

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD**  
**Katedra matematiky**

**Bakalářská práce**

**Soudobé využití fotogrammetrie  
při projektování a výstavbě dálnice**

**Plzeň 2007**

**Tomáš Vyčichlo**

## **Prohlášení**

Předkládám tuto bakalářskou práci jako součást procesu ukončení studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Plzni dne 20. května 2007

.....

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou poděkovat doc. Ing. Jiřímu Šímovi, CSc., vedoucímu bakalářské práce, za cenné odborné rady, připomínky a věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Strnadovi, vedoucímu oddělení fotogrammetrie z firmy GAK zeměměřičské práce, spol. s r. o., za poskytnutí potřebných podkladů a informací k bakalářské práci.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na vývoj fotogrammetrie a zejména digitální fotogrammetrie, její technologické postupy a možnosti využití při výstavbě dálničního obchvatu Plzně.

## **Abstract**

This bachelor thesis is oriented to the development of photogrammetry and digital photogrammetry especially, its technological processes and applications to the construction of Pilsen orbital.

## **Klíčová slova**

Digitální fotogrammetrie, letecká měřická kamera, letecký měřický snímek, skenování snímků, analytická aerotriangulace, ortofotomapa, digitální model terénu, vizualizace.

## **Key words**

Digital photogrammetry, aerial camera, aerial photograph, scanning of photographs, automatic aerotriangulation, orthophotomap, digital terrain model, visualization.

## Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>7</b>
<b>0 Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Historie analogové a digitální fotografie</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Fotogrammetrie – moderní metoda sběru a zpracování geoprostorových dat</b> .....	<b>13</b>
2.1 Historie fotogrammetrie.....	13
2.2 Fotogrammetrie na prahu 21. století.....	16
2.2.1 Digitální skenery .....	16
2.2.2 Digitální kamery .....	19
2.2.3 Použití DGPS a IMU .....	21
2.2.4 Letecké laserové skenování .....	22
<b>3 Postupy a produkty fotogrammetrie po roce 2000</b> .....	<b>24</b>
3.1 Projekt leteckého měřického snímkování .....	24
3.2 Skenování snímků na filmu kontra digitální snímání obrazových dat.....	26
3.3 Účel analytické aerotriangulace .....	26
3.3.1 Vlícovací body .....	26
3.3.2 Účel a princip analytické aerotriangulace.....	26
3.4 Tvorba mapových podkladů .....	28
3.4.1 Ortofotomapa .....	28
3.4.2 Vektorová mapa.....	30
3.5 Vyhodnocení digitálního modelu terénu a povrchu a jejich využití.....	30
3.6 Vizualizace, 3D modely a průlety nad terénem.....	31
<b>4 Praktická ilustrace využití fotogrammetrie při projektování</b>	
<b>a výstavbě dálničního obchvatu Plzně</b> .....	<b>33</b>
4.1 Parametry leteckého měřického snímkování a přednáletové signalizace .....	33
4.2 Převod snímků do digitální formy, jejich prostorové rozlišení .....	35
4.3 Výsledky a využití analytické aerotriangulace .....	35
4.4 Tvorba ortofotomapy a digitální základní mapy dálnice .....	36
4.4.1 Tvorba ortofotomapy .....	36
4.4.2 Tvorba digitální základní mapy dálnice.....	37
4.5 Parametry digitálního modelu terénu a jeho využití.....	39
4.6 Použité postupy vizualizace projektované dálnice v terénu .....	39
<b>5 Zhodnocení přínosu fotogrammetrie obecně a ve sledované aplikaci</b> .....	<b>41</b>

<b>Použitá literatura .....</b>	<b>42</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>43</b>

## Seznam použitých zkratk

AAT	analytická aerotriangulace
AD převodník	analogově digitální převodník (elektronická součástka)
BMP	Bitmap (formát pro ukládání nekomprimovaných rastrových dat)
CAD	Computer Aided Design (software pro projektování či konstruování)
CCD	Charge-Coupled Device (zařízení s vázanými náboji, elektronická součástka snímající obrazové informace)
DGPS	Differential Global Positioning System (diferenciální polohový systém)
DMP	digitální model povrchu
DMR	digitální model reliéfu
DMT	digitální model terénu
DPI	Dots Per Inch (počet bodů na palec, 1 palec = 2,54cm)
DZMD	digitální základní mapa dálnice
FMC	Forward Motion Compensation (zařízení pro kompenzaci smazu)
GIF	Graphics Interchange Format (grafický formát ukládání dat, používá bezztrátovou kompresi)
GIS	geografický informační systém
IMG	Image (jednoduchý rastrový formát dat, pracuje bez komprese)
IMU	Inertial Measurement Unit (inerciální měřící jednotka)
INS	Inertial Navigation System (inerciální navigační systém)
JPEG	Joint Photographic Experts Group (metoda ztrátové komprese pro ukládání obrazových informací)
LIDAR	Light Detection And Ranging (zařízení sloužící k detekci objektů a měření vzdáleností)
LMS	letecký měřický snímek
MÚK	mimoúrovňová křižovatka
NASA	National Aeronautics Space Administration (Národní úřad pro letectví a kosmonautiku)
PCX	PC Paintbrush File Format (formát pro ukládání rastrových dat, pracuje s kompresí i bez komprese)
PET	polyetylén tereftalát (materiál pro výrobu nesrážlivých mapových fólií)
ŘSD ČR	Ředitelství silnic a dálnic České republiky

SAR	Synthetic Aperture Radar (radarový systém se syntetickou aperturou)
TIFF	Tag Image File Format (souborový formát pro ukládání obrazů v rastrové podobě)
THM	technickohospodářské mapování (1961 až 1981)
TIN	Triangulated Irregular Network (nepravidelná trojúhelníková síť)
ÚDKM	Účelová digitální katastrální mapa
VB	vlícovací bod(y)
VRML	Virtual Reality Modeling Language (jazyk pro popis 3D modelů, scén a animací)
ZABAGED	Základní báze geografických dat
ZMVM	základní mapa velkého měřítká
ZPBP	základní polohové bodové pole
ZVS	základní vytyčovací síť dálnice



## 0 Úvod

Proti klasickým geodetickým postupům má moderní fotogrammetrie nezanedbatelné výhody, kterými jsou především nezávislost na okolních rušivých vlivech (počasí, dopravní provoz, těžko přístupná či nepřístupná místa), vysoká dokumentační hodnota snímků (možnost dokumentace a monitorování průběhu stavby včetně zpětného pohledu do historie), názornost a možnost globálního a zároveň reálného pohledu na celé zájmové území, značná úspora práce v terénu apod. Moderní technologie umožňují široké uplatnění fotogrammetrie v řadě navazujících i odlišných oborech lidské činnosti a zároveň usnadňují její popularizaci v široké veřejnosti (zejména barevné ortofotomapy a vizualizace).

Úkolem bakalářské práce bylo ilustrovat použití této moderní metody při výstavbě dálničního obchvatu města Plzně. Bakalář se osobně zúčastnil řady geodetických a přípravných fotogrammetrických prací, což mu umožnilo získat cenné údaje a obrazové přílohy z této akce zásadního významu pro město Plzeň i Plzeňský kraj.

# 1 Historie analogové a digitální fotografie

*Fotogrammetrie* je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z fotografického záznamu [1].

Původ názvu *fotogrammetrie* pochází z řečtiny, konkrétně složením tří řeckých slov: *Photos* ... světlo, *Gramma* ... to, co jest zapsáno nebo zakresleno, neboli záznam a *Metron* ... měřit. Slovo *fotogrammetrie* vzniklo ve snaze popsat vhodným způsobem činnost zabývající se měřením světelných záznamů neboli fotografických snímků. První použití slova *fotogrammetrie* je přisuzováno Němci A. Meydenbauerovi, jenž ji použil při zaměřování stavebních památkových objektů. Ve fotogrametrii se nezískávají informace o předmětech jejich přímým měřením, ale měřením na jejich fotografických, nověji i digitálních obrazových záznamech.

Obrazový záznam lze provádět buď klasickou metodou na světlocitlivou vrstvu (analogová fotografie) anebo moderní metodou digitálního záznamu (digitální fotografie). Mezi výhody digitální fotogrammetrie patří například možnost radiometrické úpravy digitálních obrazových záznamů, možnost předzpracování, bezpečná a snadná archivace, snadný přenos dat a prezentace, stálost kvality snímků a dokonalé kopírování.

Jednoduchá, levná a rychlá možnost konverze analogové fotografie na digitální obrazový záznam se provádí skenováním. Skenování leteckých měřických snímků (LMS) je prováděno na speciálních fotogrammetrických skenerech. Ty se vyznačují vysokou geometrickou přesností a zároveň vysokým prostorovým rozlišením. Další výhodou skenerů je komplexní technologické zázemí pro předzpracování obrazového záznamu, mezi nevýhody patří poměrně vysoké pořizovací náklady těchto zařízení (více viz odstavec 2.2.1).

Fotografie je od doby svého vzniku důležitým dokumentačním nástrojem v moderní historii lidstva. Vzniku fotografie předcházelo objevení optických vlastností skla a objev světlocitlivých sloučenin stříbra. Název *fotografie* (volně přeloženo „kreslení světlem“) se datuje k roku 1839, jeho autorem je britský astronom John Frederick Herschel. Vznik analogové fotografie lze z technického hlediska rozdělit do dvou částí: exponování materiálu

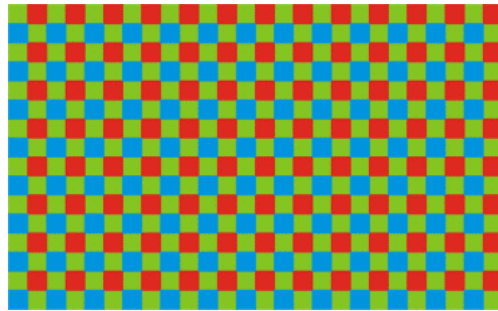
a zpracování exponovaného materiálu v laboratoři. Exponovaným materiálem je u analogových fotografií fotografický film-negativ, na němž je nanesa světlocitlivá vrstva. Během expozice se tato vrstva osvítlí a tím dojde k záznamu obrazu. Ve fotogrammetrii se jako fotografický negativní materiál používaly nejprve skleněné desky a později film na nesrážlivé podložce. Z exponovaných negativních materiálů se v laboratořích vytvoří zpravidla negativní snímek. Případné zhotovení pozitivu se provádí na zvětšovacích přístrojích expozicí negativu na pozitivní film či papír vyvolaný a ustálený v chemických roztocích.

