicovým osám. V tomto případě se souřadnicovým

systemem myslí geodetický souřadnicový systém, ve kterém bude výsledek fotogrammetrického zpracování. Mezi prvky vnější orientace patří šest základních parametrů, které určují polohu fotogrammetrického svazku paprsků v prostoru. Jsou to:

- prostorové souřadnice  $X_0, Y_0, Z_0$  stanoviště,
- úhly rotace snímku kolem třech souřadnicových os  $\omega, \varphi$  a  $\kappa$ .

Směr osy záběru, resp. rotace, tzn. vodorovný úhel, který svírá průmět osy záběru s určeným stanoveným směrem je označován písmenem  $\omega$ . Sklon osy záběru, měřený ve svislé rovině od horizontály, nebo jeho doplněk měřený od vertikály, označován  $\varphi$  a pootočení, tj. úhel, který vyjadřuje otočení snímku ve vlastní rovině kolem osy záběru, označován  $\kappa$ .

Prostorové souřadnice stanoviště včetně úhlů rotace se až na výjimky považují za neznámé a je potřeba je určit početně. V současné době je však velká pozornost věnována vývoji přímému určování prvků externí orientace již za letu. To umožňují nejnovější GPS/IMU jednotky. Přesnost určení prvků vnitřní a vnější orientace je pro měření na snímcích kriticky důležitá. Početním a kalibračním postupům je potřeba věnovat náležitou pozornost.



Obr. 2.3 Prvky vnější orientace (upraveno podle Erdas, 2010).

### Rovnice kolinearity

Na základě znalosti prvků vnější a vnitřní orientace lze provést transformaci mezi souřadnicovými systémy. To je nutné, protože snímek má své vlastní snímkové souřadnice, ale výsledný zpracovaný snímek je v geodetickém souřadnicovém systému. Jako mezistupeň se dále volí tzv. modelový systém souřadnic. Transformace se provádí postupně kolem jednotlivých os  $x, y, z$  o úhly  $\omega, \varphi, \kappa$ . K transformaci slouží matice rotace a ve výsledku se všechny tři matice rotace mezi sebou vynásobí. Po dosazení výsledné

matice rotace do vzorce (4) vzniknou rovnice kolinearit (8) a (9). Existuje také inverzní tvar rovnic kolinearit. Podle toho, které z rovnic kolinearit se použijí, je možné vypočítat buď prvky vnější orientace, nebo v případě již známých prvků vnější orientace lze počítat souřadnice bodů na snímcích. Pro správný výpočet musí být dodržena tzv. podmínka kolinearit, která říká, že projekční centrum, bod v terénu a jeho obraz na snímku leží v jedné přímce.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_x R_y R_z \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \quad (2)$$

$$= \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Po dosazení matice rotace do rovnic:

$$\frac{x_p - x_0}{-f} = \frac{X_p - X_0}{Z_p - Z_0} \times \frac{y_p - y_0}{-f} = \frac{Y_p - Y_0}{Z_p - Z_0}; \quad (4)$$

které vycházejí z vektorů:

$$a = (x_p - x_0, y_p - y_0, -f); \quad (5)$$

$$A = (X_p - X_0, Y_p - Y_0, Z_p - Z_0) \quad (6)$$

kde:

$$a = k \times A \quad (7)$$

a  $k$  představuje měřítkové číslo, získáme rovnice kolinearit:

$$x = x_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (8)$$

$$y = y_0 - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (9)$$

Kompletní matematické pozadí fotogrammetrických výpočtů je mnohem složitější. V této kapitole byly uvedeny pouze nejdůležitější výpočetní operace pro základní pochopení problematiky. Detailnější informace o matematických základech fotogrammetrie lze nalézt v české i zahraniční odborné literatuře.

## 2.2 Historie UAV

Problematika UAV platforem a snímkování je ve světě i u nás poměrně značně diskutována. Ve velké většině se až do současnosti jednalo pouze o amatérské létání a snímkování, kdy výstupy sloužily pouze pro vlastní potřebu bez dalších nároků na zpracování a použití dat. V lepším případě se jedná o skupiny archeologů, kteří používají snímky z nízkých výšek pro vizualizaci archeologických lokalit. Problematika UAV fotogrammetrie je zejména v naší zemi ještě více podhodnocená. Snímkování pro fotogrammetrické účely není u nás příliš prozkoumáno. Ve světě je situace přece jen o trochu rozvinutější.

První pokusy s SFAP respektive s UAV modely se datují již na začátek 20. století. Za tuto dobu bylo provedeno a popsáno poměrně značné množství experimentů, testů a případových studií, které dokumentují použitelnost UAV fotogrammetrie. První fotografie ze vzduchu byla pořízena v roce 1858, a to z říditelného balónu nad Paříží (Newhall, 1969). Postupem času se začaly objevovat pokusy s modely balónů. Paralelně s tím se prováděly pokusy s draky, holuby a raketami, např. Neubronne v roce 1903. Jeden z nejstarších pokusů s motorovým UAV modelem, který měl pevné křídlo proběhl v roce 1979 (Przybilla, Wester-Ebbinghaus, 1979). Let byl proveden ve výšce 150 metrů nad povrchem. Rozměry letadla byly 3 metry na délku a rozpětí křídel bylo 2,6 m. Rychlost letadla se pohybovala okolo 11 m/s a maximální nosnost byla 3 kg. V kombinaci s pozemními snímky bylo možné získat obrazy archeologických lokalit. Výsledky byly však omezené z důvodu rychlosti letadla a vibrací motoru. Aplikace UAV modelů ve fotogrammetrii nikdy zcela neutichly. Nicméně období na začátku 90. let 20. století bylo spíše v útlumu. Až v současné době, díky rozvoji IMU jednotek, GPS systémů apod. se používají UAV modely s větším úspěchem. Lze dohledat odborné články na vysoké vědecké úrovni např. Chiabrando et al. (2011), Grenzdörffer et al. (2008). Příspěvky diskutují nejen problematiku, ale nastiňují také možné řešení, které je většinou doplněno konkrétní případovou aplikací.

Pro naše území byly nejvýznamnějším obdobím sedmdesátá léta minulého století. Pracovníci Geografického ústavu ČSAV využívali snímky z modelů ke své odborné práci. V rámci svého výzkumu vyvinuli sofistikované kamery pro snímkování, kdy např. Stehlík (1981) vyvinul multispektrální kameru Flexaret.

V té době odborníci z Geografického ústavu Československé akademie věd využívali bezpilotní systémy ke snímkování krajiny. Jak uvádí Plánka (1984 a 1988), první výzkumy začaly již v roce 1965, kdy O. Stehlík sestrojil dálkově ovládaný model využívající padákového křídla. Popis na snímkování pomocí dálkově ovládaných modelů prezentoval v roce 1967 na mezinárodním geomorfologickém sympoziu v Bukurešti. Následovaly pokusy s letadlem s pevným křídlem, které sestrojili pracovníci ČSAV společně s organizací SVAZARM Brno. Nakonec se rozhodlo o návratu k modelu s padákovým křídlem a vznikl model nesoucí označení Rogalo 1976. Nesl fotografickou komoru Flexaret. Později sestrojili odborníci robustnější model Rogalo 1981, který nesl vůbec první multispektrální kameru Flexaret M-6. Multispektrální kamera byla

jedinečným výrobkem, který v té době neměl ve světě obdoby. Kamera byla vybavena selektivními filtry pro vlnové délky 480 - 550 - 604 - 660 - 720 - 800 nm (Červinka, 1991). Při použití speciálních filmů byl zajištěn přesah do blízké infračervené části spektra, která je velmi důležitá pro studium vegetace. Kolečka (1989) představuje možnosti zpracování snímků pořízených modelem na příkladu vodních ploch. Na tehdejší dobu využívá moderní metody faktorových analýz nebo metod podle nejvyšší pravděpodobnosti. Odborníci z Geografického ústavu ČSAV v Brně odváděli velmi cennou práci a posunuli oblast DPZ o velký kus dopředu. Bohužel vzhledem k tehdejší technické úrovni a absentující výpočetní technice nebylo možné používat data pro sofistikovanější fotogrammetrické vyhodnocování například pro tvorbu 3D modelů terénu či povrchu. Od té doby pokusy na našem území ustaly.

## 2.3 UAV platformy

Platformy pro UAV snímkování lze rozdělit podle mnoha kritérií. Mezi nejdůležitější kritérium však patří to, zda se jedná o UAV model s motorovým pohonem nebo se jedná o nemotorový model. Další dělení jak uvádí Aber, et al (2010) může být podle toho, zda se jedná o model volně letící nebo je spojen se zemí pomocí lana. Následující podkapitoly uvádí přehled vybraných UAV platform pro vědecké použití.

### Draci

Drak je platforma, která byla použita jako jedna z prvních pro SFAP Aber et al. (2010). Již v roce 1880 použil Batut (1890) draka pro snímkování. V dnešní době se draci, jako platforma, vrací zpět a opět se používají pro snímkování. V roce 1997 byl použit drak jako nosič pro kameru v rámci několika vědeckých aplikací. V arktickém prostředí byl například mapován zkamenělý les (Bigras, 1997). Obdobně jako u jiných platform, tak i draci se uplatňují zejména v archeologickém průzkumu (Bitelli et al., 2001). Velmi úspěšné experimenty provádí Aber, et al. (2002), který prosazuje tuto platformu v USA. Jeho typ draka může operovat ve výškách od 50 do 150 metrů nad terénem. Tento typ draka použil pro aplikace v různých oborech jako je architektura, lesnictví, hřbitovnictví a nebo glaciální geomorfologie. Použití draků je ovšem omezené rychlostí větru a rozlohou snímkaného území. Zatímco platformy typu letadlo či vrtulník mohou operovat ve vzdálenostech v řádu kilometrů, drak, který je uvázán na lano, tuto výhodu ztrácí. Druhým aspektem je, že to, co je pro vrtulník nebo letadlo výhodou, tedy bezvětrí, je pro draka nepřekonatelná překážka. Jak uvádí Aber et al. (2010) pro použití draka je nutné, aby rychlost větru byla alespoň 4 m/s.

### Balóny

Vozikis (1983) ukázal praktický příklad funkčnosti balónu s namontovanou středoformátovou kamerou. Použita byla kamera značky Hasselblad 500 EL/M s objektivem značky Zeiss. Samotná kamera byla pověšena na kardanovém závěsu, který umožňoval natáčení ve všech třech osách ( $\omega$ ,  $\phi$  a  $\kappa$ ). Vše probíhalo dálkově. Již v této době byly s pomocí takového zařízení vytvořeny tři stereomodely, a to na institutu

fotogrammetrie ve Vídni. Jak dále uvádí Vozikis (1983), konečným výsledkem byla vyprodukovaná mapa v měřítku 1 : 100.

Další ukázkou použití balónů publikuje Johnson, et al. (1990). Experiment s fotogrammetrií s pomocí balónu se odehrál v oblasti Nazca v Peru. Experiment bohužel nebyl úspěšný z důvodu silného větru.

Použití klasické 35mm filmové kamery vyzkoušel Karras, et al. (1999). Na kameře byl použit širokoúhlý objektiv a celkem bylo vytvořeno 12 snímků archeologické lokality v Aténách. Ty byly zpracovány profesionálním fotogrammetrickým nástrojem Integraph Image Station SKK.

Ries, Marzloff (2003) použili vzducholoď pro monitoring stržové eroze ve Španělsku. Vzducholoď byla přivázána tenkým lankem, které umožňovalo let až ve výšce 350 m nad terénem.

Balóny a vzducholoďe jsou výborným nosičem v případě, že je nutné snímkovat rozlohou malou oblast. V případě že dojde k napuštění balónu nebo vzducholoďe héliem, není již možné model převážet na jinou zájmovou plochu. I z tohoto důvodu nejsou modely, které se plní plynem lehčím než vzduch, vhodné pro aplikace, kde se předpokládá velmi častá frekvence snímkování. Na druhou stranu, jsou zde i zřejmé výhody. Schopnost „stát“ na místě umožňuje použití i v aplikacích, které vyžadují delší čas snímkování. Za nespornou výhodu můžeme také považovat to, že se jedná o nemotorový prostředek, který neprodukuje žádné vibrace. Tedy nehrozí ani roztržení fotoaparátu. V neposlední řadě je i cena za výrobu ve většině případů nižší, nežli u motorových modelů.

### **Vrtulníky a multirotorové systémy**

Jednu z prvních aplikací s vrtulníkem, jakož to UAV nosičem, popsal Miyatsuka (1996). Miyatsuka použil model vrtulníku, na který připevnil kameru se 6 Mpx rozlišením. Vrtulník byl sice schopen vylétnout až do výšky 300 metrů nad terén, ale rozlišení kamery v této výšce již nebylo dostatečné pro archeologické účely.

Podobný experiment, ale s větším úspěchem, provedl Zischinsky. V roce 2000 nasnímkoval s pomocí modelu vrtulníku 38 snímků a na základě nich a dalších 82 snímků ze země pak vytvořil 3D model historického mlýna. Pro tuto práci použil stejnou kameru jako v předcházejícím případě Miyatsuka, tedy amatérský Kodak DCS 460c. Protože Zischinsky neznal prvky vnější orientace, musel použít 120 GCP bodů. Pro zpracování byl použit software Orpheus a dle studie byla výsledná RMSE (Root Mean Square Error) chyba 2 cm (Zischinsky, et al. 2000).

Jedním z úspěšných výrobků, který se používá pro UAV fotogrammetrii, je také vrtulník společnosti Yamaha s názvem RMAX. Hongoh, et al., (2001) použil tento stroj pro rozlišení jednotlivých typů vegetačního krytu. V roce 2002 byl RMAX systém použit pro sérii fotogrammetrických experimentů ve Švédsku. Cílem projektu bylo otestovat GPS/INS systém, který byl přímo instalován na zařízení. Celý systém vykázal velkou míru stability a jak uvádí Eisenbeiss (2003), testování dopadlo velmi dobře.

Eisenbeiss (2009) ve své práci uvádí použití modelu vrtulníku společnosti Aeroscout, který je vybaven kompaktním a lehkým laserovým skenerem společnosti Riegl. Skener nese označení LMS-Q160 a Eisenbeiss s tímto typem vrtulníku a skeneru úspěšně provedl skenování několika archeologických objektů.

Vrtulník je nosič, který tak jako i ostatní nosiče nabízí klady i zápory. Mezi nesporné klady se řadí v případě potřeby schopnost zůstat ve vzduchu na jednom místě. Oproti tomu, vrtulník je poměrně náročné zařízení na obsluhu. Schopnost přesné pilotáže vyžaduje dlouhou praxi. Nevýhodou může být také cena, která se u profesionálního přístroje může dostat za hranici 1 mil. korun. Za tuto cenu však bude model vybaven nejmodernějšími prostředky pro automatickou pilotáž a navigaci.

Multirotorové systémy jsou velmi mladou leteckou platformou, která spojuje výhody vrtulníku společně s relativně snadnou pilotáží. Rozšiřování této platformy do oblasti UAV fotogrammetrie je však otázkou přibližně posledních dvou let, kdy začínají vznikat důležité studie. Mezi jednu z nich se snaží zařadit i tato práce. Multirotorový systém funguje na principu podobném vrtulníku, ale na rozdíl od něho nevyžaduje zadní vrtuli kompenzující rotaci kolem svislé osy. Tím je velmi usnadněna pilotáž. Místo toho využívá několik vrtulí s vertikálním tahem a stabilita je zajištěna rozdílným tahem jednotlivých motorů. Bližší informace lze nalézt v kapitole 4.1.4 *Hexakopter XL*.

## **Letadla**

Letadla jsou poměrně rozšířenou skupinou, která se využívá pro snímkování. Nicméně pro fotogrammetrické účely mají poměrně dost omezení. Jedná se zejména o poměrně vysokou rychlost letu, která znemožňuje exponování delším časem. Také samotná konstrukce letadla neumožňuje příliš dobře umístit kameru tak, aby nedošlo k poškození při přistání nebo vzletu. Nicméně i zde můžeme nalézt aplikace, které využívají letadel pro snímkování.

E. Raymond Hunt, Jr, et al. (2008) využívá letadla pro určování indexu LAI (Leaf Area Index). Pro studii používá kamery FujiFilm FinePix S3 Pro UVIR, která nemá zabudován filtr, který blokuje blízkou infračervenou část spektra. Dále v práci testuje vegetační index GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index). Jak je z názvu zřejmé, jedná se o obdobu známého NDVI indexu. GNDVI index však používá místo červené části spektra zelenou část.

Další aktivity vyvíjí např. NASA, která sestrojila solární UAV model letadla s názvem Helios. Jak uvádí Herwitz, et al. (2002), na Helios byly umístěny dvě kamery, z čehož první snímá pouze RGB pásmo a u druhé se jedná o multispektrální kameru. Obě kamery pořizují záznam s velmi vysokým rozlišením. Jedno z možných dělení UAV systémů je uvedeno v tabulce 2.1. V tabulce 2.2 je uvedeno hodnocení konkrétních systémů z hlediska různých kritérií.

Tab. 2.1 Dělení UAV systémů (upraveno podle: Eisenbeiss, 2009).

	Lehčí než vzduch	Těžší než vzduch		
		Padáková křídla	Pevná křídla	Systemy s rotujícím „křídlem“
Bezmotorový	Balón	Rogalo	Kluzáky	
	Vzducholod'	Paraglide		
		Drak		
Motorový	Vzducholod'	Paraglide	Vrtulové letadlo	Jednomotorový
			Proudové letadlo	Multimotorový

Tab. 2.2 Hodnocení UAV systémů; 0: nejnižší hodnota, +: prostřední hodnota, ++: nejlepší hodnota (upraveno podle Eisenbeiss, 2009).

Typ letadla	Dosah	Výdrž	Závislost na počasí a větru	Manévrovatelnost
Balón	0	++	0	0
Vzducholod'	++	++	0	+
Drak	+	0	0	0
Kluzák s pevným křídlem	++	+	+	+
Vrtulová a proudová letadla	++	++	+	+
Motorový kluzák	++	+	0	+
Jednomotorový (helikoptéra)	++	+	+	++
Multirotorové systémy	+	+	+	++

## 2.4 UAV fotogrammetrie

Eisenbeiss (2008) ve své práci zmiňuje termín UAV fotogrammetrie. Uvádí, že jde o nástroj pro měření, kdy je využíváno UAV platform, které jsou schopny fotogrammetrického měření. Tyto platformy musí být schopny operovat v manuálním, poloautomatickém nebo automatickém režimu. Hlavní podmínkou je, že pilot nesmí být fyzicky přítomný v zařízení. UAV fotogrammetrie kombinuje výhody fotogrammetrie letecké a pozemní. Zatímco z letecké získává výhodu vertikálního pohledu, z pozemní přebírá blízkou vzdálenost a tím vysoký detail snímku (Aber, et al., 2010). Základním principem celého fotogrammetrického měření je geometricko-matematická rekonstrukce směru fotografických paprsků na snímku. Stejně tak je tomu i u UAV fotogrammetrie. UAV fotogrammetrii lze tedy chápat jako nový měřicí nástroj, který otevírá možnosti



získávání geodat v nových aplikacích. Bližší informace o získávání dat s pomocí UAV modelů lze nalézt např. v Kerle, et al. (2008).

Teoretické a matematické pozadí UAV fotogrammetrie vychází z fotogrammetrie letecké a je velmi podobné. Vlastnosti a charakteristiky letových modelů a zejména snímkovacích kamer však mají svá specifika, a proto je nutné standardní postupy zpracování dat mírně upravit, aby výsledky odpovídaly požadavkům na výslednou přesnost.

Rozměry, váha a cena ve většině případů neumožňují použití přesných INS jednotek v UAV modelech (Aber, et al., 2010), proto je nutné použít výpočet aerotriangulace bez známých prvků vnější orientace. Nejčastější metodou je určení prvků vnitřní orientace pomocí vlíčovacích bodů neboli GCP bodů (angl. Ground Control Points) se známými souřadnicemi X, Y, Z.

Přesnost určení polohy vlíčovacích bodů je nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výslednou přesnost aerotriangulace. Měření s pomocí standardního GPS přístroje nebo odečítání souřadnic z mapy může být dostatečné pro práci se snímky malého měřítka, nicméně pro SFAP s centimetrovou přesností je nutné pro zaměření GCP bodů použít totální stanici nebo dvoufrekvenční GPS přístroj s korekčními daty (Chandler, 1999).

Prvky vnitřní orientace kamery lze určit buď ve speciálních laboratořích, nebo také i svépomocí. Zatímco letecké měřické kamery jsou již obvykle kalibrovány výrobcem, pro malé kamery využívané v SFAP aplikacích kalibrační protokoly známy nejsou. Různé kalibrační metody pro určení prvků vnitřní orientace popisuje Fraser (1997) nebo Wolf a Dewitt (2000).

## **2.5 Aplikační oblasti UAV systémů**

Je celá řada aplikačních oblastí, ve kterých je možné uplatnit UAV modely. Níže uvedené příklady zcela jasně dokazují, že lze UAV modelů a SFAP s velkým úspěchem použít v celé řadě aplikací od ekologických až po urbanistické. Pořízení snímku je velmi snadné, problém však může nastat při samotném zpracování. Zpracování bloku snímků závisí na mnoha faktorech, které v klasické letecké fotogrammetrii lze ovládat jednodušeji než v UAV fotogrammetrii. Pro vynikající výsledky v UAV fotogrammetrii je nutné mít dokonale zkalibrovanou kameru a pečlivě plánovat všechny fáze projektu od plánu letu až po zpracování snímků. Ze samotných aplikačních studií např. Horcher, Visser (2004) se ve své práci zaměřuje na výzkum přírodních zdrojů s pomocí modelů vrtulníků a letadel. Aplikace se nevyhýbají ani vytváření stereomodelů. Kise, et al. (2005) vytváří stereo modely a z nich poté mapy plodin. Obecně lze sledování plodin zahrnout do širšího pojmu precizní zemědělství, kterým se zabýval Reidelstuerz, et al. (2007). Podobně zaměřené studie provádí také Sugiura, et al. (2005), který se zaměřuje na sledování vegetace. Velký přehled o UAV aplikacích poskytuje Niranjana, et al. (2007), který se zaměřuje na oblasti zvládnutí katastrof, monitoring potrubních systémů, detekce lesních požárů apod. Případové studie přehledně podává také Aber et al. (2010).

Grenzdörffer, et al. (2008) popisuje použití UAV modelů pro dokumentaci nezákonného kácení lesů a dále podává výsledky fotogrammetrického zpracování obrazových dat, která byla snímána letadlem Carolo P330 a motorovým paraglidem Susi. V rámci obou studií dosahuje dobrých výsledků. Celková přesnost se pohybuje pod hranicí 0,5 m. V některých případech se dá dosáhnout centimetrové přesnosti. Ve studii jsou podrobně popsány jednotlivé zdroje chyb a možnosti jejich kompenzace.

Eisenbeiss (2009) uvádí, že je nutné řešit prvky vnější orientace přímo v terénu. Proto je nutné mít na modelu DGPS společně s IMU jednotkou. Tato disertační práce však dokazuje, že tomu tak není. Prvky vnější orientace je možné zpětně pomocí aerotriangulace dopočítat softwarově. Je však nutné splnit některé specifické požadavky.

### 3 KONCEPT NASAZENÍ UAV TECHNOLOGIÍ

UAV fotogrammetrie není jedna osamocená technologie nebo postup zpracování dat. Jedná se o celý systém postupů a technologií, který musí být důkladně propracovaný a každá z jeho částí musí poskytnout relevantní výsledky. Jen tak může být celý systém UAV fotogrammetrie použitelný a může poskytnout kvalitní výsledky s odpovídající přesností. Navržený koncept představuje základní stavební kameny nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii, které autor v průběhu doktorského studia ověřil.

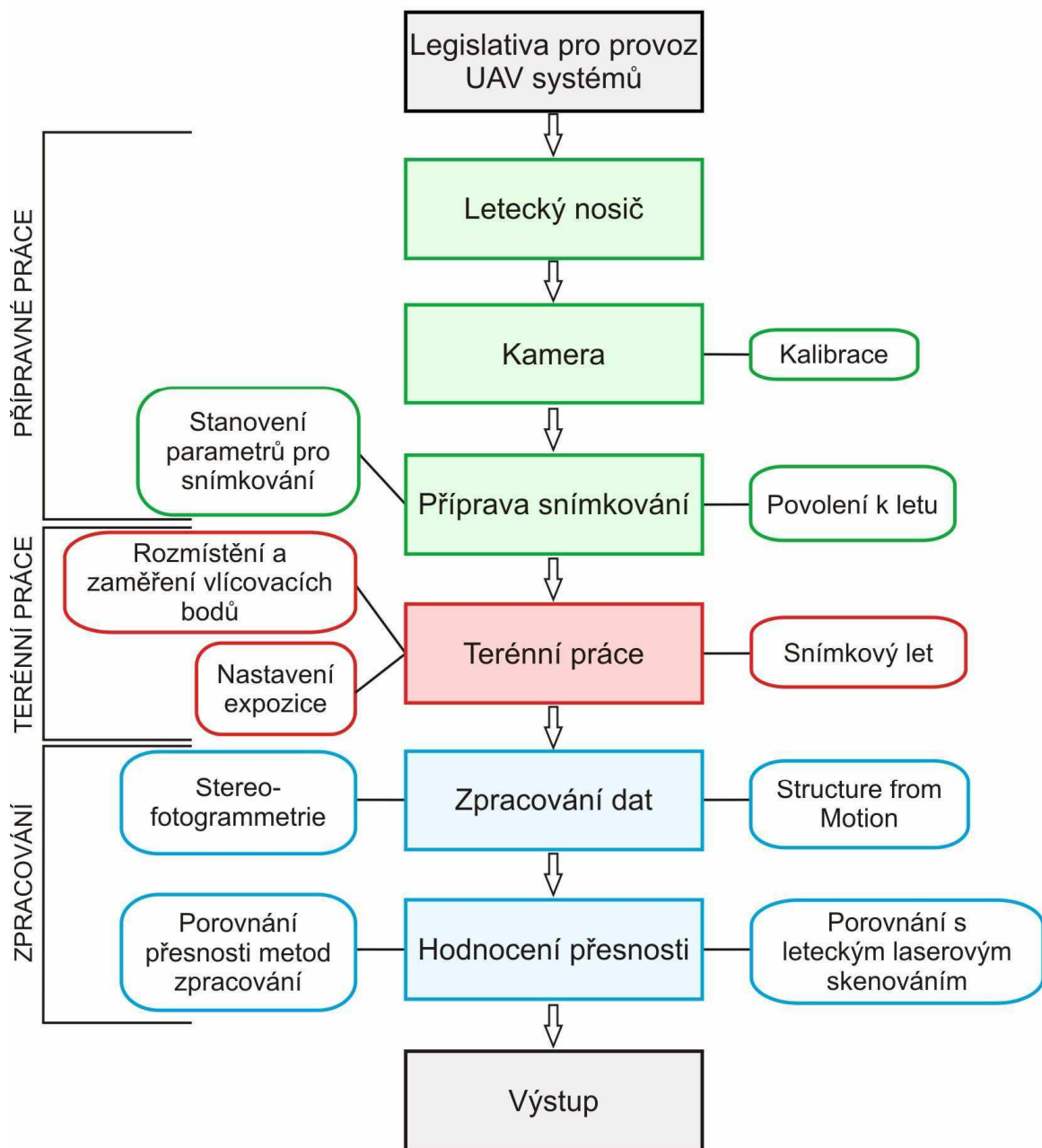
#### 3.1 Návrh konceptu

Návrh konceptu nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii pro velmi přesný sběr geodat má základ v postupech a metodách konvenční letecké fotogrammetrie. Pro potřeby UAV fotogrammetrie a snímkování bylo nutné metody a postup práce přepracovat. Jako první byla zvolena základní kostra prací v UAV fotogrammetrii, na kterou navazují další z nich vyplývající požadavky. Ve schématu (obr. 3.1) jsou části konceptu rozděleny podle barev. Přípravné práce, které probíhají před snímkovým letem, jsou označeny zeleně. Červeně jsou označeny práce terénní, modré jsou práce prováděné po ukončení snímkového letu. Jako první stojí v konceptu legislativní rámec pro UAV snímkování, který sice nemá přímou návaznost na žádnou z částí konceptu, ale jeho znalost je základním a prvním požadavkem pro práci.

Autorem navržená struktura byla ověřena v praxi, čímž byly získány zásadní poznatky o funkčnosti a chybách v návaznosti položek konceptu. Podle získaných zkušeností byly některé položky přeraženy, sloučeny nebo naopak přidány či osamostatněny. Upravený koncept byl opětovně otestován v praxi.

#### 3.2 Koncept

Obrázek 3.1 představuje sestavený koncept nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii. Ve schématu jsou zobrazeny nejdůležitější části konceptu. Každá z uvedených oblastí schématu se ve většině případů dále dělí na detailnější části, které jsou uvedeny v samostatných kapitolách práce. Předložený koncept představuje systém postupů a technologií, který by měl být ve své základní rovině vždy dodržen (podbarvené položky). Některé navazující položky nemusí být ve všech případech dodrženy. Například položka konceptu *Porovnání přesnosti metod zpracování* nemusí být dodržena v případě, kdy bude použita pouze jedna metoda zpracování dat. Položka *Kalibrace* nebude brána v potaz v případě, kdy uživatel již bude používat kalibrovanou kameru. Vždy však musí být dodržena hlavní část konceptu, která je oproti ostatním položkám podbarvena.



Obr. 3.1 Základní koncept nasazení UAV systému. Zeleně jsou označeny laboratorní a kancelářské práce prováděné před snímkovým letem. Červeně jsou označeny práce prováděné přímo v terénu a modře jsou označeny práce kancelářské a laboratorní po ukončení snímkového letu. Samostatnou barvou je označena kategorie Legislativa (autor: J. Mířijovský).

### 3.3 Struktura práce a popis konceptu

Disertační práce má povahu metodické studie s ověřením na experimentálních a reálných datech. Metody a postup práce jsou zpracovány v jednotlivých kapitolách, které se týkají daného tématu (konceptu). Z převažující části se jedná o přímo autorem navržený a vytvořený postup.

## **Legislativa**

Pravidla legálního používání UAV systémů v České Republice jsou první částí předloženého konceptu. Legislativou se musí zabývat každý, kdo má zájem používat bezpilotní systém, a to nejen pro vědeckou práci. V kapitole 5 jsou předloženy výsledky analýzy právních podmínek pro použití UAV systému v ČR.

## **Letecký nosič**

Letecký nosič spadá do širší kapitoly *Východiska UAV fotogrammetrie*, ve které autor představuje nejdůležitější součásti potřebné pro UAV snímkování. Část nazvaná *Letecký nosič* (kapitola 4.1) představuje detailní popis dvou systémů, které byly vybrány pro fotogrammetrické snímkování v předkládané práci. Podkapitola se dále věnuje povoleným frekvencím na území ČR pro provoz bezpilotních systémů.

## **Kamera**

Součástí laboratorních prací je volba typu kamery, která byla použita pro snímkování, a její kalibrace. V kapitole 4.3 jsou nejprve představeny používané metody a postupy pro kalibraci kamer, které se využívají ve fotogrammetrii. V navazující části jsou popsány různé přístupy autora k laboratorní kalibraci použité kamery. Pro práci v této části byly využity zejména metody průsekové fotogrammetrie.

## **Příprava snímkování**

Část konceptu *Příprava snímkování* představuje autorem navržený ideální postup prací pro ověření podmínek letu v zájmové lokalitě, pro návrh letových os a stanovení parametrů letu. Autor práce na konkrétním příkladu ukazuje použití letecké mapy ICAO a aplikace AIS View. V další části jsou popsány jednotlivé parametry snímkování, na které navazuje konkrétní příklad výpočtu všech parametrů letu. Na podkladě konkrétních experimentů a testovacích letů je představena problematika nedodržení letových os a vady na snímcích způsobené slunečním zářením. Navržený postup byl dodržen v průběhu všech leteckých pracích.

## **Terénní práce**

V kapitole *Terénní práce a snímkový let* je autorem navržen optimální postup pro práci prováděné v terénu. Autor předkládá řešení pro výpočet optimální velikosti vlíčovacích bodů, které byly použity během snímkování. V samostatném experimentu dokazuje vliv geometrického uspořádání a rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výstupů. Kapitola pokračuje představením řešení pro správné nastavení expozice a problémů, které mohou vzniknout při nastavení nesprávném. Řešení bylo získáno během dlouhodobého testování a experimentálních letů. Poslední část kapitoly *Snímkový let* zahrnuje konkrétní postup činností, který byl použit při snímkování během zpracování disertační práce. Součástí kapitoly je také analýza letových dat. Všechny informace jsou uvedeny v kapitole 7.

## **Zpracování dat**

Zpracování dat bylo provedeno metodami digitální stereofotogrammetrie a metodou Structure from Motion. V kapitole 8 jsou představeny provedené analýzy vlivu různého nastavení parametrů na výpočet aerotriangulace, automatickou extrakci bodů ze snímků a rovněž je provedeno testování vhodnosti různých interpolačních metod pro tvorbu DMP. V další části je představen postup zpracování dat metodou Structure from Motion s hodnocením přesnosti výpočtu. Podle výsledků uvedených v kapitole 8 byla zpracována všechna data z terénu.

## **Hodnocení přesnosti**

Pro ověření reálné chybovosti modelů bylo provedeno testovací snímkování s následnou analýzou dat z reálného prostředí. Data byla konfrontována s daty geodetického měření a s daty z leteckého laserového skenování. Cílem bylo ověřit přesnost metod zpracování a zjistit, zda výstupy splňují kritéria pro fotogrammetrické aplikace. Pro hodnocení bylo využito popisné statistiky používané v geodézii a v fotogrammetrii. Analýza dat z testovacího území je podrobně popsána v kapitole 9.

## **Zobecnění výsledků**

Koncept představuje posloupnost prací, které na sebe logicky navazují. Všechny části konceptu jsou založeny na konkrétních laboratorních testováních, experimentech a práci v terénu. Výsledky, které jsou uvedeny v jednotlivých kapitolách, jsou tedy výstupy, které lze primárně vztáhnout na jednu konkrétní situaci. Povaha řešení však ve většině případů umožňuje výsledky zobecnit a analogicky použít s jiným přístrojem nebo v jiném typu terénu.

## 4 VÝCHODISKA UAV FOTOGRAMMETRIE

Stejně jako v jiných oborech a disciplínách, i v UAV fotogrametrii lze stanovit východiska a základní požadavky, aby mohl systém existovat. Jako základní požadavky UAV fotogrammetrie a systému byly stanoveny:

- letecký nosič,
- kalibrovaná kamera,
- fotogrammetrický software,
- personál a znalosti.

Jistě lze nalézt i další body, které by zde mohly být zařazeny, nicméně výše uvedené položky jsou základem kompletního systému a v případě chybějící jedné položky nemůže být systém úplný a splnit zadané úkoly.

### 4.1 Letecký nosič

Letecký nosič neboli letecký model je základním prvkem celého systému. Je to prostředek, který nese snímkovací kameru případně další měřičské vybavení jako GPS systém, IMU systém apod. Mezi základní požadavky pro nosič, který má být použit pro UAV fotogrametrii, patří zejména jeho stabilita, nosnost a doba po kterou je schopný letu. Podrobné informace o jednotlivých typech UAV nosičů lze nalézt v kapitole 2.3 UAV platformy. V této kapitole jsou podrobně představeny nosiče, které jsou nebo byly používány na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci.

#### 4.1.1 Povolené frekvence

O rozdělení kmitočtového pásma rozhoduje v České republice Český telekomunikační úřad (ČTÚ). Pro legální a hlavně bezpečný let musely být použity pouze takové frekvence, které jsou Českým telekomunikačním úřadem povoleny a zároveň jsou přiděleny pro použití v amatérských aplikacích a v tzv. „pohyblivé službě“, případně v „letecké pohyblivé službě“. Stanice dálkového ovládání leteckých modelů mohou v souladu s rozhodnutím ČTÚ využívat úsek 34,995–35,225 MHz. Nad rámec uvedeného rozhodnutí mohou stanice dálkového ovládání leteckých modelů využívat kmitočty z úseku 35,820–35,910 MHz (ČTÚ, 2010). Pro ovládání leteckých modelů lze dále využít kmitočtové pásmo 2,4 GHz. V současné době se jedná o nejspolehlivější frekvenci a bylo jí využito i u leteckých modelů použitých během studia.

#### 4.1.2 První experimenty

První pokusy na Katedře geoinformatiky začaly již v roce 2006. V té době se nejednalo o použití pro fotogrammetrické účely, ale o „pouhé“ snímání krajiny za účelem zjišťování její změny. Použity byly velmi primitivní nosiče v podobě balónků které byly napuštěny heliem a současně s nimi také jednoduchý model vrtulníku na dálkové ovládání (obr. 4.1). Model Upper Air byl tří kanálový RC model poháněný tužkovými bateriemi a řízen rádiem. Tři kanály zajišťovali let nahoru, dolů, vpřed, vzad,

doprava a doleva. Jeho malé rozměry (délka 53 cm) neumožňovaly osadit vrtulník těžším fotoaparát. Samozřejmě i ovládání vrtulníku bylo velmi omezené a navigační systém zcela chyběl. Jako kamera sloužil kompaktní fotoaparát bez větších nároků na geometrickou kvalitu snímků. Přestože se jednalo o velmi primitivní a neprofesionální zařízení, výsledky v podobě fotografií byly použitelné.



Obr. 4.1 První pokusy s UAV platformami. Balónky napuštěné héliem (vlevo), jednoduchý model vrtulníku (vpravo) (foto: V. Pechanec).

### 4.1.3 Paraglidový model PIXY

Drone Pixy je pomalu letící, rádiem ovládaný model motorového padákového kluzáku, který je primárně určen pro geovědní disciplíny, zejména pro dálkový průzkum Země z ultra nízkých výšek (50 - 500 m). Letový model zkonstruovala, vyrobila a prodává francouzská společnost Philae Concept se sídlem v Orange. Umožňuje pořízení klasických i digitálních snímků včetně video záznamu. Maximální nosnost zařízení umožňuje osadit nosič několika senzory současně. Koncept Drone PIXY vyniká snadnou pilotáží, jednoduchým transportem, vysokou odolností celého zařízení a umožňuje široké použití. Provoz zařízení nevyžaduje speciální licenci, z pohledu legislativy v ČR je chápáno jako běžný letecký model.

Model Pixy je vyráběn v několika modelových řadách, které se vzájemně mírně liší. Rozdílnosti spočívají především v konstrukci a velikosti rámu, křídla a drobných úpravách motoru a ovládání. Vlastněný model je ze série Pixy Vision. Tento typ je konstruován na 4 kolovém podvozku (oproti dřívějším třikolovým), díky kterému se zvětšila šířka spodní základny a tak umožnila větší pracovní záběr při snímání povrchu. Pixy Vision je osazen pohonnou jednotkou Zenoah 290 o výkonu 2.6 HP a užitečné zatížení je rovno 6 kilogramům. PIXY Vision má na model velmi dobré letové charakteristiky. Dosah radiového spojení končí za hranicí 1 km. Samotné letové možnosti jsou z největší části omezeny povětrnostními podmínkami. Doporučená rychlost větru pro dobrou ovladatelnost a bezpečnou práci je 3 – 35 km/h. Minimální rychlost je udána hlavně pro zlepšení startovací délky a rychlosti vzletu. Omezení 35 km/h je dáno z důvodu hmotnosti a odporu celé soustavy. Díky nízké hmotnosti (kolem 10 kg) a relativně velké ploše padáku je model dosti náchylný na boční a nárazový vítr. Model je



vybaven palivovou nádrží o užitém objemu 1 litr. Tato hodnota dostačuje přibližně na jednu letovou hodinu se zatížením.



Obr. 4.2 Model PIXY. Model v letu (vlevo), detail motorové části (vpravo) (foto: M. Jančík).

Rám je konstruován jako kompletně demontovatelný a skládá se ze čtyř hlavních částí a pevného motorového bloku, jež je jako jediný pevně svařován metodou TIG. Vše je zde koncipováno tak, aby konstrukce a osazení celé jednotky byla jednoduchá a celé zařízení je dodáváno od výrobce tzv. na klíč. Pro zajištění dostatečné pevnosti a zároveň zachování minimální hmotnosti jsou všechny pevné kovové část (mimo blok motoru) vyrobeny ze speciální slitiny hliníku a zicralu. Ke svému pohybu ve vzduchu využívá dvouplášťového křídla o velikosti 2,9 m<sup>2</sup>. Křídlo je vyrobeno z padákového materiálu, díky čemuž je zajištěna nízká hmotnost a pevnost.

Ovládání je zajištěno za pomoci tří na sobě nezávislých servo motorů, jež jsou standardně napájeny akumulátory připevněnými k rámu. Dvě serva zajišťují ovládání padákového křídla modelu, třetí servo slouží pro ovládání plynu motoru.

Pro ovládání modelu slouží pozemní stanice. Stanice je vybavena malým LCD monitorem, na kterém jsou zobrazena data ze snímacího zařízení. Pomocí funkce live view tak může být po dobu celého letu pozorováno zájmové území. Stanice je vybavena displejem, jenž slouží jako informační panel. Zde jsou zobrazovány veškeré technické údaje o sestavě (model + snímací zařízení). Jde především o výšku letu, stav baterií, délka letu a další. Celou stanici je možné propojit s PC a díky zabudovanému GPS modulu tak aktuálně sledovat polohu a pohyb sestavy. Pomocí vestavěného GPS modulu je možné provádět jednoduchou navigaci a zacílení modelu na zájmové území. Propojení pozemní stanice s notebookem umožňuje archivovat data pro následné vyhodnocení.

Hlavní částí modelu PIXY je snímkovací „věž“. Ta zajišťuje stabilní připojení snímacího zařízení. Díky univerzálním úchytům na snímací základně je možné připevnit i jiné zařízení než fotoaparát. Hlavní devizou celé snímkovací věže je využití dvouosé gyrostabilizace, která zajišťuje stálou polohu snímacího zařízení vůči zemskému povrchu.

Model PIXY Vision je vybaven modulem konstantní letové hladiny. Po zapnutí se model snaží udržet požadovanou výšku letu. Údaje o aktuální výšce přebírá z GPS modulu. Použití modulu je nutné pro zajištění stejné výšky snímků nad terénem.

#### 4.1.4 Hexakopter XL

Zařízení Hexakopter XL je multirotorový systém se šesti vrtulemi, který je také primárně určen pro letecké snímkování z nízkých výšek. Hexakopter XL patří do rodiny mikrokofterů, které vyrábí německá firma HiSystems GmbH. Historie společnosti sahá do roku 2006, kdy ji založili dva společníci Holger Buss a Ingo Busker. O pouhých šest měsíců později už byl vyroben první mikrokofter, který byl schopen samostatného letu. Základní členění kofterů je podle počtu vrtulí a podle výkonu motorů. Společnost HiSystems GmbH vyvíjí tři typy modelů vždy ve dvou velikostech. Čtyřvrtulový Quadro Kopter, šestivrtulový Hexa Kopter a osmivrtulový Octo Kopter. Všechny typy jsou v malé velikosti nebo ve velikosti XL.

Princip letu je poměrně jednoduchý. Mikrokofter má dva směry rotací vrtulí. Přední a zadní vrtule se otáčejí ve směru hodinových ručiček, zatímco levá a pravá vrtule se otáčejí proti směru hodinových ručiček. Pokud se má zařízení vznášet ve stejné výšce a na jednom místě, budou se všechny vrtule otáčet stejnou rychlostí. Poměr tahu jednotlivých vrtulí resp. motorů bude všude stejný. Pro let do různých směrů je využíváno rozdílného tahu motorů. Vrtule již nebudou v rovnováze, ale pokud je potřeba letět ve směru dopředu, zadní vrtule zvýší svůj tah, zařízení se mírně nakloní a začne se pohybovat směrem vpřed. Naprosto stejný princip je využit při vybočení ze směru. Zařízení je vybaveno elektronikou, která počítá rychlosti motorů a také kompenzuje rychlost větru. Hlavním úkolem elektroniky je držet zařízení ve vyváženém stavu.

Základem zařízení je rám, který tvoří kostru Mikrokofteru. Vzdálenost motorů se pohybuje v rozpětí 35 cm až 60 cm v závislosti na typu motoru a velikosti vrtulí. Rám je vytvořen ze standardních hliníkových profilů, které se k sobě montují pomocí šroubů.

Nutnou podmínkou k letu je elektronická jednotka Flight Control. Je vybavena procesorem ATmega 644P a další elektronikou, která obsluhuje a řídí zařízení a zajišťuje stabilní let. Nejdůležitějšími senzory, které jednotka Flight Control obsahuje, jsou kromě samotného procesoru gyroskopy a akcelerometry, které měří zrychlení a úhel natočení oproti počátečnímu směru či bodu. Protože je pro let důležité znát změny v náklonech a zrychlení pro každou z os X, Y a Z, je zařízení vybaveno trojicí těchto senzorů. Zařízení je dále vybaveno barometrickým čidlem. To dává možnost udržovat konstantní letovou hladinu po dobu letu.

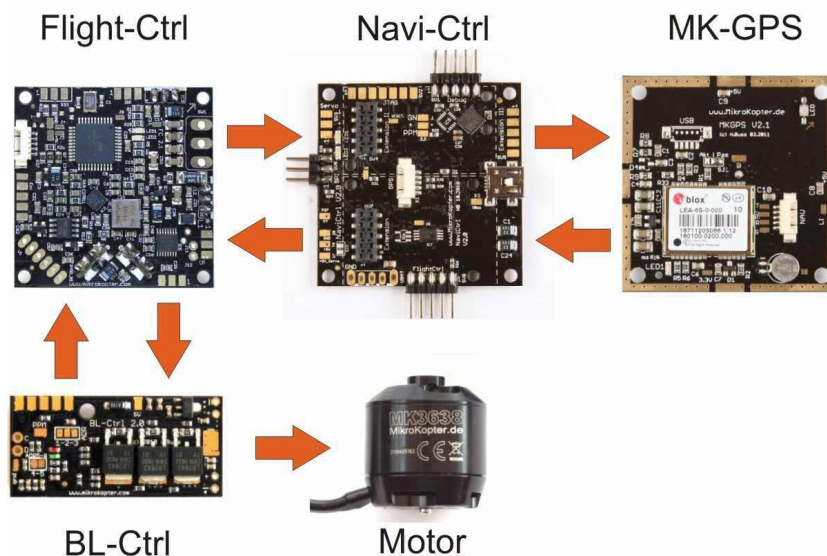
Jednotka Flight Control je přímo připojena k regulátorům (BL-Ctrl) pro motory na střídavé napětí. Každý regulátor ovládá jednu motorovou jednotku. Pokud je zařízení šesti vrtulové, je potřeba šest regulátorů. Standardně každý BL-Ctrl regulátor pracuje s PPM (Pulse-position modulation) příkazy, ale Mikrokofter je nedokáže využít. Proto je každý regulátor připojen ke sběrnici, kde je mu přiřazena unikátní adresa a komunikuje přes I<sup>2</sup>C (eye-squared cee) příkazy. Ty dokáže zpracovávat jakýkoliv standardní přijímač

na straně dálkového ovládní. K jednotkám jsou připojeny motory na střídavé napětí s max. tahem 2 200 g na jeden motor. Poslední povinnou částí na straně modelu je baterie. Mikrokofter využívá čtyřčlánkové Lithium-Polymerové baterie o kapacitě 6 600 mAh a jmenovitém napětí 14,4 V. Pro ovládní modelu musí být model vybaven vysílačem s nejméně čtyřmi kanály. Ty slouží pro samotné ovládní letu modelu. Pro model na Katedře geoinformatiky je použit jedenáctikanálový vysílač JR PROPO. Volné kanály jsou využity pro přenos dalších příkazů jako je ovládní fotoaparátu, GPS systému, apod.



Obr. 4.3 Model Hexakopter XK před startem (foto: J. Miřijovský).

Mezi nepovinný prvek, který není nezbytný pro let, ale velmi užitečný pro letecké snímkování patří jednotka Navi-Ctrl s modulem MK-GPS. Při použití této dvojice zařízení lze využívat funkce jako Position Hold, která zajistí stání kopteru na zadaných souřadnicích, Coming Home, neboli návrat kopteru na místo startu v automatickém režimu, a možnost použití průletových bodů (Waypointů). Je třeba si uvědomit, že stání na místě nad zadaným bodem může mít určitou nepřesnost. Model je vybaven pouze standardním GPS čipem turistické úrovně. Proto i přesnost tomu odpovídá. Model se nad daným bodem mírně pohybuje a osciluje kolem zadaného bodu. I tak ale jednotka Navi-Ctrl s modulem MK-GPS dokáže významně ulehčit snímkový let.



Obr. 4.4 Zapojení elektronického systému. Oranžové šipky naznačují směry předávání příkazů (autor: J. Miřijovský).

## 4.2 Software

Počítačové programy v dnešní době umožňují zpracování dat s rychlostí, která před deseti nebo dvaceti lety byla nemožná. Objemy zpracovávaných dat narostly z megabajtů do gigabajtů a operační paměti moderních počítačů se počítají na desítky gigabajtů. Navigační programy umožňují sledovat letecké modely v reálném čase a mít o nich veškeré informace během letu. Moderní fotogrammetrické aplikace dovolují zpracovat analytickými metodami i takové snímky, které v dobách analogové fotogrammetrie byly nezpracovatelné. Přestože teoretické základy fotogrammetrie jsou známy již dlouhé desítky let, neustále se vylepšují algoritmy zpracování dat pro ještě přesnější a rychlejší dosažení výsledků. Během práce byly využity programy zakoupené na Katedře geoinformatiky a také aplikace s demo nebo trial licenci pro porovnání různých fotogrammetrických algoritmů. Použitý software lze rozdělit podle jednotlivých fází práce:

- software pro přípravnou fázi,
- software pro letovou fázi,
- software pro zpracovatelskou fázi,
- doplňkový software.

### Software pro přípravnou fázi

Při plánování letu bylo nutné využít software, který je schopen zaznamenat plán letových os a uložit ho ve formátu takovém, aby mohl být následně nahrán do aplikace pro kontrolu letu. I proto bylo hlavní programové vybavení první a druhé fáze shodné. Jednalo se zejména o volně šiřitelnou verzi programu „HappyKillmore's Ground Control Station“, který integruje do svého prostředí Google Earth okno. V tomto programu byly digitalizovány jednotlivé osy letu. Aplikace byla využita zejména při plánování letových

os u paraglidového kluzáku PIXY. Pro model multirotorového systému bylo využito softwaru MikroKopter-Tool (viz kapitola 6.3 *Waypointy a letové osy*). Pro kalibraci kamery byly využity aplikace PhotoModeler a iWitness. Pro sběr pozemních dat bylo využito speciálních aplikací ke GNSS přístrojům, totálními stanicím apod.

### **Software pro letovou fázi**

Software pro letovou fázi byl shodný s programovým vybavením fáze plánovací. Opět bylo využito aplikace HappyKillmore's Ground Control Station a MikroKopter-Tool, které umožňovaly okamžitě analyzovat aktuální polohu nosiče, včetně jeho náklonů a rychlosti letu (záleží na technickém vybavení modelu). Vše bylo možné zobrazovat na podkladu aplikace Google Earth a leteckém kompasu.

### **Software pro zpracovatelskou fázi**

Hlavní pilíř zpracovatelské fáze tvořily fotogrammetrické produkty. Během práce bylo využito několik produktů světových firem v oblasti fotogrammetrie. Software je nutné rozdělit podle metody zpracování leteckých snímků. V případě zpracování metodami stereofotogrammetrie byl využit produkt společnosti Intergraph. Jedná se o program LPS, který patří mezi světovou špičku v oblasti zpracování fotogrammetrických dat. V případě použití druhé fotogrammetrické metody zpracování dat SfM (Structure from Motion) byl využit software Agisoft PhotoScan Professional edition.

### **Doplňkový software**

Mezi podpůrné programy lze zařadit aplikace pro tvorbu grafů, úpravu obrázků, psaní textů apod. Jde zejména o kancelářský balík Microsoft Office, Adobe Photoshop a Corel Draw.

## **4.3 Kamera a její kalibrace**

*Část informací, které jsou uvedeny v této kapitole vychází z bakalářské práce Martina Šimíčka „Neměřické kamery při fotogrammetrickém studiu památkových objektů“. Práce byla vypsána autorem disertační práce za účelem výzkumu neměřických kamer v UAV systémech. Autor práci odborně vedl a podílel se na laboratorních experimentech i zpracování.*

Nosič je sice základním předpokladem pro UAV fotogrammetrii, ale kamera je právě to zařízení, které umožňuje tvorbu digitální reprezentace krajiny. Proto musely být na kameru kladeny vysoké požadavky co se geometrické kvality týče. Pro UAV fotogrammetrii mohou být s úspěchem použity téměř všechny typy digitálních kamer. Bylo ale vhodnější použít kamery s větší velikostí čipu. Tuto podmínku splňují digitální zrcadlovky, které mají dostatečnou velikost čipu a disponují podstatně kvalitnějšími objektivy.

### **4.3.1 Kamera**

Na Katedře geoinformatiky byla pro fotogrammetrické účely vyčleněna digitální zrcadlovka Canon EOS 500D. Základní charakteristika kamery je uvedena v tabulce 4.1.

Důležitější než tělo kamery je typ objektivu. V ideálním případě by objektiv měl mít pevné ohnisko s velmi stabilními optickými prvky. Při dodržení určitých požadavků lze použít i tzv. zoom objektivy. Pro účely této práce byl použit objektiv Canon EF-S 18-55 mm (model EW-60C). Jedná se o standardní a kvalitní objektiv firmy Canon.

Tab. 4.1 Základní parametry použitých kamer (autor: J. Miřijovský).

Název kamery	Canon EOS 500D
Typ kamery	Digitální zrcadlovka s výměnnými objektivy
Typ snímače	CMOS
Velikost snímače (mm)	22,334 x 14,889
Rozlišení snímače (px)	4752 x 3168
Poměr stran snímače	3:2
Velikost pixelu ( $\mu\text{m}$ )	4,7
Objektiv	Canon EF-S 18-55 mm

#### 4.3.2 Kalibrace

Prvky vnitřní orientace kamery pro účely fotogrammetrie byly zjištěny pomocí kalibrace. Pavelka (2002) uvádí, že kalibrace je určení vlastností fotografického přístroje, zejména zjištění prvků vnitřní orientace, což jsou:

- konstanta komory (ohnisková vzdálenost v milimetrech, označení:  $f$  nebo  $c$ ),
- poloha hlavního snímkového bodu (souřadnice hlavního bodu, označení:  $x_0, y_0$ )
- radiální distorze objektivu (označení  $K, K_2, K_3$ ).

Prvky vnitřní orientace kamery lze určit buď ve speciálních laboratořích, nebo svépomocí. Zatímco letecké měřické kamery jsou již obvykle kalibrovány výrobcem, pro malé kamery využívané v SFAP aplikacích kalibrační protokoly známy nejsou. Různé kalibrační metody pro určení prvků vnitřní orientace popisuje Fraser (1997) nebo Wolf and Dewitt (2000).

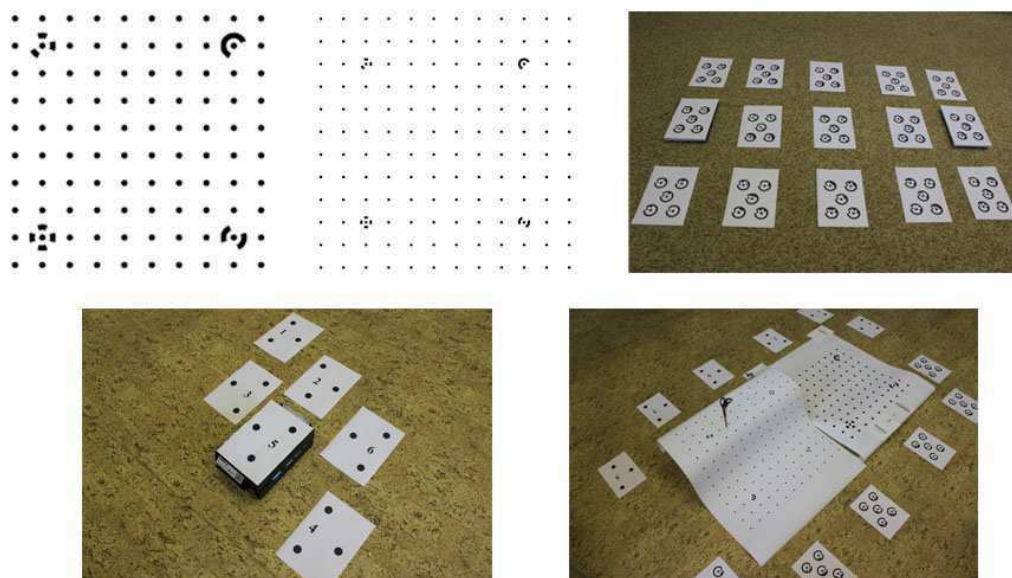
Existují různé techniky jak provést kalibraci. Základní dělení je dáno typem referenčního objektu, místem a časem kalibrace. Jedná se o:

- kalibraci laboratorní,
- simultánní,
- kalibraci pomocí testovacího pole.

Ne všechny způsoby kalibrace jsou dosažitelné pro malé neměřické kamery. Například laboratorní kalibrace se provádí pouze pro měřické kamery se speciálními přístroji a na specializovaných pracovištích. Vhodnou a nejčastěji použitou kalibrací pro digitální neměřické kamery byla kalibrace pomocí testovacího pole s následným upřesněním simultánní kalibrací (tzv. on the field calibration).

Princip metody spočívá ve snímkování rovinného, nebo prostorového testovacího (kalibračního) pole z několika optimálně konfigurovaných stanovisek, ze kterých je pořízena sada konvergentních snímků s vhodným úhlem protnutí os záběru. Je popsána celá řada způsobů jak volit polohu stanoviška, ale všechny se shodují v dodržení zásad průsekové fotogrammetrie jako konvergence os a natáčení kamery o 90° pro fixaci polohy hlavního snímkového bodu.

V průběhu práce na kalibraci kamery bylo využito jak rovinných, tak i prostorových testovacích polí. Testovací pole se skládalo ze speciálních terčů, které byly rozmístěny v pravidelném intervalu po celé ploše pole. Pro použití ve speciálních kalibračních aplikacích mohou být vybaveny tzv. kódovanými terči, které mají specifický tvar, a software na základě vyhodnocení jeho tvaru dokáže určit jeho přesnou polohu na testovacím poli. V rámci ověření výsledků bylo vytvořeno improvizované prostorové kalibrační pole složené ze všech použitých polí, ve kterém byly terče rozdílné nejen v souřadnici X a Y, ale také v souřadnici Z. Pro kalibraci byly využity programy PhotoModeler a iWitness. Pro zachování co největší přesnosti byla proto využita kalibrační pole dodávaná těmito společnostmi. V praxi je však možné si vytvořit své vlastní pole o libovolném počtu bodů a rozmístění. Kalibrační listy, na kterých byla provedena testovací kalibrace kamery, jsou uvedeny na obrázku 4.5. Za názvem pole je uvedeno číslo. Dále v textu bude pole označováno již jen tímto číslem.



Obr. 4.5 Různé typy kalibračních polí. Small sheet (1) (vlevo nahoře), Large sheet (2) (nahore uprostřed), Multi sheet (3) (vpravo nahoře), iWitness sheet (4) (vlevo dole), vlastní řešení (5) (vpravo dole) (foto: J. Miřijovský, M. Šimíček).

Kalibrační pole č. 1, 2 a 3 jsou součástí programu PhotoModeler. Číslo jedna a dvě jsou rovinná pole skládající se z matice bodů, která obsahuje deset bodů v ose x a deset bodů v ose y, resp. dvanáct a dvanáct bodů v případě pole č. 2. Čtyři body jsou vyznačeny pomocí kódovaných terčů. Obě pole byla vytisknuta na velký formát 90 x 90 centimetrů. Kalibrační pole č. 3 je také obsaženo v programu PhotoModeler. Jedná se

o prostorové kalibrační pole složené ze 75 kódovaných terčů na 15 listech formátu A4. Správné rozmístění bodů lze vidět na obrázku 4.5. Dva krajní listy byly umístěny výše než ostatní. Tím bylo docíleno změny v souřadnici Z. Výhoda prostorového bodového pole spočívala především v tom, že umožňovala lepší rozložení v prostoru tak, aby pole záběru co nejvíce vyplňovaly kalibrační listy.

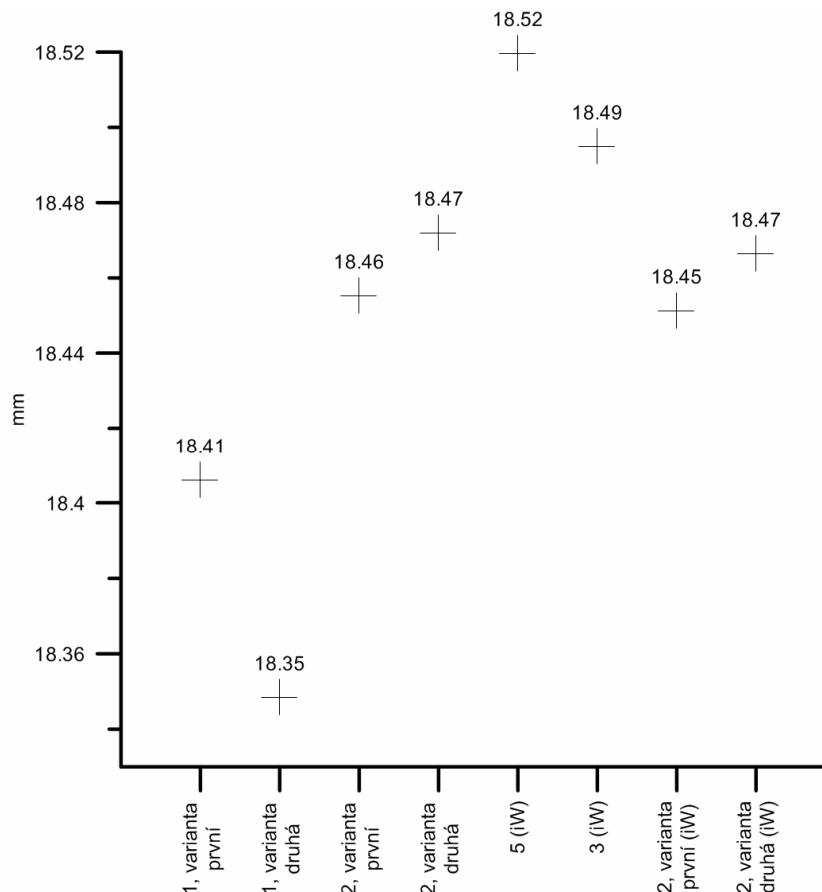
Další typ kalibračního pole (č. 4) je dodáván společně s programem iWitness. Pole je složeno z 15 bodů na celkem šesti listech papíru formátu A4. Tak jako u předcházejícího pole i zde se nejednalo o pole rovinné, ale o pole se změnou v souřadnici Z. Poslední kalibrační pole bylo vlastní a mělo potvrdit nebo vyvrátit správnost procesu kalibrace. Jedna jeho celá část byla výrazně zvednuta, čímž došlo ke změně v souřadnici Z.

Snímkování probíhalo vždy podle doporučených postupů daného programu. Stanoviska byla rozmístěna kolem kalibračního pole tak, aby jednotlivá stanoviska byla od sebe vzájemně pootočená o  $90^\circ$ . Na každém stanovisku byly pořízeny snímky v normální poloze kamery a v poloze otočené o  $90^\circ$  ve vlastní rovině na každou stranu. Z jednoho snímkování bylo pořízeno celkem 12 snímků. Aby byla splněna podmínka, že optické členy v objektivu se nesmí během snímkování hýbat, byla vypnuta optická stabilizace obrazu, přepnuto na manuální ostření a v případě zoom objektivu byla také zafixována jeho pozice v krajní poloze páskou. Tím bylo dosaženo stabilní polohy všech optických členů.

