

**Univerzita Palackého v Olomouci**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra geoinformatiky**

**Marie ŠTĚPÁNOVÁ**

**TVORBA 3D MODELŮ GEOMORFOLOGICKÝCH  
OBJEKTŮ ZE STEREODVOJIC**

**Magisterská práce**

**Vedoucí práce: RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ**

**Olomouc 2012**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem magisterskou práci magisterského studia oboru Geoinformatika vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Jakuba Miřijovského.

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 19. dubna 2011

---

Především velice děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakobovi Miřijovskému za veškeré rady, podněty a připomínky, které mi poskytoval po celou dobu vypracování práce. Děkuji také všem, kteří mi byli nápomocni během terénních prací.

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marie ŠTĚPÁNOVÁ**  
Osobní číslo: **R100112**  
Studijní program: **N1301 Geografie**  
Studijní obor: **Geoinformatika**  
Název tématu: **Tvorba 3D modelů geomorfologických objektů ze stereodvojc**  
Zadávající katedra: **Katedra geoinformatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem magisterské práce je podrobně popsat možnosti využití stereodvojc ve fotogrametrii pro tvorbu 3D modelů geomorfologických objektů. Práce se bude podrobně zabývat celým procesem od kalibrace kamery až po finální zpracování snímků. Nedílnou součástí práce bude samotná tvorba modelů. Práce předpokládá jak práci v terénu, tak i v laboratoři. Výstupem práce bude kompletní slovní, statistické i grafické zhodnocení možnosti využití stereodvojc ve fotogrametrii, včetně tvorby 3D modelů geomorfologických objektů. Studentka vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořila nebo získala v rámci práce, do Metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O magisterské práci studentka vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002). Na závěr magisterské práce připojí studentka jednostránkové resumé v anglickém jazyce.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **max. 50 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

**ABER, J.,S., MARZOLFF, I., RIES, J. (2010): Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications, Elsevier, first edition, 268 p. ISBN: 978-0-444-53260-2**  
**NEČASOVÁ, H. (2007): Dvojtředové promítání, anaglyfy, Diplomová práce, Masarykova univerzita v Brně**  
**BÖHM, J. (2002): Fotogrammetrie, Vysoká škola báňská - TU Ostrava**  
**OLIVÍK, S. (2003): 3D virtuální model areálu ZČU Borská pole, Diplomová práce, Plzeň**  
**Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.**

Vedoucí diplomové práce: **RNDr. Jakub Miřijovský**  
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: **13. června 2010**  
Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2012**

L.S.

Prof. RNDr. Juraj Ševčík, Ph.D.  
děkan

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
KATEDRA GEOINFORMATIKY  
II. Svobodu 26, 771 46 Olomouc

Prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 13. června 2010

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>10</b>
<b>2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>11</b>
2.1 Data, hardware .....	12
2.1.1 Fotogrammetrická kamera .....	12
2.1.2 Geodetické přístroje.....	12
2.2 Software .....	13
2.2.1 Kalibrace kamery.....	13
2.2.2 Zpracování geodetických měření.....	13
2.2.3 Zpracování snímků .....	13
2.3 Postup zpracování .....	14
<b>3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>16</b>
3.1 Blízká fotogrammetrie .....	16
3.2 Modelování geomorfologických objektů .....	16
<b>4 STEREOFOTOGRAMMETRIE V GEOMORFOLOGII.....</b>	<b>17</b>
4.1 Vymezení fotogrammetrické metody.....	17
4.2 Možnosti aplikace v geomorfologii .....	18
<b>5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ .....</b>	<b>23</b>
5.1 Lokality .....	23
5.1.1 Štěpánov .....	25
5.1.2 Moravičany .....	25
5.1.3 Mohelnice .....	26
5.2 Přípravné práce.....	26
5.2.1 Kamera a její kalibrace .....	26
5.2.2 Plánování snímkování.....	28
5.3 Práce v terénu .....	28
5.3.1 Volba stereofotogrammetrické základny .....	29
5.3.2 Signalizace a stabilizace bodů .....	29
5.3.3 Geodetické zaměření referenčních a vlíčovacích bodů .....	30
5.3.4 Snímkování .....	31
5.4 Práce v laboratoři .....	32
5.4.1 Zpracování souřadnic, transformace.....	32
5.4.2 Zpracování snímků do podoby 3D modelů .....	33
5.5 Shrnutí.....	43

<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>44</b>
6.1	Výsledky hodnocení fotogrammetrických metod .....	44
6.2	Výstupy modelování .....	44
6.2.1	Štěpánov .....	44
6.2.2	Moravičany .....	48
6.2.3	Mohelnice .....	50
<b>7</b>	<b>DISKUZE .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
	Literatura .....	54
	Elektronické zdroje .....	55
	<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE</b>	
	<b>SUMMARY</b>	
	<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
DTM	Digital Terrain Model
GIS	geografický informační systém
GPS	Global Positioning System
CHKO	Chráněná krajinná oblast
JPEG	Joint Picture Experts Group
KGI UP	Katedra geoinformatiky Univerzity Palackého
LPS	Leica Photogrammetry Suite
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SHP	Shapefile
TIFF	Tagged Image File Format
TIN	triangulated irregular network



## ÚVOD

Chráněná krajinná oblast Litovelské Pomoraví, nacházející se mezi Mohelnicí a Olomoucí, je nížinnou oblastí protkanou meandrující řekou Moravou a jejími rameny. Meandry mají díky rovinné povaze reliéfu i vhodnému geologickému podloží tendenci se dynamicky vyvíjet, na některých lokalitách dokonce o několik metrů ročně. A právě dokumentaci stavu a sledování vývoje vybraných říčních meandrů má za cíl předložená magisterská práce.

V rámci řešení diplomové práce bylo využito metod pozemní stereofotogrammetrie. Ačkoli fotogrammetrie nabízí i jiná řešení pro dokumentaci geomorfologických objektů, metoda stereodvojic byla (např. oproti metodě průsekové fotogrammetrie) zvolena proto, že na Univerzitě Palackého dosud žádná práce využívající tohoto přístupu zpracována nebyla. Hlavním přínosem práce je tedy zhodnocení vhodnosti a přesnosti metod blízké pozemní stereofotogrammetrie pro účely dokumentace a analýz vývoje břehových nátrží.

# 1 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem magisterské práce je podrobný popis možností využití stereodvojic ve fotogrametrii pro tvorbu 3D modelů geomorfologických objektů, včetně vlastní tvorby modelů vybraných lokalit. Práce se bude podrobně zabývat popisem dílčích částí procesu tvorby modelů, od kalibrace kamery přes přípravu a realizaci snímkování až po finální zpracování měřických snímků do podoby digitálních modelů terénu. Řešení cíle magisterské práce předpokládá jak práci v terénu, tak v laboratoři.

Plánovaným výstupem práce je kompletní slovní, statistické i grafické zhodnocení možností využití stereodvojic ve fotogrametrii, včetně vlastní sady 3D modelů vybraných geomorfologických objektů.

Zájmovou oblastí pro řešení magisterské práce je Chráněná krajinná oblast Litovelské Pomoraví, kde je důraz kladen na fluviální tvary vzniklé laterální erozí vodního toku (břehové nátrže). Na třech konkrétních lokalitách je provedena dokumentace stavu a na jedné z nich i zhodnocení vývoje geomorfologického tvaru v průběhu delšího časového intervalu, a to metodou porovnání dvou rastrových 3D modelů vytvořených zpracováním měřických snímků pořízených stereofotogrammetrickým snímkováním.

## 2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

Prověření aktuálního stavu řešené problematiky bylo provedeno **studiem literatury a internetových zdrojů**, přičemž byla podrobně nastudována i pravidla a předpoklady pro správné provedení terénních prací a následné zpracování získaných dat.

Geodetické zaměření lokalit probíhalo metodou tachymetrie, případně s využitím totální stanice. **Tachymetrická metoda** se využívá pro současné měření polohopisu a výškopisu pomocí polárních souřadnic a trigonometrie [1]. Na základě znalosti souřadnic dvou bodů v terénu (stanoviště přístroje a bodu vymezujiícího nulový směr) a přesně změřených úhlů a vzdáleností od stanoviště ke zjišťovaným bodům (polární metoda) jsou jednoduše dopočítávány jejich místní souřadnice. **Totální stanice** využívá pro určení souřadnic zjišťovaných bodů také kombinace metod měření úhlů a vzdáleností (jde o digitální analogii metody tachymetrie). Pro měření vzdáleností je zde využito schopnosti přístroje vyslat laserový paprsek a zjistit čas odezvy, nebo porovnat fáze vyslaného a přijatého vlnění. Opět se využívá známých souřadnic stanoviště a nulového směru. Souřadnice zjišťovaných bodů jsou při správném nastavení přístroje zaznamenávány ihned v souřadnicovém systému S-JTSK.

Sběr obrazových dat byl dle zadání proveden metodou **stereofotogrammetrie** – byly vytvářeny dvojice pozemních měřických snímků se vzájemným překryvem (60 - 100%) tak, aby mohly být pozorovány stereoskopicky a vytvářely tak virtuální prostorový model [6]. Snímkování probíhalo podle zásad blízké pozemní stereofotogrammetrie, tzn. musely být vhodně zvoleny délky základny i rovnoběžné směry snímkování a dodržena stejná výška kamery.

Při zpracování snímků bylo pro vytvoření bloku snímků využito metody **svazkového vyrovnání bloku** (*Bundle block adjustment*). Podle Pavelky (2003) jde o jednu z metod analytické aerotriangulace, která se používá pro výpočet prvků vnější orientace a jejímž základem je vztah mezi měřenými snímkovými souřadnicemi bodu a jeho prostorovými (geodetickými) souřadnicemi. Paprskové svazky se vyrovnávají pro celý blok najednou – jde o analytický postup výpočetně nejnáročnější, ovšem poskytující nejpřesnější výsledky.

Pro vytvoření snímkové mozaiky byla použita metoda **rektifikace** - transformace polohy obrazových prvků z jednoho souřadnicového systému do jiného [2], zde konkrétně ze snímkového do místního souřadnicového systému. Snímková mozaika byla později určena pro účely vymezení přesného rozsahu zájmového území (břehové nátrže) a také pro vizualizaci výsledného 3D modelu.

Interpolace 3D bodů vytvořených ze snímkových stereodvojic byla provedena geostatistickou interpolační metodou využívající geostacionární metody odhadu – **kriging**. Typ krigingu byl zvolen jako *Ordinary*, *Spherical* a výsledná velikost pixelu stanovena na 0,01 m.

## 2.1 Data, hardware

### 2.1.1 Fotogrammetrická kamera

Nejdůležitějšími daty potřebnými pro zpracování diplomové práce byly rastrové snímky získané pozemním stereofotogrammetrickým snímkováním vybraných geomorfologických objektů v lokalitě Litovelské Pomoraví. Data byla pořizována fotoaparátem **Canon EOS 500D** s objektivem **EF-S 18-55 mm**, a výsledné snímky byly ukládány ve formátu TIFF, JPEG nebo CR2 v rozlišení 4752 x 3168 px.

Tab. 1 Základní parametry kamery

<b>Fotoaparát</b>	
Typ	Canon EOS 500D
Efektivní pixely	15,1 mil.px
Senzor	APS-C (22,3 x 14,9 mm)
Rozlišení snímku	4752 x 3168 px
	3456 x 2304 px
	2353 x 1568 px
Formát snímku	CR2, TIFF (nekomprimovaný)
	JPEG (komprimovaný)

<b>Objektiv</b>	
Typ	EF-S 18-55 mm
Ohnisková vzdálenost	18 mm - 55 mm
Min. zaostřovací vzdálenost	25 cm
Poměr zobrazení	1:2,9

### 2.1.2 Geodetické přístroje

Před zahájením fotogrammetrického snímkování bylo provedeno geodetické zaměření všech lokalit. U Mohelnice a Štěpánova byly zaměřeny vždy tři referenční body, a to pomocí dvoufrekvenční GPS - přístroje **Topcon Legacy E** s anténou **LegAnt**. Polohy jednotlivých vlíčovacích body byly poté doměřovány pomocí teodolitu **Geofennel FET-405K**.

U Moravičan bylo využito referenčních geodetických bodů zaměřených již dříve pro účely terénního průzkumu prováděného pracovníky Katedry geoinformatiky Univerzity Palackého (KGI UP). Zde bylo pro doměření vlíčovacích bodů použito totální stanice **Pentax V227N**.

## 2.2 Software

### 2.2.1 Kalibrace kamery

Před zahájením fotogrammetrického snímkování bylo nutné řádně zkalibrovat kameru. Kalibrace byla provedena v software **PhotoModeler**. Ten nabízí kalibračních metod hned několik; jako nejvhodnější pro danou úlohu byla zvolena metoda kalibrace pomocí testovacího pole, spočívající ve využití čtvercové mřížky, která je nasnímána vždy pod úhlem přibližně 45°, a to ze čtyř stanovišť vzájemně natočených o 90°.

### 2.2.2 Zpracování geodetických měření

Stažení záznamů z dvoufrekvenční GPS proběhlo pomocí programu **Topcon Tools**. Souřadnice byly poté v prostředí software **Geolink** transformovány ze souřadnicového systému ETRS89 do S-JTSK. Souřadnice vlivovacích bodů naměřené totální stanicí Pentax V227N byly z přístroje staženy přes programové prostředí **Pentax Data Transfer Software**. Tyto, spolu se souřadnicemi bodů naměřených pomocí teodolitu, byly přepočteny do místního i geodetického souřadnicového systému (S-JTSK) pomocí programu pro komplexní zpracování geodetických dat: **Groma** [5].

### 2.2.3 Zpracování snímků

Jako hlavní nástroj pro zpracování měřických snímků byl zvolen balík programů **ERDAS IMAGINE 9.2**, především pak jeho nadstavba s označením **LPS** (*Leica Photogrammetry Suite*), jež slouží především k vytváření snímkových stereodvojic, digitálních modelů terénu a ortomozaik. V rámci LPS bylo nejvíce využíváno nástroje Stereo Analyst, který umožňuje vytvoření binokulárního vjemu ze snímkové stereodvojice a tím zjednodušení orientace ve scéně a snadnější editaci 3D bodů. Taktéž je pomocí něj možné měřit polohy bodů v daném souřadnicovém systému a proměřovat vzdálenosti.

Pro tvorbu výsledných 3D modelů geomorfologických objektů byla použita extenze Geostatistical Analyst software **ArcGIS 10**. Porovnání modelů z různých časových období bylo zpracováno pomocí mapové algebry. Finální vizualizace modelů byla provedena v prostředí 3D vizualizačního software **Voxler 2** a také v **ArcScene**.

## 2.3 Postup zpracování

Nejprve byly nastudovány **knižní a internetové zdroje** zaměřené na stěžejní české i zahraniční publikace věnující se pozemní fotogrammetrii a maloformátovému snímkování zemského povrchu. Na základě tohoto rešeršního šetření byl zvolen nejvhodnější postup dalšího zpracování.

Pro potřeby diplomové práce byla Katedrou geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci zapůjčena primárně neměřická kamera Canon EOS 500D, kterou bylo nutno před použitím pro účely fotogrammetrického snímkování **zkalibrovat**.

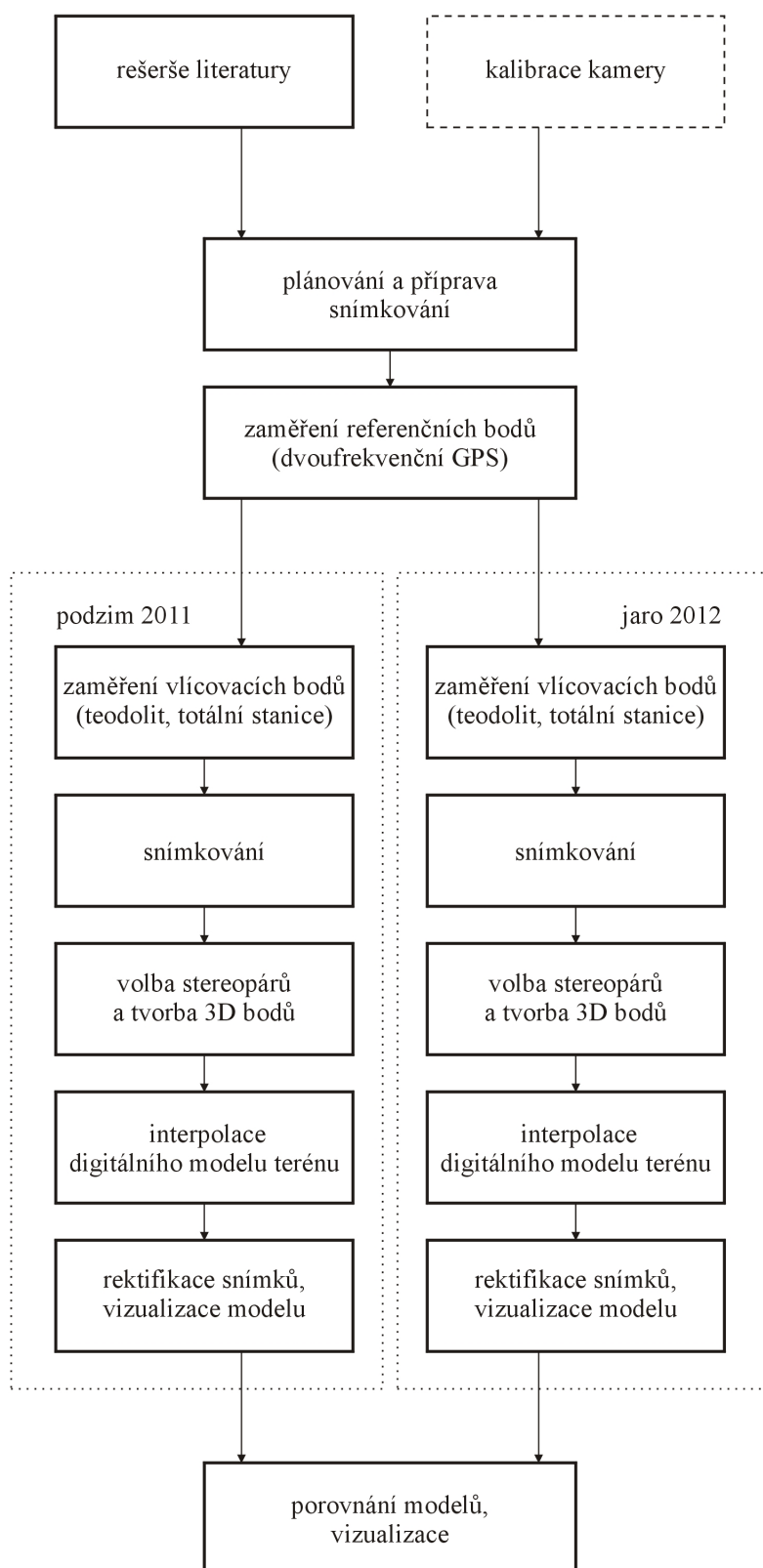
Před vlastním snímkováním v terénu bylo nutné zajistit **pomůcky** pro úspěšné provedení fotogrammetrických prací: geodetické přístroje s příslušenstvím, dřevěné špalíky pro trvalou stabilizaci bodů, signalizační terčíky, měřicí přístroje (laserový dálkoměr, buzola) a samozřejmě fotoaparát a stativ.