Vznik technologie digitální fotografie je spojen s technologií záznamu televizního obrazu. V padesátých letech minulého století poprvé zaznamenaly páskové videorekordéry obraz z televizní kamery konverzí do elektrických impulsů a uložily jej na magnetickou pásku. V šedesátých letech začala tuto technologii využívat americká vesmírná agentura NASA ke snímání povrchu Měsíce a zasílání digitálních obrazových záznamů na Zemi. K širokému využití technologie digitální fotografie pak dochází koncem osmdesátých a v devadesátých letech minulého století v souvislosti s rozvojem elektroniky a výpočetní techniky [9].

Základní funkcí digitálního fotografování je snímání obrazů do podoby digitální fotografie, která umožňuje další zpracování pomocí výpočetní techniky. Jádrem digitálního fotografického přístroje je světlocitlivá plocha CCD snímače (z anglického Charge-Coupled Device, přeloženo „zařízení s vázanými náboji“). Na plochu senzoru je obraz promítán přes systém optických čoček objektivu. Světelná energie přicházející ze snímané scény je v jednotlivých pixelech (obrazových prvcích) převáděna na elektrický signál a uložena v podobě vázaného náboje. Po uzavření uzávěrky fotografického přístroje jsou generované náboje z čipu postupně odváděny a měřeny speciálním zesilovačem pro každý jednotlivý pixel. Takto získaný signál je dále převeden AD převodníkem na digitální signál v binárním kódu. Vzniklý datový proud je poté pomocí mikroprocesoru různě upravován a převeden do některého grafického formátu používaného pro záznam obrazových dat, např. JPEG nebo TIFF. Výsledný datový soubor je zpravidla uložen na paměťové medium v podobě paměťové karty.

Snímání barevných fotografií zajišťuje tzv. Bayerova maska, v níž jsou z každých čtyř buněk snímače dvě překryty zeleným filtrem, jedna červeným a jedna modrým (obr. 1). Toto

uspořádání souvisí se spektrální citlivostí lidského oka, která je v oblasti zelené barvy nejvyšší [10].



*Obr. 1 Bayerův filtr*

## 2 Fotogrammetrie – moderní metoda sběru a zpracování geoprostorových dat

### 2.1 Historie fotogrammetrie

Počátky fotogrammetrie lze s trochou nadsázky datovat do doby dávno před vynálezem fotografie (1839). Při úvaze, že snímky jsou středovými průměty objektů, jejichž proměrováním se fotogrammetrie zabývá, lze za počátek fotogrammetrie považovat již rok 1032, kdy arabský učenec Ibn Al Hasan Haitkam (965-1039) jako první popsal *cameru obscuru*. V době renesance Leonardo da Vinci (1452-1519) popsal dírkovou komoru, sloužící ke grafické konstrukci středových průmětů. Tyto metody ale vyžadovaly ruční kresbu obrazu, tudíž značné malířské zkušenosti a zručnost a tak nemohly dojít širšího uplatnění. Upadly skoro v zapomnění – čekalo se na objev média, které by bylo schopno vzniklý obraz uchovat. To se podařilo až vynálezem fotografie Niepcem a Daquerrem (1839). Název *fotografie* vyslovil J. F. Herschel v témže roce. Tento nový perspektivní vynález byl rychle zdokonalován.

Využití fotografie pro mapování a interpretační účely na sebe nedalo dlouho čekat. Podle návrhu A. Laussedata (1859) byl konstruován první fototeodolit a roku 1861 bylo fotografie poprvé využito ve Francii při mapování pomocí průsekové fotogrammetrie (*métrophotographie*). V roce 1874 R. Kennett vyrobil suché desky s bromidem stříbrným v želatině a v letech 1884 – 89 byl vynalezen a zdokonalen G. Eastmanem svitkový film a zkonstruován první klasický fotografický přístroj. V roce 1890 byla francouzskou firmou Pathé zkonstruována první fotografická letecká komora. Do konce století byla omezeně využívána průseková fotogrammetrie. Její nevýhodou byla nutnost identifikace odpovídajících si bodů na více snímcích, tj. jednotlivé určované body musely být přirozeně nebo uměle signalizovány [1].

Další rozvoj fotogrammetrie přišel na začátku 20. století – použití stereoskopie odstranilo nevýhody průsekové fotogrammetrie a výrazně zvýšilo přesnost metody. Průkopníkem stereofotogrammetrické metody byl Dr. C. Pulfrich, který v roce 1901 zkonstruoval stereokomparátor - první přístroj pro stereoskopické měření snímkových souřadnic. Stereokomparátor však umožňoval jen bodové vyhodnocení snímků a vyžadoval následné pracné výpočetní a zobrazovací práce. Měření snímkových souřadnic na

stereokomparátoru je dodnes nejpřesnějším způsobem získávání geoprostorových dat z fotogrammetrických snímků. Zdokonalením původního stereokomparátoru a mechanizací výpočetních prací zavedením prvků mechanické analogie se velmi úspěšně zabýval E. Orel, jenž v roce 1908 zkonstruoval první autostereograf. Tento přístroj se vyráběl od roku 1909 v závodech Carl Zeiss Jena pod názvem stereoautograf. Použití stereoautografu zjednodušilo a usnadnilo grafické vyhodnocení polohopisné a výškopisné složky mapy ze stereoskopických dvojic pozemních snímků. Pozemní fotogrammetrie se však mohla výhodně uplatnit jen při mapování menších a svažitých území nebo v horách.

Rozsáhlejší území je výhodnější mapovat z výšky, což ale vyžadovalo umístit fotografickou komoru na vhodný nosič. Do konce století se pro jednotlivé snímky a interpretační práce nejprve využívaly balony, které se ale pro své letové vlastnosti příliš neosvědčily. Vynálezem letadla (bratři Wrightové, 1903) byl umožněn vznik letecké fotogrammetrie. Letecké snímkování našlo uplatnění během 1. světové války, kdy byla letecká fotogrammetrie používána především pro vojenské sledovací a interpretační účely. Na začátku 1. světové války byla nadpoloviční většina všech letadel používána převážně pro účely leteckého průzkumu a snímkování.

Pro vyhodnocení jednotlivých leteckých snímků rovinatého území se používal překreslovač, zkonstruovaný Th. Scheimpflugem v roce 1903, stereoskopické snímky se nejprve vyhodnocovaly pomocí projekčního multiplexu. Po roce 1915 byla již vyráběna celá řada přístrojů pro vyhodnocení stereoskopických dvojic pracujících na analogovém principu. V roce 1935 přišel na trh první barevný film Kodakchrome. Během druhé světové války byl vyvinut další druh – spektrozónální film.

Historie fotogrammetrie v Čechách se datuje již od svého prvopočátku této metody díky profesorovi Dr. Karlu Kořistkovi. Profesor Kořistka se na studijní cestě ve Francii seznámil s novou mapovací metodou přímo od A. Laussedata a poté ji použil v Praze. Ze dvou stanovisek, umístěných na Hradčanech a na Petříně, zhotovil fotografické snímky a metodou průsekové fotogrammetrie určil polohu věží a významných bodů v tehdejší Praze. Po něm se fotogrammetrií zabýval profesor F. Steiner, autor jedné z prvních učebnic fotogrammetrie. Mezi prvními pracemi většího rozsahu v tehdejší době bylo mapování Tater metodou průsekové fotogrammetrie v měřítku 1 : 25 000 [1].

Rozvoj fotogrammetrie po první světové válce byl v tehdejší Československé republice výrazný. První pozemní stereofotogrammetrické měření bylo provedeno v roce 1921, když bylo mapováno asi 400 ha území města Trutnov a na stereoautografu vyhotoveny mapy v měřítku 1 : 4000 a 1 : 1000 s vrstevnicemi po 1 m. Do roku 1938 zmapoval tehdejší Vojenský zeměpisný ústav asi 1600 km<sup>2</sup> pozemní fotogrammetrií a přes 67 000 km<sup>2</sup> leteckou fotogrammetrií.

Další vývoj fotogrammetrie nastal po druhé světové válce. V roce 1952 byly zahájeny práce na vojenském topografickém mapování území tehdejšího Československa v měřítku 1 : 25 000. Od roku 1954 se tyto práce prováděly kromě Vojenského topografického ústavu i na pracovištích Ústřední správy geodézie a kartografie. Během čtyř let, do roku 1957, bylo univerzální fotogrammetrickou metodou (kdy se ze snímků vyhodnocuje současně polohopis a výškopis) a kombinovanou metodou (kdy se výškopis doplňuje do fotoplánu metodou stolové tachymetrie) zmapováno 90 % území státu. V letech 1957 - 1965 byla rovněž převážně fotogrammetrickou metodou vyhotovena topografická mapa v měřítku 1 : 10 000, v některých lokalitách 1 : 5000. Vyhodnocování snímků bylo tehdy prováděno na analogových vyhodnocovacích přístrojích (převážně stereoplanigrafech a autografech). Zavedením letecké fotogrammetrie do mapování se finanční náklady snížily přibližně asi o jednu třetinu a časová úspora byla téměř 50procentní.

Počátkem šedesátých let 20. století měly být podle vládního nařízení zhotoveny nové technickohospodářské mapy (THM) v měřítku 1 : 1000 až 1 : 5000 pro potřeby národního hospodářství. Hlavní mapovací metodou byla letecká fotogrammetrie. Původně předpokládaná doba mapování území celého státu měla být asi 35 let. V rámci TH mapování bylo celkem zmapováno asi 8,5 % území dnešní České republiky (tj. přibližně 1100 katastrálních území), přičemž letecké fotogrammetrie bylo využíváno v lokalitách s minimální rozlohou 500 ha a v extravilánech [4].