Snímky se po vyfotografování nesměly žádným způsobem upravovat. Zejména v případě změny rozlišení snímků by došlo k jejich znehodnocení a kalibrační proces by neproběhl správně. Kalibrace v obou zmiňovaných programech nebyla složitým procesem. Je však třeba mít na paměti, že pro správnou kalibraci prvků vnitřní orientace musí být alespoň jeden parametr kamery znám. Jako pevná a neměnná hodnota byla zadána velikost senzoru kamery. Velikost senzoru je zpravidla i nejpřesněji určena již při výrobě fotoaparátu. V programu PhotoModeler je kalibrační proces zcela automatický. Program iWitness nepoužívá kódované terče, a proto musely být všechny body na všech snímcích nadefinovány ručně.

Při kalibraci kamery bylo pořízeno celkem osm sad snímků kalibračních polí, některá pole byla focena dvakrát. V programu PhotoModeler byla zpracována kalibrační pole číslo 1 a 2. V programu iWitness byly zpracovány snímky ze všech polí. Z výsledných 12 projektů byly vybrány ty, které měly střední kvadratickou chybu menší než 0,5 mm. Výsledky konečných osmi kalibrací jsou uvedeny v tabulce 4.2. V obrázku 4.6 je uveden graf s hodnotami konstanty komory pro jednotlivé výsledky kalibrací.





Obr. 4.6 Výsledné hodnoty konstanty kamery v závislosti na typu kalibrace (autor: J. Miřijovský).

Mezi výsledky hodnot ohniskových vzdáleností a polohy hlavního bodu nejsou výrazné rozdíly, nicméně z tabulky lze vypočítat velký rozdíl mezi koeficienty radiální distorze. Rozdíl byl dán tím, že každý z programů používá jiný typ výpočtu koeficientů  $K$ . Proto hodnoty  $K$  nemohly být přímo porovnatelné mezi sebou. Jediný možný způsob, jak bylo možné hodnoty porovnat, bylo použít surová čísla vzdálenosti od polohy hlavního snímkového bodu (tzv. radiální vzdálenost) a k ní příslušnou hodnotu radiální distorze. Problémem bylo, že tyto hodnoty lze získat pouze z programu iWitness. Program PhotoModeler nabízí uživateli pouze vypočítané koeficienty. Nemožnost použití těchto koeficientů např. v programu LPS dokazují rozdílné výpočty koeficientů  $K$  v LPS a PhotoModeler.

Řešení použité v programu PhotoModeler:

$$\Delta r = K_1 \times r^2 + K_2 \times r^4; \quad (10)$$

kde:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (11)$$

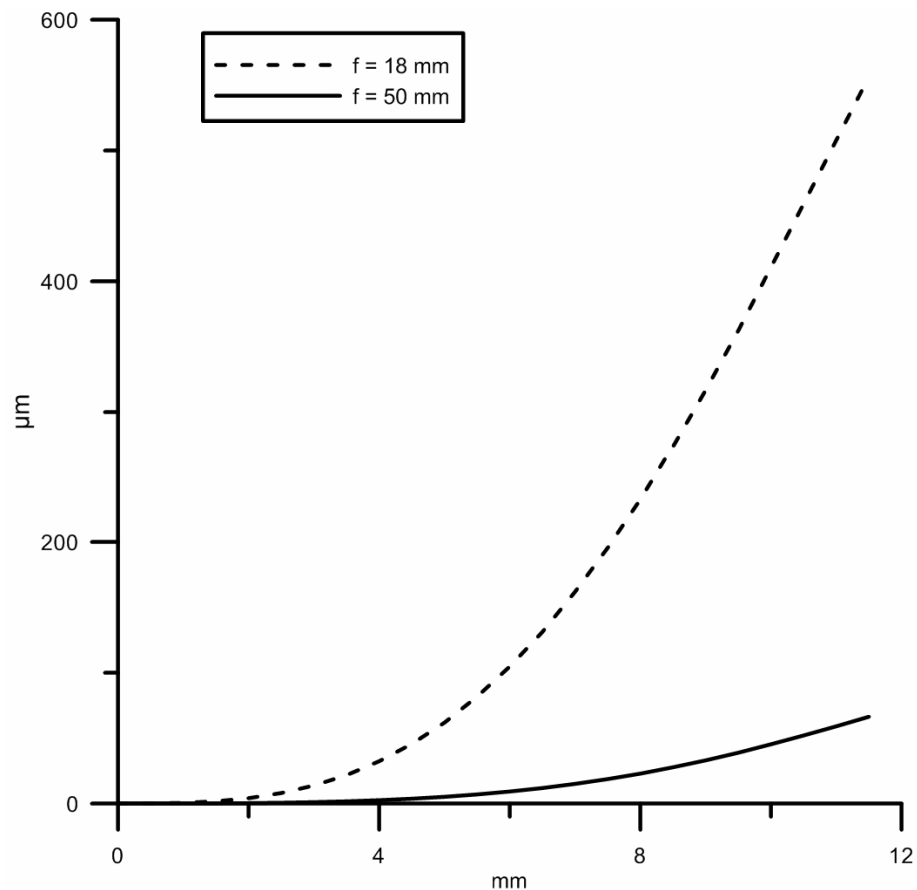
Řešení použité v LPS:

$$\Delta r = K_0 \times r + K_1 \times r^3 + K_2 \times r^5 \quad (12)$$

Tab. 4.2 Výsledky kalibrace kamery Canon EOS 500D s RMS chybou menší než 0,5 (autor: J. Miřijovský).

Kalibrační pole	Program	f (mm)	$x_p$ (mm)	$y_p$ (mm)	K1	K2	K3	RMS error
1, varianta první	PM	18,4061	0,002	0,003	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$-1,34 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,401
1, varianta druhá	PM	18,3483	0,002	0,002	$5,63 \cdot 10^{-4}$	$-1,34 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,252
2, varianta první	PM	18,4552	9,30E-04	0,001	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$-1,16 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,177
2, varianta druhá	PM	18,4719	0,001	0,001	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$-1,16 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,163
5	iW	18,5196	-0,1331	0,1937	$5,28 \cdot 10^{-4}$	$-1,1 \cdot 10^{-6}$	$-1,21 \cdot 10^{-9}$	0,280
3	iW	18,4948	-0,0991	0,1335	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$-8,1 \cdot 10^{-7}$	$-3,03 \cdot 10^{-9}$	0,260
2, varianta první	iW	18,4512	-0,0812	0,14	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$-1,3 \cdot 10^{-6}$	$-9,75 \cdot 10^{-11}$	0,280
2, varianta druhá	iW	18,4663	-0,128	0,1357	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$-8,5 \cdot 10^{-7}$	$-2,33 \cdot 10^{-9}$	0,200

Průběh radiální distorze a hodnota celkového zkreslení záležela především na ohniskové vzdálenosti objektivu a geometrické kvalitě snímku. Obecně platí, že čím byla kratší ohnisková vzdálenost (objektiv bude mít širší úhel záběru), tím bylo výraznější zkreslení objektů na snímku. Porovnání průběhu radiální distorze na objektivu EF-S 18-55 mm v poloze s konstantou 18 mm a na objektivu EF 50 mm je vykreslen na obrázku 4.7. Lze pozorovat velmi výrazný rozdíl v průběhu radiální distorze. Na objektivu s konstantou komory 18 mm dosahuje distorze a tedy zkreslení obrazu hodnot  $550 \mu\text{m}$ . Přestože byl znám průběh radiální distorze a bylo tedy možné správně opravit polohu bodu na snímku do skutečné pozice, mohlo docházet ke zkreslení kresby v obraze. Bylo proto lepší využít při zpracování snímků pouze střední část obrazu, která netrpěla tak výraznou geometrickou vadou.



Obr. 4.7 Průběh radiální distorze u dvou objektivů s rozdílnou konstantou (autor: J. Miřijovský).

Ze všech výsledků je patrné, že jak hodnoty konstanty komory, tak i poloha hlavního snímkového bodu se u jednotlivých kalibrací lišily. Po odfiltrování záznamů, které nesplnily kritérium v podobě limitní RMS chyby, byly konečné parametry vnější orientace určeny jako průměr ze všech kalibrací. Proces kalibrace také dokázal poměrně silnou nestabilitu optických členů objektivu. V podstatě každá provedená kalibrace poskytla jiné výsledky zejména u konstanty kamery. V tabulce 4.3 jsou uvedeny konečné výsledky kalibrace pomocí testovacího pole. Záměrně nejsou uvedeny koeficienty radiálního zkreslení, protože ty musely být vypočítány přímo až v programu LPS podle hodnot radiálních vzdáleností a k nim příslušných hodnot radiální distorze. Výsledky z tabulky 4.3 takto vstoupily do procesu zpracování snímků a během procesu automatické aerotriangulace byly upřesněny pomocí simultánní kalibrace. Více v kapitole 8.1.1 *Aerotriangulace*.

Tab. 4.3 Výsledné hodnoty kalibrovaných neměřických komor (autor: J. Miřijovský).

Kamera	f (mm)	$x_p$ (mm)	$y_p$ (mm)	$x_0$ (mm)	$y_0$ (mm)
EOS 500D	18,45168	-0,05443	0,076238	11,1125	7,5207

#### **4.4 Personál a znalosti**

UAV fotogrammetrie tvoří systém technologií a fotogrammetrických aplikací. Systém by nemohl být nikdy kompletní bez personálu, který všechny hardwarové a softwarové prostředky bude ovládat. Personál musí disponovat znalostmi na vysoké odborné úrovni, aby byl schopen analyticky uvažovat nad celou problematikou UAV fotogrammetrie a řešit úlohy s ní spojené. UAV fotogrammetrie je mladé a velmi dynamicky se rozvíjející odvětví klasické fotogrammetrie a žádá si odlišný přístup k přípravným pracím, postupu práce v terénu, i ke zpracování snímků v laboratoři. K tomu musí být personál dostatečně proškolen. Jen tak se UAV fotogrammetrie stane výkonným nástrojem pro sběr a zpracování primárních, velmi přesných dat o Zemi.

## 5 LEGISLATIVA PRO PROVOZ UAV

Při používání UAV technologií bylo třeba se vždy řídit platnou legislativou v dané zemi. V naší zemi byla z počátku cesta k samostatnému snímkování z leteckých modelů velmi komplikovaná. Tuto cestu prošlapávali zejména pracovníci Geografického ústavu ČSAV v Brně. Jak uvádí Kolečka (2001), snímkování z létajících strojů bylo v počátcích předmětem zdlouhavého schvalování a zdůvodňování. Za vše mohl zákon o utajovaných skutečnostech, který u nás dlouhá léta platil. Jak dále Kolečka (2001) uvádí, od sedmdesátých let 20. století došlo ke zmírnění dopadu tohoto zákona na neměřické snímky pro výzkumné účely, což umožnilo odstartovat využití UAV v naší zemi. Doba přísného utajování je již naštěstí od dob vzniku samostatné České republiky pryč a snímkovat se může legálně vše vyjma objektů, u kterých je to výslovně zakázáno.

### 5.1 Provoz bezpilotních systémů

Samotný provoz bezpilotních systémů neměl po dlouhou dobu jednoznačnou oporu v zákoně. Z pohledu české legislativy se až do konce února roku 2012 vždy jednalo o letecký model, který nemusel být nikde registrován, a to bez rozdílů. Tedy ani stroje, které byly těžší než 20 kg, nemusely mít speciální licenci pro létání. Od 1. 3. 2012 vstoupil v platnost Doplněk X leteckého předpisu L2, který významně mění pravidla pro použití bezpilotních systémů. Pro sportovní a rekreační účely je doplněk X doporučeným, pro výdělečnou a výzkumnou činnost pak závazným předpisem. V souvislosti s nabytím účinnosti doplňku X vydal Úřad pro civilní letectví (dále jen ÚCL) směrnici CAA/S-SLS-010-0/2012 s názvem Postupy pro vydání povolení k létání letadla bez pilota.

Ze všeho nejdříve jsou v doplňku X předpisu L2 vysvětleny rozdíly mezi jednotlivými systémy. Doplněk rozlišuje následující systémy:

#### **Autonomní letadlo**

Bezpilotní letadlo, které neumožňuje zásah pilota do řízení letu.

#### **Bezpilotní letadlo (UA)**

Letadlo určené k provozu bez pilota na palubě. V mezinárodním kontextu se jedná o nadřazenou kategorii dálkově řízených letadel, autonomních letadel i modelů letadel; pro účely tohoto doplňku se bezpilotním letadlem rozumí všechna bezpilotní letadla kromě modelů letadel s maximální hmotností nepřesahující 20 kg.

#### **Bezpilotní systém (UAS)**

Systém skládající se z bezpilotního letadla, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako například komunikačního spojení a zařízení pro vypuštění a návrat. Bezpilotních letadel, řídicích stanic nebo zařízení pro vypuštění a návrat může být v rámci bezpilotního systému více.

## Model letadla

Letadlo, které není schopné nést člověka na palubě, je používáno pro soutěžní, sportovní nebo rekreační účely, není vybaveno žádným zařízením umožňujícím automatický let na zvolené místo, a které, v případě volného modelu, není dálkově řízeno jinak, než za účelem ukončení letu nebo které, v případě dálkově řízeného modelu, je po celou dobu letu pomocí vysílače přímo řízené pilotem v jeho vizuálním dohledu.

Další významný rozdíl, který nastal od 1. 3. 2012 je ten, že je nutné za určitých podmínek model registrovat. ÚCL pro tyto účely modely rozdělilo do kategorií podle vzletové váhy i s užitečným zařízením. V případě, že bude UAV model použit pro účely výdělečné, výzkumné a experimentální, musí být registrován vždy, a to bez rozdílů v celkové vzletové váze stroje. Pokud bude model používán pouze pro sportovní a rekreační účely, povinnost registrace nastává až od váhové kategorie 20 kg. V případě, že je stroj registrován, již se nejedná o model letadla, ale o bezpilotní letadlo či bezpilotní systém. Při registraci stroje pro výdělečné, výzkumné a experimentální účely s váhou nad 7 kg musí pilot splnit teoretický a praktický test. V případě registrace stroje nad 20 kg platí výše zmíněné požadavky i pro sportovní a rekreační účely. Kompletní přehled požadavků pro jednotlivé kategorie UAV modelů lze nalézt v příloze č. I.

## 5.2 Prostory pro provádění letu

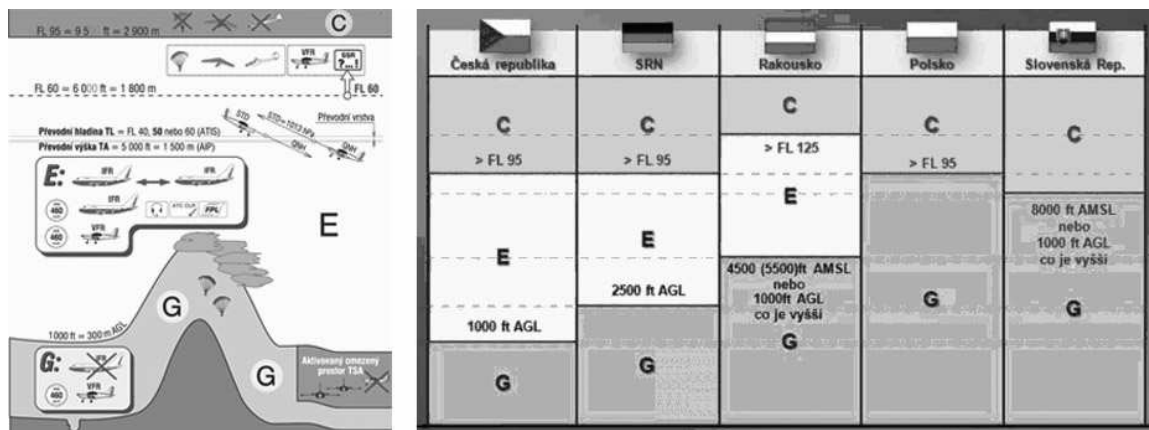
V České republice rozeznáváme čtyři třídy letových prostorů, u některých z nich jsou spodní a horní hranice vymezeny tzv. letovými hladinami angl. Flight level (FL). Letové hladiny jsou uváděny ve stopách - tedy FL 95 = 9 500 stop. Každý prostor má své využití, UAV modely je možné využívat pouze v jednom z nich.

Prostor třídy C - Jedná se o řízený prostor v ČR, který začíná ve FL 95 (od 2 900 m) a končí v FL 660. Pro létání v těchto prostorech je vyžadováno povolení od Řízení letového provozu (ŘLP).

Prostor třídy D - Jedná se o řízené okrsky (CTR) a řízené koncové oblasti (TMA) řízených letišť. Všechny lety musí mít letové povolení a navíc se vyžaduje oboustranné spojení mezi letadlem a Řízením letového provozu.

Prostor třídy E - Nachází se v ČR od 300 m AGL (above ground level) do FL 95.

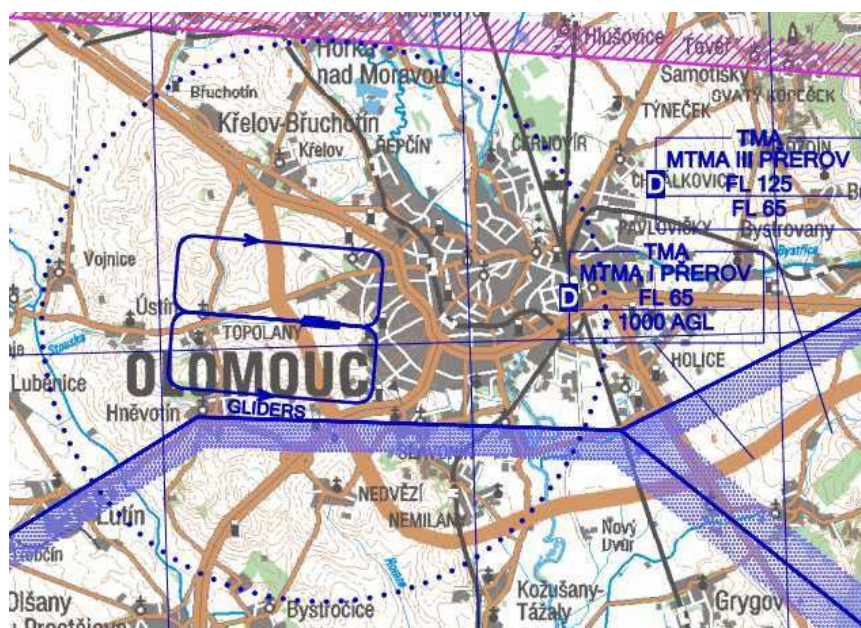
Prostor třídy G - V ČR je tento prostor platný do výšky 300 m AGL. Létá se výhradně za viditelnosti tzv. VFR (Visual flight rules).



Obr. 5.1 Vlevo - letové třídy v ČR, vpravo - letové třídy v zahraničí (zdroj: <http://www.paragliding-4u.cz>).

Ne všechny státy mají zcela totožné rozdělení vzdušného prostoru. Jak lze vidět na obrázku 5.1, v sousedních státech se mírně liší výškové hranice pro jednotlivé třídy. Provoz UAV je možný pouze ve třídě G. I zde platí jistá omezení a požadavky pro zajištění bezpečnosti. Bez povolení a až do výšky 300 m AGL se smí létat pouze mimo oblasti řízeného okrsku letiště (CTR) a mimo oblast letištní provozní zóny (ATZ). V případě, že je místo v letištní provozní zóně (ATZ) neřízeného letiště, pak musí být splněny podmínky stanovených provozovatelem letiště a létat se smí pouze na základě koordinace s letištní letovou informační službou (AFIS) nebo s provozovatelem letiště, není-li služba AFIS poskytována (Letecký předpis L2, 2012).

V případě, že se místo letu nachází v řízeném okrsku letiště (CTR) a současně je do výšky 100 metrů nad zemí a v horizontální vzdálenosti větší než 5 500 m od vztažného bodu letiště, pak se neuplatňují požadavky na získání letového povolení a na stálé obousměrné spojení se stanovištěm řízení letového provozu (Letecký předpis L2, 2012).



Obr. 5.2 Letiště Olomouc s vyznačenou zónou ATZ (zdroj: letecká informační služba).

Při využití letové třídy G je samozřejmě nutné respektovat zakázané, nebezpečné a další, uživatelem aktivované a vyhrazené prostory. Přelet v těchto prostorech není možný bez příslušného povolení. Informace o aktuálním využití vzdušného prostoru lze nalézt jednak v Plánu využití vzdušného prostoru a jednak v mapové aplikaci Řízení letového provozu, kde lze nalézt leteckou mapu ICAO. Více informací v kapitole 6.1 *Kontrola lokality a povolení k letu*.

Při letech v území se zvláštním režimem ochrany jako jsou národní parky, chráněné krajinné oblasti, národní přírodní rezervace atd. je vždy důležité zajistit povolení k letu u příslušného správního orgánu. I přesto, že nad daným typem území nemusí platit žádné omezení z hlediska ŘLP, může být vyžadováno zvláštní povolení z důvodu ochrany životního prostředí, vodních zdrojů, živočichů nebo vegetace.

Aber et al. (2010) uvádí, že v některých státech může být také zákaz fotografovat vybrané veřejné budovy, vojenské objekty, elektrárny nebo přírodní rezervace. Zvláštní situace panuje na Slovensku. Podmínky pro použití UAV modelů jsou v této republice podobné jako u nás. Nicméně velké „problémy“ zde způsobuje zákon 241/2001 Z.z. (resp. jeho § 60), který vznikl v době bývalého režimu, a který byl v naší zemi po roce 1993 zrušen. Jedná se o zákon o ochraně utajovaných skutečností a o změně a doplnění některých zákonů. Konkrétně v § 60 Letecké snímkování a vykonávání geodetických a kartografických prací je zmíněno, že „Na letecké snímkovanie územia Slovenskej republiky a vykonávanie leteckého meračského snímkovania pre potreby správy štátnych hraníc, geodézie a kartografie z lietajúceho zariadenia (ďalej len "letecké snímkovanie") sa okrem leteckého snímkovania pre potreby obrany štátu vyžaduje povolenie, ktoré vydáva Úrad až po súhlase:

- a) Ministerstva obrany,
- b) Ministerstva vnútra Slovenskej republiky,
- c) Ministerstva hospodárstva Slovenskej republiky,
- d) Slovenskej informačnej služby,
- e) Leteckého úradu Slovenskej republiky,“ (Zákon 241/2001 Z.z.).

Výše uvedená citace ze zákona prakticky znemožňuje provádět letecké snímkování z UAV modelů za účelem měřičského vyhodnocení bez toho, aniž by musel být porušen zákon. Povolení ke snímkování sice je možné teoreticky získat, je však otázkou, zda je získání licence finančně únosné.

Při provádění UAV leteckého snímkování v dané zemi je vždy velmi důležité se seznámit s místními zákony pro letecké snímkování a pro použití bezpilotních systémů. V praxi to je někdy velmi obtížné (např. jazyková bariéra). Nejlepší z cest je mít v dané zemi spřátelenou instituci, která s vyřízením všech potřebných formalit pomůže. Na legislativní podmínky je potřeba myslet již v přípravné fázi snímkování, protože vyřízení všech formalit může trvat i několik měsíců.



## 6 PLÁN LETU A PŘÍPRAVA NA SNÍMKOVÁNÍ

Plánování snímkování bylo důležité především v případě, pokud se výsledky snímkování používaly pro fotogrammetrické účely. Nebylo možné přijít do lokality zájmu a provést snímkování bez přípravy. Takto pořízené snímky nemusely splňovat přísné požadavky na fotogrammetrické zpracování. I v případě, že nebylo potřeba získat měřické snímky, bylo nutné se zabývat alespoň letovým plánem, určit výšku letu, zabývat se směrem osvětlení apod. Přípravné práce se vždy samozřejmě lišily podle typu použitého modelu, oblasti zájmu a účelu snímkování. Obecně však bylo možné přípravné práce rozdělit na následující kroky:

- kontrola lokality a povolení k letu,
- stanovení parametrů pro snímkování,
- waypointy a letové osy,
- meteorologická situace, světelné podmínky.

### 6.1 Kontrola lokality a povolení k letu

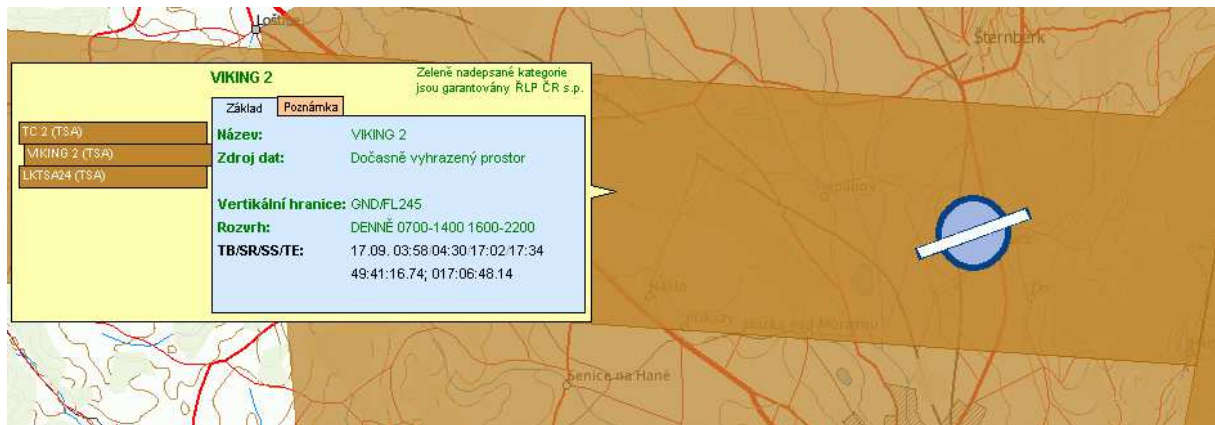
Velmi často byly počáteční informace o lokalitě zájmu silně omezeny jen na informace o velikosti, přibližném umístění a jak se na místo dostat s vybavením. Naštěstí v době moderních technologií byly neocenitelným pomocníkem aplikace jako je Google Earth nebo různé on-line mapové aplikace se satelitními nebo leteckými snímky lokality. S jejich pomocí bylo možné mnohem přesněji určit nejen rozměry lokality zájmu, ale také i případné překážky při snímkování. Ne vždy však byla kontrola podle on-line zdrojů dostatečná. Letecké snímky jsou často několik let staré a lokalita vypadala jinak než v době původního snímkování. Důkazem toho může být obrázek 6.1, na kterém je zaznamenán stav lokality Tepenec. Jedná se o archeologické naleziště, které leží na vrcholu kopce a je obklopeno břidlicovým lomem. Původní rozsah lokality je vidět na leteckých snímcích z roku 2009 (žlutá čára). Ovšem i v roce 2012 byly k dispozici stále stejné snímky, které ale již nezachycovaly správný stav z důvodu odtěžení části kopce. V takovém případě musel být před vlastním snímkováním proveden průzkum přímou rekognoskací terénu a musela být zachycena aktuální situace (na obrázku červená čára).



Obr. 6.1 Rozsah lokality Tepenec podle aktuální Google Maps (žlutě) a skutečný aktuální stav podle terénního šetření (autor: J. Miřijovský).

Legislativní podmínky k provádění letu s pomocí UAV zařízení byly podrobně popsány v kapitole 5 *Legislativa*. Mimo jiné byl zmíněn i plán využití letového prostoru dle letecké mapy ICAO. Ta je jedním z nejdůležitějších podkladů při plánování leteckého snímkování. Existuje velké množství leteckých map ICAO, od letištních map velkých měřítek až po leteckou mapu světa v M 1 : 1 000 000. Kompletní přehled map lze nalézt v leteckém předpisu L4. Pro předletovou přípravu za účelem snímkování pomocí modelů letadel se nejlépe hodí mapová aplikace Řízení letového provozu AIS View. V aplikaci AIS View lze nalézt informace z letecké informační služby a dále meteorologické informace. Podle informací z odborného leteckého serveru aeroweb.cz je hlavním cílem aplikace přehledně zobrazit aktivace dočasně vyhrazených prostorů TSA (Temporary Segregated Area), TRA (Temporary Reserved Area) a omezené prostory, dále omezení a navigační výstrahy publikované zprávou NOTAM (Notice To Airmen), letištní NOTAM a vybrané meteorologické informace. Data zobrazovaná v AIS View jsou rozdělena do dvou kategorií. A to na data s garancí ŘLP ČR, s.p. a data negarantovaná, která jsou z jiných zdrojů.

Důležitost předletové přípravy podle aktuálních informací ŘLP dokládá následující příklad. V září 2012 mělo proběhnout UAV letecké snímkování v oblasti CHKO Litovelské Pomoraví. Při pohledu do aplikace AIS View bylo zřejmé, že pro daný den snímkování není možné, a to v žádné výšce nad terénem.



Obr. 6.2 Vyhrazený prostor v aplikaci AIS View umožňuje letecké snímkování (autor: J. Miřijovský, zdroj dat: aplikace AIS View).

Zájmová oblast je na obrázku 6.2 označena hnědě, což znamená, že je zde vyhrazený prostor TSA. V informacích si lze přečíst jaký je výškový rozsah omezeného prostoru a nejbližší možná letová hladina pro přelet. Z obrázku 6.2 jednoznačně vyplývá, že omezení pro danou oblast v CHKO Litovelské Pomoraví bylo již od nulové výšky nad terénem (značka GND = Ground). Následně byl nalezen dokument, který vysvětloval důvod použití TSA v lokalitě. Jednalo se o veřejnou vyhlášku, která rezervovala vyhrazené prostory pro vojenské letecké cvičení RAMSTEIN ROVER 2012. Aplikace AIS View je nezbytnou pomůckou pro všechny uživatele, kteří plánují využití vzdušného prostoru jakýmkoliv bezpilotním prostředkem.

## 6.2 Stanovení parametrů pro snímkování

Mezi nejdůležitější parametry pro snímkování patří: výška letu, měřítko snímku, délka základny mezi středy snímků, prostorové rozlišení snímku a stanovení ohniskové vzdálenosti kamery. Ve většině případů jedna charakteristika ovlivní druhou. Je tedy nutné si na začátku stanovit požadavky na snímkování např. minimální prostorovou rozlišovací schopnost snímku.

### Výška letu

Letová výška modelu je jedním ze základních parametrů, který předurčuje prostorovou rozlišovací schopnost výsledných snímků a velikost scény, kterou je možné zachytit na jeden snímek. Samozřejmě musela být brána v potaz platná legislativa, která neumožňovala bez povolení snímkovat z větších výšek než 300 m nad povrchem terénu (platí pro bezpilotní systémy).

### Ohnisková vzdálenost

Ke snímkovací kameře lze vybrat téměř jakýkoliv objektiv. Ohniskové vzdálenosti (konstanty kamery) se tak mohou lišit od tzv. rybích ok až po teleobjektivy. Pavelka (2002) uvádí, že pro klasické letecké snímkování se nejčastěji používají objektivy s ohniskovou vzdáleností od 9 do 60 cm při výšce letu 1 000 až 5 000 m nad terénem. Pro UAV fotogrammetrii se však využívají nejrůznější kamery s téměř libovolnou

ohniskovou vzdáleností. Téměř vždy je však konstanta komory pod 10 cm. Je to dáno nízkou výškou letu. Je velmi nevýhodné použití dlouhých ohniskových vzdáleností z důvodu malého prostorového záběru výsledného snímku. Nejčastěji se používají ohniskové vzdálenosti od 24 do 80 mm (ekvivalent 35mm filmu) při výšce letu od 20 do 300 m. Použití delších ohnisek má výhodu v podobě menší radiální distorze a vyššího prostorového rozlišení snímku avšak za cenu prostorově menší oblasti, která může být obsažena v jednom snímku. Oproti tomu použití širokoúhlých objektivů má výhodu v poměrně velkém záběru terénu, ale za cenu nižší prostorové rozlišovací schopnosti a také větší míry radiálního zkreslení. Srovnání ohniskových vzdáleností pro jednotlivé typy kamer přehledně ukazuje tabulka 6.1. Tabulka ukazuje odpovídající si objektivy z hlediska ohniskové vzdálenosti. V případě použití 28mm objektivu na kinofilmové kameře, je potřeba použít 18mm objektiv na digitální zrcadlovce, aby se dosáhlo stejně širokého záběru. Rozdíly jsou dány rozdílnou velikostí senzoru.

Tab. 6.1 Srovnání objektivů pro různé typy kamer (upraveno podle: Aber, et al, 2010).

Zorné pole	Ohnisková vzdálenost			Množství světla dopadající na senzor
	35-mm film	Digitální SLR	Kompaktní fotoaparát	
Rybí oko	15 mm	9 mm	4 mm	Velmi vysoké
Širokoúhlý	28 mm	18 mm	7 mm	Vysoké
Normální	50 mm	31 mm	13 mm	Střední
Teleobjektiv	200 mm	125 mm	50 mm	Nízké

### Měřítka snímku

Výška letu a ohnisková vzdálenost kamery jsou parametry, které předurčují výsledné měřítko snímku. Je zřejmé, že při plánování letu musely být alespoň dva parametry známé, aby mohl být dopočítán třetí. Záleželo tedy jen na požadavcích zadavatele, které z parametrů stanovil jako pevné a důležité. Třetí parametr byl dopočítán. Je třeba doplnit, že měřítko snímku se vztahuje na snímek v době pořízení. Při zobrazení na digitálním zobrazovacím zařízení může být měřítko snímku samozřejmě různé.

### Prostorové rozlišení snímku

Pro digitální snímky není příliš vhodné používat klasické měřítko obrazu, ale nahrazuje se hodnotou GSD. Hodnota GSD je určena jako skutečná vzdálenost v terénu, která je na snímku respektive na senzoru kamery vyjádřena jedním pixelem. V době digitálních technologií může být hodnota různá podle toho v jakém přiblížení je zobrazen snímek na monitoru. Pokud pomineme zvětšování obrazu na monitoru, velikost GSD předurčuje výška letu, použitá ohnisková vzdálenost kamery a velikost jednoho obrazového prvku na senzoru kamery. Požadovaná hodnota GSD záleží na tom, co je ve snímku potřeba určit. Comer et al. (1998) uvádí, že pro identifikaci prvku v obraze jako

samostatného objektu musí být jeho velikost 4 - 9 x větší než je hodnota GSD. Jinými slovy objekt se musí skládat alespoň ze čtyř až devíti pixelů. Pokud bylo potřeba ve snímku identifikovat např. samostatně ležící kameny o reálné velikosti 12 cm, GSD musela být v ideálním případě 2 cm.

### **Délka základny**

Při plánování letu nesměla být opomenuta volba správné délky základny mezi dvěma snímky. Vzdálenost mezi středy snímků záleží přímo na volbě procentuelního překryvu mezi dvěma snímky. V případě, že výsledkem snímkování byly stereodvojice, bylo žádoucí, aby se překryv snímků pohyboval v podélném směru okolo 80 % a v příčném směru okolo 40 %. V konvenční letecké fotogrammetrii se uvádí podélný překryv již od 60 %. V UAV fotogrammetrii byla velikost překryvu do jisté míry dána použitým objektivem. Z důvodu vysokých hodnot radiální distorze širokoúhlých objektivů, které byly nejčastěji použity pro UAV fotogrammetrii, bylo vhodné použít pro zpracování snímku pouze část obrazu kolem středu. K pořízení stereodvojice, na které se oba dva snímky dostatečně překrývaly kolem středu na obě strany, pak byl potřeba 80% až 90% překryv. V případě tvorby „pouhé“ fotomozaiky mohl být překryv pouze 15%. Tato varianta však téměř nenastala. Stanovení parametrů pro snímkování lze nejlépe dokumentovat na následující ukázce.

Zadání úkolu zní: provést UAV snímkování břehové nátrže v CHKO Litovelské Pomoraví. Z leteckého snímku např. v Google Earth je možné si udělat základní představu o umístění a rozměrech lokality. V tomto konkrétním případě se jednalo o břehovou nátrž na řece Moravě s rozměry 55 m na délku a 30 m na šířku (bráno i s korytem toku).



Obr. 6.3 Břehová nátrž v lokalitě Štěpánov (foto: J. Miřijovský).

Základní otázkou, na kterou bylo nutné odpovědět, je, jaké je požadované rozlišení na snímku (tedy GSD). Pokud je znám typ snímkovací kamery a objektivu, pak požadované

rozlišení určuje výšku letu a tedy i počet snímků, které musely být pořízeny. Ve většině případů se jako pevný a neměnný parametr bere volba ohniskové vzdálenosti. Při použití kamery Canon EOS 500D s objektivem, který má ohniskovou vzdálenost 18 mm a při požadované GSD hodnotě 2 cm pro jeden pixel, bylo možné vypočítat požadovanou výšku letu podle následujícího vzorce:

$$GSD = \left( \frac{p \times Hg}{f} \right); \quad (13)$$

$$Hg = \left( \frac{GSD \times f}{p} \right); \quad (14)$$

$$Hg = \left( \frac{20 \times 18}{0,0047} \right); \quad (15)$$

$$Hg = 76596 \text{ mm}$$

kde:

Hg - je průměrná výška letu nad terénem,

GSD - Ground sample distance,

f - ohnisková vzdálenost,

p - skutečná velikost obrazového prvku senzoru.

Výška letu pro dodržení požadovaného GSD je 76,596 m.

Pokud je známa výška letu bylo možné v dalším kroku vypočítat jak velká část území bude pokryta jedním snímkem. Nejprve bylo třeba vypočítat měřítko snímku:

$$M = \frac{1}{ms} = \frac{f}{Hg}; \quad (16)$$

$$ms = \frac{Hg}{f}; \quad (17)$$

$$ms = \frac{7659,6}{1,8} \quad (18)$$

$$ms = 4255,33$$

kde:

M - je měřítko,

ms - měřítkové číslo,

f - ohnisková vzdálenost,

Hg - průměrná výška letu nad terénem.

Měřítko snímku je 1 : 4255.

Pro výpočet velikosti pokrytí jednoho snímku bylo potřeba znát velikost obrazového snímače v použité kameře. Údaj může být buď přímo v milimetrech a nebo v případě, že je známa velikost jedné světlocitlivé buňky, je dostačující znát hodnotu v pixelech. Údaj

je u většiny kamer volně dostupný v technických specifikacích. Pro Canon EOS 500D je velikost obrazového snímače  $22,3344 \times 14,8896$  mm. Výpočet velikosti skutečně snímané scény pak již byl jednoduchý:

$$D = 2,23344 \times 4255; \quad (19)$$

$$D = 9503,3 \text{ cm}$$

$$\check{S} = 1,48896 \times 4255; \quad (20)$$

$$\check{S} = 6335,5 \text{ cm}$$

Délka skutečně zobrazená na snímku byla 95 m a šířka scény byla 63 m. Obojí samozřejmě platí pouze za předpokladu pořízení kolmého snímku.

Z výsledku je patrné, že vzhledem k relativně malé velikosti objektu byla dostatečná velikostní rezerva pro snímkování a celý objekt se vlezl bez problému na jeden snímek. Velká rezerva umožňovala v případě potřeby snížit výšku snímkování a zvýšit tím hodnotu GSD. Pro výpočet správné výšky se zvolil opačný postup. Tedy nejprve se vypočetlo nové měřítko snímku při známých hodnotách velikosti senzoru a skutečné vzdálenosti, která měla být na jednom snímku, poté správná výška letu a nakonec bylo možné vypočítat novou hodnotu GSD.

Přestože bylo možné umístit celý objekt na jeden snímek, pro potřeby stereofotogrammetrického vyhodnocení musel být pořízen minimálně jeden stereopár. Ideální překryv pro UAV fotogrammetrii se pohybuje kolem 80 % v podélném směru. Zbývalo vypočítat správnou vzdálenost mezi místy jednotlivých expozic v případě 80% překryvu. S příčným překryvem nebylo nutné kalkulovat, protože byly potřeba pouze dva snímky (jedna stereodvojice) k pokrytí celého území.

$$B = D \times 1 - \left( \frac{PE}{100} \right); \quad (21)$$

$$B = 95 \times 1 - \left( \frac{80}{100} \right); \quad (22)$$

$$B = 19 \text{ m}$$

kde:

B - je vzdálenost mezi dvěma expozičními stanovišti,

D - skutečná délka terénu, která je zobrazena na snímku,

PE - požadovaný procentuelní překryv snímku.

Z výpočtu vyplývá, že vzdálenost mezi stanovišti, na kterých proběhla expozice, byla 19 m. V takovém případě dosahoval podélný překryv hodnoty 80 %. Je nezbytné si uvědomit, že většina neměřických kamer nemá čtvercový, ale obdélníkový formát senzoru. Před vlastním snímkováním muselo být rozhodnuto, která ze stran senzoru bude v linii letu. Podle toho se za písmeno D dosadila buď reálná délka nebo šířka území, kterou zaznamenala kamera při dané výšce letu. Pro UAV modely, které mají stále stejnou rychlost letu, lze vypočítat časový interval mezi expozicemi. Vzorec pro výpočet času pak je:

$$\Delta T = \frac{B}{Vg} \quad (23)$$

kde:

$\Delta T$  - je čas mezi dvěma expozičními stanovišti,

B - délka fotogrammetrické základny,

$Vg$  - průměrná rychlost letu.

### 6.3 Waypointy a letové osy

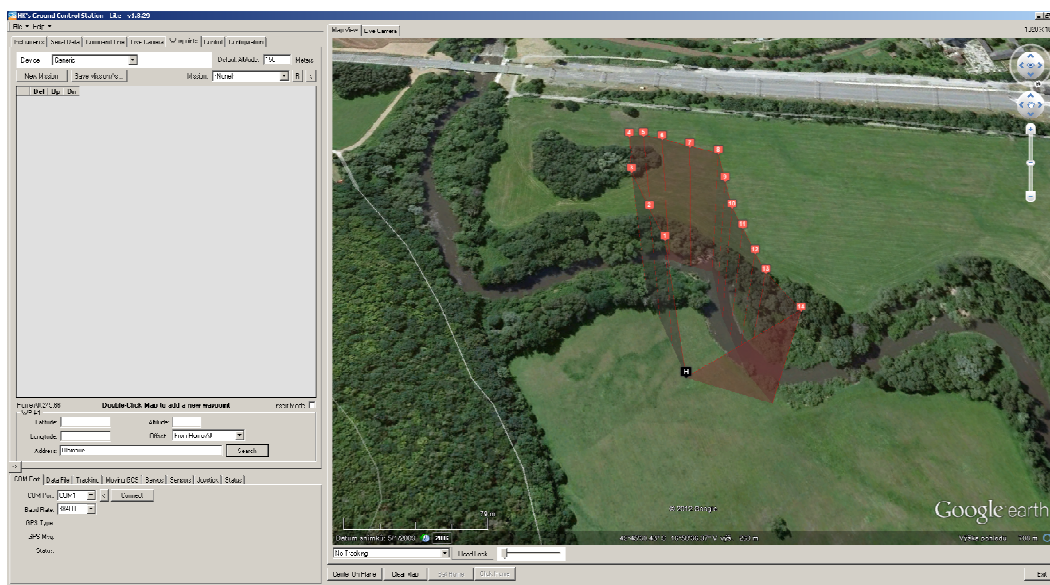
Stanovené parametry musely být přeneseny do grafického prostředí. Vznikly tzv. waypointy, neboli průletové body, a letové osy. Waypointy a letové osy jsou důležitými prvky pro navigaci snímkového letu. Waypoint je myšlený bod, který má přesně určeny souřadnice X, Y, Z. Jsou to body, které musí UAV systém proletět. Rovněž na vybraných z nich musí pořídit snímek nebo sérii snímků. Letová osa je myšlená čára, která spojuje jednotlivé waypointy. Možnosti grafického zpracování a navigace byly u různých systémů odlišné.

Nejjednodušší UAV systémy neumožňují žádnou navigaci letu podle letových os a waypointů, a to ani manuální. Jsou to nejlevnější systémy, které nemají žádným způsobem zajištěn přenos telemetrie ze zařízení k pilotovi. Takové systémy umožňují snímkování většinou pouze v kontinuálním módu, tedy v určitých časových intervalech. Navigace systému nad danou lokalitu je pouze přibližná a přesnost silně závisí na zkušenostech pilota. Pro tento typ modelů se doporučuje rozmístit pomocníky do zájmové lokality, kteří budou s pilotem komunikovat vysílačkou a navádět jej nad požadovanou oblast. Této metody využívali u nás v polovině 70. let pracovníci Geografického ústavu ČSAV (Kolejka aj., 2001). Navigační technologie v této době nedosahovaly dnešní úrovně. Rovněž první pokusy s UAV na Katedře geoinformatiky využívaly tohoto postupu.

Pokročilejší systémy umožňují manuální navigaci podle připravených letových os a waypointů. Podmínkou je, že model musí disponovat vlastním GPS modulem, případně IMU jednotkou, pro záznam náklonů kolem třech os. Za zmínku stojí práce odborníků z Malajsie, kteří prezentují svůj postup plánování UAV letu s pomocí softwaru Google Earth, Lentsika a Mapinfo professional. Z České Republiky je typickým zástupcem této kategorie paraglidový model Pixy, který byl prvním profesionálním zařízením využívaným na Katedře geoinformatiky. Pro vytvoření bodů a letových os lze s úspěchem použít také aplikaci Google Earth. Existuje však i celá řada open-source softwarů, které umožňují kvalitní přípravu a plán letu. Při práci s modelem Pixy byl hojně využíván software HK's Ground Control Software, který umožňuje pohodlné a jednoduché zadávání waypointů včetně výšky letu nad terénem. Body a letová osa se zobrazují na integrovaném Google Earth (obr. 6.4). Body bylo možné exportovat do textového souboru, který je možné kdykoliv zpětně použít. Tím je zajištěna stále stejná poloha snímků při opakovaných náletech. Ovládání kamery je u této skupiny strojů vyřešeno ve



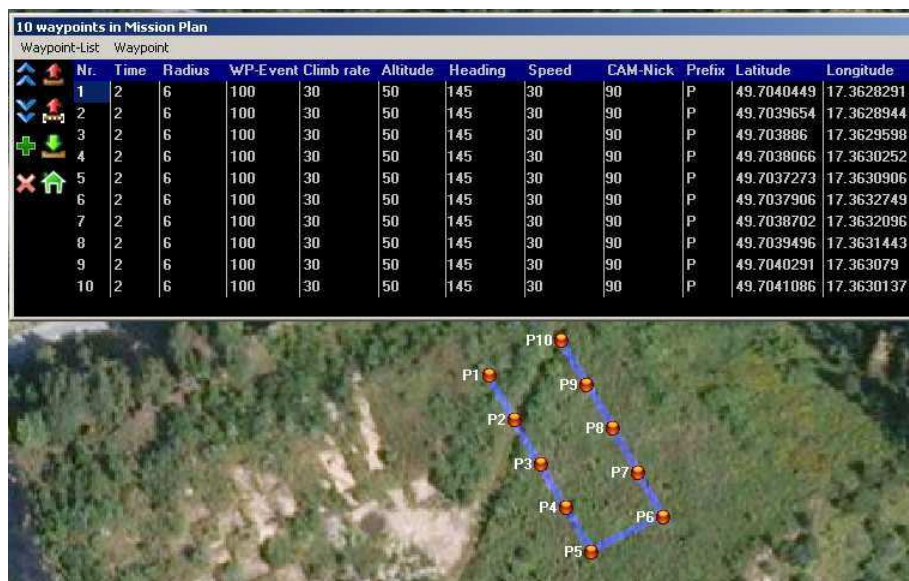
většinou případů dálkově. Pilot sám může ovládat na dálku spoušť kamery a tím zajistit pořízení snímků přesně z místa dle vypočtených a graficky zaznamenaných waypointů.



Obr. 6.4 Plánování letu v oblasti Moravičany. Výška letu 150 m (autor: J. Miřijovský).

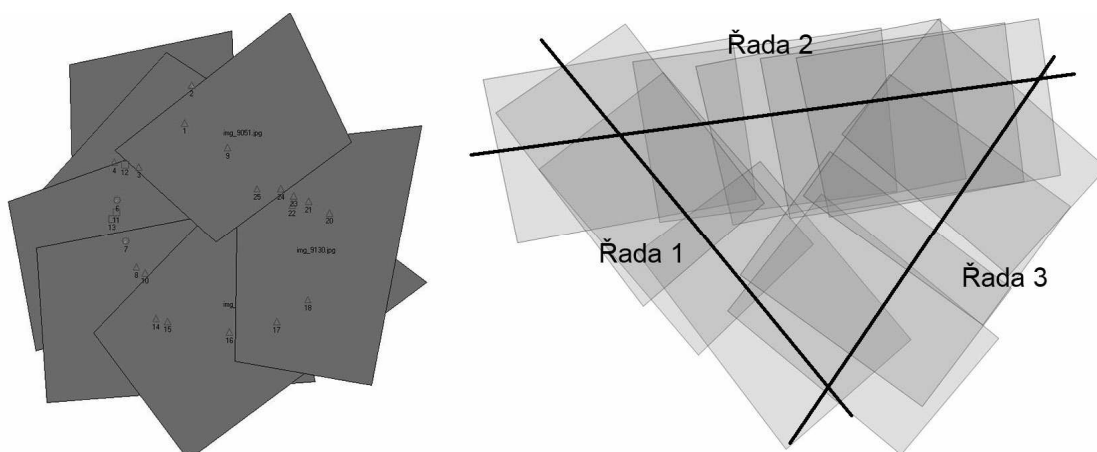
Při snímkování pro fotogrammetrické účely nebyly příliš využity modely z první skupiny. Oproti tomu druhá skupina modelů již byla s úspěchem použita. Možnost mít pod kontrolou letový plán a průletové body dělá z UAV modelu mnohem silnější nástroj. Nevýhodou však zůstával pouze plně manuální režim. Záleželo pouze na zkušenostech pilota, jak přesně navigoval zařízení podle plánované osy letu.

Třetí skupinou UAV systémů jsou nejvyspělejší modely, které dokáží letět v plně automatickém nebo poloautomatickém režimu. I plán přípravy letových os a waypointů tomu odpovídá. Zástupcem této kategorie je model Hexakopter XL. V rámci počítačového softwaru Mikrokopter Tool a modulu OSD bylo možné velmi podrobně plánovat průletové body a osy letu. Při plánování bylo možné zadávat nejen polohu bodu včetně výšky, ale také údaje související přímo se snímkovací kamerou. Jedná se zejména o úhel sklopení a azimut kamery při pořízení snímků. Rovněž bylo možné nastavit kolik snímků bude pořízeno na daném waypointu. Pro samotný let pak byly důležité údaje o výšce letu, kolik vteřin má zařízení zůstat na jednotlivých bodech, rychlost stoupání, klesání a přímého letu. Při plánování letových os lze vybírat buď z pravidelné pravoúhlé sítě, a nebo lze zadat kruh o daném poloměru. Třetí možností je volit body volně dle vlastního uvážení. Při tvorbě grafického plánu se zadává tzv. radius. Body jsou určeny v souřadnicovém systému WGS-84 a je zřejmé, že díky použití relativně málo přesných GPS čipů nebylo možné za letu téměř nikdy dosáhnout přesně zadaných souřadnic. Radius v metrech pak rozšiřoval okruh waypointu o zadanou hodnotu. Pokud se zařízení dostalo do vnitřní části kruhu, pak systém považoval bod jako navštívený. Bylo vždy potřeba dobře zvážit, jakou hodnotu nastavit, aby nedocházelo k přílišným odchylkám, ale na druhou stranu, aby model „nekroužil“ neustále kolem jednoho bodu s cílem dosáhnout naprosto přesných souřadnic.



Obr. 6.5 Plánování v Mikrokopter Tool (autor: J. Miřijovský).

Grafické zakreslení os a waypointů včetně výpočtů času stráveného ve vzduchu byly základním předpokladem úspěšného pořízení snímků, aby měly dostatečnou kvalitu a přesnost pro další fotogrammetrické zpracování. Vytvoření časového plánu a spočítání doby strávené ve vzduchu pak bylo přímo kriticky důležité, aby nedošlo ke spotřebování veškeré energie nebo paliva a nedošlo k pádu zařízení. Rozdíl mezi bloky snímků zpracovaných stereofotogrammetrickou metodou je uveden na obrázku 6.6. Levý blok snímků je zcela neuspořádaný a pro fotogrammetrické vyhodnocení nevhodný. Důvodem je provedení letu v manuálním režimu, kde není možné přesně dodržet letové řady. Pravý snímek je výsledkem automatického letu podle zadaných průletových bodů.



Obr. 6.6 Neuspořádaný (vlevo) a uspořádaný (vpravo) blok snímků (autor: J. Miřijovský).

## 6.4 Meteorologická situace a světelné podmínky

Meteorologická situace a světelné podmínky spolu úzce souvisejí. Požadavek na rychlost větru, oblačnost, směr osvětlení apod. se liší podle účelu pořízení snímků a podle typu modelu. Archeologové vyžadují jiný typ osvětlení snímků než kartografové. Zrovna

tak jiná rychlost větru je vyžadována pro použití padákového kluzáku a multirotorového systému.

#### **6.4.1 Meteorologická situace**

Při konvečním leteckém snímkování je k dispozici pár desítek letových dní v roce, kdy mohou být letecké snímky pořizovány. Je to dáno především přísným stanovením požadavků na meteorologickou situaci v době snímkování. Dalším důvodem je, že plošné snímkování probíhá v době před olistěním nebo naopak po opadání listů ze stromů. V období sněhové pokrývky snímkování také většinou neprobíhá. Tyto požadavky pak společně s meteorologickou situací eliminují většinu dní v roce.

U leteckého snímkování pomocí dálkově ovládaných modelů je situace naštěstí příznivější. Protože se nesnímkuje plošně rozsáhlá území, ale ve většině případů snímkování probíhá za účelem pořízení dokumentace jednoho konkrétního objektu, může být ignorován např. požadavek na neolistěné stromy. I přesto existuje mnoho faktorů, které ovlivňují možnost úspěšně a bezpečně provést letecké snímkování. Nejdůležitějšími z nich jsou bezesporu rychlost větru a déšť. V případě srážkové činnosti je snímkování až na zcela extrémní výjimky úplně vyloučeno. Pokud zanedbáme špatnou kvalitu snímků, tak největším problémem zůstává elektronika. Při letu může snadno dojít ke zkratu elektrických zařízení jak na samotném modelu, tak i v kameře. Poté ve většině případů nastává selhání celého systému nebo jeho části a havárie. Až na výjimky v podobě vojenských bezpilotních systémů nejsou UAV platformy stavěné pro provoz v deštivém počasí.

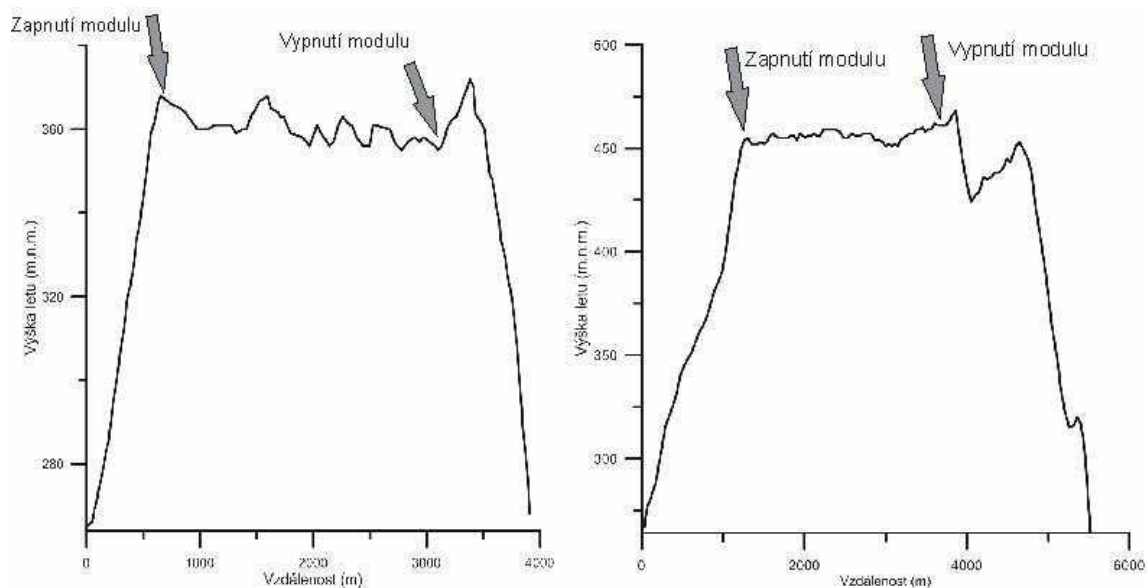
Vítr, respektive jeho směr a rychlost určovaly, zda snímkování bylo nebo nebylo možné provést. Často byla jiná rychlost a směr větru u země a ve vyšších vrstvách. Rovněž místní povětrnostní situace se výrazně lišila od předpovědních modelů. Bylo to dáno lokální morfologií terénu, která výrazně měnila směr a rychlost větru. Z praktických, ale i teoretických znalostí lze konstatovat, že velké změny a rozdíly směru proudění a rychlosti větru vždy nastávaly nad hranicí dvou různých typů povrchu. Bylo potřeba dávat velký pozor při přeletech např. ze zemědělských kultur nad vzrostlý les. Nad každým typem povrchu se jiným způsobem ohřívala vzduchová masa a byla zde jiná intenzita výstupných proudů. Model, který váží jen několik kilogramů, není stavěn do silných větrných proudů.



Obr. 6.7 Změna typu krajiny může být potenciálně nebezpečná (foto: J. Miřijovský).

Směr větru i jeho rychlost se také měnila během dne. Většinou nejkliďnější částí dne byly ranní a brzy dopolední hodiny. Odpoledne bývala rychlost větru nejsilnější a ve večerních hodinách se vítr opět tišil. Jedná se o běžnou meteorologickou situaci, které se říká denní chod rychlosti větru.

Každý z použitých leteckých modelů má jiné rozpětí rychlostí větru, ve kterém může operovat. Autor práce má největší zkušenosti s motorovým paraglidovým kluzákem PIXY a multirotorovým systémem Hexakopter XL. Proto i zde jsou popsány rozdíly právě těchto dvou zařízení v citlivosti na rychlost větru. PIXY je motorový paraglidový kluzák, který má plochu padákového křídla  $2,9 \text{ m}^2$ . To na jednu stranu zajišťovalo vysokou nosnost celého systému, ale na druhou stranu byl citlivý na povětrnostní podmínky. Udávaná operační rychlost větru se pohybovala v rozmezí od  $0 \text{ m/s}$  do  $11 \text{ m/s}$ . Na základě terénního výzkumu však bylo zhodnoceno, že udávané rozpětí je jen marketingové. Reálně použitelný byl model do rychlosti větru kolem  $6 \text{ m/s}$ . Při takové rychlosti bylo ještě možné s modelem relativně dobře pracovat, nalétávat na waypointy apod. Při vyšších rychlostech větru model jen velmi těžce překonával odpor vzduchu při letu proti směru proudění. Také manévrování bylo mnohem náročnější. Spodní hranice opravdu mohla být nulová, ovšem pak bylo nutné počítat s delším startem a tomu přizpůsobit délku startovací dráhy. Nejlepší bylo, pokud foukal mírný protivítr o rychlostech kolem  $2 \text{ m/s}$ . Pak se padákové křídlo mnohem snadněji nafukovalo a start probíhal podstatně rychleji. Na obrázku 6.8 lze vidět záznamy z „palubní“ GPS v podobě grafu. Po většinu doby byl zapnut modul pro držení konstantní letové hladiny. Levý graf demonstruje funkčnost modulu konstantní letové hladiny za větrného počasí (rychlost větru je vyšší než  $6 \text{ m/s}$ ) a pravý graf je zaznamenán během mírného větru. Z pravého grafu je patrné, že model s padákovým křídlem je poměrně náchylný na větrné nárazy. Vždy se však modul snaží správné letové hladiny opět dosáhnout.



Obr. 6.8 Náraz větru může model vynést mimo plánovanou letovou hladinu (autor: J. Miřijovský).

Hexakopter XL nemá žádné padákové křídlo, proto byl ve větru stabilnější než PIXY. V praxi se to mnohokrát potvrdilo. Při vyšších rychlostech větru byl Hexakopter XL opravdu více stabilní. Docházelo pouze k mikrovibracím, ale bez problémů model dokázal udržet požadovanou polohu rozdílným tahem motorů. Operační hodnoty rychlosti větru výrobce udává v rozmezí od 0 m/s do 10 m/s. Pro pohodlné a kvalitní snímkování však bylo nejvhodnější využít bezvětří nebo pouze mírný vítr do rychlosti 5 m/s. Je zřejmé, že zatímco výše zmiňované příklady vyžadují pro bezproblémové provedení letu spíše bezvětří, při použití draků je situace zcela opačná. Draci vyžadují poměrně větrné počasí, aby bylo možné provádět snímkování.

Minimálně v zimním období se musí zahrnout do příprav pro snímkování teplota vzduchu. Většina použitých UAV modelů dokáže bez větších problémů létat i v zimních měsících, ale příprava na let ve dnech, kdy byla teplota pod bodem mrazu, byla složitější. U benzínového modelu muselo být zejména dbáno na správné zahřátí motoru, který musel mít při startu již provozní teplotu. Čistě elektrické systémy nevyžadovaly pro svůj správný chod zahřátí motoru, ale bylo nezbytné věnovat pozornost výdrži baterií. Při nízkých teplotách byla výdrž akumulátorů podstatně nižší, než při teplotách kolem 20 °C. Pokud byla baterie plně nabitá při teplotě 27 °C, její kapacita při teplotě -18°C byla pouze poloviční. Při teplotách kolem nuly se kapacita snížila přibližně o 20 %. Velkým počtem startů v chladném počasí bylo potvrzeno, že v případě kdy baterie byly umístěny v teple (nejlépe přímo na těle) až těsně do startu, pak vydržely i v chladném počasí téměř stejně dlouho jako při optimální teplotě vzduchu.

Aber, et al. (2010) dále uvádí, že je nutné se věnovat také informacím o tlaku vzduchu v případě potřeby snímkování ve výškách nad 1 000 m n. m. Důvodem je klesající hustota vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou jak dokazuje tabulka 6.2. To může některé UAV systémy zcela vyřadit z možnosti použití.

Tab. 6.2 Vliv nadmořské výšky na tlak a hustotu vzduchu (upraveno podle: Aber, et al., 2010).

Výška (m n. m.)	Teplota (°C)	Tlak (hPa)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	Procento
0	15,0	1013	1,2	100
1000	8,5	900	1,1	92
2000	2,0	800	1,0	83
3000	- 4,5	700	0,91	76
4000	- 11,0	620	0,82	68
5000	- 17,5	540	0,74	62

K plánování meteorologických podmínek v době snímkování bylo nejvhodnější použít klasickou meteorologickou předpověď z ČHMÚ. Vzhledem k nízkým letovým výškám nebyla speciální předpověď pro piloty potřebná.

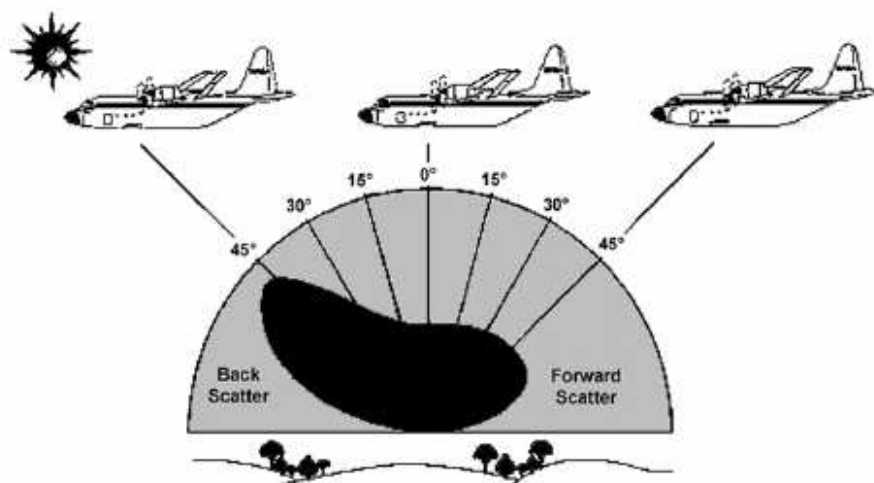
#### 6.4.2 Světelné podmínky

Světelné podmínky významně ovlivňují výsledný vzhled snímků. Pro dosažení co nejlepšího kontrastu snímku, který zachovává všechny detaily, bylo důležité zvolit správnou dobu snímkování. Na rozdíl od konvenčního leteckého snímkování, které probíhá pouze několik desítek dní v roce, v UAV fotogrametrii bylo možné snímkovat po celý rok. To bylo dáno zejména malými plochami, které se snímkovaly, a pak také velmi rozličnými aplikacemi, přičemž některé z nich naopak vyžadovaly snímkování v zimním období. Základní charakteristiky ze světelných podmínek, které bylo nutné zohlednit při tvorbě plánu snímkování, jsou úhel a směr osvětlení a dále vady způsobené dopadajícím slunečním zářením.