Terénní práce probíhaly na třech stanovených lokalitách v rámci CHKO Litovelské Pomoraví. V každé lokalitě bylo přesně **geodeticky zaměřeno** několik referenčních bodů, k čemuž bylo použito technologie dvoufrekvenční GPS. Pro doměření vlíčovacích bodů byla použita totální stanice a metoda tachymetrie (teodolit).

**Fotogrammetrické snímkování** vybraných lokalit probíhalo podle zásad pro získání kvalitních stereopárů (viz. další kapitola). Po zvoleném časovém intervalu bylo snímkování na jedné lokalitě zopakováno.

Snímky byly **zpracovány** v nadstavbě LPS programu ERDAS IMAGINE. Z vybraných stereodvojic byly vygenerovány sady 3D bodů. 3D body byly podle potřeby upraveny, doplněny a poté **interpolovány** metodou kriging do podoby rastrových 3D modelů. Pro účely vizualizace byly měřické snímky rektifikovány a použity pro vytvoření mozaiky. Ta posloužila také pro definování hranic břehové nátrže – byla nad ní digitalizována vrstva pro ořezání digitálního modelu terénu do požadovaného tvaru.

Výsledné modely byly **porovnány** vizuálně i pomocí mapové algebry (odečtení rastrových snímků) a poté vizualizovány formou drátěného modelu a náhledu na 3D scénu.



Obr. 1 Postup práce (autor: M. Štěpánová, 2012).

### **3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

Snímkové stereodvojice a fotogrammetrické materiály obecně se uplatňují ve velmi širokém spektru aplikací. Lze je využít v architektuře, lékařství, strojírenství, ale i při jiných úlohách, např. při měření deformací objektů a tvorbě jejich 3D modelů. Významnou oblastí uplatnění je i mapování zemského povrchu a analýza krajiny.

#### **3.1 Blízká fotogrammetrie**

Maloformátovým snímkováním zemského povrchu obecně se zabývá Aber et al. (2010). Ve své publikaci představuje základní principy dané problematiky (letecké a okrajově i pozemní stereofotogrammetrie), kamery a nosiče, obrazovou interpretaci, možnosti analýz a implementaci maloformátového snímkování v praxi.

Na metody blízké fotogrammetrie se podrobněji zaměřuje Luhmann et al. (2006). Zvláštní důraz je kladen na aktuální trendy v digitální fotogrammetrii, měřicích systémech a možnostech praktické aplikace všech poznatků. Přínosná je zde také kapitola o praktických aspektech úloh – o plánování projektu, kalibraci kamery, dynamické fotogrammetrii a maloformátovém leteckém snímkování.

#### **3.2 Modelování geomorfologických objektů**

Vlastní téma využití fotogrammetrických metod pro tvorbu 3D modelů geomorfologických objektů bylo v české literatuře popsáno hned několikrát.

Na katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci vznikla magisterská práce zabývající se vizualizací geomorfologických objektů pomocí fotogrammetrických metod (Hladiš, 2009). Autor zhodnotil vhodnost práce s fotogrammetrickými daty v software PhotoModeler Pro a PhoTopol ve srovnání s daty z laserscanu Leica, to vše mj. na příkladech sesuvů v Halenkovicích a Křenově. (Pozn. Předložená magisterská práce na rozdíl od práce L. Hladiše využívá metod stereofotogrammetrie a zpracování snímků provádí v software ERDAS IMAGINE s nadstavbou LPS.)

Také na Ostravské Univerzitě v Ostravě byly zpracovány dvě na sebe navazující magisterské práce věnující se sledování říční eroze pomocí fotogrammetrických metod, a to Drozdek (2006) a Hönig (2007). Celkovým výsledkem je zhodnocení a vizualizace úbytku hmoty břehu řeky Odře po půlročním působení erozních procesů. Pro zpracování tématu bylo využito fotogrammetrické stanice ImageStation SSK a pro porovnání modelů břehové nátrže potom funkcí programu Surfer.

Dále např. Prokešová et al. (2010) využívá metod digitální letecké fotogrammetrie k sestrojení historické topografické podoby sesuvu Ľubětová (Západní Karpaty, Slovensko) a rekonstrukci jeho vývoje v letech 1969-1998. K dispozici byly čtyři sady leteckých snímků dané lokality. Vyextrahovaná výšková data posloužila jako základ pro vznik čtyřech digitálních výškových modelů o vysokém rozlišení, které byly poté porovnány. Díky tomu mohlo dojít ke kvantifikaci vertikálních přesunů zeminy. V průběhu celé práce bylo využito software ImageStation SSK a AtlasDMT.



## 4 STEREOFOTOGRAMMETRIE V GEOMORFOLOGII

### 4.1 Vymezení fotogrammetrické metody

Podle Pavelky (1998) je **fotogrammetrie** „věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálních modelů terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu.“ Jde tedy o metodu bezkontaktního určování souřadnic prostorových objektů, kterou lze rozdělit na různé typy podle:

- způsobu pořízení a vyhodnocení snímků,
- polohy stanoviška,
- počtu a konfigurace snímků,
- technologického způsobu zpracování.

Poloha stanoviška určuje, zda půjde o fotogrammetrii leteckou, družicovou nebo pozemní. Počet snímků a jejich konfigurace pak souvisí s metodami jednosnímkovými, vícesnímkovými nebo stereoskopickými. Způsob zpracování snímků je možný analogově, analyticky nebo digitálně.

Předložená magisterská práce se dle zadání zabývá stereofotogrammetrickým snímkováním vybraných geomorfologických objektů, a to z pozemního stanoviště. Pořízení měřických snímků i jejich následné zpracování je realizováno digitálními metodami.

Pro **stereofotogrammetrii** je typické využití binokulárního přímého měření snímkových souřadnic v jednom ze snímků, přičemž druhý snímek se používá pro určení horizontální X paralaxy (Pavelka, 1998), která vyjadřuje prostorovou složku.

Pro vytvoření kvalitního stereovjemu je při snímkování nutné dodržet několik zásad: osy snímkování musejí mít přibližně rovnoběžný směr, stanoviška fotografování stejnou výšku (vertikální snímková paralaxa Y musí být nulová), a základna (vzdálenost mezi stanovišky snímkování) vhodnou délku, která se obvykle uvádí 1/5 - 1/10 průměrné vzdálenosti stanoviška od objektu. Ideální je také, když je směr snímkování kolmý na základnu – tzv. normální případ. Směr může být za určitých okolností (vždy však u všech snímků stejně) stočený, skloněný nebo obecně orientovaný, což u analogové fotogrammetrie mohlo činit obtíže při zpracování, ale u digitální je tento problém víceméně setřen.

## 4.2 Možnosti aplikace v geomorfologii

Stereofotogrammetrické metody mohou být v geomorfologii využity pro **mnoho různých úloh** – pro dokumentaci povrchu terénního objektu, provádění terénních analýz, zjišťování změn v krajině nebo tvorbu digitálního modelu reliéfu.

Možnosti použití se liší v závislosti na **velikosti a členitosti objektu** zájmu. Je nutné, aby existoval dostatečný prostor pro vytvoření odpovídající fotogrammetrické základny a tím potom kvalitních snímkových stereodvojic. Významnou roli zde hraje volba objektivu fotogrammetrické kamery – šířka úhlu, rozlišení snímku a také kalibrovaná ohnisková vzdálenost. Objekty malých rozměrů mohou být zachyceny na jediné stereodvojici, u prostorově výraznějších je nutné pro vytvoření kvalitního stereomodelu použít snímkových dvojic několik. Důležité je také zvážit členitost objektu a úroveň požadovaného detailu, protože modelování převisů, dutin a jiných nepravidelností vyskytujících se na geomorfologických objektech poměrně hojně není úplně bezproblémové. Řešením může být vhodný úhel snímkování nebo doplňková měřicí metoda.

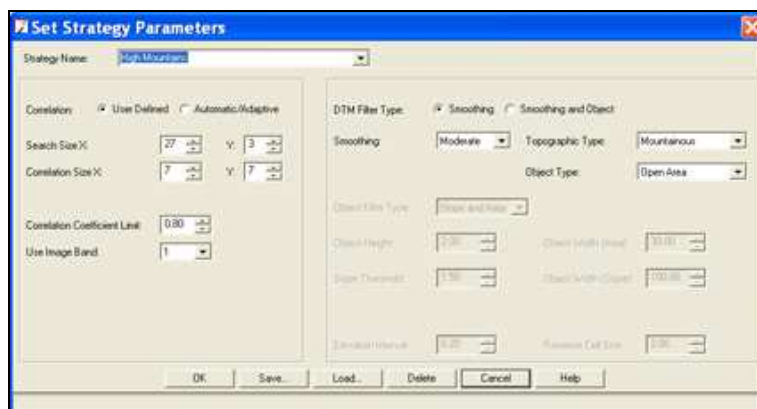
Snímkování lze provádět **pozemní i leteckou** stereofotogrammetrií. Každá z těchto metod má svá specifika a své nároky – např. na přesnost zaměření vřícovacích bodů a na technické vybavení. Pro pozemní fotogrammetrii je obecně nutné zaměřit vše s větší přesností, a naopak na kameru nejsou požadavky kladeny tak vysoké. Zato pro letecké snímkování je vhodné použít kameru profesionální, protože v čím větší vzdálenosti od objektu se nachází, tím více se projevují všechny typy zkreslení a deformací. Nároky na pořízení kvalitních snímkových stereodvojic jsou poměrně vysoké: mimo jiné je třeba dbát na dodržení stejné výšky kamery a stejného směru snímkování. Důležité je také znát průměrnou vzdálenost kamery od snímkaného objektu.

Pro zpracování snímkových stereodvojic se nabízí několik **softwarových řešení**. V předložené diplomové práci bylo využito nadstavby LPS programu ERDAS IMAGINE, která poskytuje nástroj pro práci se stereoskopicky orientovanými snímky příznačně nazvaný *Stereo Analyst*. Dalším programovým prostředkem je PhotoModeler, který je sice primárně určený pro práci s konvergentními snímky, ale stereodvojice dokáže zobrazit také - stereo pohled na scénu vytváří prostřednictvím integrované 3D prohlížečky (*3D Viewer > Stereo View*). Mezi další často využívaná softwarová řešení patří např. ImageStation s modulem *Stereo Display*.

Praktické nástrojové vybavení pro **tvorbu 3D bodů** ze stereodvojic poskytuje podle zkušeností nadstavba LPS programu ERDAS IMAGINE. Je zde totiž umožněno vybrat jen konkrétní oblasti pro tvorbu 3D modelu a nastavit tzv. strategie pro generování bodů – velikost vyhledávacího okna a korelačního koeficientu, možnost shlazení výsledného povrchu atd. Strategie pro základní typy povrchů (např. rovinatý, kopcovitý, hornatý, urbanizovaný) jsou již předdefinované, je však možné si nadefinovat strategii vlastní (*Custom*). Častou volbou je také vyjmutí areálu (*Exclude*) z tvorby sady 3D bodů.

Při definici **vlastní strategie**, případně při úpravě strategie stávající, je nutno brát v potaz charakter (rozsah, vertikální a horizontální členitost) povrchu zájmového území. Pro vygenerování optimálního množství a kvality bodů je nutno v menu *Set Strategy Parameters* nastavit patřičné parametry (prvních pět parametrů je nejdůležitější):

- název strategie (*Strategy Name*),
- typ korelace (*Correlation*)
  - uživatelsky definovaná nebo automatická metoda korelace: vhodné je zvolit možnost uživatelského nastavení pro přizpůsobení procesu extrakce bodů konkrétní aplikaci,
- velikost vyhledávacího okna (*Search Size*)
  - zadává se ve směru X a Y, přičemž větší rozměr je takřka vždy ve směru X (vodorovném): vyhledávání identických bodů probíhá na snímkových stereodvojicích, tzn. body jsou přibližně ve stejné výšce, ale v různé horizontální vzdálenosti (mají určitou X paralaxu);
  - čím členitější je povrch, tím širší (ve směru X) by mělo být vyhledávací okno, ne však příliš, protože pak může docházet k párování nesprávných bodů, naopak úzké vyhledávací okno způsobuje nespárování odpovídajících bodů s velkou X paralaxou;
  - pro stereodvojice s větší Y paralaxou je třeba zvětšit velikost vyhledávacího okna v Y směru, aby došlo ke správnému spojení identických bodů (nutno podotknout, že přítomnost Y paralaxy samo o sobě způsobuje nepřesnosti ve vertikálním rozměru modelu),
- velikost okna pro korelaci (*Correlation Size*)
  - velikost okna definuje čtvercový nebo obdélníkový vzorek, pro který je počítán korelační koeficient,
- velikost korelačního koeficientu (*Correlation Coefficient Limit*)
  - čím větší korelační koeficient je nastavený, tím více si musejí body v levém a pravém snímku odpovídat, aby byly označeny za shodné a naopak,
- použité obrazové pásmo (*Use Image Band*)
  - pro geomorfologické úlohy zpracovávané ve viditelné části spektra je vhodné použít pásmo č. 2 (zelené),
- typ filtrování digitálního modelu terénu (*DTM Filter Type*),
- shlazování (*Smoothing*),
- typ topografie (Topographic type),
- typ výstupu (Output type).



Obr. 2 Okno pro nastavení parametrů strategie (zdroj: [4]).

Při zadání nevhodných hodnot parametrů dochází k extrakci nekvalitních 3D bodů – vlivem špatné identifikace identických bodů nebo příliš velkého vyhledávacího okna jsou kromě správných bodů identifikovány i body smyšlené, při malém vyhledávacím okně je bodů naopak vytvořeno příliš málo. I při sebelepším nastavení je však vždy nutné body zkontrolovat, promazat a doplnit, aby byla výsledná sada 3D bodů co nejkvalitnější a tím byla zaručena kvalita i výsledného digitálního modelu terénu.

Pro účely extrakce 3D bodů na konkrétních geomorfologických tvarech (břehových nátržích) bylo testováno několik uživatelsky definovaných strategií. Vycházelo se z předpokladu, že sledované břehové nátrže mají relativně hladký povrch, pouze místy převisy a sesunutou půdu a částečně jsou pokryty vegetací (ta byla z extrakce vyjmuta).

Tab. 2 – 6 Strategie pro extrakci 3D bodů ze stereodvojic

Strategy Name	strategie01
Search Size	25 x 5
Correlation Size	10 x 10
Correlation Limit	0,9
Výsledek: Strategie vhodná spíše pro členitý povrch. Vlivem nadměrné velikosti vyhledávacího okna a okna pro korelaci docházelo na hladké břehové nátrži k identifikaci příliš velkého množství nadbytečných bodů.	
Strategy Name	strategie02
Search Size	19 x 3
Correlation Size	5 x 5
Correlation Limit	0,8
Výsledek: Strategie vhodná pro zpracování stereodvojic s nízkou hodnotou Y paralaxy a pro území se střední členitostí. Nízký korelační koeficient znamená vyšší toleranci při sběru identických bodů, tudíž opět docházelo k nadbytečné identifikaci bodů.	

Strategy Name	strategie03
Search Size	23 x 9
Correlation Size	7 x 7
Correlation Limit	0,9
Výsledek: Strategie použitelná pro zpracování stereodvojic s velkou Y paralaxou, ačkoli souřadnice vygenerovaných bodů nebudou kvůli paralaxe příliš přesné.	

Strategy Name	<b>moravicany, stepanov</b>
Search Size	15 x 5
Correlation Size	9 x 9
Correlation Limit	0,9
Výsledek: Strategie vytvořená pro optimální sběr identických bodů ze snímkových stereodvojic pořízených v lokalitách Moravičany a Štěpánov: vysoká hodnota korelačního koeficientu pro výběr kvalitních bodů a adekvátní velikost vyhledávacího okna přizpůsobená území s nízkou členitostí a snímkům s malou Y paralaxou.	

Strategy Name	<b>mohelnice</b>
Search Size	15 x 9
Correlation Size	9 x 9
Correlation Limit	0,9
Výsledek: Strategie vytvořená pro optimální sběr identických bodů ze snímkových stereodvojic pořízených v lokalitě Mohelnice: vysoká hodnota korelačního koeficientu pro výběr kvalitních bodů a adekvátní velikost vyhledávacího okna přizpůsobená území s nízkou členitostí a snímkům s větší Y paralaxou.	

**Tvorba digitálních modelů terénu** z 3D sad bodů má své možnosti i limity. Problémem mohou být např. převisy a dutiny, vyskytující se na geomorfologických objektech poměrně často. Pomocí datových modelů TIN (triangulated irregular network), GRID ani pomocí 2,5D prezentace dat není možné tyto tvary modelovat. Řešením může být rotace souřadnicového systému a modelování bočního pohledu. Vizualizovat takovýto povrch je možné také např. pomocí software Voxler.

Výsledná **přesnost geomorfologických úloh**, k jejichž zpracování bylo využito stereofotogrammetrických metod, se podle Pavelky (2009) pohybuje kolem řádu centimetrů až decimetrů. Každá metoda má totiž své technické možnosti a vzniklé chyby se postupně kumulují. Měření polohy bodů pomocí dvoufrekvenční GPS dosahuje i po stažení korekcí centimetrové přesnosti, měření vzdáleností tachymetrickou metodou pomocí teodolitu lze provádět s přesností na centimetry až decimetry, měření totální stanicí na milimetry až centimetry a centimetrové chyby vstupují do výsledků i ve fázi

triangulace snímků a interpolace modelu. Problémem je také výskyt vegetace přímo na geomorfologickém objektu, což v daných místech znemožňuje přesné modelování povrchu. V předložené práci se sleduje vývoj břehových nátrží, které jsou velmi nestálé a rychle se vyvíjejí (za rok dochází k posunu břehové hrany až o několik metrů), navíc jsou částečně zatravněné, a tudíž lze považovat decimetrovou nepřesnost výsledného modelu za relativně přijatelnou.