Zároveň s mapováním území státu byla letecká fotogrammetrie využívána i pro jiné účely, například při mapování lesů, vodních toků a vodních děl, v dopravním stavitelství (projekty dálnice, elektrifikace žel. tratí, Jednotná železniční mapa), pozemní fotogrammetrie nejvíce v památkové péči a pro sledování těžby v lomech a na povrchových hnědouhelných dolech.

Analogové vyhodnocovací přístroje se za období od 20. do 70. let 20. století příliš nezměnily. S vývojem výpočetní techniky se postupně od poloviny 80. let začalo přecházet na analytické metody vyhodnocování. Princip analytického přístroje, na základě řešení přímého vztahu mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi byl patentován finským fotogrammetrem Dr. Uki Helavou v roce 1957, ale na úspěšnou realizaci metody bylo nutno čekat do doby rozšíření osobních počítačů. Prudký rozvoj zaznamenaly analytické přístroje teprve po roce 1980 a vzhledem ke své vysoké přesnosti se vyrábějí ještě v současné době.

Koncem osmdesátých let minulého století nastala ve fotogrammetrii skutečně revoluční změna. Rychlý rozvoj výpočetní techniky umožnil vznik prvních digitálních zpracovatelských systémů a tím nastoupila éra digitální fotogrammetrie (softcopy photogrammetry).

Dalším posunem ve vývoji je splývání fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země, který přináší družicovou technologii i do oblasti fotogrammetrie. Využití umělých družic Země, doposud pouze v oblasti mapování v malých a středních měřítkách, se díky novým snímacím systémům s rozlišovací schopností pod 1 m dostává i do mapování v měřítkách 1 : 10 000 a 1 : 25 000. Družicové multispektrální a panchromatické snímky v kombinaci „pansharpening“ se užívají pro tvorbu tématických map. Kromě konvenční měřické filmové komory se na družicích instalují skenující radiometry (skenery), které pracují v řadě úzkých pásem širšího spektrálního oboru (až po tepelné záření) a umožňují též stereoskopické snímání, a dále zobrazující radarové systémy SAR (Synthetic Aperture Radar) [1].

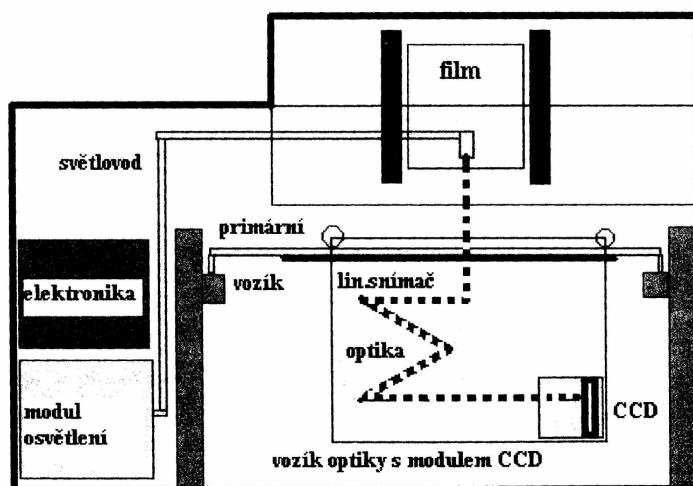
## **2.2 Fotogrammetrie na prahu 21. století**

### **2.2.1 Digitální skenery**

V současné době je nejrozšířenějším způsobem tvorby digitálních snímků metoda digitalizace předlohy (sekundární digitalizace), tzn. převod analogových LMS na filmu do digitální podoby. Tento postup je realizován na speciálních fotogrammetrických skenerech. Princip skeneru je založen na snímání obrazu CCD senzory. Fotogrammetrické skenery musí splňovat některé specifické požadavky, především vysokou geometrickou a radiometrickou přesnost, dostatečné rozlišení (moderní skenery pracují teoreticky s rozlišením až 5000 DPI, tj. velikost pixelu je méně než 5 $\mu$ m a s polohovou přesností 2  $\mu$ m), jejich součástí je výkonný hardware a



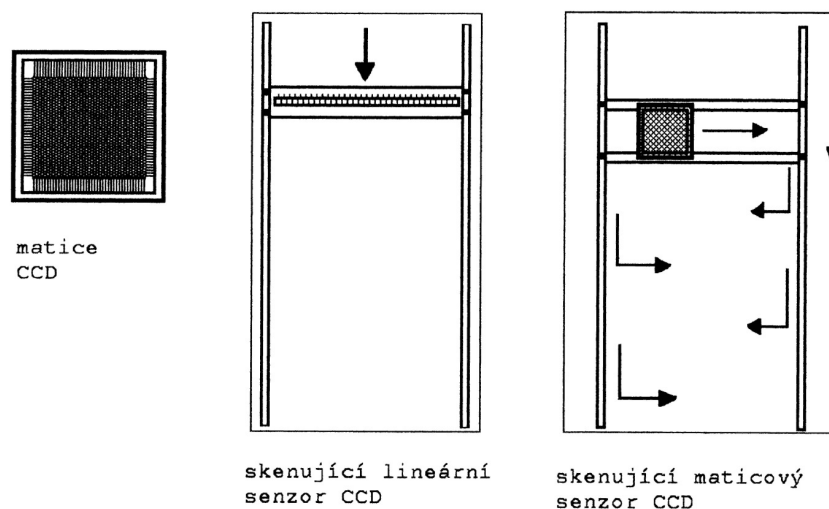
kvalitní software. Podle systému skenování se skenery dělí na přístroje s pohyblivými CCD senzory (např. skener PhotoScan2001 firmy Z/I Imaging) a na přístroje, u nichž jsou CCD snímače stacionární, při skenování se pohybuje obraz (např. skener DSW500 firmy L/H Systems, dříve Leica).



Obr. 2 Princip fotogrammetrického skeneru [3]

Nastavení geometrické a radiometrické přesnosti probíhá na skenerech softwarově, stejně jako zbavení optických a barevnostních vad naskenovaných snímků, nastavení hustoty skenování, hodnot kompresního poměru, výstupního formátu dat a podobně. Skenery zároveň zvládají i řešení dalších fotogrammetrických úloh, například automatickou aerotriangulaci. Skenery bývají umístěny ve vyhrazených místnostech s minimální prašností [3].

U běžně používaných skenerů snímá senzor v určitém okamžiku jeden řádek pixelů a pohybuje se ve směru kolmo na předlohu. Princip fotogrammetrických skenerů je podobný. Šířka dnes vyráběných senzorů (a tedy počet pixelů v jedné řadě) však nestačí k nasnímání celé šířky snímku v požadovaném rozlišení, proto se snímky skenují v pruzích, které následně software skeneru spojuje.



Obr. 3 Konstrukce senzoru skenerů [3]

Konstrukce snímacího zařízení (senzoru) je u dnes vyráběných skenerů buď trilineární (řádkový) anebo plošná (maticová). Běžně používané optické rozlišení skenovaných snímků je zpravidla 7, 14, 21 nebo 28 mikrometrů. Objem dat naskenovaného leteckého snímku velikosti 23 x 23 cm je při rozlišení 7  $\mu\text{m}$  v barevném provedení cca 3,2 GB, u černobílého snímku cca 1 GB. Při rozlišení 28  $\mu\text{m}$  je to pak cca 200 MB pro barevný a cca 70 MB pro černobílý snímek. Rychlost skenování jednoho snímku je 5 až 10 min, v závislosti na požadovaném rozlišení a typu skeneru.

Základní konstrukce fotogrammetrických skenerů se stabilizovala přibližně před patnácti lety a nové typy těchto přístrojů se od svých předchůdců liší jen minimálně. Postupně se zvyšuje rychlost skenování a zlepšuje se softwarové vybavení skenerů (jednak jednoduchost a automatizace některých úkonů a jednak nové možnosti úpravy naskenovaných snímků, např. kompenzace škrábanců a nečistot snímku, filtrace obrazu, ostření, změny kontrastu apod.) [12]. V tabulce 1 jsou uvedeny typy skenerů vyráběných v poslední době a jejich vybrané parametry.

Tabulka 1

Výrobce, název	polohová přesnost [ $\mu\text{m}$ ]	geometrické rozlišení		formát předlohy [mm]	výstupní formáty	navíjení role	přibližná cena [€]
		[ $\mu\text{m}$ ]	DPI				
Vexcel UltraScan 5000	2	5 - 28,8	5080 - 882	330x440*	TIFF, tilled TIFF, JPG, RAW, EPS, DCS	150m	70 000
Z/I Imaging PhotoScan 2003	1	7	3629	275x250	TIFF, JPEG	150m	130 000
Leica DSW 700	2	4,5 - 22	5644 - 1155	260x260	TIFF, tilled TIFF, JPG	152m	140 000

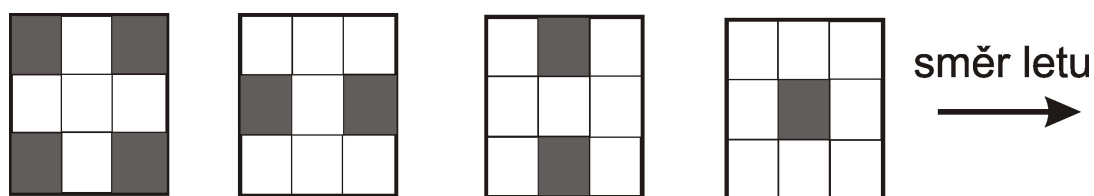
\* platí pro rozlišení 882 DPI

Nejpoužívanějším výstupním formátem naskenovaných dat je formát TIFF, popřípadě tilled TIFF (kachlový). Dalšími používanými formáty jsou např. BMP, GIF, IMG, JPEG, PCX. Liší se od sebe zejména stupněm komprese uložených dat a strukturou jejich ukládání [3]. Skenery UltraScan 5000 a PhotoScan 2003 (z tabulky 1) mají trilineární konstrukci senzoru, přístroj DSW 700 pracuje s plošným senzorem. Senzor tohoto skeneru je stacionární, kdežto senzory ostatních uvedených přístrojů jsou pohyblivé.

