

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

**Ekologie a ochrana prostředí
Ochrana životního prostředí**



Bakalářská práce

Fotogrammetrické zpracování leteckých snímků horského terénu za účelem vytvoření digitálního modelu terénu

Fotogrammetric analyses of aerial pictures of mountain landscape and generation of DEM

Marie Hynštová

Vedoucí práce: doc. RNDr. Evžen Stuchlík, CSc.

Praha, Srpen 2012

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana docenta RNDr. Evžena Stuchlíka, CSc. Použité zdroje informací a literaturu, z které jsem čerpala, jsem uvedla v seznamu zdrojů. Předkládaná tištěná verze se shoduje s verzí vloženou do Studijního informačního systému.

V Praze, dne

Poděkování:

Především bych chtěla poděkovat panu Ing. Jaroslavu Řeřichovi za seznámení se s fotogrammetrií, vysvětlení práce v použitém programu, za cenné rady během všech fází tvorby digitálního modelu terénu a velmi si vážím jeho času, který mi mohl v průběhu nácviku metody i tvoření výstupů práce věnovat. Rovněž děkuji svému školiteli panu doc. RNDr. Evženu Stuchlíkovi, CSc. za jeho názory a rady při sepisování tohoto textu bakalářské práce a za samotnou možnost zpracovávat v rámci bakalářského projektu pro mne takto zajímavé téma. Za ochotu a vstřícnost při využívání Laboratoře GIS v budově ÚŽP děkuji panu Ing. Luboši Matějčíkovi, Ph.D.

Abstrakt

V této bakalářské práci je přiblížena použitá stereofotogrammetrická metoda pro digitalizování výškových informací o modelovaném území a stručně uvedeno využití vytvořeného digitálního modelu terénu (výškového). Podstatnou část práce představuje metodický postup tvorby digitálního výškového modelu (DEM), od stereofotogrammetrického vyhodnocení terénu z leteckých snímků, přes kontrolní postup vyhodnocování, vytvoření DEM a závěrečnou korekci modelu. Proces tvorby modelu byl zpracováván v programu Erdas Imagine 8.6. Výsledkem práce je popsán a vyzkoušený metodický postup tvorby DEM horského terénu vybraného území povodí vysokohorských jezer ve Vysokých Tatrách. Přílohou je i vytvořený rastrový DEM s rozlišením 1 x 1 m.

Klíčová slova: horská jezera a povodí, fotogrammetrie, letecké snímky, digitální model terénu

Abstract

This thesis describes the stereo photogrammetric method used for digitalization of terrain elevation data of choosen area and the applications of digital elevation model (DEM). The main part of the thesis consists of DEM generation methodology, including stereo photogrammetric evaluation of aerial pictures, quality control of evaluating process, DEM creation and revision. DEM was created in software Edras Imagine 8.6. The thesis results in detailed description of DEM creation in the high mountain terrain selected in the High Tatra Mountains. Grid DEM of cell size 1 x 1 meter is attached.

Key words: mountain lakes and catchments, photogrammetry, aerial pictures, DEM

Obsah:

1. Seznam uvedených zkratek	5
2. Úvod	6
3. Metodika.....	10
3.1 Charakteristika oblasti	10
3.2 Použité programy (software)	10
3.3 Použité vybavení (hardware).....	11
3.4 Zdroj dat	11
3.5 Nástroje k měření výškopisu v programu Erdas Imagine.....	12
3.5.1 Stereo Analyst.....	12
3.5.2 Interpolační metody	14
4. Výsledky.....	16
4.1 Metodický postup	16
4.1.1 Stereofotogrammetrické vyhodnocení.....	16
4.1.2 Kontrolní postup	18
4.1.3 Zálohování projektu.....	20
4.1.4 Vytvoření DEM	20
4.1.5 Konečná úprava DEM	21
4.2 Výstupy práce	25
5. Diskuse	27
6. Závěr.....	30
7. Seznam literatury.....	31
8. Seznam obrázků	34
9. Seznam příloh.....	34

1. Seznam uvedených zkratek

AOI – Oblast zájmu (Area of interest)

DEM – Digitální výškový model (Digital elevation model)

GIS – Geografický informační systém (Geographic information systém)

GPS – Global Positioning System

LPS – Leica Photogrammetry System

TIN – Nepravidelná trojúhelníková síť (Triangulated irregular network)

UTM – Universální transverzální Mercatorův systém souřadnic

VGHÚř – Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad

VTOPÚ – Vojenský topografický ústav

WGS 84 – Světový geodetický referenční systém 1984 (World Geodetic System 1984)

2. Úvod

Digitální model terénu znázorňuje zemský povrch číselně v digitální podobě a umožňuje tak matematické výpočty pro jeho analýzy provádět počítačovými programy, které ve výsledku tyto postupy usnadňují a zrychlují. Přiřazením správných nadmořských výšek bodům zemského povrchu, kterým náležejí, vzniká digitální výškový model (DEM - Digital elevation model), (Oršulák a Pacina, 2010), jehož tvorbou se právě zabývá tato bakalářská práce.