##### Směr a typ osvětlení

Úhel dopadajících paprsků a směr osvětlení významně ovlivní výsledný vzhled fotografie. Každá aplikace si žádala jiný typ osvětlení. Zatímco pro fotogrammetrické snímkování byla nejlepší doba pro pořízení snímků, když bylo slunce vysoko nad obzorem, některé archeologické aplikace vyžadovaly snímkování těsně před východem slunce nebo těsně po západu.

V odborné literatuře se často v souvislosti s UAV snímkováním uvádí zkratka BRDF. Vychází z anglických slov Bidirectional Reflectance Distribution Function, které volně přeloženo znamenají Funkce obousměrné distribuce odrazivosti. Funkce odkazuje na změny odrazivosti objektů v závislosti na úhlu snímkování a aktuální poloze slunce na obloze (Aber et al., 2010). Lepší představu o funkci BRDF si lze udělat z obrázku 6.9. Z obrázku je patrné, že největší odrazivost se nachází ve směru přímo zpět ke slunci.



Obr. 6.9 Odrazivost slunečního záření při snímkování (zdroj: Aber et al, 2010).

Funkcí BRDF bylo potřeba se zabývat pouze při šikmém snímkování. Takové snímkování se provádělo např. při použití metod průsekové fotogrammetrie. Z obrázku 6.9 je patrné, že při pořizování kolmých snímků má BRDF stále stejnou hodnotu. V případě použití stereofotogrammetrických metod nebylo potřeba se funkcí BRDF příliš zabývat, protože odrazné vlastnosti objektů jsou na všech snímcích stejné.

Dalším problémem, který vznikal při leteckém snímkování, jsou stíny. Často byl terén členitý a téměř nikdy nebylo osvětleno sluncem vše. Některé části terénu tak byly vždy ve stínu. Stíny byly výraznější v případě ostrého světla. Čím bylo světlo rozptýlenější, tím byla i fotografie světelně vyváženější. Stíny způsobovaly velké problémy při stereofotogrammetrickém vyhodnocení, protože v místech, kde nebyl dostatek světla, se celé plochy barevně slévaly v jednu a nebylo možné jednotlivé pixely od sebe dostatečně odlišit. Typická ukázka rozdílů, které byly způsobeny jiným typem osvětlení, je vyobrazena na obrázku 6.10, který zachycuje archeologické vykopávky. Oba dva snímky jsou ze stejné lokality, ale byly pořízeny v jiném období. Zatímco levý snímek je pořízen za jasného slunného dne s ostrým světlem, během pořizování pravého snímku bylo skoro zataženo s vysokou oblačností. Světlo na takovém snímku je více rozptýlené. Lze pozorovat jasné rozdíly mezi oběma případy. Výhody levého snímku jsou zejména vyšší kontrast, lepší podání barev a méně šumu v obraze. Velkou nevýhodou jsou však stíny na dnech vykopaných objektů. To velmi ztěžuje fotogrammetrické vyhodnocení. Je zřejmé, že v tomto případě nelze nikdy dosáhnout osvětlení celého dna přirozeným zdrojem světla.



Obr. 6.10 Rozdílná odrazivost slunečního záření při přímém (vlevo) a rozptýleném světle (vpravo) (foto: J. Miřijovský).

Jednoznačnou výhodou pravého snímku je rovnoměrné rozložení světla v obraze, které nezpůsobuje téměř žádné stíny. Z důvodu velké hloubky některých jam jsou sice pixely tmavší, ale stále lze poměrně dobře dno rozeznat a vyhodnotit. To je ovšem za cenu nižší obrazové kvality snímku. Z důvodu nízké úrovně osvětlení musela být zvýšena citlivost fotoaparátu. Tím ovšem narostla i úroveň digitálního šumu. Také barvy nejsou podány tak věrně jako u pravého snímku. Ideální řešení by bylo někde mezi těmito krajními případy. Více o stínech a extrakci bodů ze zastíněných obrazů lze nalézt v kapitole 8.1.2 Extrakce bodů.

### Vady způsobené slunečním zářením

Mezi tři nejvýznamnější vady způsobené odraženým slunečním zářením, které dopadá skrz objektiv na rovinu snímku lze zařadit sluneční skvrnu, třpyt od objektů a tzv. horkou skvrnu. Sluneční skvrny vznikaly v případě, kdy úhel odraženého paprsku do kamery byl roven úhlu dopadajícího slunečního záření na objekt. Jak byl efekt významný záleželo především na typu objektu, na který sluneční záření dopadalo. Sluneční skvrny se většinou na fotografii objevovaly po odrazu slunečního záření od lesklých a hladkých ploch jako jsou např. voda, sklo nebo kovové objekty. Sluneční skvrna se nejčastěji objevila na šikmých snímcích, když byl úhel záběru kamery nasměrován ke slunci. Na kolmých snímcích nebyla tak častá.

Třpyt slunečního záření vzniká za podobných podmínek jako sluneční skvrna, ale oproti ní se zcela běžně objevoval i na kolmých snímcích. Proto, aby vznikl na snímku sluneční třpyt, muselo záření dopadat na lesklý povrch, který byl mírně zvlňený. Takový objekt měl vždy jednu stranu stinnou a druhou přezářenou. Typickou ukázkou třpytu lze vidět na snímku 6.11. Třpyt se zobrazuje na vodní hladině pouze v části, která je zvlňená rychlým průtokem. V jiné části toku, kde nevznikají vlnky, se žádný třpyt nenachází.





Obr 6.11 Třpyt na snímku způsobený odraženým slunečním zářením a zvlněnou lesklou plochou (foto: J. Miřijovský).

Třetí důležitou vadou, která se může objevit i na kolmých snímcích (i když je to opět méně časté), je tzv. horká skvrna. Lynch and Livingston (1995) uvádí, že horká skvrna je místo na povrchu, které je v jedné ose s kamerou a sluncem. Je to tedy bod, který vznikne na zemi v místě, kde se propojí pomyslná přímka středu slunce s kamerou. Někdy je nazýván také jako stínový bod (Murtha et al., 1997), protože se velmi často uprostřed bodu může objevit stín letícího modelu, jak ukazuje obrázek 6.12. Dvojice snímků na obrázku zachycuje stejnou lokalitu, ale vždy z mírně odlišné polohy. V místě, kam ukazuje šipka, lze zřetelně spatřit přesvětlenou skvrnu, která se utváří kolem stínu z modelu. Výzkumem vzniku horkých skvrn se zabývají zejména studie Hapke et al. (1996) a Leroy et al. (1996).



Obr. 6.12 Horká skvrna na šikmých snímcích (autor: J. Miřijovský).

Optické vady na snímcích se mnohem častěji objevují při SFAP snímkování než při snímkování klasickém z vyšších výšek. Je to způsobeno zejména širokým úhlem záběru a obdélníkovým formátem digitálních kamer, které se nejčastěji používají při snímkování. Při SFAP snímkování mohou vznikat další optické vady způsobené slunečním zářením, nicméně většina z nich vzniká při pořizování šikmých snímků, což není hlavním předmětem této disertační práce.

## 7 TERÉNNÍ PRÁCE A SNÍMKOVÝ LET

Terénní práce a samotný snímkový let byly zahájeny až po důkladném naplánování. Tak jako u plánování letu, i zde bylo možné rozdělit celý proces získání terénních dat do několika dílčích částí.

- shromáždění a kontrola vybavení,
- práce s vlíčovacími body,
- nastavení kamery,
- snímkový let.

Každé části bylo potřeba věnovat náležitou pozornost, protože jeden chybně provedený úkon mohl významně ovlivnit všechny ostatní. Pro terénní práce bylo nutné zajistit dostatečný počet osob, které budou pomáhat s dílčími činnostmi.

### 7.1 Shromáždění a kontrola vybavení

Před samotným odjezdem do terénu bylo zkontrolováno a shromážděno veškeré vybavení potřebné pro provedení leteckého snímkování včetně zaměření vlíčovacích bodů. Složitost přípravy závisela na typu lokality snímkování a typu použitého leteckého modelu. Příprava vybavení byla proto v některých případech velmi jednoduchá a rychlá. V případě, kdy mělo být nasnímováno prostorově rozsáhlé území s vysokou přesností, zabraly přípravné práce i několik hodin. Kontrole vybavení bylo třeba věnovat náležitou pozornost, protože např. zapomenuté náhradní baterie mohly znemožnit úspěšné provedení celé akce.

Pro letovou fázi bylo třeba věnovat pozornost zejména správnému nabití všech akumulátorů do modelu a vysílačky, u benzínových modelů pak dostatečnému množství paliva. Pro kontrolu aktuálních letových podmínek bylo vhodné s sebou vozit příruční anemometr na měření rychlosti větru. Na snímkování bylo také třeba připravit kameru. Opět platí, že vybitá baterie mohla zhatit celý proces snímkování. Při velkém objemu dat bylo dobré myslet na záložní kartu nebo notebook, který umožňoval data ze snímkování stáhnout. Také bylo třeba myslet na dostatečný počet vlíčovacích bodů a bodů určených pro verifikaci dat. Pro případné opravy modelu přímo v terénu byl na každé snímkování brán kufr se základním nářadím.

Pro fázi měření musely být připraveny také geodetické přístroje. Záleželo na tom, zda měření probíhalo pomocí totální stanice, nebo GNSS systému. V případě použití totální stanice se musely předem vyhledat vhodné geodetické body, na které se bylo možné připojit a zjistit o nich geodetické údaje. Pro tuto činnost nejlépe sloužila aplikace ČÚZK, DATAZ neboli Databáze trigonometrických a zhušťovacích bodů, dostupná na [dataz.cuzk.cz](http://dataz.cuzk.cz). Pokud se v místě nenacházel žádný geodetický bod, pak bylo měření provedeno v místním souřadnicovém systému, nebo byly v terénu vytyčeny minimálně dva body jinou metodou (např. metodami GNSS). V případě provedení zaměření metodami GNSS bylo nejdůležitější částí přípravy sestavení plánu měření.

## 7.2 Vlíčovací body

Vlíčovací body patřily mezi nejdůležitější součásti pro správné zpracování leteckých snímků. Na základě vlíčovacích bodů byly počítány prvky vnější orientace (kapitola 2.1.2 *Matematické řešení stereofotogrammetrie*) a upřesňovány prvky vnitřní orientace.

Jejich přesné určení bylo kriticky důležité pro další zpracování snímků. Na přesnost výpočtu AAT (Automatic Aerial Triangulation) mělo vliv několik faktorů. Jednak to byl celkový počet a rozmístění bodů a dále přesnost zaměření souřadnic vlíčovacích bodů. Jen pokud byly obě části provedeny správně, byl správný i celkový výsledek aerotriangulace, respektive určení parametrů vnější a vnitřní orientace.

### 7.2.1 Typy vlíčovacích bodů

Vlíčovací bod neboli tzv. GCP (Ground Control Point) je prvek, který se objevuje na snímku a jehož poloha ve zvoleném souřadnicovém systému je známa (Wolf a Dewitt, 2000), (Warner et al., 1996). Vlíčovací bod může mít mnoho podob. Jeho nejdůležitější funkcí je, aby byl dobře identifikovatelný na snímku, ale zároveň aby bylo možné s dostatečnou přesností určit jeho střed, ke kterému se vztahují měřené souřadnice. Pro splnění zmíněných požadavků bylo potřeba navrhnout body o správném tvaru, velikosti a barvě.

Potřebnou velikost terče bylo možné určit poměrně snadno. Pro identifikaci objektu na snímku musel být objekt přibližně 5x větší, než je hodnota GSD. V případě modelové situace, kdy byl snímek pořízen z výšky 80 m na kameru s ohniskovou vzdáleností objektivu 18,47 mm a velikosti jedné buňky senzoru kamery 0,00047 cm, byla výsledná hodnota GSD 2,04 cm. V takovém případě terč umístěný v terénu musel mít velikost alespoň 10 cm. Dobrá identifikace terče dále záležela na podkladě, na kterém terč ležel. Mohla totiž nastat situace, že v případě stejné barvy terče a podkladu, by se stal terč jen těžko identifikovatelným. Z experimentů a praxe vyplynulo, že při snímkování na kameru Canon EOS 500D s objektivem o ohniskové vzdálenosti 18 mm postačoval terč o velikosti 12 cm, a to až do výšky 80 metrů. Při snímkování z vyšších výšek bylo vhodné použít větší terče s barevným odlišením od podkladu.

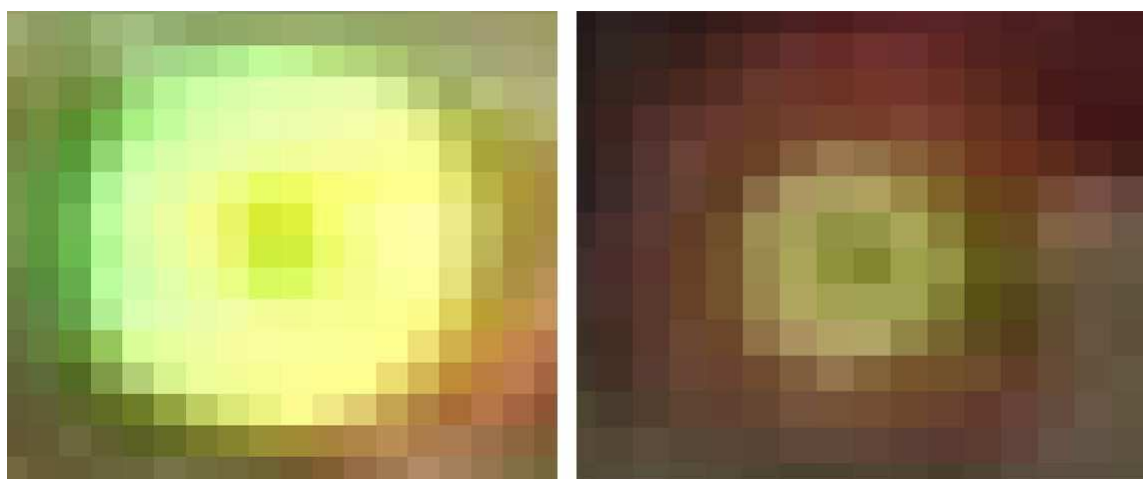
Na Katedře geoinformatiky byly vyzkoušeny celkem tři typy terčů, ale jen dva z nich se ukázaly být použitelné v praxi. Jako první bylo v praxi otestováno řešení, které uvádí Aber et al. (2010). Jedná se o červený čtvercový karton o hraně 40 cm, do jehož středu se vlepilo plastové CD. Tento typ terče měl dvě nevýhody. Velmi často docházelo k odrazům slunečního záření od povrchu lesklého CD a k přesvětlení na snímku. Tato vada se dala relativně snadno odstranit barevným nástřikem na povrch CD. Druhou nevýhodou terče byla naprostá nevhodnost použití ve vlhkých podmínkách. Protože snímkování často probíhalo pro potřeby fluvialní geomorfologie, snímkovalo se v blízkosti koryta toku, kde bylo velmi vlhko. Papírový podklad se vlhkem kroutil a u několika terčů došlo dokonce k úplnému rozmočení.

Jako náhrada za původní typ terčů, který se příliš neosvědčil, byly vytvořeny dva nové typy. Prvním z nich, pro snímkování z nižších výšek, bylo pouze obyčejné CD. Pro

snímky z výšek do 80 m bylo plně dostačující. Minimalizovalo náklady na výrobu a nezabíralo místo. Celá plocha CD byla nastříkána zeleným nebo červeným reflexním sprejem. Nedochovalo tak k odleskům od zrcadlové strany disku, ale zároveň byla zajištěna výborná viditelnost na snímcích. Byly vytvořeny dvě varianty pro snazší rozpoznání středu terče na snímku. V první variantě byl střed vyznačen černým kroužkem a ve druhé byly použity místo kroužku dvě trojúhelníkové výseče. Pro snímkování z vyšších výšek než 80 m již byly standardní 12cm CD nedostatečná. Jako efektivní se ukázaly být staré gramofonové desky, které měly rovněž barevný podklad, a doplňující značení pro přesnější identifikaci středu na snímku. Na obrázcích 7.1 a 7.2 lze vidět používané terče a také jejich detail z různých vzdáleností.



Obr. 7.1 Různé typy terčů používané jako vlčovací body (foto: J. Miřijovský).



Obr. 7.2 Obraz kompaktního disku ze vzdálenosti 50 m (vlevo) a obraz terče z gramofonové desky o průměru 25 cm ze vzdálenosti 80 m (vpravo) (autor: J. Miřijovský).

Pokud nebyly k dispozici umělé terče, bylo využito přirozených objektů, které byly zaměřeny. V případě pevného terénního podkladu, který byl holý a bez travin, byly nastříkány barevné kříže či jiné signalizační značky přímo na terén.

## 7.2.2 Rozmístění a počet vlíčovacích bodů

Rozmístění a počet vlíčovacích bodů měl zásadní vliv na výsledek a přesnost AAT. Jak uvádí Pavelka (2003), při konvenčním leteckém snímkování se v praxi používá 4–5 symetricky rozmístěných bodů. Teoretické minimum pro výpočet správného řešení jsou u digitální fotogrammetrie tři plné body. V praxi se však doporučuje použít větší počet bodů, které poté umožní nejen určení prvků vnější orientace, ale také např. zpřesnění radiální distorze objektivu. Pro pokročilé fotogrammetrické analýzy bylo tedy vhodné použít větší počet vlíčovacích bodů. Přebytkové z nich mohly být použity jako tzv. check points neboli kontrolní body, pomocí kterých byla ověřena reálná přesnost výsledného fotogrammetrického řešení.

Z praxe vyplynulo, že jako dostatečný počet pro UAV fotogrammetrii se jeví 10 až 15 vlíčovacích bodů, které byly rozmístěny na daném území. Jaký je ale vhodný způsob rozmístění bodů?

Dle obecně známých pravidel pro fotogrammetrii musí být body rozmístěny rovnoměrně po celé ploše snímku. Je ale mnoho způsobů, jak body rozmístit. Z teorie statistických odhadů a řešitelnosti lineárních rovnic plyne, že v případě lineární závislosti mezi body se zvyšuje chybovost modelu. Jinými slovy se snižuje přesnost výsledného řešení. Přidáním rovnic pro třetí bod, který leží na přímce spojující dva jiné body, nedojde k nárůstu hodnosti matice, a proto tento bod nezvýší řešitelnost soustavy rovnic Anděl (2007). Jinými slovy se tímto postupem nesníží počet stupňů volnosti. Vysvětlení lze nalézt v následujícím příkladě. Pokud bylo nutné vyřešit šest neznámých, pak bylo k úspěšnému vyřešení potřeba šest (lineárně nezávislých) rovnic, aby se celá soustava dala správně vyřešit. Pokud se tedy vzaly dva body, u kterých byly určeny souřadnice  $X$  a  $Y$ , pak tyto body poskytly čtyři rovnice (dvě za  $X$  a dvě za  $Y$ ). Jestliže se přidal třetí bod, který však byl lineární kombinací dvou předchozích (leží na přímce spojující tyto body), pak i odpovídající dvojice rovnic byla stále lineární kombinací předchozích rovnic. Hodnost soustavy rovnic (resp. odpovídající matice) se nezvýšila, zůstala rovna čtyřem, a soustava jako celek byla neřešitelná (resp. měla nekonečně řešení). Pokud však byl třetí bod lineárně nezávislý s předchozími (neleží na přímce spojující tyto body), hodnost matice narostla na 6 a soustava měla právě jedno řešení. Konkrétní řešení popisuje Frobeniova věta například v Anděl (2007).

V konkrétním případě, který byl aplikován na rozmístění vlíčovacích bodů v terénu, lineární závislost znamená, že body nesmí ležet na přímkách. Teoreticky maximální přesnosti lze dosáhnout tehdy, když žádné tři body nebudou ležet na přímce. Je zřejmé, že v praxi se tohoto požadavku dosahovalo poměrně obtížně. Velkým omezením ve správném rozmístění bodů byly přirozené nebo umělé překážky, které bránily umístění pevných bodů, jež musely být geodeticky zaměřeny. Situaci dokazuje obrázek 7.3. Fotogrammetrické snímkování probíhalo pro potřeby fluvialní geomorfologie. Vodní tok však neumožňoval rozmístit body správně a rovnoměrně po celém snímku.



Obr. 7.3 Přírozená překážka znemožňuje správné rozmístění vlíčovacích bodů  
(foto: J. Miřijovský).

V UAV fotogrametrii byla přesnost určení prvků vnější orientace ještě složitější také o to, že ke snímkování byly použity neměřické kamery, u kterých hodnoty radiální distorze dosahovaly více než 200  $\mu\text{m}$ . Pavelka (2003) uvádí, že v případě, kdy není možnost začlenit do výpočtu hodnoty radiální distorze, se doporučuje využít pouze 60 % obrazu kolem jeho pomyslného středu. Moderní fotogrammetrické aplikace většinou dovolují vypočítat hodnoty radiální distorze v jednom kroku zároveň s výpočtem AAT. Případně bylo možné použít software třetí strany. Ale i tehdy, kdy byl znám průběh radiální distorze, nebyl použit celý rozsah snímku, což omezilo možnost rozmístění vlíčovacích bodů. Vliv rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost určení prvků vnější orientace se snažil dokázat nebo naopak vyvrátit experiment provedený v laboratorních podmínkách s následnou aplikací na reálný případ.

### **Příprava experimentu**

Pro potřeby experimentu byl využit milimetrový papír, který byl umístěn na vodorovný povrch. Roviny bylo dosaženo za použití přesné digitální vodováhy. Tím bylo zaručeno, že všechny hodnoty vlíčovacích bodů v souřadnici Z byly nulové. Papír byl fixován izolepou na vyváženou desku. Kamera byla umístěna na stativ tak, aby snímkové pole pokrývalo celou plochu snímku. Výška kamery byla změřena pravítkem. Stejně jako papír i kamera byla umístěna do roviny, a tím byla zajištěna kolmá osa pro snímkování. Na milimetrový papír byl vyznačen střed snímku podle umístění středního ostříčícího bodu v hledáčku. Expozice kamery byla nastavena na manuální mód a byl vyfocen snímek. Kamera i se stativem byla posunuta a byl exponován další snímek za stejných podmínek jako předcházející. Opět byl na papír zaznamenán střed snímkování pro další zpracování. Ukázka ze snímkování je na obrázku 7.4.



Obr. 7.4 Příprava testování (foto: S. Popelka).

### Zpracování snímků

Na milimetrový papír, u kterého byly kalibrovaným pravítkem proměřeny jednotlivé body v síti po jednom centimetru, byly vytvořeny tři modelové situace v rozmístění vlčovacíh bodů. Celkový počet vlčovacíh bodů byl fixní pro všechny situace a byl stanoven na hodnotu 15. Souřadnice bodů byly odečteny z milimetrového papíru po proměření kalibrovaným pravítkem. Modelové situace v rozmístění bodů byly následující:

1. Zcela chybná situace, kdy body nebyly rovnoměrně rozmístěny a všechny ležely v jedné přímce a na jedné straně pomyslného terénu. Tento případ může v UAV fotogrametrii nastat tehdy, když se snímkuje vodní tok a není možné rozmístit body na druhou stranu toku.
2. Použitelné rozmístění, kdy vlčovací body byly rozmístěny rovnoměrně po snímku, ale jednotlivé skupiny bodů měly lineární závislost. Takovéto rozmístění by teoreticky mělo dát použitelné řešení.
3. Ideální varianta rozmístění bodů po snímku. Žádná trojice bodů (z celkem 15) neležela na přímce a pro správný výpočet musel software použít maximální počet trojúhelníků. Tato varianta by měla teoreticky poskytnout nejlepší řešení.

Rozmístění bodů ve všech třech případech lze přehledně vidět na obrázku 7.5.



Obr. 7.5 Různé varianty rozmístění vlčovacíh bodů (autor: J. Miřijovský).

Všechny varianty byly zpracovány se stejným nastavením. Byla použita kalibrovaná digitální kamera (digitální zrcadlovka) se známými prvky vnitřní orientace včetně parametrů radiální distorze. Protože byly u levných digitálních kamer parametry vnitřní orientace poměrně nestálé, byla zapnuta volba pro zpřesnění parametrů vnitřní orientace z bodů přímo měřených na snímku. To sice vyžadovalo větší množství vličovacích bodů než je teoretické minimum, ale zato bylo možné získat přesnější výsledky. Bylo nutné si uvědomit, že do celkové přesnosti výpočtu vstoupily i jiné faktory a chyby než jen volba polohy bodů. Jedním z významných faktorů, které mohly ovlivnit výsledek bylo přesné určení skutečných souřadnic. Ty byly proto v experimentu brány jako přesné a neměnné u všech variant. Jako významné se také jevilo přesné umístění bodů na snímku. Celé řešení mohlo být degradováno v případě, kdy by body sice měly ideální polohu, ale jejich definování v obraze by nebylo zcela přesné. V takovém případě narůstá chybovost celého řešení. Umístění o jeden pixel mimo správnou hodnotu má vliv na výslednou přesnost výpočtu. Čím je pixel větší, tím důležitější bylo dbát na správné umístění. Dobrým ukazatelem přesnosti umístění bodů na jednotlivých snímcích byly hodnoty reziduí obrazových bodů. Bylo dbáno na to, aby na všech třech variantách byly celkové chyby v umístění bodů stejné.

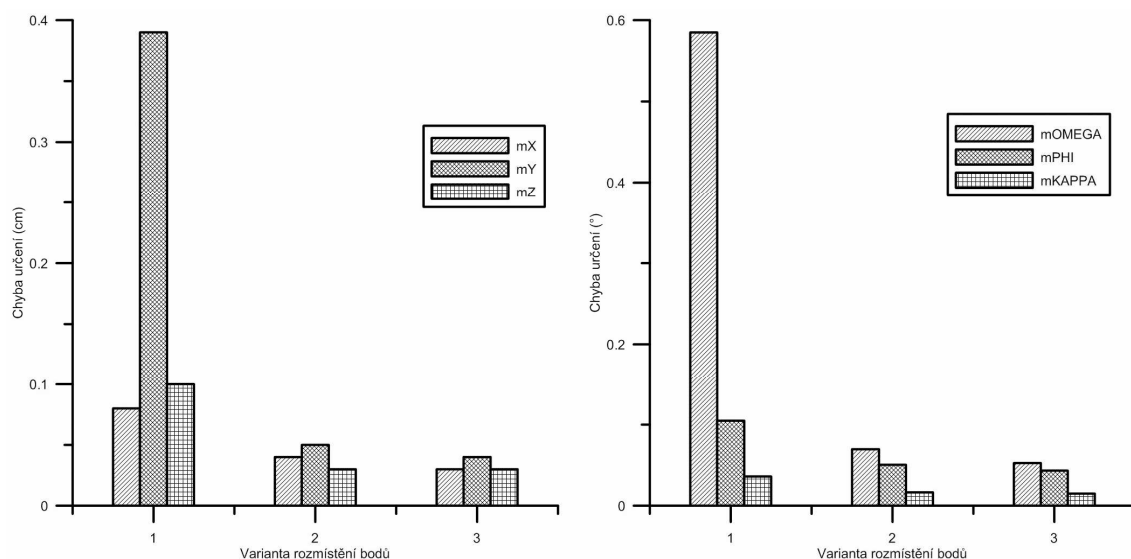
## Vyhodnocení

Pro hodnocení přesnosti byly použity podrobné statistické reporty, které obsahují potřebné informace pro vyhodnocení. Zejména se jedná o výstupy, které popisují přesnost určení prvků vnější orientace. Parametry  $mXs$ ,  $mYs$  a  $mZs$  byly vypočítané hodnoty rozptylů pro jednotlivé složky externí orientace a odrážejí statistickou přesnost každého parametru. Byly počítány z kovariančních matic během poslední iterace početního řešení. Rovněž byly vypočítané prvky vnější orientace porovnány se zaměřeným přibližným stavem. Přestože početní řešení by mělo být v ideálním případě podstatně přesnější, v případě varianty první, byla souřadnice v ose Y určena o 0,5 cm chybně. Je potřeba připomenout, že snímkování probíhalo z výšky pouhých 38 cm. V případě, že by snímkování probíhalo z výšky 100 m, měla by chyba hodnotu 1,38 m. Výsledky experimentu ( $mXs$ ,  $mYs$ ,  $mZs$  pro jednotlivé varianty) jsou uvedeny v obrázku 7.6. Z výsledků lze vyvodit:

- Za jednoznačně nejhorší variantu je považována první. Body, které byly umístěny v jedné přímce, nelze použít ke kvalitnímu výpočtu prvků vnější orientace. Dokonce musel být přidán jeden bod mimo přímku, aby proběhl výpočet. Bez jeho přidání software neprovedl výpočet a hlásil chybu nedostatečného množství vličovacích bodů. To bylo dáno tím, že byly zapnuty přídavné parametry do výpočtu. Každý nový parametr, který bylo potřeba vypočítat, přidával další neznámé do rovnic a pro správné vyřešení bylo nutné zvýšit celkový počet vličovacích bodů. Bez požadavku na přesnější výpočet distorze objektivu byly rovnice vyřešeny, byť chybně.
- Mezi variantami č. 2 a č. 3 bylo sice možné pozorovat rozdíl, ale nebyl příliš výrazný. Významnějších hodnot by nabýval při snímkování z vyšších výšek, než



v jakých byl proveden experiment. Jako přesnější se opravdu ukázala být varianta třetí, která neměla žádný bod v lineární závislosti s jiným. Nicméně početní řešení implementované v softwaru ERDAS LPS dokázalo získat správné prvky vnější orientace s dostatečnou přesností i z varianty druhé. Výraznější rozdíly než v hodnotách  $mX$ ,  $mY$  a  $mZ$  byly ve statistickém vyhodnocení přesností pro úhly náklonů kamery. Všechny výsledky jsou přehledně uvedeny v obrázku 7.6.



Obr. 7.6 Hodnocení přesnosti určení prvků vnější orientace. Vlevo souřadnice X, Y, Z. Vpravo úhly natočení kamery  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  (autor: J. Miřijovský).

## Závěr experimentu

Vliv správného rozmístění vlíčovacích bodů v terénu na správný výpočet prvků externí orientace byl nezanedbatelný. Jako zcela nevhodná se dle předpokladu ukázala být varianta, ve které byly body rozloženy v jedné přímce a mající mezi sebou lineární závislost. V žádném případě není doporučeno umisťovat body podél rovné komunikace nebo jiných objektů v terénu. Pokud je to alespoň trochu možné, vždy je nejlepší dodržet pravidlo rovnoměrného rozmístění bodů po ploše tak, aby žádný z bodů neležel na jedné přímce s jiným. To platí jak pro souřadnice X a Y, tak i pro souřadnici Z. Této variantě v podstatě odpovídá zcela náhodné rozmístění bodů. Při umisťování bodů v terénu je samozřejmě nutné zohlednit případné výškové překážky přes, které vlíčovací bod nejde na snímku vidět.

### 7.2.3 Zaměření vlíčovacích bodů

Přesnost zaměření vlíčovacích bodů byla pro správné určení prvků vnější orientace kritická. Vzhledem k tomu, že veškeré mapování v UAV fotogrammetrii probíhalo výhradně ve velkých až velmi velkých měřítkách, nebylo možné odečítat souřadnice přirozených bodů v terénu z mapy. Vlíčovací body byly měřeny vždy výhradně geodetickými metodami s velmi vysokou přesností. Přesnost zaměření vlíčovacích bodů byla pod 5 cm. Ideální však bylo, pokud se přesnost pohybovala kolem dvou až tří

centimetrů. Zaměření bodů probíhalo různým způsobem. Na výběr byly klasické geodetické metody v podobě elektronické či starší, nitkové tachymetrie nebo bylo využito geodetických GNSS aparatur. V případě využití GNSS aparatur přicházely v úvahu pouze dvě metody měření pro získání souřadnic bodů s požadovanou přesností. Často používanou a rychlou metodou měření byla RTK metoda.

K použití metody Real Time Kinematic (RTK) byly zapotřebí dva GNSS přijímače. Jeden stál na bodě o známých souřadnicích, fungoval jako referenční stanice, a druhý sloužil jako přenosný přijímač. Referenční stanice v reálném čase vysílala RTK korekce o svojí správné poloze, které byly přenášeny protokolem RTCM (Real Time Correction Messages). RTK korekce stanovovaly rozdíl mezi polohou určenou výhradně systémem GNSS a souřadnicemi určenými geodetickým měřením. Pohyblivý přijímač tyto korekce zachycoval a opravoval svoji polohu o určenou chybu. Standardní podmínkou bylo, že referenční i pohyblivá stanice využívala ke svému výpočtu jen stejné satelity a přijímač byl schopen zpracovávat signály frekvencí na kanálech L1 a L2. Pokud nebyly k dispozici dva GNSS přístroje, bylo možné pracovat jen s jedním a korekce přijímat z jedné ze sítí permanentních stanic provozovaných v České republice. V takovém případě bylo ale nutné vybavit přístroj SIM kartou s datovými tarify, protože přenos dat se předával po běžných mobilních datových sítích.

Pokud nebyla možnost měřit RTK metodou, ale přesto bylo potřeba využít potenciálu GNSS přístrojů, pak bylo využito statické metody, která však vyžadovala dlouhé observace na vlíčovacích bodech s následným zpracováním v kanceláři. Při dostatečně dlouhém měření byla odměnou nejvyšší možná přesnost získaných souřadnic. Zaměření deseti vlíčovacích bodů však trvalo i několik hodin.

Tab. 7.1 Technické parametry přístroje HiPerII (zdroj: technická dokumentace k přístroji).

Sledování satelitů		
Počet přijímaných kanálů		72 univerzálních kanálů
Sledované signály	GPS	L1 CA, L1/L2 P-kód, L2 C
	GLONASS	L1/L2 CA, L1/L2 P-kód
	SBAS	WASS, EGNOS, MSAS
Přesnost určení polohy		
Statika	L1+L2	H: 3 mm + 0,5 ppm V: 5 mm + 0,5 ppm
	L1	H: 3 mm + 0,8 ppm V: 4 mm + 1 ppm
RTK	L1+L2	H: 10 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm
DGNSS		< 0,3 m

Zatímco přesnost geodetických metod byla z velké části dána typem použitého přístroje, u GNSS systémů byla výsledná přesnost vlíčovacích bodů určena více faktory. Základní dosažitelná přesnost byla definována použitou metodou. Nicméně na výsledek měl významný vliv momentální stav satelitů na obloze (jejich celkový počet

a geometrická kvalita rozmístění), aktuální stav ionosféry a v neposlední řadě morfologie terénu. Při měření v morfologicky složitém terénu (údolí) nebo pod korunami stromů bylo použití RTK metod prakticky vyloučeno. Bylo to z důvodu, že poloha se určuje tzv. fázovým měřením a přístroj musel být neustále rádiově spojen s vysílající družicí. Pokud se do dráhy mezi družicí a přijímač „postavila“ větev nebo jiná překážka, fázová synchronizace byla ztracena a celé měření muselo být započato znovu. Z výše uvedených faktorů ovlivňujících přesnost souřadnic vyplývá, že pro každé měření bylo velmi žádoucí provést podrobný plán měření. Jen tak mohl být zajištěn bezproblémový průběh měření s dobrou kvalitou geometrie družic. Pro plánování byl nejčastěji použit graf PDOP – polohové snížení přesnosti (Dilution of Precision). Parametr je bezrozměrný a nižší číslo znamená lepší geometrické postavení družic. Kvalitní plán měření se neobešel bez nadeřinování překážek v místě probíhajícího měření. Na základě aktuálního almanachu družic, ve kterém byly uvedeny jejich dráhy letu a znalosti překážek, bylo simulováno množství a postavení družic během zadané doby měření. Obrázek 7.7 ukazuje plán měření pro potřeby zaměření bodu statickou metodou.



Obr. 7.7 Plán měření v programu Trimble Planning (autor: J. Miřijovský).

Bližší informace o plánování měření uvádí Miřijovský (2008). Další informace o GNSS metodách měření lze nalézt například v Rapant (2002).

Metoda měření musela být vždy zvolena až podle konkrétního typu terénu a technických možností přístroje. Avšak, ať už měření probíhalo jakoukoliv z výše uvedených metod, vždy musely být získány souřadnice s co nejvyšší přesností. Bylo potřeba stále myslet na to, že přesnost zaměření vlíčovacích bodů rozhoduje o výsledné přesnosti celého fotogrammetrického zpracování.

### 7.3 Nastavení kamery

Správné nastavení snímkovací kamery může podstatně ovlivnit výsledek zpracování. U moderních digitálních kamer bylo sice možné poměrně radikálně zasahovat do obrazového souboru a i zdánlivě neopravitelné chyby bylo možné napravit. Ale pokud bylo při snímkování chybně nastaveno zaostření, žádný program nedokázal z neostřích objektů udělat ostré. Software dokázal pouze mírně zvýšit ostrost snímků pomocí zvýšení

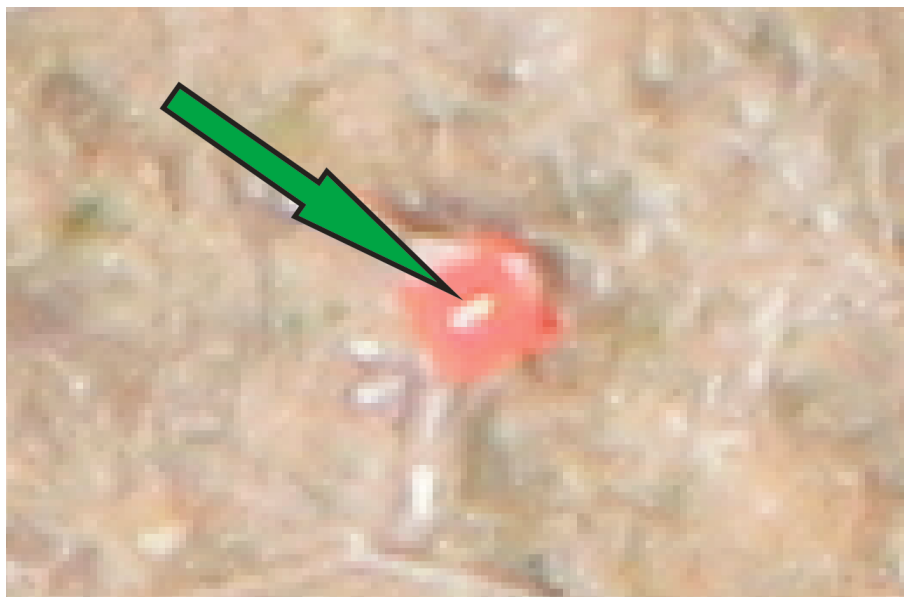
hranového kontrastu. Navíc jako všude jinde i zde platí, že nejlepší je snímky správně pořídit než je poté pracně upravovat ve specializovaných grafických editorech. Dva nejdůležitější parametry, které bylo vždy nutné nastavit ještě před provedením snímkovacího letu, tedy v přípravné fázi, byly volba správných expozičních parametrů a zaostření.

### 7.3.1 Expoziční parametry

Volba správné expozice nesměla být podceněna. Dlouhý čas mohl způsobit z důvodu pohybu zařízení a mikrovibrací motorů rozmazání snímku. Extrémně krátký čas pak zase vyžadoval vysokou hodnotu ISO, aby na senzor dopadalo dostatečné množství světla, což snímek degradovalo z důvodu zvyšujícího se šumu v obraze. Moderní digitální zrcadlovky umožňují volit mezi automatickým, poloautomatickým nebo manuálním režimem. Pro letecké snímkování nebyl použit žádný z automatických režimů. Expoziční parametry musely být po celou dobu snímkování pod kontrolou a nebylo možné nechat kameru, aby rozhodovala, zda pro snímek použije či nepoužije blesk. Takovéto neuvážené rozhodnutí mohlo ve výsledku znehodnotit celý proces snímkování. Pro letecké snímkování s UAV systémy platí dvě zásady:

1. expoziční čas musí být dostatečně krátký,
2. DN (Digital Number) hodnoty v identických pixelech v rámci stereodvojice si musí přibližně odpovídat.

ad 1) Letecké snímkování vyžadovalo poměrně rychlý čas expozice, aby nedošlo ke smazu snímku. Rozmazání snímku mohl způsobit jednak pohyb modelu a jednak mikrovibrace, které byly přenášeny od motorů vrtulí na držák fotoaparátu. I přesto, že držák fotoaparátu obsahoval gyrostabilizátory, které vyrovnávaly náklony, a tlumení k eliminaci mikrovibrací, nebylo možné tyto efekty nikdy zcela odstranit a k mírnému chvění kamery docházelo vždy. Při delším expozičním čase nemuselo dojít vždy k rozmazání celého snímku, ale jen jeho části. Ať už se jednalo o model paraglidového kluzáku nebo multirotorového systému, vždy se pohyboval určitou rychlostí. Pokud nebyla rychlost závěrky dostatečně rychlá, model uletěl za dobu otevření závěrky určitou vzdálenost, která byla celá exponována. To mohlo způsobit, že na vlíčovacích bodech zobrazených na snímku nebylo možné správně identifikovat jejich střed. Na obrázku 7.8 je zvětšený čtvercový terč o hraně 40 cm. Uprostřed terče je umístěn CD disk o průměru 12 cm. V době snímkování ještě nebyly kompaktní disky nastříkány barevně, lze vidět tedy jeho stříbrnou plochu. Z důvodu vysoké odrazivosti a poměrně dlouhého expozičního času se kulaté CD zobrazilo jako čára protažená ve směru letu o délce cca 13 cm, ale šířce pouhých 6 cm. V takovém případě bylo poměrně složité určit, kde se nachází reálný střed terče. Při následném zpracování tak mohla vzniknout chyba až několika pixelů. Z terénní praxe se ukázalo jako dostatečné použití rychlosti závěrky 1/800 s. To je dostatečná rychlost na zastavení veškerého pohybu, a přesto za dobrých světelných podmínek umožňovala pořízení kvalitních a ostrých snímků.



Obr. 7.8 Chybně stanovené expoziční parametry způsobily přesvětlení středové části terče (autor: J. Miřijovský).

ad 2) V dnešní době je zpracování mnohonásobně rychlejší, než tomu bývalo v dřívějších dobách manuálního vyhodnocování snímků. Digitální techniky, umožňující poloautomatické nebo zcela automatické zpracování dat, mnohonásobně urychlily celý proces zpracování snímků. Ať už se jedná o automatické vyhledání vázacích bodů (tzv. Tie points) nebo o automatické generování 3D modelu terénu či povrchu, většina algoritmů je založena na autokorelačních metodách (více v kapitole 8 *Zpracování dat*). Základní požadavek u autokorelačních metod je, že algoritmus dokáže vyhledat identický pixel na levém i pravém snímku zpracovávané stereodvojice. V případě velmi rozdílných DN hodnot v obraze způsobených rozdílnou expozicí snímků nemusely vyhledávací algoritmy najít identické pixely a nedošlo k propojení, resp. k vyhodnocení bodu. I proto bylo nutné použít jiné než automatické režimy expozice. V praxi byly použity dva režimy, a to buď režim „Priorita času“, kdy byla pevně dána rychlost závěrky a kamera automaticky dopočítala clonové číslo, nebo zcela manuální režim, který měl výhodu 100% kontroly expozičních parametrů. Na druhou stranu ve většině případů vyžadoval použití externího expozimetru pro přesné stanovení parametrů expozice.

### 7.3.2 Ostření kamery

Téměř všechny moderní digitální kamery využívají elektronických objektivů s automatickým zaostřováním. Ostření velmi často zajišťují rychlé piezoelektrické (USM) motorky, které jsou také velmi přesné. Bohužel během práce nebylo automatické ostření příliš využito. Kalibrovaná kamera měla určitou, pevně danou ohniskovou vzdálenost. Při jakémkoliv přeostrřování docházelo k posunu optických členů v objektivu, a tím ke změně ohniskové vzdálenosti. Docházelo tedy k porušení konstantních prvků vnitřní orientace. Při použití klasických fotoaparátů pro UAV fotogrammetrii nebylo tedy

využito automatické ostření, ale zaostřování probíhalo manuálně před startem a ostřicí prsteneček byl zafixován, aby nedošlo k posunu během letu. Otázkou ale bylo, kam zaostřit.

V krajinářské fotografii se velmi často objevuje pojem hyperfokální vzdálenost. Shaw's (1994) uvádí, že hyperfokální vzdálenost je bod zaostření, kde se všechno od poloviční vzdálenosti k tomuto bodu až do nekonečna na fotografii zobrazí ostře. V praxi to funguje tak, že pokud má být ostré popředí i pozadí snímku, neostří se na objekt, který se nachází uprostřed, ale např. jen několik metrů před místo fotografování. Pokud se např. zaostří na vzdálenost 5 m, bude ostré vše od 2,5 m až do nekonečna. Ve skutečnosti je to mírně složitější, protože do výpočtu ještě vstupuje typ objektivu, velikost senzoru a zejména použité clonové číslo. Pokud byla kamera zaostřena na hyperfokální vzdálenost, zcela jistě byly ostré i objekty vzdálené několik desítek metrů. Tento způsob ostření však nebyl pro leteckou fotografii příliš vhodný. Důvod je zejména ten, že pokud se každé snímkování ostřilo na bod v jiné vzdálenosti, měnila se i ohnisková vzdálenost kamery, a tím docházelo k porušení prvků vnitřní orientace. V praxi bylo lepší ostřit na „nekonečno“, přičemž hloubka ostrosti byla u takto nastavené soustavy tak obrovská, že bylo v podstatě stále zaostřeno již od vzdálenosti necelých čtyř metrů. Z tabulky 7.2 je zřejmé, že pokud nebylo potřeba ostřit na velmi blízké předměty, což v UAV fotogrammetrii nebylo třeba, plně dostačovalo ostření na „nekonečno“. Uvedené hodnoty v tabulce platí pro ohniskovou vzdálenost kamery 18 mm a clonové číslo 5.

Tab. 7.2 Hypefokální vzdálenost ve vztahu k hloubce ostrosti (autor: J. Miřijovský).

Zaostřovací vzdálenost	Hloubka ostrosti od	Hloubka ostrosti do
4 m	1,8 m	nekonečno
10 m	2,5 m	nekonečno
50 m	3 m	nekonečno
nekonečno	3,5 m	nekonečno

Správné nastavení všech expozičních parametrů včetně správného zaostření vedlo k získání velmi ostrých snímků s vynikající kresbou a dobrým kontrastem. Pro UAV snímkování, zejména pak pro fotogrammetrické účely, lze jednoznačně doporučit objektivy s pevným ohniskem. U nich je základní jistota, že nedojde ke změně polohy optických členů během snímkování, a tím k porušení prvků vnitřní orientace. Při výběru správného objektivu je potřeba dobře zvážit, jakou ohniskovou vzdálenost zvolit. Stojí proti sobě dva požadavky. Dobrá kresba s co nejmenším radiálním zkreslením a na druhou stranu potřeba zachytit co nejširší úhel záběru. Získání kvalitních snímků s dobrou kresbou je základem úspěchu při dalším zpracování.

## 7.4 Snímkový let

Nejdůležitějším požadavkem pro každý snímkový let byla bezpečnost. Během letu nesmělo dojít k pádu zařízení, který mohl způsobit nejen zničení zařízení, ale také zranění nebo smrt osob, které se pohybovaly v blízkosti. Bylo třeba mít stále na paměti, že modely váží několik kilogramů a můžou být při pádu velmi nebezpečné a nepředvídatelné. Celý snímkový let se skládal z pěti částí – předletová příprava, start, let, přistání a kontrola dat.

### 7.4.1 Předletová příprava

Každému startu musela předcházet důkladná předletová kontrola všech systémů. Co vše se kontrolovalo, samozřejmě záviselo na typu modelu. U různých zařízení byla kontrola odlišná. V obecné rovině byly stanoveny alespoň základní požadavky na předletovou kontrolu:

- všechny mechanické prvky fungují správně a jsou pevně utaženy,
- žádné elektrické spoje nejsou poškozeny a vše je správně zapojeno,
- vrtule a motory jsou nepoškozené, pevně připevněné a volně se otáčejí,
- podvozek je nepoškozený, dotažený,
- baterie a další „volné“ části (např. držák kamery, kamera) jsou správně namontované a upevněné.

Pokud model disponoval telemetrií, pomocí které se přenášely letové údaje a údaje o zařízení do PC, bylo potřeba zkontrolovat, zda není chyba v softwaru. Pokud předletová kontrola zařízení proběhla v pořádku, mohlo se přistoupit ke startu zařízení.

### 7.4.2 Start

Start se opět odvíjel od daného typu zařízení. Mohl probíhat kolmým stoupáním vzhůru, rozjezdem po startovací dráze nebo hozením z ruky. Každý typ startu si žádal jiné podmínky. Těsně před startem bylo vždy třeba ještě jednou zkontrolovat, zda se v okruhu startu nenacházela žádná osoba nebo překážka. Anemometrem bylo vhodné změřit rychlost větru. U zařízení, které startuje kolmo vzhůru, bylo nejvhodnější, pokud panovalo bezvětří nebo foukal jen mírný vítr bez výrazných nárazů. U některých systémů byla určitá rychlost větru naopak žádoucí. Např. paraglidový model PIXY odstartoval mnohem jednodušeji a lépe v případě, když byla rychlost větru mezi 3 a 5 m/s. Ať se jednalo o jakýkoliv model, pokud vítr foukal, vždy se startovalo proti směru větru. V případě startu po směru větru bylo vysoké riziko pádu zařízení. Model (zejména s padákovým křídlem) by nezískal dostatečný vztlak a mohlo by dojít k pádu. Různé typy startů ukazuje obrázek 7.9. U zařízení Hexakopter XL je důležité, aby celé zařízení bylo v době startu v horizontální poloze. Před startem se vždy prováděla kalibrace senzorů a provedení kalibrace stroj bere jako svou výchozí rovinu. Start z horizontální roviny nebyl ani tak důležitý pro let samotný, ale zejména pro zajištění kolmých snímků během letu. V případě kolmého snímání se kamera otáčela během letu přesně o 90° od výchozí polohy. Pokud nebyla výchozí poloha v rovině, nebyla poté ani osa záběru

kolmá. Pokud pilot nastavil model před startem na přesně vyváženou podložku, bylo zajištěno, že během letu budou snímky vždy kolmé.



Obr. 7.9 Typy startů: hozením z ruky (vlevo), rozjetím po startovací dráze (uprostřed), kolmý start (vpravo) (foto: J. Svobodová, S. Popelka).

Po úspěšném odstartování od země bylo třeba co nejrychleji nabrat bezpečnou výšku. Létání nízko nad zemí přináší značné riziko. Pokud dojde během letu k nepředvídané události, nebude v případě nízkého letu čas reagovat a může dojít k pádu systému.

### 7.4.3 Let

Letová fáze může probíhat v manuálním, poloautomatickém nebo automatickém režimu. Pro letecké snímkování byl nejvhodnější poloautomatický nebo zcela automatický režim. Pokud všechny navigační přístroje fungovaly správně, byla elektronika vždy přesnější než manuální povely pilota. Moderní elektronické inerciální navigační jednotky dokáží model a kameru vyrovnávat s velmi vysokou přesností, které pilot nemohl nikdy dosáhnout. Velmi jednoduché provedení letu bylo u zařízení Hexakopter XL, které může fungovat ve všech třech režimech. V případě použití automatického letu model vyžadoval předem definované průletové body se všemi parametry. Po přechodu z manuálního režimu (start probíhá vždy manuálně) do automatického už vše obstarávala elektronika. Na pilotovi zůstával pouze dohled pro případ výpadku systému a samotné snímkování krajiny. I to však mohlo být nastaveno do automatického módu tak, že elektronika vyfotila záběr vždy po dosažení průletového bodu nebo fotila kontinuálně v zadaném časovém kroku. Pilot vždy vidí zařízení on-line na počítači včetně všech letových údajů potřebných pro správný chod zařízení (obr. 7.10).

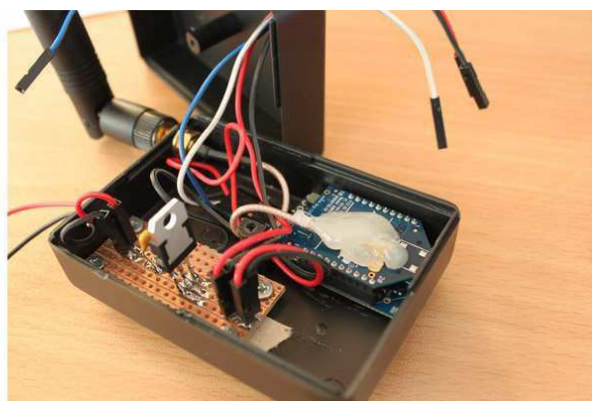
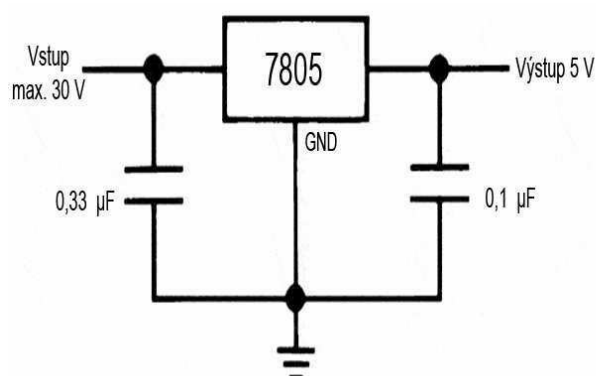


Obr. 7.10 Letové údaje přenašžené do PC z modelu (autor: J. Miřijovský).

V případě staršího modelu PIXY byla situace složitější. Zařízení sice umožňovalo jednoduchý přenos dat o své poloze do řídicí stanice, kterou bylo možné propojit s počítačem, a zobrazení dat na Google Earth, nicméně pro potřeby leteckého snímkování



byly požadavky náročnější. Zejména bylo vhodné vidět on-line také náklon celého zařízení. Proto bylo přistoupeno k výrobě vlastního zařízení, které umožní přenos dat do počítače, kde se zobrazil nejen údaj o aktuální poloze, ale také rychlost letu, směr letu a náklony ve třech osách. Základem pro výrobu se stal GPS čip MediaTek MT3329 s 10Hz frekvencí. Ta umožňuje předávat data až 10x za sekundu. GPS čip byl připojen do IMU (Inerciální měřící jednotka) jednotky ArduIMU+ V3, která obsahovala tři elektronické gyrostabilizátory s citlivostí 131 LSBs/dps a tři akcelerometry s programovatelným rozsahem až do  $\pm 16g$ . Z takto propojených zařízení se v podstatě stala inerciální navigační jednotka. Přenos dat byl vyřešen přes dva programovatelné XBee moduly pracující ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz a připojené do základní desky, která přenášela naprogramované povely. Celé zařízení napájel jeden pětičlánekový Ni-Mh akumulátor s nominálním napětím 6 V. Zařízení pro svůj běh vyžadovalo striktní dodržení napětí 5 V. Napětí v akumulátoru ale kolísalo v rozmezí 6,4 V až 4,8 V podle aktuální úrovně nabití, resp. vybití. Tento fakt musel být při stavbě zařízení zohledněn a navigační jednotka na straně vysílače byla vybavena lineárním regulátorem napětí KIA7805AP, který dokázal regulovat napětí na přesnou hodnotu 5 V, přičemž maximální vstupní napětí mohlo být až 35 V. Schéma zapojení regulátoru a výsledné vysílací zařízení lze vidět na obrázku 7.11.

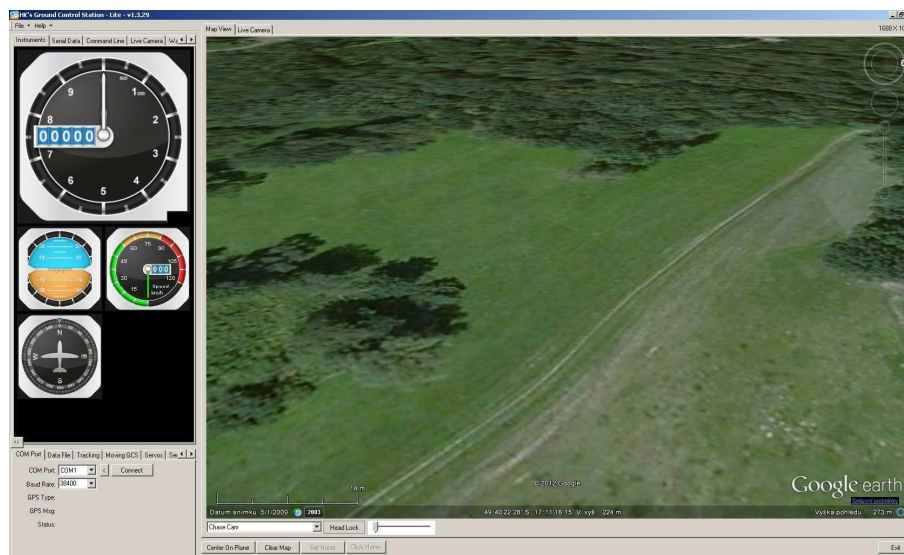


Obr. 7.11 Zapojení telemetrie pro inerciální navigační jednotku (GPS modul není připojen)  
(autor: J. Miřijovský).

Na straně přijímače bylo zapojení obdobné s tím rozdílem, že byla zapojena jiná základní deska, která byla vybavena klasickým USB konektorem pro připojení k notebooku. V tomto případě nebylo potřeba ani přídavné napájení. To bylo obstaráváno skrz USB port.

S takto vytvořenou jednotkou bylo možné po správném naprogramování celého zařízení přenášet všechny potřebné letové údaje kromě informace o napětí akumulátorů. Navigace letu sice stále nemohla probíhat v automatickém režimu, ale bylo možné poměrně přesně navigovat stroj podle předem definovaných letových os a snímkování provádět na předem vytvořených průletových bodech. Výstup z INS jednotky byl poskytován buď v binárním, nebo ASCII kódu. Pro komunikaci s navigačním softwarem bylo vhodnější použít ASCII kód, který byl jednodušeji upravitelný do požadované

podoby. Výstup ze zařízení v ASCII kódu má následující tvar: !!!VER:1.8.1,RLL:1.12,PCH:0.07,YAW:0.03,IMUH:253,LAT:49663065,LON:17198001,ALT:2235,COG:0,SOG:0,FIX:1,SAT:9,TOW:21230400\*\*\*. Na obrázku 7.12 lze vidět navigační software, který je schopný zpracovávat letové údaje do grafické podoby v reálném čase.



Obr. 7.12 Software HK's Ground Control Software určený pro plánování letu a on-line navigaci (autor: J. Miřijovský).

#### 7.4.4 Přistání

Přistání byla vždy jedna z nejtěžších fází letu. Samotné zařízení je poměrně drahé, kamery umístěné na modelu také. Přistávalo tedy i několik set tisíc korun v podobě elektronické výbavy, která je citlivá na otřesy. Bohužel místo snímkování si nebylo možné příliš vybírat a odvíjelo se od aplikační oblasti. Proto nebyly výjimkou situace, kdy přistání probíhalo na velmi malé ploše s četnými výškovými překážkami v okolí přistávací plochy (obr. 7.13). V případě paraglidového modelu probíhalo přistání proti směru větru, aby bylo padákové křídlo do poslední chvíle nafouknuté. Přibližně 10 metrů nad zemí se z důvodu bezpečnosti dálkově vypnul benzinový motor. Z motorového paraglidu se stal pouhý kluzák, se kterým bylo stále možné manévrovat pomocí elektrických servomotorů ovládajících padák.

V případě multirotorového systému Hexakopter XL byla situace o něco jednodušší. Pilot si mohl vybrat, zda přistávat na zem nebo zda pomocník pilota chytí zařízení během letu do ruky. Druhá možnost byla velmi vítaná právě v případě komplikovaného terénu, který neumožňoval přistání na zem. Vysoká tráva, bláto nebo přítomnost vody sice znemožnilo přistání na zem, ale díky možnosti chytit zařízení do ruky bylo snímkování možné i v oblastech, kde to s paraglidovým modelem nebylo proveditelné. Multirotorový systém je schopen „stát“ na místě ve vzduchu a takto levituje v zadané výšce buď podle systému GPS, nebo podle manuálních pokynů pilota. Na obrázku 7.14 vlevo je ukázáno

přistání „do ruky“, zatímco na pravé straně je částečně nepovedené přistání, kdy se padák omotal kolem suchého kmene.



Obr. 7.13 Přistání je někdy velmi náročným manévrem. Jediná plocha možná k přistání v širokém okolí je ve vyschlém korytě toku (foto: J. Miřijovský).



Obr. 7.14 Přistání do ruky (vlevo), nepovedené přistání (vpravo) (foto: J. Svobodová, S. Popelka).

Jak již bylo zmíněno, přistání je velmi složitým manévrem a je třeba mu věnovat náležitou pozornost. Pilot se musí plně soustředit, aby nedošlo k poškození nebo zničení zařízení či jeho částí.

#### 7.4.5 Kontrola dat

Po přistání bylo vhodné některá data překontrolovat ještě přímo na místě v terénu. Jedná se zejména o kontrolu pokrytí oblasti snímky, kvalitu snímků a kontrolu letových

údajů. Případné zjištěné vady tak bylo možné odstranit poměrně jednoduše opakovaním letu. Pokud se na chyby přišlo až po návratu, musel se opakovat nejen celý let, ale také celý proces přípravy letu a terénního zpracování, včetně nového zaměření bodů, které většinou nebyly stabilizovány trvale, ale pouze dočasně.

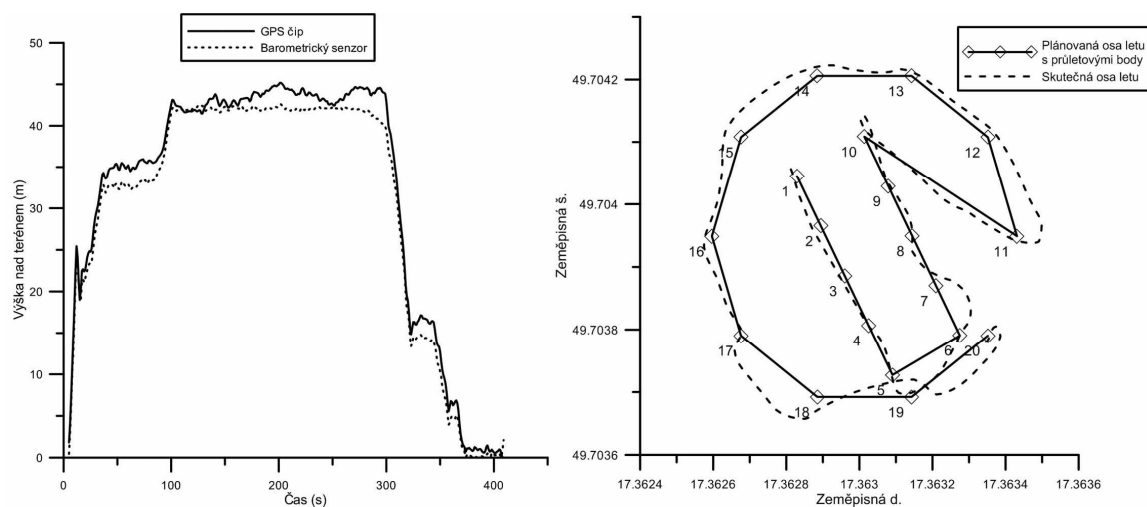
Pro kontrolu pokrytí území snímky a správné kvality obrazových dat postačil obyčejný notebook s prohlížečem fotografií. Pro vyhodnocení letových údajů (pokud model umožňuje jejich záznam) byly většinou dodány speciální programy. Jedním z nich je i nástroj MK GPXToll, který umožňuje vyhodnocovat záznamy ve formátu GPX. Jedná se o jednoduchý, ale velmi mocný nástroj pro vyhodnocení letových dat. Umožňuje sestavovat grafy podle zadaných parametrů, propojit OSD menu s videem a mnoho dalšího.