### 2.2.2 Digitální kamery

Poměrně novou a v současné době také prudce vyvíjející se technologií v moderní fotogrametrii je přímý (primární) vznik digitálních snímků za pomoci digitálních fotografických přístrojů, přesněji řečeno digitálních měřických kamer. Doposud největším problémem rozšíření digitálních (leteckých) měřických kamer byla konstrukce maticového CCD senzoru s dostatečně velkým rozlišením. Při standardně používaném formátu leteckého měřického snímku 23 x 23 cm a požadovaném rozlišení alespoň 10  $\mu\text{m}$ , které je srovnatelné s analogovou technologií, by byla potřeba zkonstruovat matici senzorů s počtem 529 milionů CCD prvků (23 000 x 23 000 pixelů). Toto však v současné době žádný výrobce za přijatelnou cenu nedokáže. Nyní na trhu existují CCD matice s maximálním počtem 4000 x 4000 elementů.

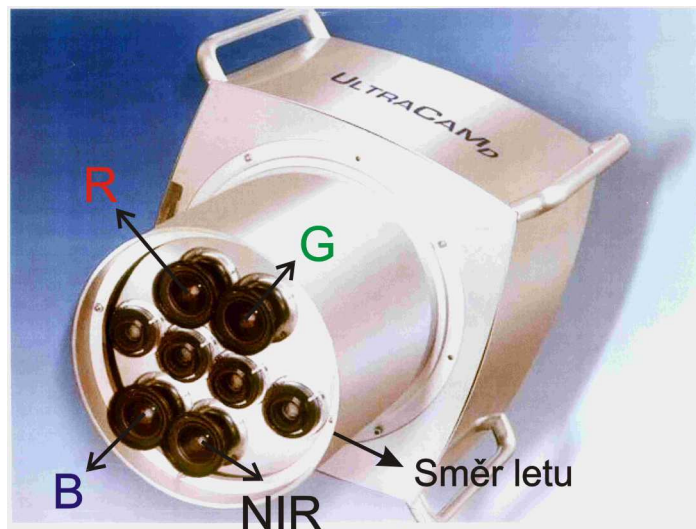
Tento konstrukční nedostatek řeší v současné době výrobci digitálních leteckých kamer (konkrétně Vexcel) použitím principu skládání výsledného obrazu z devíti částečně překrývajících se subobrazů. Digitální kamera je složena ze čtyř panchromatických objektivů s rovnoběžnými osami záběru, v jejichž ohniskových rovinách jsou umístěny maticové CCD senzory. Konfigurace osazení sensorů je v každém systému odlišná (viz obr. 4). Výsledný obraz, který je softwarově spojen do jednoho záznamu, má vynikající radiometrické vlastnosti [5].



Obr. 4 Schéma panchromatických objektivů s odlišným osazením sensorů

Vznik barevného obrazu s vysokým rozlišením je u digitálních kamer většinou realizován použitím principu *pansharpening* (panchromatické zostření multispektrálního obrazového záznamu): např. u kamery Vexcel UltraCam je černobílý panchromatický záznam s rozměrem pixelu 9  $\mu\text{m}$  (resp. 7,2  $\mu\text{m}$ ) doplněn o barevnou informaci, pořízenou samostatnými maticovými senzory v jednotlivých barevných složkách R (červená), G (zelená), B (modrá) a NIR (blízká infračervená) [5].

Součástí digitálních leteckých kamer je zařízení pro kompenzaci smazu obrazu snímků, Forward Motion Compensation (FMC). Tímto zařízením jsou vybaveny i novější typy analogových kamer, kde je princip FMC založen na protipohybu snímkového rámu s přisátým filmem v momentě expozice snímků. Toto zařízení je nutné především při použití rychlejšího letadla a nízkých výškách letu nebo při nutném použití delší expozice (snímkování za méně nepříznivého počasí). Letecká kamera je zavěšena v gyroskopickém závěsu, zabezpečujícím povšechnou svislost osy záběru i při náklonech letadla.



Obr. 5 digitální kamera Vexcel UltraCamD

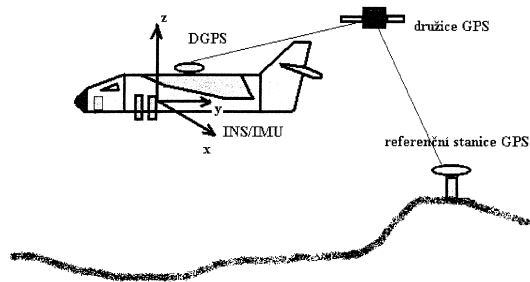
### 2.2.3 Použití DGPS a IMU

Stále častěji využívanou technologií při leteckém měřickém snímkování je použití zařízení GPS (Global Positioning System) a IMU (Inertial Measurement Unit). Velice časově efektivní a ekonomické je použití systému GPS pro geodetické zaměření výchozích vlícovacích bodů (jejich pomocí se provádí analytická aerotriangulace LMS, určení prvků vnější orientace, vlícovací body slouží také jako kontrola při vyhodnocování). Další využití GPS spočívá v přesné navigaci letadla při realizaci snímkového letu (dodržení výšky a polohy letadla a směru letu).

K určení úhlové orientace snímku v prostoru slouží aparatura IMU. Tato integrovaná měřicí jednotka poskytuje v krátkých časových intervalech velmi přesné údaje. Pomocí 3 gyroskopů a 3 akcelerometrů umožňuje jednotka IMU určit 3 úhlové prvky vnější orientace LMS v okamžiku expozice ( $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ ). Propojením zmíněných dvou aparatur vznikne tzv. integrovaný GPS/IMU systém, schopný přesného určení všech šesti prvků vnější orientace (v některé literatuře se označují tyto aparatury jako GPS/INS).

K odstranění systematických chyb se používá metoda DGPS (Differential GPS). Princip systému DGPS spočívá v umístění přídatné pozemní GPS referenční stanice v blízkosti snímkové lokality.

Tato technika umožňuje významně snížit počet vlíčovacích bodů na zemském povrchu a zároveň zvýšit přesnost georeferencování LMS. Postupným zpřesňováním souřadnic určených těmito metodami dojde pravděpodobně v budoucnu k přímému georeferencování LMS a digitální aerotriangulace v současném rozsahu se již nebude provádět.



Obr. 6 Schéma aparatur DGPS/IMU [3]

#### 2.2.4 Letecké laserové skenování

Další novou a rychle se rozvíjející metodou sběru geoprostorových dat je metoda laserového skenování (laserscanning). Tato metoda nachází využití např. v památkové péči a architektuře (pozemní laserscanning), při tvorbě digitálního modelu terénu (DMT) a digitálního modelu povrchu (DMP), projektování liniových staveb (dálnice, železnice), dokumentaci vedení vysokého napětí, ale také při tvorbě 3D modelu měst, vyhodnocování stavu lesních porostů (vyhodnocovat lze koruny a výšky jednotlivých stromů a s tím související další kvalitativní parametry) apod. ve variantě letecký laserscanning.

Princip laserového skenování vychází z emitace (vyzařování) laserového záření (viditelného nebo infračerveného) a po odrazu paprsku od měřeného objektu dojde k jeho detekci. Emitor generuje pulsy záření s velmi vysokou frekvencí (až 80 000 Hz). Vysílaný paprsek při průchodu vegetací sice ztrácí intenzitu, ale dokáže se ještě odrazit od terénu. Na základě zpracování těchto parametrů detektorem lze určit prostorové souřadnice změřených bodů. Počet změřených bodů se pohybuje v řádech tisíců až milionů za minutu. Přesnost výšek bodů určených leteckým laserovým skenováním se pohybuje v rozmezí 0,10 m – 0,30 m při výškách letu od 500 m do 3000 m. Nezbytnou součástí leteckého laserového

skeneru je zařízení DGPS/IMU. Kompletní systém leteckého skeneru, včetně datové a obrazové jednotky, se nazývá LIDAR [2].

Pro mapování se nejvíce využívá vlnová délka 1100 – 1200 nm, tj. infračervené záření (mapování vodních ploch používá zelenomodré záření do 500 nm). Podle druhu pohybu hranolu, usměřujícího vysílaný paprsek, existují letecké skenery s rotačním zrcadlem, oscilujícím zrcadlem a skenery se svazkem optických vláken. Každý z těchto systémů má určité klady a zápory. Při výšce letu 500 m a rychlosti letu 70 m/s je přibližná hustota zaměřených bodů 1,6 bodu/m<sup>2</sup>. K vyloučení odlehlých pozorování se používají různé filtrace dat, nejčastější jsou morfologické filtry [6].

### **3 Postupy a produkty fotogrammetrie po roce 2000**

Do konce 80. let minulého století byl v tehdejší Československu obor fotogrammetrie řízen ústředním orgánem resortu – Českým úřadem geodetickým a kartografickým. Speciální fotogrammetrické práce prováděl Vojenský topografický ústav Dobruška (dnes Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad), který byl v té době jediným dodavatelem LMS a dodnes disponuje jejich rozsáhlým archivem (od 50. let minulého století bylo prováděno snímkování celého území republiky opakovaně pro aktualizaci základní topografické mapy 1 : 10 000). Tyto snímky mají vysokou historickou a dokumentační hodnotu [2]. Vlivem společenských změn po roce 1989 se fotogrammetrie jako mnoho jiných oborů stala středem zájmu komerční sféry a dnes se v České republice tímto oborem zabývá přibližně 20 firem. V regionu západních Čech působí tři firmy, z nichž dvě mají sídlo v Plzni. V této kapitole budou stručně přiblíženy činnosti od zadání zakázky až po vyhotovení zadané práce.