Díky znalosti výškového průběhu povrchu zájmového území je možné z modelu primárně odečíst sklon svahu terénu, jeho orientaci vůči světovým stranám (tzv. aspekt), nadmořskou výšku, vertikální a horizontální zakřivení reliéfu. Pro hydrologické analýzy je klíčové určení přesných hranic povodí, směr odtoku srážek, plochy povodí (Callow a kol., 2007), dále dobu zdržení srážek, průtok vody povodím, typ pokryvu povrchu, náchylnost k erozi, zakřivení svahů, zastínění horizontem a jiná další geomorfologická či biologická využití mohou mít informace, které digitální výškový model poskytuje (MOORE, 1991). Na základě DEM také probíhá ortorektifikace snímků (Imagine OrthoBase User's Guide, 2002), (Welch a Jordan, 1996). Model poslouží jako nástroj pro analýzy prováděné v projektu CLIMHEAD Grantové agentury ČR č. SP 526/09/0567 - Integrovaný vliv změn klimatu, kvality ovzduší a lesnického hospodaření na vodní ekosystémy v pramenných povodích.

Náplní práce je vytvoření DEM horského terénu, který představovalo vybrané území ve Vysokých Tatrách na Slovensku. Jedná se o pramenná povodí s vysokohorským charakterem, tedy tvořené strmými a členitými skalnatými či suťovými úbočími hor. Takto relativně složitě strukturovaný reliéf nedovoluje použít pro tvorbu digitálního výškového modelu doposud automatizované postupy vyhodnocování průběhu zemského povrchu, ačkoliv to mnohé programy umožňují pro území s méně prostorově proměnlivým a komplikovaným terénem (například modul OrthoBase programu Erdas Imagine, LPS). Existující vytvořené digitální modely reliéfu buď necharakterizují tento členitý horský terén dostatečně podrobně, jako například digitální model reliéfu DMR20-SK_1 celého území Slovenské republiky s rozlišením rastru 20 x 20 m (Hronček a Košický, 2007), nebo jsou cenově nedostupné. Z těchto důvodů bylo potřebné navrhnout a prakticky vyzkoušet alternativní postup tvorby DEM takto členitého horského terénu.

2.1. Cíl práce

Jedním z cílů této bakalářské práce je vytvoření rastrového digitálního výškového modelu terénu povodí vybraných vysokohorských jezer. K tomu bylo potřebné se naučit ovládat program ERDAS Imagine, jeho moduly Stereo Analyst, Viewer, Interpreter, Virtual GIS. Stěžejní partie práce spočívá ve zvládnutí stereofotogrammetrického vyhodnocení leteckých snímků horského terénu s výškovým rozsahem přes 500 m a s přesností adekvátní pro použití modelu k limnologickým analýzám. Navržený stereofotogrammetrický postup získání výškových informací o povrchu zájmového území a postup vytvoření DEM je názorně popsán v kapitole Výsledky.

2.2. Stereofotogrammetrie

Pro tvorbu DEM jsem měla k dispozici letecké snímky Vysokých Tater (více v kapitole Metodika – Zdroj dat), které byly snímány pro následné zpracování stereofotogrammetrickou metodou za účelem získání výškopisných údajů o terénu. Stereofotogrammetrie je případ dvousnímkové fotogrammetrie¹, kdy je na základě uměle navozeného stereoskopického vjemu možné vyhodnotit prostorové souřadnice objektu zaznamenaného na obou snímcích (Böhm, 2002). Utvoření stereoskopického vjemu je přirozeně používaná schopnost zdravého lidského zraku (jako celkového smyslu) vnímat okolní prostor tak, že člověk dokáže rozeznat relativní vzdálenost okolních objektů a jejich vzájemnou polohu (Heron a Lages, 2012). Aby byly dva snímky schopné poskytovat umělý stereoskopický vjem, musí zobrazovat shodný objekt, překrývat se, a je třeba zajistit, aby každé oko vnímalo jen jeden snímek ze stereopáru.