## 5 VLASTNÍ ŘEŠENÍ

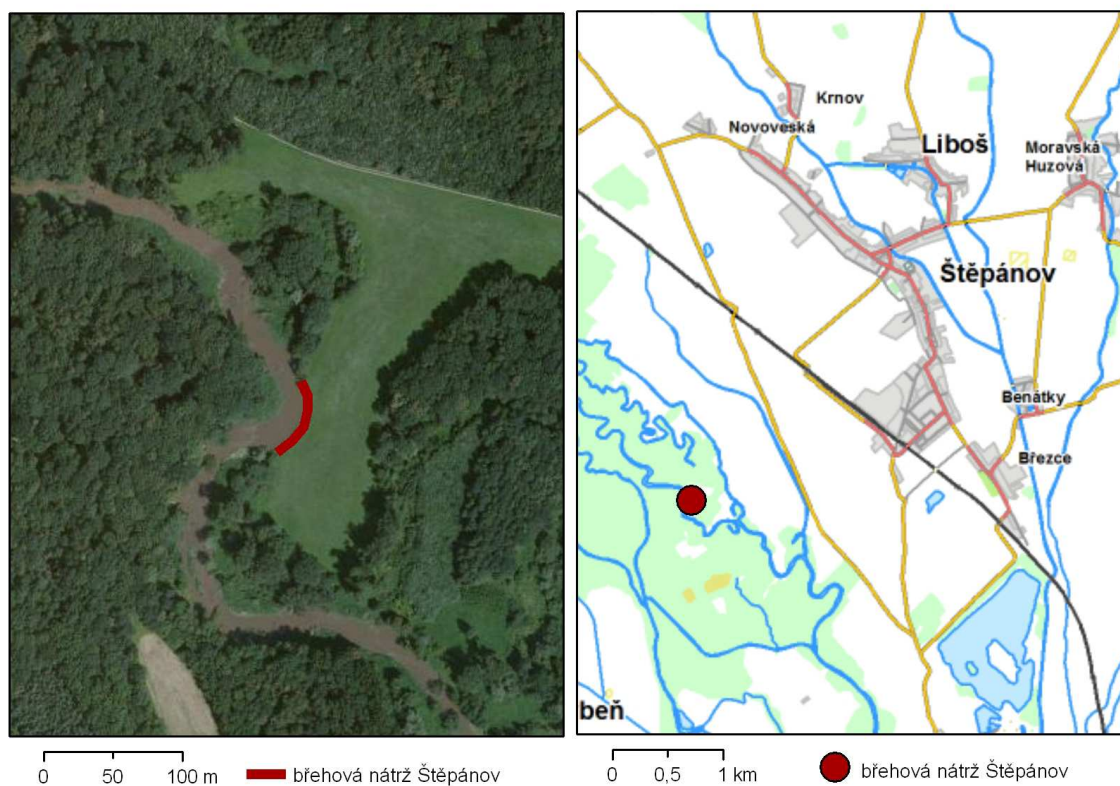
Praktické řešení magisterské práce spočívalo v realizaci jednotlivých kroků vedoucích k výsledným 3D modelům geomorfologických objektů. Nejprve byly vybrány vhodné lokality, ty byly geodeticky zaměřeny a nasnímkovány, z vybraných stereosnímků byly vygenerovány sady 3D bodů a ty byly následně interpolovány do podoby digitálních modelů terénu. Celý postup byl doplněn o nutné přípravné i dokončovací práce.

### 5.1 Lokality

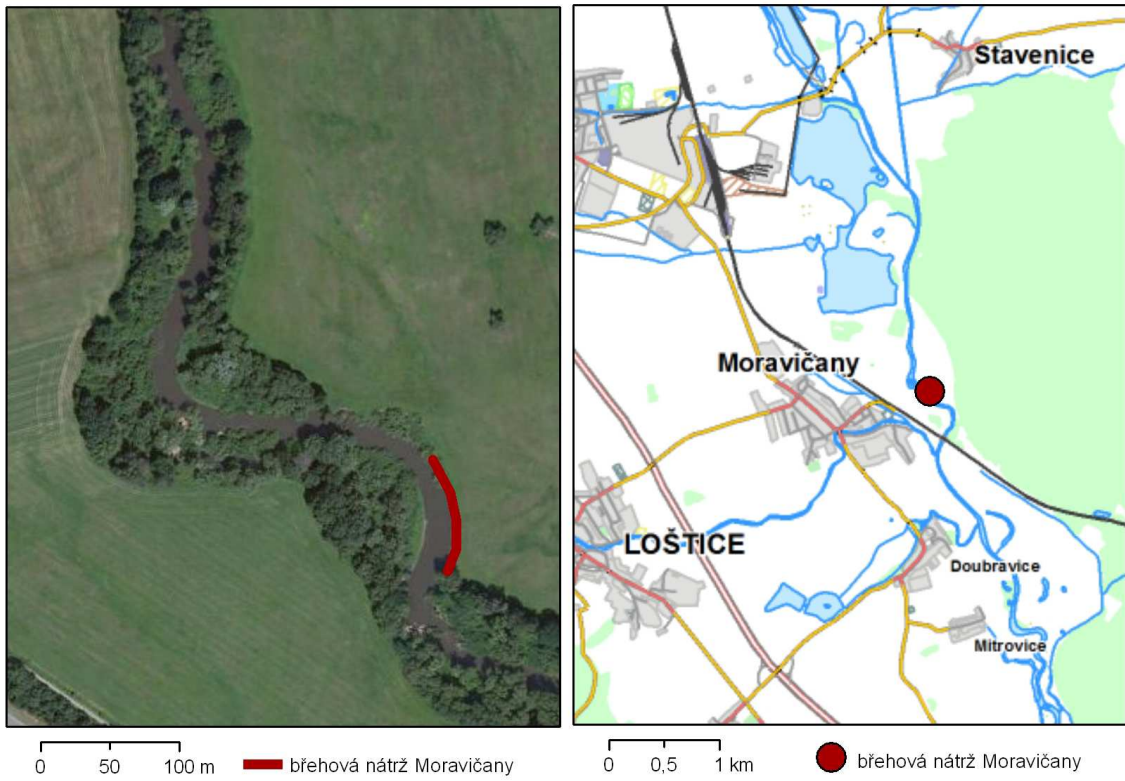
Magisterská práce se zabývá dokumentací a sledováním vývoje vybraných břehových nátrží v chráněné krajinné oblasti Litovelské Pomoraví, tedy v nížinné oblasti mezi Olomoucí a Mohelnicí, jež je typická četnými fluviálními tvary vzniklými meandrující řekou Moravou. Morava v některých místech formuje reliéf velmi dynamicky – až o několik metrů ročně, a právě v takovýchto lokalitách byly voleny konkrétní břehové nátrže pro sledování boční říční eroze.

Lokalitami pro tvorbu modelů jsou břehové nátrže v blízkosti obcí:

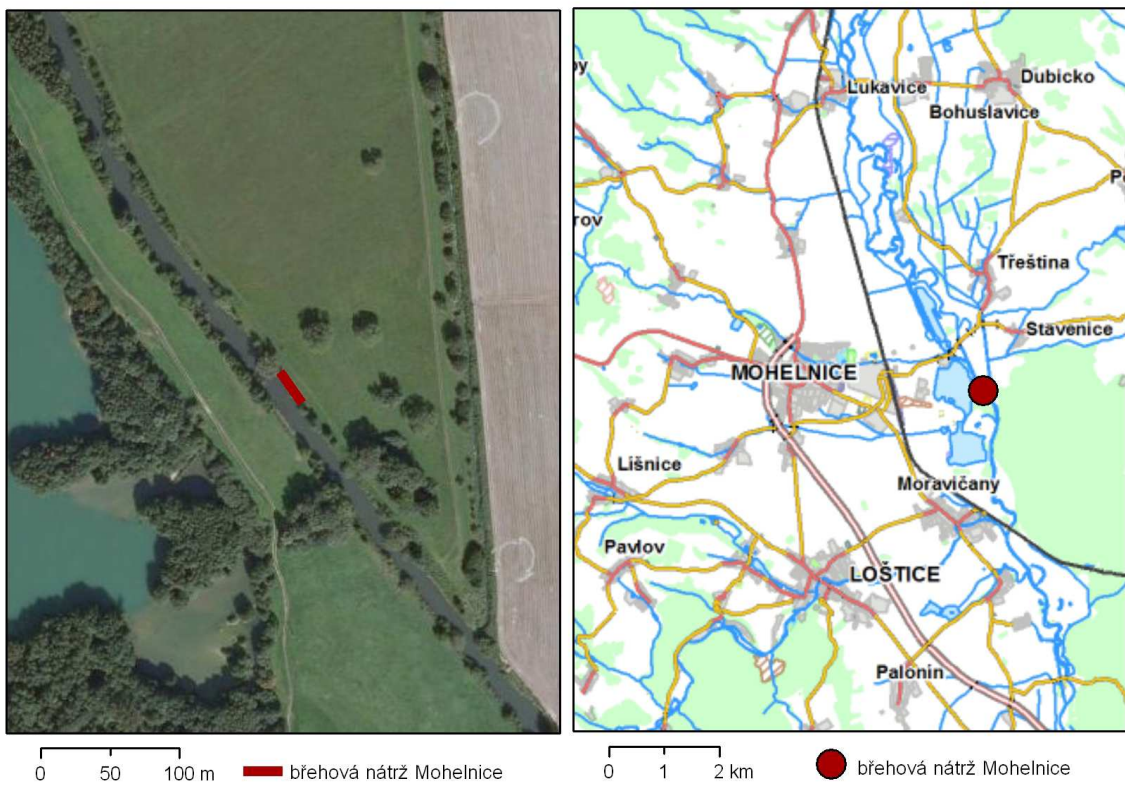
- Štěpánov (49°39'47.218"N 17°11'52.642"E)
- Moravičany (49°45'34.045"N 16°58'27.609"E)
- Mohelnice (49°46'39.205"N 16°57'58.605"E)



Obr. 3 Lokalita Štěpánov (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 4 Lokalita Moravičany (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 5 Lokalita Mohelnice (autor: M. Štěpánová, 2012).



### 5.1.1 Štěpánov

Břehová nátrž ve Štěpánově je specifická velmi intenzivní boční erozí. Posun hrany břehu byl během jednoho roku před terénním průzkumem odhadnut na dva metry. A právě dokázat postupující tendenci je jedním z cílů předložené diplomové práce. Jedno snímkování zde bylo provedeno na podzim a jedno na jaře. Již z fotodokumentace (obr. 6, 7) je patrné, že břehová nátrž během zimy změnila svůj tvar.

Břehová nátrž měří na délku přibližně 60 metrů. V době podzimního snímkování měla výšku 2,70 m a na jaře, vzhledem k vyššímu vodnímu stavu zaznamenanému během končící jarní oblevy, přibližně 1,90 m.



Obr. 6, 7 Břehová nátrž v lokalitě Štěpánov, na podzim 2011 (vlevo) a na jaře 2012 (vpravo) (autor: J. Miřijovský, 2011, V. Štěpánová, 2012).

### 5.1.2 Moravičany

Břehová nátrž poblíž Moravičan je taktéž velmi intenzivně ovlivňována boční vodní erozí – podle pracovníků KGI, kteří na této lokalitě již dříve prováděli terénní průzkum, byl na výsepním břehu pozorován posun břehové čáry o několik metrů za rok. Nátrž je formována právě v tomto místě i díky tomu, že zde řeka Morava protéká kolem louky, tedy plochy nezpevněné kořeny stromů.

Rozsah nátrže je přibližně 70 m, což činí z Moravičan největší sledovanou lokalitu. V době podzimního snímkování byl poměrně nízký vodní stav a břeh byl tedy dostatečně odhalen – výška břehové nátrže měla výšku kolem 2,40 m.



Obr. 8 Břehová nátrž v lokalitě Moravičany (autor: M. Štěpánová, 2011).

### 5.1.3 Mohelnice

Břehová nátrž poblíž Mohelnice je svým rozsahem nejmenší (20 m) a také nejméně aktivní. Nachází se totiž na napřímenějším úseku říčního toku než lokality předchozí. Její výška v době snímkování byla stanovena na 1,90 m.



Obr. 9 Břehová nátrž v lokalitě Mohelnice (autor: M. Štěpánová, 2011).

## 5.2 Přípravné práce

### 5.2.1 Kamera a její kalibrace

Ve fotogrammetrických úlohách je většinou využíváno tzv. měřických kamer, tedy takových, u nichž jsou známy prvky vnitřní orientace (ohnisková vzdálenost, radiální distorze objektivu a poloha hlavního snímkového bodu) a u nichž se tyto v čase výrazněji nemění. Druhou skupinou jsou kamery neměřické. Snímky pořízené těmito kamerami neobsahují měřické značky, a navíc u nich nejsou známy prvky vnitřní orientace. Ty je nutno je zjistit procesem kalibrace. Třetí skupinu lze vymezit jako kamery semi-měřické.

Pro účely magisterské práce byla použita neměřická kamera - fotoaparát **Canon EOS 500D** s objektivem **EFS 18-55 mm**. Vzhledem k povaze kamery bylo bezpodmínečně nutné provést její kalibraci.

Kalibrace kamery je možná několika způsoby, které se liší přesností výsledných parametrů i časovou náročností. Podle Luhmann (2006) rozlišujeme následující kalibrační metody:

*Laboratorní kalibrace* se většinou využívá pro měřické kamery. Parametry vnitřní orientace jsou určeny pomocí goniometrů, kolimátorů nebo jiných přístrojů, jež umožňují změřit směr a úhel paprsků procházejících objektivem.

*Kalibrace pomocí testovacího pole* je založena na snímkování vhodně signalizovaného testovacího pole z různých směrů, obvykle po 90°. Pro výpočet konstanty komory je nutno zadat minimálně jednu informaci o vzdálenosti bodů testovacího pole. Programové prostředky nabízející možnost kalibrace touto metodou jsou např. PhotoModeler Pro, Camera Calibrator 4.0 a Matlab (Štefanová, 2006).

*Kalibrace na olovnicové závěsy* využívá testovací pole složené z několika rovných linií, nejčastěji visících drátů. Tato metoda je vhodná pro určení distorze objektivu, avšak konstantu komory ani ohniskovou vzdálenost jí určit nelze.

*On-the-job kalibrace* je kombinací kalibrace pomocí testovacího pole a vlastního snímkování objektu. Je vhodná pro případy, kdy objekt nemá žádné geometrické informace, které by umožňovaly autokalibraci.

*Autokalibrace* využívá pro kalibraci kamery snímky určené pro zpracování. Testovací pole je tedy nahrazeno vlastním objektem, který ale musí být nasnímán za podmínek srovnatelných s těmi, jež jsou požadovány při kalibraci pomocí (např. bodového) testovacího pole. Výhodou této metody je, že je kalibrace provedena na míru snímanému objektu.

*Systémová kalibrace* je vhodná pro digitální, mobilní nebo statické, multikamerové systémy. Umožňuje určit prvky vnitřní i vnější orientace u všech systémových komponent.

Kalibraci neměřické kamery Canon EOS 500D provedl Martin Šimíček (KGI UP), a to v rámci řešení své bakalářské práce. Pro danou úlohu byla jako nejvhodnější zvolena **metoda kalibrace pomocí testovacího pole**, a to s využitím programu PhotoModeler. Během práce bylo použito rovinných i prostorových testovacích polí. Jedním z nich je například testovací pole PhotoModeler Large Sheet, které slouží především pro kalibraci kamer s vysokým rozlišením. Matice kalibračního pole se skládá z 144 bodů a tiskne se do formátu cca 90 x 90 cm. Vlastní postup kalibrace v programu PhotoModeler probíhá tak, že se založí kalibrační projekt, do něj se naimportují pořízené snímky kalibrační mřížky a výpočet parametrů kamery proběhne již automaticky.

Kalibrace byla provedena pro krajní ohniskovou vzdálenost 18 mm, kterou je nutno dodržet i během vlastního fotogrammetrického snímkování.

### **Výsledky kalibrace:**

Pro zpracování stereosnímků jsou nejdůležitější tyto parametry kamery:

- ohnisková vzdálenost - Focal Length  $f$  [mm]
- poloha hlavního bodu - Principal Point  $X_0, Y_0$  [mm]
- hodnota radiální distorze - Radial Lens Distortion Coefficients  $k_0, k_1, k_2$

Tab. 7 Parametry kalibrace kamery

$f$	18.4715 mm
$x_0$	-0.1100 mm
$x_1$	0.1500 mm
$K_0$	-2.7503400e-04
$K_1$	5.5104700e-04
$K_2$	-1.4262100e-06

Pozn. Výsledný protokol kalibrace kamery byl získán na základě několika dílčích kalibračních procesů. Pro účely zpracování diplomové práce byl použit dílčí výsledek kalibrace, který se od výsledného nijak výrazně neliší a který je pro danou úlohu naprosto dostačující. Finální hodnoty jsou ve formě kalibračního protokolu přiloženy na DVD.

### 5.2.2 Plánování snímkování

Plánování fotogrammetrické úlohy zahrnuje popis aktuální úlohy včetně konceptu pro její řešení a prezentaci výsledků (Luhmann, 2006). Plánování sestává z několika důležitých kroků a je při něm nutno zohlednit mnoho kritérií. Díky novým technologiím a digitálnímu zpracování dat však našťástí dochází ke snížení požadavků na základní fotogrammetrická řešení, což vede k usnadnění práce. Přesto je dobré se níže zmíněnými zásadami řídit, protože mohou práci přinejmenším zpřesnit a zefektivnit (Pavelka, 2009).

Většinou jsou nejdůležitějšími kritérii finanční náročnost projektu a přesnost výsledků, nutno je však zohlednit například i nejmenší objekt v zájmové oblasti (rozlišení pořizovaných dat), typ souřadnicového systému (geodetický, místní), přesnost všech měření, metodu zpracování (monoskopická, stereoskopická, mnohosnímková), typ výsledných dat (body, linie, povrchy, modely s texturami) a měřítko výstupu.

Pro danou úlohu bylo dle zadání zvoleno stereoskopické snímkování. Referenční body byly pomocí dvoufrekvenční GPS zaměřeny v souřadnicovém systému S-JTSK, zpracování snímků i prezentace výsledných modelů ve formě rastrových povrchů pak bylo provedeno v systému místním. Vzhledem k povaze pořízených dat a způsobu jejich následného zpracování se přesnost výsledků očekává řádově kolem dvou decimetrů.

### 5.3 Práce v terénu

Před snímkováním objektu je podle Pavelky (2009) vždy nutno vykonat následující úkony:

- rekognoskace terénu - rozvaha o rozmístění stanovisek fotografování, délkách základen a geodetickém zaměření vlčovacíh bodů,
- volba metody - pro účely magisterské práce zadána metoda stereofotogrammetrického snímkování, v jiných případech je třeba zvážit požadovanou přesnost metody, její časovou a ekonomickou náročnost, a teprve poté metodu zvolit,

- volba stereofotogrammetrické základny - volba stanovisek tak, aby byly osy snímkování pokud možno vodorovné a kolmé na objekt a bylo přitom možné celý objekt pokrýt kvalitními měřickými snímky,
- signalizace vlíčovacích bodů - zvýraznění bodů potřebných pro určení vnější orientace, měřítka a transformace do geodetického systému, případně pro zjištění přesnosti měřické úlohy,
- geodetické zaměření vlíčovacích bodů - zaměření jejich horizontálních i výškových souřadnic pomocí teodolitu nebo totální stanice, včetně oměření některých vzdáleností,
- snímkování - prováděné podle zásad pro pořízení kvalitních stereoskopicky orientovaných snímků.

Pro zajištění úspěšného průběhu všech výše zmíněných terénních prací bylo nutné zajistit následující pomůcky: geodetické přístroje s příslušenstvím, fotoaparát a stativ, signalizační terčíky, dřevěné stabilizační špalíky, laserový dálkoměr a buzolu.