#### **3.1 Projekt leteckého měřického snímkování**

Zadavatel vyznačí zpracovateli zájmovou oblast, zadá požadovanou přesnost výstupních dat a způsob jejich využití, dále pak požadované měřítko mapování, velikost obrazového prvku (pixelu) v území v případě tvorby ortofotomapy a její požadovanou přesnost. Standardní polohová přesnost ortofotomapy se uvádí 1,5 - 2násobek velikosti pixelu. Z těchto důležitých informací se dále odvíjí potřebná výška letu, typ a konstanta kamery a přibližné měřítko snímků. Dalším požadavkem může být možnost výstupu jen v digitální podobě na vhodném nosiči (CD nebo DVD) anebo zároveň i tisk barevné ortofotomapy na kvalitním fotografickém papíře (může být doplněno např. soutiskem s vektorovou mapou dané lokality). V neposlední řadě je zadán termín vyhotovení, buď celé zakázky kompletně, nebo dohodne termín snímkování (s ohledem na počasí, vliv vegetačního pokryvu a pod.).

Na základě těchto informací je zpracovatel schopen zahájit přípravné práce, konkrétně zvolí typ kamery (při snímkování města se volí kamera s větší ohniskovou vzdáleností než při snímkování rovinných nezastavěných oblastí), ke které získá kalibrační protokol. Ten je důležitý pro znalost prvků vnitřní orientace LMS. Dále zpracovatel realizuje vlastní projekt leteckého měřického snímkování, konkrétně provede:



- určení přibližného měřítka snímku ze vztahu  $m_s = \frac{h}{f}$  [2], kde  $h$  je relativní výška letu [m] a  $f$  je konstanta kamery [m],
- rozvržení letových os. Má-li nalétávaná lokalita plošný charakter (např. plocha celého kat. území), jsou osy letu zpravidla ve směru východ-západ, u liniových staveb (dálnice) kopíruje osa snímkování osu přímých úseků stavby [2],
- výpočet předpokládaného počtu LMS ze vztahu  $n = \frac{D}{b+1}$  pro každou řadu LMS, kde  $D$  je celková dráha letu nad danou lokalitou [m] a  $b$  je fotogrammetrická základna [m], jež se určí ze vztahu  $b = s' * m_s * (1 - \frac{p}{100})$ , kde  $s'$  je rozměr snímku [m],  $m_s$  měřítko snímku a  $p$  je hodnota podélného překrytu,
- volbu překrytů jednotlivých snímků a řad. Podélný překryt  $p$  je standardně 60 %. Tato hodnota umožňuje trojnásobné překrytí (20 %) snímku předcházejícího, příslušného a následujícího a zároveň vznikne překryt na sebe navazujících stereoskopických modelů (v místě trojnásobného překrytu snímků je nejvýhodnější umístit vřícovací a spojovací body). V zastavěných oblastech může mít podélný překryt vyšší hodnoty, až 80 % (z důvodu možnosti vyhodnocení perspektivou zakrytých míst). 80procentní překryt také umožňuje výběr 60% překrytu snímků (pro optimální umístění vřícovacích bodů) lichých nebo sudých (nevýhodou jsou vyšší náklady). Příčný překryt  $q$  se obvykle volí 30 %. Při snímkování horských oblastí a vysoké městské zástavby je možno volit hodnotu  $q$  až 60 %, minimální hodnota by neměla být menší než 15 %. V místě příčného překrytu je optimální volit umístění vřícovacích a spojovacích bodů,
- zvolí možnost využití zařízení DGPS a IMU pro přímé určení prvků vnější orientace za letu a zařízení pro kompenzaci smazu obrazu FMC,
- realizuje přednáletovou signalizaci. Vřícovací body se signalizují na vhodných barevně kontrastních plochách terči (v rostlém terénu) nebo nátěrem (betonové a asfaltové plochy, komunikace). Rozmístění vřícovacích bodů záleží na tom, zda budou určeny pouze geodeticky nebo většina aerotriangulací. Následuje zaměření vřícovacích bodů (výhodné je signalizovat body ZPBP z důvodu znalosti jejich souřadnic). Pro kontrolu fotogrammetricky vyhodnocených bodů lze signalizovat další stabilní prvky v terénu (sloupky plotů, víka dešťových vpustí a pod.). V protokolu se uvede velikost a barva signálů,
- určení absolutní nadmořské výšky letu dle vztahu  $H_a = H_f + h$ , kde  $H_f$  je střední výška území (fiktivní srovnávací rovina), určovaná pro každou letovou řadu [m]. Zjišťuje se odhadovaným odpočtem z vrstevnicové mapy,  $h$  je relativní výška letu,
- zhotovení schematického náčrtu LMS. Do existující mapy vhodného měřítka zájmového území se zakreslí náletové osy a v každé letové řadě poloha bodů s extrémními nadmořskými výškami. Náletové osy se očíslovají směrem od severu k jihu, případně od západu k východu, k příslušné ose se uvede absolutní výška letu  $H_a$ , zaokrouhlená na desítky metrů.

### **3.2 Skenování snímků na filmu kontra digitální snímání obrazových dat**

Mezi výhody skenování patří zavedená a propracovaná technologie převodu LMS do digitální podoby, přijatelná cena tohoto převodu a volitelný rozměr pixelu. Výhodami přímého vzniku digitálního obrazu jsou především odpadající náklady na fotografický materiál a skenování, počet zhotovených snímků a velikost překrytů tak nemá podstatný vliv na cenu snímků (nejvýznamněji u jednořadového náletu). Pořizovací cena digitální kamery je nyní přibližně třikrát vyšší proti ceně přesného fotogrammetrického skeneru. Přímý záznam digitálního obrazu kamerou je technologií blízké budoucnosti, vývoj fotogrammetrie se bude ubírat tímto směrem.

### **3.3 Účel analytické aerotriangulace**

#### **3.3.1 Vlícovací body**

Vlícovací body slouží především jako prostředek k převodu souřadnic zjištěných vyhodnocením měřických snímků do požadovaného geodetického souřadnicového systému. Obecně platí zásada, že čím větší je počet výchozích vlícovacích bodů, tím přesnější je výpočet aerotriangulace. Zde je však třeba brát v úvahu celkový účel použití vlícovacích bodů v souvislosti s náklady spojenými na jejich signalizaci a zaměření v terénu.

Pro vyhodnocení stereodvojice snímků je třeba určit 12 neznámých prvků vnější orientace (pro jeden snímek 6). Jsou to souřadnice středu projekce snímku  $x_0, y_0, z_0$  a úhly rotace  $\omega, \phi, \kappa$ . Každý vlícovací bod v překrytovém území stereodvojice představuje ve výpočtu aerotriangulace čtyři rovnice (2 rovnice snímkových souřadnic pro každý snímek stereodvojice). Minimální nutný počet vlícovacích bodů na jednu stereodvojici je  $12 : 4$ , tj. 3. Z důvodů žádoucích nadbytečných měření je nejčastěji užívaný počet bodů 4 až 6 [2].

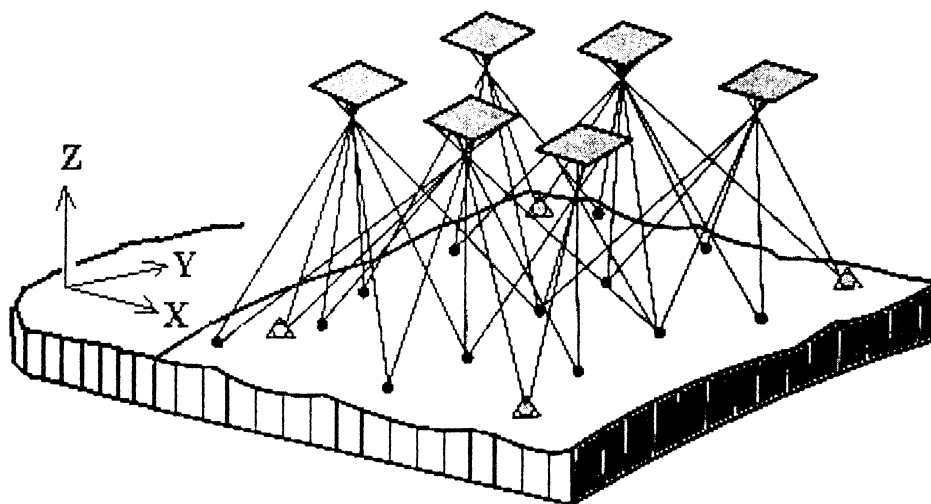
#### **3.3.2 Účel a princip analytické aerotriangulace**

Základním účelem analytické aerotriangulace (AAT) je převod LMS do geodetického referenčního systému, dále pak spojení a vyrovnání jednotlivých snímků do bloků, zhuštění pole vlícovacích bodů, získání výchozích dat pro ortogonalizaci snímků (převod středového

průmětu LMS na průmět ortogonální) a následná tvorba ortofotomap či DMT (AAT slouží k určení většího počtu bodů fotogrammetricky, a to z malého počtu bodů vhodně rozložených a určených geodeticky). AAT vychází ze vztahu mezi snímkovými souřadnicemi vlíčovacích bodů změřených na snímcích a souřadnicemi totožných bodů geodeticky zaměřených v terénu. Metody AAT se začaly aplikovat s nástupem prvních (sálových) počítačů v 70. letech minulého století, avšak hromadné použití nastalo až s nástupem výkonných osobních počítačů v 90. letech.

Současné metody AAT patří mezi nejdůležitější operace ve fotogrametrii. Původně se používalo **etapové řešení** (Schutovo řešení, blokové vyrovnání), kdy je blok LMS vyrovnáván v postupných krocích (etapách). V prvním kroku se provede relativní orientace, tzn. souřadnice snímků se postupně transformují kolineární transformací do souřadnicové soustavy prvního snímku na základě spojovacích bodů. V takto spojené soustavě se v dalším kroku provede vyrovnání a spojení projekčních center jednotlivých modelů, důležité pro výškovou stabilizaci celého bloku (tento krok se nazývá *měřítkové připojení*). V posledním kroku se provede podobnostní transformace bloku na vlíčovací body určené v geodetickém souřadnicovém systému. Tato metoda je již překonána v souvislosti s ohromnými možnostmi současných osobních počítačů.