První podmínka je splněna, když je objekt (zemský povrch) podruhé sejmuto objektivem s horizontálním posunem. V letecké stereofotogrammetrii se snímkování provádí při konstantní

¹ Fotogrammetrie je technologie a metoda k získávání informací o objektech (např. zemském povrchu), které mohou být změřené na základě fotografií. Fotogrammetrie zahrnuje proces pořízení snímku, měření ve snímku, interpretace naměřených výsledků z fotografie na reálný objekt (ISPRS, 1988 cit. v Li, 1988). Moderní digitální fotogrammetrii se vyhodnocují digitální či naskenované fotografie na počítačích ve fotogrammetrických programech, ve snaze automatizovat fotogrammetrické postupy (Leberl a Thurgood, 2005).

letové hladině a svislé ose záběru měřickými komorami tak, aby se v řadě po sobě vyfocené snímky překrývaly z cca 60 % a řady snímků vzájemně z cca 20 %, a tímto bylo pokryto celé mapované území (Oršulák a Pacina, 2010). (Chen a kol., 2007) uvádí závislost přesnosti DEM na sklonu terénu a velikosti úhlu, který svírají osy záběru při pořizování snímků: v rovinném terénu může být přínosné zvětšit úhel průsečíku os záběru, aby bylo docíleno přesnějších výsledků DEM, ale naopak v terénu s vyšší svažitostí povrchu přesnost klesá, natož když osy záběru snímků svírají velký úhel. Pořizovací osy záběru snímků jsou vedeny pokud možno vzájemně rovnoběžně. Měřické komory jsou fotografickými aparáty s objektivem složeným z několika čoček, kvůli eliminaci jeho optických vad a zkreslení, se známými prvky vnitřní orientace komory a jsou stabilizovaně uloženy na sběrném letuschopném zařízení. Prvky vnitřní orientace snímku (ohnisková vzdálenost, snímkové souřadnice hlavního bodu, snímkové souřadnice rámových značek) jsou vlastností měřické komory a upřesňují pozici bodů v rámci snímku (Heipke, 1997).

Správného překryvu se docílí zorientováním snímků pomocí vlíčovacích bodů zachycených na obou snímcích. Vlícovací body jsou místa s jedinečným charakterem v okolní krajině, nepohybující se, dobře na snímku rozpoznatelná a se známými geodetickými souřadnicemi. Metodou aerotriangulace jsou dopočítány další potřebné body k orientaci snímků do polohy při jaké byly pořizovány, tedy dodatečné určení prvků vnější orientace snímků, které by jinak nebyly známy kvůli leteckému způsobu snímání povrchu (Fiala, 2011). Prvky vnější orientace jsou pro každý pořízený snímek odlišné podle toho, jaké byly souřadnice objektivu měřické komory, a jaký je úhlový posun snímkových souřadnic vůči souřadnicím užívaným v modelu podle možných třech úhlů rotace (Šíma a Fiala, 2006). Možnost pořizování fotografií digitalizovanými komorami přináší zautomatizování, urychlení a zpřesnění orientace snímků na rozdíl od manuálně zadávaných prvků orientace (Heipke, 1997).

Fakt, že je bod zemského povrchu zabrán z dvou různých míst, a tedy z různých úhlů, znamená, že v rámci snímku má na každé fotografii rozdílné souřadnice. Tento rozdíl ve snímkových souřadnicích zobrazovaného bodu se nazývá paralaxa, a je zásadní pro vytvoření umělého stereoskopického vjemu. Horizontální rozdíl souřadnic bodu (podle osy X), neboli horizontální paralaxa, umožňuje právě zraku vnímat i třetí rozměr umístění tohoto bodu. To znamená jeho relativní vzdálenost vůči okolí tak, jako přirozený stereoskopický vjem zabezpečuje nenulová šířka základny dvou lidských očí a správné spojení obrazů v mozku. Pozitivní paralaxa způsobuje konvergenci očí až za rovinou displeje, proto se objekt jeví

vzdálenější, negativní paralaxa naopak konverguje oči už před rovinou displeje a objekt vystupuje nad rovinu displeje, s nulovou paralaxou je objekt viděn v této rovině (Čížek, 2005). Naopak lidský mozek nedokáže stereoskopicky vyhodnotit obrazy dopadající na sítnice očí, pokud je mezi nimi vertikální posun, tedy vertikální paralaxa ve směru osy Y. Proto je při sestavování stereopárů nutné se vzniku této vertikální paralaxy vyvarovat (Nečasová, 2007), (Švec, 2009).