### 5.3.1 Volba stereofotogrammetrické základny

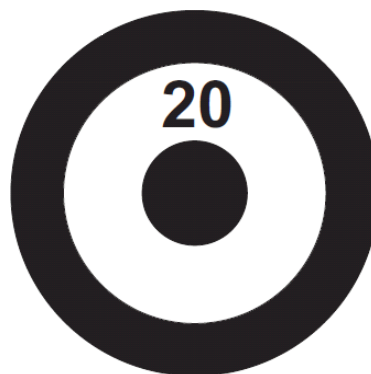
Základna je velice důležitým parametrem stereofotogrammetrického snímkování, protože se od ní odvíjí přesnost prováděné úlohy. Její délku je podle Pavelky (2009) vhodné zvolit v závislosti na nejbližších a nejvzdálenějších snímkaných bodech. Obecně je doporučována délka základny jako 1/5 až 1/10 průměrné vzdálenosti od objektu.

### 5.3.2 Signalizace a stabilizace bodů

Trvalá **stabilizace referenčních bodů** (zaměřených pomocí GPS) je provedena dřevěnými špalíky zatlučenými do země. Tyto zůstávají na lokalitách i po dokončení magisterské práce, a to pro zajištění možnosti případného pokračování v dalším výzkumu.

Pozn. Dřevěné kolíky jsou umístěny vždy několik metrů od břehu řeky, je tedy možné, že postupující říční erozí bude do koryta stržena i půda, v níž jsou kolíky zatlučeny. Potom by bylo nutné provést opětovné zaměření dalších bodů, např. opět pomocí dvoufrekvenční GPS.

**Signalizační terčíky** slouží k dočasnému označení bodů na objektu, pokud na tomto není možné žádné body identifikovat přímo. Jejich rozměry a typ záleží na parametrech konkrétní aplikace - na pozicích kamery, směrech snímání, měřítku, rozlišení a osvětlení scény (Luhmann 2006). Nejpraktičtějším tvarem terčíku je kruh, protože je invariantní vůči rotaci a měřítku. Střed terčíku může být jednoduše bodový nebo kódovaný. Pro účely magisterské práce bylo vyrobeno celkem dvacet číselně označených kruhových terčíků o průměru 14 cm s jednoduchým bodovým středem.



Obr. 10, 11 Stabilizace a signalizace referenčních a vlíčovacích bodů  
(autor: M. Štěpánová, 2011).

### 5.3.3 Geodetické zaměření referenčních a vlíčovacích bodů

V každé lokalitě bylo nutné nejprve přesně určit polohu všech stabilizovaných referenčních bodů. V Mohelnici a ve Štěpánově byly body zaměřeny pomocí **dvoufrekvenční GPS**. V Moravičanech byly souřadnice bodů převzaty z terénního průzkumu provedeného na dané lokalitě již dříve pracovníky KGI UP (i tehdy však byly body zaměřeny stejnou metodou).

Dvoufrekvenční GPS pracuje na principu určení polohy pomocí schopnosti přijmout a dekodovat dvě frekvence, L1 a L2 (základní i přesnou polohovou službu), a schopnosti pracovat i se samotnými fázemi nosné vlny. Pro účely magisterské práce byl zapůjčen dvoufrekvenční GPS přijímač Topcon Legacy E s anténou LegAnt. Anténa umístěná na výtyčce a stativu byla připojena k datovému úložišti a baterii. Po registraci dostatečného počtu družic byl spuštěn průměrovaný záznam pozice. Ten by měl pro zvýšení přesnosti záznamu probíhat minimálně 20 minut, a to v závislosti na aktuální konfiguraci družic a množství překážek v okolí stanoviště.



Obr. 12 Dvoufrekvenční GPS přijímač Topcon Legacy E (autor: M. Štěpánová, 2011).

**Tachymetrickou metodou** nebo **měřením totální stanicí** byly před snímkováním každé lokality doměřovány přesné souřadnice vlícovacích bodů označených geodetickými terčíky. V rámci geodetického zaměření lokalit bylo vhodné provést ještě kontrolní oměření některých délek (podle charakteru lokality např. vzdáleností mezi některými vlícovacími a referenčními body). K tomuto, stejně jako ke změření výšky teodolitu a vzdálenosti kamery od snímkaného objektu, bylo použito geodetické latě a laserového dálkoměru.

#### 5.3.4 Snímkování

Snímkování bylo prováděno metodou blízké pozemní stereofotogrammetrie, a proto bylo nutné dodržet několik zásad:

- stejnou výšku kamery (pro zajištění nulové vertikální Y paralaxy),
- stejné směry snímkování (odchylky maximálně do 10°),
- vzdálenost mezi stanovišti přibližně 1/10 délka základny (záleží na šířce objektivu),
- dostatečný překryv snímků (60-100%).

Během snímkování byl fotoaparát pro zajištění vodorovného směru upevněn do **stativu**. Fotogrammetrická základna byla dočasně vytyčena natažením provazu mezi dvěma krajními body a konstantní směr vůči snímkanému objektu byl kontrolován pomocí buzoly.

Při snímkování musela být dodržena kalibrovaná ohnisková vzdálenost 18 mm (není možné použít automatické zaostřování, protože by došlo ke změně prvků vnitřní orientace kamery). Ostřeno bylo vždy na hyperfokální vzdálenost tak, aby pokud možno veškeré objekty na snímku byly stejně ostré, a taktéž byla nastavena vždy stejná expozice a stejné ISO.

Na každé lokalitě bylo pořízeno 4-15 snímků, v závislosti na charakteru a rozsahu břehové nátrže a také tak, aby byl každý vlícovací bod zachycen na alespoň třech snímcích. Snímky byly pořizovány ve formátu JPEG nebo TIFF, případně v nativním formátu Canon RAW (CR2) a do TIFF teprve poté transformovány.

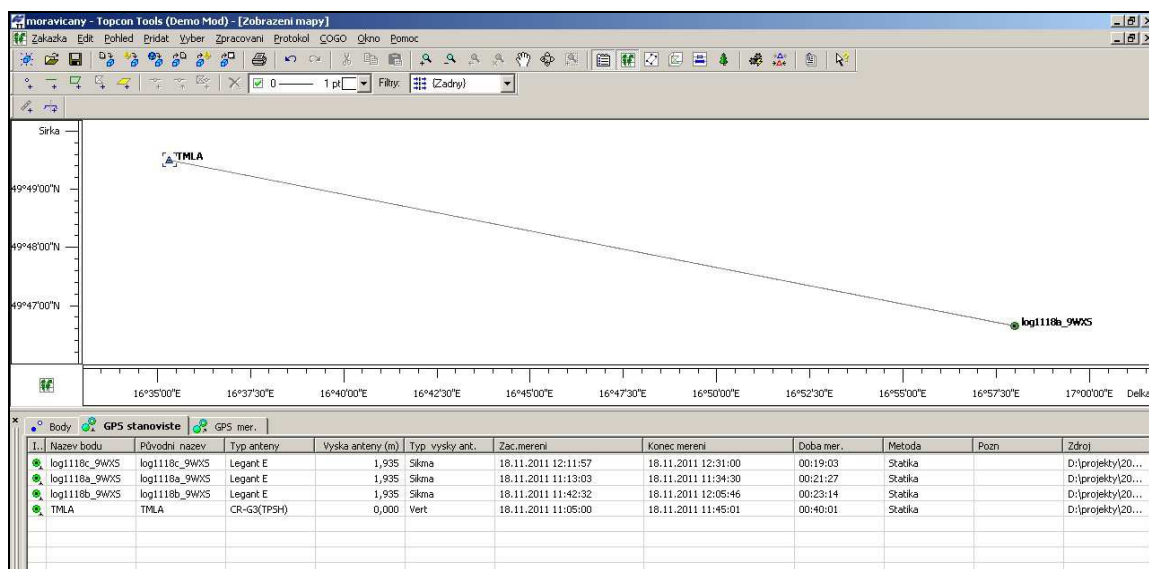
Snímkování proběhlo ve dvou vlnách – podzimní a jarní, aby bylo možné porovnat stav některých břehových nátrží před oblevou a po ní. Podzimní snímkování proběhlo 6.12. 2011 na lokalitě Moravičany a 15.12. 2011 u Štěpánova a Mohelnice, jarní etapa poté 9.4. 2012 na lokalitě Štěpánov.

## 5.4 Práce v laboratoři

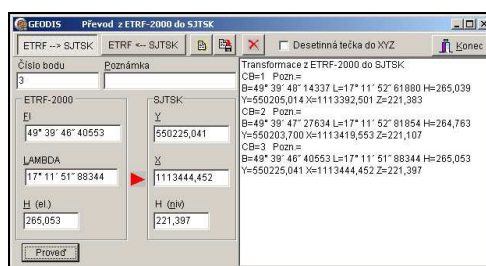
### 5.4.1 Zpracování souřadnic, transformace

Data naměřená pomocí dvoufrekvenční GPS lze zpřesnit využitím **korekcí** poskytovaných sítí pozemních referenčních stanic. Data byla získána přes webovou aplikaci společnosti Geodis [7]. Konkrétně byly využity korekce ze sítě pozemních stanic Topcon, nejbližší z nich pro danou úlohu byla stanice Mladějov.

Data ve formátu RINEX (*Receiver Independent Exchange Format* – formát pro výměnu surových navigačních dat) byla v programu Topcon Tools stažena z paměťové jednotky GPS přístroje, doplněna o korekce a nakonec bylo možno vytisknout i protokol o výsledných datech a jejich přesnosti. Takto získané souřadnice byly uloženy primárně v souřadnicovém systému ETRS89, a proto je bylo nutno ještě transformovat pomocí programu Geolink do systému S-JTSK.



Obr. 13 Topcon Tools (autor: J. Miřijovský, 2011).



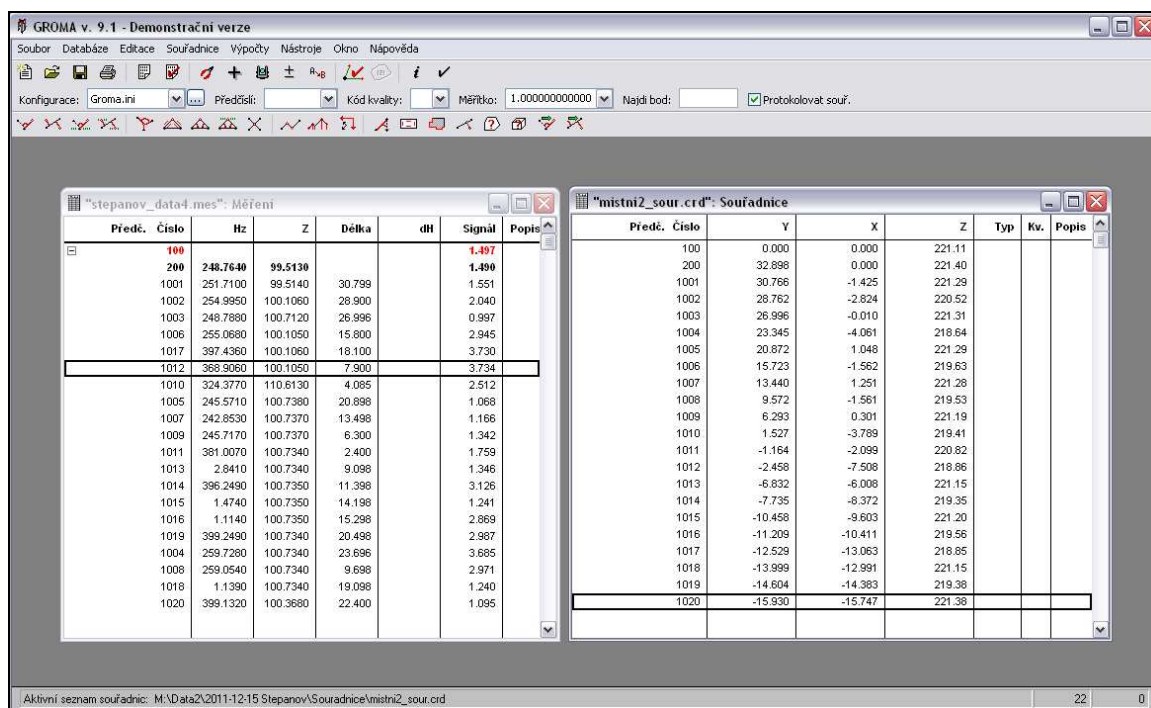
Obr. 14 Geolink (autor: J. Miřijovský, 2011).

**Data z terénních měření** ve formě tachymetrických zápisníků, která byla vytvořena před snímkováním každé lokality, byla přepsána do digitální formy a ve speciálním software pro geodetické výpočty (Groma) automaticky přepočítána do souřadnicového systému S-JTSK, a to především kvůli archivaci dat pro případný další výzkum. Pro účely zpracování v LPS byly souřadnice všech bodů taktéž přepočítány do místních



souřadnicových systémů jednotlivých lokalit, a to vždy tak, aby jedna osa ležela co nejpřesněji ve směru snímkování (jde o nutnou podmínku pro správný chod programu).

Při práci se software Groma bylo nejprve nutné vytvořit nový seznam souřadnic ve formátu CRD a naplnit jej souřadnicemi stanovišek v systému S-JTSK. Polární data byla vložena do nově vytvořeného seznamu měření ve formátu MES, a nad oběmi tabulkami byl poté proveden příkaz *Polární metoda dávkou* (vstup: měření, výstup: souřadnice), což umožnilo rychlý jednorázový výpočet souřadnic pro danou lokalitu. Pro výpočet souřadnic bodů v místním souřadnicovém systému bylo nutné vytvořit nový seznam souřadnic, a hodnoty jednotlivých souřadnic do něj vyplnit tak, aby jedna z os ležela přibližně ve směru snímkování (za počátek souřadnicového systému lze zvolit jeden z referenčních bodů a jiný, vhodně umístěný bod jako orientaci, tzn. bude také ležet na ose x). Dále byla provedena polární metoda dávkou, úplně stejně jako v předchozím případě.



Obr. 15 Groma (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 5.4.2 Zpracování snímků do podoby 3D modelů

Snímky byly ponechány v původním rastrovém formátu TIFF nebo JPEG i pro další zpracování, které probíhalo v modulu **LPS** softwaru **ERDAS IMAGINE**. Jednotlivé kroky zpracování zahrnují založení nového projektu, nastavení pracovního prostředí, import a orientaci snímků, volbu stereodvojic (pro každou lokalitu několik na sebe navazujících), generování 3D bodů, interpolaci modelu, vytvoření rektifikované mozaiky snímků a vizualizaci výsledného modelu pomocí 3D scény.

## 1. Nový projekt

V prostředí LPS byl vytvořen nový projekt, tzv. *Block file* (BLK). V nastavení prostředí projektu, které se spustí ihned po jeho založení, byl typ kamery nastaven jako digitální (*Digital Camera*), souřadnicový systém neznámý (*Set LSR (unknown) Projection*) a směr osy Z ve směru snímkování (vysvětlení viz. níže). Ve vlastnostech snímku byla zadána průměrná výška letu (změřena pro každou lokalitu zvlášť, obvykle 25-35 m) a v nastavení senzoru (*Edit Camera*) parametry vnitřní orientace – ohnisková vzdálenost, poloha hlavního snímkového bodu a hodnoty radiální distorze čočky, které byly zjištěny při laboratorní kalibraci kamery a které lze vyčíst z kalibračního protokolu (viz. přílohy na DVD).

## 2. Import snímků, nastavení vnitřní orientace

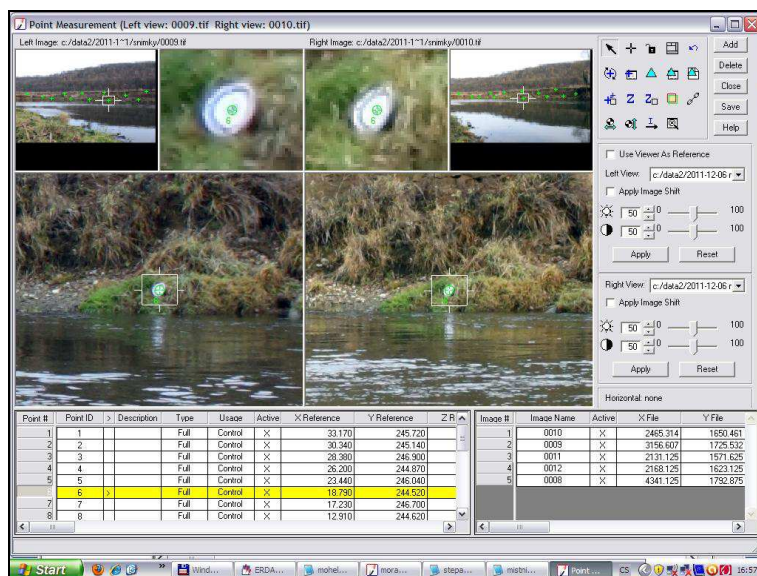
Do nového souboru byly naimportovány snímky ve formátu TIFF nebo JPEG (*Add Images*) a každému z nich byly vytvořeny pyramidové vrstvy. V záložce pro úpravu parametrů snímků (*Frame Editor*) byly doplněny informace k vnitřní orientaci snímků, a to především velikost pixelu v mikronech. Tato velikost byla spočítána z fyzické velikosti senzoru kamery (22,3 x 14,9 mm) a použitého rozlišení snímku (4752 x 3168 px): výsledná hodnota velikosti pixelu byla stanovena na 4,693 x 4,703  $\mu\text{m}$ .

## 3. Identifikace vlícovacích a vázacích bodů

Hodnoty parametrů vnější orientace byly získány triangulací, do níž vstupovaly vhodně zvolené stereopáry snímků s identifikovanými vlícovacími a vázacími body.

Pomocí nástroje pro identifikaci bodů na snímcích (*Point Measurement Tool*) byly na vybraných stereodvojicích označovány vlícovací body o známých souřadnicích (*ground control points*, GCP), kontrolní body (*check points*, které nevstupují do výpočtu, slouží pouze k výpočtu odchylek) a doplňkové vázací body (*tie points*, TP), a to pro každý stereopár v počtu minimálně 3 GCP nebo 6 TP. Poté bylo možné volitelně provést automatický sběr vázacích bodů – nastavit vhodnou hodnotu korelace pro co nejpřesnější výsledky automatického hledání, spustit sběr a poté body zkontrolovat a promazat. Přiměřený počet vhodně rozmístěných vázacích bodů dokáže zpřesnit výsledky triangulace, při velkém množství bodů ale může dojít k opaku.

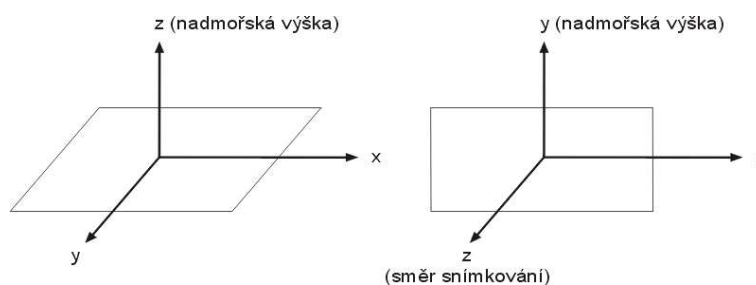
V praxi se vyplatilo označovat body především uprostřed stereodvojic, protože směrem k okrajům snímků vykazovaly výsledky určité nepřesnosti. Z tohoto důvodu nebylo použito jen jedné stereodvojice pro lokalitu (i když by v některých případech na první pohled jediná stereodvojice celou břehovou nátrž pokryla), ale hned několika na sebe navazujících.