Současný postup se označuje jako **komplexní řešení** (Schmidovo řešení, svazkové vyrovnání), kdy jsou všechny modely vyrovnávány jednorázově prostorovou transformací přímo na geodeticky určené vlíčovací body. Jedná se o rozsáhlý systém normálních rovnic. Počet rovnic  $n = (x * 6)^3$ , kde  $x$  je počet snímků a číslo 6 je počet neznámých (prvků vnější orientace).



Obr. 7 Schéma svazkového vyrovnání bloku [2]

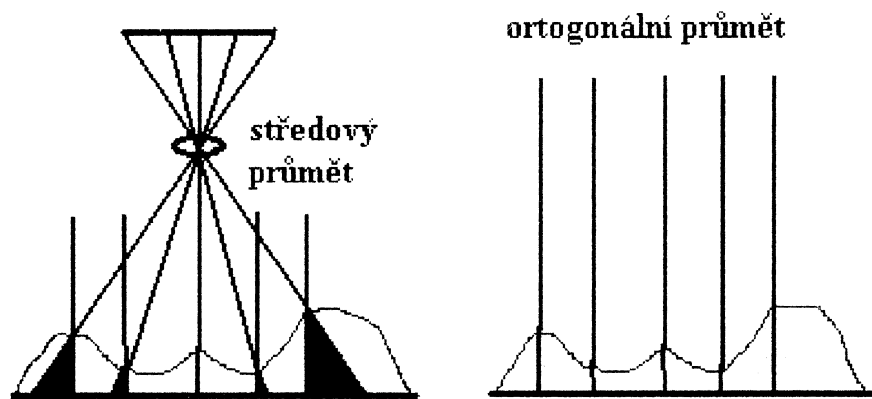
AAT představuje složité výpočty, realizované rozsáhlými programy (např. program *MATCH – AT*, *PAT – B*). Software umožňuje mnoho přídatných funkcí, například volbu automatického vyhledávání vlíčovacích bodů, vypuštění z výpočtu vlíčovacího bodu s velkými odchylkami a pod. Samozřejmostí je výsledný protokol s odchylkami, středními a maximálními chybami a prvky vnější orientace.

### 3.4 Tvorba mapových podkladů

Mapové podklady jsou jedním z výsledných produktů digitální fotogrammetrie. Jsou to především ortofotomapy se zachovalým obsahem leteckých snímků, rastrové nebo vektorové mapy (vyhodnocené z LMS), popřípadě jejich kombinace.

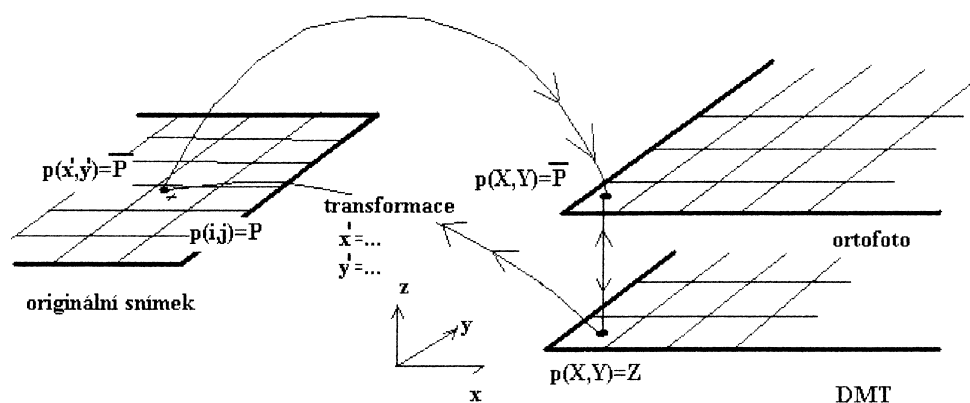
#### 3.4.1 Ortofotomapa

*Ortofotomapa* je kolmý (ortogonální) průmět LMS. Vznikne diferenciálním překreslením středového průmětu snímku a odstraněním radiálního zkreslení, způsobeného centrální (středovou) projekcí. Radiální zkreslení (posun) je přímo úměrné převýšení zobrazovaného bodu nad/pod střední srovnávací rovinou, měřítku snímku, konstantě letecké kamery a radiální vzdálenosti bodu na snímku od jeho středu [3].



Obr.8 Středový a ortogonální průmět [3]

Tvorbě ortofotomapy obvykle předchází opatření existujícího nebo vlastní tvorba digitálního modelu terénu (DMT). Ortofotomapa vznikne tak, že se nejprve vytvoří „prázdný“ snímek v rastru stejné velikosti a polohy jako má DMT. V následné operaci se nepřímou geometrickou transformací převedou jednotlivé pixely DMT na původní originální snímek a provede se interpolace mezi hodnotami obrazové funkce v blízkých pixelech na snímku. Vyhledávání odpovídajících si hodnot pixelu se uskutečňuje na základě bilineární interpolace (výpočet ze čtyř nejbližších okolních stupňů šedi) nebo interpolace bikubické (celkem ze 16 nejbližších okolních stupňů šedi). Výsledná hodnota obrazové funkce (optické hustoty) se dosadí do prázdného pixelu nad DMT.



Obr.9 Princip tvorby ortofota [3]

Není-li k dispozici DMT nebo jen s nedostatečnou podrobností a přesností, lze určit výšku jednotlivých pixelů obrazu na základě automatické korelace obrazových dat (hledá se maximální obrazová podobnost bodů) a následným odečtením horizontální paralaxy ve stereodvojici snímků. Korelace se provede postupně pro celé území stereodvojice, avšak výsledkem v prvním kroku je digitální model povrchu objektů a vegetace (DMP), který je

nutno manuálně editovat redukcí na terén. Následující postup tvorby ortofotomapy je shodný s předcházejícím [3].

Po vytvoření ortofotomapy z několika ortofot se vytvoří jejich spojení v celek, v tzv. *bezešvou mozaiku* a provedou případné úpravy barevných (radiometrických) nespojitostí. Součástí mozaikování ortofotomap může být též následné rozdělení do požadovaného kladu mapových listů (v případě tisku souboru mapových listů).

Při tvorbě ortofotomap v zastavěném území vzniká tzv. *problém zakrytých ploch*, vzniklý při ortogonalizaci radiálním posunem vrcholů stromů a staveb. Tento problém se řeší využitím obrazových dat z vedlejšího snímku pořízeného s dostatečně velkým podélným i příčným překrytem. Takto zhotovené ortofoto se nazývá *pravé ortofoto* (true orthophoto). Veškerá činnost spojená s tvorbou ortofotomap je prováděna pomocí speciálního software, např. *OrthoVista*, *OrthoMaster*, *OrthoMAX*, *OrthoBASE*.

### **3.4.2 Vektorová mapa**

Fotogrammetrické vyhodnocení ve vektorové formě (*čárová mapa*) je prováděno ze stereomodelů. *Stereomodel* vzniká v překrytu dvou snímků s provedenou absolutní orientací. Nezbytnou součástí pro vyhodnocování je specializovaný software, kvalitní grafická karta umožňující práci s frekvencí monitoru nad 110 Hz, fotogrammetrická 3D myš s citlivým polohovacím zařízením a krystalové nebo polarizační brýle.

Při tvorbě vektorové mapy je fotogrammetrický program propojen s CAD aplikací (např. *Autocad*, *Microstation*), v níž se předem zvolí požadované atributy kresby v závislosti na účelu vyhotovované mapy. Vyhodnocením lze vytvořit mapy různých měřítek, jejichž přesnost je závislá především na kvalitě a parametrech LMS, velikosti pixelu a schopnostech a zkušenostech operátora.

### **3.5 Vyhodnocení digitálního modelu terénu a povrchu a jejich využití**

Digitální model terénu DMT je matematický popis plochy terénu. Existuje několik typů terénních modelů: polyedrický, rastrový a plátový. V digitální fotogrammetrii se nejvíce

používá model rastrový (Grid) a polyedrický. Tento model reprezentuje nepravidelná trojúhelníková síť TIN. Tvorba DMT je realizována pomocí speciálního softwaru (např. *SiteWork*, *Atlas*), který jej automaticky vytvoří ze stereodvojice snímků. Přesnost DMT je závislá na vstupních datech (parametry a kvalita LMS, velikost pixelu, měřítko snímkování, přesnost aerotriangulace, zkušenosti vyhodnocovatele). Při použití velkého měřítku snímku (1 : 3500 – 1 : 7000) dosahuje střední výšková chyba DMT  $m_z$  0,10-0,15 m.

DMT vzniká buď jako druhotný produkt při tvorbě ortofot, nebo je přímo cílovým produktem. Digitální model povrchu DMP představuje povrch nad terénem, tzn. koruny stromů, špičky stožárů, střechy budov apod. DMT je využíván při tvorbě vrstevnicových plánů (vrstevnice s požadovaným základním intervalem jsou automaticky vykresleny), jako podklad pro GIS, analýzy výškových profilů terénu, vyhodnocení terénních hran, výpočty kubatur, vizualizace záplavových území apod., DMP se využívá např. pro vizualizace projektů v pozemním a dopravním stavitelství, průlety nad terénem a 3D modely měst a památkových objektů.

### **3.6 Vizualizace, 3D modely a průlety nad terénem**

Vizualizace je další z řady nových možností využití digitální fotogrammetrie, kdy je na základě polohopisných a výškopisných digitálních dat vytvořena realisticky působící 3D scéna, kterou lze dále využít pro prezentaci skutečného stavu projektované stavby a jiných zamýšlených změn v zájmovém území. Výstupem pak mohou být statické 3D pohledy na scénu, průlety nad terénem po zvolené trase a interaktivní prohlížení scény popsané ve VRML.

Z ortogonalizovaných snímků a DMR se ve speciálním programu vytvoří průlet nad terénem, do nějž je možno vložit nově navrhované prvky (např. stavby, stromy, vegetaci) a tak třírozměrně modelovat zamýšlený projekt (např. výstavbu větších komplexů budov, mostů, zářezy a násypy navrhovaných komunikací a pod.) Při generování průletu je možno zvolit rychlost a dráhu letu, směr pohledu a povrch modelu lze pokrýt skutečným stavem terénu (z ortofota) nebo libovolnou mapou (katastrální mapa, různé tématické mapy a pod.)