Aby se pozorováním stereoskopické dvojice snímků navodil stereoskopický vjem, jako je tomu při běžném binokulárním vidění, je nutné obdobně zajistit, aby každé oko vidělo jen jemu určený snímek. To znamená pravé oko snímek více vpravo ve směru osy X a levé oko levý snímek. Nejjednodušší a nejlevnější na pořízení i provoz je anaglyfická metoda, ačkoliv neumožňuje vidět skutečné barvy snímku. Oba snímky (stereopár) se zobrazují současně na jednu plochu, pravý snímek je zabarven barvou shodnou k barvě pravého skla anaglyfických brýlí a levý snímek barvou levého skla brýlí. Nejčastější komplementární barevné kombinace jsou červená a azurová (modrá+zelená) či zelená a fialová (červená+modrá), (Pastoor a Wöpking, 1997). Takto je každému oku zobrazen jen jemu odpovídající snímek stereopáru a viděné obrazy se spojí až v mozku, stejně jako při běžném pozorování objektů s fyziologickou paralaxou oběma očima. Další možnosti utvoření stereovjemu jsou nákladnější, ale zato poskytují kvalitnější obraz s jeho pravými, nezměněnými barvami. Metoda pasivních brýlí spočívá v promítání jednoho snímku stereopáru s horizontální polarizací a druhého snímku s vertikální polarizací na projekční plochu (displej), a úlohou pasivních brýlí se skly s filtry odpovídající horizontální a vertikální polarizaci promítaných snímků je propustit k oku jen paprsky pravého snímku do pravého oka a levého snímku do levého oka. Při použití aktivních brýlí jsou snímky náležející pravému a levému oku promítány jednotlivě po sobě, ale skla brýlí s tekutými krystaly střídavě propouští a nepropouští paprsky snímku, který pro dané oko je a není určený. To znamená, že ve stejný okamžik je například dovoleno vidět obraz pravého snímku pravému oku, zatímco levé oko nevidí nic. Rychlým (dvojnásobně) střídáním snímků pro pravé a levé oko, synchronizovaným s aktivitou brýlí, je docíleno spojení obrazů v mozku do jednoho prostorového (Švec, 2009).

K účelu stereofotogrammetrického vyhodnocení leteckých snímků v této práci byla použita metoda anaglyfu.

3. Metodika

V této kapitole je uvedena charakteristika modelované oblasti, používané vybavení a programy, dále co bylo zdrojem dat a nástroje programu Erdas Imagine 8.6, využívané při fázích vytváření digitálního výškového modelu.

3.1 Charakteristika oblasti

Modelovaná povodí se nalézají ve východní části pohoří Vysokých Tater, ve vrchní partii Velké Studené doliny. Modelované území je vymezeno souřadnicemi $49^{\circ} 10' 58''$ - $49^{\circ} 10' 25''$ s. š. a $20^{\circ} 08' 38''$ - $20^{\circ} 10' 25''$ v. d. Jedná se o povodí Ladového plesa (2057 m n. m.), Pustého plesa (2055 m n. m.), Zbojnických ples (1969-1972 m n. m.), Starolesnianského plesa (1986 m n. m.) a Dlhého plesa (1898 m n. m.). Nejvýše položeným místem tohoto území je štít Bradavica (2476 m n. m.). Údolí s jezery je orientováno na jihovýchod, ze severovýchodu je obklopeno strmým skalnatým úbočím Javorového štítu a Svišťového štítu ze severozápadu, pokračují vysoké štíty Divá veža, Východná Vysoká, Kupola, Bradavica, Západná a Východná Slavkovská veža k jihozápadu (Mapa Vysokých Tatier SK-PL, Marco Polo). Okolí jezer tvoří kamenné horské louky, na zvedajících se úbočích strmých hřebenů je častý výskyt suťových kuželů a nad nimi skalnaté rýhované svahy.

3.2 Použité programy (software)

ERDAS IMAGINE 8.6 od společnosti Leica Geosystems:

Modul Stereo Analyst pro stereofotogrammetrické vyhodnocení stereodvojice snímků.

Modul Interpreter k vytvoření DEM z vektorových dat získaných stereofotogrammetrií a vygenerování vrstevnic z modelu.

Modul Virtual GIS k prohlížení 3D modelu.

Modul Viewer jako univerzální prohlížeč vyhodnocených vektorových dat, vrstevnic, plošného rastrového zobrazení modelu, dále jako nástroj k úpravě modelu a opravě zjevných chyb při konstrukci a genezi rastru.

Quantum GIS Desktop 1.8.0 ke zpětné extrakci vrstevnic z opravovaného rastrového modelu.

3.3 Použité vybavení (hardware)

Notebook HP Compaq nc6400, procesor Intel® Core™ 2 T5600, 1,83 GHz, RAM 0,99 GB

LCD monitor Sony, 46", rozlišení 1280 x 768, obnovovací frekvence 60 Hz

Anaglyfické brýle PRIME Magneta - Green

Pro zaškolení a průběžné konzultace se školitelem a specialistou bylo využito Laboratoře GIS ÚŽP PřF UK vedenou ing. Matějíčkem.