Obr. 7.15 OSD menu se záznamem letových údajů (autor: J. Miřijovský).

Jedním z nejdůležitějších údajů o letu je výška snímkování. Model je vybaven dvěma způsoby měření výšky. První způsob je založen na základě měření pomocí GPS signálu a druhý na základě měření tlakového čidla MPX4115A. To funguje na principu měření tlaku. Podle hodnoty tlaku je na výstupu generováno určité napětí. Barometrický senzor bere jako referenční hodnotu průměrný tlak u hladiny moře, což je 1013,25 hPa, a jemu odpovídá hodnota 4,08 V na výstupu. Protože v nížinách klesá tlak každých 8 m o jeden hPa, lze počítat změny výšky. Hodnota osm metrů však platí při teplotě 0 °C. Při teplotě 10 °C je to už 8,3 m. Pokud senzor byl v nadmořské výšce 500 m, byla hodnota tlaku přepočítaná na hladinu moře 954,61 hPa a výstupní napětí mělo hodnotu 3,82 V. V levém grafu na obrázku 7.16 byla provedena analýza porovnání letové výšky z GPS čipu s přesnějším (za předpokladu správné kalibrace senzoru) barometrickým měřením. Maximální odchylka výšky z GPS čipu oproti barometrickému senzoru činí 4,075 m. Z grafu je dále patrné, že barometrický senzor měl také vyrovnanější průběh. V pravém grafu je vidět porovnání polohy skutečné letové osy od plánované. V grafu jsou rovněž

vyznačeny průletové body, na kterých proběhlo snímkování terénu. Všechny odchylky od plánovaných bodů odpovídají přednastavené hodnotě „radius“ 6 m.



Obr. 7.16 Vyhodnocení letových údajů zařízení Hexakopter XL (autor: J. Miřijovský).

Obdobným způsobem bylo možné kontrolovat a sestavit závislosti i jiných parametrů než jen výšky. Vyhodnocení dat umožnilo nejen kontrolu správného provedení snímkování, ale otevírá možnosti pro další analýzy dat i v jiných oblastech vědy a výzkumu, než je fotogrammetrie.

## 8 ZPRACOVÁNÍ DAT

Kvalitně pořízené snímky jsou základním předpokladem úspěšného zpracování dat. V dnešní době výkonné výpočetní techniky je sice možné zpracovat snímky, které obsahují i dosti výrazné geometrické vady, ale vždy je to za cenu snížení výsledné přesnosti. Snímky pořízené UAV technikou se nejčastěji zpracovávají buď klasickou stereofotogrammetrickou metodou, nebo tzv. metodou „Structure from Motion“, která je zejména v posledních letech stále oblíbenější, a je zde velký pokrok v oblasti vývoje nových a přesnějších algoritmů zpracování.

### 8.1 Stereofotogrammetrické zpracování dat

Stereofotogrammetrické zpracování dat je klasická metoda, která je známá již desetiletí. V době, kdy veškeré výpočty probíhají pomocí výpočetní techniky, se jedná o mocný nástroj nejen konvenční letecké fotogrammetrie, ale také UAV fotogrammetrie. Postupy zpracování jsou obdobné, ale specifičnost dat z SFAP snímkování vyžadovalo standardní postupy mírně upravit. Každé stereofotogrammetrické zpracování dat se skládalo z několika dílčích kroků, které měly vyústit tvorbou 3D modelu, případně ortogonalizací původních snímků. Jednotlivé kroky jsou:

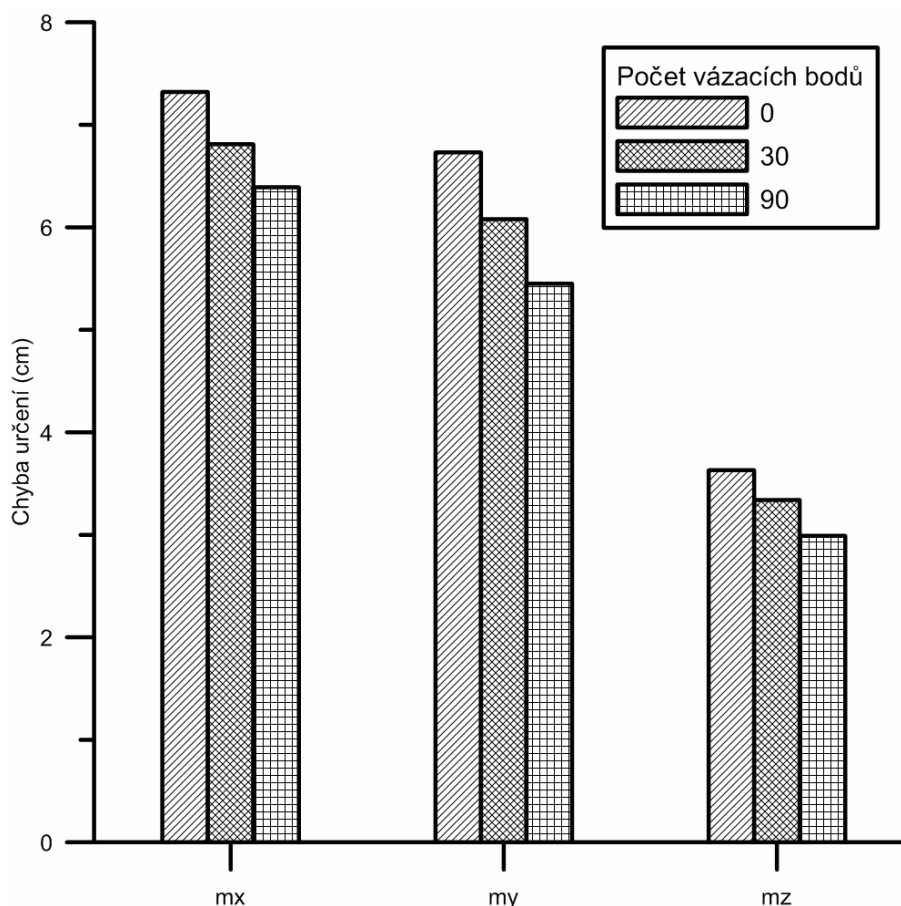
- výpočet prvků vnější orientace, který se provádí pomocí tzv. aerotriangulace,
- extrakce bodů,
- tvorba 3D modelu terénu,
- ortogonalizace snímku.

Pokud bylo cílem vytvořit ortorektifikovaný snímek, pak nebylo možné žádný z kroků vynechat. Detailnější informace o matematickém principu stereofotogrammetrie je možné nalézt v kapitole *2.1.2 Matematické řešení stereofotogrammetrie* nebo v odborné literatuře.

#### 8.1.1 Aerotriangulace

Aerotriangulace je matematická metoda, která slouží k přesnému určení polohy a orientace jednotlivých leteckých snímků. Jedná se tedy o určení prvků vnější orientace. Vstupními daty musí být vždy vlíčovací body (angl. Control points), které slouží jako základní prostředek k výpočtu souřadnic středu snímků a jejich natočení. V konvenční letecké fotogrammetrii jsou většinou dalšími vstupními daty informace o přibližném středu každého snímku a jeho náklonech. Ty pocházejí z GNSS a IMU jednotky. V UAV fotogrammetrii však byly vlíčovací body jediným zdrojem dat, který měl přesně určeny geodetické souřadnice bodů. Pro zpřesnění výsledku bylo vhodné využít tzv. vázacích bodů (angl. Tie points). Vázací body jsou body, jejichž souřadnice v geodetickém systému nejsou určeny, ale je známa jejich přesná poloha na obou či více snímcích. Geodetické souřadnice vázacích bodů byly proto určeny až během výpočtu AAT, ale i tak mohly zvýšit přesnost výpočtu. Vázací body byly na snímku definovány buď manuálně, nebo automaticky. V případě automatického rozmístění vázacích bodů na snímku bylo

třeba správně definovat vyhledávací parametry. Algoritmus pro vyhledávání identických bodů vždy používá pouze jedno pásmo obrazu. Proto bylo třeba volit takové, kde budou dostatečné rozdíly v DN (digital number) hodnotách mezi jednotlivými objekty. Vyhledávání funguje na základě obrazové korelace, a proto především velikost vyhledávacího okna a hodnota korelačního koeficientu měly nejvýznamnější vliv na výsledek. Vliv počtu vázacích bodů na přesnost AAT byl experimentálně ověřen na datech pořízených přímo v terénu. Výsledky experimentu lze vidět na obrázku 8.1. Po analyzování grafu bylo možné potvrdit, že čím větší počet vázacích bodů se v obraze nacházel, tím byla vyšší přesnost aerotriangulace. Před použitím vázacích bodů bylo nutné zkontrolovat a odstranit ty vázací body, které ležely např. na korunách stromů. Během snímkování mohlo ve větru docházet k pohybu jednotlivých listů, tudíž na každém ze snímků mohly mít listy jinou polohu. To bylo nepřijatelné. Musely být vybírány pouze objekty, které byly po celou dobu snímkování na stejném místě a přímo na povrchu terénu. Vlivem centrální projekce totiž docházelo k posunu objektů na jednotlivých snímcích.



Obr. 8.1 Vliv počtu vázacích bodů na přesnost aerotriangulace (autor: J. Miřijovský).

Jak již bylo zmíněno, UAV fotogrammetrie kladla na zpracování dat některá specifika. Prvním z nich byla již uvedená absence údajů o přibližných středech jednotlivých snímků. Mezi další podstatné specifikum patřily ne zcela přesné parametry prvků vnitřní orientace. I přesto, že byla kamera zkalibrována pomocí prostorového nebo

rovinného testovacího pole, díky konstrukci objektivů snímkovacích kamer nebyly prvky vnitřní orientace stálé. Proto bylo vhodné přidat do výpočtu AAT tzv. simultánní kalibraci. Výpočet upřesnil zadané prvky vnitřní orientace v rozpětí, které bylo uživatelem nastaveno jako možná chyba původních hodnot. Jednotlivé možnosti se lišily podle použitého programu, ale téměř všechny používaly obecně uznávané modely pro upřesnění prvků vnitřní orientace. Po dlouhodobých testech v programu LPS byl jako nejpoužitelnější zvolen model pro výpočet radiální distorze objektivu. Tento model má ve výsledku pouze dva parametry, a těmi jsou koeficienty radiálního zkreslení  $K_1$  a  $K_2$ . Vzorec pro výpočet je následující:

$$\Delta x = k_1 x r^2 + k_2 x r^4; \quad (24)$$

$$\Delta y = k_1 y r^2 + k_2 y r^4 \quad (25)$$

kde:

$\Delta x, \Delta y$  jsou posuny bodu ve snímkových souřadnicích na stereopáru,

$k_1, k_2$  jsou koeficienty radiální distorze,

$r$  je hodnota radiální distorze.

Druhým modelem, který bylo možné použít, je Braunův fyzický model. Tento model přidává do výpočtu 14 nových parametrů, které kompenzují lineární i nelineární distorze jak filmu, tak objektivu. Právě proto, že kompenzuje i distorzi filmu, nebyl ve výpočtech použit. Během práce totiž byla použita výhradně digitální technika. Na druhou stranu Braunův model do výpočtu zahrnuje také ohniskovou vzdálenost kamery, což předchází výpočet nemá. Výsledky však vycházely hůře než v případě použití modelu pro odstranění radiální distorze objektivu. Matematický zápis Braunova modelu je:

$$\Delta x = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 y^2 + a_5 x^2 y + a_6 xy^2 + a_7 x^2 y^2 + a_{13} \frac{x}{f} x^2 y^2 + a_{14} x(x^2 + y^2); \quad (26)$$

$$\Delta y = a_8 xy + a_9 x^2 + a_{10} x^2 y + a_{11} xy^2 + a_{12} x^2 y^2 + a_{13} \frac{y}{f} x^2 y^2 + a_{14} y(x^2 + y^2) \quad (27)$$

Protože se do výpočtu AAT přidávaly další neznámé v podobě výpočtu radiální distorze a dalších parametrů, bylo potřeba použít více vlíčovacích bodů, než je teoretické minimum. Experimenty bylo zjištěno, že deset vlíčovacích bodů již poskytuje kvalitní a přesný výsledek (tab. 11.2). V případě požadavku na simultánní kalibraci musely být body měřeny s velmi vysokou přesností. Přesnost určení souřadnic vlíčovacích bodů musela být vyšší, než je prostorová rozlišovací schopnost snímku, tedy skutečná velikost jednoho pixelu. Před výpočtem aerotriangulace bylo také nezbytné zadat jako váhový parametr přesnost geodetického měření vlíčovacích bodů. Tím byla do výpočtu vložena mírná volnost pro korekci vlíčovacích bodů, které nikdy nebyly zaměřeny s nulovou chybou.



S výslednou přesností automatické aerotriangulace byl úzce svázán další postup v podobě extrakce bodů ze snímků. Pokud byla AAT provedena nesprávně, nemohl být další postup nikdy zcela přesný. Jak již bylo zmíněno, přesnost AAT bylo možné ověřit v reportech z výpočtu, kde se nachází informace o přesnosti výpočtu prvků externí orientace. Pro zjištění absolutní přesnosti aerotriangulace bylo vhodné použít některé ze zaměřených bodů v terénu jako tzv. kontrolní body. Takto použité body nevstupovaly do procesu výpočtu aerotriangulace a bylo možné podle nich porovnat absolutní přesnost aerotriangulace. Jinými slovy při této analýze bylo možné porovnat souřadnice kontrolních bodů, které byly vypočítány pouze fotogrammetrickým řešením s jejich originálními změřenými souřadnicemi. Výsledkem této analýzy byla RMSE chyba, která definuje míru korespondence mezi vypočítanými hodnotami a původními hodnotami. Nižší hodnoty RMSE znamenaly přesnější výsledky. V tabulce 8.1 lze vidět RMSE třech kontrolních bodů, které byly použity během výpočtu AAT s 22 vlícovacími body.

Tab. 8.1 Přesnost výpočtu AAT pomocí kontrolních bodů (autor: J. Miřijovský).

Číslo bodu	RMSE <sub>X</sub> (m)	RMSE <sub>Y</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
4	-0,0236	-0,0088	0,0881
7	-0,0160	0,0106	0,0174
20	-0,0123	0,0290	0,0159

### 8.1.2 Extrakce bodů

Extrakce bodů ze stereopáru v programu LPS mohla probíhat manuálním, poloautomatickým nebo zcela automatickým způsobem. Každá z možností měla své výhody i nevýhody. Základní podmínkou pro úspěšnou extrakci bodů bylo velmi přesné určení externí orientace společně s přesným odstraněním radiální distorze objektivu. Objekty, které ležely na jedné stereodvojici, měly vlivem rozdílného stanoviště snímkování určitou hodnotu tzv. X-paralaxy. Velikost X-paralaxy je přímo úměrná prostorové složce dat. Jednoduše řečeno, čím měla X-paralaxa vyšší hodnotu, tím byl prostorový 3D vjem větší. Toho bylo možné velmi dobře využít při manuálním vyhodnocování snímků k zajištění dostatečného prostorového vjemu. Bohužel proti tomu stál fakt, že čím byla delší fotogrammetrická základna, tím byl menší překryv snímků. To bylo problematické zejména z důvodu vysokých hodnot radiální distorze u okrajů snímků. I přes znalost průběhu radiální distorze nebylo možné nikdy zcela přesně zkusit odstranit a bylo lepší se okrajům snímků při zpracování vyhnout. Při zpracování tak bylo využito u obou snímků pouze jejich střední části, a proto bylo třeba volit vysoké hodnoty překryvu. V opačném případě okraje snímků obsahovaly určitou hodnotu Y-paralaxy, která však byla nepřijatelná.

Pro manuální vyhodnocování 3D bodů bylo využito speciálních zařízení k zobrazení pravého 3D. V dnešní době je ve fotogrammetrické praxi využíváno nejčastěji dvou technologií. První z nich jsou speciální stereoskopické monitory značky Planar. Jedno zařízení se skládá ze dvou monitorů a polopropustného zrcadla. Každý monitor promítá pouze jeden snímek ze stereodvojice a každý je s jinou polarizací. Oba obrazy se skládají

v jeden na polopropustném zrcadle. Při použití polarizačních brýlí pak každé oko uživatele vnímá pouze jeden z obrazů a vzniká stereovjem. Druhý systém, který byl použit během studia, využívá tzv. aktivní brýle a monitor s velmi vysokou rychlostí obnovovací frekvence. Na monitoru, který musí mít rychlost nejméně 120 Hz, se střídavě zobrazuje levý a pravý obraz. Aktivní brýle střídavě zatmívají levé a pravé oko rovněž s rychlostí 120 Hz. Obě zařízení jsou synchronizována, a tím opět dochází k tomu, že levé a pravé oko vidí střídavě pouze levý a pravý obraz. Při obnovovací frekvenci 120 Hz není lidský mozek schopen rozlišit oba obrazy a výsledek se jeví jako pravé 3D. Obě zařízení mají své výhody a nevýhody, ale pro manuální 3D vyhodnocování bodů jsou obě velmi dobře použitelná.

Manuální vyhodnocení terénu bylo časově náročné, a proto bylo využíváno pouze jako doplňující řešení. Při vyhodnocení každého bodu bylo potřeba kurzor ve 3D režimu výškově umístit na terén, a to s vysokou přesností. Zde docházelo k limitním situacím, co dokáže lidské oko rozeznat. Snímky pořízené z nízkých výšek měly hodnoty GSD kolem jednoho až dvou centimetrů a teoreticky bylo možné vyhodnocovat i výškové nerovnosti v řádech centimetrů. Tyto změny však nebylo schopné lidské oko ve 3D zobrazení rozeznat a z dlouhodobé praxe bylo zřejmé, že v manuálním režimu operátor nebyl schopen poznat, zda kurzor leží např. ve výšce 200 m nebo 200,03 m.

Jistým řešením bylo využití poloautomatického vyhodnocení. Většina v současnosti používaných fotogrammetrických programů umožňuje použití funkce, která na základě obrazové korelace kurzor automaticky přichytává k terénu. Operátorovi je usnadněno pracné umísťování kurzoru na bod a pouze ve stereo režimu kontroluje správnost řešení. Při použití autokorelačních metod bylo nezbytné nastavit vysokou hodnotu korelačního koeficientu (kolem hodnoty 0,9). V opačném případě docházelo k přichytávání i na body, které nebyly identické, a docházelo k chybnému určení nadmořské výšky bodu. Praxí bylo ověřeno, že pomocí kombinace manuálního a poloautomatického vyhodnocení bylo možné objekty nebo terén rekonstruovat s vysokou přesností. Hlavním omezením zůstával maximální počet bodů, které byl operátor schopen vygenerovat. Vysoké hodnoty GSD u snímků z UAV dovolovaly generovat desetitisíce bodů na malé ploše, což nebylo možné dělat manuálně. Proto bylo přistoupeno k třetí možnosti, kterou bylo použití automatické obrazové korelace s extrakcí bodů podle zadaných parametrů.

V programu LPS je nástrojem pro automatickou extrakci bodů z terénu modul eATE (Enhanced Automatic Terrain Extraction). Nejdůležitější funkcí modulu je schopnost automaticky extrahovat výšková data z překrývajících se snímků, které však musely mít rovnoběžné osy záběru, případně mohly mít mírně konvergentní geometrii. Modul umožňuje řídit celý proces zpracování přes definování tzv. vyhledávacích strategií. Ty ze všeho nejvíce ovlivňovaly kvalitu výstupu. Během definování nové strategie musel být brán v úvahu charakter (rozsah, vertikální a horizontální členitost) povrchu zájmového území. Mezi nejdůležitější parametry ve vyhledávacích strategiích patří:

- velikost vyhledávacího okna (Search Window),
- velikost okna pro výpočet korelačního koeficientu dvou bodů (Window Size),

- velikost korelačního koeficientu (Coefficient Start, Coefficient End),
- použité pásmo obrazu.

Bylo zpracováno velké množství dat s různými hodnotami pro jednotlivé parametry. Je zřejmé, že každý typ terénu vyžaduje mírně odlišný přístup a tedy i jiné hodnoty pro vyhledávací parametry. Byly stanoveny výchozí parametry, které ve většině případů vyhovovaly terénu se střední výškovou členitostí (tab. 8.2).

Tab. 8.2 Parametry pro automatickou extrakci bodů (autor: J. Miřijovský).

Search Window	30 x 30
Window Size	9 x 9
Coefficient Start	0,8
Coefficient End	0,95
Použité pásmo obrazu	1 nebo 2

Pro hodnocení kvality extrakce bodů bylo využito reportů, které byly vytvářeny s každým procesem zpracování. Extrakce bodů probíhala v iteracích. První iterace využila zaváděcí soubor, který byl následně aktualizován v dalších iteracích. Body byly exportovány až po poslední iteraci, která měla také nejvyšší hodnotu korelačního koeficientu. Výstup z poslední iterace, včetně hodnocení přesnosti v podobě směrodatné odchylky, střední chyby a střední kvadratické chyby, lze vidět v tabulce 8.3. Výpočty jsou provedeny pro souřadnici Z, ale stejným způsobem byly určeny i chyby v souřadnicích X a Y. Výpočty probíhají podle následujících vzorců.

Střední chyba:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dZ ; \quad (28)$$

kde:

$$dZ = (Z_{or} - Z_{mer}) ; \quad (29)$$

kde:

$Z_{or}$  je souřadnice bodu určena geodetickým měřením,

$Z_{mer}$  je souřadnice stejného bodu určena výpočtem.

Směrodatná odchylka:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} (dZ_1 - ME)^2 + (dZ_2 - ME)^2 + \dots + (dZ_N - ME)^2} \quad (30)$$

Střední kvadratická chyba:

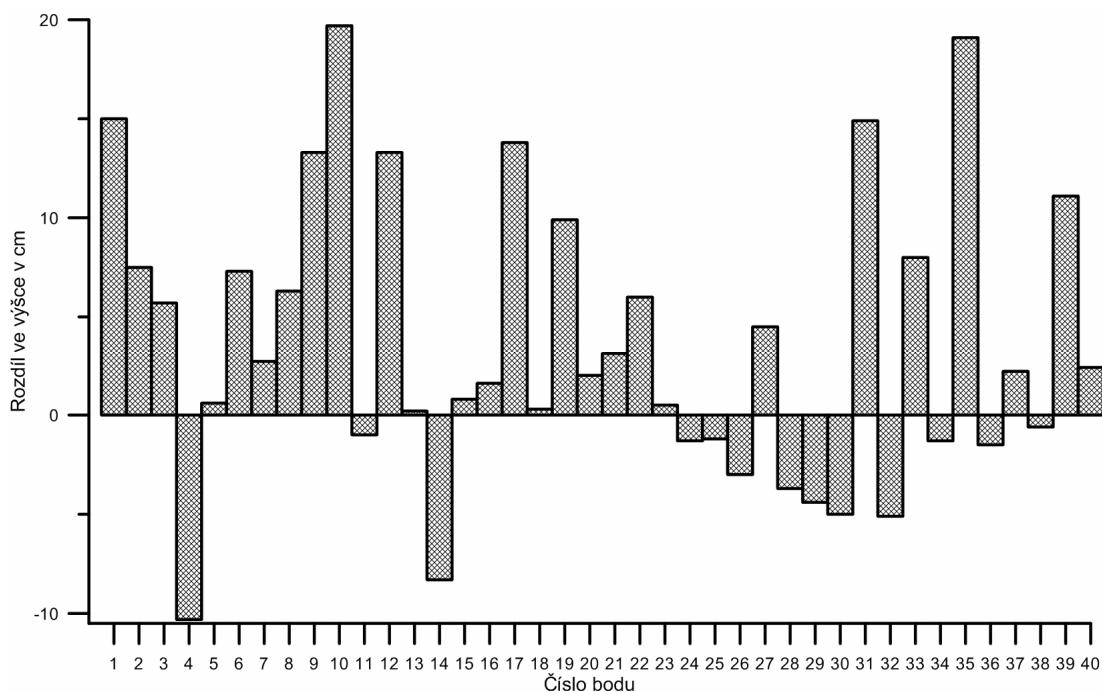
$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_{or} - Z_{mer})^2}{N}} \quad (31)$$

Na prvním řádku jsou uvedeny hodnoty z výstupu s nejlepšími parametry a na druhém řádku pro srovnání výstup s horšími parametry pro extrakci bodů. Rozdíl v parametrech byl v tomto případě ve změně použití spektrálního pásma. V prvním výpočtu bylo pro vyhledávání bodů a výpočet korelačního koeficientu využito pouze pásmo první, zatímco v druhém výpočtu bylo využito kombinací všech tří RGB pásem. Přestože použití všech tří pásem v druhém případě zvýšilo počet bodů jak na výstupu, tak i počet propojených bodů, z tabulky je vidět, že přesnost bodů je výrazně nižší.

Tab. 8.3 Závěrečné hodnocení z poslední iterace dvou automatických extrakcí (autor: J. Miřijovský).

Z min. (m)	Z prům. (m)	Z max. (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)	Střední chyba (m)	Počet propojených bodů	Počet bodů na výstupu
433,735	439,175	447,903	0,072	0,080	0,036	1 285 564	39 925
433,918	439,354	447,900	0,256	0,263	0,062	2 333 441	58 803

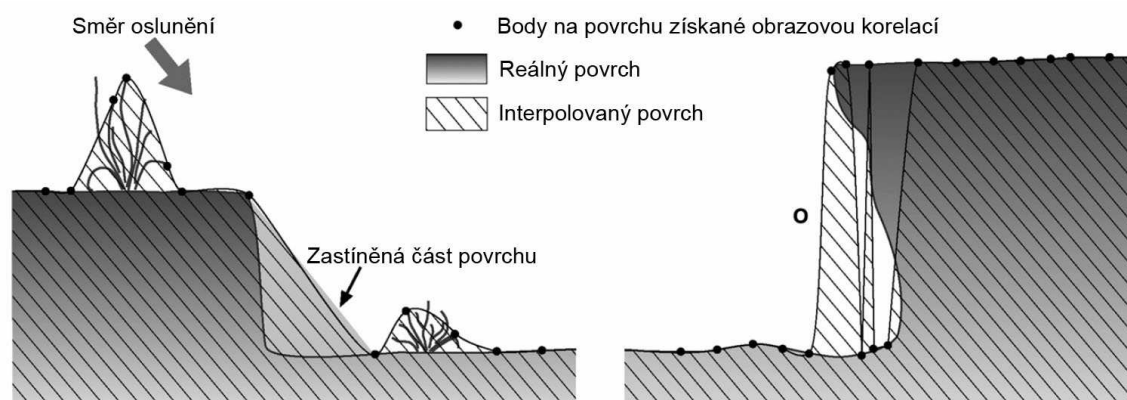
Přesnost exportovaných bodů lze také vidět na obrázku 8.2. Pro zvýšení přesnosti byly před zahájením extrakce bodů nahrány do projektu vázací a vlivovací body. Podle nich bylo možné po ukončení zpracování provést kontrolu přesnosti. V grafu jsou uvedeny rozdíly v souřadnici Z mezi vlivovacími nebo vázacími body a body vyexportovanými automatickým postupem, který leží v těsné blízkosti.



Obr. 8.2 Rozdíly mezi vlivovacími body (případně vázacími body) a body povrchu vyexportovanými automatickými postupy (autor: J. Miřijovský).

Velkým problémem při extrakci bodů, a to všemi postupy, byly stíny a převisy terénu. Z principů fotogrammetrie je zřejmé, že vyhodnotit bylo možné pouze to, co se nacházelo na snímku, a zároveň musí platit, že pixel byl nositelem užitečné informace. Na obrázku 8.3 je vyobrazen případ, ve kterém nemůže být část povrchu vyhodnocena. Na pravé straně obrázku je vidět směr dopadajícího slunečního záření a část zastíněného terénu. Terén sice může být zachycen na snímku, ale z důvodu stínů v obraze nenesou pixely v této oblasti žádnou užitečnou informaci, z které by bylo možné vyhodnotit výšku bodu. Na pravé straně je zobrazen terénní převis. Jak je z obrázku patrné, není možné, aby byl dokonale zachycen terén i pod převisem. V takovém případě je část terénu nevyhodnotitelná a terén bude interpolován chybně. Tyto situace nastávaly nejčastěji při snímkování břehových nátrží.

Žádný ze tří postupů nebyl zcela automatickým procesem. I v případě automatické extrakce musely body projít manuální kontrolou. Při kontrole se podle znalosti terénu prověřovalo, zda některé body nejsou chybné. V kladném případě byly ihned odstraněny. Naopak často se stávalo, že část bodů bylo nutné doplnit manuálně. Zejména v oblastech, kde byl povrch homogenní (písek, voda, atp.), autokorelační metody selhávaly. Software nedokázal nalézt žádné hrany v obraze a tedy ani identické pixely s dostatečnou hodnotou korelačního koeficientu. V takových oblastech se operátor nevyhnul manuálnímu vyhodnocení terénu či povrchu.



Obr. 8.3 Problematika stínů a převisů při extrakci bodů ze snímků (zdroj: upraveno podle Aber et al. (2010)).

### 8.1.3 Tvorba 3D modelu

Data, která byla získána jedním z postupů představených v kapitole 8.1.2, byla bodového charakteru. Jednalo se tedy pouze o diskrétní digitální reprezentaci terénu či povrchu. Pro většinu analýz bylo ovšem výhodnější použití spojitěho digitálního modelu, který reprezentoval reálnou krajinu. Existuje velké množství interpolačních postupů, které lze použít na získání 3D modelu terénu či povrchu. Analýzou interpolačních metod se zabývala ve své práci např. Svobodová a kol. (2009). Bodová data, která byla získána z UAV snímků, měla v některých případech v terénu velmi specifické rozmístění. Vždy záleželo na konkrétním typu povrchu. V oblastech, kde bylo velké množství hran

a snímky měly dostatečný kontrast, bylo možné získat velký počet bodových dat. Naopak v místech, která byla homogenní, bylo bodových dat velmi málo. Ve výsledku nemusely být body rozmístěny vždy zcela rovnoměrně po celé ploše zájmu, ale mohly tvořit samostatné shluky bodů (obr. 8.4). I zpracování dat do podoby 3D modelu pak bylo odlišné.



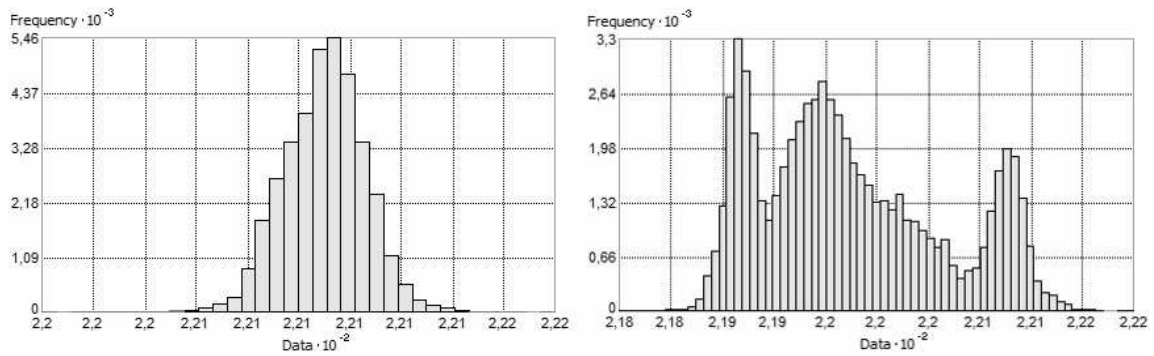
Obr. 8.4 Ukázka nerovnoměrného rozložení bodů v terénu (autor: J. Miřijovský).

Dále je uvedena studie, která měla nalézt nejvhodnější postup zpracování dat z UAV fotogrammetrie pro aplikaci fluviaální geomorfologie. Jedná se o břehovou nátrž v CHKO Litovelské Pomoraví.

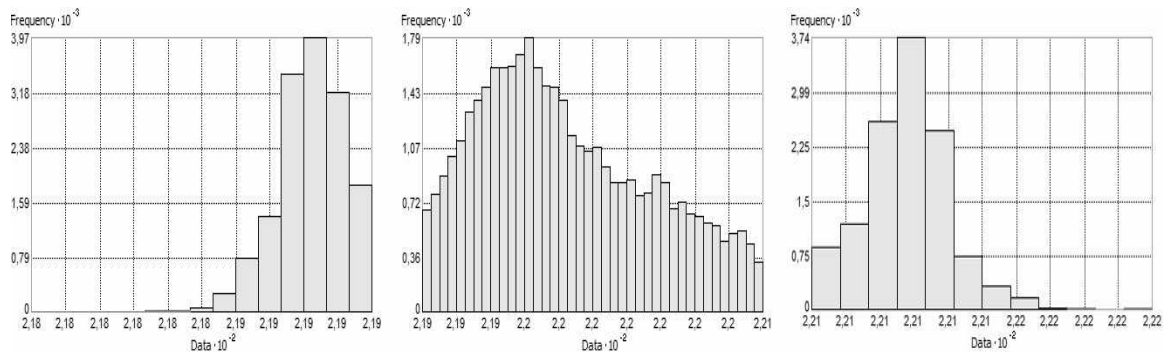
### **Odstranění odlehlých hodnot**

Před tvorbou 3D modelu byly odstraněny odlehlé hodnoty. K jejich odstranění byly využity histogramy, pomocí kterých bylo možné detekovat odlehlé hodnoty z hlediska souřadnice Z (nadmořské výšky). Odlehlost ve směru X a Y nebylo třeba řešit, neboť se jednalo o velmi přesná data. Území bylo pro získání vyšší přesnosti rozděleno na dvě části. První částí byla rovinatá oblast nad břehem (jednalo se o posečenou louku) a druhou částí byl samotný břeh. Pro každou část území (1 a 2) byl vytvořen histogram četnosti hodnot nadmořské výšky (počet intervalů odpovídal tisícům bodů v dané části, např. Část 1 – 36,5 tis. bodů 36 intervalů v histogramu). Následně byly z bodové vrstvy odstraněny extrémní (okrajové) hodnoty s četností menší než 10 bodů v daném intervalu.

V obrázku 8.5 lze vidět histogramy pro část první a pro část druhou. Levý histogram má normální rozdělení, ale v pravém histogramu, který patří břehové části, se nachází tři samostatné vrcholy. Proto byla data rozdělena do dalších tří samostatných částí a znovu vytvořeny histogramy pouze pro jednotlivé části břehu. Poté byly opět odstraněny odlehlé hodnoty pro jednotlivé suboblasti (obr. 8.6). Celkově bylo odstraněno celkem 80 bodů v první části a 73 bodů v druhé části.



Obr. 8.5 Histogramy četnosti hodnot výšky v rovinaté a břehové části (autor: J. Miřijovský).



Obr. 8.6 Histogramy četnosti hodnot výšky v jednotlivých částech břehu (autor: J. Miřijovský).

### Výběr vhodné hustoty dat pro tvorbu DSM

Hustota bodů vygenerovaných ze stereodvojic byla značně proměnlivá. V některých místech se nacházelo až 36 bodů na  $100 \text{ cm}^2$ , jinde byl pouze bod jeden nebo body v daném segmentu zcela chyběly. Vliv na výslednou hustotu bodů měla kvalita snímků, úspěšnost provedené korelace mezi snímky v daném místě a zejména zvolený krok vzorkování pro generování bodů.

Na počátku modelování bylo vhodné při generování dat ze snímků zachovat co nejvyšší hustotu dat a filtrování (změnu hustoty dat) provést až v další fázi, tj. před vlastní tvorbou DMP (digitální model povrchu). Navíc v této fázi již bylo možné použít různou hustotu dat pro různé části území. Za účelem určení vhodné míry filtrace pro části modelového území 1 a 2 byl postupně z bodů o hustotě 85, 60, 40 a 20 % vytvořen TIN a interpolací rastr (metodou spline s tenzí, hodnota váhy tenze 10, počet vstupních bodů 10). Vizualizací ve 2D (pomocí stínovaného reliéfu) i v perspektivním promítání byla sledována členitost či shlazení výsledných povrchů a vliv změny hustoty vstupních dat na výsledné povrchy.

Na základě vizualizace byla pro jednotlivé části vybrána nejvhodnější hustota vstupních bodů, která byla následně použita pro tvorbu výsledného TIN i rastru. Jako vhodná hustota výškových bodů pro louku byla vybrána filtrace na 20 % z původní datové sady, čímž bylo dosaženo maximálního shlazení v této rovinné části. V opačném případě byl terén velmi nerovný, což způsobovaly jednotlivé trsy travin. Model byl sice přesný, nicméně pro vizualizační účely nevhodný. Pro břehovou část byla zvolena filtrace

na 40 %, která odstranila drobnější „morfologické“ tvary (nerovnosti vegetace např. v rámci jednoho drnu), avšak stále velmi podrobně zachycovala tvarové změny odkrytého reliéfu i pokryvné vegetace.

### Tvorba vektorového a rastrového DMP

Vektorový formát TIN je schopen se snadno přizpůsobit různé hustotě vstupních dat. Pro tvorbu DMP v tomto formátu tedy stačilo vybrat vhodnou hustotu vstupních dat. Nepravidelná síť trojúhelníků věrně vystihovala modelovaný povrch (obr. 8.7), ale ve většině případů nebyla vhodná pro další analýzy (morfometrické, objemové apod.), a to z důvodu, že naprostá většina analytických nástrojů vyžaduje jako vstupní soubor rastr. Z toho důvodu bylo třeba vytvořit i rastrový DMP s pravidelnou strukturou.

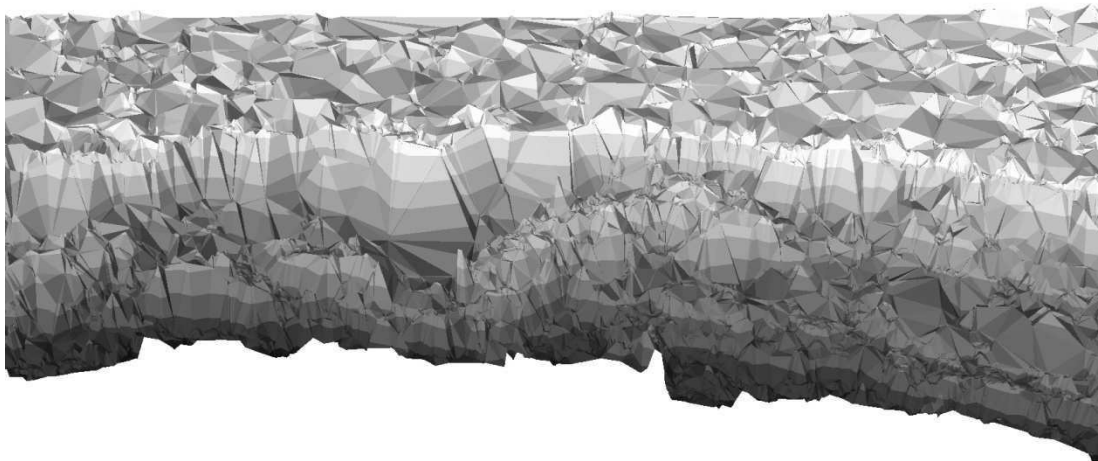
Výběru vhodné interpolační metody předcházela tvorba sady digitálních modelů povrchu o velikosti pixelu 10 cm. Nastavení dalších parametrů pro jednotlivé interpolační metody je uvedeno v tabulce 8.4. Při tvorbě DMP metodou „kriging“ bylo využito možnosti modelování anizotropie v datech ve směru SSV-JJZ (koeficient anizotropie nastaven na 2,5). Ke zhodnocení výsledných rastrových DMP byla použita vizualizace v perspektivním zobrazení a dále výpočet RMSE chyby. Výpočet RMSE byl možný vzhledem k existenci 15 % bodů, které nevstupovaly do interpolace a byly brány jako referenční. Tato metoda se nazývá „Split sample validation“. Metoda pracuje na principu rozdělení vstupního souboru na dvě části. Jedna část je použita jako referenční a druhá pro interpolaci (Erdogan, 2009).

Výsledné hodnoty RMSE jsou uvedeny v tabulce 8.4, vizualizace nejlépe a nejhůře hodnocených DMP jsou na obrázcích 8.8, 8.9 a 8.10. Je třeba připomenout, že hodnoty RMSE chyby nemají žádnou vypovídající hodnotu o absolutní přesnosti modelu ve vztahu k souřadnicovému systému. Modely lze pouze porovnávat mezi sebou navzájem.

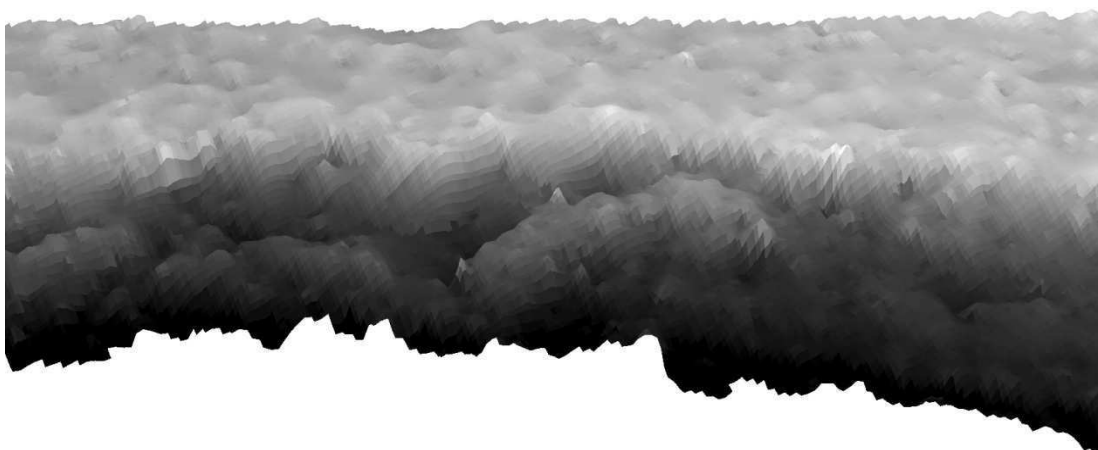
Tab. 8.4 Nastavení interpolačních metod pro tvorbu DSM a výsledné hodnoty RMSE (autor: J. Miřijovský).

název DMP	interpolační metoda (nastavení parametrů)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
KRGA	kriging (gaussian model, nugget 0,03; sill 0,07; range 0,5; lag size 0,5; number of lags 10)	0,9966
KRSF	kriging (spherical model, nugget 0; sill 0,045; range 0,5; lag size 0,5; number of lags 10)	0,9971
IDW4	inverse distance weighted (weight 4)	1,0011
IDW2	inverse distance weighted (weight 2)	1,0013
ST10	spline with tension (weight 10)	1,0017
ST01	spline with tension (weight 0,1)	1,0018
SR06	regularized spline (weight 0,6)	1,0022
SR03	regularized spline (weight 0,3)	1,0028

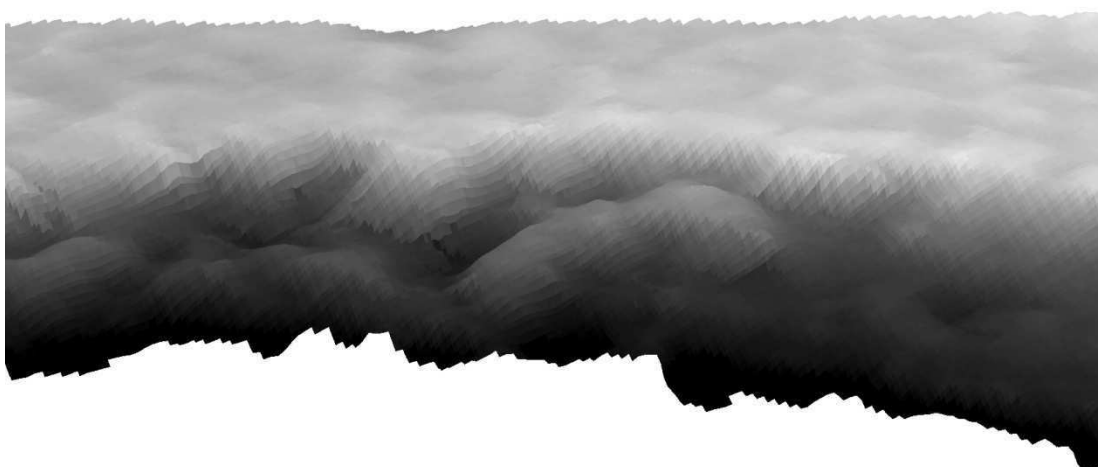




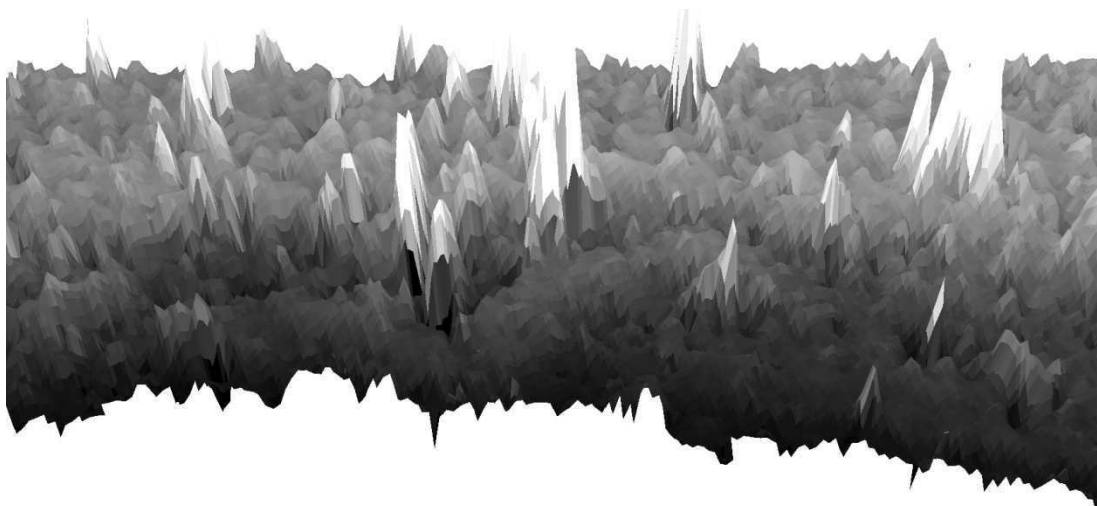
Obr. 8.7 Vektorový TIN (autor: J. Miřijovský).



Obr. 8.8 DMP vytvořený metodou běžný kriging při použití sférického modelu teoretického semivariogramu (autor: J. Miřijovský).



Obr. 8.9 DMP vytvořený metodou „kriging“ při použití Gaussova modelu teoretického semivariogramu. Nejlépe hodnocený DMP, ale s přílišným shlazením (autor: J. Miřijovský).



Obr. 8.10 DMP vytvořený metodou regularizovaný spline. Nejhůře hodnocený model podle RMSE i vizualizace (autor: J. Miřijovský).

#### 8.1.4 Ortogonalizace snímku

3D model povrchu nebo terénu byl v některých případech konečným produktem. Častější variantou však bylo, že 3D model vstoupil do dalšího zpracování snímků. Model pak sloužil jako referenční výškový zdroj k ortogonalizaci snímků původních. Tím docházelo k odstranění chyb, které byly způsobené centrální projekcí a nestejnou výškou snímaného terénu. Po provedení ortogonalizace snímku vznikl nový produkt, který se nazývá ortofoto. S ním bylo možné pracovat jako s klasickou mapou. Jak uvádí Pavelka (2003), ortogonalizace snímku probíhá nejčastěji jako výpočet nových poloh pixelů na základě známých převýšení pixelů nad srovnávací rovinou. Tím byly odstraněny radiální posuny jednotlivých pixelů. V případě většího počtu snímků vznikla potřeba spojit všechny snímky do jedné bezešvé ortofotomozaiky. Využito bylo tzv. seam polygonů neboli linií řezu. Při tvorbě ortofotomozaiky bylo třeba klást důraz také na barevné vyrovnání všech snímků. Přestože ani tvorba ortofota a ortofotomozaiky nebyla zcela jednoduchou záležitostí, tyto procesy jsou už zcela shodné s metodami konvenční letecké fotogrammetrie a UAV fotogrammetrie je pouze přebírá.

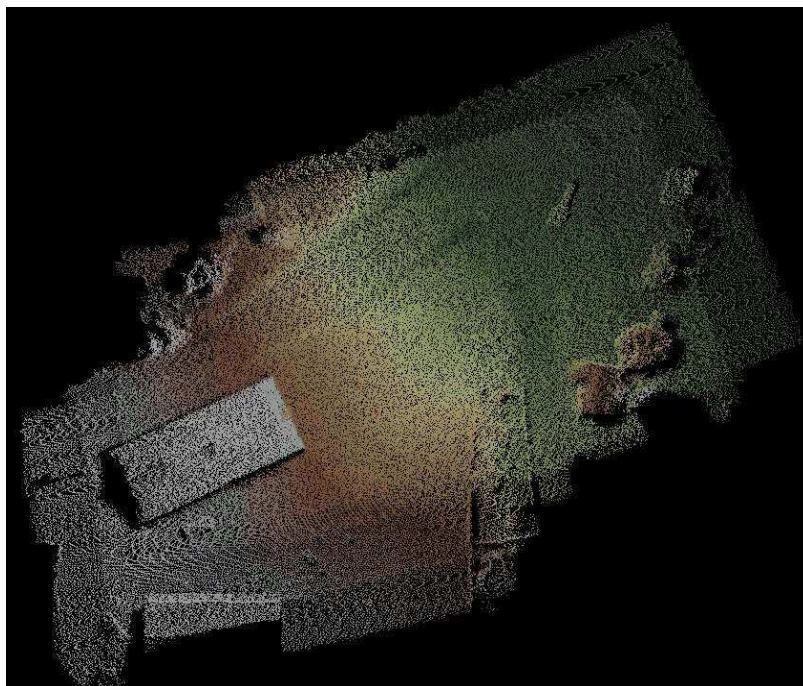
## 8.2 Zpracování dat metodou „Structure from Motion“

Metoda „Structure from Motion“ (SfM) kombinuje výhody stereofotogrammetrických metod a metod průsekové fotogrammetrie. Do procesu zpracování tedy mohly vstoupit snímky jak s rovnoběžnými osami záběru, tak s osami konvergentními. To usnadnilo celý proces snímkování. Nebylo třeba dbát na přesné dodržení kolmých snímků s rovnoběžnými osami záběru, jako tomu bylo u stereofotogrammetrických metod. Proces zpracování snímků byl u softwaru využívajícího tuto metodu podstatně jednodušší, co se týká možnosti nastavení parametrů. Na druhou stranu měl operátor pouze částečnou možnost ovlivnit výsledek. Programy jsou mnohem jednodušší na ovládání, protože se předpokládá využití i v jiných oblastech, než je vysoce specializovaná fotogrammetrie. Celá řada programů pracuje dokonce v on-line režimu. Na server společnosti uživatel

nahraje snímky a za poplatek obdrží vygenerovaný 3D model a ortofoto snímky. Poměrně detailní srovnání a hodnocení on-line aplikací zpracoval v rámci diplomové práce Řehák (2012). Pro účely této práce byl využit program společnosti Agisoft s názvem Agisoft PhotoScan Professional. Jeho výhodou je, že se jedná o desktopovou verzi, uživatel má tedy možnost ovlivnit výsledný produkt. Obecný postup zpracování byl následující.

Prvním krokem bylo seřazení pořízených snímků. V tomto kroku se software snažil nalézt na všech snímcích dostatečný počet nejčastějších bodů, které navzájem propojil. Na základě nalezených bodů program vypočítal pozice jednotlivých kamer při snímání a opravil prvky vnitřní orientace. Jedná se o velmi podobný proces, jako byl výpočet AAT u stereofotogrammetrické metody, která v sobě zahrnovala také simultánní kalibraci. Pro zpracování metodou Structure from Motion bylo vhodné použít větší množství snímků, i když teoretické minimum byly dva snímky. Tedy stejné množství jako u stereofotogrammetrie. Přesnost řešení byla totiž přímo úměrně závislá na množství vstupních snímků, které byly pořízeny nad stejným územím. Při dostatečném množství snímků obsahovalo řešení dostatečné množství nadbytečných rovnic, které byly generovány z množství pořízených snímků. Tím mohly být odstraněny chyby, které by byly v opačném případě zahrnuty do výpočtu. Výsledkem prvního kroku byly určené prvky vnější a vnitřní orientace a mračno propojovacích bodů. Mračno bodů získané v prvním kroku sloužilo pouze pro tento účel a dále nevstupovalo do generování 3D modelu. Po prvotním určení prvků vnější orientace a opravení prvků vnitřní orientace bylo možné zadat vlíčovací body. Pokud byly body měřeny s vysokou geodetickou přesností, byla provedena aktualizace vygenerovaného mračna bodů podle zadaných vlíčovacích bodů.

Ve druhém kroku algoritmus vygeneroval 3D geometrii povrchu. Na základě určených pozic kamery vznikl rekonstruovaný povrch jednotlivých objektů. Operátor měl na výběr, zda použije algoritmus pro generování objektů nebo tzv. výškové pole. Právě výškové pole nacházelo největší uplatnění pro generování 3D modelu povrchu z leteckých snímků. Místo vygenerování 3D modelu, který byl v tomto případě reprezentován TIN strukturou, bylo možné generovat a exportovat body v textovém formátu, nebo ve formátu pro ukládání laserových dat LAS 1.2 se členěním podle ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing). Práce s LAS soubory byla pohodlná a body bylo možné jednoduše vizualizovat i v mnohých volně dostupných prohlížečkách. Ukázkou vizualizace ve volně dostupném prohlížeči LAS souborů lze vidět na obrázku 8.11. Celkový počet bodů v tomto konkrétním případě je přibližně 1,8 mil. s průměrnou hustotou bodů 1 333 bodů na metr čtvereční.



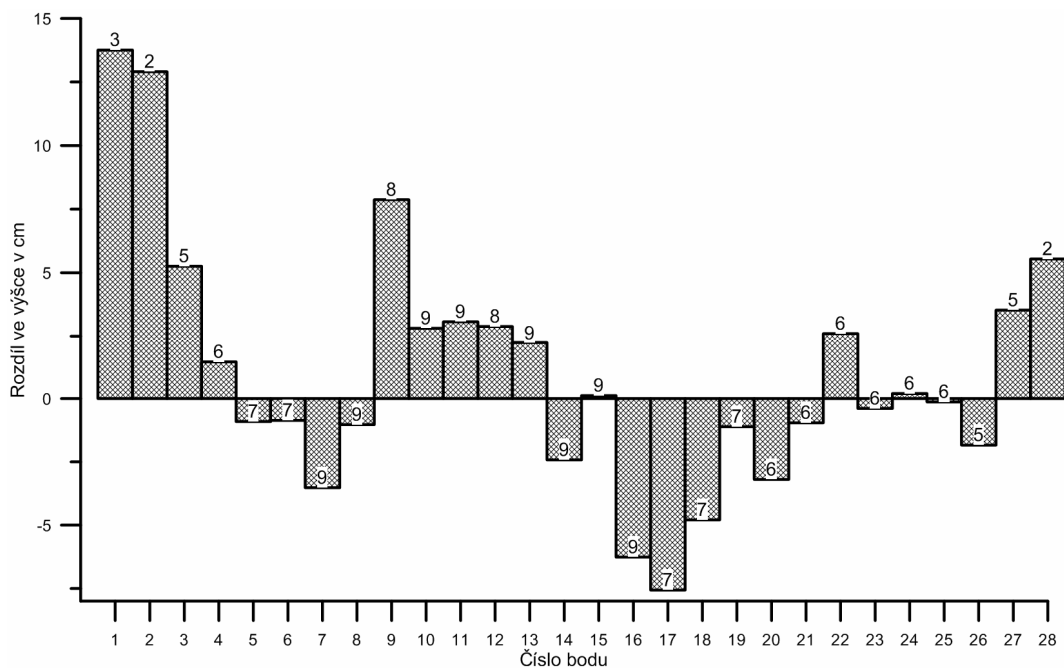
Obr. 8.11 Mračno bodů vizualizované v programu FugroViewer. (autor: J. Miřijovský).

Chyba modelu vytvořených  $Z$  souřadnic byla určena stejně jako v případě stereofotogrammetrické metody podle vzorců č. 29, 30 a 31. Nejdůležitějšími parametry pro hodnocení přesnosti bodů stále zůstala směrodatná odchylka, střední kvadratická chyba a střední chyba modelu. Výsledky všech tří parametrů lze vidět v tabulce 8.5. V tomto případě byly porovnány body vypočítané automatickými postupy s vlčovacími body, které byly zaměřeny geodeticky.

Tab. 8.5 Přesnost automatické extrakce bodů metodou SfM (autor: J. Miřijovský).

Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)	Střední chyba (m)
0,0484	0,0494	0,010

Pro názornější představu byly hodnoty  $dZ$ , tedy rozdíl mezi originální souřadnicí  $Z$  zaměřenou geodeticky a vypočítanou hodnotou téhož bodu, zobrazeny v grafu na obrázku 8.12. Po analýze níže zobrazeného grafu a porovnání s grafem na obrázku 8.2 bylo možné konstatovat, že metoda SfM poskytla výrazně přesnější výsledky než stereofotogrammetrické řešení. Rozdíl v přesnosti byl dán zejména podstatně vyšším počtem snímků stejného území oproti „pouhým“ dvěma snímkům ve stereofotogrammetrickém řešení. Tím byla při výpočtu získána velká nadbytečnost bodů, a tedy i rovnic umožňujících kvalitní řešení a možnost vyloučit z výpočtu chybné body. V grafu na obrázku 8.12 lze také pozorovat vliv počtu snímků na přesnost řešení. Např. body č. 1 a 2, které mají nejvyšší chybu, jsou zobrazeny pouze na dvou, případně na třech snímcích, a to navíc v jejich okrajových částech. To způsobilo chybu určení souřadnice  $Z$  o řád vyšší oproti ostatním bodům.



Obr. 8.12 Rozdíly mezi vlčovacími body a body vyexportovanými automatickými postupy. Číslo bodu nad sloupcem značí počet snímků, na kterém se bod nachází (autor: J. Miřijovský).

Posledním krokem bylo vytvoření ortofoto snímku. Proces probíhal zcela automatickým způsobem. Hodnocení výsledné přesnosti výstupů je uvedeno v kapitole 9.

## 9 PŘESNOST VÝSTUPŮ

Hlavním cílem fotogrammetrie je poskytnout výsledky s velmi vysokou přesností. UAV fotogrammetrie využívá snímky z nízkých výšek, které mají velmi vysokou prostorovou rozlišovací schopnost. Proto se očekává, že přesnost při použití UAV fotogrammetrie bude vyšší než při použití fotogrammetrie konvenční. V kapitole 8 byla hodnocena přesnost tvorby 3D modelu z dat UAV fotogrammetrie. Nicméně přesnost byla nejčastěji hodnocena pouze vůči bodům, které vstupovaly do procesu aerotriangulace. Byly to vlíčovací body, případně body vazací. Pro absolutní stanovení přesnosti musí být vždy k dispozici další sada měření, která bude sloužit jako referenční. Taková metoda kontroly se nazývá křížová kontrola (angl. Cross Validation). V kapitole 9 je hodnocena absolutní přesnost digitálních modelů a výsledných ortogonalizovaných snímků. Jako referenční zdroj dat slouží geodetické měření. Pro hodnocení kvality byla vybrána lokalita v obci Vysoké Pole. Nachází se zde EnviCentrum Pro krajinu a Katedra geoinformatiky je spolupracující organizací. Testovací lokalita je trojúhelníkového tvaru s délkami stran 28 m, 45 m a 60 m. Maximální převýšení je přibližně osm metrů.

### 9.1 Referenční datový zdroj

Referenční datový zdroj musel být velmi přesný. Jedině geodetické měření mohlo splnit požadavky na přesnost pro hodnocení kvality vytvořených digitálních modelů. V rámci geodetického měření bylo zaměřeno 248 bodů. Body byly zaměřeny pomocí geodetické GNSS aparatury. Jako metoda měření byla zvolena RTK metoda s virtuální referenční stanicí a s vektorem dlouhým 5 km. Na základě znalosti tabulky 7.1 byla odvozena teoretická přesnost dat, která je 15 mm v horizontální poloze a 20 mm ve vertikální poloze. Skutečná přesnost zaměřených bodů byla ale vyšší, jak je uvedeno v tabulce 9.1.

Tab. 9.1 Přesnost geodeticky zaměřených bodů (autor: J. Miřijovský).

Počet bodů	Horizontální RMSE (m)	Vertikální RMSE (m)
248	0,0070	0,0111

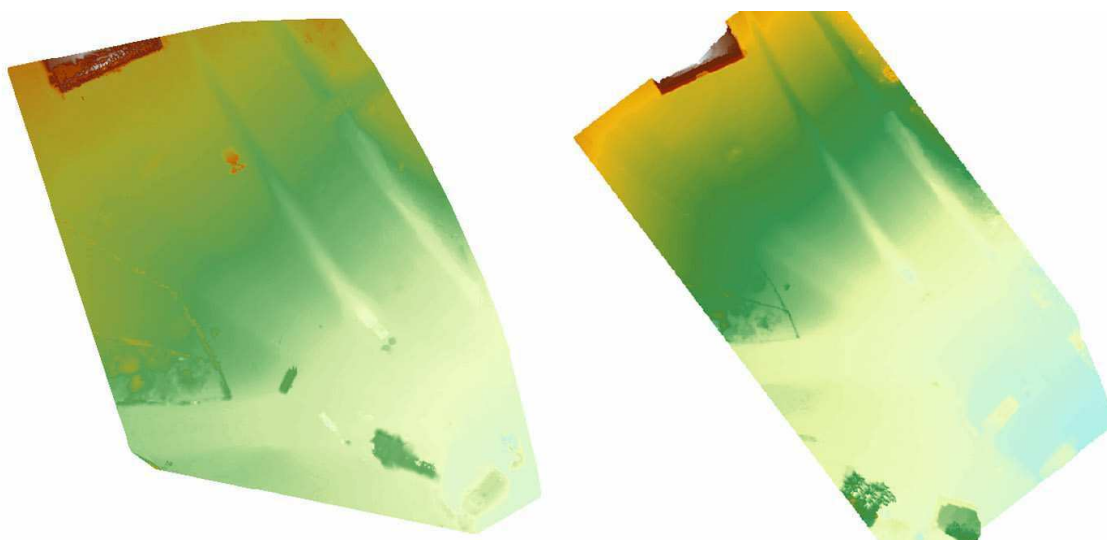
Pro hodnocení přesnosti výstupů byla použita metoda křížové validace. Z důvodu nízké hustoty měřených bodů nebyl z referenčního datového zdroje vytvořen digitální model terénu, ale rastrové modely byly hodnoceny bodově přímo v pixelech, které odpovídaly souřadnici X a Y v referenčním zdroji.

## 9.2 Stereofotogrammetrie a SfM

### 9.2.1 Přesnost digitálních 3D modelů

Pro porovnání absolutní přesnosti obou metod podle nezávislého referenčního zdroje dat, byly vytvořeny dva digitální modely. Model vytvořený stereofotogrammetrickou metodou použil pro své generování stejné parametry, jaké jsou uvedeny v tabulce 8.2. Vytvořený digitální model je svou rozlohou menší než model vytvořený metodou SfM. Důvodem byla použitá metoda stereofotogrammetrie. Ta využívá pro generování mračna bodů z obrazu většinou pouze jednu stereodvojici. V tomto případě stereodvojice nepokrývala dokonale celé testovací území a digitální model nepřekrýval všech 248 zaměřených bodů, ale o 16 méně. Celkově tedy vstoupilo do křížové validace 232 bodů.

V případě modelu vytvořeného metodou SfM vstoupilo do hodnocení všech 248 bodů. Oba modely byly vytvořeny shodnou metodou kriging podle nejlepšího nastavení v tabulce 8.4. Velikost pixelu byla u obou modelů 1 cm. Vytvořené digitální modely povrchu lze vidět na obrázku 9.1.



Obr. 9.1 Vytvořené digitální modely povrchu. Vlevo stereofotogrammetrickou metodou, vpravo metodou SfM (autor: J. Miřijovský).