Použití vizualizace je vhodné například pro přiblížení navrhovaných projektů laické veřejnosti, názornou představu o navrhovaných změnách (při jednání s vlastníky pozemků dotčených zamýšlenou stavbou) a to v mnoha oborech, jež se nějakým způsobem podílejí na změnách a tvorbě reliéfu krajiny.



## 4 Praktická ilustrace využití fotogrammetrie při projektování a výstavbě dálničního obchvatu Plzně

Obchvat Plzně byl posledním budovaným úsekem dálnice D5, spojující Prahu s německým Norimberkem. Celková délka úseku činila 21 km a byla rozdělena do několika částí:

- 0510/IA - Ejpovice-Černice, východní část obchvatu o délce 8,6 km,
- 0510/IB - Černice-Útušice, prostřední část obchvatu o délce 3,5 km včetně tunelu pod vrchem Valík,
- 0510/II - Útušice-Sulkov, západní část obchvatu o délce 8,4 km. Součástí stavby byla přeložka části silnice I/27 z Plzně do Klatov o délce 4 km (Klatovský přivaděč).

Samostatnými stavebními objekty byly mosty:

- 0510/III - 530 m dlouhý most přes řeku Úslavu ve východní části obchvatu,
- 0510/IV - most přes řeku Úhlavu, který navazuje na portál tunelu Valík směrem na Rozvadov, délka mostu je 450 m,
- 0510/V - most přes řeku Radbuzu o délce 580 m, most je situován v západní části obchvatu [14].

Následující odstavce jsou věnovány využití postupů a metod digitální fotogrammetrie na stavbě dálničního obchvatu Plzně, konkrétně pak přeložky silnice č. I/27 (Plzeň – Klatovy) v části 0510/II dálničního obchvatu. Tato původně jednoproudová silnice první třídy byla v rámci výstavby dálničního obchvatu rozšířena v úseku dlouhém 4 km na dvouproudovou rychlostní komunikaci, napojenou na obchvat mimoúrovňovou křižovatkou (MÚK). Součástí této stavby je další MÚK se silnicí č. II/180 Dobřany – Štěnovice a napojení na dosavadní průběh silnice č I/27.

### 4.1 Parametry leteckého měřického snímkování a přednáletové signalizace

V tabulce 2 jsou znázorněny základní parametry leteckého měřického snímkování (vždy v měřítku 1 : 3500) v rámci výstavby celého dálničního obchvatu Plzně. Veškeré snímkování bylo prováděno firmou Argus Geosystém, s.r.o., a to kamerou Zeiss LMK 15 s ohniskovou vzdáleností  $f = 152$  mm umístěnou v jednomotorovém letadle Cessna TU 206 F. Součástí

dodávky negativů LMS ve filmových rolích byly i barevné kontaktní kopie (pozitivы 23 x 23cm).

*Tabulka 2*

Kód projektu	datum snímkování	část stavby	Počet Snímků	počet VB
3 - 2001	7.3.2001	510/II	48	63
6 - 2001	26.6.2001	510/IA, B 510/II	132	145
10 - 2001	11.10.2001	510/II	50	68
5 - 2002	16.5.2002	510/IB, 510/II, Klat. přivaděč	131	144
10 - 2002	2.10.2002	510/II, 510/IA, B	129	140
5 - 2003	6.5.2003	510/IA, B, 510/II, Klat. přivaděč	157	163
8 - 2003	19.8.2003	510/I, 510/II, Klat. přivaděč	157	161
6 - 2004	25.6.2004	510/IB, 510/II	75	72
9 - 2004	15.9.2004	510/IA	55	57

V tabulce 2 uvedené vlčovací body byly zaměřeny výhradně pro účely analytické aerotriangulace. Signalizovány byly blízké body polohového bodového pole a body základní vytyčovací sítě dálnice (ZVS), a to pomocí terčů ze sololitových desek složených do tvaru trojcípé hvězdy. Na pevném podkladě (např. přilehlé komunikace) byla signalizace realizována nátěrem bílou latexovou barvou. Před každým dalším snímkováním byla signalizace na příslušných výchozích vlčovacích bodech obnovena.

Zaměření vlčovacích bodů bylo v rámci prvních dvou snímkování uskutečněno geodeticky z bodů polohového bodového pole, v následujících etapách byly souřadnice VB zaměřeny metodou GPS. Na úseku Klatovského přivaděče bylo tak zaměřeno celkem 15 vlčovacích bodů metodou GPS se střední souřadnicovou chybou  $m_{xy} = 0,03$  m, počet snímků v tomto úseku stavby je 10 (viz Příloha A).

Hodnota podélného překrytu snímkování  $p$  byla zvolena 60 %, příčný překryt  $q$  dosahoval hodnoty 30 % (ve všech úsecích stavby, kde bylo snímkování prováděno ve více letových řadách). Tyto parametry se vztahují na všechny projekty LMS.

Snímkování stavby dálničního obchvatu Plzně probíhalo po dohodě s investorem v takových fázích stavby, aby byly vždy zachyceny nejvýznamnější momenty v různých stupních rozestavěnosti obchvatu. Jednalo se především o maximální plochy skřívky ornice

(kontrola hranic stavebních objektů) a skřívky doprovodných komunikací, sanování zamokřených ploch stavby (kontrola výpočtu kubatur skryté zeminy) a zaměření vodorovného značení (podklad pro DZMD).

## 4.2 Převod snímků do digitální formy, jejich prostorové rozlišení

Skenování leteckých měřických snímků bylo realizováno firmou Mostecká uhelná, a.s. na přesném fotogrammetrickém skeneru PhotoScan 2001. Všechny LMS byly skenovány s rozlišením 1200 DPI, velikost pixelu je 21  $\mu\text{m}$ . Z uvedených parametrů a měřítka snímkování (1 : 3500) vyplývá, že velikost pixelu odpovídá přibližně hodnotě 0,075 m.

## 4.3 Výsledky a využití analytické aerotriangulace

Výpočet AAT v počátečních třech etapách snímkování obchvatu byl proveden tak, že byly v programu *Phodis* zaměřeny vlíčovací a spojovací body a vlastní výpočet byl uskutečněn v programu *PAT-B*. Výsledné soubory snímkových souřadnic VB a prvků vnější orientace byly použity opět v programu *Phodis*, pro další fotogrammetrické práce (ortogonalizace snímků, stereoskopické vektorové vyhodnocování).

Změna technologie nastala s použitím programu *MATCH-AT* a softwarového balíku *OrthoBox*, složeného z programů *OrthoMaster* a *OrthoVista*. Program *MATCH-AT* realizuje výpočet AAT na základě zadání počtu snímků, letových řad, měřítka snímkování a průměrné výšky terénu. Dalšími parametry při zadání výpočtu jsou počet vlíčovacích a spojovacích bodů, jejich apriorní přesnost, počet iterací výpočtu (souvisí s nastavením korelačního koeficientu podobnosti) a možnost použití aparatur GPS/IMU během snímkového letu. Výsledkem výpočtu AAT jsou prvky vnější orientace: vyrovnané souřadnice středů snímků a úhly rotace  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ . V konkrétním případě výpočtu AAT při snímkování Klatovského přivaděče (projekt 5-2002) vyšly následující střední chyby prvků vnější orientace:

$$m_{\omega} = 3,1 \text{ mgon},$$

$$m_{\phi} = 2,3 \text{ mgon},$$

$$m_{\kappa} = 1,1 \text{ mgon},$$

$$m_y = 0,030 \text{ m},$$

$$m_x = 0,026 \text{ m},$$

$$m_z = 0,022m.$$

V programu *MATCH-AT* byl následně proveden export celého projektu do programu *Phodis*, kde již nastal proces vyhodnocování. Tento postup se i v rámci realizace výstavby dálnice osvědčil jako efektivní a dostatečně přesný.

#### **4.4 Tvorba ortofotomapy a digitální základní mapy dálnice**

##### **4.4.1 Tvorba ortofotomapy**

Tvorbě ortofotomapy předcházela tvorba digitálního modelu terénu (DMT, viz odstavec 4.5). Ortofotomapa byla vytvořena v programu *OrthoMaster*, přičemž byly použity prvky vnější orientace určené analytickou aerotriangulací a digitalizované letecké měřické snímky (LMS). Při opakovaném snímkování a tvorbě ortofotomap stejných úseků obchvatu (snímkování bylo realizováno přibližně dvakrát ročně) byl k ortogonalizaci snímků využit týž model terénu, vytvořený při prvním snímkování. Tento model byl aktualizován v místech terénních změn, především pak v rámci dálničního tělesa.

K dosažení minimálních polohových chyb ortofotomap byly diferenciallyně překresleny všechny snímky s 60% překrytem. Tím byly vyloučeny okrajové části snímků, kde vznikají největší chyby při ortogonalizaci. Z každého snímku se překreslovala plocha o rozměrech  $a \cdot b$ , kde  $a$  je vzdálenost sousedních letových drah a  $b$  velikost vzdušné základny.

Ortogonalizované snímky byly spojeny v bezešvou mozaiku. Tento proces byl realizován v programu *OrthoVista*. Mozaikování a vyhledání řezných linií proběhlo automaticky, v případě potřeby následovalo ruční editování bezešvé mozaiky.

Výsledné ortofotomapy byly podkladem pro vyhodnocení skutečného stavu stavby, který v průběhu výstavby požadoval technický dozor stavby ke kontrole dodržování dočasného a trvalého záboru stavby, dále pak pro tvorbu digitální základní mapy dálnice, pro vizualizaci projektu a realizace stavby, ale také například pro činnost právního oddělení investora stavby při jednání s vlastníky dotčených pozemků.

Přesnost ortofotomapy po ortogonalizaci dostatečně splňovala kritéria pro třetí třídu přesnosti při tvorbě základní mapy velkého měřítka (ZMVM), tj. základní střední souřadnicovou chybu podrobných bodů polohopisu  $m_{xy} = 0,14$  m a mezní odchylku jako dvojnásobek střední chyby. Rozlišení ortofotomapy bylo 0,10 m v území a její přesnost dána 1,5násobkem rozlišení, to znamená přibližně 0,15 m.