3.4 Zdroj dat²

Nosné informace pro vytvoření DEM představovaly skenované armádní letecké fotografické snímky (1200 dpi), pořízené v roce 1986 v letové výšce 4300 m n. m., v přibližném měřítku 1: 24 000, zakoupené od Topografického ústavu v Banské Bystrici. Údaje o fotografických komorách byly získány ve VTOPÚ v Dobrušce (nyní VGHÚř v Dobrušce). Další, neméně důležitá data pro správnou orientaci stereodvojic digitální aerotriangulací (určení prvků vnější orientace) a jejich georeferencování poskytly velmi přesné souřadnice vlíčovacích bodů přímo zaměřené systémem GPS v několika etapách v letech 2000 - 2002. Souřadnice vlíčovacích bodů zaměřoval doc. RNDr. Evžen Stuchlík, CSc. a RNDr. Jakub Horecký, PhD. s využitím profesionálních zařízení od firmy Trimble. Většina měření byla provedena pomocí tzv. Carrier face mode metodou dvou velmi přesných přístrojů vzdálených do 20 km. Zpracování databáze vlíčovacích bodů z jednotlivých měření a jejich vložení do snímků provedla ve spolupráci s doc. Stuchlíkem Mgr. Jana Konrádová v rámci své doktorské práce (studium přerušeno).

Stereopár zobrazující modelované povodí jsem získala ke stereofotogrammetrickému vyhodnocení již připravený. Tato příprava probíhala v rámci kompletního zpracování všech 55 leteckých snímků Tater do stereopárů v modulu Erdas Imagine OrthoBase, prováděl ji zkušený fotogrammetr Ing. Jaroslav Řeřicha a spočívala v přípravě tzv. snímkového bloku, zaměření rámových značek a vlíčovacích bodů ve všech snímcích a určení prvků absolutní orientace všech snímků pomocí výpočtu analytické aerotriangulace. Příprava probíhala v modulu OrthoBase programu Erdas Imagine. Kroky přípravy konkrétněji byly: přiřazení metrických vlastností snímkům (rozměry v metrech, úhly v šedesátinných stupních, geografická projekce pravoúhlého

² Informace v této podkapitole poskytli doc. RNDr. Evžen Stuchlík, CSc. a Ing. Jaroslav Řeřicha k faktickému doplnění práce.

souřadnicového systému UTM/WGS 84 (zóna 34 severní polokoule); dále konfigurace prvků vnitřní orientace a zavedení vnitřního souřadnicového systému na základě graficky určených rámových značek snímků; zaměření snímkových souřadnic vřícovacích bodů se známými geodetickými souřadnicemi; zahuštění sítě vřícovacích bodů spojovacími body identifikovatelnými na co největším počtu snímků; dopočítání prvků absolutní (vnější) orientace snímků při analytické aerotriangulaci. Vytvořený projektový soubor se seřazenými stereopáry, v programu nazýván „Stereo Model“, nese příponu *.blk*.

3.5 Nástroje k měření výškopisu v programu Erdas Imagine

3.5.1 Stereo Analyst

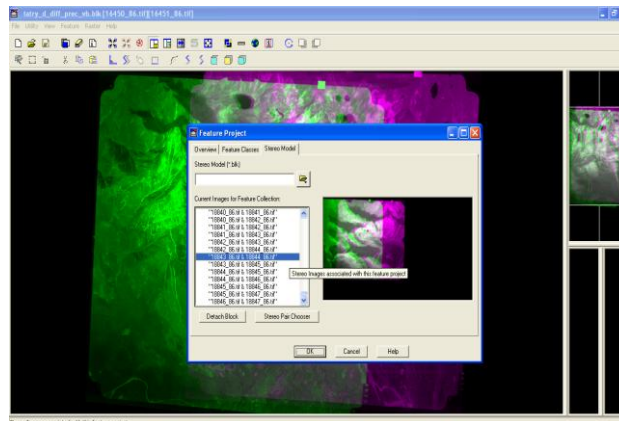
K získání výškopisných informací o průběhu modelovaného terénu stereofotogrammetrickou metodou slouží nástroje modulu Stereo Analyst. Umožňuje prohlížet stereodvojice snímků modelovaného území a digitálně zaznamenávat X , Y a H souřadnice povrchu na základě vizuálně-manuálního vyhodnocení. Před započítáním samotného vyhodnocování snímků je potřeba založit nový projekt v modulu Stereo Analyst. Projektem se rozumí rámcová složka, do které se budou následně ukládat soubory nesoucí data o vyhodnocených prvcích na základě nahaného stereo modelu (soubor IMAGINE OrthoBase Block File **.blk*). Program nabízí dvě varianty založení projektu: zvolení přímo New - Stereo Analyst Feature Project, po otevření okna s názvem Feature Project na kartě Stereo Model otevřít soubor s orientovanými snímky, ale ve skutečnosti lze touto cestou vkládat jen orientované stereopáry s příponou **.stp*. Z tohoto důvodu je nutné pro použití Block File **.blk* souboru tento nejdříve samostatně otevřít, teprve poté podle výše popsané cesty začít vytvářet nový projekt Stereo Analystu. Kromě zadání umístění a názvu na kartě Overview, je možné, a na úplném počátku vyhodnocování žádoucí, definovat na kartě Feature Classes jaké třídy prvků budou o objektech na snímku sbírány. Rozdělení digitalizovaných prvků do tříd má také význam při generování DEM. Otevřený stereo model je již načtený (Obr. 1), a lze z něj vybírat stereopáry k zobrazení (Obr. 2).