Vypočítané hodnoty, které charakterizují přesnost modelu v souřadnici Z, jsou uvedeny v tabulce 9.2. Parametry byly vypočítány podle vzorců 28, 29, 30 a 31. Model vyexportovaný metodou SfM byl ve všech parametrech přesnější oproti modelu ze stereofotogrammetrie.

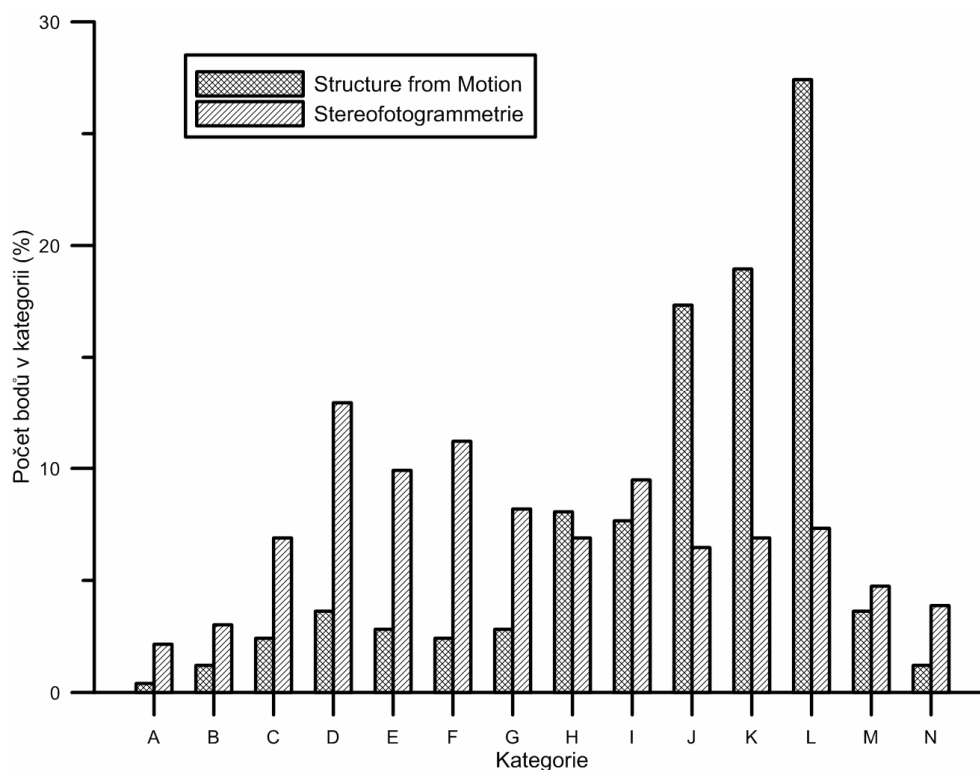
Tab. 9.2 Porovnání přesnosti digitálních modelů vytvořené stereofotogrammetrickou metodou a metodou SfM (autor: J. Miřijovský).

Metoda extrakce bodů	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	-0,063863448	0,109184337	0,12649
SfM	-0,011016239	0,07244522	0,073278

U obou rastrových modelů byly odečteny hodnoty souřadnice Z přesně v místě, kde ležel bod referenční. Obě souřadnice Z (referenční a vypočítaná) od sebe byly odečteny. Tím byly získány absolutní rozdíly ve výšce pro 248, resp. 232 bodů. Dále byl celý soubor hodnot rozdílů od referenčního zdroje dat rozdělen podle četnosti na 14 intervalů. Kategorie jsou uvedeny v tabulce 9.3. Všechny body byly zařazeny do některé z kategorií. Grafické vyhodnocení výsledků je uvedeno na obrázku 9.2. Obecně platí, že čím více bodů je zařazeno v kategoriích oscilujících kolem nuly, tím je model přesnější.

Tab. 9.3 Intervaly pro zařazení jednotlivých bodů (autor: J. Miřijovský).

Kategorie	Interval hodnot chyby (cm)	Kategorie	Interval hodnot chyby (cm)
A	-74,8389 – -33,7565	H	-5,7651 – -4,1833
B	-33,7564 – -23,4076	I	-4,1832 – -2,2595
C	-23,4075 – -15,6998	J	-2,2594 – -0,1785
D	-15,6997 – 11,8075	K	-0,1784 – 2,0378
E	-11,8074 – -9,4946	L	0,20379 – 6,6515
F	-9,4945 – -7,5039	M	6,6516 – 12,9036
G	-7,5038 – -5,7652	N	12,9037 – 26,9456



Obr. 9.2 Četnost bodů zařazených v jednotlivých kategoriích pro stereofotogrammetrickou metodu a metodu SfM (autor: J. Miřijovský).



Při analýze grafu je na první pohled patrné rozdílné rozložení bodů při použití jednotlivých metod. Zatímco v případě metody SfM je nejvíce bodů zařazeno v kategoriích J, K a L, které jsou v intervalech od -2,26 cm do 6,65 cm, v případě stereofotogrammetrické metody jsou nejpočetnější kategorie D, E a F, které se nacházejí v intervalu rozdílů hodnot od cca -15,7 cm do -7,5 cm. Na základě analýzy lze tedy jednoznačně potvrdit, že v případě dostatečného množství kvalitně pořízených fotografií poskytla metoda Structure from Motion kvalitnější digitální model povrchu oproti metodě stereofotogrammetrické.

### 9.2.2 Přesnost ortogonalizovaných snímků

Jedním z hlavních cílů tvorby 3D modelů terénu nebo povrchu bylo jejich následné použití k ortogonalizaci leteckých snímků. Tím se odstranilo zkreslení způsobené nestejnou výškou terénu a centrální projekcí. V této kapitole byla provedena analýza přesnosti souřadnic X a Y u ortogonalizovaných snímků pomocí předchozích dvou digitálních modelů. Prvním výstupem byl ortogonalizovaný snímek z programu LPS, který byl vytvořen pomocí 3D modelu povrchu z téhož programu. Druhým výstupem byl zpracovaný ortogonalizovaný snímek z programu Agisoft PhotoScan, který byl zpracován 3D modelem vytvořeným ve stejnojmenném programu. Oba ortogonalizované snímky byly převzorkovány metodou nejbližšího souseda na hodnotu prostorové rozlišovací schopnosti 1 cm. Porovnání proběhlo nad jednoznačně identifikovatelnými body v terénu a opět byly vypočítány statistické parametry: aritmetický průměr chyby, směrodatná odchylka chyby a střední kvadratická chyba souřadnice X a Y. Ortogonalizovaný snímek vytvořený metodou SfM obsahoval 28 bodů, které vstoupily do hodnocení přesnosti. U výsledného snímku ze stereofotogrammetrie to bylo o tři body méně z důvodu menšího 3D modelu povrchu, a tedy nemožnosti vygenerovat ortogonalizovaný snímek v celé ploše. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 9.4 a 9.5.

Tab. 9.4 Statistické porovnání přesnosti ortogonalizovaných snímků pro souřadnici X (autor: J. Miřijovský).

	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>X</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	-0,0135	0,0201	0,0242
SfM	-0,0037	0,0228	0,0231

Tab. 9.5 Statistické porovnání přesnosti ortogonalizovaných snímků pro souřadnici Y (autor: J. Miřijovský).

	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Y</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	0,0366	0,0207	0,0421
SfM	6,964E-05	0,0329	0,0329

Při podrobném zkoumání statistických výpočtů bylo sice možné nalézt rozdíly v jednotlivých metodách jak pro souřadnici X, tak i pro souřadnici Y, nicméně rozdíly

byly nepatrné a nebylo možné jim přisuzovat příliš velkou váhu. Největší rozdíl mezi metodami nastal v případě použití aritmetického průměru, který mohl být do jisté míry zavádějící, protože se v souboru nachází jak záporné, tak i kladné hodnoty. Pro kontrolu byl spočítán pro obě metody aritmetický průměr z absolutních hodnot statistického souboru a pak byly průměrné hodnoty chyby velmi podobné. Z výše uvedeného vyplývá, že i když byl digitální model povrchu vytvořený metodou SfM jednoznačně přesnější, na přesnost ortogonalizace snímku to v tomto případě nemělo významný vliv. Pak bylo možné volit metodu podle jiných kritérií. Například podle náročnosti zpracování nebo podle vizuálního hodnocení. A právě vizuální hodnocení digitálního modelu povrchu a ortogonalizovaného snímku nemohlo být opomenuto. Přestože z hlediska přesnosti dosahovaly oba dva ortogonalizované snímky podobných výsledků, jak dokazuje obrázek. 9.3, snímek, který byl ortogonalizován digitálním modelem povrchu ze stereofotogrammetrie, je z vizuálního hlediska chybný. Na obrázku je zobrazen výřez snímku, který byl zpracován oběma metodami, a na snímku jsou zobrazeny geodeticky zaměřené body. Zatímco geodeticky zaměřené body jsou na obou snímcích umístěny správně, pravý snímek, který je vytvořen na základě DMP ze stereofotogrammetrie, je z vizuálního hlediska chybný. Chyby ve snímku jsou způsobeny lokálními nepřesnostmi v digitálním modelu povrchu, které se poté projeví i na ortogonalizovaném snímku. Jediným řešením v tomto případě byla manuální úprava digitálního modelu povrchu před tím, než se provedla ortogonalizace.



Obr. 9.3 Vizuální rozdíl vybraného detailu v ortogonalizovaných snímcích z metody SfM (vlevo) a stereofotogrammetrie (vpravo) (autor: J. Miřijovský).

### 9.3 Porovnání s leteckým laserovým skenováním

Laserové skenování je v současné době považováno za jednu z nejpřesnějších a zároveň nejrychlejších metod pro získávání přesného digitálního modelu terénu nebo povrchu. Svědčí o tom i projekt nového mapování výškopisu České republiky, který už probíhá několik let. Vzhledem k oblíbenosti použití laserového skenování bylo velmi zajímavé provést porovnání absolutní přesnosti digitálních modelů získaných UAV fotogrammetrií právě i ve vztahu k tomuto zdroji dat. Je zřejmé, že obě metody si nemohly konkurovat, protože použití obou je zcela odlišné. Nicméně vzájemné srovnání dvou typů dat o výškových poměrech území mohlo přinést zajímavé poznatky o přesnostech obou datových zdrojů.

### 9.3.1 Laserové skenování

Data z laserového skenování pro testovací oblast byla zakoupena Katedrou geoinformatiky, pořizena byla společností GEODIS BRNO, spol. s r.o. Skenování bylo rozděleno podle kladu mapových listů SMO-5 (Státní mapa 1 : 5 000, odvozená). Metadata skenování jsou uvedena v tabulce 9.6.

Tab. 9.6 Metada laserového skenování (autor: J. Miřijovský).

Datum měření	27. 6. 2012	Nosič	Cessna 402
Počet letových řad	5	Průměrná výška letu nad terénem	1 000 m
Nominální příčný překryv řad	35 %	Max. rychlost letu	241 km/h
Úhel záběru	25°	Reálná hustota všech bodů	5,272 b/m <sup>2</sup>
Použitý skener	Leica ALS50II	Reálná hustota bodů terénu	3,229 b/m <sup>2</sup>

Laserová data byla uložena ve formátu LAS 1.2 a byla klasifikována podle členění ASPRS. Pro testování přesnosti v zájmovém území byla použita pouze malá část dat, která byla převedena na 3D shapefile. Ten následně vstupoval do všech výpočtů.

### 9.3.2 Porovnání 3D modelů s laserovým skenováním

I v případě vzájemného porovnání 3D modelů vytvořených metodami UAV fotogrammetrie s body laserového skenování byly využity standardní statistické nástroje. Těmi byly aritmetický průměr, směrodatná odchylka a střední kvadratická chyba souřadnice Z. Z dat laserového skenování vstoupilo do hodnocení celkem 1 364 bodů pro model vytvořený metodou SfM a 1 306 bodů pro model ze stereofotogrammetrie. Před výpočtem byla ověřena absolutní přesnost bodů z laserového skenování podle geodeticky zaměřených bodů. Po vyloučení extrémních hodnot bylo zjištěno, že rozdíl se pohyboval do 5 cm, což může být přisuzováno částečně jak chybě geodetického měření, tak i chybě laserového skenování. Výsledky porovnání dat laserového skenování a modelů z UAV fotogrammetrie jsou zobrazeny v tabulce 9.7.

Tab. 9.7 Statistické porovnání přesnosti 3D modelů z UAV fotogrammetrie s daty z laserového skenování (autor: J. Miřijovský).

	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	-0,0731	0,1280	0,1474
SfM	-0,0167	0,0499	0,0526

Z tabulky je patrné, že stejně jako v případě porovnání 3D modelů povrchu s geodetickým měřením, i zde byl lépe hodnocen model vytvořený metodou SfM. Střední

kvadratická chyba souřadnice Z je téměř třikrát nižší než v případě modelu ze stereofotogrammetrie. Záporná hodnota střední chyby znamená, že stereofotogrammetrická metoda model nadhodnocuje. Od originálního bodu s nižší nadmořskou výškou byla odečtena vyšší nadmořská výška z 3D modelu. Výsledek je pak záporný a nadmořské výšky bodů jsou vyšší než ve skutečnosti. Tento efekt mohla v menší míře způsobit nízká vegetace, která se na některých částech snímků vyskytovala. Při detailní analýze rozmístění bodů v terénu v závislosti na velikosti chyby byly zjištěny následující poznatky:

- Body s nejvyšší hodnotou záporné chyby u metody SfM byly téměř výhradně ve spodní části digitálního modelu. V této části byly k dispozici pro extrakci bodů pouze dva, maximálně tři snímky, proto i přesnost byla v této části nejnižší.
- Body s nejvyšší hodnotou kladné chyby se u metody SfM projevily téměř výhradně podél odvodňovacího příkopu. Protože obě snímkování proběhla s odstupem dvou měsíců, je možné, že měl terén skutečně jiný průběh.
- Většina bodů byla zařazena do intervalu s hodnotou chyby do pěti centimetrů kladně nebo záporně od bodů laserového skenování. Nelze jednoznačně vyvozovat závěry o původu chyby u tak malých hodnot. Chyba mohla být způsobena jak přesností laserového skenování, tak limitní přesností metody SfM v UAV fotogrammetrii. Rozdíl mohl být způsoben také změnou reliéfu v době mezi skenováním a snímkováním.
- V případě 3D modelu vytvořeného metodou stereofotogrammetrie se chyba bodů velmi často pohybovala kolem hodnoty 15 cm. Velké množství bodů tuto hodnotu dokonce přesáhlo.
- Zajímavé je rozložení bodů na snímku podle kladných a záporných hodnot chyby. Všechny body, které měly zápornou hodnotu chyby (model ležel výše než body z laserového skenování), byly umístěny na jedné straně původního snímku. Naopak body, které měly kladnou hodnotu chyby, ležely na straně zcela opačné.

Metody UAV fotogrammetrie poskytly velmi přesné výsledky. Zejména metoda Structure from Motion naprosto splnila požadavky na přesnost, které odpovídaly nebo dokonce převýšily požadavky na přesnost laserového skenování. Na základě hodnot chyb, které byly zjištěny při porovnání výstupů vytvořených metodou SfM a dat z geodetického měření nebo laserového skenování, nebylo možné jednoznačně stanovit, která z metod dosáhla vyšší přesnosti. Všechny tři datové zdroje jsou velmi přesné a zcela vyhovují použití ve fotogrammetrii a geografických informačních systémech. Při použití metody SfM bylo důležité mít dostatečné množství kvalitních snímků pro zpracování a geodeticky zaměřené body. Stereofotogrammetrická metoda dosáhla v automatickém režimu extrakce bodů ze snímků mírně horších výsledků. To bylo dáno použitím pouze dvou snímků. Výhodou stereofotogrammetrické metody byla ale možnost manuálního vyhodnocování v pravém stereo režimu zobrazení scény. Ideální variantou je kombinace obou metod. V prvním kroku automatická extrakce bodů metodou SfM a v druhém kroku manuální kontrola a případná oprava bodů ve stereo zobrazení.

## 10 PŘÍPADOVÉ STUDIE

V kapitole 3 byl sestaven koncept použití UAV technologií v UAV fotogrammetrii. Detailní informace konceptu včetně jeho ověření jsou uvedeny v kapitolách 5 – 9. Byly analyzovány různé přístupy ke sběru a zpracování dat včetně předložení konkrétních řešení a postupů na dílčí úkoly. Podle sestaveného konceptu bylo zpracováno pět případových studií. První tři případové studie jsou vázány na oblast fluviální geomorfologie a další dvě na oblast archeologie. Všech pět případových studií je velmi vhodné pro použití UAV fotogrammetrie.

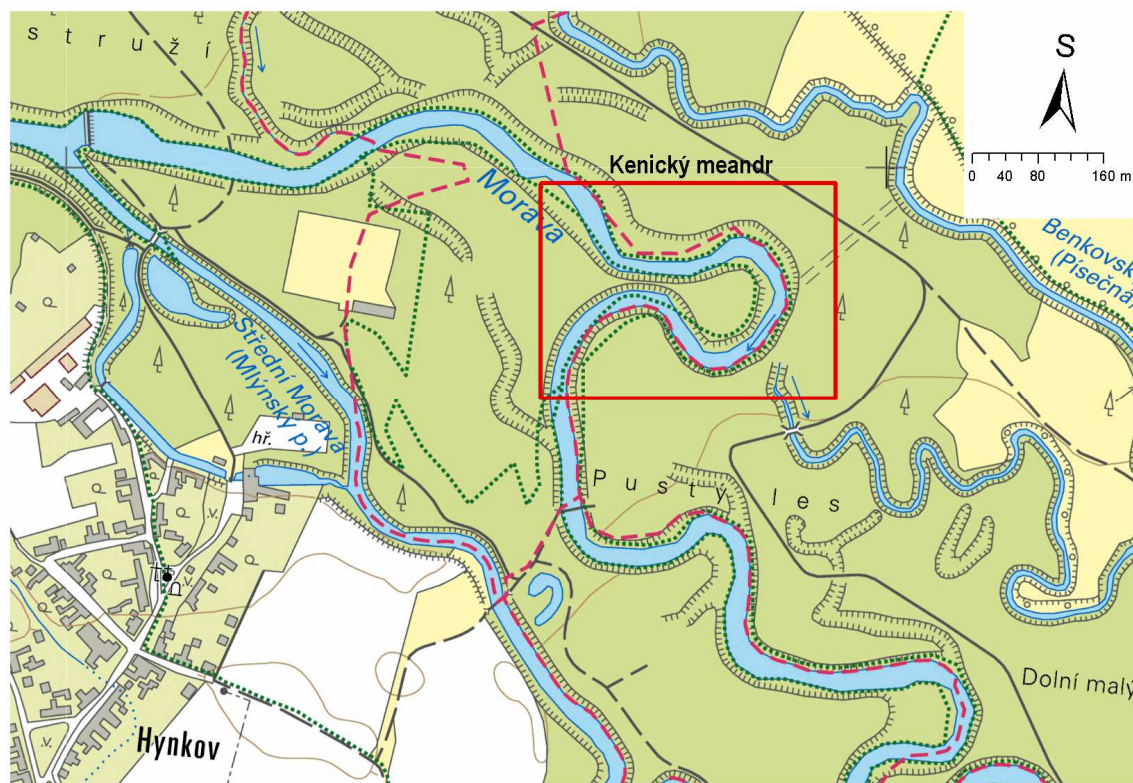
### 10.1 Fluviální geomorfologie

Případové studie z oblasti fluviální geomorfologie jsou součástí výzkumu, který probíhá na řece Moravě v CHKO Litovelské Pomoraví a částečně také na řece Moravě v oblasti obce Strážnice. Případové studie dokazují možnosti využití UAV fotogrammetrie při hodnocení dynamiky vývoje vybraných částí koryta toku v souvislosti s břehovou erozí v CHKO Litovelské Pomoraví. Pro studie byly vybrány tři úseky vodního toku. První a zároveň nejvýznamnější výzkumnou plochou je v současnosti již protržený meandr nacházející se v přírodní rezervaci Kenický. Meandr se protrhl při povodňové události v únoru roku 2012. Pro terénní výzkum byly zvoleny metody geodetické a UAV fotogrammetrie. Další dvě doplňkové výzkumné plochy jsou samostatné břehové nátrže, lokalizované rovněž v oblasti CHKO Litovelské Pomoraví. Na výzkumných plochách probíhá opakované měření pomocí UAV fotogrammetrie s cílem vyhodnotit rychlost břehové eroze v závislosti na povodňových událostech.

#### 10.1.1 Kenický meandr

*Kapitola obsahuje vybrané části článku „Morava river in the Litovelské Pomoraví protected area – spatiotemporal evolution of unique preserved meandering system in Central Europe“. Článek byl v době odevzdání disertační práce připraven na odeslání do časopisu Catena (IF 1.889). Autoři článku: J. Miřijovský, M. Michalková, O. Petyniak, Z. Máčka.*

Kenický meandr se nachází na území CHKO Litovelské Pomoraví v říčním kilometru 250,3. Konkrétně v NPR ramena řeky Moravy, která zahrnuje hlavní i boční koryta Moravy. Předmětem ochrany jsou neregulované koryto řeky a přilehlá břehová společenstva bylin a dřevin, která si zachovala původní druhovou skladbu. Na pravém břehu západně od kenického meandru se nachází také PR Kenický, která zahrnuje tvrdý luh (lužní les s převahou dřevin s tvrdým dřevem; dub, jasan) mezi hlavním korytem Moravy a Mlýnským potokem (někdy označovaným jako Střední Morava nebo Malá voda). Lokalizace kenického meandru je na obrázku 10.1.



Obr. 10.1 Lokalizace kenického meandru (autor: J. Miřijovský, zdroj dat: WMS služba ČÚZK).

### Geomorfologie, pedologie

Meandr a jeho okolí spadá geomorfologicky do podcelku Středomoravská niva, který je součástí Hornomoravského úvalu. Charakter reliéfu je rovinatý, nadmořská výška se pohybuje mezi 220–225 m n. m. s lokálními minimy v zahloubených korytech Moravy se sítí smuh. Nivu Moravy tvoří souvrství štěrkopísků, které je kryté povodňovými sedimenty. Ačkoli mocnost sedimentů je v Hornomoravském úvalu většinou přes 10 m, v oblasti u Hynkova je mocnost pouze 4,5–4,8 m (Demek, 1965). Z charakteru reliéfu také vychází pedologické poměry, kdy se v okolí Hynkova a kenického meandru nachází výhradně glejové fluvizemě.

Morava se v oblasti kenického meandru nachází v přírodě blízkému stavu a je jí nechána možnost přirozeného vývoje a geomorfologického působení. V korytě se nachází velké množství říčního dřeva a štěrkopískových lavic, které podstatně ovlivňují proudění a vytváří podmínky pro další vývoj. Střídání mělčin a tůní je příčinou proměnlivé rychlosti proudění. Řeka kvůli krátkodobé ztrátě energie ukládá plaveniny, naopak při nárůstu energie v rychlejších partiích eroduje břehy a dno. Vzhledem k množství vody, které korytem po většinu roku protéká, je koryto velké a hlavně přehlubené (Máčka, Krejčí, 2006). Má to výhodu ve schopnosti odvádět povodňové průtoky, avšak při velkém zahloubení dochází ke snižování hladiny podzemních vod, což může ohrozit vodní režim okolních lužních lesů.

Proč řeka meandruje, není zatím spolehlivě vysvětleno. Panuje shoda, že ke vzniku meandru je potřeba selektivní břehová eroze způsobující ústup břehů. Hugget (2007)

uvádí že možné příčiny meandrování jsou rozdělení a rozptýlení energie řeky; spirálovitá cirkulace vody v korytě, rovnováha eroze břehů, transportu a ukládání sedimentů. Při laboratorním experimentu se přímý pramínek, po dosažení určitého spádu a průtoku, samovolně změnil na meandrující (Knighton, 1984).

Proudnice se ve vrcholu meandru těsně přimyká k výsepnímu břehu (zde se také podstatně podílí na laterální erozi). Pokud se za sebou nachází několik meandrů, přesouvá se proudnice směrem k dalšímu výsepnímu břehu (na opačné straně než předchozí). Oblast brodu se nachází přibližně uprostřed, v některých případech se stává málo zřetelnou kvůli vyrovnaní dynamiky proudění v celém omočeném profilu. Blíže jeseptních břehů se vyskytuje také podstatně slabší sekundární proudění. V těchto místech má voda velmi malou pohybovou energii, takže není schopna dále transportovat erodované částice, proto zde dochází k vývoji bočních náplavových lavic. Příčná cirkulace vody v meandru probíhá při hladině ve směru k výsepnímu a při dně k jeseptnímu břehu. Tím vzniká cirkulační buňka, která se v oblasti brodu rozděluje na dvě: při dnu působí proudění směrem do středu koryta, při hladině směrem k břehům. Kombinací obou složek vzniká spirálovitý tvar proudění. Meandry řek se následkem erozně akumuláčních procesů vyvíjejí v čase, přičemž migrace meandrů směřuje údolní nivou směrem po proudu.

### **Předchozí výzkum lokality**

Kenický meandr byl v minulosti předmětem zájmu odborníků mnoha oborů – například botaniků, geografů, ekologů, krajinných inženýrů, geomorfologů. První komplexní multidisciplinární práci zabývající se Litovelským Pomoravím řešil kolektiv autorů V. Bednář, V. Panoš a O. Štěrba: „Význam řeky Moravy a přilehlých moravských lesů v Hornomoravském úvalu z hlediska životního prostředí (návrh chráněné krajinné oblasti Litovelské Pomoraví) (1978)“. Kromě výzkumu pracovníků Správy CHKO se na oblast zaměřil v roce 2000 Z. Máčka ve své práci „Studium a hodnocení vývoje říční sítě v Národní přírodní rezervaci Ramena řeky Moravy od Hynkovského jezu po ústí Cholinky“. Režim plavenin a splavenin a říčního dřeva řešil M. Šindlar ve studiích „Analýza transportu splavenin hlavním korytem Moravy a novou aktivní nivou v úseku Střeň–Chomoutov a Problematika plavené dřevní hmoty (splávi) v CHKO Litovelské Pomoraví“ z roku 2003. Přímě kenického meandru se týká zmiňovaná studie autorské dvojice Máčka, Krejčí (2006).

### **Analýza historického vývoje Moravy v okolí kenického meandru**

Anastomóza a meandrování způsobují neustálé změny ve vedení koryt Moravy. Při obchůzce v terénu i při zkoumání podrobných map jsou jasně zřetelná, zčásti zazeměná, slepá ramena, bývalá koryta nebo jejich části. Po ukončení protékání koryta vodního toku začíná ihned proces jeho zazemňování. To se děje z velké části splachováním částic z okolí při rozlivech a větších srážkách, ale také přísunem organických částic z okolní vegetace. Jedním ze způsobů určení historického průběhu koryt je výzkum terénních nerovností v nivě a datování půdních vzorků, které jsou v místě bývalého koryta vždy mladší než sedimenty ve stejné hloubce mimo koryto. Tato metoda může být velmi přesná, ale je finančně a technicky náročná. Jednodušší

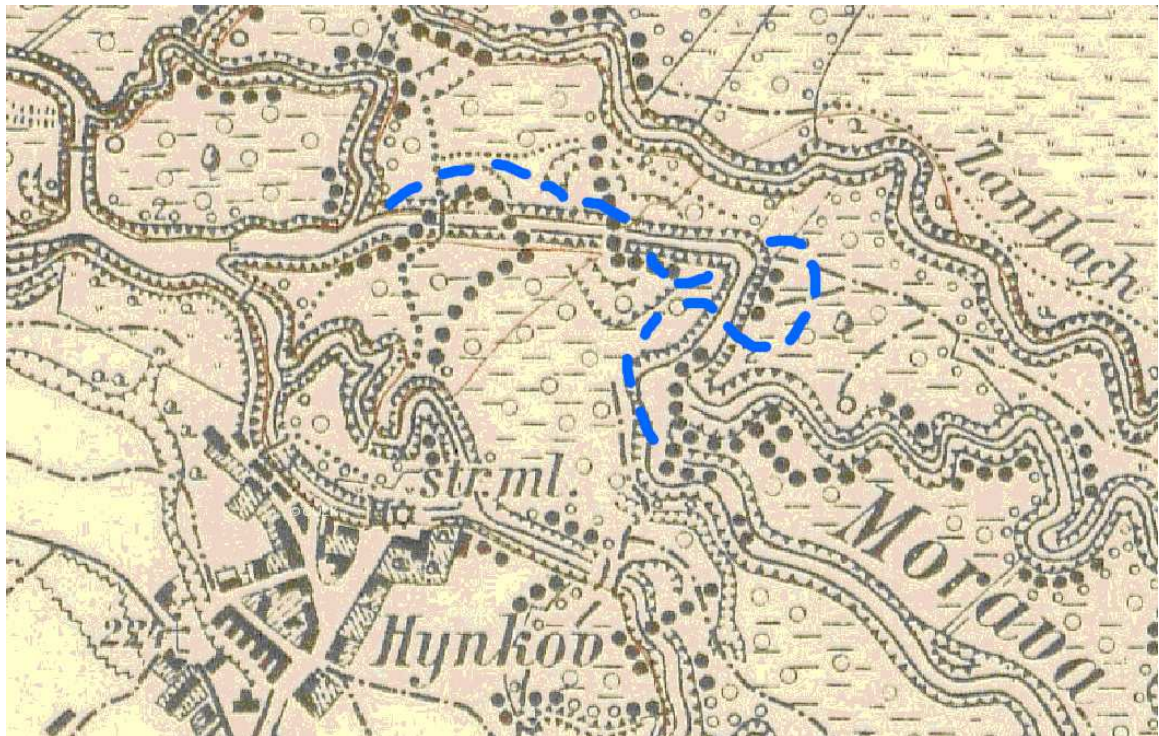
metodou je zkoumání starých map či leteckých snímků. Tuto možnost morfologického výzkumu použila Grešková (2002) na dolním toku Moravy. Tak se dá určit průběh a charakter toku přibližně od 1. pol. 19. století, kdy začínají být vytvářeny mapy ve větších měřítkách a v souřadnicovém systému.

Seznam použitých historických materiálů je uveden v tabulce 10.1. Nejstarší získané podklady sahají až do roku 1716. Prvním uceleným mapovým dílem, které obsahuje matematické a geodetické základy, je však až měřický operát Stablního katastru, jenž byl vytvořen mezi lety 1824–1836. Kenický meandr prošel dynamickým vývojem což dokládá obr. 10.2. Vzhledem ke geometrické kvalitě historických podkladů může být věnován podrobnější popis až leteckým snímkům od roku 1938.

Tab. 10.1 Seznam získaných historických mapových zdrojů pro oblast kenického meandru (autor: O. Petyniak).

Název mapy	Měřítko	Rok	Zdroj
Müllerova mapa Moravy	cca 1 : 180 000	1716	<a href="http://oldmaps.geolab.cz/">http://oldmaps.geolab.cz/</a>
I. vojenské mapování	1 : 28 800	1764-8	<a href="http://oldmaps.geolab.cz/">http://oldmaps.geolab.cz/</a>
II. vojenské mapování	1 : 28 800	1837-8	<a href="http://oldmaps.geolab.cz/">http://oldmaps.geolab.cz/</a>
Stablní katastr	1 : 2 880	1834	<a href="http://archivnimapy.cuzk.cz/">http://archivnimapy.cuzk.cz/</a>
III. vojenské mapování	1 : 25 000	1876	<a href="http://oldmaps.geolab.cz/">http://oldmaps.geolab.cz/</a>
Hospodářská mapa revíru Střeň	1 : 7 200	1894	Máčka, Krejčí (2006)
III. vojenské mapování – reambulace	1 : 25 000	1930	<a href="http://archivnimapy.cuzk.cz/">http://archivnimapy.cuzk.cz/</a>
Letecký snímek 1938	1 : 22 500	1938	Správa CHKO Litovelské Pomoraví
Letecký snímek 1954	1 : 25 000	1954	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Topografická mapa S-1952	1 : 25 000	1960	<a href="http://archivnimapy.cuzk.cz/">http://archivnimapy.cuzk.cz/</a>
Letecký snímek 1971	1 : 40 000	1971	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 1985	1 : 27 500	1985	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Základní vodohosp. mapa	1 : 50 000	1992	<a href="http://heis.vuv.cz/">http://heis.vuv.cz/</a>
Letecký snímek 1994	1 : 26 710	1994	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 2003	1 : 23 000	2003	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)
Letecký snímek 2006	1 : 23 000	2006	KGI (zakoupeno z VGHMÚř)





Obr. 10.2 Výřez z reambulované mapy III. vojenského mapování, rok 1930, modře zakreslena přibližná současná poloha meandru (zdroj: <http://archivnimapy.cuzk.cz/>).

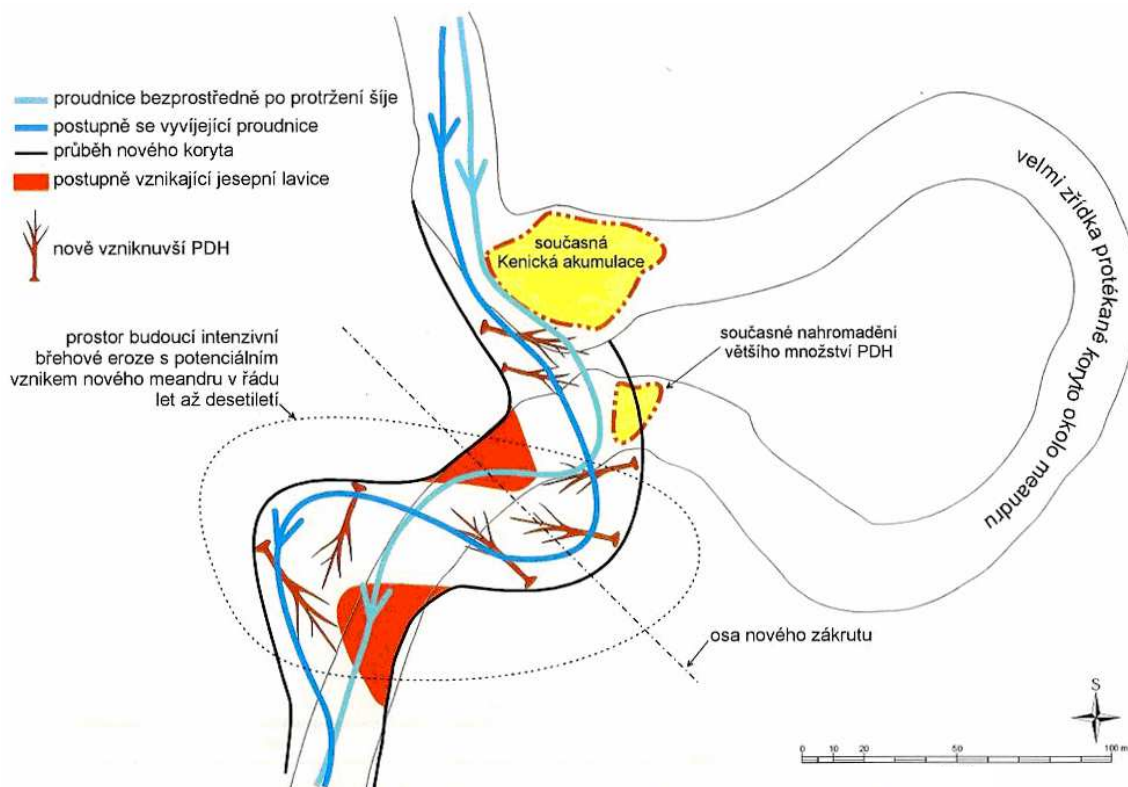
Letecký snímek z roku 1938 ukazuje, k jak velkým změnám zde za několik desetiletí došlo. Na začátku Střední Moravy došlo k částečnému napřimění toku. Oproti předchozím mapovým zdrojům je také v náhonu k hynkovskému mlýnu menší průtok než ve zbytku Střední Moravy. Kenická smuha je již dobře viditelná, hlavně v její jižní části. Došlo také k ukončení stálého protékání Štěpánovské smuhy, která se od té doby velmi pomalu zazemňuje a laterální eroze probíhá jen omezeně. Původní zákrut se již vyvinul v kenický meandr. Šíje byla tehdy široká přibližně 70 m a na pravém břehu meandru se nacházela rozsáhlá jesešní lavice bez vegetace. Meandr se totiž nacházel ve fázi nejdynamičtějších změn.

Na leteckém snímku z roku 1954 je pozorovatelný další vývoj meandru. Šíje se začíná zužovat a meandr se celkově zvětšuje v severojižním i západovýchodním směru. Říční síť v zájmovém území je již ustálená, dochází však k vývoji zákrutů a meandrů. Na přelomu 60. a 70. let 20. stol. došlo k napřimění koryta Střední Moravy v úseku mezi začátkem a koncem mlýnského náhonu.

Na leteckém snímku z roku 1971 je nově vyhloubené narovnané koryto, které však ještě není průtočné a je na Střední Moravu napojeno pouze svým spodním koncem. V této době také pravděpodobně začalo nalepšování průtoků ve Střední Moravě pomocí jezu Hynkov. Na ostatních leteckých snímcích 1985, 1994, 2003 a 2006 je vidět jen postupné zužování šíje meandru a pozvolný vývoj břehů (Petyniak, 2012).

## Budoucí vývoj lokality

Ve studii Máčka, Krejčí (2006) je uveden nástin vývoje po protržení meandru. Autoři vycházejí z předpokladu, že se šíje protrhne v nejužším místě, což se také stalo. Očekávali rychlé rozšíření průchodu v šíji na minimálně 25 m – to se zatím nestalo, šířka je podle zaměření ze začátku května 2012 jen 17,5 m. Jedním z možných důvodů je rychlé opadnutí povodně po protržení, kdy řeka neměla dost energie, aby průchod dostatečně rozšířila. Částečně erozi další části šíje brání stromy a jejich kořenové baly, které napadaly do koryta. Jejich kmeny (nacházející se ve vodě kolmo na proud) částečně napomáhají také k tomu, aby si voda tvořila prostor spíše hloubkovou erozí než laterální. To také způsobuje extrémní hloubku v bývalé šíji. Tomuto zahloubení napomáhá i to, že na spodní straně šíje se nachází tůň a dá se předpokládat, že úroveň dna bude klesat zpětnou erozí. Její dosah závisí na četnosti a síle dalších povodní. Kenická akumulace již začala napomáhat blokování nátoků do meandru, kde je v současnosti mnohem menší proud (voda v některých místech prakticky stojí), a v budoucnu přispěje k poměrně rychlému ukončení jeho protékání. Zatím se ostatní předpoklady z výše uvedené studie potvrzují, ale bude záležet na dalším vývoji a jeho rychlosti. Obrázek 10.3 názorně ukazuje předpoklady z roku 2006. Podle současného vývoje to však vypadá, že případná délka meandrové vlny potencionálních meandrů znázorněných na mapě bude mnohem delší. Je možné, že případné nové meandry zasáhnou až do prostoru spodní části kenické smuhy, která by se stala pravidelně protékaným korytem. To je však hypotéza výhledu několik desítek let do budoucnosti.



Obr. 10.3 Předpokládaný vývoj meandru. Pozn.: PDH = plavená dřevní hmota = říční dřevo (zdroj: Máčka, Krejčí, 2006).

## UAV fotogrammetrie v lokalitě Kenický

Během výzkumu byly až do odevzdání práce provedeny dva lety nad kenickým meandrem. První z nich byl realizován pouze pro získání vizuální informace, přičemž nebylo cílem získat přesné fotogrammetrické snímky. Přibližně měsíc před provedením letu byla celá lokalita zaměřena geodeticky. I přesto nakonec byla snaha získat alespoň přibližně georeferencovaný snímek v souřadnicích pro případné další použití v geografických informačních systémech. Výsledek je na obrázku 10.4. Jedná se o mozaiku pěti snímků, která je georeferencovaná polynomickou transformací třetího řádu podle geodeticky zaměřených bodů. Nicméně celá mozaika není ortogonalizovaná podle digitálního modelu terénu. Proto případné měření na snímku není v tomto případě doporučeno. Přesnost výstupu je v ploše různá a pohybuje se v rozpětí od 20 cm do jednoho a půl metru. Mnohem cennější je v tomto případě vizuální informace, kterou lze získat ze snímku. Téměř s jistotou se jedná o poslední letecký snímek kenického meandru před jeho protržením. V levé části snímku lze pozorovat velmi tenkou meandrovou šíji, která je již narušená předcházejícími povodňovými událostmi.



Obr. 10.4 Poslední snímek kenického meandru před jeho protržením v únoru 2012. Snímek je pořízen v lednu 2012 (autor: J. Miřijovský).

Na základě dvou geodetických měření s podporou UAV technologií byl vytvořen podrobný plán lokality ve dvou obdobích. Na podzim roku 2011 a poté na jaře 2012. Ten zcela jednoznačně dokumentuje změny, které se odehrály během jarního tání. Podrobný plán je v příloze II. Zároveň byly sledovány vodní stavy a průtoky na vodoměrné stanici na jezu Hynkov, která se nachází v blízkosti meandru. K úplnému protržení meandru

došlo v době mezi 25. 2. a 2. 3. 2012. Z tohoto období pochází fotografie na obrázku 10.5. Levý snímek zachycuje meandrovou šíji těsně před protržením v době, kdy už přes její vrchol přetéká nepatrné množství vody. To urychluje proces degradace šíje. Další fotografie je z 2. 3. 2012, na které je vidět již zcela protržený meandr. V tomto období protékaly vodoměrnou stanicí Hynkov maximální průtoky  $130 \text{ m}^3$  za sekundu. Tomu odpovídá vodní stav přibližně 225 cm. Podle povodňových plánů se ještě nejedná ani o druhý stupeň povodňové aktivity. Dle vlastního terénního průzkumu však takovýto vodní stav zcela naplňuje koryto toku a vznikají tzv. korytotvorné průtoky. Jinými slovy průtoky, které zcela naplní koryto toku mají vyšší účinek na břehovou erozi než průtoky, které jsou vyšší a při kterých dochází k vyhlížení vody z koryta. Podrobná geomorfologická analýza kenického meandru však přesahuje rámec této disertační práce.



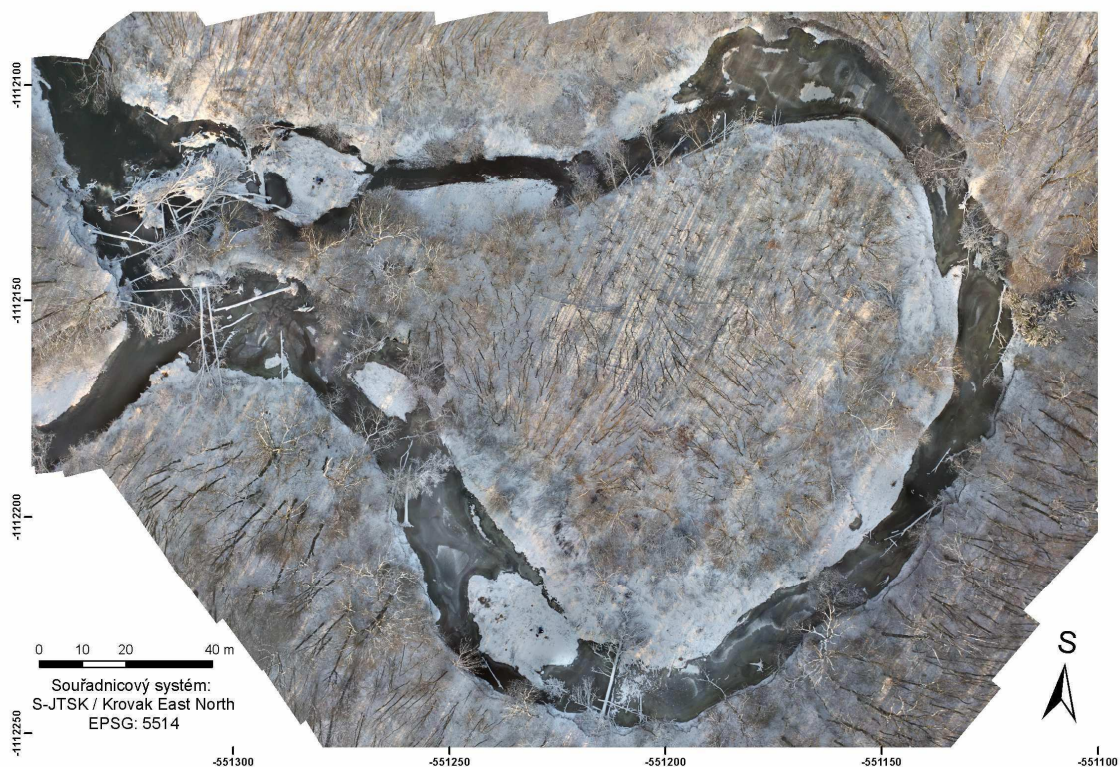
Obr. 10.5 Vlevo šíje kenického meandru 25. 2. 2012 před protržením a vpravo 2. 3. 2012 po protržení (foto: J. Miřijovský).

Druhý let byl proveden na začátku prosince 2012. Cílem letu bylo získat co nejpřesnější a nejlepší fotogrammetrická data. V tomto období nebylo provedeno žádné geodetické měření, a proto výstup musel splňovat přísné požadavky na přesnost. Kenický meandr je území výrazně zarostlé vegetací. Proto muselo být snímkování odloženo až do doby, kdy byly opadané veškeré listy ze stromů. V době snímkování ležela v lokalitě zájmu sněhová pokrývka v celkové tloušťce přibližně tři centimetrů. Sněhová pokrývka zlepšila viditelnost břehové čáry a kmenů, které jsou umístěny ve vodním toku. Parametry snímkování jsou uvedeny v tabulce 10.2.

Během zpracování byl vytvořen digitální model povrchu a pomocí modelu byla provedena ortogonalizace snímků. Porovnáním výstupu s geodetickým měřením z jara roku 2012 bylo zjištěno, že meandr i meandrová šíje se během léta 2012 chovaly velmi stabilně. Během léta nedošlo k žádným zvýšeným průtokům, které by dosahovaly prvního povodňového stupně. Drobné posuny břehů nastaly pouze na obou stranách protržené šíje, což bylo očekáváno. Největší pohyb nastal u dřevní hmoty, která během protržení napadala do koryta. Výstup z prosincového snímkování je na obrázku 10.6 a v příloze III. Další vývoj kenického meandru záleží na četnosti a síle povodňových situací.

Tab. 10.2 Parametry snímkování a zpracování (autor: J. Miřijovský).

	Kenický - 2012
Počet snímků	47
Výška letu (m)	106
GSD (cm)	2,3
Počet vlíčovacích bodů	17
Počet vázacích bodů	94365
Chyba snímkových souřadnic (pix)	0,59
Hustota bodů DMP (bodů/m <sup>2</sup> )	299
Průměrná chyba Z (m)	-6,01E-05
Směrodatná odchylka (m)	0,093
RMSE <sub>Z</sub> (m)	0,093



Obr. 10.6 Kenický meandr po protržení. Snímkování z prosince 2012 (autor: J. Miřijovský).

### 10.1.2 Břehová nátrž – Štěpánov

Druhou výzkumnou plochou je břehová nátrž v blízkosti obce Štěpánov. Jedná se o mohutnou nátrž, která leží v CHKO Litovelské Pomoraví na levém břehu toku a má délku přibližně 60 m. Přilehlé okolí břehové nátrže není zalesněno. Nachází se zde louka,

kteřá je pravidelně sečena. Nepřítomnost lesního porostu bez kořenového systému ještě více urychluje boční erozi.



Obr. 10.7 Lokalita Štěpánov. Vlevo stav v listopadu 2011, vpravo stav v dubnu 2012 při jarním tání (foto: J. Miřijovský).

### UAV snímkování

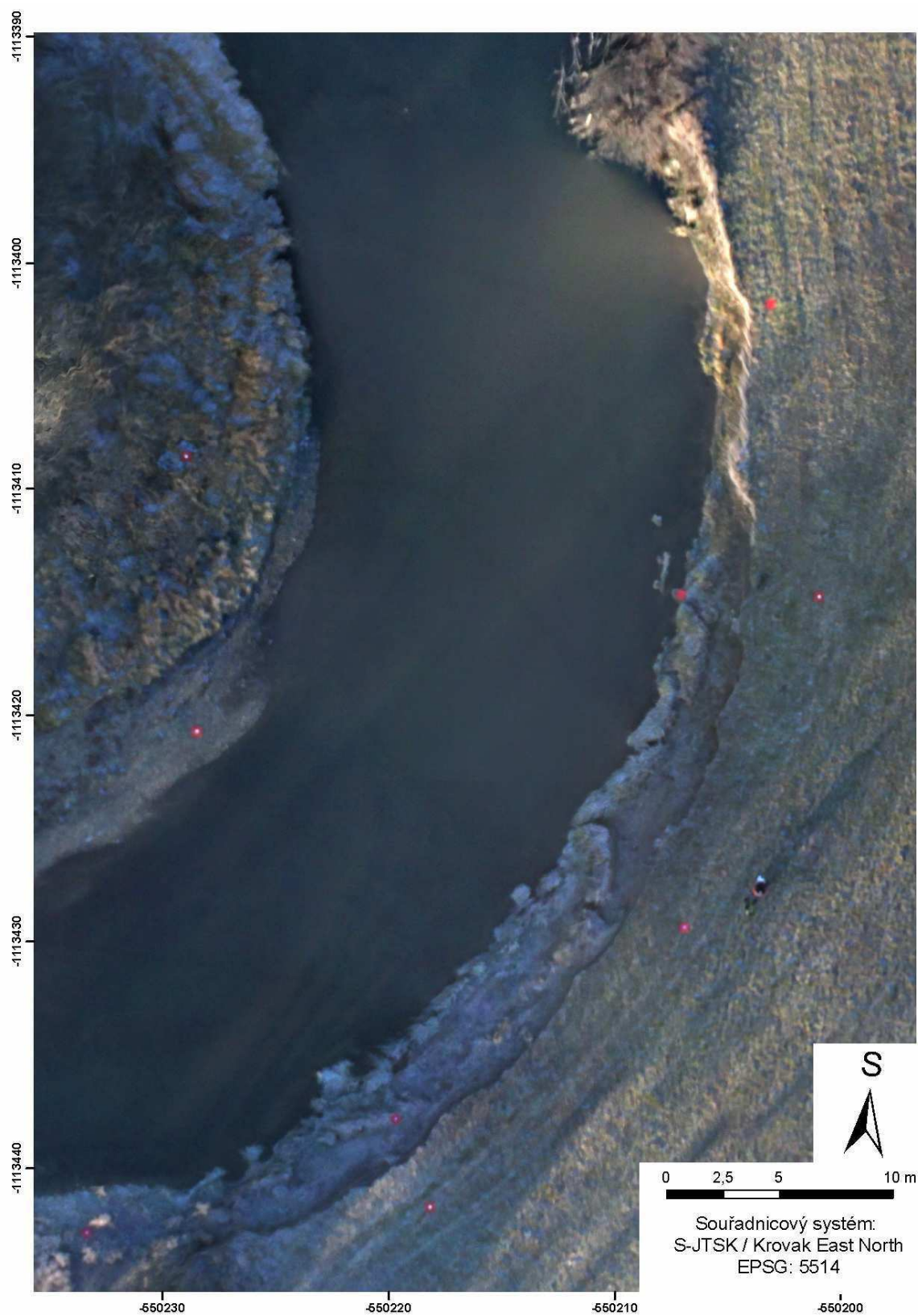
Byly provedeny dva lety nad lokalitou Štěpánov. První let se uskutečnil v prosinci 2011 a druhý během září 2012. Během první etapy snímkování byl využit model padákového kluzáku, během druhé etapy bylo snímkování provedeno pomocí multirotorového systému Hexakopter XL. Obě etapy byly zpracovány metodou Structure from Motion s následnou kontrolou exportovaných bodů ve stereorežimu. Technické parametry pro oba lety a zpracování jsou uvedeny v tabulce 10.3.

Tab. 10.3 Parametry snímkování a zpracování dat (autor: J. Miřijovský).

	Štěpánov - 2011	Štěpánov - 2012
Počet snímků	18	27
Výška letu (m)	97	54
GSD (cm)	2,1	1,2
Počet vlíčovacích bodů	17	28
Počet vázacích bodů	77442	139562
Chyba snímkových souřadnic (pix)	0,55	0,49
Hustota bodů DMP (bodů/m <sup>2</sup> )	1585	6802
Průměrná chyba Z (m)	-1,47E-06	0,0000361
Směrodatná odchylka (m)	0,028	0,022
RMSE <sub>Z</sub> (m)	0,085	0,022

V tabulce si lze všimnout téměř dvojnásobné výšky letu během první etapy snímkování. Ta byla dána výškou okolních stromů, let musel probíhat až nad jejich korunami. U druhé etapy bylo využito schopnosti multirotorového systému držet model

ve visu na jednom místě, a tím mohlo dojít ke snížení výšky letu. To se pozitivně projevilo na téměř dvojnásobném prostorovém rozlišení snímků. Ortogonalizovaná mozaika z prosince 2011 je na obrázku 10.8.



Obr. 10.8 Ortogonalizovaná mozaika štěpánovské nátrže z prosince 2011 (autor: J. Miříjovský).

## Vývoj štěpánovské nátrže

Analýza vývoje štěpánovské nátrže v sobě zahrnuje zjištění posunu břehové hrany nejen v průběhu výzkumu, ale také v blízké minulosti. Protože výzkum na štěpánovské nátrži začal až v roce 2011, nejsou k dispozici dřívější data z UAV snímkování. Pro rozšíření datové řady byly použity letecké snímky zakoupené z VGHMůř Dobruška z roku 2003 a 2006. Prostorová rozlišovací schopnost snímků je několikanásobně horší (přibližně 50 cm na pixel), ale pro identifikaci břehové čáry jsou i tyto datové zdroje akceptovatelné. Druhým úkolem bylo přibližně stanovit množství zeminy, která byla odplavena při vysokých vodních stavech. To je možné provést pouze v období mezi lety 2011 a 2012, protože pro dřívější období není k dispozici přesný digitální model povrchu získaný z UAV snímkování.

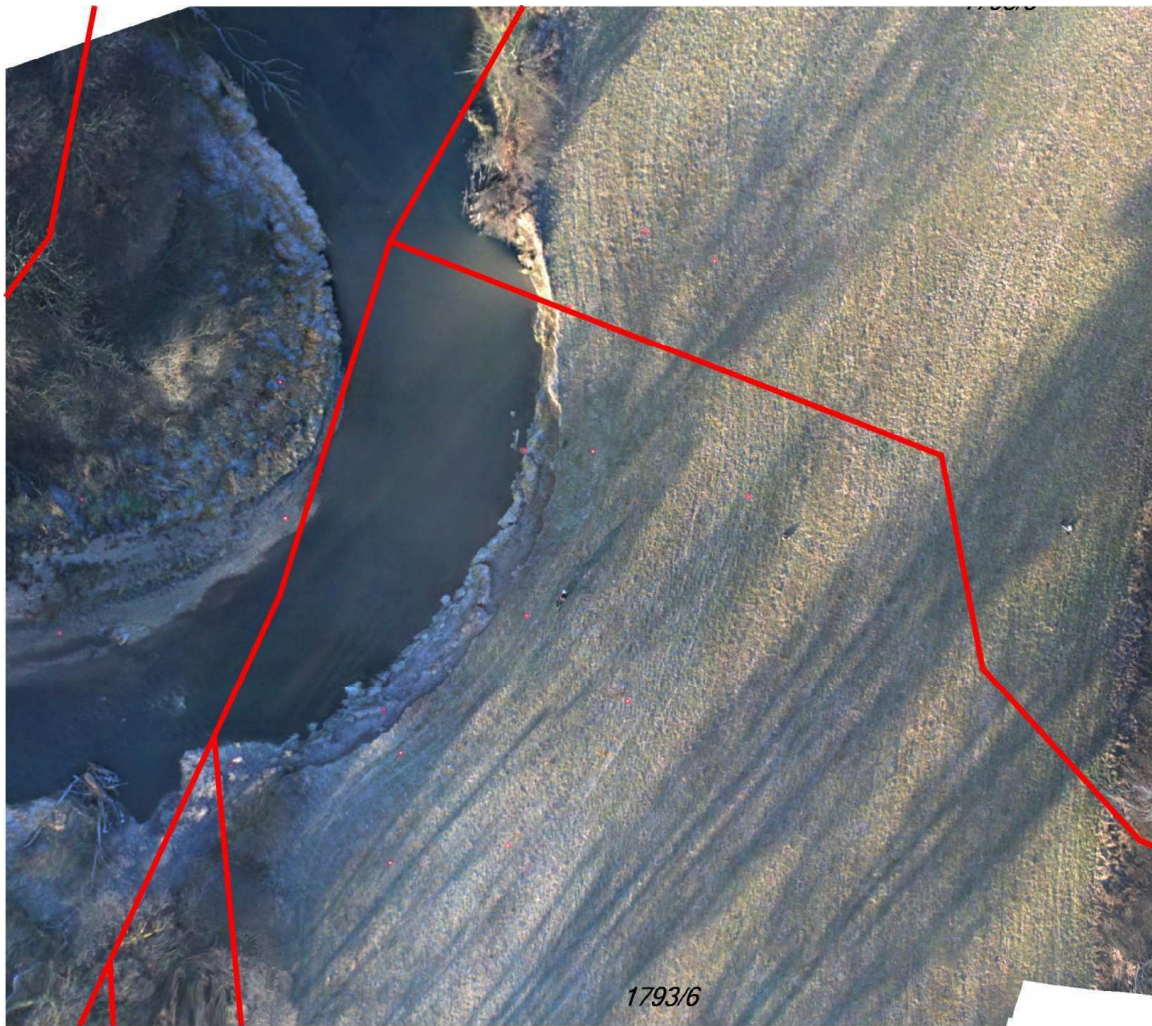
Aby mohly být datové zdroje mezi sebou porovnány, musely být na snímcích z roku 2003 a 2006 provedeny geometrické korekce. Pro transformaci do zvoleného souřadnicového systému bylo využito nejpřesnější možnosti geometrických korekcí, tedy byly zadány přesně prvky vnější orientace společně s nadefinováním prvků vnitřní orientace pro kameru, kterou probíhalo snímkování. Prvky vnější a vnitřní orientace byly získány z VGHMůř Dobruška. Vzhledem k tomu, že pro roky 2003 a 2006 není k dispozici digitální model povrchu ani terénu, oba snímky byly ortogonalizovány podle konstantní výšky 220 m, která je platná pro zájmové území. V tabulce 10.4 jsou uvedeny hodnoty minimálního a maximálního posunu břehové nátrže mezi jednotlivými lety. Rovněž byl proveden výpočet plošného úbytku lokality.

Tab. 10.4 Posun břehové hrany mezi lety 2003 až 2012 (autor: J. Miřijovský).

Pozorovací období	Minimální posun břehové hrany (m)	Maximální posun břehové hrany (m)	Úbytek plochy (m <sup>2</sup> )
2003 - 2006	0,5	3,2	93,3
2006 - 2011	1,5	4,4	173,1
2011 - 2012	0	2,8	57,2

Obrázek 10.10 graficky ukazuje posun břehové hrany štěpánovské nátrže. Údaje z tabulky i z obrázku dokazují významný vliv břehové eroze v CHKO Litovelské Pomoraví na přilehlé soukromé pozemky. V případě Štěpánova se jedná o pozemek, jehož majitelem je Česká republika, a příslušnost hospodařit s majetkem státu má Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky. Dopady břehové eroze na skutečně využitelnou výměru pozemku jsou velmi významné. Obrázek 10.9 ukazuje právně platný stav přilehlého pozemku (červená čára), čímž je záznam v Katastru nemovitostí České republiky. Parcela je zobrazena na podkladu snímkování z roku 2011. Z obrázku je zřejmé, že posun břehové hrany toku způsobil, že skutečně využitelná výměra pozemku se během několika desetiletí zcela změnila. Vzniklou situaci může vyřešit pouze pozemková úprava, v rámci které by došlo k přeměření hranic pozemků a kompenzaci výměr. Je otázkou, zda to má v území, které je morfológicky velmi aktivní, smysl.



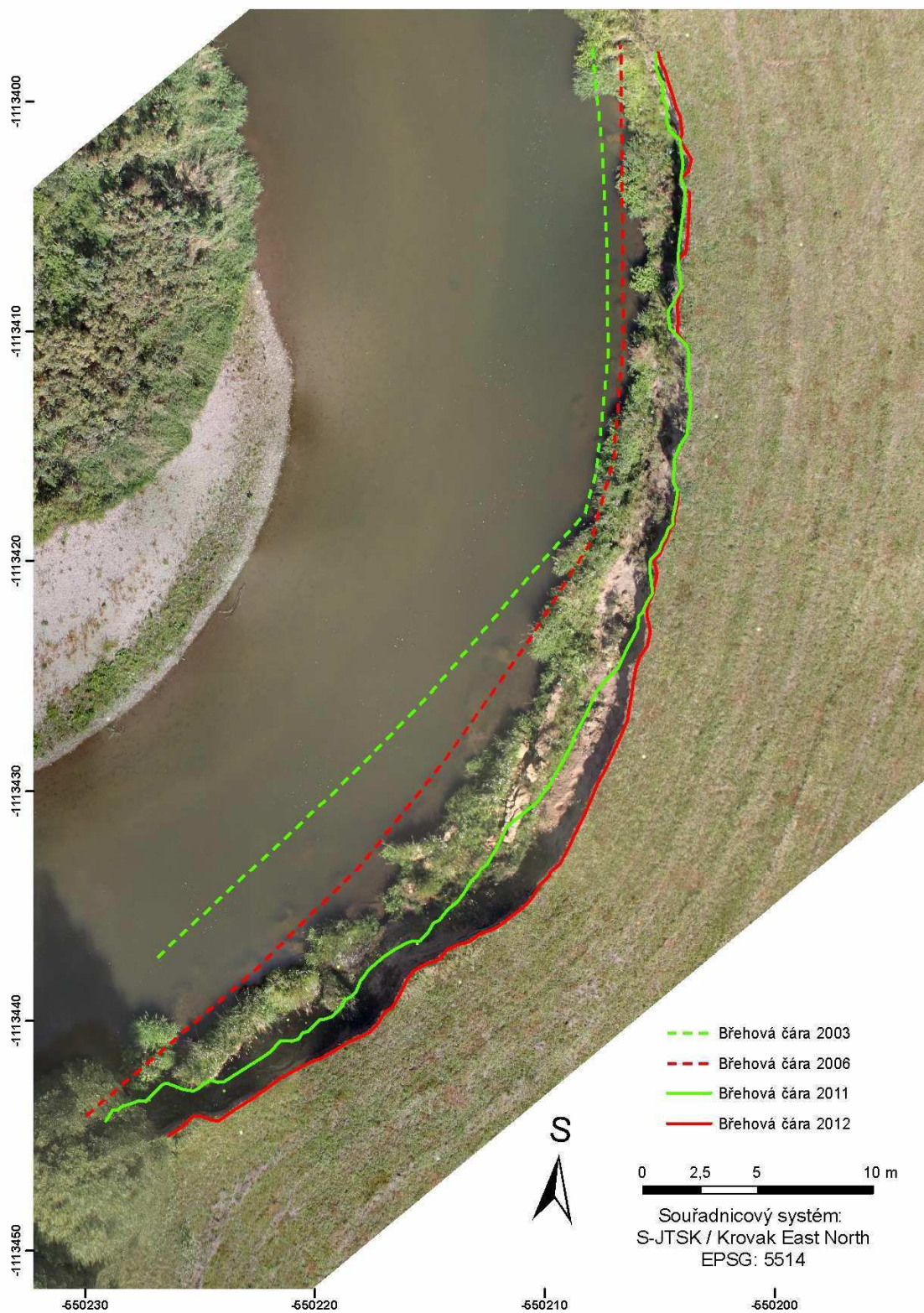


Obr. 10.9 Právně platný stav z Katastru nemovitostí (červená čára) versus skutečný stav (snímek z roku 2011) (autor: J. Miřijovský, zdroj dat: vlastní měření, WMS služba ČÚZK).