Obr. 16 Nástroj pro identifikaci vlčcovacích a vázacích bodů (Point Measurement Tool)  
(autor: M. Štěpánová, 2012).

Pozn. Místní souřadnice vlčcovacích bodů je nutno do programu zadávat s ohledem na zvolený souřadnicový systém – je-li v počátečním nastavení projektu zvolena osa  $Z$  ve směru snímkování (viz. výše), je nutné reálný souřadnicový systém (takový, kde souřadnice  $X$  a  $Y$  jsou vodorovné a  $Z$  je svislá) rotovat tak, aby souřadnice  $Z$  a  $X$  byly ve vodorovném směru a  $Y$  ve svislém.

Navržení místního souřadnicového systému maximálně závisí na charakteru lokality a na směrech snímkování, proto se může stát, že pro některé aplikace bude vhodnější rotovat systém ještě jinak, a to aby souřadnice  $Z$  a  $Y$  byly ve vodorovném směru a  $X$  ve svislém.



Obr. 17 Reálný souřadnicový systém (vlevo) a rotovaný snímkový (vpravo)  
(autor: M. Štěpánová, 2012).

Níže je znázorněna praktická ukázka transformace a rotace skutečných souřadnic lokality Mohelnice. Nejprve je naznačen převod ze souřadnicového systému S-JTSK do místního a poté způsob zadávání souřadnic do prostředí LPS.

	Y	X	Z	POZNÁMKA
A	1099071,93	565525,22	248,46	stanovisko
B	1099082,52	565523,32	248,76	orientace
C	1099070,24	565532,20	248,81	kontrolní bod
01	1099071,76	565530,30	248,81	bod č.1
02	1099073,60	565531,48	246,86	...
03	1099072,70	565529,23	247,7	
...				



	X	Y	Z	POZNÁMKA
A	0,00	0,00	248,46	stanovisko
B	0,00	10,76	248,74	orientace
C	6,57	-2,90	248,81	kontrolní bod
01	-1,07	4,97	248,81	bod č.1
02	0,54	6,46	246,86	...
03	0,05	4,09	247,70	
...				



Point #	Point IC	>	Color	Type	Usage	Active	X Reference	Y Reference	Z Reference
1	1		Blue	Full	Control	X	-1.070	248.810	4.970
2	2	>	Green	Full	Control	X	0.540	246.860	6.460
3	3		Blue	Full	Control	X	0.050	247.700	4.090

Obr. 18 Přepoččet souřadnic a rotace souřadnicového systému (autor: M. Štěpánová, 2012).

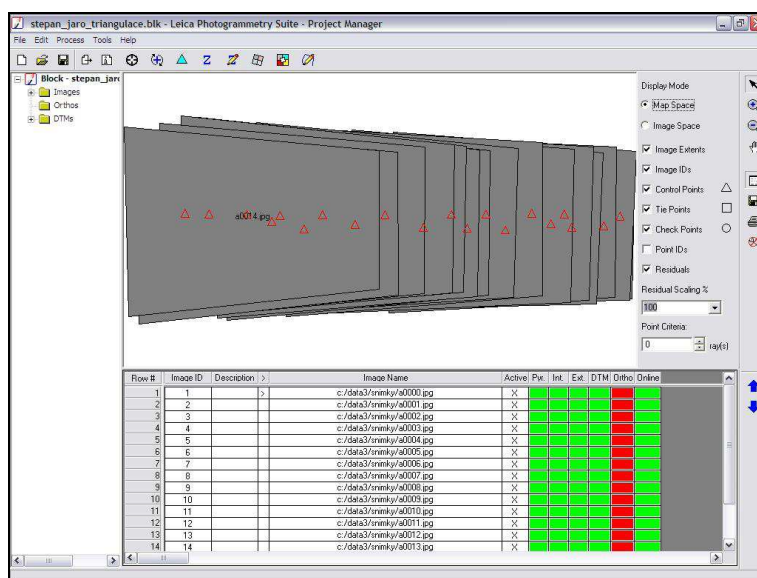
#### 4. Triangulace

Pomocí metody blokové triangulace (*Block Triangulation*) byl vytvořen rektifikovaný blok dvou až třech vhodně zvolených stereoskopických snímků. V nastavení triangulace byla zadána odchylka v měření polohy vlíčovacích bodů (*Standard Deviation*), a to v závislosti na způsobu geodetického zaměření lokality a také na vzdálenosti vlíčovacího bodu od referenčního, v řádech 5 – 20 cm. V pokročilém nastavení (*Advanced Properties*) byl potom ještě zvolen Brownův model (*Brown's physical model*), který umožňuje kompenzovat většinu forem lineární i nelineární distorze čočky. Pro správné výsledky však vyžaduje více vlíčovacích i vázacích bodů.

Po spuštění triangulace (*Run*) se zobrazí tabulka s jednoduchým přehledem odchylek poloh bodů (RMSE – *root mean square error*, střední kvadratická chyba) a je možno otevřít i detailní zprávu (*Report*). Je-li střední chyba příliš vysoká, nedoporučuje se výsledky triangulace přijímat, ale na základě reportu vyřadit některé body, případně celé snímky z výpočtu a triangulaci provést znovu. Jsou-li střední chyby nyní již přijatelné, výsledky triangulace je možno akceptovat (*Accept*). To lze udělat v každém BLK souboru pouze jednou, protože triangulací může dojít k pozměnění dat a následnému vzniku nepřesností.



Obr. 19 Triangulation Summary (zdroj: [3]).



Obr. 20 Block File (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 5. Generování 3D bodů

Generování souřadnic 3D bodů potřebných pro pozdější tvorbu modelu terénu probíhá v modulu extrakce DTM (*DTM Extraction*). Pro účely diplomové práce bylo nejvhodnější zvolit trojrozměrný shapefile (*3D Shape*) a generování jednotlivých výstupů (*Single Mosaic*). Také je nutné nastavit velikost buňky (*Cell Size*) vyjadřující hustotu bodů výsledné 3D datové sady.

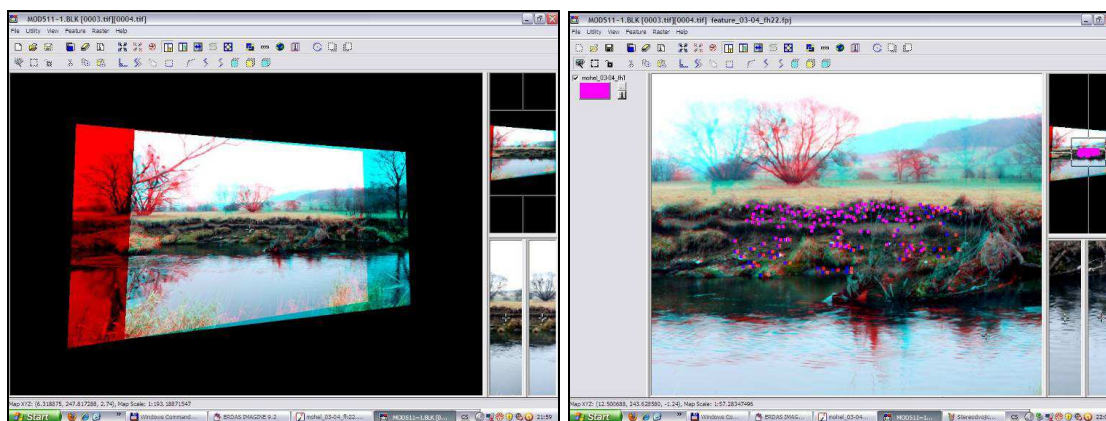
Pomocí parametrů v záložce pokročilé nastavení (*Advanced Properties*) lze výrazně ovlivnit kvantitu i kvalitu výsledných vygenerovaných bodů. V záložce *General* je možné zadat vertikální i horizontální jednotky, zvolit tvorbu rastrové vrstvy kvality bodů, obdélníkovou oblast zájmu i vrstevnicovou mapu oblasti. V záložce *Stereopair* se vybírají konkrétní stereopáry, nejlépe s překryvem nad 60%. Důležitá je záložka *Area*, která umožňuje vybírat oblasti zájmu a zadávat strategie pro generování bodů na různých typech povrchů (viz. kapitola 4.2). Záložka *Accuracy* řeší zpřesnění výsledku pomocí vlíčovacích a vázacích bodů nebo externího digitálního modelu terénu. Po zadání všech potřebných parametrů bylo spuštěno automatické generování bodů ve formátu 3D SHP.

## 6. Úprava 3D bodů

Vygenerované 3D body byly před dalším zpracováním zkontrolovány, opraveny a doplněny, k čemuž vhodně posloužil nástroj *Stereo Analyst*. Ve stereoprohlížeči byl vytvořen nový projekt (*New Feature Project*), do něhož byl přidán 3D shapefile bodů vygenerovaných v předchozím kroku (*Import Features*).

Správnost polohy 3D bodů na skutečném terénu byla kontrolována pomocí nástrojů pro zjišťování pozice (*Position Tool*) a pro sledování terénu (*Terrain Following Cursor*). Chybně vygenerované body byly umazány a v místech nedostatečného pokrytí byly digitalizovány jiné. Bylo nutné dbát na správnou polohu kurzoru pro sledování terénu (v nastavení kurzoru se zadal vysoký práh korelace – např. 0,9; kurzor se poté při nájedzu nad místo s vysokou korelací přebarvil a právě tehdy byl umístěn nový bod). Upravené body byly vyexportovány opět do formátu 3D shapefile a tím připraveny pro další zpracování (*Export Features*).

Při práci se stereoprohlížečem je možné použít anaglyfické brýle, nejlépe s levým sklem červeným a pravým sklem modrým. Podle Pavelky (2008) je tato metoda vytváření stereoskopického vjemu pro danou úlohu nejjednodušší a nejlevnější, a přitom dostatečně efektivní. Pohled na scénu ve 3D pomocí anaglyfických brýlí výrazně usnadňuje orientaci ve snímkové dvojici i kontrolu vytvořených 3D bodů.



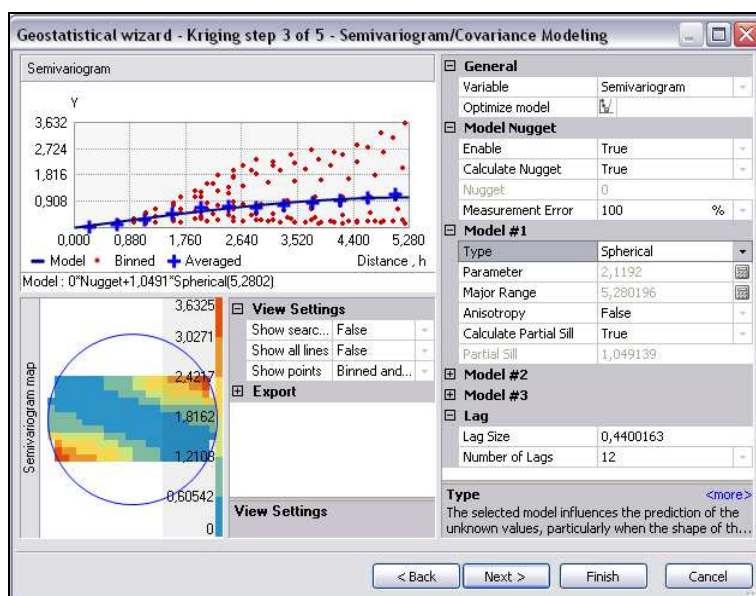
Obr. 21, 22 Stereo analyst (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 7. Tvorba modelu

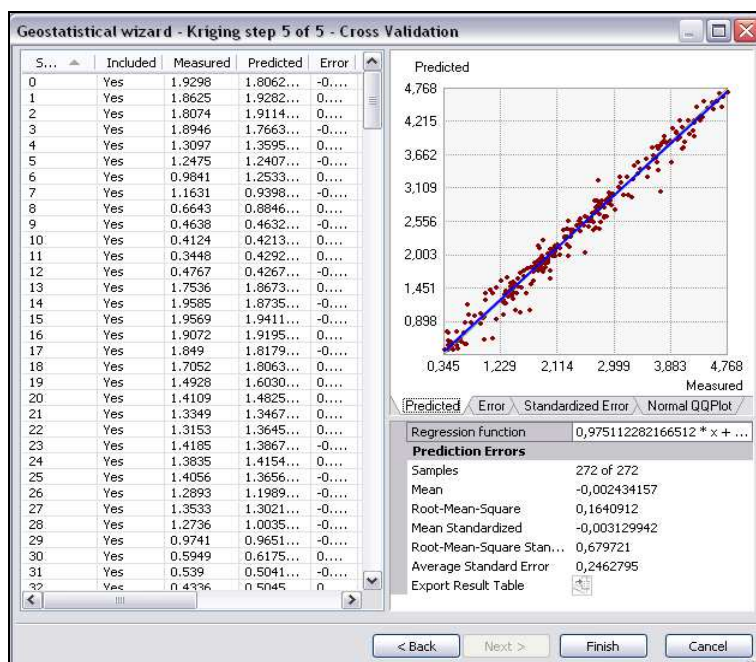
3D body vytvořené a upravené pomocí nástrojů ERDAS IMAGINE a LPS byly zobrazeny v prostředí ArcGIS. Pokud bylo pro jednu lokalitu použito více stereodvojic a tím i více bodových 3D shapefile, bylo nutné body upravit a spojit do jedné datové sady (*Merge*). Tato sada vstupuje do nástroje pro tvorbu digitálního modelu terénu (*Geostatistical Wizard*), který se nachází v rámci extenze Geostatistical Analyst programu ArcGIS 10. Jako nejvhodnější interpolační metoda byl zvolen kriging.

Tab. 8 Parametry metody kriging

Geostatistical Method	Kriging / CoKriging
Kriging Type	Ordinary
Output Type	Prediction
Semivariogram Type	Spherical
Searching neighborhood Type	Standard
Sector Type	4 sectors with 45° offset



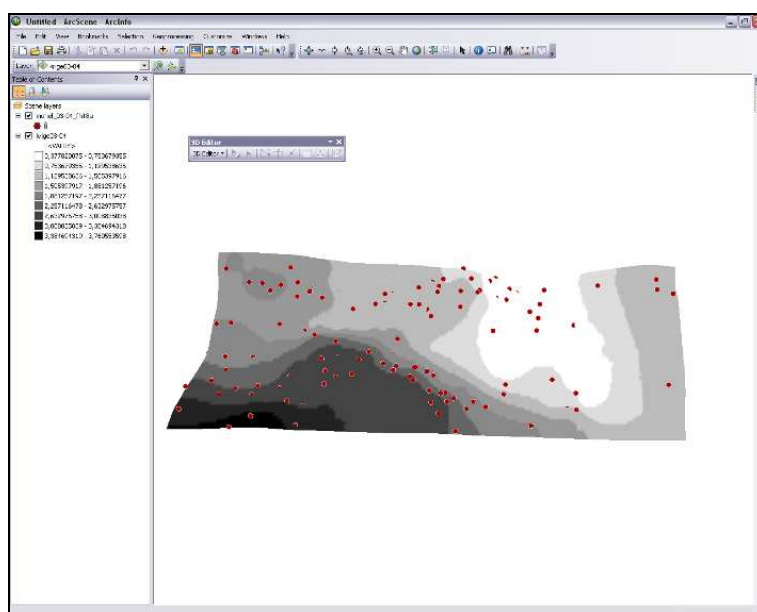
Obr. 23 Nastavení semivariogramu (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 24 Křížová validace, zobrazení chyb modelu (autor: M. Štěpánová, 2012).

Takto dojde k vytvoření geostatistické vrstvy, kterou je však pro další zpracování třeba převést na rastr (*Export To Raster*). Vzniklou rastrovou vrstvou je možné zobrazit a vizuálně zkontrolovat v programu ArcScene.

Důležitým faktem je, že výsledný model je natočený o 90° - zachycuje boční pohled na břehovou nátrž. Tvorba 3D modelu břehové nátrže ve formátu GRID totiž představuje problém kvůli převisům. Podle Höniga (2007) tento datový model ukládá informace o výšce terénu do matice, kde je ke každé souřadnici [A,B] přiřazena právě jedna hodnota C. V místě převisu by však muselo být jedné souřadnici [A,B] přiřazeno více hodnot C, což není realizovatelné - pomocí GRIDu tedy není možné takto členitý terén věrohodně postihnout, proto bylo přistoupeno k alternativnímu řešení, a to tvorbě modelu bočního pohledu.

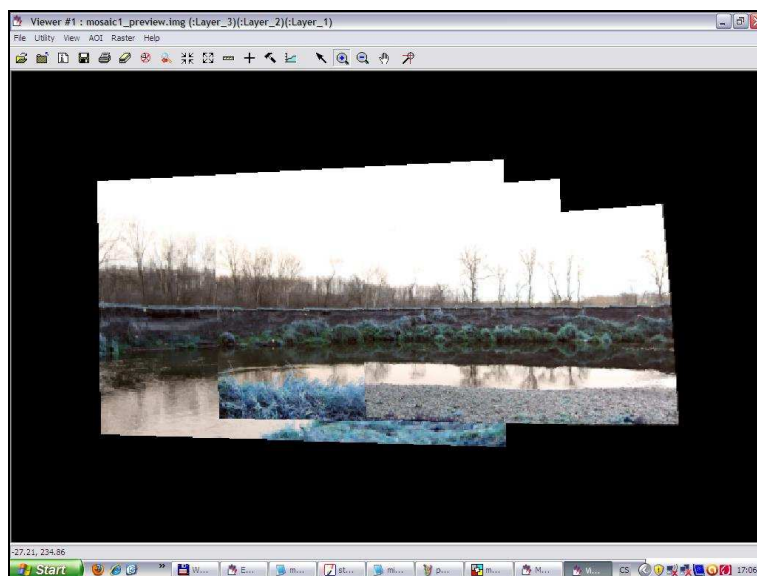


Obr. 25 ArcScene (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 8. Tvorba textury

Pro účely pozdější vizualizace byla v LPS vytvořena rektifikovaná mozaika snímků. Nejprve byly jednotlivé snímky rektifikovány a převzorkovány (*Ortho Resample*). Tento nástroj využívá metody ortorektifikace založené na kolineárních rovnicích [3], která v sobě zahrnuje zohlednění orientace kamery (senzoru) a chyb způsobených zakřivením Země. Při začlenění digitálního modelu terénu do procesu ortorektifikace dojde k vytvoření planimetricky správných ortofot, v nichž jsou eliminovány všechny geometrické chyby. Pro zpracování snímků však digitálního modelu využito nebylo, a proto byla výsledkem pouze sada rektifikovaných snímků. Mozaika byla poté vygenerována nástrojem *Mosaic Tool*, kde je třeba vhodně zvolit pořadí snímků i barevné nastavení (*Color Corrections*) snímků. Výsledná mozaika je generována ve formátu TIFF.