V menu Utility – Stereo Analyst Option se nastavují možnosti vzhledu a funkcí modulu, především je důležité navolení kurzoru udržujícího při horizontálním pohybu konstantní výšku (kategorie Cursor Height Adjustment) a zvolení barevnosti pravého a levého snímku podle barev skel anaglyfických brýlí (kategorie Stereo Mode).

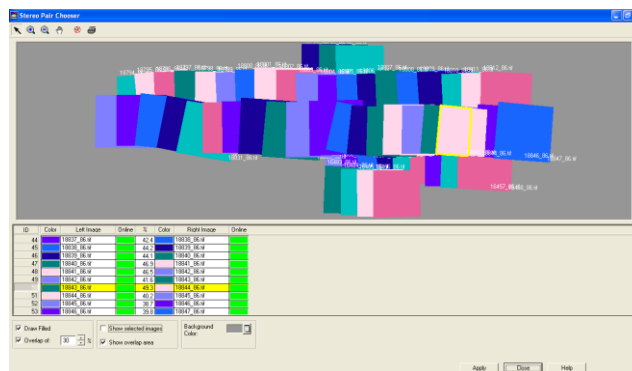
Pozorováním stereodvojice snímků skrze anaglyfické brýle vznikne stereoskopický vjem, objekty zobrazované s větší pozitivní horizontální paralaxou se zdají být vzdálenější/hluběji než objekty s paralaxou menší, naopak větší negativní horizontální paralaxa objekty posouvá blíže/výše. Velikost horizontální paralaxy lze v průběhu vyhodnocování změnit podle potřeby pohybem myši za současného stisknutí klávesy *x*. Pohyb myši směrem doleva snímky na sebe nasouvá, pohybem myši doprava se snímky rozbíhají.

Nejdůležitějším nástrojem k vyhodnocení výškového průběhu a tvaru terénu je pohyblivý kurzor ovládaný myší. Samozřejmý je jeho pohyb ve směru os *X* a *Y* (vzhledem k terénu horizontálně, na jedné výškové hladině). Nastavitelná je ale i jeho hloubka/výška v prostoru, ve směru osy *H*, to znamená vertikálně vzhledem k terénu. Tento posun se provádí buď rolováním středního kolečka myši, nebo pohybem myši dopředu či zpět za současného stisknutí klávesy *c*. Vnímání kurzoru v třídimenzionálním prostoru je opět způsobeno horizontální paralaxou mezi zobrazeným kurzorem na pravém a levém snímku. Při předozadním pohybu (z pohledu pozorovatele před displejem) se opět mění její velikost: zvětšení pozitivní paralaxy se projeví jako oddálení (prohloubení) kurzoru v prostoru, s nulovou paralaxou se kurzor nachází na úrovni displeje, zvětšením negativní paralaxy vystoupí nad rovinu displeje. Kurzor v georeferencovaném stereopáru podle vřícovacích bodů do pravoúhlého souřadnicového systému nese informace o poloze bodu, v němž se nachází. Udávají se na dolní liště Stereo Analystu vlevo společně s měřítkem zobrazení snímků. Nastavením kurzoru tak, že se dotýká povrchu, jsou určeny jeho souřadnice *X*, *Y*, *H* v tomto bodě. Získáním souřadnic o dostatečném množství bodů je základem pro stvoření digitálního výškového modelu. Vzhledem k tomu, že není prakticky možné, a ani výrazně účelné, vyhodnotit všechny body povrchu, zjednoduší se získávání souřadnic pomocí izolinií a linií zaznamenávajících výraznou změnu průběhu terénu. Použitím lineárního záznamu povrchu (konturami vyhodnocovaných tříd prvků) se zvýší počet vyhodnocených bodů, aniž by bylo potřeba se jimi zabývat jednotlivě.