Druhou analýzou, která byla provedena nad daty získanými z UAV snímkování, je vyhodnocení objemu materiálu, který byl odplaven mezi prvním a druhým snímkováním. Výpočty byly provedeny na vytvořených 3D modelech povrchu. Byl vypočítán objem hmoty nad srovnávací rovinou u modelu z roku 2011 a poté u modelu z roku 2012. Nejdůležitějším parametrem pro výpočet bylo vhodně zvolit výšku srovnávací roviny. Ta byla stanovena tak, aby nemohlo dojít k ovlivnění vodním tokem. Srovnávací rovina musela tedy procházet výše, než byla aktuální výška vodní hladiny. V obou případech se výška hladiny pohybovala okolo hodnoty 217 m n. m. Jako srovnávací rovina byla zvolena hodnota 217,7 m n. m. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 10.5.

Tab. 10.5 Analýza množství odplaveného materiálu (autor: J. Miřijovský).

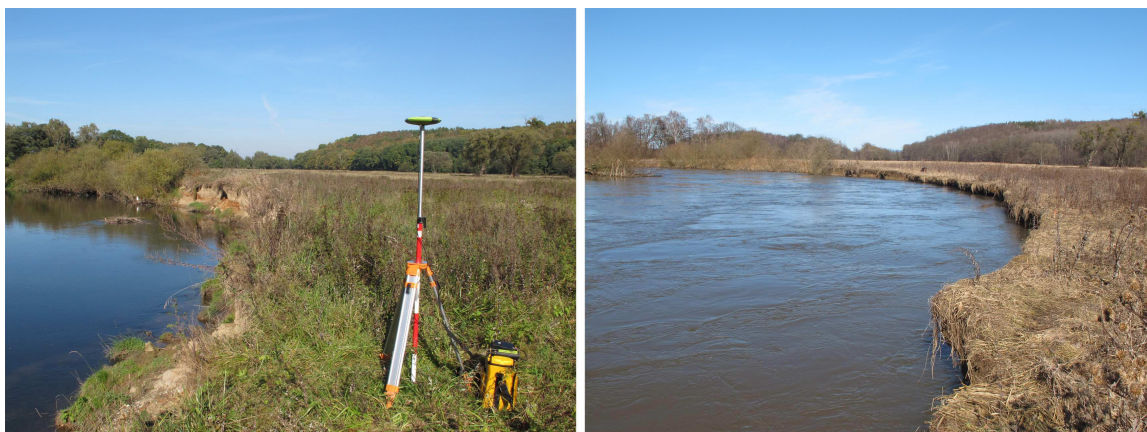
Objem hmoty nad srovnávací rovinou v roce 2011 (m <sup>3</sup> )	Objem hmoty nad srovnávací rovinou v roce 2012 (m <sup>3</sup> )	Úbytek objemu (m <sup>3</sup> )
426,06	272,26	153,8



Obr. 10.10 Grafické zobrazení posunu břehové čáry mezi lety 2003 až 2012 (autor: J. Miřijovský).

### 10.1.3 Břehová nátrž – Moravičany

Třetí výzkumnou plochou je břehová nátrž v blízkosti obce Moravičany. Jedná se o břehovou nátrž, která leží stejně jako štěpánovská nátrž na levém břehu toku a má délku přibližně 65 m. Levý břeh není zalesněn a nachází se zde udržovaná louka v soukromém vlastnictví. Podél pravého břehu se nachází liniová vegetace v podobě vzrostlých stromů přibližně 25 m široká. Za ní je opět trvalý travní porost v soukromém vlastnictví.



Obr. 10.11 Břehová nátrž v Moravičanech. Vlevo měření stanoviska, vpravo břehová nátrž v době jarního tání. Moravou protékají tzv. korytotvorné průtoky (foto: J. Miřijovský).

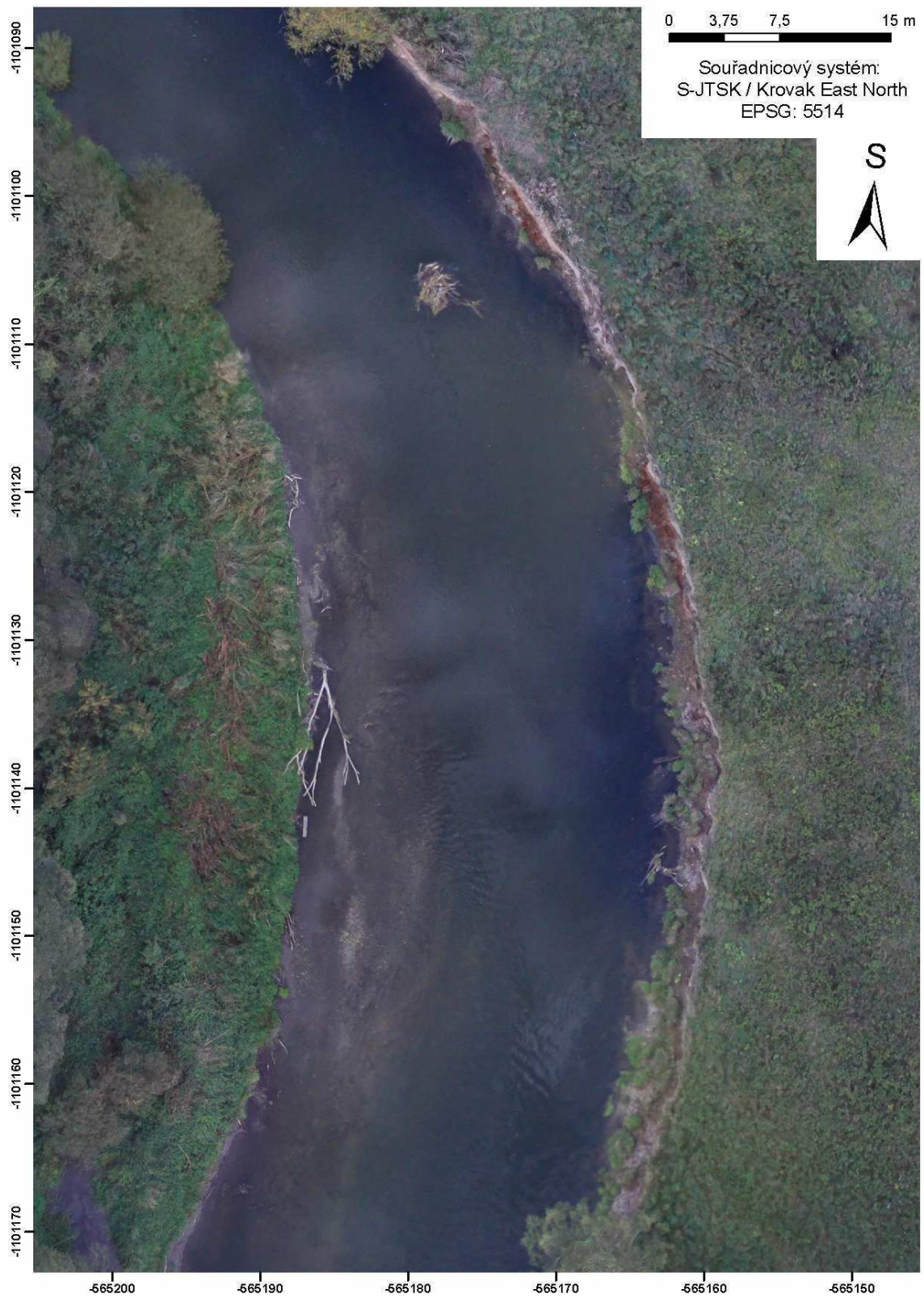
#### UAV snímkování

Stejně jako v případě štěpánovské nátrže i zde byly provedeny dva lety nad lokalitou. První let se uskutečnil v říjnu roku 2011 a druhý v květnu 2012. Během první etapy snímkování byl využit model padákového kluzáku, během druhé etapy bylo snímkování provedeno pomocí multirotorového systému Hexakopter XL. Data z obou letů byla zpracována metodou Structure from Motion s následnou kontrolou exportovaných bodů ve stereorežimu. Zaměření vřícovacích bodů prvního letu bylo provedeno elektronickým teodolitem metodou nitkové tachymetrie, která má však nižší přesnost. Přesnost je dána zejména vzdáleností, na kterou se používá. Cílí se na klasickou nivelační lať a manuálně se odečítají hodnoty z lať pro určení vzdálenosti. S rostoucí vzdáleností měřiče od lať klesá přesnost. Průměrná přesnost geodeticky zaměřených bodů je asi 10 cm. V době měření nebylo možné použít jinou metodu z důvodu chybějícího přístrojového vybavení. Protože měření probíhalo v souřadnicovém systému S-JTSK, byly nejprve vytyčeny dva body GPS aparaturou Topcon Legacy E s jednofrekvenční anténou LegAnt. Jako metoda měření byla zvolena statická metoda. Během druhého letu byly body zaměřeny přístrojem HiPer II metodou RTK, kde se přesnost v horizontální a vertikální poloze pohybuje kolem jednoho až dvou centimetrů. Technické parametry pro oba lety a zpracování jsou uvedeny v tabulce 10.6.

Tab. 10.6 Parametry snímkování a zpracování dat (autor: J. Miřijovský).

	Moravičany - 2011	Moravičany - 2012
Počet snímků	17	21
Výška letu (m)	137,6	98
GSD (cm)	2,9	2,2
Počet vlíčovacích bodů	9	17
Počet vázacích bodů	73763	84622
Chyba snímkových souřadnic (pix)	0,61	0,54
Hustota bodů DMP (bodů/m <sup>2</sup> )	226	1493
Průměrná chyba Z (m)	-0,0327	3,43E-05
Směrodatná odchylka (m)	0,255	0,033
RMSE <sub>Z</sub> (m)	0,25	0,032

Z tabulky je na první pohled patrný velký rozdíl v přesnosti mezi modely. Model z roku 2011 je kvalitativně mnohem horší. Je to dáno zejména již zmiňovanou nižší přesností zaměření vlíčovacích bodů a také menším množstvím vlíčovacích bodů. Během měření navíc došlo k situaci, že v době mezi snímkováním a zaměřením terčů došlo u pěti z nich k posunu z důvodu silného větru. Posunutá vlíčovací body byly nepoužitelné pro výpočet prvků vnější orientace. Aby nedošlo ke znehodnocení celého snímkování, bylo vybráno jiných pět bodů, které byly dostatečně viditelné na snímcích, a metodou nitkové tachymetrie byly určeny jejich souřadnice. Nižší přesnost použité metody s nižší přesností identifikace vlíčovacího bodu na snímku způsobila celkově horší parametry vygenerovaných výstupů. To lze pozorovat jak na směrodatné odchylce, tak i na RMSE chybě. Horší přesnost negativně ovlivnila také počet bodů na metr čtvereční. Zatímco u snímkování z roku 2012, kde jsou přesnosti naprosto v pořádku, je počet bodů na m<sup>2</sup> 1493, u snímkování z roku 2011 je jich „pouze“ 226. I tak se stále jedná o více než dostačující počet pro vyhodnocení. Celkově měření není natolik chybné, aby muselo být vyřazeno z výzkumu. Je tedy možné provést stejné analýzy jako u štěpánovské nátrže.



Obr. 10.12 Ortogonalizovaná mozaika nátrže v Moravičanech z roku 2011 (autor: J. Miřijovský).

### Vývoj nátrže v Moravičanech

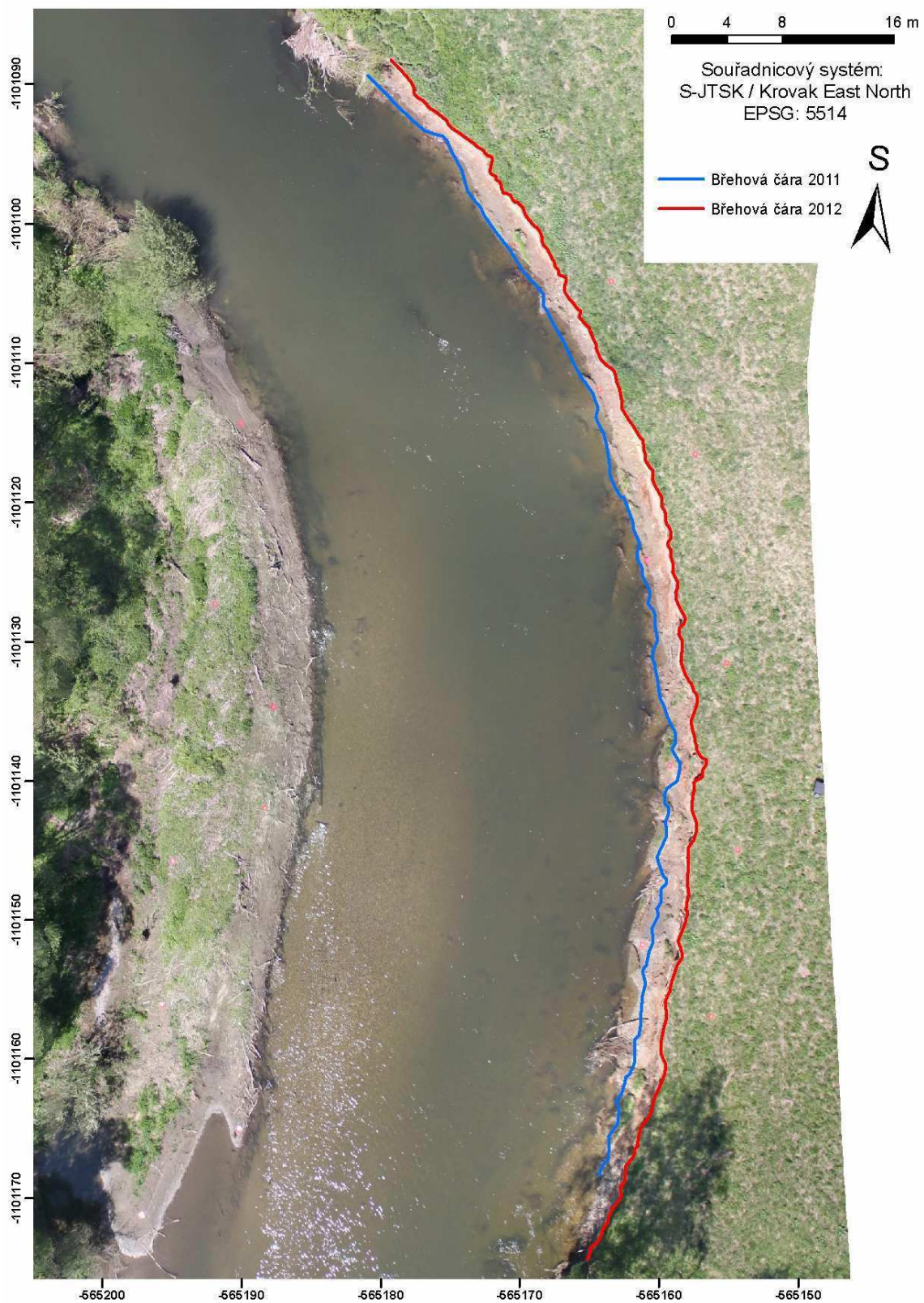
Vyhodnocení vývoje stejně jako postup tvorby analýz je shodný jako u štěpánovské nátrže. Pro oblast nátrže v Moravičanech však nebyly zakoupeny letecké snímky z VGHMúř Dobruška, proto analýza posunu břehové čáry i objemová analýza byla provedena pouze mezi lety 2011 a 2012.

Tab. 10.7 Posun břehové hrany mezi lety 2011 a 2012 (autor: J. Miřijovský).

Pozorovací období	Minimální posun břehové hrany (m)	Maximální posun břehové hrany (m)	Úbytek plochy (m <sup>2</sup> )
2011 - 2012	0,9	3	181,5

Tab. 10.8 Analýza množství odplaveného materiálu (autor: J. Miřijovský).

Objem hmoty nad srovnávací rovinou v roce 2011 (m <sup>3</sup> )	Objem hmoty nad srovnávací rovinou v roce 2012 (m <sup>3</sup> )	Úbytek objemu (m <sup>3</sup> )
415,41	131,56	283,85



Obr. 10.13 Ortogonalizovaná mozaika nátrže v Moravičanech z roku 2012 (autor: J. Miřijovský).

## 10.2 Archeologie

Archeologie je další možnou aplikační oblastí, ve které jsou UAV technologie a UAV fotogrammetrie dobře využitelné a vítané. Naprosto splňuje požadavky pro UAV snímkování a SFAP. U archeologických lokalit se téměř vždy jedná o plošně nevelké území, které je potřeba detailně zmapovat. Vzhledem k potřebě archeologů zaznamenávat i objekty o velikosti několika centimetrů (např. jednotlivé kameny) je konvenční letecká fotogrammetrie méně využitelná. UAV technologie umožňují výrazně urychlit celý archeologický výzkum, protože archeologům odpadá pracné zaměřování a překreslování plošných objektů na milimetrový papír. Zároveň získávají letecký pohled na archeologickou lokalitu. To je neocenitelné zejména u záchranných výzkumů, u kterých většinou dojde po ukončení k odtěžení objektů z důvodu další výstavby.

V následujících kapitolách jsou představeny výsledky spolupráce na dvou záchranných archeologických výzkumech. Výsledkem je ortogonalizovaná bežešvá mozaika archeologické lokality, která slouží jako podklad pro archeology k dalšímu výzkumu.

### 10.2.1 Přeložka silnice I/44

V měsících červnu až prosinci 2011 při stavbě přeložky silnice I/44 v úseku mezi obcemi Vlachov a Rájec (okr. Šumperk) prováděla ARCHAIA Olomouc o.p.s. rozsáhlejší záchranný archeologický výzkum. Plošný archeologický odkryv byl uskutečněn na dvou pozitivních lokalitách vytipovaných zjišťovacím sondážním výzkumem v roce 2009 – na úsecích 5,0–5,75 km (katastr Vlachova) a 6,9–7,25 km (katastr Zvole).

Na prvním úseku u obce Vlachov byla prozkoumána okrajová část laténského sídliště (3.–1. stol. př. Kr.) reprezentovaná větším zahloubeným objektem s ohništěm uprostřed dna, 14 mělkými sídlištními jámami, mocnou kulturní vrstvou, početnými fragmenty na kruhu točené keramiky a několika zlomky železných předmětů. Vzhledem k malému počtu archeologických nálezů v této části lokality nebylo provedeno UAV snímkování.

Druhý úsek se nachází na západním okraji obce Zvole, v polní trati za bývalou cihelnou. Zde na ploše cca 1,9 ha bylo zjištěno rozsáhlé pravěké sídliště čítající 630 zahloubených objektů, převážně datovaných do období popelnicových polí (lužická a slezská kultura, 1200–800 př. Kr.) V rámci sídliště byla zachycena 1 nadzemní kúlová konstrukce, 2 pece, 11 hliníků, 275 zásobních a odpadních jam a 340 jednotlivých kúlových jamek. Jde pravděpodobně o střed osady, jejíž okraje byly zachyceny jen na severní a jižní straně. Bylo zde vyzvednuto množství keramického materiálu, bronzové jehlice nebo zlomek nože, hliněná závaží, přesleny, kamenné zrnětky a brousky, štípaná kamenná industrie (čepelky) nebo fragmenty mazanice.

V tomto případě se jednalo o plošně rozsáhlejší lokalitu než v předchozím případě. Rovněž množství nalezených objektů bylo mnohonásobně větší než u lokality na katastru obce Vlachov. Bylo přistoupeno k leteckému snímkování pomocí paraglidového modelu PIXY.



## UAV snímkování

Byly provedeny dva lety nad lokalitou v různém stupni vykopávek podle požadavků archeologů. První let byl proveden v září roku 2011 a druhý v listopadu 2011. Letové parametry jsou uvedeny v tabulce 10.9. Zpracování dat bylo provedeno metodou Structure from Motion s fyzickou kontrolou dat ve stereo režimu. Na obrázku 10.14 je 3D model v perspektivním zobrazení s překryvnou vrstvou ortofotomozaiky. Detail ortogonalizované bezešvé mozaiky je na obrázku 10.15. Komplettní ortogonalizované bezešvé mozaiky z období září a listopad jsou uvedeny v přílohách IV a V.

Tab. 10.9 Parametry snímkování a zpracování dat (autor: J. Miřijovský).

	Zvole - září 2011	Zvole - listopad 2011
Počet snímků	21	38
Výška letu (m)	65	106
GSD (cm)	1,6	2,5
Počet vlíčovacích bodů	6	27
Počet vázacích bodů	125152	197289
Chyba snímkových souřadnic (pix)	0,53	0,83
Hustota bodů DMP (bodů/m <sup>2</sup> )	197	438
Průměrná chyba Z (m)	-0,002	0,001
Směrodatná odchylka (m)	0,034	0,024
RMSE <sub>Z</sub> (m)	0,034	0,024



Obr. 10.14 Perspektivní zobrazení 3D modelu archeologické lokality (autor: J. Miřijovský).



Obr. 10.15 Detailní výřez snímku archeologické lokality ukazuje jednu z výhod UAV snímkování. Prostorová rozlišovací schopnost snímku je 1,5 cm (autor: J. Miřijovský).

### 10.2.2 Hrad Tepenec

Lokalita leží na jednom z výběžků Nížkého Jeseníku, na kopci zvaném Tepenec (v nadmořské výšce 480–519 m n. m.), který se sklání jihozápadním směrem k údolí, kterým protéká Bělkovický potok. Tepenec se nachází poblíž obce Jívová, přibližně 15 km severovýchodně od Olomouce. Na kopci Tepenec se nachází hradisko kultury slezskoplatěnických popelnicových polí z pozdní doby bronzové a doby halštatské a zřícenina středověkého hradu.

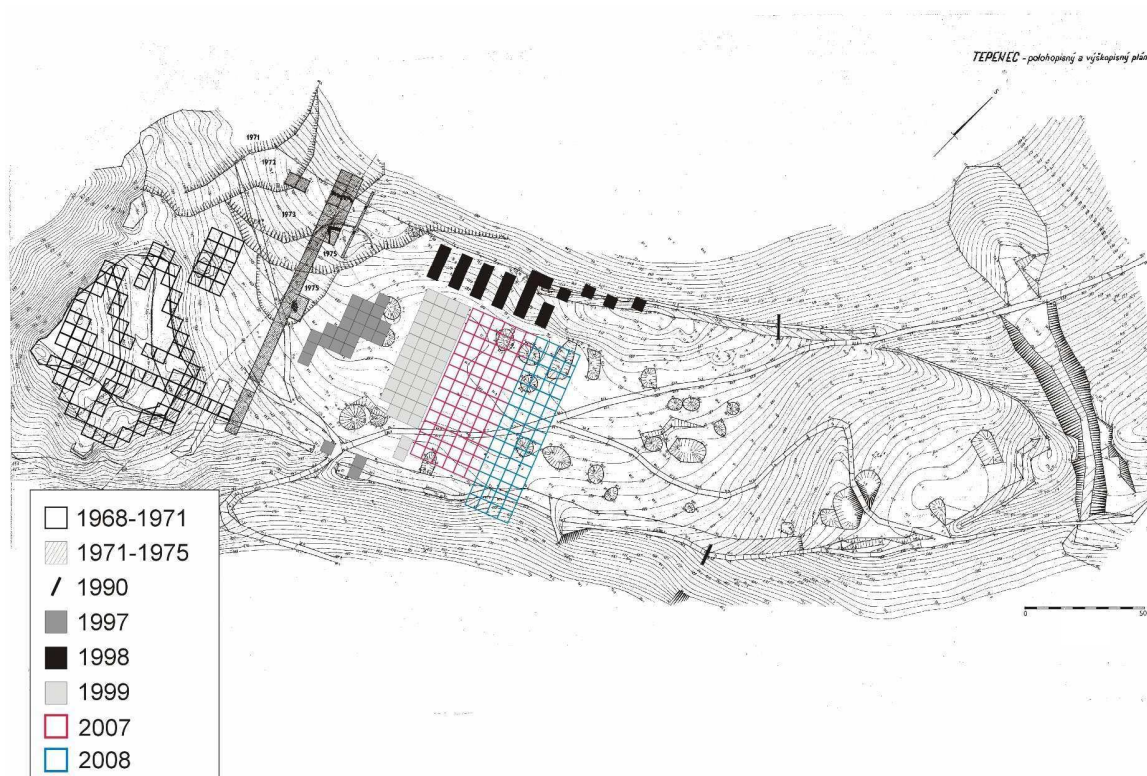
Hrad založil v roce 1340 císař Karel IV., tehdy ještě jako markrabě moravský. Hrad Tepenec byl vybudován pro lepší ochranu a kontrolu obchodní cesty zvané Jívovská, která vedla z Moravy do Slezska. Na nově postaveném hradě pojmenovaném Twingenberg sídlil nejen purkrabí a popravce, ale vznikla zde i tržnice a celnice, kde se vybíralo mýtné na Jívovské cestě. Hrad neměl dlouhého trvání. Poprvé byl dobyt v roce 1381 za války moravských markrabat, bratrů Jošta a Prokopa. Podruhé byl Tepenec dobyt kolem roku 1400 vojskem budoucího českého krále Zikmunda. Hrad nebyl již nikdy znovu obnoven.

Tepenec je lokalita dlouhodobě archeologicky zkoumaná, výzkumy zde probíhají s přestávkami již od 60. let. 20. století v souvislosti s těžbou kamene, která lokalitu destruuje. Dnes je již odtěžena zhruba polovina kopce (zcela zmizelo hradní jádro a část předhradí). Metodika záchranného archeologického výzkumu je na Tepenci již od počátku založena na rozměření výzkumné plochy do čtvercové sítě o velikosti jednotlivých čtverců 5 x 5 metrů. Zejména z časových důvodů jsou čtverce zkoumány šachovnicově. Od 90. let 20. století jsou neprobádané čtverce prozkoumány za pomoci detektorů kovů. Archeologické záchranné výzkumy se od 70. let 20. století až po současnost soustřeďují na plochu předhradí. Během všech archeologických výzkumů uskutečněných na Tepenci bylo prozkoumáno 256 čtverců a 11 sond. Celkově byla prozkoumána plocha o velikosti cca 6 494 m<sup>2</sup>.

Z hlediska stratigrafie se téměř na celé ploše nachází kulturní vrstva (cca 50 cm), ve které je smíchán středověký a pravěký materiál. Do této vrstvy a pod ní jsou zahloubeny objekty z doby bronzové, halštatské a středověku. Jedná se o kůlové jamky a jednoduché, max 50–60 cm hluboké jámy. V několika případech se podařilo zachytit i relikty zdí, představující pozůstatky po nadzemních středověkých stavbách. Kromě toho se na celé ploše předhradí nachází poměrně značné množství velkých depresí, kdy zcela jasné doklady o jejich funkci přineslo posledních šest výzkumných sezon (1997 až 1999, 2007, 2008 a 2012). V jednom případě se jednalo o hradní studnu a ve všech dalších jde o relikty středověkých, do skály vysekaných sklepů či suterénů nadzemních budov. V současnosti je prozkoumáno deset těchto objektů.

Během dlouhodobého archeologického výzkumu byla získána rozsáhlá kolekce archeologického movitého materiálu zahrnující zlomky pravěkých i středověkých nádob, kovové (bronzové a železné) ozdoby a militaria (šípky do kuše, hroty kopí, olovené projektily do prvních palných zbraní). Dále byly nalezeny součásti koňského postroje, podkovy, ostruhy a kusy náradí.

Na základě měření, které provedli přímo archeologové, vznikl plán výzkumných čtverců (obr. 10.16).



Obr. 10.16 Plán lokality používaný archeology (zdroj: Vránová, 2009).

### UAV snímkování

Pro získání přesnější dokumentace bylo ve spolupráci s Archeologickým centrem Olomouc provedeno letecké UAV snímkování. Byly provedeny dva lety. Letové parametry a údaje ze zpracování jsou uvedeny v tabulce 10.10.

Tab. 10.10 Parametry snímkování a zpracování dat (autor: J. Miřijovský).

	Tepenec - celá lokalita	Tepenec - detail
Počet snímků	9	17
Výška letu (m)	62	19
GSD (cm)	1,4	0,4
Počet vlíčovacích bodů	28	26
Počet vázacích bodů	40728	102170
Chyba snímkových souřadnic (pix)	0,6	0,6
Hustota bodů DMP (bodů/m <sup>2</sup> )	4565	102569
Průměrná chyba Z (m)	4,64E-07	-0,0006
Směrodatná odchylka (m)	0,016	0,033
RMSE <sub>Z</sub> (m)	0,017	0,033

Snímkování bylo provedeno stejným způsobem jako v předcházejících výzkumech. Během prvního letu bylo provedeno snímkování celé lokality. Druhý let byl proveden s velmi nízké výšky, aby byl zachován vysoký detail dvou vybraných archeologických čtverců, které byly v celé lokalitě nejhodnotnější.

Během zpracování dat bylo vytvořeno velké množství výstupů. Na obrázku 10.17 je ukázka 3D modelu povrchu výzkumné archeologické lokality v perspektivním zobrazení. Na obrázku 10.18 je v perspektivním zobrazení detail jednoho čtverce, který byl z hlediska archeologie nejzajímavější. Ve výkopu byly objeveny základy obvodových zdí původní kuchyně. Ortogonalizovaná mozaika celé lokality je zobrazena v příloze č. VI. V přílohách č. VII a VIII jsou umístěny dva z nejcennějších výzkumných čtverců z druhého letu.



Obr. 10.17 Archeologická výzkumná plocha v perspektivním zobrazení (autor: J. Miřijovský).

Archeologie je obor, ve které povědomí o geografických informačních systémech není příliš rozšířeno. Proto také pouze část odborníků na archeologii využívá specializované programy pro fotogrammetrii, dálkový průzkum Země a geografické informační systémy. Z tohoto důvodu byly také vytvořeny 3D modely ve formátu KMZ, které lze načíst do aplikace Google Earth. KMZ je komprimovaná verze souboru KML (Keyhole Markup Language). Aby bylo možné výstupy nahrát do aplikace Google Earth, musely být nejdříve všechny zaměřené vlíčovací body převedeny do souřadnicového systému WGS 84. Body byly převedeny pomocí globálního transformačního klíče do souřadnicového systému ETRS-89 a následně do WGS-84. Použitý transformační klíč je schválen pro převod souřadnic Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním. Dále byl

celý proces zpracování stejný jako v předcházejících případech. Výstupy v podobě KMZ souborů jsou uvedeny v příloze na DVD, kde se nachází také všechny ostatní 3D modely povrchu v digitální podobě.



Obr. 10.18 Perspektivní zobrazení jednoho výzkumného čtverce (autor: J. Miřijovský).

## 11 VÝSLEDKY

Hlavním výsledkem disertační práce je navržený a ucelený koncept UAV snímkování a UAV fotogrammetrie (kapitola 3, obr. 3.1), zahrnující aspekty základního i aplikačního výzkumu. Tento koncept představuje řešení základních otázek formulovaných v kapitole *Cíle práce*. Nejvýznamnějšími dosaženými výsledky jsou poznatky doplňující navržený koncept UAV snímkování a UAV fotogrammetrie a prokazující jeho použitelnost v odborné praxi. Patří k nim zejména:

### **Určení základních parametrů kamery pro použití v UAV fotogrammetrii, které souvisí s použitím neprofesionálních leteckých komor.**

Výsledky různých kalibračních postupů a použití různých testovacích polí (podkapitola 4.3) potvrzují, že nelze jednoznačně upřednostnit jeden konkrétní postup nebo kalibrační pole. V tabulce 4.2 jsou uvedeny všechny výsledky provedených kalibrací s celkovou RMSE chybou menší než 0,5 mm. Z tabulky je zřejmé, že i při stejné hodnotě RMSE chyby, se mohou prvky vnitřní orientace mírně lišit. Graficky jsou rozdílné hodnoty znázorněny v obrázku 4.6. Rozdílné hodnoty na výsledcích kalibrací jsou způsobeny zejména nestabilitou optických členů objektivu neměřické kamery. Výsledné zprůměrované hodnoty, které dále vstoupily do procesu zpracování dat, jsou uvedeny v tabulce 11.1.

Tab. 11.1 Výsledné hodnoty kalibrovaných neměřických komor.

Kamera	f (mm)	x <sub>p</sub> (mm)	y <sub>p</sub> (mm)	x <sub>0</sub> (mm)	y <sub>0</sub> (mm)
EOS 500D	18,45168	-0,05443	0,076238	11,1125	7,5207

Hodnoty radiální distorze objektivu s ohniskovou vzdáleností 18 mm jsou uvedeny v grafu na obrázku 4.7. Pro srovnání byl analyzován i objektiv s konstantou komory 50 mm, jehož hodnoty radiální distorze jsou v grafu také uvedeny. Vysoké hodnoty radiální distorze lze pozorovat zejména u objektivu s konstantou 18 mm. To je negativní důsledek širokého úhlu záběru. U objektivu snímkovací kamery autor doporučuje provádět v pravidelných intervalech kontrolní kalibrace, protože relativně levné kamery trpí nestabilními optickými členy a prvky vnitřní orientace se při používání mírně mění.

### **Analýza míry přesnosti kalibrace kamery ve vztahu k celkové přesnosti výstupu**

Z provedených analýz jednoznačně vyplývá, že kalibrace kamery má podstatný vliv na celkovou přesnost výstupu. Bylo prokázáno, že zejména přesný výpočet koeficientů radiální distorze je zásadní, aby nedocházelo ke vzniku y-paralaxy. Proto autor práce doporučuje používat zpřesňující výpočet koeficientů  $K_0$ ,  $K_1$  a  $K_2$  až během závěrečné fáze automatické aerotriangulace s pomocí vlíčovacích a vázacích bodů. Jako nejvhodnější z nabízených výpočtů byl vyhodnocen *Lens distortion model*, který je uveden ve vzorci číslo 24 a 25. Zcela jednoznačně nelze doporučit nastavení pevných hodnot prvků vnitřní orientace během výpočtu aerotriangulace. Nestabilita optických členů objektivu vyžaduje zpřesnění prvků vnitřní orientace podle bodů, které byly

použity v konkrétním snímkování. Laboratorní kalibrace totiž zcela neodpovídá reálným podmínkám snímkování (např. vzdálenost kamera – objekt). Nutnou podmínkou použití reálných vlíčovacích bodů pro zpřesnění prvků vnitřní orientace je vysoká přesnost zaměření bodů. Zvýšení stability optických členů objektivu je dosaženo při použití skel s pevnou ohniskovou vzdáleností. V takovém případě je omezena nestabilita optických členů a ke změnám prvků vnitřní orientace během letu a mezi různými snímkovými lety dochází v menší míře. Zcela jednoznačně autor nedoporučuje využití celé scény u širokoúhlých objektivů (podkapitola 4.3.2). Hodnoty radiální distorze v okrajových částech dosahují extrémních hodnot a i při jejich znalosti může docházet k nepřesnostem a vzniku nežádoucí y-paralaxy.

### **Volba správného výpočtu prvků vnější orientace při absenci GPS/IMU přístroje**

Byly testovány dvě metody zpracování dat. Kompletní analýzy dvou metod výpočtů prvků vnější orientace jsou uvedeny v rámci podkapitol 8.1 a 8.2. Odpověď na otázku, zda je pro UAV snímky přesnější stereofotogrammetrická metoda nebo metoda Structure from Motion, lze nalézt v grafech na obrázcích 8.2 a 8.12. Podle rozložení bodů v grafu jako přesnější jednoznačně vychází metoda Structure from Motion. Byla dokázána přímá úměra, že čím více snímků stejného území vstoupí do procesu zpracování, tím přesnější výsledek bude. Negativem je výrazně narůstající výpočetní čas. Vysoké množství snímků je hlavním důvodem přesnosti metody. V místech, kde byly pouze dva snímky stejného území, dosahovala metoda SfM velmi podobné přesnosti jako metoda stereofotogrammetrická.

V případě použití stereofotogrammetrické metody autor doporučuje použít 10 až 20 vlíčovacích bodů a maximálně možný počet přesně umístěných bodů vázacích. Tím bude zaručena dostatečná přesnost výpočtu. Vliv počtu vázacích bodů na přesnost výpočtu dokazuje graf na obrázku 8.1. Přesnost výpočtu AAT pomocí 22 vlíčovacích bodů je uvedena v tabulce 8.1.

### **Vliv rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výpočtu**

V podkapitole 7.2.2 popisuje autor experiment, který měl dokázat či vyvrátit vliv rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výpočtu AAT. Z experimentu jednoznačně vyplývá, že rozmístění bodů má nezanedbatelný vliv na přesnost výpočtu. V grafu na obrázku 7.6 jsou uvedeny hodnoty chyby pro všechny prvky vnější orientace podle variant rozmístění bodů. Jednotlivé typy rozmístění jsou uvedeny na obrázku 7.5. Optimální variantou rozmístění vlíčovacích bodů je, aby žádný z bodů neměl lineární závislost s bodem jiným. To platí pro souřadnice X, Y i Z. Všechny vlíčovací body by měly být umístěny na rostlém terénu. Zcela nevhodné je umístění bodů na výškové objekty z důvodu radiálních posunů objektů.

### **Analýza vlivu atmosférických a světelných podmínek na kvalitu výstupu**

V podkapitole 6.4 jsou analyzovány vlivy, které můžou způsobit komplikace letového charakteru nebo snížit či znehodnotit obrazový záznam. Na základě provedené analýzy letových dat z modelu PIXY byl identifikován problém, který způsobují nárazy větru



(obr. 6.8, pravý graf). Problém se ve velké většině případů vyskytuje pouze u paraglidového modelu, který je náchylný na povětrnostní podmínky. Z grafu na obrázku 7.16 je zřejmé, že u multirotorového systému k podobnému vlivu nedochází. Velká pozornost musela být věnována světelným podmínkám. Při různém typu osvětlení dochází ke zcela rozdílné viditelnosti objektů na snímku (obr. 6.10). Pokud se na snímcích vyskytují objekty, které jsou výrazně zahloubené do terénu, pak je vhodnější volit pro snímkování rozptýlené světlo. Mezi další vady, které byly identifikovány na snímcích, lze zařadit třpyt na snímcích a horké skvrny. Nelze stanovit obecně aplikovatelný postup, jak předejít vadám způsobených slunečním zářením na snímku. Správný postup musí být zvolen na základě správného plánování snímkování s ohledem na aktuální světelné podmínky a typ snímaného objektu. Chyby se však častěji objevují na snímcích šikmých než kolmých (obr. 6.12).

### **Kvantifikace a kvalifikace všech možných prostorových chyb vstupujících do systému sběr – vyhodnocení dat**

Přesnost výsledků UAV výstupů závisí na řadě faktorů. Při nevhodně zvolených pracovních postupech nebo technice způsobí tyto faktory navýšení chyb ve všech výstupech z UAV snímkování. Jedním z cílů práce bylo na možné chyby upozornit, a pokud to je možné, je pak kvantifikovat a navrhnout řešení, jak se jich vyvarovat. U výsledků, které pocházejí z testovacího území, byla porovnána přesnost se dvěma sadami nezávisle změřených výškových dat. Kromě výsledků uvedených v předcházejících bodech bylo provedeno sedm úkolů s následujícími závěry:

#### *1. Vliv počtu vřícovacích bodů na přesnost AAT*

Minimální počet vřícovacích bodů pro zajištění přesných výsledků v UAV fotogrammetrii je deset (podkap. 7.2.2). Zpracování je možné i s menším počtem bodů, ale výsledná přesnost se snižuje (tab. 11.2). V tabulce jsou uvedeny parametry letu a vypočítané  $RMSE_z$  chyby z vybraných případových studií. Z tabulky je patrná značná závislost mezi počtem vřícovacích bodů a přesností výstupu. Přesnost výsledků logicky ovlivňuje i výška letu. Proto jsou výsledky v tabulce barevně odlišeny podle výšky letu do dvou skupin.

Tab. 11.2 Vliv počtu vřícovacích bodů na přesnost AAT (autor: J. Miřijovský).

Výška letu (m) / GSD (cm)	Počet vřícovacích bodů	$RMSE_z$ (m)
138 / 2,9	9	0,250
106 / 2,3	17	0,093
97 / 2,1	17	0,085
106 / 2,5	27	0,024
65 / 1,6	6	0,034
54 / 1,2	28	0,022
62 / 1,4	28	0,016

Pozn.: Barevně jsou odlišeny lety z přibližně stejné výšky.

## *2. Doporučení postupů pro zaměřování a přesnost vlíčovacích bodů*

V podkapitole 7.2.3 autor rozpracoval doporučené postupy pro zaměření vlíčovacích bodů. Přesnost zaměření bodů vždy záleží na požadované výsledné přesnosti a měřítku výstupů. Pro fotogrammetrické použití by přesnost zaměření vlíčovacích bodů neměla překročit hodnotu 5 cm. Autor doporučuje, aby chyba určení souřadnic vlíčovacích bodů nebyla vyšší než je prostorová rozlišovací schopnost snímku, tedy skutečná velikost jednoho pixelu. V optimálním případě by se chyba měla pohybovat na poloviční hodnotě velikosti jednoho pixelu. Přesné zaměření vlíčovacích bodů je o to důležitější, pokud se během zpracování dat budou používat algoritmy na zpřesnění prvků vnitřní orientace.

## *3. Stanovení základních parametrů pro správnou extrakci bodů ze snímků pomocí autokorelačních metod včetně výpočtů přesnosti*

V podkapitole 8.1.2 autor řešil extrakci bodů ze stereosnímků. Dokazuje, že správné parametry pro automatickou extrakci bodů jsou vždy záležitostí konkrétního typu terénu, na který má být algoritmus aplikován. V obecné rovině lze v případě stereofotogrammetrické metody vycházet z nastavení v tabulce 8.2. Při automatické extrakci bodů autor doporučuje použití pouze jednoho spektrálního pásma. Použití všech spektrálních pásem sice zvyšuje celkový počet extrahovaných bodů, ale zároveň s nimi se zvyšuje i RMSE chyba (tab. 8.3).

## *4. Provedení analýzy interpolačních metod z dat extrahovaných z UAV fotogrammetrie*

Analýzu nejvhodnější interpolační metody pro výšková data, která jsou extrahovaná ze stereosnímků, autor testoval v podkapitole 8.1.3. Všechny interpolační metody, včetně nastavení jejich parametrů, jsou uvedeny v tabulce 8.4. Jako nejvhodnější autor doporučuje interpolační metodu Kriging s parametry: gaussian model, nugget 0,03; sill 0,07; range 0,5; lag size 0,5; number of lags 10.

## *5. Určení absolutní přesnosti DMP ze stereofotogrammetrie a SfM metody na reálných datech v testovacím území*

V kapitole 9 autor provedl analýzu přesnosti UAV fotogrammetrie vůči referenčním datovým zdrojům. Absolutní přesnosti DMP zpracovaných metodami Stereofotogrammetrie a SfM jsou uvedeny v tabulce 9.2. Nejpřesnějších výsledků zcela jednoznačně dosáhl metodou SfM s hodnotou RMSE chyby 7,32 cm v souřadnici Z. Přesnost DMP v souřadnici Z stejného území ze Stereofotogrammetrické metody je 12,6 cm. Autor dále vytvořil kategorie hodnot chyb a do nich zařadil všechny body z obou metod zpracování, které vstoupily do analýzy přesnosti. Četnost bodů a jejich rozložení v jednotlivých kategoriích pro stereofotogrammetrickou metodu a metodu SfM uvedl v grafu na obrázku 9.3. Výsledky uvedené v grafu opět potvrdily vyšší přesnost metody SfM.

## *6. Analýza ortogonalizovaných snímků a stanovení absolutní přesnosti včetně vyvození patřičných závěrů*

Hodnocení přesnosti ortogonalizovaných snímků vytvořených na základě DMP z obou metod potvrdilo vyšší přesnost metody SfM, byť je rozdíl pouze nepatrný (tab. 9.4

a 9.5). I přes podobné výsledky při hodnocení přesnosti je znatelný rozdíl v kvalitě výstupů z hlediska vizuálního hodnocení. Přestože je rozdíl v parametrech  $RMSE_X$  a  $RMSE_Y$  menší než jeden centimetr, obrázek 9.3 dokazuje negativní vliv nepřesného 3D modelu na ortogonalizaci snímku.

#### *7. Porovnání dat z laserového skenování s daty UAV fotogrammetrie v testovacím území*

Pro nezávislé ověření byly v podkapitole 9.3 výsledky z UAV fotogrammetrie konfrontovány s daty z leteckého laserového skenování. Podle údajů v tabulce 9.7 lepších výsledků dosáhl model vytvořený metodou SfM.  $RMSE_Z$  modelu ze Stereofotogrammetrie je 14,7 cm a byl tedy hodnocen hůře než výstup z leteckého laserového skenování. Model vytvořený metodou SfM s hodnotou  $RMSE_Z$  5,3 cm je srovnatelný nebo dokonce lepší než výstup z laserového skenování. Na základě hodnot chyb, které byly zjištěny při porovnání výstupů vytvořených metodou SfM a dat laserového skenování, nelze jednoznačně stanovit, která z metod dosahuje vyšší přesnosti. Oba datové zdroje jsou velmi přesné a zcela vyhovují použití ve fotogrammetrii a geografických informačních systémech.

### **Další výsledky**

#### *1. Definování základních požadavků na letecký nosič*

V podkapitole 4.1 autor představil dva modely, které použil při práci v terénu. Podle platných zákonů České Republiky je možné využívat pro řízení dálkově ovládaných modelů několik volných frekvencí. Autor doporučuje používat frekvenci 2,4 GHz a vždy ji kódovat proti nežádoucímu rušení. V podkapitole 6.3 autor popisuje výsledky v použití modelů rozdělených podle schopnosti navigovat UAV systém na předem definované body a letové osy. Zcela jednoznačně autor doporučuje nejvyspělejší technologie multirotorového systému, mezi které patří automatický let podle zadaných bodů v požadované výšce, schopnost modelu viset nad jedním místem, automatické pořizování snímků v požadovaném časovém intervalu apod.

#### *2. Shrnutí aktuální a platné legislativy pro použití UAV platform ve vzdušném prostoru České republiky pro rok 2012*

Autor v kapitole 5 shrnuje legislativní poznatky pro provoz UAV systémů ve vzdušném prostoru České Republiky. Nejedná se o vědecký výstup, ale znalost problematiky je pro provozování UAV systémů naprosto klíčová.

#### *3. Doporučení postupů pro přípravnou fázi snímkování pomocí modelů, včetně stanovení parametrů pro snímkování*

V podkapitole 6.1 autor představil postup pro ověření podmínek letu v zájmovém území na konkrétním příkladě (obr. 6.2). Na základě znalosti legislativních podmínek autor jednoznačně doporučuje před každým letem kontrolu letového prostoru v aplikaci AIS View. Pro plánování letových parametrů autor doporučuje využít vzorce 13, 14, 17, 21 a 23. Všechny výpočty doplnil o ukázky reálných výpočtů. Stejný výpočet však lze použít i v jakékoliv jiné situaci. V kapitole 6.3 autor popsal rozdílné situace v plánování letových os a důsledky chybné navigace (obr. 6.6).

#### *4. Definování základních expozičních parametrů pro správné nastavení kamery včetně ostření*

Autor se domnívá, že pro nastavení expozice nelze stanovit obecný postup. Nastavení expozičních parametrů doporučuje upravovat podle aktuálních světelných podmínek, avšak jednoznačně doporučuje použití režimu priority času na snímkovací kameře, případně manuální režim. Činnost závěrky musí být dostatečně rychlá, aby nedošlo k rozmazání snímků z důvodu mikrovibrací. Jako dostatečnou rychlost i s rezervou autor stanovil hodnotu 1/800 s. Zaostření kamery může být provedeno na nekonečno (tab. 7.2).

#### *5. Popis jednotlivých fází letu a kontroly letových dat na vybraných příkladech*

V podkapitole 7.4 autor podrobně popisuje všechny fáze snímkového letu, představuje postupy pro předletovou přípravu (podkapitola 7.4.1), jednotlivé typy startů (obr. 7.9) i fázi letovou. Na příkladu paraglidového modelu PIXY představil postup jak svépomocí sestavit a doplnit letecký model o navigační jednotku.

### **Případové studie**

V aplikační části práce (kapitola 10) autor dokumentuje případové studie z oblasti fluviální geomorfologie a archeologie. Případovými studiemi dokázal významný vědecký potenciál UAV fotogrammetrie pro základní, ale také pro aplikační geovědní výzkum. V oblasti fluviální geomorfologie autor aplikoval možnosti UAV fotogrammetrie při sledování vývoje říční laterální eroze a dalších geomorfologických fluviálních procesů, konkrétně pohyb dřevní hmoty v korytě toku. UAV fotogrammetrii významnou měrou použil při výzkumu vývoje kenického meandru a pomocí ní zdokumentoval konečnou fázi jeho vývoje. V oblasti moderního archeologického výzkumu autor použil UAV fotogrammetrii jako první v České republice a představil ji jako zcela novou metodu nedestruktivní archeologie, která byla spolupracujícími archeologickými organizacemi a institucemi přijata s velmi pozitivním ohlasem. V podkapitole 10.2 autor popisuje příklady využití UAV fotogrammetrie při archeologickém výzkumu v lokalitě bývalého hradu Tepenec a dále u přeložky silnice I/44.

## 12 DISKUZE

Během výzkumu v rámci své disertační práce řešil autor problémy, které způsobily technické prostředky nebo nevhodně zvolené pracovní postupy a metody. Při praktických úlohách autor dosáhl hraničních situací, za kterými UAV fotogrammetrii již nelze použít. Jsou diskutovány nejdůležitější problémy, které autor řešil.

### **Kamera**

Největší komplikace v průběhu řešení úkolů práce nastaly v oblasti používání kamerové techniky, kterou autor označuje za nejslabší prvek navrženého konceptu. Zatímco v letecké fotogrammetrii jsou nasazovány kamery špičkové úrovně v ceně až několika desítek miliónů korun, při práci na tématu disertační práce byla využita pouze kvalitní DSLR zrcadlovka. I po provedení několika kalibrací kamery různými metodami se prvky vnitřní orientace vždy mírně lišily. Díky nestabilitě optických členů objektivu docházelo v průběhu výzkumu k mírným změnám prvků vnitřní orientace. Autorovi se podařilo problém vyřešit použitím metody využívající pro opravu kalibračních parametrů nadbytečné množství snímků. Prvky vnitřní orientace byly zpřesňovány až pomocí vlíčovacích bodů zaměřených pro daný snímkový let. Toto řešení je sice úspěšné, nicméně koncepčně lepším řešením by bylo použití kvalitního fotogrammetrického objektivu. Zde je otevřen velký prostor pro výrobce kamer a objektivů. Důležité je, aby veškeré prvky vnitřní orientace byly naprosto stabilní a nedocházelo k jejich změnám v průběhu snímání. Rovněž současné kalibrační metody vyžadují pro UAV fotogrammetrii inovaci. Snímání rovinných testovacích polí sice umožní zjistit prvky vnitřní orientace, ale výsledky mohou být odlišné v případě snímání z výšky 2 nebo 50 metrů.

### **Letové osy**

Při použití paraglidového modelu PIXY docházelo během práce k problémům s navigací podle definovaných letových os. Model neměl možnost automatického letu a navigace musela v počátcích probíhat pouze podle online přenášeného obrazu z kamery umístěné na nosiči. Výsledkem v několika případech byly naprosto chaoticky umístěné snímky v bloku, který ani vzdáleně nesplňoval požadavky na fotogrammetrické snímání. I přesto se z takto chaotického bloku snímků povedlo získat uspokojivé výsledky. Tato zkušenost vedla autora k sestavení přídatného GPS zařízení s online přenosem dat do terénního počítače, což umožnilo provádět jednoduchou navigaci podle letových os předdefinovaných v počítači. Situaci zcela vyřešilo až pořízení vyspělejšího leteckého modelu, který měl již zabudovaný modul pro automatický let podle zadaných průletových bodů. U paraglidového modelu také docházelo k nestabilitě držáku kamery. Přestože byl držák vybaven dvouosou gyrostabilizací, u některých snímků překračovaly hodnoty  $\omega$  a  $\phi$  pět stupňů. Problémy nastaly zejména za silnějšího větru, protože paraglidový model je z důvodu větší plochy padákového křídla náchylnější na nárazy větru. Řešením může být použití velmi rychlých motorů, které budou vyrovnávat držák kamery i za silnějšího větru.

## **Manuální vyhodnocování ve stereorežimu**

Při vyhodnocování leteckých snímků, které byly pořízeny konvenční leteckou fotogrammetrií, se nečastěji používá manuální vyhodnocení se zobrazením stereodvojice ve stereorežimu. Autor k vyhodnocování dat pořízených UAV technologií z počátku přistupoval stejným způsobem. Během práce však bylo zjištěno, že pokud má být dodržen požadavek na velmi vysokou přesnost extrakce bodů, není možné manuální režim až na výjimky použít. Fyziologické vlastnosti lidského oka a velmi vysoká podrobnost snímků neumožňovaly s dostatečnou přesností manuálně vyhodnotit a extrahovat body z 3D modelu, který byl zobrazen ve stereorežimu. Na velmi malé ploše snímků dochází ke změnám ve výšce v řádech centimetrů. I tyto rozdíly a změny musí být ve výsledném 3D modelu zachyceny, ale lidské oko tyto centimetrové rozdíly nedokáže ve stereorežimu rozeznat. Autor až na výjimky upustil od manuálního vyhodnocování dat a jednoznačně doporučuje pouze automatickou, případně poloautomatickou extrakci bodů. Manuální vyhodnocování je vhodné např. při potřebě extrakce ostrých terénních hran. Problematika manuálního nebo poloautomatického vyhodnocování se může stát výzvou pro další výzkum. Autokorelační metody ke své správné funkci nutně potřebují kvalitní a ostrý snímek. Největším problémem způsobujícím rozostření snímku jsou mikrovibrace od motorů modelu. Vylepšením držáků kamer s kvalitním tlumením mikrovibrací se zvýší ostrost snímků a i korelace na snímcích bude přesnější. V současné době není jednoznačná shoda na tom, jaký typ tlumení použít pro eliminaci mikrovibrací. Záleží na konkrétní konstrukci držáku a použitém materiálu. Zcela jistě by se to mělo stát předmětem dalšího výzkumu.

## **Y-paralaxa u zpracovaných stereopárů**

Pro snímkování autor ve výzkumu použil kamery s krátkou ohniskovou vzdáleností. Širokoúhlé objektivy kompenzují nízkou výšku letu. Hodnoty radiální distorze použitého objektivu byly několikrát vyšší než u kamer v letecké fotogrammetrii. Zejména při zpracování snímků stereofotogrammetrickou metodou docházelo v okrajových částech snímků ke vzniku y-paralaxy, která je ve fotogrammetrii nežádoucí. Tento problém je jednoznačně způsoben použitím neměřických kamer. I přes znalost průběhu radiální distorze objektivu nebylo v autorových silách namodelovat koeficienty radiální distorze zcela bezchybně. Proto extrémní hodnoty distorze v okrajových částech snímků způsobovaly vznik nežádoucí y-paralaxy. Při použití stereofotogrammetrické metody bylo jediným řešením vynechání okrajových částí ze zpracování. Po zavedení metody SfM byl problém odstraněn použitím velkého množství snímků při zpracování. Nebyla sice odstraněna samotná radiální distorze, ale velká nadbytečnost rovnic řešení umožňuje lépe dopočítat a zpřesnit koeficienty radiální distorze. Nejvhodnějším řešením by zcela jistě bylo mít objektivy takové konstrukce, které by měly všechny prvky vnitřní orientace jednoznačně určeny a průběh radiální distorze by byl znám velmi přesně. V takovém případě by nemusely být použity náhradní postupy v simultánní kalibraci.

## **Tvorba 3D modelu**

Po automatické extrakci bodů ze stereopáru byl vytvářen 3D model terénu. Největším problémem v této fázi bylo velmi specifické rozložení extrahovaných bodů na terénu. Algoritmy a postupy pro automatickou extrakci výškových dat jsou založeny na autokorelačních metodách. Ty však selhávají v částech obrazu, které jsou homogenní. Rozložení bodů tedy bylo velmi nepravidelné. V místech, kde se nacházely ostré hrany a přechody, se nacházelo velké množství výškových dat. Plochy, které byly homogenní (například jednolité travnaté plochy), obsahovaly malé množství extrahovaných bodů. V některých místech body zcela chyběly. Problém definitivně vyřešilo až použití metody SfM. Potud muselo být velmi podrobně zkoumáno správné nastavení pro interpolaci 3D modelu povrchu.

## **Budoucí vývoj a osvěta**

UAV fotogrammetrie nemá ve své moderní podobě příliš dlouhou historii. A přestože i v posledních letech došlo zejména ve světě k významnému pokroku, nabízí stále velký potenciál k vylepšování všech jednotlivých částí. V oblasti leteckého nosiče to je zejména výdrž baterií za současného zvyšování nosnosti modelů. Otázkou blízké budoucnosti je také tzv. přímé georeferencování na základě palubních přístrojů. Toto téma je v současnosti velmi aktuální v konvenční letecké fotogrammetrii. Je pouze otázkou času, kdy dojde k miniaturizaci přístrojů do takové míry, aby bylo možné jich využít také na modelech.

Jako velký problém lze v obecné rovině vidět nedostatečnou osvětu mezi odborníky z příbuzných oborů. Existují dva tábory odborníků, přičemž každý zaujímá extrémně rozdílné stanovisko na UAV technologie. První skupina odborníků technologii zcela zavrhuje. Podle jejich názoru se nejedná o plnohodnotný fotogrammetrický nástroj a současný zájem o tuto technologii je pouze krátkodobý. Tento názor je zcela mylný. V současné době jsou již implementovány UAV technologie a metodiky v mezinárodních skupinách zabývajících se fotogrammetrií nebo geodézií, což potvrzuje velké množství článků a referátů na odborných akcích. Druhá skupina odborníků prosazuje UAV technologie a fotogrammetrii jako technologii, která do jisté míry může nahradit konvenční letecké snímkování. To však je rovněž velmi chybný názor. UAV technologie nemohou být nikdy chápány jako nástroj, který má nahrazovat jiný sběr dat. Tento nástroj musí být chápán jako doplněk širokého systému sběru přesných geodat. Každá úroveň sběru dat má své opodstatnění v určitých aplikacích. Vývoj UAV technologií a postupů by se tedy měl ponechat na zájmu odborníků a potřebách vědy a praxe.

## 13 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo sestavit koncept nasazení UAV technologií ve fotogrametrii pro velmi přesný sběr geodat a ověřit jej na případových studiích aplikovaného výzkumu. Autorem sestavený koncept představuje systematicky uspořádaný soubor dílčích technologických a metodologických procedur, které je potřeba realizovat v průběhu práce s UAV systémem.

Během řešení cílů disertační práce byly využity poznatky, metody a znalosti zejména z oborů fotogrammetrie, dálkového průzkumu Země, geodézie, statistiky, geografických informačních systémů, informatiky a elektronických systémů. Sestavený koncept použití UAV systémů ve fotogrametrii byl ověřen na testovacích i reálných datech z terénu. Pro zpracování dat byly vybrány a otestovány fotogrammetrické metody Stereofotogrammetrie a Structure from Motion.

Výsledkem disertační práce je sestavený koncept nasazení UAV technologií ve fotogrametrii a pět vypracovaných případových studií. V sestaveném konceptu jsou obsaženy všechny důležité části systému, které jsou potřebné pro jeho správnou funkčnost. Autor navrhl postupy pro přípravu snímkování, tvorbu plánu letu i práci v terénu včetně provedení snímkového letu. Dále byly navrženy a ověřeny postupy zpracování dat včetně kvantifikace chyb. Při dodržení všech postupů a metod zpracování bylo autorem prokázáno, že přesnost výstupů je srovnatelná nebo dokonce lepší než u jiných fotogrammetrických aplikací. Přesnost výstupů z UAV fotogrammetrie byla porovnána s výstupy leteckého laserového skenování a bylo prokázáno, že v přesnostních parametrech může UAV fotogrammetrie bez problémů konkurovat i těmto technikám sběru dat. V oborech fluvialní geomorfologie a archeologie bylo vypracováno pět případových studií. Studie jsou součástí širšího vědeckého výzkumu a dokazují využitelnost UAV technologií v aplikovaném výzkumu.

V UAV fotogrametrii se skrývá velký potenciál, který nebyl do současné doby v České republice zcela využit. Při správném pochopení původního smyslu UAV technologií se k uživatelům dostane velmi silný nástroj na sběr geodat v různých oblastech aplikovaného výzkumu. UAV fotogrammetrie může být využita v mnoha oborech nejen z oblasti geografie a geografických informačních systémů. V aplikovaném výzkumu se nabízí její využití například v oblasti geomorfologie, biogeografie, ekologie, kartografie, archeologie a dalších oborů. Pro základní výzkum stále zůstává velké množství otevřených otázek, pro které je možné hledat vhodná řešení. Zejména je možné jmenovat oblast vhodnějších kalibračních postupů pro neměřické kamery nebo návrh nových konstrukcí objektivů pro snímkování z nízkých výšek.

Během autorova výzkumu v oblasti UAV fotogrammetrie se téměř všechny používané technologie posunuly o významný kus kupředu. To, co bylo v roce 2009 moderní a aktuální, je v současnosti běžné nebo nahrazené kvalitnějším řešením. Typickým příkladem je nosnost multirotorových systémů. Zatímco v roce 2009 byla jejich nosnost pouze několik desítek gramů, dnes je možné používat zařízení, které unese profesionální



DSLR kameru a vydrží s ní ve vzduchu více než 20 minut na jednu baterii. Obdobně rychlý vývoj je očekáván i v nejbližší budoucnosti. Velký zájem o UAV technologie ve světě je motorem k dalšímu vědeckému vývoji i u nás. Nekoncepční myšlení a snaha o nahrazení jiných metod sběru dat pouze UAV technologiemi však není šťastnou volbou.

Disertační práce „Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení“ přináší koncept v používání UAV technologií a dokazuje, jak silným nástrojem pro získávání cenných poznatků z různých oborů může být. Autor věří, že se disertační práce stane přínosným dílem pro další výzkum a vývoj nejen v oblasti fotogrammetrie.

## POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

Aber, J. S., Aber, S. W. and Pavri, F. (2002). Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large scale, high-resolution, multiview-angle imagery. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS, Denver : CO, USA.

Aber, J. S. (2010). *Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications*. 1 Edition. Elsevier Science.. 268 p.

Anděl, J. (1998). *Statistické metody*. Matfyzpress, 300 s. ISBN 8085863278.

Batut, A. (1890). *La photographie ae'rienne par cerf-volant*. Gauthier-Villars et fils, Paris, 74 p.

Bigras, C. (1997). Kite aerial photography of the Axel Heiberg Island fossil forest. In Bauer, M., Befort, W., Coppin, Ir. Pol R. and Huberty, B. (eds.), *Proceedings of the first North American symposium on small format aerial photography*. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, United States, p. 147-153.

Bitelli, G., Unguendoli, M. and Vittuari, L. (2001). Photographic and photogrammetric archaeological surveying by a kite system. In *Proceedings of the 3rd International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin*, Elsevier, Paris, p. 538–543.

Böhm, J. (2002). *Fotogrammetrie*, vydavatelství VŠB - TUO, Ostrava.

Comer, R.P., Kinn, G., Light, D. and Mondello, C. (1998). Talking digital. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64, p. 1139-1142.

Červinka B. (1991). Amatérská fotografická komora Flexaret v dálkovém průzkumu Země. *Zprávy geografického ústavu ČSAV*. ročník 28, číslo 4. Brno, 21 s.

Česká Republika. (1997). Letecký předpis - pravidla létání L2. Dle ustanovení § 102 zákona č. 49/1997 Sb. Dostupné z: [http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2\\_cely.pdf](http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf).

Česká Republika. (1997). Letecký předpis - letecké mapy L4. Dle ustanovení § 102 zákona č. 49/1997 Sb. Dostupné z: [http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4/data/print/L-4\\_cely.pdf](http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4/data/print/L-4_cely.pdf).

Česká Republika. (2008). Doplněk X – Bezpilotní systémy. In: Hlava 3, ust. 3.1.9. předpisu. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/effective/doplX.pdf>.

Český telekomunikační úřad. (2010). Část plánu využití rádiového spektra č. PV-P/26/09.2010-10 pro kmitočtové pásmo 27,5–66 MHz. Dostupné z: [http://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok\\_2010/pv-p\\_26-09\\_2010-10.pdf](http://www.ctu.cz/cs/download/plan-vyuziti-radioveho-spektra/rok_2010/pv-p_26-09_2010-10.pdf).