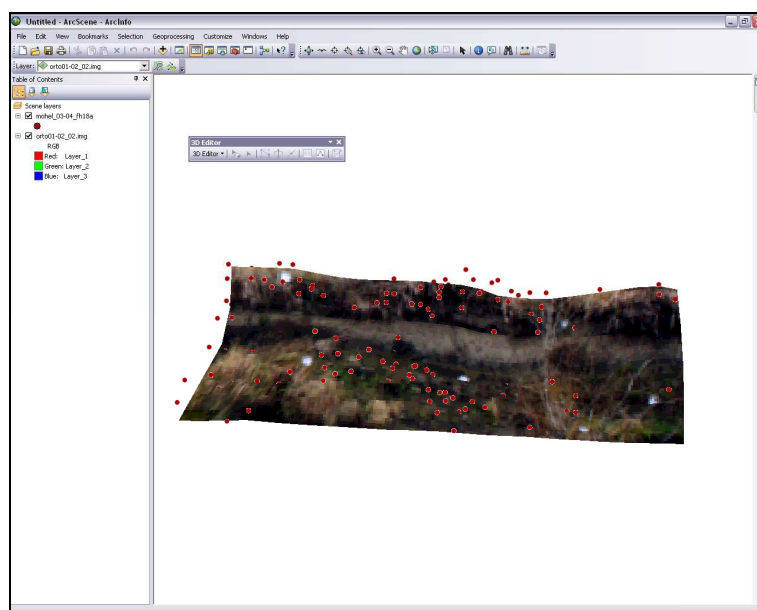




Obr. 26 Mosaic Tool (autor: M. Štěpánová, 2012).

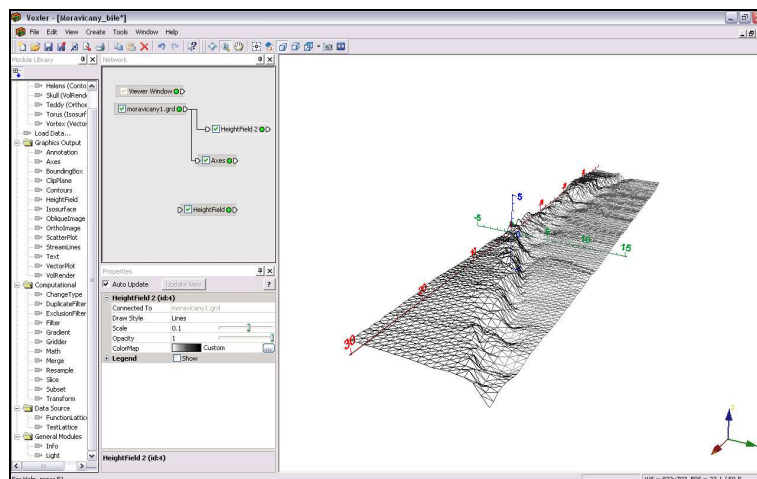
## 9. Vizualizace

Cílem vizualizace je zobrazit digitální model terénu o správném rozsahu, včetně rektifikované textury. Digitální model terénu vytvořený interpolací má pravidelný obdélníkový tvar, který ovšem neodpovídá skutečnému tvaru břehové nátrže v bočním pohledu – je proto vhodné jej ořezat. Pro tento účel byla digitalizací podle ortomozaiky vytvořena vektorová polygonová vrstva, která byla v ArcGIS převedena na rastr s hodnotou 1 (*Polygon To Raster*) a poté pomocí mapové algebry pronásobena s gridem digitálního modelu (*Raster Calculator*). Takto ořezaný 3D model byl zobrazen v ArcScene. Zde byla rektifikovaná mozaika naložena na povrch digitálního modelu terénu tak, že v nastavení mozaiky byla zvolena možnost převzít výšky (*Base Heights*) z digitálního modelu vytvořeného dříve pomocí krigingu.



Obr. 27 ArcScene (autor: M. Štěpánová, 2012).

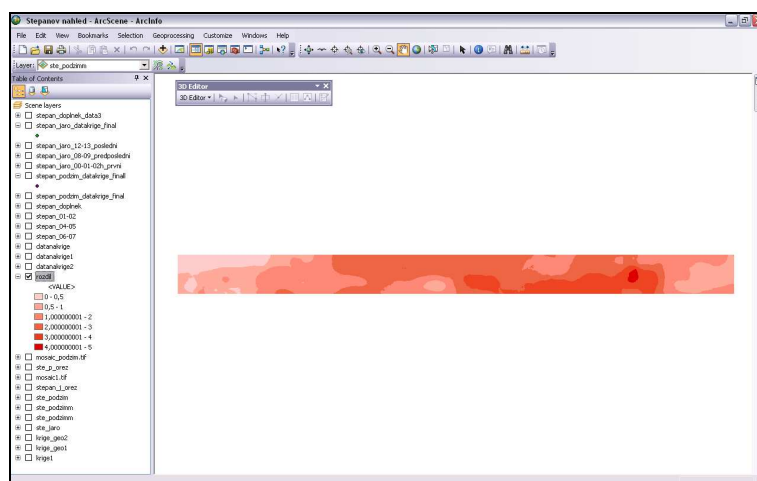
Vizualizace byla taktéž provedena pomocí nástrojů programu Voxler. Z 3D bodů byl vytvořen drátěný model, jehož převýšení včetně dalších parametrů mohlo být pozměněno pomocí modulu *Height Field*. Model byl zobrazen spolu s osovým křížem (*Axes*) pro snadnější orientaci v místním souřadnicovém systému a lepší představu o rozměrech modelu.



Obr. 28 Voxler (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 10. Porovnání modelů, vizualizace

Porovnání modelů terénu vytvořených z dvou snímkových sad (podzim 2011 a jaro 2012) bylo provedeno pomocí mapové algebry (*Raster Calculator*) v software ArcGIS 10. Snímky byly od sebe odečteny (stav na podzim minus stav na jaře) a výsledný rastr vyjádřil kladnými hodnotami posun stěny břehové nátrže v metrech.



Obr. 29 Porovnání dvou 3D modelů (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 5.5 Shrnutí

Postup pořízení a zpracování měřických snímků a princip tvorby 3D modelů byl v základě pro všechny vybrané lokality stejný, avšak určité rozdíly ve vlastnostech dat a postupech jejich zpracování existují. Výčet specifik je pro přehlednost doplněn o základní informace o sledovaných lokalit. Vše přehledně shrnuje tab. 9.

Tab. 9 Specifika pořízení a zpracování dat v jednotlivých lokalitách

lokality	Moravičany	Mohelnice	Štěpánov	
			podzim	jaro
souřadnice	49°45'34.045"N 16°58'27.609"E	49°46'39.205"N 16°57'58.605"E	49°39'47.218"N 17°11'52.642"E	
délka břehové nátrže	70 m	30 m	60 m	

geodetické zaměření				
počet referenčních bodů	2	3	3	
způsob zaměření referenčních bodů	dvoufrekvenční GPS Topcon Legacy E s anténou Levant			
počet vřícovacích bodů	20	14	20	20
způsob zaměření vřícovacích bodů	totální stanice Pentax V227N	teodolit Geofennel FET-405K		

snímkování				
počet snímků	12	4	9	15
formát snímků	TIFF	TIFF	TIFF	JPEG
datum snímkování	6.12.2011	15.12.2011	15.12.2011	9.4.2012

zpracování snímků				
počet stereopárů	7	2	3	4

## 6 VÝSLEDKY

Hlavními výsledky předložené magisterské práce jsou textové a statistické zhodnocení fotogrammetrických metod využitelných pro tvorbu 3D modelů geomorfologických objektů a sada 3D modelů vybraných břehových nátrží nacházejících se v Litovelském Pomoraví.

### 6.1 Výsledky hodnocení fotogrammetrických metod

Studiem literatury a internetových zdrojů byl získán přehled o současném stavu řešené problematiky, což výraznou měrou ovlivnilo následně zvolené metody i postup pro vypracování celé práce.

Hlavním výsledkem práce bylo textové a statistické zhodnocení možností využití metod stereofotogrammetrie pro dokumentaci a analýzy geomorfologických objektů. Hodnoceny byly typy konkrétních aplikací, podmínky pro realizaci terénních prací, možností tvorby a vizualizace 3D modelů a předpokládaná přesnost získaných výsledků. Zvláštní pozornost byla věnována softwarovým řešením a nástrojům pro práci se stereoskopicky orientovanými snímky, především nadstavbě LPS software ERDAS IMAGINE, v níž byla realizována velká část diplomové práce. V průběhu zpracování snímků v LPS bylo možné výrazně ovlivnit kvalitu extrakce 3D bodů určených pro tvorbu 3D modelů geomorfologických objektů, a to např. definicí strategií pro vyhledávání identických bodů.

Taktéž byl podrobně popsán celý postup tvorby 3D modelů břehových nátrží, od vymezení konkrétních lokalit přes jejich geodetické zaměření, snímkování, zpracování snímkových stereodvojic, extrakci 3D bodů a jejich následnou interpolaci až k výslednému hodnocení dokumentace a vývoje břehových nátrží.

### 6.2 Výstupy modelování

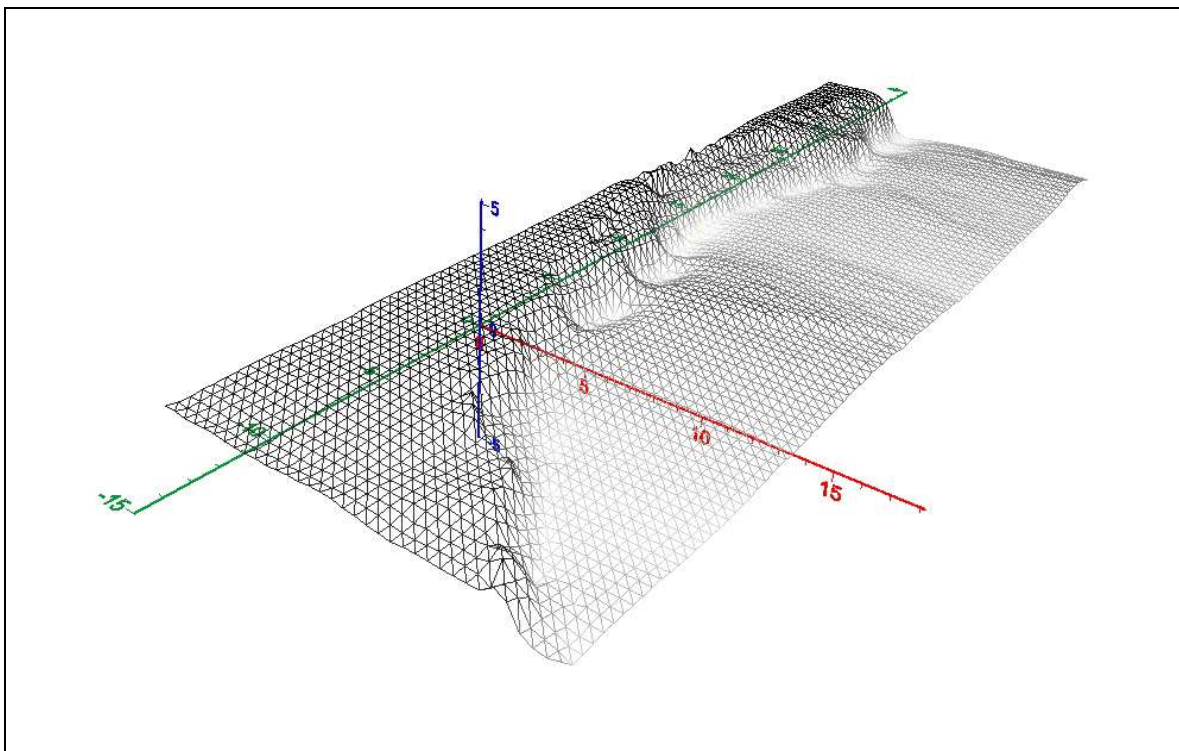
V rámci řešení magisterské práce byly vytvořeny celkem čtyři rastrové 3D modely břehových nátrží, a to ve dvou etapách – podzimní (prosinec 2011) a jarní (duben 2012). To proto, aby byla zajištěna možnost porovnání jedné lokality před a po jarní oblevě.

Vizualizace stavu a vývoje břehových nátrží byly provedeny pomocí nástrojů programu ArcScene a také v software pro 3D modelování povrchů Voxler. Zde bylo možné názorně zhlédnout umístění modelu do místního souřadnicového systému.

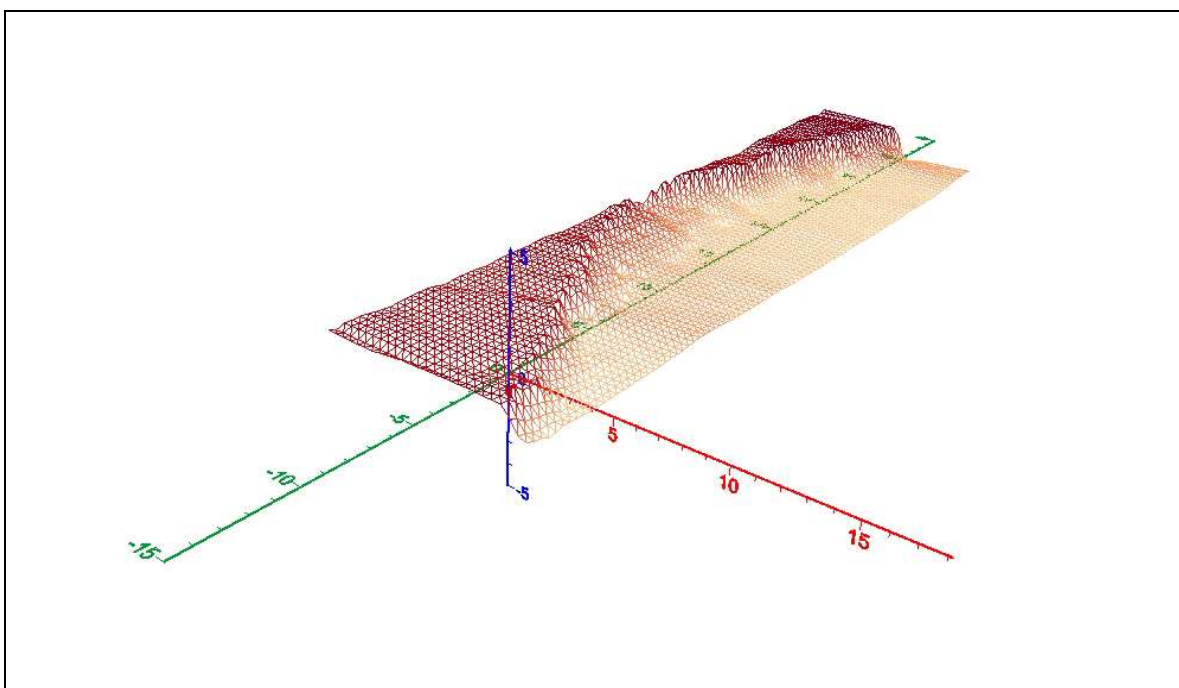
#### 6.2.1 Štěpánov

Břehová nátrž poblíž Štěpánova byla vybrána pro dlouhodobější monitoring vlivu říční eroze na koryto řeky Moravy. První 3D model této lokality byl vytvořen v rámci etapy podzimního snímkování, a to pro stav z 15.12. 2011. V té době byla břehová nátrž místy pokryta vegetací, což částečně bránilo přesnému modelování. Přesto se podařilo zachytit tvar geomorfologického objektu poměrně věrohodně. Druhý 3D model geomorfologického tvaru byl vytvořen na základě terénního průzkumu z 9.4. 2012. Tento

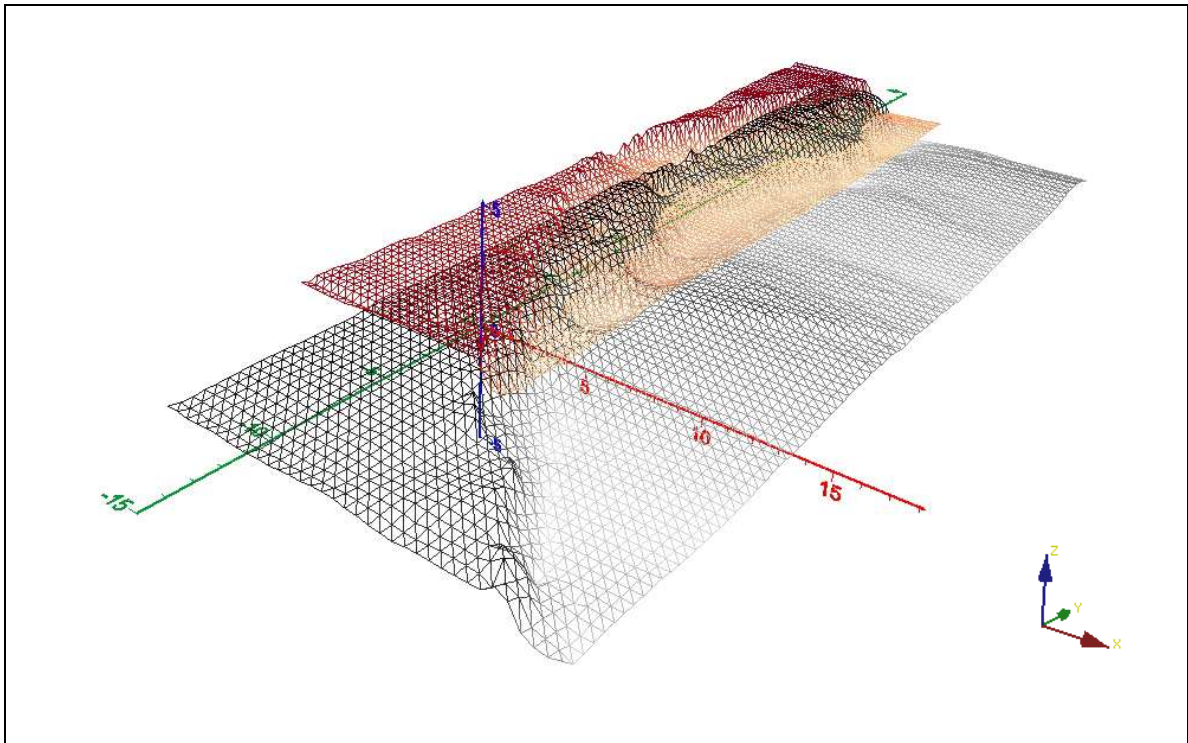
model je menšího rozsahu, což však pro úspěšné srovnání není nejmenší překážkou - část břehové nátrže zůstala totiž od minulého snímkování takřka nezměněna. Velkou změnou však prošla část břehové nátrže dále po směru toku řeky – v některých místech byl zaznamenán posun stěny nátrže až o více než 3 metry.