Linie a jejich zálohy se ukládají ve formátu Shapefile **.shp* do složky projektu. Zobrazení v projektu však zajišťuje celkem šest souborů s příponami **.shp*, **.dbf*, **.fcl*, **.prj*, **.shp.lst*, **.shx*.



Obr. 1 Projekt Stereo Analystu s nahráním stereo modelem. Zakládáním nového projektu v načteném souboru *.blk se na kartě Stereo Model zobrazí seřazené stereopáry.



Obr. 2 Výběr stereopáru. Na kartě Stereo Model, v ikoně Stereo Pair Chooser, lze přehledně vybrat, na kterém stereopáru bude vyhodnocování probíhat.

3.5.2 Interpolační metody

Exportováním stereofotogrammetricky vyhodnocených výškopisných dat ve formátu shapefile (popis exportu v kapitole Výsledky – Sestrojení DEM) získáme cenný popis prostorového tvaru terénu prostřednictvím výškopisných kontur. Výškopisné informace jsou však reprezentovány jen těmito geometrickými útvary a je potřebné tato zdrojová data rozšířit na spojitou plochu reprezentující tvar terénu v každém jeho bodě. V prostředí programu ERDAS IMAGINE tuto funkci zajišťuje modul Interpreter.

Možnostmi získání neznámých výškových souřadnic jsou metody lineární či nelineární interpolace výpočtu TIN (triangulated irregular network). Výběr metody interpolace má vliv na

výslednou kvalitu DEM (Heritage a kol., 2009). Lineární interpolace je nejjednodušším způsobem, jak vypočítat neznámé H souřadnice, je relativně rychlejší, ale model je ve výsledku sestaven z rovinných trojúhelníkových ploch, a terén nemá přirozený charakter (Yue a kol., 2007). Nelineární interpolace provádí dopočet podle polynomu pátého řádu, výpočet touto metodou trvá déle, než při výpočtu lineární interpolací, ale za to terén má přirozenější, plynulejší charakter (ERDAS IMAGINE 8.6 Tour Guides, 2002). S další interpolační metodou, která slouží k odstranění vad na modelu vzniklých souhrou nepřesného zaznamenání výškových souřadnic a interpolační metody, se pracuje v modulu Viewer. V nástrojích rastru jsou dva způsoby, jak interpolovat vybranou oblast zájmu. Buď je možné si zvolit ikonou „Local Surface Interpolation“ metodu interpolační techniky, popřípadě řád polynomu, anebo ikonou Immediate Surface Interpolation zvolit okamžitou interpolaci, která k výpočtu používá souřadnice všech okolních vyrovnávacích bodů podle funkce polynomu druhého řádu (On-line nápověda programu ERDAS IMAGINE pro Rastr - Nástroje).

4. Výsledky

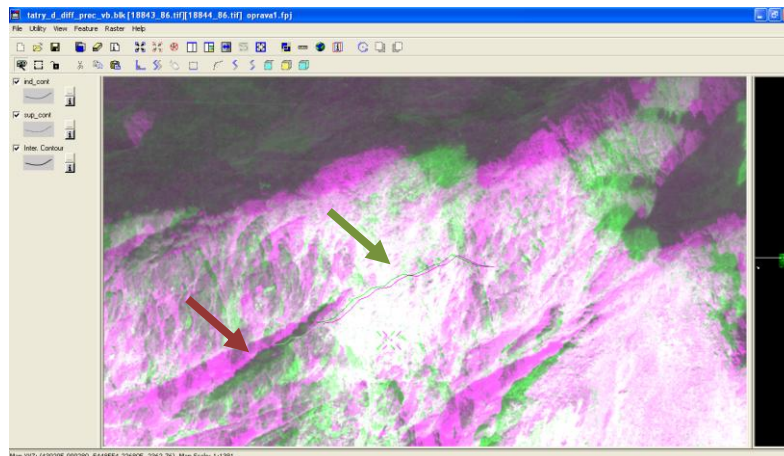
Výsledkem této bakalářské práce jsou nejen výstupy samotného modelování v podobě rastrového digitálního výškového modelu a vektorové vrstvy vrstevnic, ale rovněž popis metodického postupu tvorby modelu. Metodický postup obsahuje mé vlastní zkušenosti s jednotlivými fázemi tvorby modelu, kterými byly stereofotogrammetrické vyhodnocení, sestavení DEM a konečná úprava DEM.