Demek, J. (1987). *Obecná geomorfologie*. Academia, Praha, 480 s.

Dunford, R. et al. (2009). Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, no. 19, p. 4915–4935.

Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry*, Zürich : Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, 199 p.

Eisenbeiss, H. (2003). *Positions- und Orientierungsbestimmung eines autonomen Helikopters - Vergleich zwischen direkter Georeferenzierung und Aerotriangulation mit Videobilddaten*, 86 p. Diploma Thesis, Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, University of Technology Dresden, Dresden.

Eisenbeiss, H. (2008). UAV photogrammetry in plant sciences and geology. In *6th ARIDA Workshop on "Innovations in 3D Measurement, Modeling and Visualization"*. Italy, Povo (Trento).

ERDAS. (2008). *LPS Project Manager - User's Guide*. ERDAS, Norcross, Georgia, USA. 440 p.

Erdogan S. (2009). A comparison of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale. *ESPL*, vol. 34, Issue 3, p. 366–376, 15.

Fraser, C.S. (1997). Digital camera self-calibration. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 52/4, p. 149–159.

Grenzdörffer, G. J., Engel, A. and Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 37 (B1), p. 1207–1213.

Grešková, A. (2002). Dynamika a transformácia nivy rieky Moravy študovaná pomocou historických máp a leteckých snímok. *Geomorphologia Slovaca*, č. 2, s. 40-44.

Hanzl, V., Sukup, K. (2001). *Fotogrammetrie 1*, Brno : Vysoké učení technické, Akademické nakladatelství CERM, 94 s. ISBN 80-214-2949-9.

Hapke, B., DiMucci, D., Nelson, R. and Smythe, W. (1996). The cause of the hot spot in vegetation canopies and soils: Shadow-hiding versus coherent backscatter. *Remote Sensing of Environment* 58, p. 63-68.

Herwitz, S. R. et. al., (2002). Remote command-and-control of imaging payloads using commercial off-the-shelf technology. In *IGARSS, Geoscience and Remote Sensing Symposium*, p. 2726-2728.

Hongoh, D., Kajiwara, K. and Honda, Y. (2001). Developing Ground Truth Measurement System using RC Helicopter and BRDF Model in Forest Area, In *Asian Association on Remote Sensing, 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore.

Horcher, A., Visser, R. J. M. (2004). Unmanned Aerial Vehicles: Applications for Natural Resource Management and Monitoring. In *Council on Forest Engineering Annual Meeting*, Hot Springs (AR), USA.

Hugget, R. J. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Oxon: Routledge.

Chandler, J. H. (1999). Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms* 24/1, p. 51–63.

Chiabrande, F., Nex, D. and Piatti, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, March 2011, vol. 38, iss. 3, p. 697-710.

Johnson, G. W., Meisner, D. E. and Johnson, W. L. (1990). Aerial Photography of the Nazca Lines. In Aveni, A., F. (ed.). *The Lines of Nazca, Memoirs of the American Philosophical Society*, Philadelphia, p. 273-283.

Karras, G. E. et. al., (1999). Digital orthophotography in archaeology with low-altitude non-metric images. In *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, WG V/2 & 5 "Photogrammetric Measurement, Object Modeling and Documentation in Architecture and Industry"*, Thessaloniki, Greece, XXXII-5/W11, p. 8-11.

Kerle, N., Heuel, S. and Pfeifer, N. (2008). Real-time data collection and information generation using airborne sensors, In Zlatanova S and Li. J. (eds.). *Geospatial information Technology for Emergency Response*. London, UK : Taylor & Francis, 2008, p. 43-74.

Kise, M., Rovira-Más, F. and Zhang, Q. (2005). A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. In *Biosystems Eng*, p. 90, 357-367.

Knighton, D. (1984). *Fluvial forms and processes*. London: Edward Arnold.

Kolejka, J. (1989). Geografické vyhodnocení digitalizovaných leteckých snímků vodních objektů. In *Sborník Československé geografické společnosti*, číslo 4, svazek 94, Praha. ISSN: 0036-5254, 17 s.

Kolejka J., Plánka L., Trnka J. (2001). Rádiem řízené modely, snímkují naši krajinu. *GeoInfo*, ročník VIII, s. 41-45., ISSN: 1212-4311

Leroy, M. and Bre' on, F.-M. (1996). Angular signatures of surface reflectances from airborne POLDER data. *Remote Sensing of Environment* 57/2, p. 97-107.

Lynch, D.K. and Livingston, W. (1995). *Color and light in nature*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 254 p.

Máčka, Z., Krejčí, L. (2006). *Prognóza geomorfologického vývoje řeky Moravy v úseku od jezu hynkov po kenickou lávku: NPR Ramena řeky Moravy, CHKO Litovelské Pomoraví*. Brno.

Miřijovský, J. (2008). Hodnocení podmínek využitelnosti systému GPS jako zdroje geografických dat pro GIS v NP České Švýcarsko. In *Sborník symposia GIS Ostrava 2008*, VŠB-TU Ostrava, 7s.

Miyatsuka, Y. (1996). Archaeological real time photogrammetric system using digital still camera. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XVIII ISPRS Congress, Vienna, Austria, XXXI-B5, p. 447-452.

Murtha, P.A., Deering, D.W., Olson, C.E. Jr. and Bracher, G.A. (1997). Vegetation. In Philipson, W.R. (ed.), *Manual of photographic interpretation*. 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, United States, p. 225-255.

Newhall, B. (1969). *Airborne camera: The world from the air and outer space*. Trowbridge & London : Hasting House, 144 p.

Niranjan, S. et. al., (2007). Initial Efforts toward Mission-specific Imaging Surveys from Aerial Exploring Platforms: UAV. In *GIS development, Map World Forum*, Hyderabad, India.

Nová aplikace ŘLP - AIS View. [online]. (2009). [cit. 2012-07-03]. Dostupné z: <http://www.aeroweb.cz/clanek.asp?ID=1648&kategorie=30>.

Pavelka, K. (2002). *Fotogrammetrie 10*, 2.přeprac. vyd. Praha: FSv ČVUT, 198 s.

Pavelka, K. (2003). *Fotogrammetrie 20*, 2.přeprac.vyd. Praha: FSv ČVUT, 193 s.

Petyniak, O. (2012). *Analýza současného vývoje reliéfu Kenického meandru*. Olomouc, 2012. 67 s. Bakalářská práce.

Plánka, L. (1984). Metoda leteckého snímkování z malých výšek. *Zprávy geografického ústavu ČSAV*, ročník 21, číslo 3. Brno, 10 s. ISSN 0375-6122.

Plánka L. (1988). Metoda leteckého snímkování z malých výšek. In *Sborník prací: Využití moderních metod pro geografický výzkum životního prostředí*. I. Československo - jugoslávský seminář, Brno. 9 s.

Przybilla, H. J., Wester-Ebbinghaus, W. (1979). Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. In *Bildmessung und Luftbildwesen, Zeitschrift fuer Photogrammetrie und Fernerkudung*, vol. 47, no. 5, p. 137-142.

Rango, A., Laliberte, A.S., Steele, C., Herrick, J.E., Bestelmeyer, B., Schmutge, T., Roanhorse, A. and Jenkins, V. (2006). Using unmanned aerial vehicles for rangelands: Current applications and future potentials. *Environmental Practice* 8/3, p. 159–168.

Rapant, P. (2002). *Družicové polohové systémy*. VŠB - TU Ostrava.

Reidelstuerz, P. et. al., (2007). UAV (unmanned aerial vehicles) für Präzisionslandwirtschaft. 13. In *Bornimer Agrartechnische Berichte*. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming., p. 61, 75-84.

Shaw, J. (1994). *Landscape photography: Professional techniques for shooting spectacular scenes*. Amphoto, Watson-Guption Publ., New York, 144 p.

Slovenská Republika. (2001). Zákon č. 241 z 30. mája o ochrane utajovaných skutočností a o zmene a doplnení niektorých zákonov. Sbírka zákonů Slovenské republiky. Dostupný z: <http://www.zbierka.sk/predpisy/241-2001-z-z.p-5782.pdf>.

Stehlík, O. (1981). Československá multispektrální kamera Flexaret, *Jemná mechanika a optika*, roč. 26, č. 4, s. 46-49.

Sugiura, R., Noguchi, N. and Ishii, K. (2005). Remote-sensing Technology for Vegetation Monitoring using an Unmanned Helicopter, In *Biosystems Engineering*, vol. 90, no. 4, p. 369-379.

Svobodová, J., Tuček, P., Ondráčková, J. (2009). Evaluace digitálních modelů reliéfu metodami statistické analýzy. *Geodetický a kartografický obzor*, r. 55/97, č. 9, s. 227-231.

Šimíček, M. (2012). *Neměřické kamery při fotogrammetrickém studiu památkových objektů*. Olomouc, 2012. 47 s. Bakalářská práce.

Šmejda, L. (2009). *Mapování archeologického potenciálu pomocí leteckých snímků*. Plzeň, nakladatelství ZČU v Plzni, 186 s. ISBN 978-80-7043-832-9.

Řehák, M. (2012). *Využití bezpilotních prostředků ve fotogrammetrii*. Praha, 2012. 103 s. Magisterská práce.

Vozikis, E. (1983). Analytical methods and instruments for mapping from balloon photography. *The Photogrammetric Record*, vol. 11, no. 61, p. 83-92.

Vránová, V., Vrána, J. (2005). Jívová – Tepenec, pravěké hradisko a Karlův hrad, *Archeologické památky střední Moravy* č. 9.

Vránová, V. (2009). Jívová-Tepenec (okr. Olomouc), *Přehled výzkumů* 50, Brno, 287, s. 393-394.

Vránová, V., Rybníček, M., and Kolář, T. (2010). Evaluation of results from the examination of timber casing of an underground cistern in Tepenec Castle, *Interdisciplinaria Archaeologica, Natural Sciences in Archaeology*, I/1-2, p 61-66.

Warner, W.S., Graham, R.W. and Read, R.E. (1996). *Small format aerial photography*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, United States, 348 p.

Wolf, P.R. and Dewitt, B.A. (2000). *Elements of photogrammetry with applications in GIS*. McGraw Hill, Boston, 608 p.

Zischinsky, T., Dorfner, L. and Rottensteiner, F. (2000). Application of a new Model Helicopter System in Architectural Photogrammetry. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS Congress, Amsterdam, the Netherlands, XXXIII, B5/2, p. 959 - 965.



# SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

## **Publikace v kategorii Jneimp**

Dušek, R., Miřijovský, J. (2009). Vizualizace prostorových dat: chaos v dimenzích. *Geografie - Sborník české geografické společnosti*. Česká geografická společnost, 169-178 s.

## **Publikace v kategorii Jrec**

Miřijovský, J., Pechanec, V., Burian, J. (2012). Využití bezpilotního modelu PIXY při snímkování krajiny. *Informace ČGS*, 31, č. 1, s. 11–17.

Burian, J., Miřijovský, J., Macková, M. (2011). Suburbanizace Olomouce. *Urbanismus a územní rozvoj*, 2011, 5.

Heisig, J., Burian, J., Miřijovský, J. (2011). Změny intenzity osobní automobilové dopravy a vliv na prostorovou diferenciaci suburbanizace. *Perner's Contacts*. Univerzita Pardubice, 84-91 s.

## **Publikace recenzované - ve světovém jazyce**

Miřijovský, J., Michalková, M., Trizna, M. (2012). Evaluation of a new remote sensing methodology for detailed international mapping in the V4 region. *Journal of Landscape Management* Vol. 3 / No. 2. p. 7-11.

## **Publikace v kategorii D - článek ve sborníku indexovaný v databázi Conference Proceedings Citation Index**

Miřijovský, J., Vávra, A. (2012). UAV photogrammetry in fluvial geomorphology. In *Conference Proceedings SGEM 2012*. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.

Svobodová, J., Miřijovský, J., Kilianová, H. (2012). The peculiarities of the digital surface model creation from the data acquired by small format photography. In *Conference Proceedings SGEM 2012*. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.

Pechanec, V., Vávra, A., Svobodová, J., Miřijovský, J. (2012). Phenological analysis of the landscape with the support of geographic information technologies. In *Conference Proceedings SGEM 2012*. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 1125-1132s.

Miřijovský, J., Brus, J., Pechanec, V. (2011). Utilization of a Small format aerial photography from drone PIXY concept in the evaluation of the landscape changes. In *Conference Proceedings SGEM 2011*. 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 345-352s.

Pechanec, V., Brus, J., Mirijovsky, J. (2011). Monitoring of snow risks by geo-sensors in urban areas. In *Conference Proceedings SGEM 2011*. 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 653-660s.

#### **Specializované mapy s odborným obsahem - kategorie N<sub>map</sub>**

Miřijovský, J., Petyniak, O., Uhrová, H., Michalková, M. (2012). *Morfologický vývoj Kenického meandru v letech 2011 a 2012*, číslo mapy: KGI-MIR-01. Dostupné online z <http://www.geoinformatics.upol.cz/app/v4mapping/results.html>.

#### **Konferenční příspěvky zahraniční - recenzované**

Marjanović, M., Burian, J., Miřijovský, J., Harbula, J. (2012). Urban Land Cover Change of Olomouc City Using LANDSAT Images .Issue 71, In *Conference Proceedings World Academy of Science, Engineering and Technology*, 75-81s.

Svobodová, J., Miřijovský, J., Vávra, A., Brus, J., Kilianová, H. (2012). Using of local indicators of spatial association for evaluation of spatial accuracy of DEM. In *Symposium proceedings Accuracy 2012*. 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences Florianópolis, SC, Brazil, 115-120s.

#### **Konferenční příspěvky domácí - recenzované**

Pechanec, V., Machar, I., Kilianová, H., Miřijovský, J. (2012). Environmental education: Expanding practical applications - research landscape of Litevské Pomoraví .In Svobodová, H. (ed.): *Geography and Geoinformatics: Challenge for Practise and Education*. Proceedings of 19th International Conference. Brno, Masarykova universita., 172-179s.

Miřijovský, J., Pechanec, V., Brus, J. (2010). Možnosti rozpoznávání druhů vegetace z dat DPZ .Herber, V. (ed.): In *Fyzickogeografický sborník 8*. Fyzická geografie a trvalá udržitelnost Brno, Masarykova Univerzita.

Miřijovský, J., Dušek, R. (2009). Vizualizace prostorových dat: chaos v dimenzích. 18. kartografická konference 2009, Olomouc. [CD-ROM].

Pechanec, V., Miřijovský, J. (2008). Znalostní báze krajiny pro studium ekotonů . Herber, V. (ed.): In *Fyzickogeografický sborník 6*. Fyzická geografie a trvalá udržitelnost Brno, Masarykova Univerzita, 214-218s.ISBN: 978-80-210-4780-8.

Dušek, R., Miřijovský, J. (2008). Identification of Lineaments Based on Point Phenomena Occurrence - Mathematical Model. In *16th Annual Conference Proceedings, Technical Computing Prague 2008 Humusoft*, 72-72s.

#### **Konferenční příspěvky zahraniční - nerecenzované**

Miřijovský, J., Martínek, J., Brus, J. (2011). Reconstruction of historical paths with using of small-format aerial photography. In *XXIIIrd International CIPA Symposium, Praha* : ČVÚT Praha, p. 1-7.

Miřijovský, J., Michalková, M., Bělka, L., Brus, J. (2012). Precise Close Range UAV Mapping in Difficult Field Conditions. In *XXII International Society for Photogrammetry & Remote Sensing Congress*, Melbourne.

#### **Konferenční příspěvky domácí - nerecenzované**

Miřijovský, J. (2012). The influence of the distribution and amount of ground control points on the accuracy of the aerotriangulation calculation. In: *First InDOG Doctoral Conference Proceedings*. p. 42-45.

Miřijovský, J., Pechanec, V., Štávová, Z., Voženílek, V. (2008). Metapopis při přípravě e-learningového kurzu .In. Řehout V. (ed.) *Pedagogický software 2008*. Scientific Pedagogical Publishing, České Budějovice., 247-249s.

Miřijovský, J. (2008). Hodnocení podmínek využitelnosti systému GPS jako zdroje geografických dat pro GIS v NP České Švýcarsko. In *Sborník symposia GIS Ostrava 2008*. VŠB-TU Ostrava, 7s. 978-80-254-1340-1.

Miřijovský, J., Kaňok, J. (2008). Kartografické metody výzkumu a jejich využití při hodnocení změn ekotonů. *Geografické dny Liberec 2008*, 7 s.

#### **Vyzvané přednášky v zahraničí**

2011 - *UAV mapování ve fyzické geografii*. Komenského univerzita v Bratislavě. Na pozvání prof. Minára.

2012 - *UAV fotogrammetrie*. Komenského univerzita v Bratislavě. Na pozvání prof. Minára.

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 2.1	Centrální projekce.....	15
Obr. 2.2	Prvky vnitřní orientace.....	16
Obr. 2.3	Prvky vnější orientace.....	17
Obr. 3.1	Základní koncept nasazení UAV systému. Zeleně jsou označeny laboratorní a kancelářské práce prováděné před snímkovým letem. Červeně jsou označeny práce prováděné přímo v terénu a modře jsou označeny práce kancelářské a laboratorní po ukončení snímkového letu. Samostatnou barvou je označena kategorie Legislativa.....	27
Obr. 4.1	První pokusy s UAV platformami. Balónky napuštěné héliem (vlevo), jednoduchý model vrtulníku (vpravo).....	31
Obr. 4.2	Model PIXY. Model v letu (vlevo), detail motorové části (vpravo). ....	32
Obr. 4.3	Model Hexakopter XK před startem.....	34
Obr. 4.4	Zapojení elektronického systému. Oranžové šipky naznačují směry předávání příkazů.....	35
Obr. 4.5	Různé typy kalibračních polí. Small sheet (1) (vlevo nahoře), Large sheet (2) (nahore uprostřed), Multi sheet (3) (vpravo nahoře), iWitness sheet (4) (vlevo dole), vlastní řešení (5) (vpravo dole).....	38
Obr. 4.6	Výsledné hodnoty konstanty kamery v závislosti na typu kalibrace.....	40
Obr. 4.7	Průběh radiální distorze u dvou objektivů s rozdílnou konstantou.....	42
Obr. 5.1	Vlevo - letové třídy v ČR, vpravo - letové třídy v zahraničí.....	46
Obr. 5.2	Letiště Olomouc s vyznačenou zónou ATZ.....	46
Obr. 6.1	Rozsah lokality Tepenec podle aktuální Google Maps (žlutě) a skutečný aktuální stav podle terénního šetření.....	49
Obr. 6.2	Vyhrazený prostor v aplikaci AIS View znemožňuje letecké snímání.....	50
Obr. 6.3	Břehová nátrž v lokalitě Štěpánov.....	52
Obr. 6.4	Plánování letu v oblasti Moravičany. Výška letu 150 m. ....	56
Obr. 6.5	Plánování v Mikrokopter Tool.....	57
Obr. 6.6	Neuspořádaný (vlevo) a uspořádaný (vpravo) blok snímků.....	57
Obr. 6.7	Změna typu krajiny může být potenciálně nebezpečná.....	59
Obr. 6.8	Náraz větru může model vynést mimo plánovanou letovou hladinu.....	60
Obr. 6.9	Odrazivost slunečního záření při snímání.....	62
Obr. 6.10	Rozdílná odrazivost slunečního záření při přímém (vlevo) a rozptýleném světle (vpravo).....	63
Obr. 6.11	Třpyt na snímku způsobený odraženým slunečním zářením a zvlněnou lesklou plochou.....	64
Obr. 6.12	Horká skvrna na šikmých snímcích.....	64
Obr. 7.1	Různé typy terčů používané jako vlíčovací body.....	67

Obr. 7.2	Obraz kompaktního disku ze vzdálenosti 50 m (vlevo) a obraz terče z gramofonové desky o průměru 25 cm ze vzdálenosti 80 m (vpravo).....	67
Obr. 7.3	Přirozená překážka znemožňuje správné rozmístění vlíčovacích bodů.....	69
Obr. 7.4	Příprava testování. ....	70
Obr. 7.5	Různé varianty rozmístění vlíčovacích bodů. ....	70
Obr. 7.6	Hodnocení přesnosti určení prvků vnější orientace. Vlevo souřadnice X, Y, Z. Vpravo úhly natočení kamery $\omega$ , $\varphi$ , $\kappa$ . ....	72
Obr. 7.7	Plán měření v programu Trimble Planning. ....	74
Obr. 7.8	Chybně stanovené expoziční parametry způsobily přesevětlení středové části terče.....	76
Obr. 7.9	Typy startů: hozením z ruky (vlevo), rozjetím po startovací dráze (uprostřed), kolmý start (vpravo).....	79
Obr. 7.10	Letové údaje přenášené do PC z modelu.....	79
Obr. 7.11	Zapojení telemetrie pro inerciální navigační jednotku (GPS modul není připojen). ....	80
Obr. 7.12	Software HK's Ground Control Software určený pro plánování letu a on-line navigaci.....	81
Obr. 7.13	Přistání je někdy velmi náročným manévrem. Jediná plocha možná k přistání v širokém okolí je ve vyschlém korytě toku. ....	82
Obr. 7.14	Přistání do ruky (vlevo), nepovedené přistání (vpravo).....	82
Obr. 7.15	OSD menu se záznamem letových údajů.....	83
Obr. 7.16	Vyhodnocení letových údajů zařízení Hexakopter XL.....	84
Obr. 8.1	Vliv počtu vázacích bodů na přesnost aerotriangulace. ....	86
Obr. 8.2	Rozdíly mezi vlíčovacími body (případně vázacími body) a body povrchu vyexportovanými automatickými postupy.....	91
Obr. 8.3	Problematika stínů a převisů při extrakci bodů ze snímků.....	92
Obr. 8.4	Ukázka nerovnoměrného rozložení bodů v terénu. ....	93
Obr. 8.5	Histogramy četnosti hodnot výšky v rovinaté a břehové části. ....	94
Obr. 8.6	Histogramy četnosti hodnot výšky v jednotlivých částech břehu. ....	94
Obr. 8.7	Vektorový TIN.....	96
Obr. 8.8	DMP vytvořený metodou běžný kriging při použití sférického modelu teoretického semivariogramu. ....	96
Obr. 8.9	DMP vytvořený metodou „kriging“ při použití Gaussova modelu teoretického semivariogramu. Nejlépe hodnocený DMP, ale s přílišným shlazením. ....	96
Obr. 8.10	DMP vytvořený metodou regularizovaný spline. Nejhuře hodnocený model podle RMSE i vizualizace.....	97
Obr. 8.11	Mračno bodů vizualizované v programu FugroViewer.. ....	99

Obr. 8.12 Rozdíly mezi vlíčovacími body a body vyexportovanými automatickými postupy. Číslo bodu nad sloupcem značí počet snímků, na kterém se bod nachází.....	100
Obr. 9.1 Vytvořené digitální modely povrchu. Vlevo stereofotogrammetrickou metodou, vpravo metodou SfM. ....	102
Obr. 9.2 Četnost bodů zařazených v jednotlivých kategoriích pro stereofotogrammetrickou metodu a metodu SfM. ....	103
Obr. 9.3 Vizualní rozdíl vybraného detailu v ortogonalizovaných snímcích z metody SfM (vlevo) a stereofotogrammetrie (vpravo).....	105
Obr. 10.1 Lokalizace kenického meandru. ....	109
Obr. 10.2 Výřez z reambulované mapy III. vojenského mapování, rok 1930, modře zakreslena přibližná současná poloha meandru. ....	112
Obr. 10.3 Předpokládaný vývoj meandru. Pozn.: PDH = plavená dřevní hmota = říční dřevo.....	113
Obr. 10.4 Poslední snímek kenického meandru před jeho protržením v únoru 2012. Snímek je pořízen v lednu 2012.....	114
Obr. 10.5 Vlevo šije kenického meandru 25. 2. 2012 před protržením a vpravo 2. 3. 2012 po protržení. ....	115
Obr. 10.6 Kenický meandr po protržení. Snímkování z prosince 2012. ....	116
Obr. 10.7 Lokalita Štěpánov. Vlevo stav v listopadu 2011, vpravo stav v dubnu 2012 při jarním tání.....	117
Obr. 10.8 Ortogonalizovaná mozaika štěpánovské nátrže z prosince 2011. ....	118
Obr. 10.9 Právně platný stav z Katastru nemovitostí (červená čára) versus skutečný stav (snímek z roku 2011).....	120
Obr. 10.10 Grafické zobrazení posunu břehové čáry mezi lety 2003 až 2012. ....	121
Obr. 10.11 Břehová nátrž v Moravičanech. Vlevo měření stanoviska, vpravo břehová nátrž v době jarního tání. Moravou protékají tzv. korytotvorné průtoky. ....	122
Obr. 10.12 Ortogonalizovaná mozaika nátrže v Moravičanech z roku 2011. ....	124
Obr. 10.13 Ortogonalizovaná mozaika nátrže v Moravičanech z roku 2011. ....	126
Obr. 10.14 Perspektivní zobrazení 3D modelu archeologické lokality. ....	128
Obr. 10.15 Detailní výřez snímku archeologické lokality ukazuje jednu z výhod UAV snímkování. Prostorová rozlišovací schopnost snímku je 1,5 cm. ....	129
Obr. 10.16 Plán lokality používaný archeology. ....	131
Obr. 10.17 Archeologická výzkumná plocha v perspektivním zobrazení. ....	132
Obr. 10.18 Perspektivní zobrazení jednoho výzkumného čtverce. ....	133

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Dělení UAV systémů. ....	23
Tab. 2.2 Hodnocení UAV systémů; 0: nejnižší hodnota, +: průměrná hodnota, ++: nejlepší hodnota. ....	23
Tab. 4.1 Základní parametry použitých kamer. ....	37
Tab. 4.2 Výsledky kalibrace kamery Canon EOS 500D s RMS chybou menší než 0,5. ....	41
Tab. 4.3 Výsledné hodnoty kalibrovaných neměřických komor. ....	42
Tab. 6.1 Srovnání objektivů pro různé typy kamer. ....	51
Tab. 6.2 Vliv nadmořské výšky na tlak a hustotu vzduchu. ....	61
Tab. 7.1 Technické parametry přístroje HiPerII. ....	73
Tab. 7.2 Hypefokální vzdálenost ve vztahu k hloubce ostrosti. ....	77
Tab. 8.1 Přesnost výpočtu AAT pomocí kontrolních bodů. ....	88
Tab. 8.2 Parametry pro automatickou extrakci bodů. ....	90
Tab. 8.3 Závěrečné hodnocení z poslední iterace dvou automatických extrakcí. ....	91
Tab. 8.4 Nastavení interpolačních metod pro tvorbu DSM a výsledné hodnoty RMSE. ....	95
Tab. 8.5 Přesnost automatické extrakce bodů metodou SfM. ....	99
Tab. 9.1 Přesnost geodeticky zaměřených bodů. ....	101
Tab. 9.2 Porovnání přesnosti digitálních modelů vytvořených stereofotogrammetrickou metodou a metodou SfM. ....	102
Tab. 9.3 Intervaly pro zařazení jednotlivých bodů. ....	103
Tab. 9.4 Statistické porovnání přesnosti ortogonalizovaných snímků pro souřadnici X. ....	104
Tab. 9.5 Statistické porovnání přesnosti ortogonalizovaných snímků pro souřadnici Y. ....	104
Tab. 9.6 Metada laserového skenování. ....	106
Tab. 9.7 Statistické porovnání přesnosti 3D modelů z UAV fotogrammetrie s daty z laserového skenování. ....	106
Tab. 10.1 Seznam získaných historických mapových zdrojů pro oblast kenického meandru. ....	111
Tab. 10.2 Parametry snímkování a zpracování. ....	116
Tab. 10.3 Parametry snímkování a zpracování dat. ....	117
Tab. 10.4 Posun břehové hrany mezi lety 2003 až 2012. ....	119
Tab. 10.5 Analýza množství odplaveného materiálu. ....	120
Tab. 10.6 Parametry snímkování a zpracování dat. ....	123
Tab. 10.7 Posun břehové hrany mezi lety 2011 a 2012. ....	125
Tab. 10.8 Analýza množství odplaveného materiálu. ....	125

Tab. 10.9 Parametry snímkování a zpracování dat.....	128
Tab. 10.10 Parametry snímkování a zpracování dat.....	131
Tab. 11.1 Výsledné hodnoty kalibrovaných neměřických komor.....	134
Tab. 11.2 Vliv počtu vlíčovacích bodů na přesnost AAT.....	136



## SUMMARY

The main objective of the thesis is to build a concept of UAV deployment in photogrammetry for highly accurate collecting of geodata, and to verify it on case studies related to applied research. The proposed concept is a systematically organized set of partial technological and methodological procedures, undertaken during the course of work with the UAV system. The main aims of the thesis were:

- Definition of basic parameters of the camera for use in UAV photogrammetry, which are related to the use of non-professional aerial cameras.
- Analysis of the accuracy of camera calibration in relation to the overall accuracy of the output.
- Study of the relation of ground control points distribution to the accuracy of the aerotriangulation calculation.
- Analysis of the impact of atmospheric and light conditions to the resulting image quality.
- Quantification and qualification of all possible spatial errors entering the system collection – data evaluation.

All parts of the concept had to be properly tested; therefore, the second part of the thesis includes the design of five case studies related to practical applications. Three case studies were made in the field of fluvial geomorphology and two in the field of archaeology.

The methods, tools and know-how used to achieve the goals of the thesis, included photogrammetry, remote sensing, geodesy, statistics, geographic information systems, computer and electronic systems. The proposed concept of the UAV systems in photogrammetry was verified on experimental and real-world data from the corresponding fields. Two photogrammetric methods for UAV were used: Stereophotogrammetry and Structure from Motion. To achieve the given goals, UAV platforms, which are based on a remote-control device, or which operate in automatic mode, had to be taken into account. Attention was also given to methods of photogrammetry, either in the flight part or in the processing part (Chapters 6.2, 6.3, 8). Aerotriangulation or camera calibration was addressed in chapters 4.3 and 8.1.1.

The main outcome of the thesis is the proposed concept of the UAV technology deployment in photogrammetry, and also the five introduced case studies. The proposed concept includes all the necessary components that are required for its proper functionality. The author suggested procedures for the imaging set-up, flight planning, and field work, including the flight and data processing. Moreover, data processing methods (including quantification of spatial errors) were designed and verified, and two methods for UAV photogrammetry data processing were tested (Stereophotogrammetry and Structure from Motion, cf. Chapter 8).

While conforming to the assumptions and limitations of the methods, the author proved that the accuracy of the outputs is comparable, or even better than in other photogrammetric applications. The accuracy of the outputs of UAV photogrammetry was compared with the results of laser scanning data, and it was demonstrated that UAV photogrammetry can easily compete with these techniques of data collection (Chapter 9).

In the last part of the thesis, five case studies in the fields of fluvial geomorphology and archaeology were introduced (Chapter 10). The case studies are a part of a broader scientific research and demonstrate the usability of the UAV technology in applied research. The outputs of selected parts of the case studies are 3D terrain or surface models of an area of interest, orthophoto images, photo plans, and maps. All results are based on the collection, processing and evaluation of the UAV data.

UAV photogrammetry can be used in many fields, not only in the field of geography and geographic information systems. The thesis can be employed especially by the users who work with UAV systems in photogrammetry. The outcomes can be helpful for scientists who need geometrically accurate data from the airplane photos. Applications to other fields, such as geomorphology, biogeography, ecology, cartography, archaeology and other disciplines, can also be found in the literature. The results of this thesis should serve as a guideline, helping to obtain a very accurate data with a precision better than ten centimetres.

Regarding the theoretical research, there are still many open questions, for which it is possible to find appropriate solutions. In particular, it is possible to name the area more suitable calibration procedures for non-metric cameras, or creation of a new lens which will be better for usage in close-up remote sensing. The aforementioned open problems lie in the scope of the author's future research.

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

## Vázané přílohy:

- Příloha 1      Legislativní požadavky pro UAV systémy.
- Příloha 2      Specializovaná mapa. Morfologický vývoj kenického meandru v letech 2011 a 2012.
- Příloha 3      Ortogonalizovaná mozaika kenického meandru po protržení. Stav v prosinci 2012.
- Příloha 4      Ortogonalizovaná mozaika archeologické výzkumné plochy Zvole v září 2011.
- Příloha 5      Ortogonalizovaná mozaika archeologické výzkumné plochy Zvole v listopadu 2011.
- Příloha 6      Ortogonalizovaná mozaika archeologické výzkumné plochy Tepenec.
- Příloha 7      Detail základů kuchyně v archeologické výzkumné ploše Tepenec.
- Příloha 8      Detail základů objektu v archeologické výzkumné ploše Tepenec.

## Volné přílohy

- Příloha 9      DVD

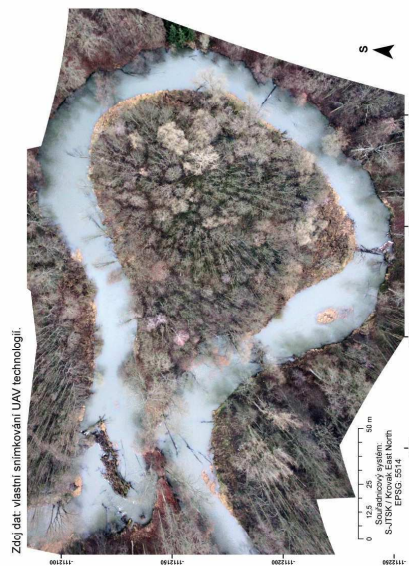
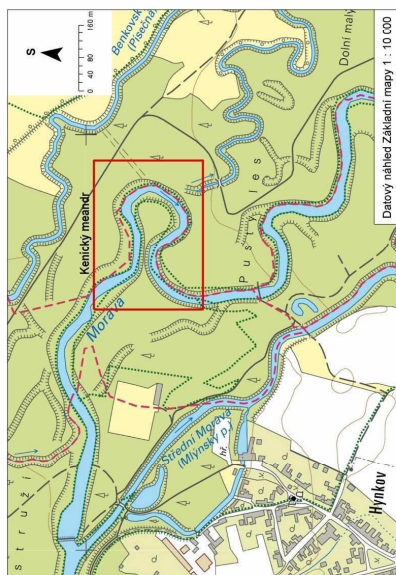
## Struktura DVD:

Adresář	Podadresář	Obsah
DMP	kenicky	Digitální modely povrchu ze zájmových lokalit ve formátu TIF. Z lokality Tepenec navíc dva KMZ soubory.
	natrz_moravicany	
	natrz_stepanov	
	tepenec	
	zvole	
Ortofoto	kenicky	Ortogonalizované mozaiky zájmových lokalit ve formátu TIF.
	natrz_moravicany	
	natrz_stepanov	
	tepenec	
	zvole	
Text		Text disertační práce

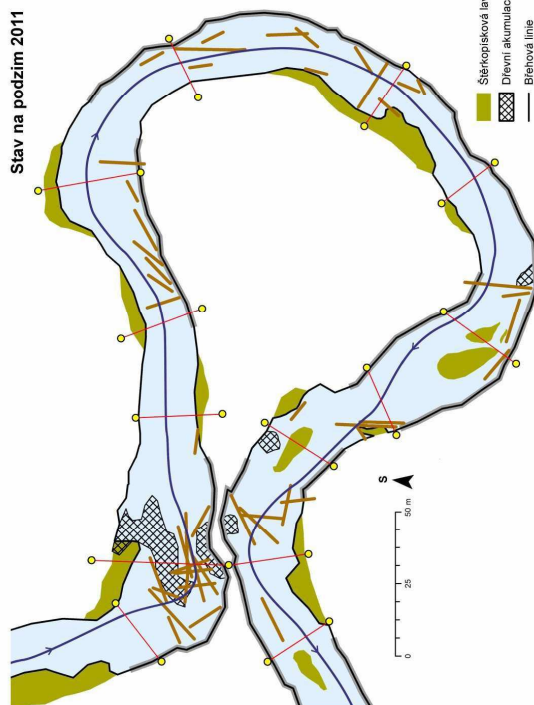


## Příloha 2 Specializovaná mapa. Morfologický vývoj kenického meandru v letech 2011 a 2012.

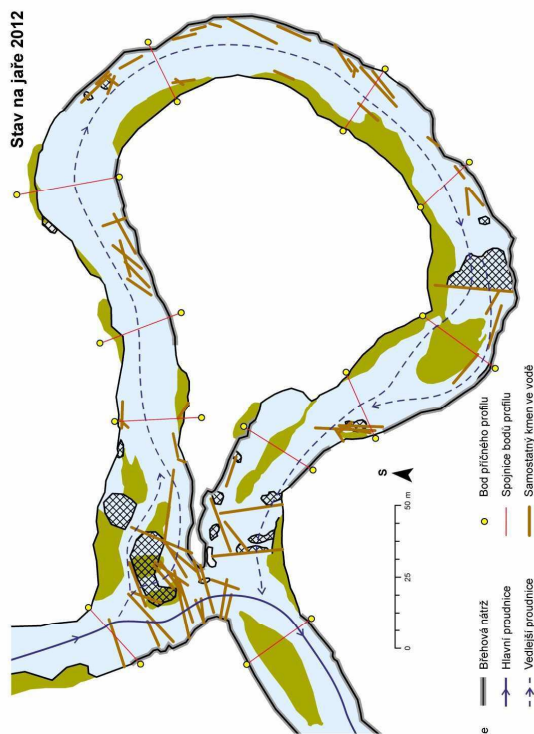
# MORFOLOGICKÝ VÝVOJ KENICKÉHO MEANDRU v letech 2011 a 2012



Stav na podzim 2011

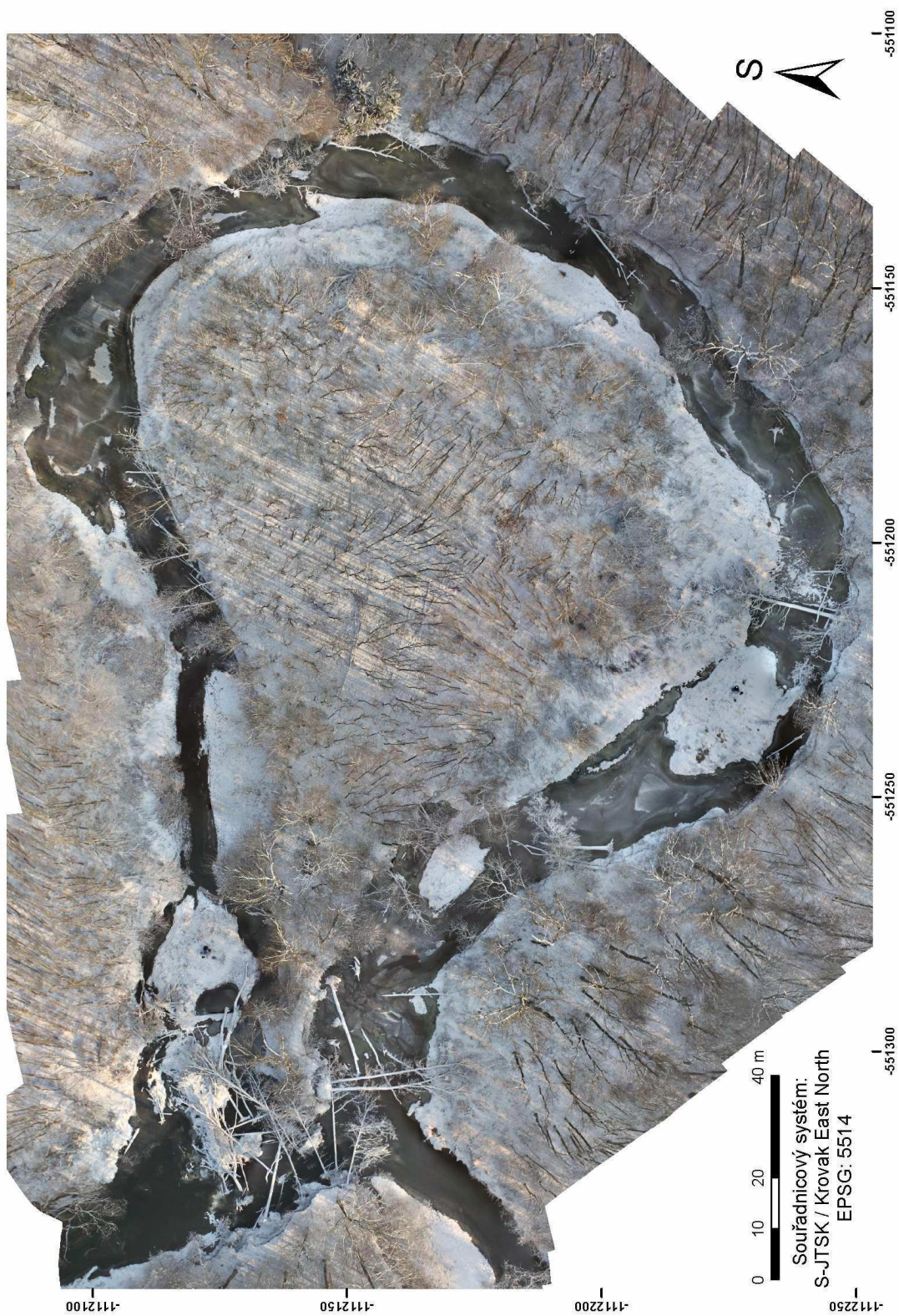


Stav na jaře 2012



- Šterkopišková lavice
- Dřevní akumulace
- Břehová linie
- Břehová nádrž
- Hlavní proudnice
- Vedlejší proudnice
- Bod příčné profilu
- Spojnice bodů profilu
- Samostatný kmen ve vodě

**Příloha 3 Ortogonalizovaná mozaika kenického meandru po protržení. Stav v prosinci 2012.**

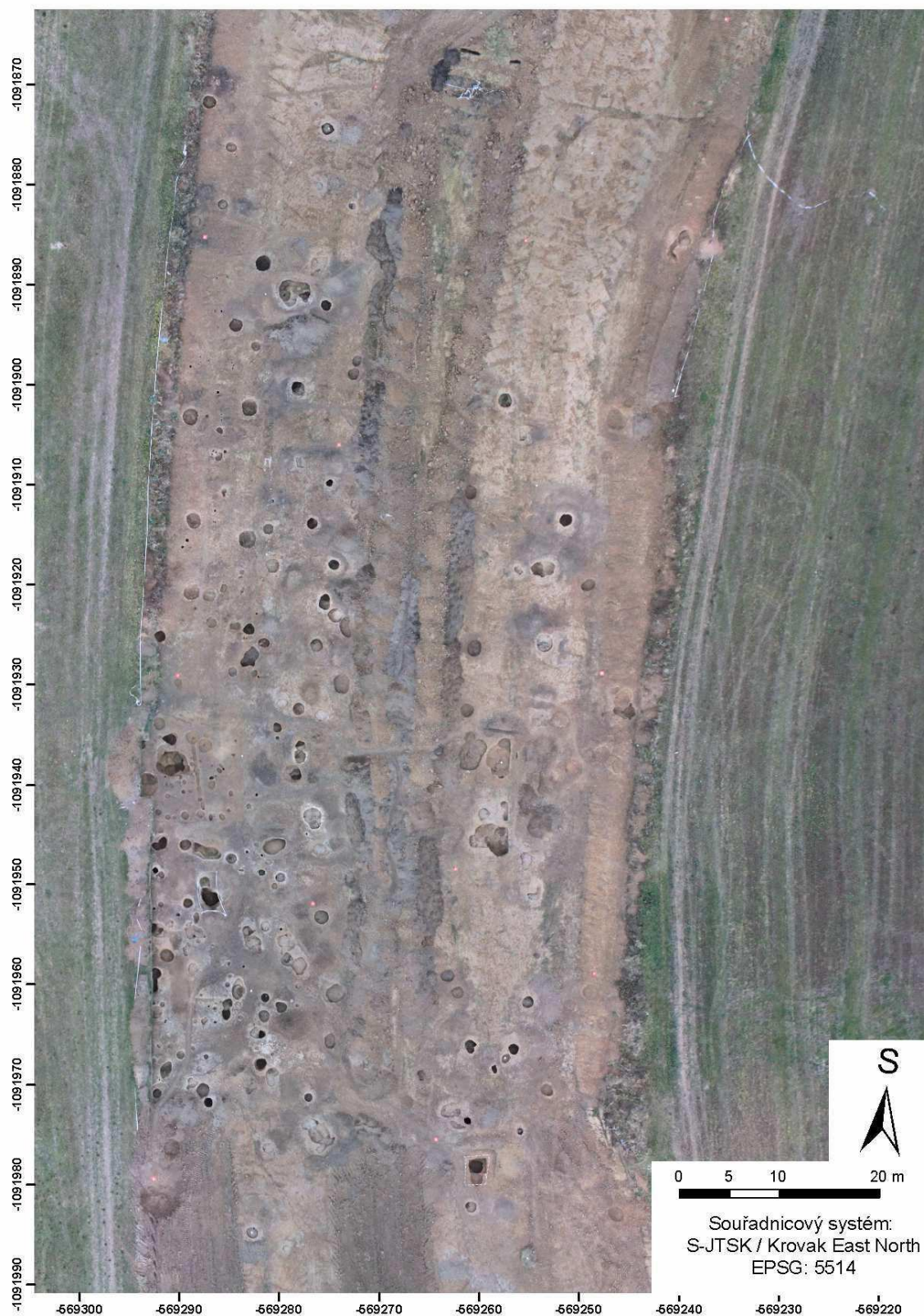


**Příloha 4 Ortogonalizovaná mozaika archeologické výzkumné plochy Zvole v září 2011.**

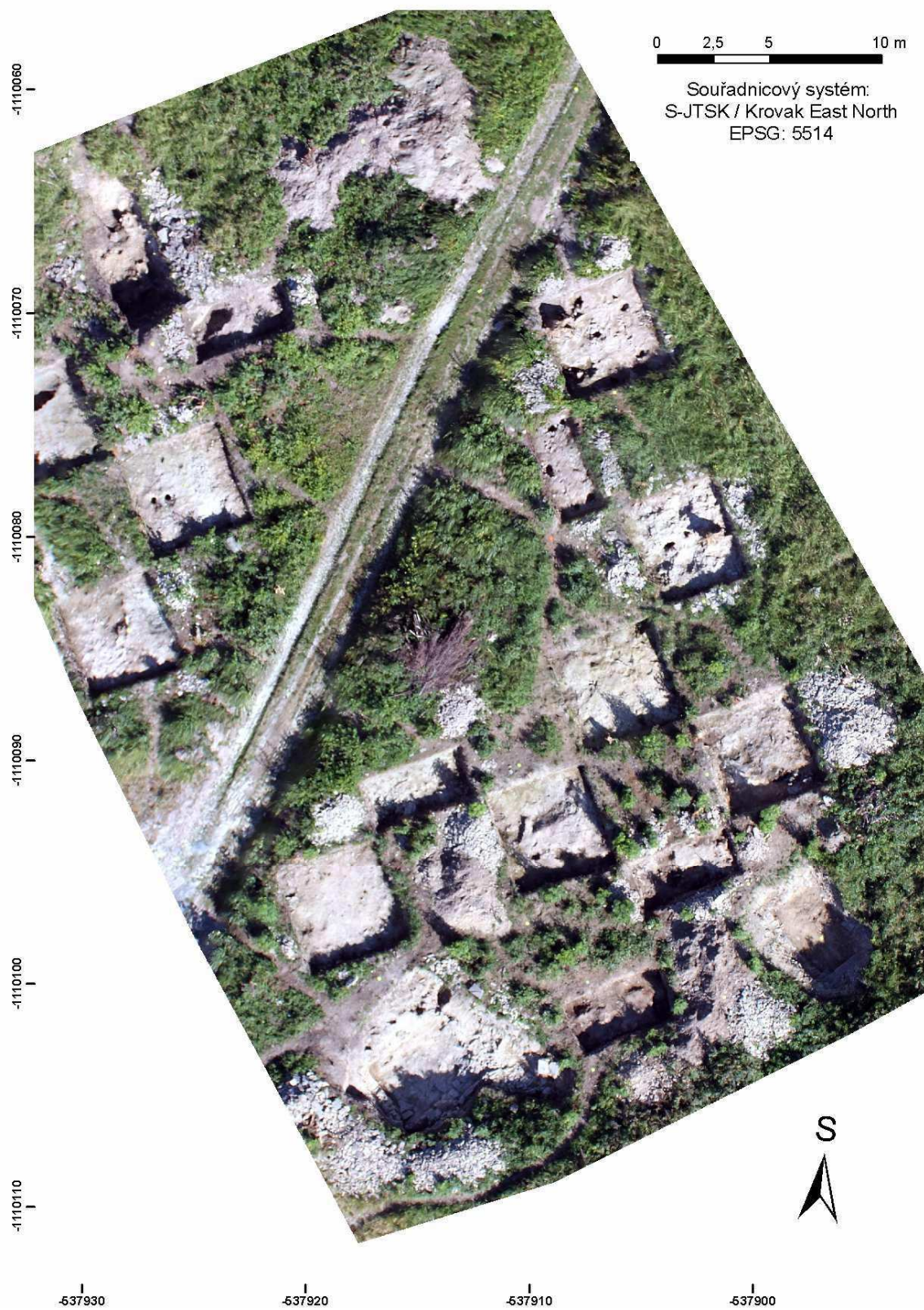




**Příloha 5 Ortogonalizovaná mozaika archeologické výzkumné plochy Zvole v listopadu 2011.**



## Příloha 6 Ortogonalizovaná mozaika archeologické výzkumné plochy Tepenec.



Příloha 7 Detail základů kuchyně v archeologické výzkumné ploše Tepenec.



**Příloha 8 Detail základů objektu v archeologické výzkumné ploše Tepenec.**





**KATEDRA GEOINFORMATIKY**

Univerzita Palackého v Olomouci | Přírodovědecká fakulta

**FOTOGRAMMETRICKÝ PŘÍSTUP  
PŘI SBĚRU GEODAT POMOCÍ  
BEZPILOTNÍCH LETECKÝCH ZAŘÍZENÍ**

**AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE**

Studijní program: P1314 Geografie

Obor studia: 1302V011 Geoinformatika a kartografie

Školitel: prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

**RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ**

**PHOTOGRAMMETRIC APPROACH TO COLLECTING  
GEODATA USING BY UNMANNED AERIAL VEHICLE**

**Ph.D. THESIS SUMMARY**

Study Programme: P1314 Geography

Specialization: Geoinformatics and Cartography

Supervisor: prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

**Department of Geoinformatics**

Faculty of Science, Palacký University in Olomouc

**Olomouc 2013**

*Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.*

*Dissertation thesis was compiled within Ph.D. study at the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University in Olomouc.*

**Předkladatel / Submitter:**

RNDr. Jakub Miřijovský

**Školitel / Supervisor:**

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

Katedra geoinformatiky

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

17. listopadu 50

771 46 Olomouc

**Oponenti / Opponents:**

doc. RNDr. Jaromír Kolejka, CSc. (Masarykova univerzita)

doc. RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D. (Univerzita Karlova v Praze)

prof. Ing. Ján Tuček, CSc. (Technická univerzita vo Zvolene)

Autoreferát byl zaslán dne / Summary was posted on: 31. 1. 2013

Obhajoba disertační práce se koná dne \_\_\_\_\_ před komisí pro obhajoby disertačních prací doktorského studia v oboru P1314 Geografie, studijním oboru 1302V011 Geoinformatika a kartografie, v prostorách Katedry geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

The defence of the dissertation thesis will be held on \_\_\_\_\_ at the commission for the defence of dissertation thesis of Ph.D. degree in study programme P1314 Geography, specialization Geoinformatics and cartography, in the premises of the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University in Olomouc, 17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

*S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 77 46 Olomouc.*

*The dissertation thesis is available at the Study Department, Faculty of Science, Palacký University in Olomouc, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc.*

© Jakub Miřijovský, 2013

ISSN 1805-7500

## Obsah

Abstrakt .....	4
1. Úvod.....	5
2. Cíle práce.....	6
3. Koncept nasazení UAV technologií .....	7
4. Výsledky .....	9
5. Diskuse.....	22
6. Závěr .....	23
Odborný životopis autora .....	24

## Contents

Abstract.....	26
1. Introduction.....	27
2. Aims of the study .....	27
3. Methods and processing procedure .....	28
4. Results and Discussion .....	29
5. Conclusion .....	30
Author's professional Curriculum Vitae.....	31
Seznam vybraných publikací autora souvisejících s disertační prací / Author's selected publications related to the dissertation .....	33
Úplný seznam publikací autora / All author's publications .....	34

## Abstrakt

Disertační práce představuje původní autorský přístup k nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii. V práci je využito dvou bezpilotních systémů a autor dokazuje jejich využitelnost v aplikacích přesného sběru geodat.

První část práce se zabývá konceptem nasazení UAV systému a jeho požadavky. Na systém je kladeno množství technologických i netechnologických požadavků, které musí být splněny. V první části práce je řešena kalibrace kamer, tvorba letového plánu, získávání letového povolení a jsou řešeny legislativní aspekty pro splnění podmínek k provozu bezpilotních systémů v České republice.

Druhá část se věnuje terénním pracím a snímkovému letu. V rámci kapitoly jsou řešeny různé typy vlíčovacích bodů a jejich zaměření. Dále je řešeno nastavení expozičních parametrů kamery. V neposlední řadě je řešena problematika samotného snímkového letu a kontroly získaných dat.

Třetí část práce se zabývá různými metodami zpracování dat včetně jejich přesnosti. Část práce se zabývá interpolačními metodami pro tvorbu 3D modelu povrchu. Jsou analyzovány metody Structure from Motion a metoda stereofotogrammetrická. Přesnost výstupů je hodnocena na základě dvou nezávislých referenčních datových zdrojů. Data z UAV fotogrammetrie jsou porovnána s daty geodetického měření a leteckého laserového skenování. Hodnocení přesnosti je provedeno pro 3D model a pro ortogonalizovaný snímek.

Poslední část práce se věnuje případovým studiím. Jsou uvedeny tři případové studie z oblasti fluvialní geomorfologie a dvě studie z oblasti archeologie. Případové studie dokazují využitelnost UAV fotogrammetrie v oblastech aplikovaného výzkumu.

Klíčová slova:

fotogrammetrie, UAV, digitální model povrchu, bezpilotní, snímek



## 1. Úvod

V dnešní době je naprosto běžné používat v geovědním výzkumu data dálkového průzkumu Země (DPZ). Jde o neustále se rozvíjející obor, který nachází uplatnění v mnoha oborech a odvětvích, ať už vědecké či komerční sféry.

Při snímkování z výšek maximálně 30 metrů nad povrchem je možné použít visutých plošin, případně snímkovat z vysokých budov a věží. Pokud je nutné získat snímky z větší výšky, je potřeba použít modelů letadel nebo jiných platforem schopných snímkovat ve výškách kolem 100 m. Mezi nejdůležitější nevědecké přínosy pro odborníky z různých oborů patří cena a operabilita. Velmi cenné vědecké poznatky přináší zejména kombinace pozemních metod s přidáním vizuální informace ze snímkování z modelů. Vlastní tvorba leteckých fotografií nabízí maximální operabilitu jak časovou, tak i technickou. Technické parametry kamery a nosiče umožňují volit nejen čas a místo snímkování, ale také úhel snímkování, šířku záběru nebo nastavení expozice. Vlastní snímkování přináší velké výhody při výzkumu v oblastech, kde je nezbytné použít letecké snímky s velmi vysokým rozlišením a vysokou geometrickou kvalitou. V takovém případě se snímky z nízkých výšek stávají neocenitelným zdrojem dat. S potřebou získávat velmi přesné a geometricky kvalitní snímky vyvstává celá řada vědeckých otázek kolem kalibrací kamer, rozmístění vlíčovacích bodů nebo letových vlastností modelů samotných. Výsledné produkty pak nacházejí uplatnění v širokém spektru odborných disciplín od geomorfologie, přes zemědělství až po archeologii. Věda získává nový nástroj a metody pro získávání velmi přesných leteckých dat. Nástroj se tak stává součástí geoaplikací, ve kterých může pomoci při hledání odpovědí na geografické a analytické otázky. Bezpilotní letecká zařízení se běžně v odborné literatuře označují zkratkou UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

## 2. Cíle práce

Disertační práce si klade za cíl sestavit koncept nasazení UAV technologií ve fotogrametrii pro velmi přesný sběr geodat a ověřit jej na případových studiích aplikovaného výzkumu. Vytvořený koncept představuje systematicky uspořádaný soubor dílčích technologických a metodologických procedur, realizovaných při průběhu práce s UAV systémem. Jedná se zejména o:

- určení základních parametrů kamery pro použití v UAV fotogrametrii, které souvisí s použitím neprofesionálních leteckých komor,
- analýzu míry přesnosti kalibrace kamery ve vztahu k celkové přesnosti výstupu,
- volbu správného výpočtu prvků vnější orientace při absenci GPS/IMU přístroje,
- vliv rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výpočtu,
- analýzu vlivu atmosférických a světelných podmínek na kvalitu výstupu,
- kvantifikování a kvalifikování všech možných prostorových chyb vstupujících do systému sběr – vyhodnocení dat.

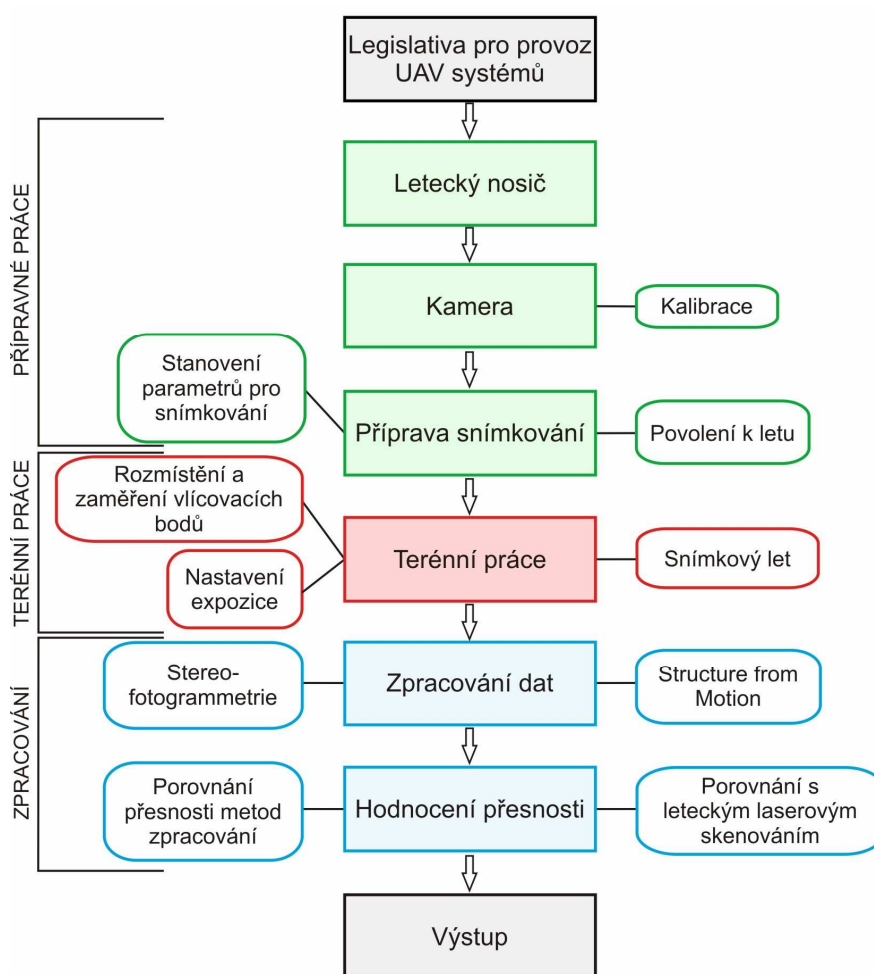
K nalezení řešení na předcházející úkoly je nezbytné řešit:

1. Vliv počtu vlíčovacích bodů na přesnost AAT
2. Doporučení postupů pro zaměřování a přesnost vlíčovacích bodů
3. Stanovení základních parametrů pro správnou extrakci bodů ze snímků pomocí autokorelačních metod včetně výpočtů přesnosti
4. Provedení analýzy interpolačních metod z dat extrahovaných z UAV fotogrammetrie
5. Určení absolutní přesnosti DMP ze stereofotogrammetrie a SfM metody na reálných datech v testovacím území
6. Analýza ortogonalizovaných snímků a stanovení absolutní přesnosti včetně vyvození patřičných závěrů
7. Porovnání dat z laserového skenování s daty UAV fotogrammetrie v testovacím území

Sestavený koncept je ověřen na pěti případových studiích z oblasti fluvialní geomorfologie a archeologie.

### 3. Koncept nasazení UAV technologií

Navržený koncept představuje základní stavební kameny nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii, které autor v průběhu doktorského studia ověřil. Obrázek 1 představuje sestavený koncept nasazení UAV technologií ve fotogrammetrii. Ve schématu jsou zobrazeny nejdůležitější části konceptu. Každá z uvedených oblastí schématu se ve většině případů dále dělí na detailnější části, které jsou uvedeny v samostatných kapitolách práce.



Obr. 1 Základní koncept nasazení UAV systému.

#### Popis konceptu

Disertační práce má povahu metodické studie s ověřením na experimentálních a reálných datech. Metody a postup práce jsou zpracovány v jednotlivých kapitolách, které se týkají daného tématu (konceptu). Z převažující části se jedná o přímo autorem navržený a vytvořený postup.

## **Letecký nosič**

Část nazvaná *Letecký nosič* představuje detailní popis dvou systémů, které byly vybrány pro fotogrammetrické snímkování v předkládané práci. Podkapitola se dále věnuje povoleným frekvencím na území ČR pro provoz UAV systémů.

## **Kamera**

Jsou představeny používané metody a postupy pro kalibraci kamer, které se využívají ve fotogrammetrii. V navazující části jsou popsány různé přístupy autora k laboratorní kalibraci použité kamery. Pro práci v této části byly využity zejména metody průsekové fotogrammetrie.

## **Příprava snímkování**

Část konceptu *Příprava snímkování* představuje autorem navržený ideální postup prací pro ověření podmínek letu v zájmové lokalitě, pro návrh letových os a stanovení parametrů letu. Autor práce na konkrétním příkladu ukazuje použití letecké mapy ICAO a aplikace AIS View. Jsou popsány jednotlivé parametry snímkování, na které navazuje příklad výpočtu všech parametrů letu.

## **Terénní práce**

V kapitole *Terénní práce a snímkový let* je autorem navržen optimální postup pro práce prováděné v terénu. V samostatném experimentu dokazuje vliv geometrického uspořádání a rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výstupů. Kapitola pokračuje představením řešení pro správné nastavení expozice a problémů, které mohou vzniknout při nastavení nesprávném.

## **Zpracování dat**

Zpracování dat bylo provedeno metodami digitální stereofotogrammetrie a metodou Structure from Motion. Jsou představeny provedené analýzy vlivu různého nastavení parametrů na výpočet aerotriangulace, automatickou extrakci bodů ze snímků a rovněž je provedeno testování vhodnosti různých interpolačních metod pro tvorbu DMP. V další části je představen postup zpracování dat metodou Structure from Motion s hodnocením přesnosti výpočtu.

## **Hodnocení přesnosti**

Pro ověření reálné chybovosti modelů bylo provedeno testovací snímkování s následnou analýzou dat z reálného prostředí. Data byla konfrontována s daty geodetického měření a s daty z leteckého laserového skenování. Cílem bylo ověřit přesnost metod zpracování a zjistit, zda výstupy splňují kritéria pro fotogrammetrické aplikace. Pro hodnocení bylo využito popisné statistiky používané v geodézii a v fotogrammetrii.