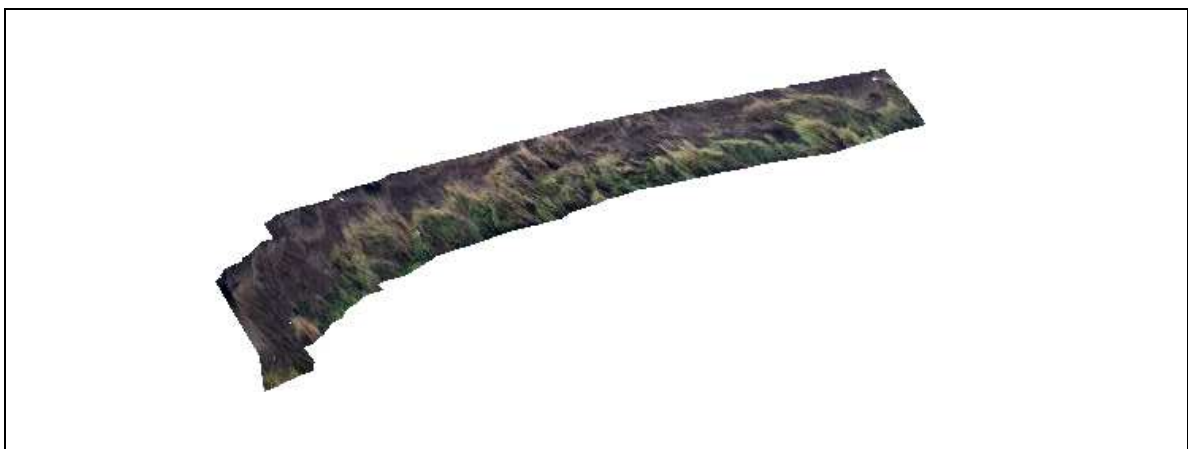
Obr. 30 Drátěný model lokality Štěpánov (podzim 2011) [m] (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 31 Drátěný model lokality Štěpánov (jaro 2012) [m] (autor: M. Štěpánová, 2012).



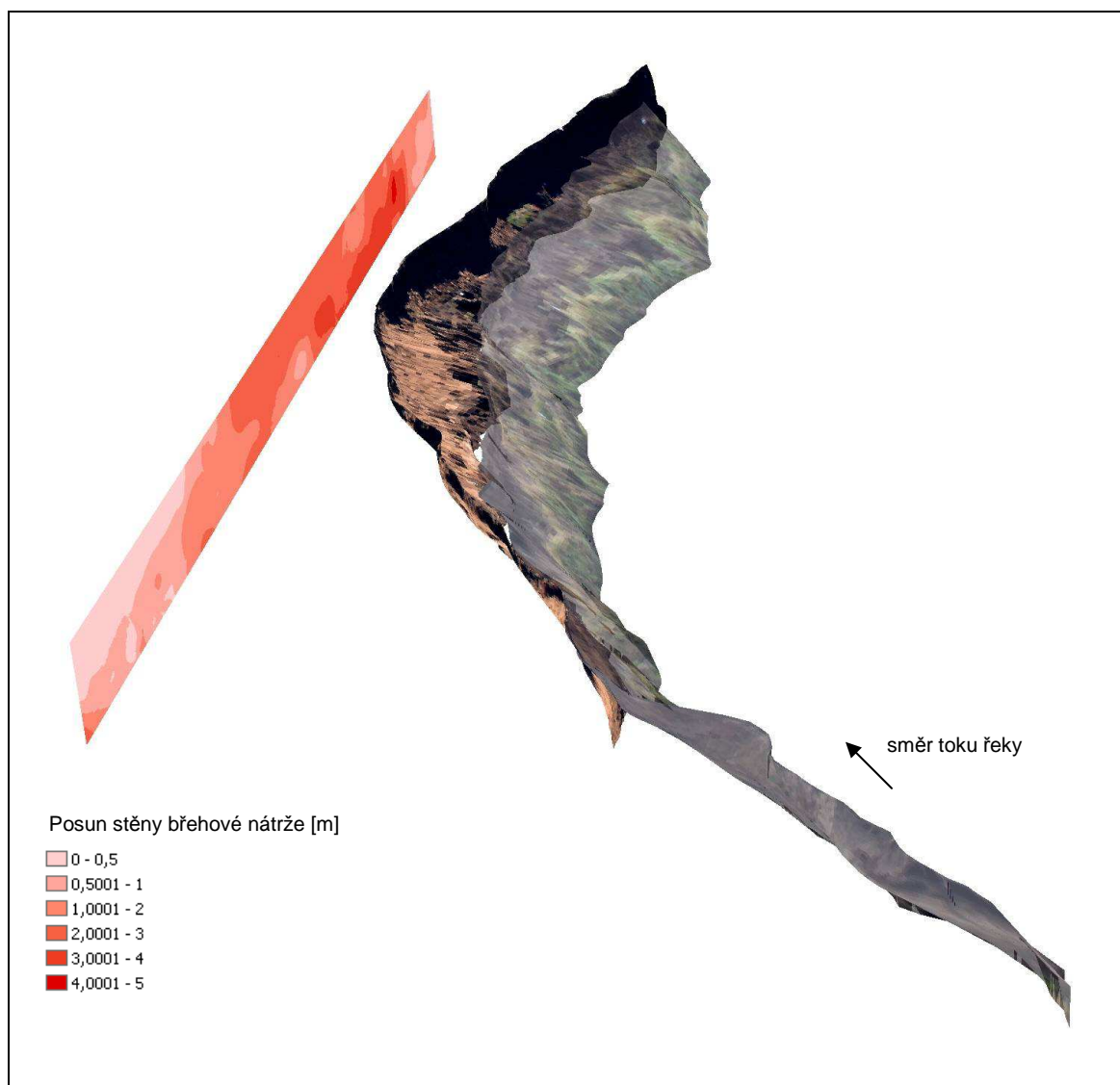
Obr. 32 Porovnání stavu břehové nátrže v lokalitě Štěpánov na podzim 2011 (černě) a na jaře 2012 (červen) [m] (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 33 Náhled na 3D model lokality Štěpánov (podzim 2011) (autor: M. Štěpánová, 2012).



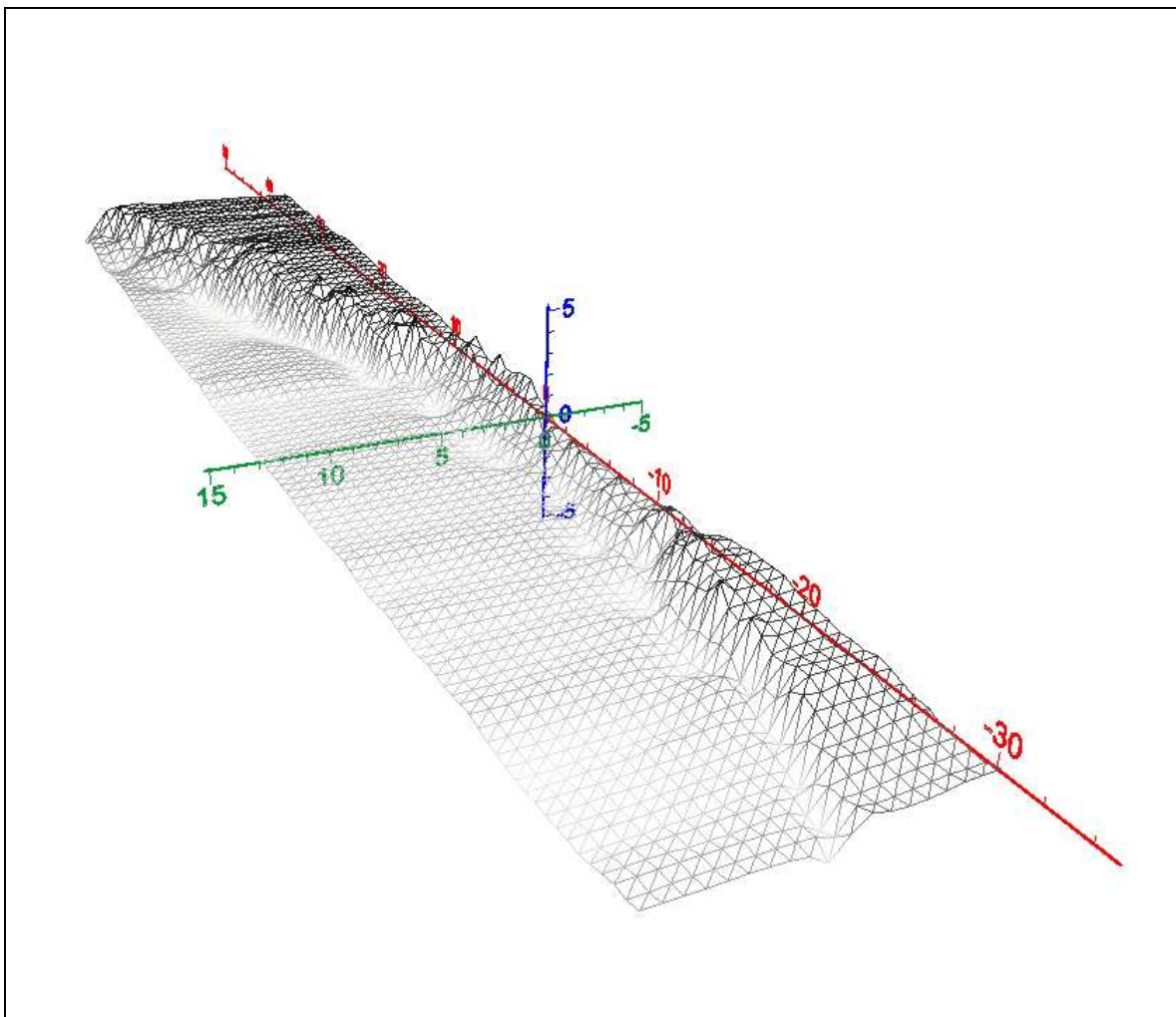
Obr. 34 Náhled na 3D model lokality Štěpánov (jaro 2012) (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 35 Porovnání stavu břehové nátrže v lokalitě Štěpánov vyjádřené vedle sebe umístěnými 3D modely, doplněné vrstvou absolutních hodnot posunu stěny břehové nátrže (autor: M. Štěpánová, 2012).

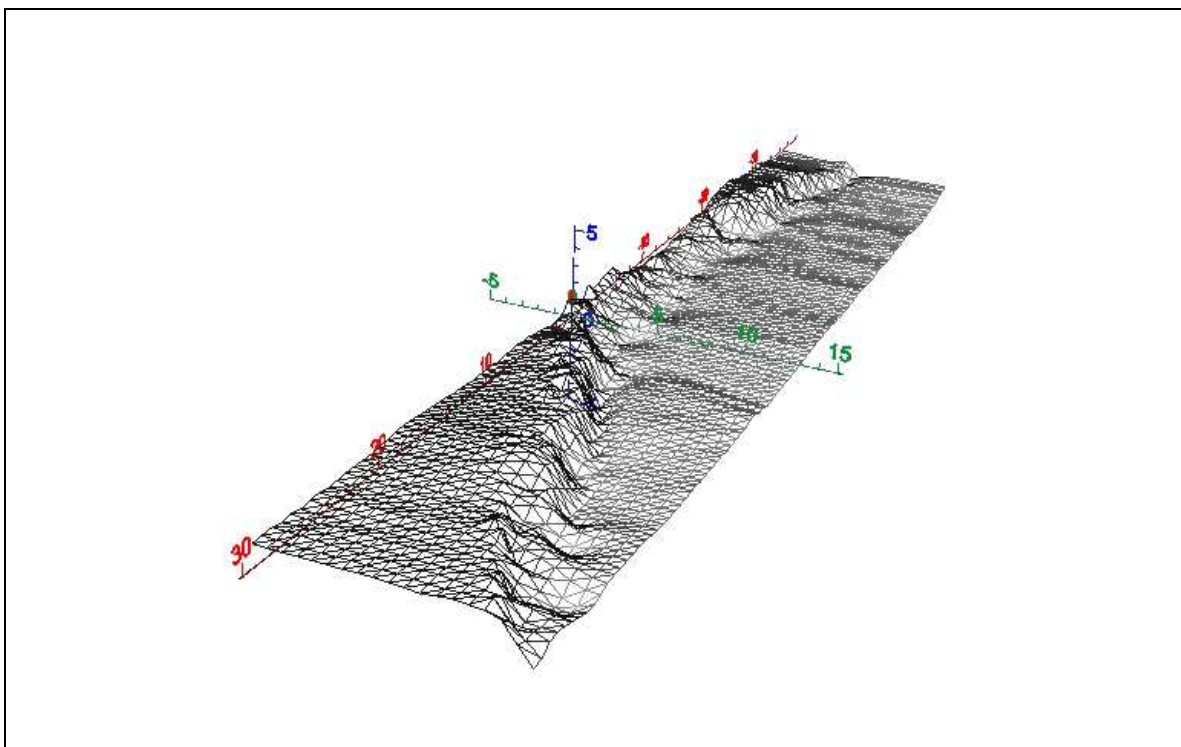
## 6.2.2 Moravičany

Břehová nátrž poblíž Moravičan byla dokumentována pouze jednorázově, a to během podzimní etapy terénního průzkumu: 6.12. 2011. Vzhledem k pokročilým metodám geodetického zaměření a oměření lokality (totální stanice, laserový dálkoměr) lze předpokládat, že výsledný model bude ze všech čtyř realizovaných nejpřesnější.



Obr. 36 Drátěný model lokality Moravičany (podzim 2011) [m] (autor: M. Štěpánová, 2012).





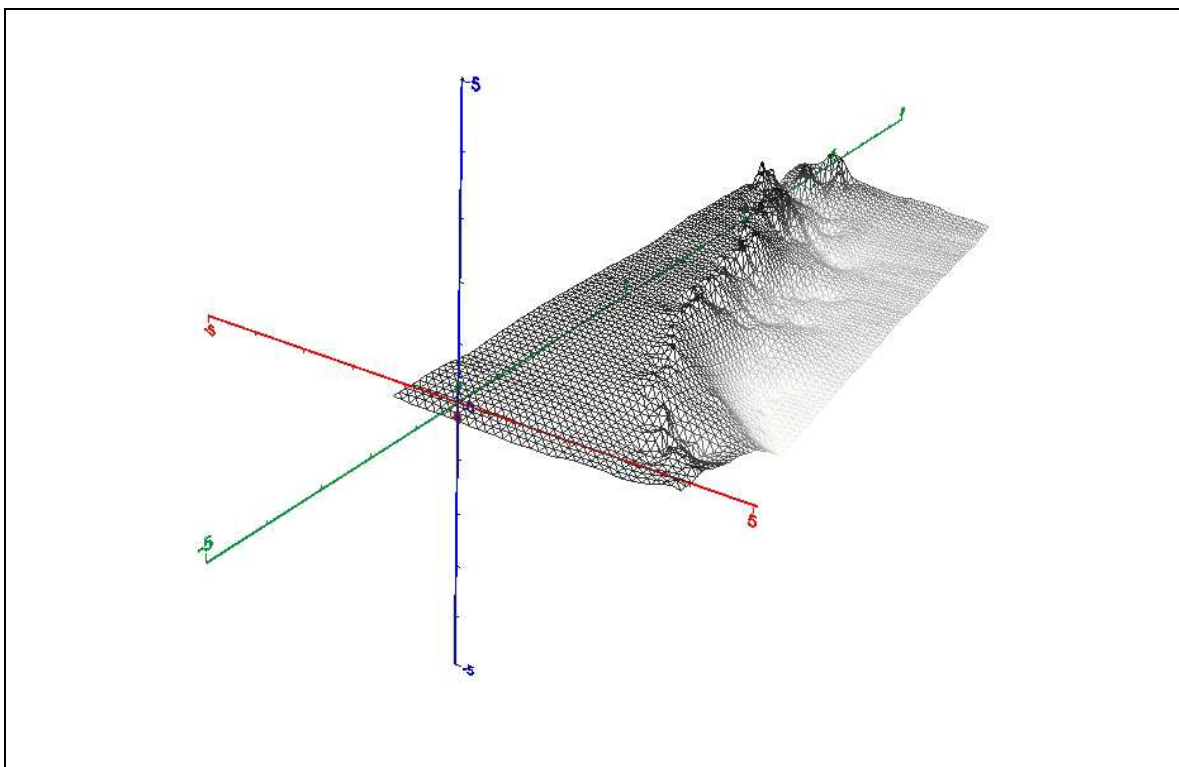
Obr. 37 Drátěný model lokality Moravičany (podzim 2011) [m] (autor: M. Štěpánová, 2012).



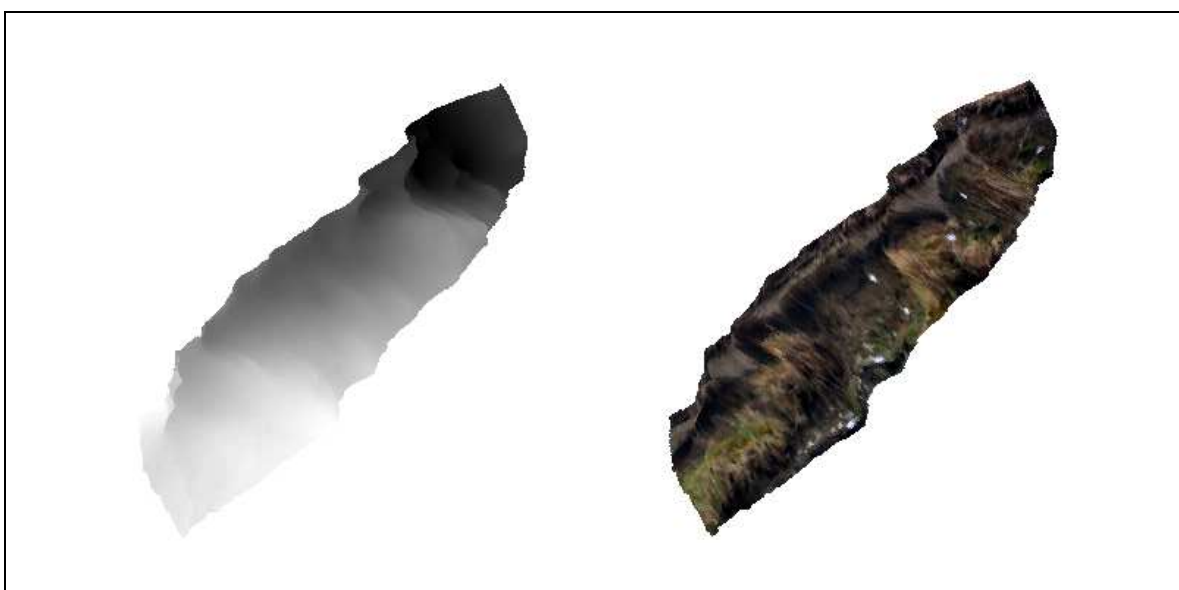
Obr. 38 Náhled na 3D model lokality Moravičany (podzim 2011) (autor: M. Štěpánová, 2012).

### 6.2.3 Mohelnice

Břehová nátrž poblíž Mohelnice byla dokumentována pouze jednorázově, a to během podzimní etapy terénního průzkumu: 15.12. 2011. Tato lokalita je nejméně aktivní ze všech sledovaných a i do budoucna se na ní očekává nejmenší úbytek hmoty.



Obr. 39 Drátěný model lokality Mohelnice (podzim 2011) [m] (autor: M. Štěpánová, 2012).



Obr. 40 Náhled na 3D model lokality Mohelnice (podzim 2011) (autor: M. Štěpánová, 2012).

## 7 DISKUZE

Řešení diplomové práce se zaměřilo na využití metod stereofotogrammetrie pro maloformátové snímkování zemského povrchu, zvláště pak snímkování geomorfologických objektů pro účely tvorby jejich 3D modelů. Během řešení vyšlo najevo několik zajímavých zjištění, jejichž včasná znalost by značně usnadnila zpracování celé práce.