#### 4.4.2 Tvorba digitální základní mapy dálnice

Podkladem pro tvorbu digitální základní mapy dálnice (DZMD) byl investorem dodaný projekt dočasného a trvalého záboru stavby dálnice. DZMD byla vytvořena částečně z geodetického zaměření skutečného provedení stavby (např. mosty, mimoúrovňové křižovatky, sjezdy, protihlukové stěny) a částečně stereofotogrammetrickým vektorovým vyhodnocením z digitalizovaných LMS. Struktura mapy vycházela z *Datového předpisu pro tvorbu digitálních map základní mapy dálnice*, vydaného Ředitelstvím silnic a dálnic ČR [7].

Mapové dílo tvořily dva základní typy map:

- účelová digitální katastrální mapa (ÚDKM),
- digitální základní mapa dálnice (DZMD).

Obsah těchto map byl sestaven z dílčích mapových souborů, uvedených v tabulce 3.

Tabulka 3

Mapa	mapový soubor	popis mapového souboru
ÚDKM	katastrální mapa	členění dle jednotlivých kat. území
	vlastnická hranice	členění dle jednotlivých kat. území
	geometrické plány	jednotlivé geometrické plány
	výplně ploch parcel	členění dle jednotlivých kat. území
DZMD	účelový polohopis	polohopis v ochranném pásmu dálnice
	polohopis dálnice	polohopis na tělese dálnice
	inženýrské sítě	všechny inž. sítě v zájmovém území
	dopravní značení	dopravní značení vztažené k provozu dálnice
	Výškopis	výškopis zájmového území
	výškopis – kóty	kóty výškových bodů
	bodová pole	body polohových a výškových polí

Zájmovým územím dálnice se rozumí pruh území o šířce 300 m, jehož středem prochází osa dálnice. Přibližná šířka trvalého záboru stavby je v nejužších místech 50 m, hranice dočasného záboru stavby je 5 m od hranice trvalého záboru.

Soubory účelových digitálních katastrálních map (ÚDKM) byly vytvořeny ve vztáhném měřítku 1 : 2000, soubory DZMD v měřítku 1 : 1000, detailní mapy pak v měřítku 1 : 500. Ke všem uvedeným mapám byl vyhotoven kontrolní tisk ve shodném měřítku. Tvorba DZMD byla realizována v systému *MicroStation* a předána investorovi stavby ve formátu *dgn*.

Obsahem výškopisu (vytvořeného z DMT) byl vrstevnicový plán s intervalem základních vrstevnic 1 m a doplňkových vrstevnic 0,5 m, včetně sítě výškových bodů. Průběh vrstevnic byl vždy ukončen na hraně zpevněného tělesa (asfalt, beton), přes dálniční těleso vrstevnice neprocházely. Na terénních hranách a zemním tělese dálnice byly vrstevnice zakresleny současně se šrafami.

Polohopisná složka DZMD byla rozdělena na „Účelový polohopis“, zobrazující předměty měření, které nejsou majetkoprávně spjaty s dálnicí (budovy, silnice, železnice, vodstvo apod.) a na „Polohopis dálnice“, obsahující objekty s dálnicí bezprostředně související (tj. objekty v trvalém záboru dálnice).

Součástí DZMD byl informační databázový systém stavby dálnice. Struktura databáze byla rozdělena do tří základních částí:

- tabulka záborového elaborátu, nesoucí údaje o každém dílčím objektu stavby; součástí této tabulky byly inženýrské sítě,
- tabulka vlastníků; obsahovala informace o vlastnictví všech pozemků dotčených stavbou dálnice,
- tabulka geometrických plánů; sloužila především pro majetkoprávní oddělení Ředitelství silnic a dálnic ČR (např. informace o zápisu jednotlivých geometrických plánů do katastru nemovitostí).

Všechny uvedené tabulky byly vytvořeny zvlášť pro každé katastrální území dotčené stavbou (výstavba dálničního obchvatu Plzně zasahovala celkem do 15 katastrálních území).

#### 4.5 Parametry digitálního modelu terénu a jeho využití

Realizace digitálního modelu terénu (DMT) předcházela tvorbě ortofotomapy. Z důvodu dalšího využití nebylo možné použít dostupný digitální model reliéfu ZABAGED (jeho výšková přesnost dosahuje v závislosti na sklonu terénu 0,7 – 3 m). Tvorba DMT byla provedena manuálním vyhodnocením výškových bodů (sít' Grid) v rastru 10 m v záboru stavby a 20 m mimo zábor. Z této sítě byla programem *SiteWork* automatizovaně vytvořena nepravidelná trojúhelníková sít' TIN (export dat ve formátu *dmt*). Následně byl automatizovaně vytvořen vrstevnicový plán s intervalem základních vrstevnic 1 m, doplňkové vrstevnice byly v intervalu 0,5 m (tento vrstevnicový plán byl součástí DZMD).

Výšková přesnost DMT (na jednoznačně identifikovatelných bodech rastrové sítě) dosahovala 0,15 m na zpevněných plochách stavby a 0,25 m mimo zpevněné plochy.

Kromě již uvedeného využití při tvorbě ortofotomapy byl DMT využit k výpočtu kubatur (objemu) skryté zeminy. Výpočet byl prováděn v programu *SiteWork*, investorovi stavby sloužil ke kontrole a porovnání práce vykazované dodavatelem. Z pohledu tohoto využití byla velmi důležitá volba a přesné dodržení termínu snímkování, neboť se vycházelo z porovnání stavu mezi dvěma časovými etapami stavby.

#### 4.6 Použité postupy vizualizace projektované dálnice v terénu

Doprovodnou součástí produkce digitální fotogrammetrie při výstavbě dálničního obchvatu Plzně byla tvorba 3D modelů a průletů nad stavbou obchvatu. Vizualizace byly vytvářeny z ortofotomap v programech *Atlas* a *Pogledy*. 3D modely byly využívány jako názorný prostředek při prezentacích obchvatu veřejnosti, organizovaných investorem stavby a zastupitelstvem města Plzně. Dále pak při posuzování aktuálního stavu výstavby a rozhodování o jejím dalším průběhu.

Dynamická vizualizace byla vytvořena jako animovaný průlet nad stavbou obchvatu s možností nastavení výšky a sklonu místa pohledu „kamery“. Animace se skládala ze dvou částí, podle stupně rozestavěnosti stavby. První část znázorňovala stavbu po skrývce vrchní zeminy, druhá část prezentovala téměř dokončenou stavbu. K animaci byly připojeny popisy

jednotlivých úseků stavby (které se postupně znázorňovaly během průletu) a namluvený komentář. Vizualizace průletu nad stavbou o celkové délce trvání cca 5 minut byla využita při slavnostním otevření stavby dálničního obchvatu Plzně a poté na výstavě o stavbě obchvatu na plzeňské radnici.



## **5 Zhodnocení přínosu fotogrammetrie obecně a ve sledované aplikaci**

Fotogrammetrie jako nepřímý sběr geoprostorových dat je již více než 50 let nedílnou součástí zeměměřictví a nyní i geomatiky. Prudký rozvoj a zároveň vznik digitální fotogrammetrie nastal s vývojem výpočetní techniky, zejména osobních počítačů. Je v praxi prokazatelné, že proti klasickým geodetickým postupům má moderní fotogrammetrie nezanedbatelné výhody, kterými jsou především nezávislost na okolních rušivých vlivech (počasí, dopravní provoz, těžko přístupná či nepřístupná místa), vysoká dokumentační hodnota snímků (možnost dokumentace a monitorování průběhu stavby včetně zpětného pohledu do historie), názornost a možnost globálního a zároveň reálného pohledu na celé zájmové území, značná úspora práce v terénu apod. Moderní technologie umožňují široké uplatnění fotogrammetrie v řadě navazujících i odlišných oborech lidské činnosti a zároveň usnadňují její popularizaci v široké veřejnosti (zejména barevné ortofotomapy a vizualizace).

Přínos fotogrammetrie ve sledované aplikaci výstavby dálničního obchvatu Plzně spatřují odborníci jiných zúčastněných profesí zejména v možnosti komplexní dokumentace skutečného stavu stavby a ve vypovídací schopnosti produktů fotogrammetrie. Další výhodou byla možnost uceleně zpracovat velký objem dat v rámci stavby tak velkého rozsahu a také schopnost poskytnout zpětný pohled do jednotlivých etap stavby.

## Použitá literatura

- [1] PAVELKA, K. *Fotogrammetrie 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998.
- [2] PAVELKA, K. *Fotogrammetrie 20*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006.
- [3] PAVELKA, K., DOLANSKÝ, T., HODAČ, J., VALENTOVÁ, M. *Fotogrammetrie 30*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [4] HUML, M., MICHAL, J. *Mapování 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [5] ŠÍMA, J. Na počátku éry digitálního fotogrammetrického snímkování území České republiky. In *GEOS*, 2007.
- [6] DOLANSKÝ, T. Lidar a jeho aplikace. In *GIS Ostrava*, 2004.
- [7] ŘEDITELSTVÍ SILNIC A DÁLNIC ČR. *Datový předpis pro tvorbu digitálních map základní mapy dálnice*. Praha: Ředitelství silnic a dálnic ČR, 2002.
- [8] *SFP*. Dostupné z: <http://www.fotogrammetry.com>
- [9] *Digitální fotografie*. Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xcernoc1.htm>
- [10] *Digitální fotografie*. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotografie>
- [11] *Vexcel Corporation*. Dostupné z: <http://www.vexcel.com>
- [12] *Geodis Brno s.r.o.* Dostupné z: <http://www.geodis.cz>
- [13] *Leica Geosystems*. Dostupné z: <http://www.gis.leica-geosystems.com>
- [14] *Ředitelství silnic a dálnic ČR*. Dostupné z: <http://www.rsd.cz>
- [15] *Argus Geosystém s.r.o.* Dostupné z: <http://www.argusgeo.cz>

## **Přílohy**