## 4. Výsledky

Hlavním výsledkem disertační práce je navržený a ucelený koncept UAV snímkování a UAV fotogrammetrie, zahrnující aspekty základního i aplikačního výzkumu. Tento koncept představuje řešení základních otázek formulovaných v kapitole *Cíle*. Nejvýznamnějšími dosaženými výsledky jsou poznatky doplňující navržený koncept UAV snímkování a UAV fotogrammetrie a prokazující jeho použitelnost v odborné praxi. Patří k nim zejména:

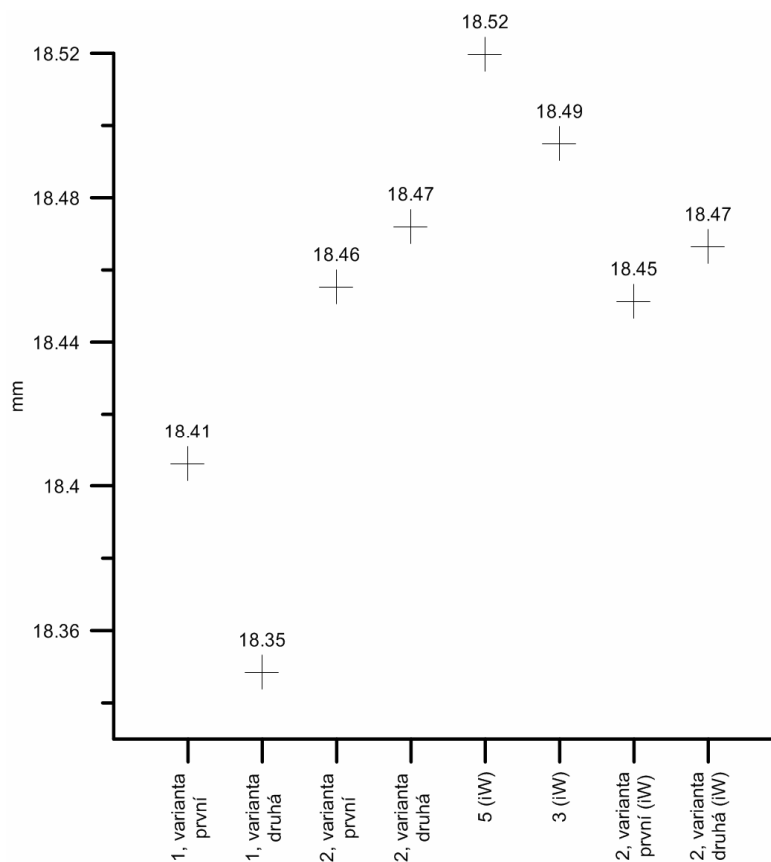
### Určení základních parametrů kamery pro použití v UAV fotogrammetrii, které souvisí s použitím neprofesionálních leteckých komor

Výsledky různých kalibračních postupů a použití různých testovacích polí potvrzují, že nelze jednoznačně upřednostnit jeden konkrétní postup nebo kalibrační pole. V tabulce 1 jsou uvedeny všechny výsledky provedených kalibrací s celkovou RMSE chybou menší než 0,5 mm.

**Tabulka 1 Výsledky kalibrace kamery Canon EOS 500D s RMS chybou menší než 0,5.**

Kalibrační pole	Program	f (mm)	x <sub>p</sub> (mm)	y <sub>p</sub> (mm)
1, varianta první	PM	18,4061	0,002	0,003
1, varianta druhá	PM	18,3483	0,002	0,002
2, varianta první	PM	18,4552	9,30E-04	0,001
2, varianta druhá	PM	18,4719	0,001	0,001
5	iW	18,5196	-0,133	0,194
3	iW	18,4948	-0,099	0,134
2, varianta první	iW	18,4512	-0,081	0,140
2, varianta druhá	iW	18,4663	-0,128	0,136
Kalibrační pole	K1	K2	K3	RMS error
1, varianta první	$5,56 \cdot 10^{-4}$	$-1,34 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,401
1, varianta druhá	$5,63 \cdot 10^{-4}$	$-1,34 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,252
2, varianta první	$5,40 \cdot 10^{-4}$	$-1,16 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,177
2, varianta druhá	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$-1,16 \cdot 10^{-6}$	0,00	0,163
5	$5,28 \cdot 10^{-4}$	$-1,1 \cdot 10^{-6}$	$-1,21 \cdot 10^{-9}$	0,280
3	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$-8,1 \cdot 10^{-7}$	$-3,03 \cdot 10^{-9}$	0,260
2, varianta první	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$-1,3 \cdot 10^{-6}$	$-9,75 \cdot 10^{-11}$	0,280
2, varianta druhá	$5,19 \cdot 10^{-4}$	$-8,5 \cdot 10^{-7}$	$-2,33 \cdot 10^{-9}$	0,200

Z tabulky je zřejmé, že i při stejné hodnotě RMSE chyby, se mohou prvky vnitřní orientace mírně lišit. Graficky jsou rozdílné hodnoty znázorněny v obrázku 2.



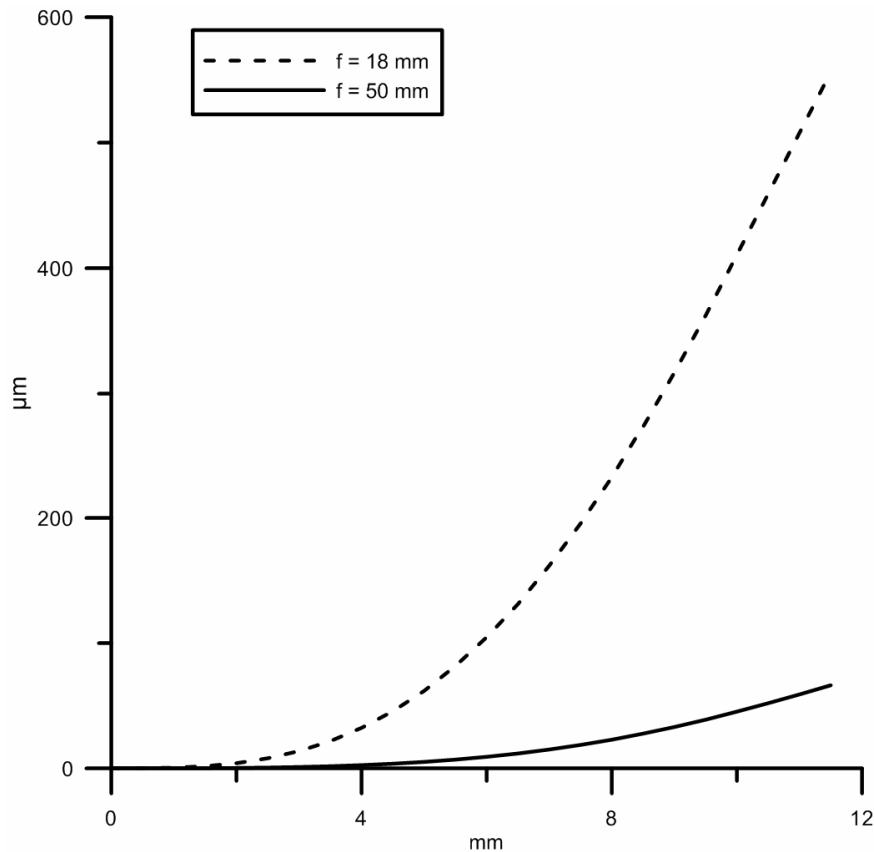
Obr. 2 Výsledné hodnoty konstanty kamery v závislosti na typu kalibrace.

Rozdílné hodnoty na výsledcích kalibrací jsou způsobeny zejména nestabilitou optických členů objektivu neměřické kamery. Výsledné zprůměrované hodnoty, které dále vstoupily do procesu zpracování dat, jsou uvedeny v tabulce 2.

**Tabulka 2 Výsledné hodnoty kalibrovaných neměřických komor.**

Kamera	f (mm)	x <sub>p</sub> (mm)	y <sub>p</sub> (mm)	x <sub>0</sub> (mm)	y <sub>0</sub> (mm)
EOS 500D	18,45168	-0,05443	0,076238	11,1125	7,5207

Hodnoty radiální distorze objektivu s ohniskovou vzdáleností 18 mm jsou uvedeny v grafu na obrázku 3.



Obr. 3 Průběh radiální distorze u dvou objektivů s rozdílnou konstantou.

Pro srovnání byl analyzován i objektiv s konstantou komory 50 mm, jehož hodnoty radiální distorze jsou v grafu také uvedeny. Vysoké hodnoty radiální distorze lze pozorovat zejména u objektivu s konstantou 18 mm. To je negativní důsledek širokého úhlu záběru. U objektivu snímkovací kamery autor doporučuje provádět v pravidelných intervalech kontrolní kalibrace, protože relativně levné kamery trpí nestabilními optickými členy a prvky vnitřní orientace se při používání mírně mění.

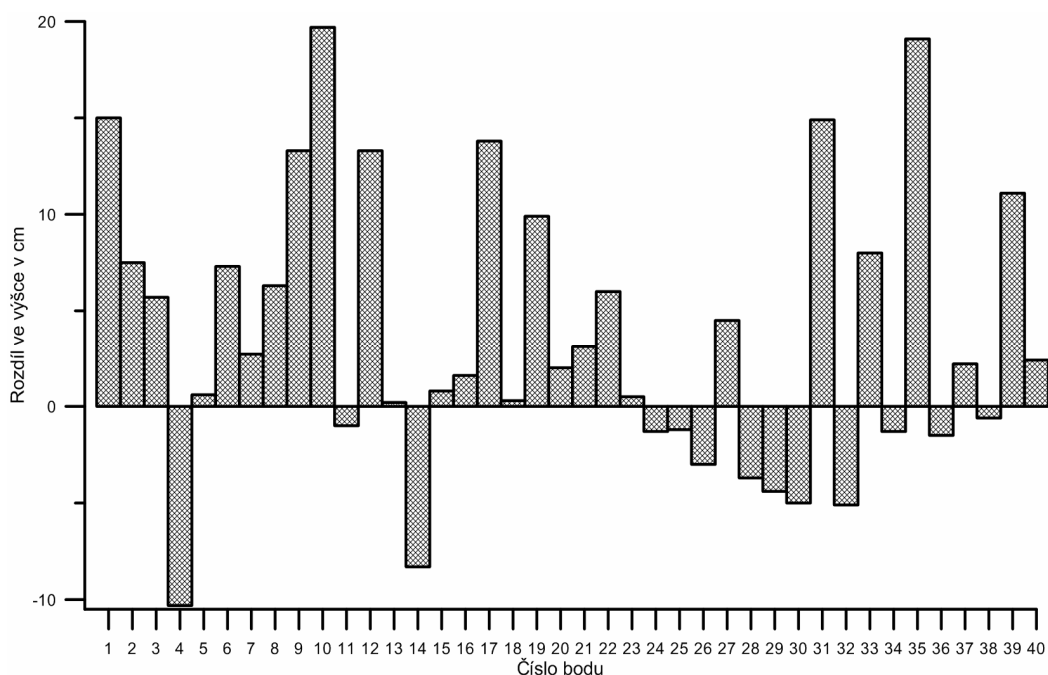
### **Analýza míry přesnosti kalibrace kamery ve vztahu k celkové přesnosti výstupu**

Z provedených analýz jednoznačně vyplývá, že kalibrace kamery má podstatný vliv na celkovou přesnost výstupu. Bylo prokázáno, že zejména přesný výpočet koeficientů radiální distorze je zásadní, aby nedocházelo ke vzniku y-paralaxy. Proto autor práce doporučuje používat zpřesňující výpočet koeficientů  $K_0$ ,  $K_1$  a  $K_2$  až během závěrečné fáze automatické aerotriangulace s pomocí vlíčovacích a vázacích bodů. Jako nejvhodnější z nabízených výpočtů byl vyhodnocen *Lens distortion model*. Zcela jednoznačně nelze doporučit nastavení pevných hodnot prvků vnitřní orientace během výpočtu aerotriangulace. Nestabilita optických členů objektivu vyžaduje zpřesnění prvků vnitřní orientace podle bodů, které

byly použity v konkrétním snímkování. Laboratorní kalibrace totiž zcela neodpovídá reálným podmínkám snímkování (např. vzdálenost kamera – objekt). Nutnou podmínkou použití reálných vlíčovacích bodů pro zpřesnění prvků vnitřní orientace je vysoká přesnost zaměření bodů. Zvýšení stability optických členů objektivu je dosaženo při použití skel s pevnou ohniskovou vzdáleností. V takovém případě je omezena nestabilita optických členů a ke změnám prvků vnitřní orientace během letu a mezi různými snímkovými lety dochází v menší míře. Zcela jednoznačně autor nedoporučuje využití celé scény u širokoúhlých objektivů. Hodnoty radiální distorze v okrajových částech dosahují extrémních hodnot a i při jejich znalosti může docházet k nepřesnostem a vzniku nežádoucí y-paralaxy.

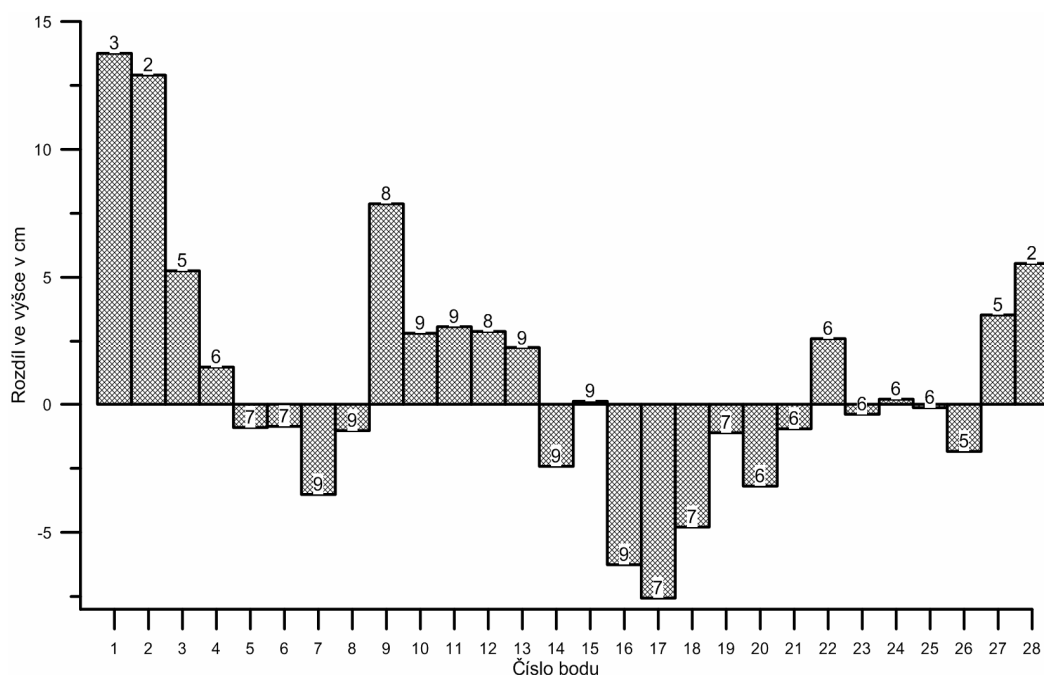
### Volba správného výpočtu prvků vnější orientace při absenci GPS/IMU přístroje

Byly testovány dvě metody zpracování dat. Odpověď na otázku, zda je pro UAV snímky přesnější stereofotogrammetrická metoda nebo metoda Structure from Motion, lze nalézt v grafech na obrázcích 4 a 5.



Obr. 4 Rozdíly mezi vlíčovacími body (případně vázacími body) a body povrchu vyexportovanými automatickými postupy.





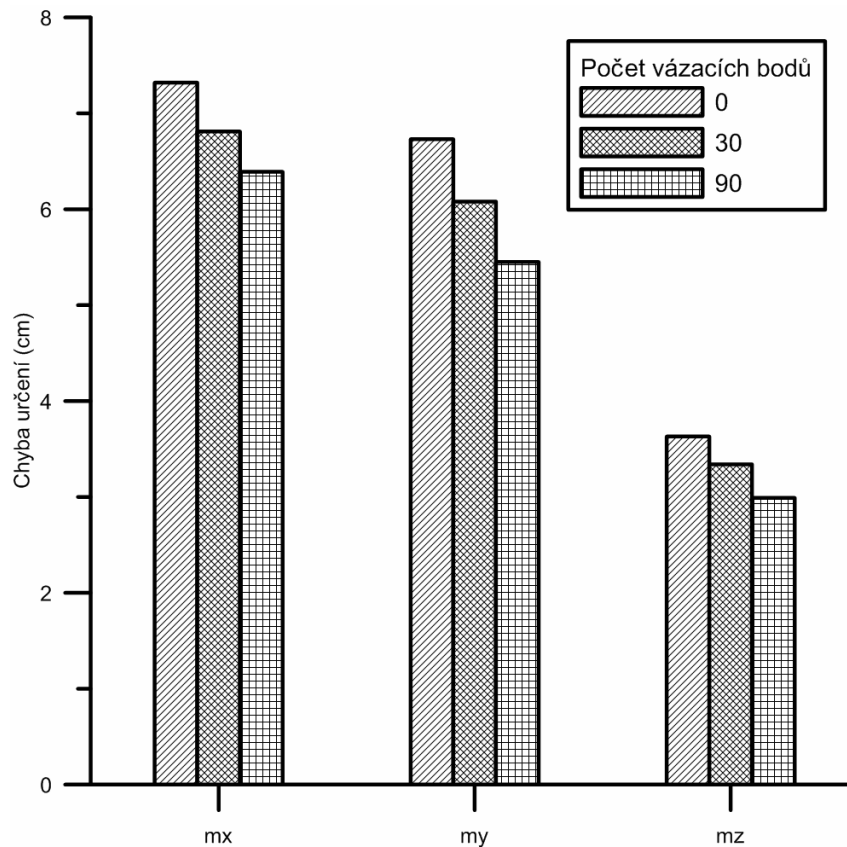
Obr. 5 Rozdíly mezi vlícovacími body a body vyexportovanými automatickými postupy. Číslo bodu nad sloupcem značí počet snímků, na kterém se bod nachází.

Podle rozložení bodů v grafu jako přesnější jednoznačně vychází metoda Structure from Motion. Byla dokázána přímá úměra, že čím více snímků stejného území vstoupí do procesu zpracování, tím přesnější výsledek bude. Negativem je výrazně narůstající výpočetní čas. Vysoké množství snímků je hlavním důvodem přesnosti metody. V místech, kde byly pouze dva snímky stejného území, dosahovala metoda SfM velmi podobné přesnosti jako metoda stereofotogrammetrická.

V případě použití stereofotogrammetrické metody autor doporučuje použít 10 až 20 vlícovacích bodů a maximálně možný počet přesně umístěných bodů vázacích. Tím bude zaručena dostatečná přesnost výpočtu. Přesnost výpočtu AAT pomocí 22 vlícovacích bodů je uvedena v tabulce 3. Vliv počtu vázacích bodů na přesnost výpočtu dokazuje graf na obrázku 6.

**Tabulka 3 Přesnost výpočtu AAT pomocí kontrolních bodů.**

Číslo bodu	RMSE <sub>X</sub> (m)	RMSE <sub>Y</sub> (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
4	-0,0236	-0,0088	0,0881
7	-0,0160	0,0106	0,0174
20	-0,0123	0,0290	0,0159



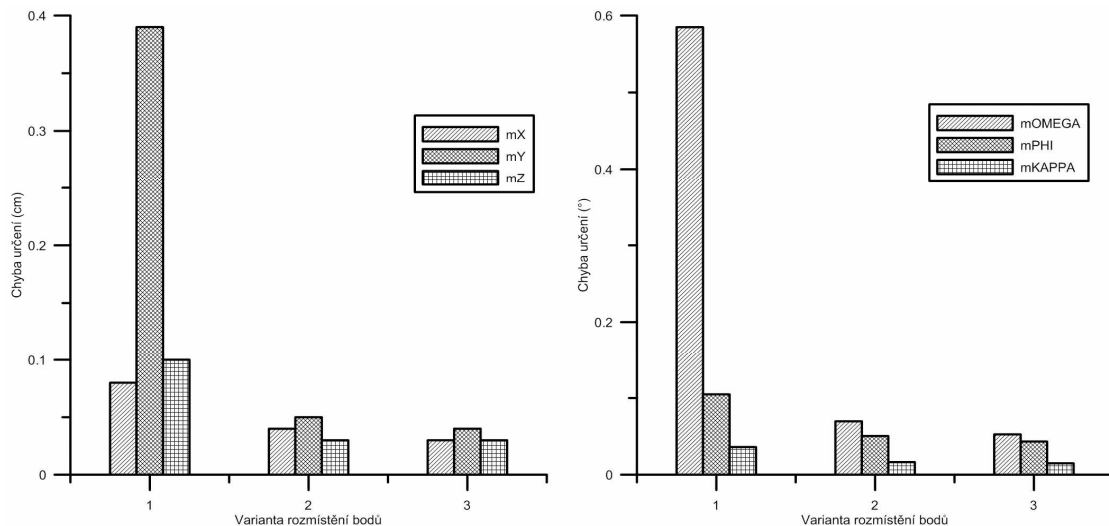
Obr. 6 Vliv počtu vázacích bodů na přesnost aerotriangulace.

### Vliv rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výpočtu

Autor provedl experiment, který měl dokázat či vyvrátit vliv rozmístění vlíčovacích bodů na přesnost výpočtu AAT. Z experimentu jednoznačně vyplývá, že rozmístění bodů má nezanedbatelný vliv na přesnost výpočtu. Jednotlivé typy rozmístění jsou uvedeny na obrázku 7. V grafu na obrázku 8 jsou uvedeny hodnoty chyby pro všechny prvky vnější orientace podle variant rozmístění bodů.



Obr. 7 Vliv počtu vázacích bodů na přesnost aerotriangulace.

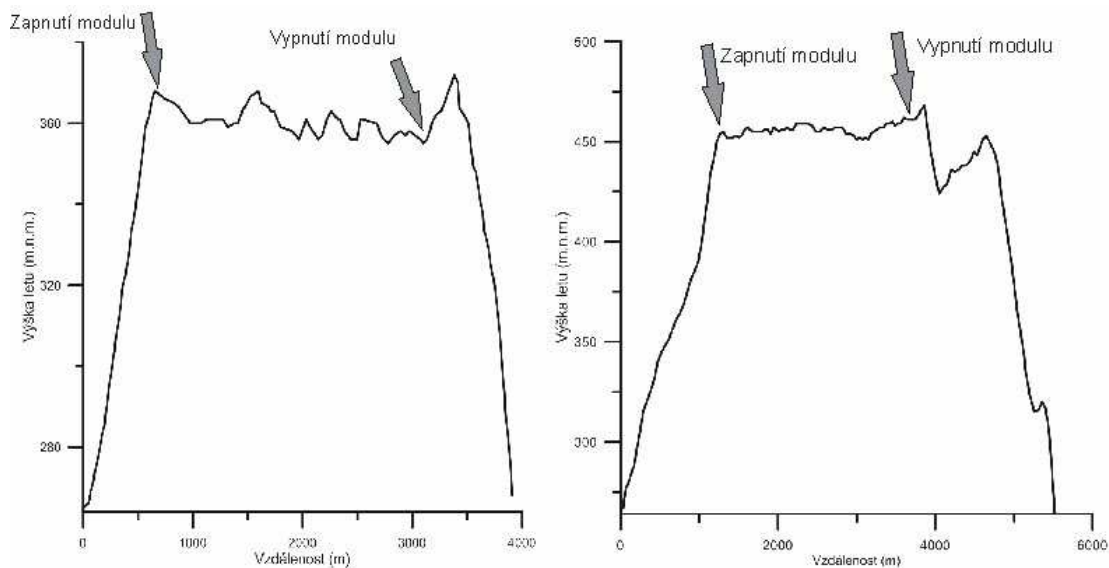


Obr. 8 Hodnocení přesnosti určení prvků vnější orientace. Vlevo souřadnice X, Y, Z. Vpravo úhly natočení kamery  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ .

Optimální variantou rozmístění vlíčovacích bodů je, aby žádný z bodů neměl lineární závislost s bodem jiným. To platí pro souřadnice X, Y i Z. Všechny vlíčovací body by měly být umístěny na rostlém terénu. Zcela nevhodné je umístění bodů na výškové objekty z důvodu radiálních posunů objektů.

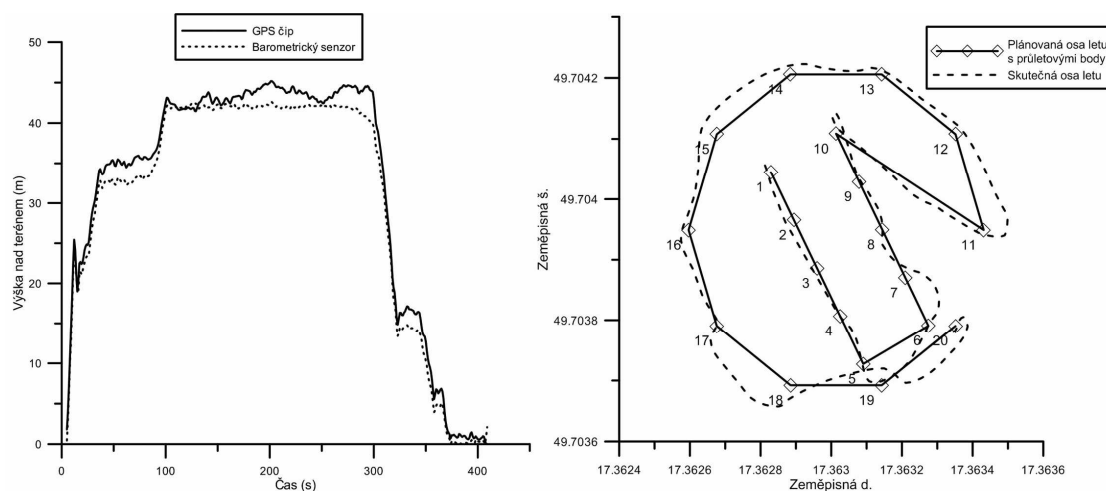
#### Analýza vlivu atmosférických a světelných podmínek na kvalitu výstupu

Byly analyzovány vlivy, které mohou způsobit komplikace letového charakteru nebo snížit či znehodnotit obrazový záznam. Na základě provedené analýzy letových dat z modelu PIXY byl identifikován problém, který způsobují nárazy větru (9 levý graf).



Obr. 9 Náraz větru může model vynést mimo plánovanou letovou hladinu.

Problém se ve velké většině případů vyskytuje pouze u paraglidového modelu, který je náchylný na povětrnostní podmínky. Z grafu na obrázku 10 je zřejmé, že u multirotorového systému k podobnému vlivu nedochází.



Obr. 10 Vyhodnocení letových údajů zařízení Hexakopter XL.

Velká pozornost musela být věnována světelným podmínkám. Při různém typu osvětlení dochází ke zcela rozdílné viditelnosti objektů na snímku (obr. 11).



Obr. 11 Rozdílná odrazivost slunečního záření při přímém a rozptýleném světle (vpravo).

Pokud se na snímcích vyskytují objekty, které jsou výrazně zahloubené do terénu, pak je vhodnější volit pro snímkování rozptýlené světlo.

### **Kvantifikace a kvalifikace všech možných prostorových chyb vstupujících do systému sběr – vyhodnocení dat**

Přesnost výsledků UAV výstupů záleží na řadě faktorů. Při nevhodně zvolených pracovních postupech nebo technice způsobí tyto faktory navýšení chyb ve všech výstupech z UAV snímkování. Jedním z cílů práce bylo na možné chyby upozornit, a pokud to je možné, je pak kvantifikovat a navrhnout řešení, jak se jich vyvarovat. U výsledků, které pocházejí z testovacího území, byla porovnána

přesnost se dvěma sadami nezávisle změřených výškových dat. Kromě výsledků uvedených v předcházejících bodech bylo provedeno sedm úkolů s následujícími závěry:

### 1. Vliv počtu vlíčovacích bodů na přesnost AAT

Minimální počet vlíčovacích bodů pro zajištění přesných výsledků v UAV fotogrametrii je deset. Zpracování je možné i s menším počtem bodů, ale výsledná přesnost se snižuje (tab. 4). V tabulce jsou uvedeny parametry letu a vypočítané  $RMSE_z$  chyby z vybraných případových studií. Z tabulky je patrná značná závislost mezi počtem vlíčovacích bodů a přesností výstupu. Přesnost výsledků logicky ovlivňuje i výška letu. Proto jsou výsledky v tabulce barevně odlišeny podle výšky letu do dvou skupin.

**Tabulka 4 Vliv počtu vlíčovacích bodů na přesnost AAT.**

Výška letu (m) / GSD (cm)	Počet vlíčovacích bodů	$RMSE_z$ (m)
138 / 2,9	9	0,250
106 / 2,3	17	0,093
97 / 2,1	17	0,085
106 / 2,5	27	0,024
65 / 1,6	6	0,034
54 / 1,2	28	0,022
62 / 1,4	28	0,016

Pozn.: Barevně jsou odlišeny lety z přibližně stejné výšky.

### 2. Doporučení postupů pro zaměřování a přesnost vlíčovacích bodů

Autor rozpracoval doporučené postupy pro zaměření vlíčovacích bodů. Přesnost zaměření bodů vždy záleží na požadované výsledné přesnosti a měřítku výstupů. Pro fotogrammetrické použití by přesnost zaměření vlíčovacích bodů neměla překročit hodnotu 5 cm. Autor doporučuje, aby chyba určení souřadnic vlíčovacích bodů nebyla vyšší než je prostorová rozlišovací schopnost snímku, tedy skutečná velikost jednoho pixelu. V optimálním případě by se chyba měla pohybovat na poloviční hodnotě velikosti jednoho pixelu. Přesné zaměření vlíčovacích bodů je o to důležitější, pokud se během zpracování dat budou používat algoritmy na zpřesnění prvků vnitřní orientace.

3. Stanovení základních parametrů pro správnou extrakci bodů ze snímků pomocí autokorelačních metod včetně výpočtů přesnosti

Autor řešil extrakci bodů ze stereosnímků. Dokazuje, že správné parametry pro automatickou extrakci bodů jsou vždy záležitostí konkrétního typu terénu, na který má být algoritmus aplikován. V obecné rovině lze v případě stereofotogrammetrické metody vycházet z nastavení v tabulce 5.

**Tabulka 5 Parametry pro automatickou extrakci bodů.**

Search Window	30 x 30
Window Size	9 x 9
Coefficient Start	0,8
Coefficient End	0,95
Použité pásmo obrazu	1 nebo 2

Při automatické extrakci bodů autor doporučuje použití pouze jednoho spektrálního pásma. Použití všech spektrálních pásem sice zvyšuje celkový počet extrahovaných bodů, ale zároveň s nimi se zvyšuje i RMSE chyba (tab. 6).

**Tabulka 6 Závěrečné hodnocení z poslední iterace dvou automatických extrakcí.**

Z min. (m)	Z prům. (m)	Z max. (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)	Střední chyba (m)	Počet propojených bodů	Počet bodů na výstupu
433,735	439,175	447,903	0,072	0,080	0,036	1 285 564	39 925
433,918	439,354	447,900	0,256	0,263	0,062	2 333 441	58 803

4. Provedení analýzy interpolačních metod z dat extrahovaných z UAV fotogrammetrie

Analýzu nejvhodnější interpolační metody pro výšková data, která jsou extrahovaná ze stereosnímků, autor testoval na testovacích datech. Jako nejvhodnější autor doporučuje interpolační metodu Kriging s parametry: gaussian model, nugget 0,03; sill 0,07; range 0,5; lag size 0,5; number of lags 10.

5. Určení absolutní přesnosti DMP ze stereofotogrammetrie a SfM metody na reálných datech v testovacím území

V samostatné kapitole autor provedl analýzu přesnosti UAV fotogrammetrie vůči referenčním datovým zdrojům. Absolutní přesnosti DMP zpracovaných metodami Stereofotogrammetrie a SfM jsou uvedeny v tabulce 7.

**Tabulka 7 Porovnání přesnosti digitálních modelů ze stereofotogrammetrické a SfM metody.**

Metoda extrakce bodů	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Z</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	-0,063863448	0,10918434	0,12649
SfM	-0,011016239	0,07244522	0,07328

Nejpřesnějších výsledků zcela jednoznačně dosáhl metodou SfM s hodnotou RMSE chyby 7,32 cm v souřadnici Z. Přesnost DMP v souřadnici Z stejného území ze Stereofotogrammetrické metody je 12,6 cm.

6. Analýza ortogonalizovaných snímků a stanovení absolutní přesnosti včetně vyvození patřičných závěrů

Hodnocení přesnosti ortogonalizovaných snímků vytvořených na základě DMP z obou metod potvrdilo vyšší přesnost metody SfM, byť je rozdíl pouze nepatrný (tab. 8 a 9).

**Tabulka 8 Statistické porovnání ortogonalizovaných snímků pro souřadnici X.**

	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>X</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	-0,0135	0,0201	0,0242
SfM	-0,0037	0,0228	0,0231

**Tabulka 9 Statistické porovnání ortogonalizovaných snímků pro souřadnici Y.**

	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	RMSE <sub>Y</sub> (m)
Stereofotogrammetrie	0,0366	0,0207	0,0421
SfM	6,964E-05	0,0329	0,0329

I přes podobné výsledky při hodnocení přesnosti je znatelný rozdíl v kvalitě výstupů z hlediska vizuálního hodnocení. Přestože je rozdíl v parametrech RMSE<sub>X</sub> a RMSE<sub>Y</sub> menší než jeden centimetr, obrázek 12 dokazuje negativní vliv nepřesného 3D modelu na ortogonalizaci snímku.



Obr. 12 Vizuální rozdíl vybraného detailu v ortogonalizovaných snímcích z metody SfM (vlevo) a stereofotogrammetrie (vpravo).

## 7. Porovnání dat z laserového skenování s daty UAV fotogrammetrie v testovacím území

Pro nezávislé ověření byly výsledky z UAV fotogrammetrie konfrontovány s daty z leteckého laserového skenování. Podle údajů v tabulce 10 lepších výsledků dosáhl model vytvořený metodou SfM.  $RMSE_z$  modelu ze Stereofotogrammetrie je 14,7 cm a byl tedy hodnocen hůře než výstup z leteckého laserového skenování.

**Tabulka 10** Statistické porovnání přesnosti 3D modelů z UAV fotogrammetrie s daty z laserového skenování.

	Střední chyba (m)	Směrodatná odchylka (m)	$RMSE_z$ (m)
Stereofotogrammetrie	-0,0731	0,1280	0,1474
SfM	-0,0167	0,0499	0,0526

Model vytvořený metodou SfM s hodnotou  $RMSE_z$  5,3 cm je srovnatelný nebo dokonce lepší než výstup z laserového skenování. Na základě hodnot chyb, které byly zjištěny při porovnání výstupů vytvořených metodou SfM a dat laserového skenování, nelze jednoznačně stanovit, která z metod dosahuje vyšší přesnosti. Oba datové zdroje jsou velmi přesné a zcela vyhovují použití ve fotogrametrii a geografických informačních systémech.

### Případové studie

V aplikační části práce autor dokumentuje případové studie z oblasti fluvialní geomorfologie a archeologie. Případovými studii dokázal významný vědecký potenciál UAV fotogrammetrie pro základní, ale také pro aplikační geovědní výzkum. V oblasti fluvialní geomorfologie autor aplikoval možnosti UAV fotogrammetrie při sledování vývoje říční laterální eroze a dalších geomorfologických fluvialních procesů, konkrétně pohyb dřevní hmoty v korytě toku. UAV fotogrammetrii významnou měrou použil při výzkumu vývoje



kenického meandru a pomocí ní zdokumentoval konečnou fázi jeho vývoje. V oblasti moderního archeologického výzkumu autor použil UAV fotogrammetrii jako první v České republice a představil ji jako zcela novou metodu nedestruktivní archeologie, která byla spolupracujícími archeologickými organizacemi a institucemi přijata s velmi pozitivním ohlasem. V další podkapitole autor popisuje příklady využití UAV fotogrammetrie při archeologickém výzkumu v lokalitě bývalého hradu Tepenec a dále u přeložky silnice I/44.

## 5. Diskuse

Během výzkumu v rámci své disertační práce řešil autor problémy, které způsobily technické prostředky nebo nevhodně zvolené pracovní postupy a metody. Při praktických úlohách autor dosáhl hraničních situací, za kterými UAV fotogrammetrii již nelze použít.

### **Kamera a její kalibrace**

I po provedení několika kalibrací kamery různými metodami se prvky vnitřní orientace vždy mírně lišily. Díky nestabilitě optických členů objektivu docházelo v průběhu výzkumu k mírným změnám prvků vnitřní orientace. Autorovi se podařilo problém vyřešit použitím metody využívající pro opravu kalibračních parametrů nadbytečné množství snímků. Prvky vnitřní orientace byly zpřesněny až pomocí vlíčovacích bodů zaměřených pro daný snímkový let.

### **Manuální vyhodnocování ve stereorežimu**

Během práce bylo zjištěno, že pokud má být dodržen požadavek na velmi vysokou přesnost extrakce bodů, není možné manuální režim až na výjimky použít. Fyziologické vlastnosti lidského oka a velmi vysoká podrobnost snímků neumožňovaly s dostatečnou přesností manuálně vyhodnotit a extrahovat body z 3D modelu, který byl zobrazen ve stereorežimu. Na velmi malé ploše snímků dochází ke změnám ve výšce v řádech centimetrů. I tyto rozdíly a změny musí být ve výsledném 3D modelu zachyceny, ale lidské oko tyto centimetrové rozdíly nedokáže ve stereorežimu rozeznat. Autor až na výjimky upustil od manuálního vyhodnocování dat a jednoznačně doporučuje pouze automatickou, případně poloautomatickou extrakci bodů.

### **Y-paralaxa u zpracovaných stereopárů**

Hodnoty radiální distorze použitého objektivu byly několikrát vyšší než u kamer v letecké fotogrammetrii. Zejména při zpracování snímků stereofotogrammetrickou metodou docházelo v okrajových částech snímků ke vzniku y-paralaxy, která je ve fotogrammetrii nežádoucí. I přes znalost průběhu radiální distorze objektivu nebylo v autorových silách namodelovat koeficienty radiální distorze zcela bezchybně. Při použití stereofotogrammetrické metody bylo jediným řešením vynechání okrajových částí ze zpracování. Po zavedení metody SfM byl problém odstraněn použitím velkého množství snímků při zpracování.

## 6. Závěr

Cílem disertační práce bylo sestavit koncept nasazení UAV technologií ve fotogrametrii pro velmi přesný sběr geodat a ověřit jej na případových studiích aplikovaného výzkumu. Autorem sestavený koncept představuje systematicky uspořádaný soubor dílčích technologických a metodologických procedur, které je potřeba realizovat v průběhu práce s UAV systémem.

Během řešení cílů disertační práce byly využity poznatky, metody a znalosti zejména z oborů fotogrametrie, dálkového průzkumu Země, geodézie, statistiky, geografických informačních systémů, informatiky a elektronických systémů. Sestavený koncept použití UAV systémů ve fotogrametrii byl ověřen na testovacích i reálných datech. Pro zpracování dat byly vybrány a otestovány fotogrammetrické metody Stereofotogrametrie a Structure from Motion.

Výsledkem disertační práce je sestavený koncept nasazení UAV technologií ve fotogrametrii a pět vypracovaných případových studií. V sestaveném konceptu jsou obsaženy všechny důležité části systému, které jsou potřebné pro jeho správnou funkčnost. Autor navrhl postupy pro přípravu snímkování, tvorbu plánu letu i práci v terénu včetně provedení snímkového letu. Dále byly navrženy a ověřeny postupy zpracování dat včetně kvantifikace chyb. Při dodržení všech postupů a metod zpracování bylo autorem prokázáno, že přesnost výstupů je srovnatelná nebo dokonce lepší než u jiných fotogrammetrických aplikací. Přesnost výstupů z UAV fotogrametrie byla porovnána s výstupy leteckého laserového skenování a bylo prokázáno, že v přesnostních parametrech může UAV fotogrametrie bez problémů konkurovat i těmto technikám sběru dat. V oborech fluviální geomorfologie a archeologie bylo vypracováno pět případových studií. Studie jsou součástí širšího vědeckého výzkumu a dokazují využitelnost UAV technologií v aplikovaném výzkumu.

Při správném pochopení původního smyslu UAV technologií se k uživatelům dostane velmi silný nástroj na sběr geodat v různých oblastech aplikovaného výzkumu. UAV fotogrametrie může být využita v mnoha oborech nejen z oblasti geografie a geografických informačních systémů. V aplikovaném výzkumu se nabízí její využití například v oblasti geomorfologie, biogeografie, ekologie, kartografie, archeologie a dalších oborů. Pro základní výzkum stále zůstává velké množství otevřených otázek, pro které je možné hledat vhodná řešení. Zejména je možné jmenovat oblast vhodnějších kalibračních postupů pro měřické kamery nebo návrh nových konstrukcí objektivů pro snímkování z nízkých výšek.

## Odborný životopis autora



### OSOBNÍ ÚDAJE

---

Jméno	Jakub Miřijovský
Bydliště	Dvořákova 30, 779 00 Olomouc
E-mail	jakub.mirijovsky@upol.cz
Datum a místo narození	10. 4. 1982, Ostrava

### VZDĚLÁNÍ

---

2008	Ostravská univerzita v Ostravě, Přírodovědecká fakulta, získán titul RNDr.
2007–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, student doktorského studijního oboru Geoinformatika a kartografie
2002–2007	Ostravská univerzita v Ostravě, Přírodovědecká fakulta, obor Geografie – fyzická geografie a geoekologie (Mgr.)
1997–2001	SPŠ – Stavební v Ostravě, obor Geodézie, zakončeno maturitou

### PRAXE

---

2009–dosud	Univerzita Palackého v Olomouci, katedra geoinformatiky, pozice Asistent
2008–2009	odborný asistent na Ostravské univerzitě v Ostravě, katedra fyzické geografie a geoekologie
2007	Geocentrum s. r. o., pozice „Informatik GIS“ Během studia odborná praxe na Správě NP České Švýcarsko

### ČLENSTVÍ V ODBORNÝCH ORGANIZACÍCH

---

Individuální člen Společnosti pro fotogrammetrii a dálkový průzkum Země

### STÁŽE

---

2011	Universitet Marii Curie-Sklodowskiej, Instytut Nauk o Ziemi (Lublin, Polsko)
2011	University of Iceland in Reykjavik (Reykjavík, Island)
2010	Aerofilm Photo Services (Paříž, Francie)
2010	Ruhr Universität Bochum, Geographisches Institut (Bochum, Německo)
2008	University of West Hungary, Faculty of Geoinformatics (Székesfehérvár, Maďarsko)

## **PROJEKTOVÁ ČINNOST**

---

- 2013-2015 Visegrad Fund N. 11210039, Evaluation of a new remote sensing methodology for detailed international mapping in the V4 region - ostatní řešitel
- 2012-2015 Operační program: OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost (osa 7.2.3) CZ.1.07/2.3.00/20.0170 - StatGis Team
- 2012 PrF\_2012\_007 Maloformátové snímkování při studiu vlivu heterogenity povrchu na charakter stanoviště - spoluřešitel projektu
- 2012 Visegrad Fund N. 31210058, Detailed aerial mapping and flood impact monitoring in the V4 region - ostatní řešitel
- 2011 EEA Norway Funds č. B/CZ0046/4/0001 - Integration of the sensor network and the small format remote sensing for prediction of the snow hazard - spoluřešitel projektu
- 2011 AV ČR - Otevřená věda CZ.1.07/2.3.00/09.0034 - pracovník v rámci jednoho subprojektu
- 2010 PrF\_2010\_14 POHOS (Pohyb obyvatel na styku urbánního a suburbánního prostoru) - spoluřešitel projektu
- 2009 FRVŠ 1818/2009: Terénní cvičení z dynamické geomorfologie - řešitel projektu

## **PEDAGOGICKÁ ČINNOST**

---

Výuka předmětů: Dálkový průzkum Země, Polohové a navigační systémy, Digitální zpracování obrazu, Základy geodézie, Pokročilé metody DPZ, Fotogrammetrie

## **KONFERENCE**

---

Přednesení vlastního příspěvku na celkem 11 konferencích, z toho 5 s výsledky disertační práce.

## Abstract

This Ph.D. thesis represents the original author's approach to the deployment of UAV technology in photogrammetry. Two unmanned aerial systems were used and author demonstrates their usefulness in the applications of accurate collection of geodata.

The first part of the thesis deals with the concept of deploying UAV system and its requirements. The system is exposed to number of technological and non-technological requirements that must be met. Camera calibration, creation of a flight plan, obtaining flight permits are solved in the first part and legal aspects for fulfill the conditions for the operation of unmanned systems in the Czech Republic.

The second part is devoted to field work and imaging flight. Different types of the ground control points and their orientation are solved in this chapter. There is also resolved the camera exposure. As well the issues of imaging flight and control of the obtained data are resolved.

The third part deals with the various methods of processing the data, including its accuracy. This part is focused on interpolation methods for creating 3D surface model. A method Structure from Motion and stereophotogrammetry method are analyzed in this part. Output accuracy is evaluated on the basis of two independent reference data sources. Data from the UAV photogrammetry are compared with the data of geodetic measurements and aerial laser scanning.

In the last part of the thesis, five case studies in the fields of fluvial geomorphology and archaeology were introduced. The case studies are a part of a broader scientific research and demonstrate the usability of the UAV technology in applied research. The outputs of selected parts of the case studies are 3D terrain or surface models of an area of interest, orthophoto images, photo plans, and maps. All results are based on the collection, processing and evaluation of the UAV data.

Keywords:

Photogrammetry, UAV, Digital Surface Model, Unmanned, Image

## 1. Introduction

Nowadays it is quite common to use remote sensing (RS) data in a geoscientific research. It is a constantly evolving field, which is applied in many fields and industries, whether scientific or commercial sphere. For an imaging from the heights up to 30 m above the surface can be used aerial platforms, or the images can be taken from the tall buildings and towers. If there is necessary to acquire images from a greater height, it is necessary to use models of aircraft or other platforms which have the capability imaging at altitudes around 100 m. The UAV photogrammetry is the field of science, contains methods and technologies that deals with the acquisition of further usable measurements, maps, digital terrain models and other products that can be obtained from the images, mostly photographic materials. If it is need to obtain very precise images with high geometric quality then arise many scientific questions about camera calibration, the deployment of control points and flight characteristics of the models.

The main condition is that a pilot may not be physically presented in the platform. UAV photogrammetry combines advantages of air and land photogrammetry. The UAV photogrammetry takes the advantage of vertical aerial view from aerial photogrammetry and the advantage of close distance and the high image detail from ground photogrammetry. Geometric-mathematical reconstruction of the direction of the photographic rays in the image is the basic principle of the photogrammetric measurement. The UAV photogrammetry is a new measurement tool with a possibility of obtaining precise geographic data.

## 2. Aims of the study

The main objective of the thesis is to build a concept of UAV deployment in photogrammetry for highly accurate collecting of geodata, and to verify it on case studies related to applied research. The proposed concept is a systematically organized set of partial technological and methodological procedures, undertaken during the course of work with the UAV system. The main aims of the thesis were:

- Definition of basic parameters of the camera for use in UAV photogrammetry, which are related to the use of non-professional aerial cameras.
- Analysis of the accuracy of camera calibration in relation to the overall accuracy of the output.

- Study of the relation of ground control points distribution to the accuracy of the aerotriangulation calculation.
- Analysis of the impact of atmospheric and light conditions to the resulting image quality.

The assembled concept has to be properly tested on five case studies.

### 3. Methods and processing procedure

#### Concept

The design of the concept is composed from the basic blocks which enable deployment UAV technologies in the photogrammetry. The author verified all parts of the concept during doctoral studies. Figure XX represents the concept of the UAV technologies in photogrammetry. The diagram shows the most important part of the concept. Each of these parts is broken down into more detailed parts that are found in other chapters of the work.

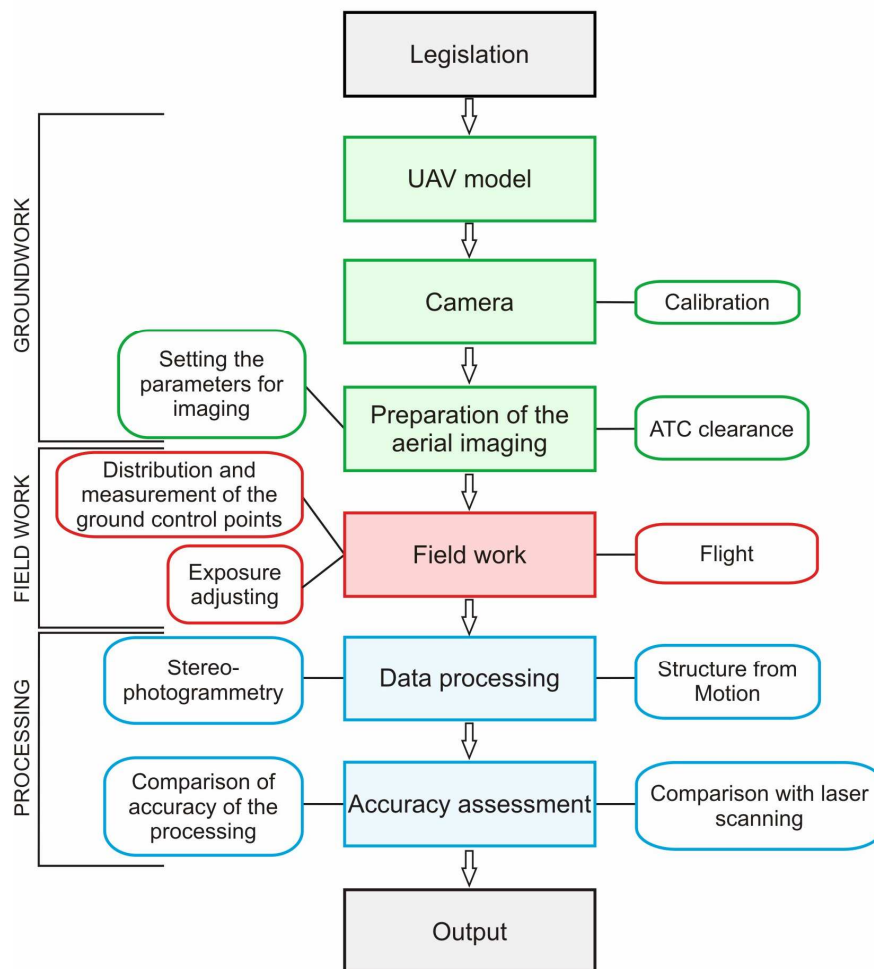


Fig. 1 Basic concept of the UAV systems deployment.



## 4. Results and discussion

The main outcome of the thesis is the proposed concept of the UAV technology deployment in photogrammetry, and also the five introduced case studies. The proposed concept includes all the necessary components that are required for its proper functionality. The author suggested procedures for the imaging set-up, flight planning, and field work, including the flight and data processing. Moreover, data processing methods (including quantification of spatial errors) were designed and verified, and two methods for UAV photogrammetry data processing were tested. The most important results are knowledge which complete the concept of UAV imaging and UAV photogrammetry. It demonstrates its applicability in professional practice. These include in particular:

**Definition of basic parameters of the camera for use in UAV photogrammetry, which are related to the use of non-professional aerial cameras.**

The results of various calibration methods and the use of different test fields confirm that there is not only one particular technique or test field for obtaining correct results. Table 1 summarizes the results of the calibration.

**Table 1 The results of the camera calibration.**

Kamera	f (mm)	xp (mm)	yp (mm)	x0 (mm)	y0 (mm)
EOS 500D	18,45168	-0,05443	0,076238	11,1125	7,5207

**Analysis of the accuracy of camera calibration in relation to the overall accuracy of the output.**

Camera calibration has a significant impact on the overall accuracy of the output. It has been shown that in particular the accurate calculation of the radial distortion coefficients is essential in order to avoid y-parallax. Therefore, the author recommends calculate the coefficients K0, K1 and K2 only during the final stage of the automatic aero-triangulation. For this process it has to be used ground control points and tie points. The most suitable model for the calculation of the radial distortion coefficients is Lens distortion model. A necessary condition for the application of the ground control points is a high precision of the ground control points.

**Study of the relation of ground control points distribution to the accuracy of the aerotriangulation calculation.**

The effect of correct distribution of control points in the terrain on a correct calculation of the external orientation objects is negligible. As expected, a version in which all the points are located in a single line, thus having a linear relation, has proven completely unsuitable.

Distribution of points along a straight communication or other objects in the terrain is by no means recommended. If it is at all possible, it is always best to keep the rule of an even distribution of the points over the surface so that none of the points lies on the same line with another point. This version in fact corresponds to an absolutely random distribution of the points.

### **Analysis of the impact of atmospheric and light conditions to the resulting image quality.**

There were analyzed factors that could cause complications with the flight in the air or to reduce or degrade image recording. Based on the analysis of flight data from the PIXY model was identified a problem that causes gusts of wind. The problem in most cases occurs only in connection with paraglider model, which is prone to weather conditions. Appropriate attention had to be paid to the lighting conditions. Various illumination leads to quite different objects visibility in the image. If there are objects in images that are substantially recessed into the ground, then it is better to choose scattered light for the imaging.

## **5. Conclusion**

UAV photogrammetry can be used in many fields, not only in the field of geography and geographic information systems. The thesis can be employed especially by the users who work with UAV systems in photogrammetry. The outcomes can be helpful for scientists who need geometrically accurate data from the airplane photos. Applications to other fields, such as geomorphology, biogeography, ecology, cartography, archaeology and other disciplines, can also be found in the literature. The results of this thesis should serve as a guideline, helping to obtain a very accurate data with a precision better than ten centimeters.

Regarding the theoretical research, there are still many open questions, for which it is possible to find appropriate solutions. In particular, it is possible to name the area more suitable calibration procedures for non-metric cameras, or creation of a new lens which will be better for usage in close-up remote sensing. The aforementioned open problems lie in the scope of the author's future research.



## RESEARCH PROJECTS MEMBERSHIPS/LEADING

---

2013-2015	Visegrad Fund N. 11210039, Evaluation of a new remote sensing methodology for detailed international mapping in the V4 region - project team leader
2012-2015	Operační program: OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost (osa 7.2.3) CZ.1.07/2.3.00/20.0170 - StatGis Team
2012	PrF_2012_007 Maloformátové snímkování při studiu vlivu heterogenity povrchu na charakter stanoviště - project team member
2012	Visegrad Fund N. 31210058, Detailed aerial mapping and flood impact monitoring in the V4 region - project team leader
2011	EEA Norway Funds č. B/CZ0046/4/0001 - Integration of the sensor network and the small format remote sensing for prediction of the snow hazard - project team member
2010	PrF_2010_14 POHOS - project team member
2009	FRVŠ 1818/2009: Field course of dynamic geomorphology - project team leader

## TEACHING COURSES

---

Remote Sensing, Global Navigation Satellite Systems, Digital Image Processing, Geodesy, Advanced Methods in Remote Sensing, Photogrammetry

## CONFERENCE

---

Presenting own contribution at 11 conferences, of which 5 with the results of the Ph.D. thesis.

## Seznam vybraných publikací autora souvisejících s disertační prací / Author's selected publications related to the dissertation

### Publikace v kategorii Jrec / Publications in Jrec category

- Miřijovský, J., Pechanec, V., Burian, J. (2012). Využití bezpilotního modelu PIXY při snímkování krajiny. *Informace ČGS*, 31, č. 1, s. 11–17.

### Publikace recenzované - ve světovém jazyce / Reviewed papers in English language

- Miřijovský, J., Michalková, M., Trizna, M. (2012). Evaluation of a new remote sensing methodology for detailed international mapping in the V4 region. *Journal of Landscape Management* Vol. 3 / No. 2. p. 7-11.

### Publikace v kategorii D - článek ve sborníku indexovaný v databázi Conference Proceedings Citation Index / Publications in D category - Papers in conference proceedings

- Miřijovský, J., Vávra, A. (2012). UAV photogrammetry in fluvial geomorphology. In Conference Proceedings SGEM 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.
- Svobodová, J., Miřijovský, J., Kilianová, H. (2012). The peculiarities of the digital surface model creation from the data acquired by small format photography. In Conference Proceedings SGEM 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.
- Miřijovský, J., Brus, J., Pechanec, V. (2011). Utilization of a Small format aerial photography from drone PIXY concept in the evaluation of the landscape changes. In Conference Proceedings SGEM 2011. 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 345-352s.

### Specializované mapy s odborným obsahem - kategorie N<sub>map</sub> / Expert maps

- Miřijovský, J., Petyniak, O., Uhrová, H., Michalková, M. (2012). Morfologický vývoj Kenického meandru v letech 2011 a 2012, číslo mapy: KGI-MIR-01. Dostupné online z <http://www.geoinformatics.upol.cz/app/v4mapping/results.html>.

### Konferenční příspěvky zahraniční - nerecenzované / Conference papers - international (Not reviewed)

- Miřijovský, J., Martínek, J., Brus, J. (2011). Reconstruction of historical paths with using of small-format aerial photography. In XXIIIrd International CIPA Symposium, Praha : ČVÚT Praha, p. 1-7.
- Miřijovský, J., Michalková, M., Bělka, L., Brus, J. (2012). Precise Close Range UAV Mapping in Difficult Field Conditions. In XXII International Society for Photogrammetry & Remote Sensing Congress, Melbourne.

#### **Konferenční příspěvky domácí - nerecenzované / Conference papers - (Not reviewed)**

- Mirijovsky, J. (2012). The influence of the distribution and amount of ground control points on the accuracy of the aerotriangulation calculation. In: First InDOG Doctoral Conference Proceedings. p. 42-45.
- Miřijovský, J. (2008). Hodnocení podmínek využitelnosti systému GPS jako zdroje geografických dat pro GIS v NP České Švýcarsko. In Sborník symposia GIS Ostrava 2008. VŠB-TU Ostrava, 7s. 978-80-254-1340-1.

#### **Vyzvané přednášky v zahraničí / Keynote lectures**

- 2011 - UAV mapování ve fyzické geografii. Komenského univerzita v Bratislavě. Na pozvání prof. Minára.
- 2012 - UAV fotogrammetrie. Komenského univerzita v Bratislavě. Na pozvání prof. Minára.

## **Úplný seznam publikací autora / All author's publications**

#### **Publikace v kategorii Jneimp / Publications in Jneimp category**

- Dušek, R., Miřijovský, J. (2009). Vizualizace prostorových dat: chaos v dimenzích. Geografie - Sborník české geografické společnosti. Česká geografická společnost, 169-178 s.

#### **Publikace v kategorii Jrec / Publications in Jrec category**

- Miřijovský, J., Pechanec, V., Burian, J. (2012). Využití bezpilotního modelu PIXY při snímkování krajiny. Informace ČGS, 31, č. 1, s. 11-17.
- Burian, J., Miřijovský, J., Macková, M. (2011). Suburbanizace Olomouce. Urbanismus a územní rozvoj, 2011, 5.
- Heisig, J., Burian, J., Miřijovský, J. (2011). Změny intenzity osobní automobilové dopravy a vliv na prostorovou diferenciaci suburbanizace. Perner's Contacts. Univerzita Pardubice, 84-91 s.

#### **Publikace recenzované - ve světovém jazyce / Reviewed papers in English language**

- Miřijovský, J., Michalková, M., Trizna, M. (2012). Evaluation of a new remote sensing methodology for detailed international mapping in the V4 region. Journal of Landscape Management Vol. 3 / No. 2. p. 7-11.

#### **Publikace v kategorii D - článek ve sborníku indexovaný v databázi Conference Proceedings Citation Index / Publications in D category - Papers in conference proceedings**

- Miřijovský, J., Vávra, A. (2012). UAV photogrammetry in fluvial geomorphology. In Conference Proceedings SGEM 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.

- Svobodová, J., Miřijovský, J., Kilianová, H. (2012). The peculiarities of the digital surface model creation from the data acquired by small format photography. In Conference Proceedings SGEM 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.
- Pechanec, V., Vávra, A., Svobodová, J., Miřijovský, J. (2012). Phenological analysis of the landscape with the support of geographic information technologies . In Conference Proceedings SGEM 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 1125-1132s.
- Miřijovský, J., Brus, J., Pechanec, V. (2011). Utilization of a Small format aerial photography from drone PIXY concept in the evaluation of the landscape changes. In Conference Proceedings SGEM 2011. 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 345-352s.
- Pechanec, V., Brus, J., Mirijovsky, J. (2011). Monitoring of snow risks by geo-sensors in urban areas. In Conference Proceedings SGEM 2011. 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 653-660s.

#### **Specializované mapy s odborným obsahem - kategorie Nmap / Expert maps**

- Miřijovský, J., Petyniak, O., Uhrová, H., Michalková, M. (2012). Morfologický vývoj Kenického meandru v letech 2011 a 2012, číslo mapy: KGI-MIR-01. Dostupné online z <http://www.geoinformatics.upol.cz/app/v4mapping/results.html>.

#### **Konferenční příspěvky zahraniční - recenzované / Conference papers - international (Not reviewed)**

- Marjanović, M., Burian, J., Miřijovský, J., Harbula, J. (2012). Urban Land Cover Change of Olomouc City Using LANDSAT Images .Issue 71, In Conference Proceedings World Academy of Science, Engineering and Technology, 75-81s.
- Svobodová, J., Miřijovský, J., Vávra, A., Brus, J., Kilianová, H. (2012). Using of local indicators of spatial association for evaluation of spatial accuracy of DEM. In Symposium proceedings Accuracy 2012. 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences Florianópolis, SC, Brazil, 115-120s.

#### **Konferenční příspěvky domácí - recenzované / Conference papers - (Reviewed)**

- Pechanec, V., Machar, I., Kilianová, H., Miřijovský, J. (2012). Environmental education: Expanding practical applications - research landscape of Litevlské Pomoraví .In. Svobodová, H. (ed.): Geography and Geoinformatics: Challenge for Practise and Education. Proceedings of 19th International Conference. Brno, Masarykova universita., 172-179s.
- Miřijovský, J., Pechanec, V., Brus, J. (2010). Možnosti rozpoznávání druhů vegetace z dat DPZ .Herber, V. (ed.): In Fyzickogeografický sborník 8. Fyzická geografie a trvalá udržitelnost Brno, Masarykova Univerzita.
- Miřijovský, J., Dušek, R. (2009). Vizualizace prostorových dat: chaos v dimenzích. 18. kartografická konference 2009, Olomouc. [CD-ROM].

- Pechanec, V., Miřijovský, J. (2008). Znalostní báze krajiny pro studium ekotonů . Herber, V. (ed.): In Fyzickogeografický sborník 6. Fyzická geografie a trvalá udržitelnost Brno, Masarykova Univerzita, 214-218s.ISBN: 978-80-210-4780-8.
- Dušek, R., Miřijovský, J. (2008). Identification of Lineaments Based on Point Phenomena Occurrence - Mathematical Model. In 16th Annual Conference Proceedings, Technical Computing Prague 2008 Humusoft, 72-72s.

**Konferenční příspěvky zahraniční - nerecenzované / Conference papers - (Not reviewed)**

- Miřijovský, J., Martínek, J., Brus, J. (2011). Reconstruction of historical paths with using of small-format aerial photography. In XXIIIrd International CIPA Symposium, Praha : ČVÚT Praha, p. 1-7.
- Miřijovský, J., Michalková, M., Bělka, L., Brus, J. (2012). Precise Close Range UAV Mapping in Difficult Field Conditions. In XXII International Society for Photogrammetry & Remote Sensing Congress, Melbourne.

**Konferenční příspěvky domácí - nerecenzované / Conference papers - (Not reviewed)**

- Mirijovsky, J. (2012). The influence of the distribution and amount of ground control points on the accuracy of the aerotriangulation calculation. In: First InDOG Doctoral Conference Proceedings. p. 42-45.
- Miřijovský, J., Pechanec, V., Šťávořová, Z., Voženílek, V. (2008). Metapopis při přípravě e-learningového kurzu .In. Řehout V. (ed.) Pedagogický software 2008. Scientific Pedagogical Publishing, České Budějovice., 247-249s.
- Miřijovský, J. (2008). Hodnocení podmínek využitelnosti systému GPS jako zdroje geografických dat pro GIS v NP České Švýcarsko. In Sborník symposia GIS Ostrava 2008. VŠB-TU Ostrava, 7s. 978-80-254-1340-1.
- Miřijovský, J., Kaňok, J. (2008). Kartografické metody výzkumu a jejich využití při hodnocení změn ekotonů. Geografické dny Liberec 2008, 7 s.

**Vyzvané přednášky v zahraničí / Keynote lectures**

- 2011 - UAV mapování ve fyzické geografii. Komenského univerzita v Bratislavě. Na pozvání prof. Minára.
- 2012 - UAV fotogrammetrie. Komenského univerzita v Bratislavě. Na pozvání prof. Minára.