Stereofotogrammetrie se projevila jako poměrně náročná na konfiguraci měřických snímků – již drobná Y paralaxa nebo odchylka od správného směru snímkování způsobila obtíže a vznik nepřesností při zpracování stereodvojic. Zde se jako řešení nabízí dočasné vyznačení fotogrammetrické základny přímo v terénu (tak, jako tomu bylo provedeno během jarní etapy snímkování) a pečlivé zajištění stejné výšky kamery a směrů snímkování pro každé stanoviště.

Obtížná byla i manipulace se souřadnicovými systémy. Software LPS vyžaduje směr snímkování ve směru jedné z os, díky čemuž nebylo možné využít souřadnicový systém geodetický (S-JTSK), ale data musela být transformována do systému místního. Vzhledem k počátečnímu nastavení prostředí LPS (osa Z ve vodorovném směru snímkování, ačkoli se osa Z používá nejčastěji pro osu svislou) bylo nutné rotovat souřadnicovým systémem, vzhledem k charakteru lokalit každým místním systémem pro každou lokalitu jinak. Pro snadnější manipulaci s daty by bylo vhodné označit v počátečním nastavení programu LPS směr snímkování ve směru osy Y tak, aby osa Z mohla zůstat svislá.

Přesnost dosažených výsledků byla stanovena na dva decimetry. V případě lokalit, kde došlo jen k jednorázové dokumentaci stavu břehové nátrže, není možné na první pohled poznat, zda model vykazuje známky určité hrubé chyby či nikoli. Avšak v případě lokality, v níž bylo provedeno k porovnání dvou modelů z dvou časových období, dle očekávání k chybě došlo. V místech takřka nulové skutečné změny stavu břehové nátrže model ukázal nárůst (!) hmoty břehové nátrže o celých 17 cm. Mohlo k tomu dojít nepřesným geodetickým zaměřením okolních vlícovacích bodů stejně jako prostou chybou interpolace. Vzhledem k očekávaným kumulovaným chybám obou modelů byla tato skutečnost ponechána v nezměněné formě i pro finální prezentaci výsledků modelování.

Jak názorně dokazuje odstavec výše, slabinou výsledných stereomodelů je jejich jistá nepřesnost. Lepších výsledků by bylo možné dosáhnout zaměřením více referenčních bodů, přesnějším zaměřením vlícovacích bodů (např. pomocí totální stanice) a získáním souřadnic vlícovacích bodů vyrovnáním, ne jen z jediného měření. Důležitými podmínkami, které ovšem splněny byly, je např. správná kalibrace kamery a výsledná podoba měřických snímků, stejně jako pečlivost při zpracování a trpělivost při hledání optimálních parametrů modelování.

Pokračování ve výzkumu je jednou z možností, jak na předloženou diplomovou práci v budoucnosti navázat. Vzhledem k charakteru všech třech lokalit je u těchto další změna tvaru geomorfologického objektu (břehové nátrže) více než předpokládána. Modely, které jsou výstupem předložené diplomové práce, jsou sice lokalizovány do místního souřadnicového systému, ale referenční i vlícovací body, z nichž bylo při tvorbě modelů vycházeno, jsou zaměřeny i v S-JTSK, proto je lze při dalším zpracování snadno použít.

Druhou možností je zaměřit se na vybrané říční meandry z jiného pohledu – více geomorfologického nebo ekologického (vliv geologie, bioty a dopad na krajinu), případně využít pro sledování eroze břehů jinou metodu – laserscanning, průsekovou fotogrammetrii nebo proměřování čistě geodetickým způsobem.

## 8 ZÁVĚR

Magisterská práce Tvorba 3D modelů geomorfologických objektů ze stereodvojic má za cíl zhodnotit možnosti využití stereofotogrammetrie pro geomorfologické úlohy a v praktické části vytvořit sadu 3D modelů vybraných břehových nátrží nacházejících se v rámci CHKO Litovelské Pomoraví.

Teoretická část práce vedla k vymezení geomorfologických úloh, pro něž je stereofotogrammetrie vhodná, ke zhodnocení možností tvorby a vizualizace 3D modelů a také byla diskutována přesnost získaných výsledků.

Pro účely praktické části práce byly vybrány tři konkrétní lokality – aktivní břehové nátrže poblíž Štěpánova, Moravičan a Mohelnice. První z nich byla zdokumentována celkem dvakrát, na podzim 2011 a na jaře 2012, a to pro získání informací o změně tvaru objektu za stanovený časový interval.

V rámci terénních prací byla každá z vybraných lokalit geodeticky zaměřena a nasnímkována podle zásad pro pořizování kvalitních stereodvojic. Snímků bylo v závislosti na rozsahu lokality pořízeno 4 – 15. Ze snímků byly vybrány nejkvalitnější stereodvojice (s co nejmenší Y parallaxou a patřičným překryvem), které posloužily pro identifikaci a generování dílčích sad 3D bodů. Ty byly dále upraveny, doplněny a spojeny do jedné datové sady, která vstupovala do procesu interpolace digitálního modelu terénu. Z důvodu charakteru břehových nátrží musel být gridový model vytvořen pro čelní pohled, tzn. v natočeném souřadnicovém systému. Pro jednu z lokalit byly vytvořeny modely dva (na podzim a na jaře), takže bylo nutné je porovnat, vizualizovat a zhodnotit tak úbytek hmoty na břehové nátrži. Všechny výsledné modely byly prezentovány ve formě drátěného modelu a náhledu na 3D model.

Výsledným zjištěním, ke kterému se dospělo během výzkumu, je fakt, že břehová nátrž na násepním břehu meandru poblíž Štěpánova, která byla zdokumentována před i po jarní oblevě, vykazovala posun hrany břehu v závislosti na části břehové nátrže v řádu 1-4 m. (Přesnost úlohy se vzhledem k použitým měřicím technikám a chybám zaneseným do modelu v průběhu triangulace a interpolace pohybuje kolem 20 cm.) Břehové nátrže poblíž Moravičan a Mohelnice byly dokumentovány pouze jednorázově, nelze proto určit jejich změnu za zimní období. Nabízí se však možnost využít stávajících zaměřených referenčních bodů a ve výzkumu dále pokračovat.

# POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

## Literatura

ABER, James S.; MARZOLFF, I.; RIES, Johannes B. *Small-Format Aerial Photography : Principles, techniques and geoscience applications*. first edition. Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2010. 266 s. ISBN 978-0-444-53260-2.

DROZDEK, Marek. *Aplikace metod pozemní digitální fotogrammetrie při sledování změn průběhu koryta Odry v CHKO Poodří*. Ostrava, 2006. 80 s. Diplomová práce. Ostravská Univerzita v Ostravě.

HÖNIG, Robin. *Využití pozemní fotogrammetrie pro sledování eroze říčních břehů*. Ostrava, 2007. 46 s. Bakalářská práce. Ostravská Univerzita v Ostravě.

LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry : Principles, Methods and Applications*. Scotland : Whittles Publishing, 2006. 510 s. ISBN 1-870325-50-8.

PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. Vydání první. Praha, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6.

PAVELKA, Karel, HODAČ, Jindřich. *Fotogrammetrie 3 – Digitální metody a laserové skenování*. Vydání první. Praha, 2008. 187 s. ISBN 978-80-01-03978-6.

PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 10*. Vydání první. Praha, 1998. ISBN 80-01-01863-6.

PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 20*. Vydání druhé přepracované. Praha, 2003. ISBN 80-01-02762-7.

PROKEŠOVÁ, Roberta; KARDOŠ, Miroslav; MEDVEĎOVÁ, Alžběta. Landslide dynamics from high-resolution aerial photographs : A case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Geomorphology*. 2010, 115, s. 90-101.

## Elektronické zdroje

- [1] 15.2. Tachymetrie. 15.2. *Tachymetrie: Kapitola 15. Metody měření výškopisu* [online]. 17.5.2007 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.gis.zcu.cz/studium/gen1/html/ch15s02.html>
- [2] Dálkový průzkum Země. CAGI. *CAGI Český rozcestník k informacím o GIS a možnostech vzdělávání* [online]. 2011, 22.4.2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: [http://gislib.upol.cz/educagi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98:dpz&catid=58:prodr-info&Itemid=90](http://gislib.upol.cz/educagi/index.php?option=com_content&view=article&id=98:dpz&catid=58:prodr-info&Itemid=90)
- [3] ERDAS, 2008. *LPS Project Manager - User's Guide*. ERDAS, Norcross, Georgia, USA. 440 p.
- [4] ERDAS, 2008. *LPS Automatic Terrain Extraction – User's Guide*. ERDAS, Norcross, Georgia, USA. 154 p.
- [5] Groma: Geodetický software. SEHNAL, Jan. *GROMA* [online]. 2009, 22.4.2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.groma.cz>
- [6] Slovník VÚGTK: Snímková dvojice, stereodvojice. In: ZEMAN, Lukáš. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. 2005, 22.4.2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: [http://www.vugtk.cz/slovník/6633\\_snimkova-dvojice--stereodvojice](http://www.vugtk.cz/slovník/6633_snimkova-dvojice--stereodvojice)
- [7] *TopNET* [online]. 10.4.2012 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://topnet.geodis.cz/topnet>.

## SEZNAM ILUSTRACÍ

- Obr. 1 Postup práce
- Obr. 2 Okno pro nastavení parametrů strategie
- Obr. 3 Lokalita Štěpánov
- Obr. 4 Lokalita Moravičany
- Obr. 5 Lokalita Mohelnice
- Obr. 6, 7 Břehová nátrž v lokalitě Štěpánov, na podzim 2011 a na jaře 2012
- Obr. 8 Břehová nátrž v lokalitě Moravičany
- Obr. 9 Břehová nátrž v lokalitě Mohelnice
- Obr. 10, 11 Stabilizace a signalizace referenčních a vlíčovacích bodů
- Obr. 12 Dvoufrekvenční GPS přijímač Topcon Legacy E
- Obr. 13 Topcon Tools
- Obr. 14 Geolink
- Obr. 15 Groma
- Obr. 16 Nástroj pro identifikaci vlíčovacích a vázacích bodů
- Obr. 17 Reálný souřadnicový systém a rotovaný snímkový
- Obr. 18 Přepočítání souřadnic a rotace souřadnicového systému
- Obr. 19 Triangulation Summary
- Obr. 20 Block file
- Obr. 21, 22 Stereo analyst
- Obr. 23 Nastavení semivariogramu
- Obr. 24 Křížová validace, zobrazení chyb modelu
- Obr. 25 ArcScene
- Obr. 26 Mosaic Tool
- Obr. 27 ArcScene
- Obr. 28 Voxler
- Obr. 29 Porovnání dvou 3D modelů
- Obr. 30 Drátěný model lokality Štěpánov (podzim 2011) [m]
- Obr. 31 Drátěný model lokality Štěpánov (jaro 2012) [m]
- Obr. 32 Porovnání stavu břehové nátrže v lokalitě Štěpánov na podzim 2011 a na jaře 2012 [m]
- Obr. 33 Náhled na 3D model lokality Štěpánov (podzim 2011)
- Obr. 34 Náhled na 3D model lokality Štěpánov (jaro 2012)
- Obr. 35 Porovnání stavu břehové nátrže v lokalitě Štěpánov vyjádřené vedle sebe umístěnými 3D modely, doplněné vrstvou absolutních hodnot posunu stěny břehové nátrže
- Obr. 36 Drátěný model lokality Moravičany (podzim 2011) [m]



- Obr. 37 Drátěný model lokality Moravičany (podzim 2011) [m]  
Obr. 38 Náhled na 3D model lokality Moravičany (podzim 2011)  
Obr. 39 Drátěný model lokality Mohelnice (podzim 2011) [m]  
Obr. 40 Náhled na 3D model lokality Mohelnice (podzim 2011)

## **SEZNAM TABULEK**

- Tab. 1 Základní parametry kamery  
Tab. 2 - 6 Strategie pro extrakci 3D bodů ze stereodvojic  
Tab. 7 Parametry kalibrace kamery  
Tab. 8 Parametry metody kriging  
Tab. 9 Specifika pořízení a zpracování dat v jednotlivých lokalitách

## SUMMARY

The Litovelske Pomoravi protected area is situated along the Morava river, between Mohelnice and Olomouc cities. It is a very special place not only because of the presence of many rare species, but because of the geomorphology as well. The Morava river creates many meanders and interesting features along itself, which makes the surrounding nature unique. Some parts of the river banks are very unstable so they change every year. And this is why this diploma thesis has been developed – to prove, that the lateral water erosion makes the river benches of the meanders change their appearance very quickly.

The aim of the master thesis is (i) to assess the possibilities of stereophotogrammetrical methods used in geomorphology and (ii) to create a set of 3D models. It focuses on particular river Morava banks, which are in some parts quite unstable because of ongoing lateral river erosion.

The theoretical part of the thesis lead to the specification of the types of geomorphological tasks, which can be processed using stereophotogrammetrical methods and to the assessment of the task precision. It has been also said, that there are different approaches and different software packages to work on the stereoimages. The most important finding of this chapter was the assessment of the LPS strategies used for the 3D points extraction and setting the most suitable ones for the processing of the studied geomorphological objects.

The practical part included, firstly, the choice of the particular meanders used for the observation (Štěpánov, Mohelnice, Moravičany). Secondly, the geodetical measurements around the river benches were accomplished, using the dual GPS device Topcon Legacy E with LegAnt antenna to get the coordinates of the reference points. Ground control points coordinates were collected using Pentax V227N or Geofennel FET-405K device. Then, a set of stereopictures was created using a non-metric camera Canon EOS 500D. In order to do a good stereophotogrammetry, one had to adjust the camera positions into one height and make the imaging directions be parallel. The stereopairs were then used for the extraction of the 3D points, which was done in an Automatic Terrain Extraction tool in LPS (Leica Photogrammetry Suite). This was very important part of the processing, because setting the right point extraction strategy influenced the result very much. After collecting and examining the points, the process of kriging interpolation could begin in order to create precise digital terrain models. Final models were presented in GRID raster model and in lattice using Voxler software and ArcScene.

All selected meanders were turned into 3D models at least once. The meander in Štěpánov has been processed twice, in autumn 2011 and in spring 2012, so its shape could be easily compared. Finally it was found out, that the meander changed its borders up to 4 meters, depending on its part. The precision of the results is said to be around 20 cm – due to the geodetical measurements, triangulation and interpolation methods.

Meanders near Moravičany and Mohelnice were observed just once, so it is not possible to determine the change of mass during the winter time.

There are many possibilities how to develop the research in the future – to continue observing the meanders, to use different geodetical methods or to study the changing meanders in a context with the surrounded protected natural area.

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

## **Vázané přílohy:**

Příloha 1      Rozmístění referenčních bodů v lokalitách

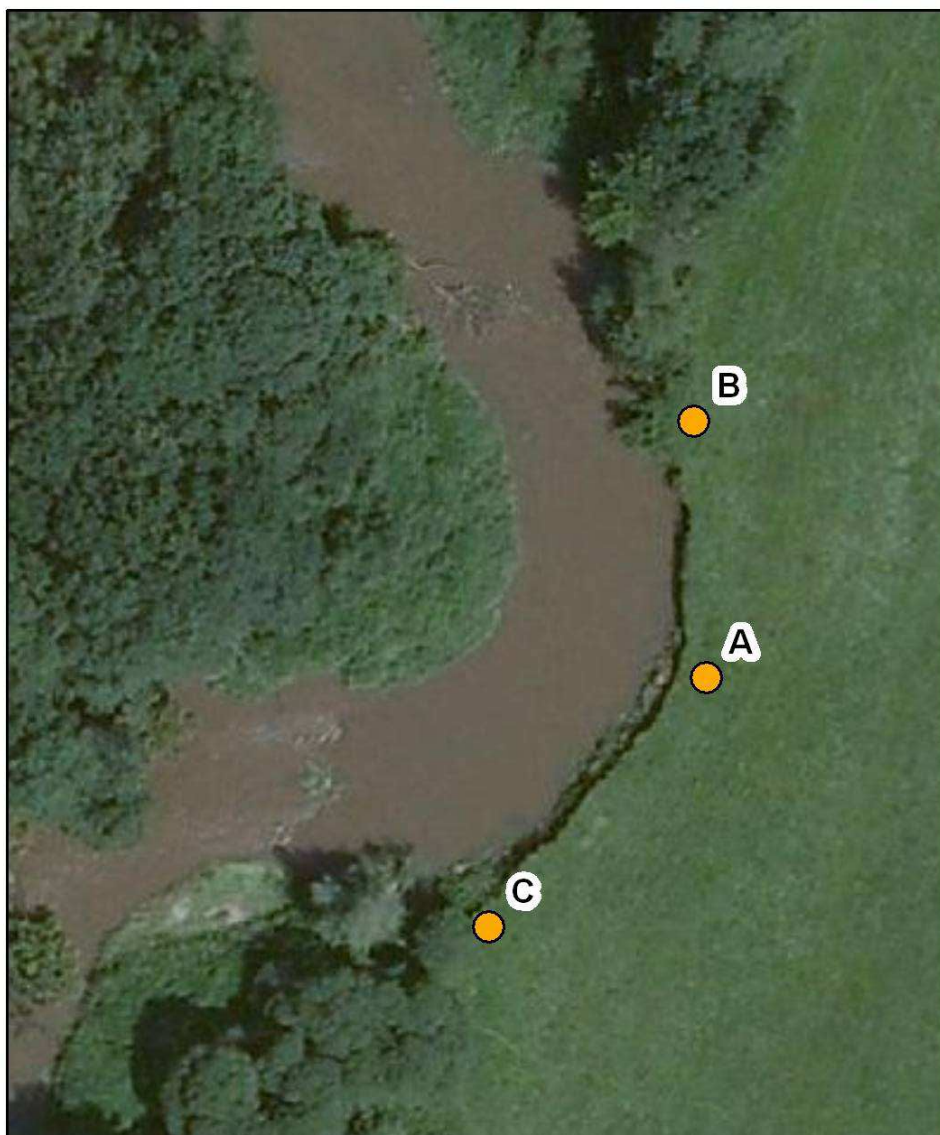
## **Volné přílohy**

Příloha 2      DVD

## Příloha 1

### Rozmístění referenčních bodů v lokalitách

#### ROZMÍSTĚNÍ REFERENČNÍCH BODŮ v lokalitě Štěpánov



0 5 10 m

● referenční body

	X	Y	Z
A	-1113419,55	-550203,70	221,11
B	-1113392,50	-550205,01	221,38
C	-1113445,84	-550226,65	221,38

**ROZMÍSTĚNÍ REFERENČNÍCH BODŮ**  
v lokalitě Moheřnice



0 5 10 m ● referenční body

	X	Y	Z
A	1099071,93	565525,22	248,46
B	1099082,52	565523,32	248,76
C	1099070,24	565532,20	248,81

**ROZMÍSTĚNÍ REFERENČNÍCH BODŮ**  
v lokalitě Moravičany



0 5 10 m ● referenční body

	X	Y	Z
A	-1101138,27	-565157,31	246,46
B	-1101116,77	-565159,74	246,33