4.1 Metodický postup


4.1.1 Stereofotogrammetrické vyhodnocení

Pro potřeby zaznamenání výškopisných údajů o terénu jsem vybrala třídy vyhodnocovaných prvků `Ind_cont` (Index Contour) pro vykreslování vrstevnic, `Inter_cont` (Intermediate Contour) k zaznamenání lomových hran a `Sup_cont` (Supplementary Contour) k označení jezer. Vrstevnicovými konturami jsou zakresleny množiny bodů se stejnou nadmořskou výškou, odpovídají tedy vrstevnicím, ale nejsou uzavřeny. Lomové hrany sdružují body v místech, kde se povrch ostře láme, jako jsou hrany, rýhy, vrcholy hřebenů a štítů, a tyto jsem zaznamenávala konturami s proměnlivou výškou.

„Vrstevnice“ jsou zaznamenávány jako `ind_cont`. Vyhodnocení spočívalo v zaznamenávání tvaru terénu konturou v místech, kde se při konstantní nastavené výšce střed kurzoru dotýkal povrchu. Zakřivení linie se vytvoří jednoduše klikem myši, pro plynulejší zaoblení je třeba udělat více kliků po sobě, aby křivka těsně obepínala terén, dvojklikem se tvorba linie ukončí. Kontury jsem nanášela ve vzdálenosti přibližně pěti výškových metrů. Lomové hrany jsou vyhodnocené pod třídou `inter_cont`. Sledují hranu nebo rýhu ve všech třech dimenzích. Názorně jsou vyobrazeny na Obrázku č. 3. Konturami poslední používané třídy vyhodnocovaných prvků `sup_cont` jsou vymezené hladiny jezer. Opět udržují konstantní výšku, ale jejich vyhodnocení je potřeba udělat zvlášť, protože se jim bude přiřazovat jiná úloha při výpočtu modelu než vrstevnicovým konturám (více ve Vytvoření DEM).



Obr. 3 Vyhodnocení lomové hrany a linie bodů se stejnou nadmořskou výškou. Lomová hrana vyhodnocená konturou třídy `inter_cont` je označena červenou šipkou, vrstevnicová kontura třídy `ind_cont` je označena zelenou šipkou.

Linie je možné dodatečně upravovat, aktivováním ikony . Při jejím použití je třeba věnovat pozornost označování bodu, aby se kurzor nacházel na stejné výškové úrovni, protože označený bod převezme ihned výškovou pozici podle kurzoru a mohlo by dojít k chybě přehlédnutím této nechtěné změny, nebo je úprava do správné pozice náročnější. Ve výsledku bylo mnohdy výhodnější konturu, která ne zcela přesně popisovala terén, vymazat a nanést znovu. Z tohoto důvodu bylo praktičtější nedělat linie příliš dlouhé, hlavně v místech s obzvláště členitým terénem, kde by mohlo dojít snáze k chybě ve vyhodnocení.

Můj postup při vyhodnocování byl takový, že jsem si nejdříve vymezila hladiny jezer s aktivní ikonou `sup_cont`, poté konturou lomových hran `inter_cont` vymezila hrany hřebenů a štítů ohraničující povodí jezer a hranici modelovaného území. Vrstevnicovými a lomovými konturami jsem vykreslila pánve v okolí jezer. Svahy jsem zakreslovala směrem shora dolů, nejdříve vymezila ostré zlomy ve svahu, výstupky a rýhy konturami `inter_cont` a následně dokreslila vrstevnicovými konturami `ind_cont` povrch mezi nimi. V problémových oblastech (o nich pojednáno v kapitole Diskuse) bylo užitečné vypnout zobrazování momentálně nezakreslovaných kontur, aby nerušily stereoskopický vjem.

Sestupováním při vyhodnocování směrem dolů (hlouběji) se stávala nastavená horizontální paralaxa nepohodlná pro zrak a bylo nutné ji průběžně upravovat. V horském terénu je třeba měnit horizontální paralaxu neustále, v závislosti na nadmořské výšce aktuálně

vyhodnocované oblasti, tak aby bylo pozorování obrazu v rámci možností optimální pro utváření správného stereoskopického vjemu. V údolní pánvi povodí je možné vyhodnocovat relativně velké území bez změny paralaxy, avšak na strmých úbočích je třeba měnit paralaxu zhruba po 30 výškových metrech. Jako nejideálnější způsob navození stereoskopického vjemu bylo zobrazovat úsek pod místem budoucího vyhodnocování s nulovou paralaxou na úrovni displeje a terén nad vyhodnocovaným místem s mírnou negativní paralaxou směrem nahoru. K vystižení dostatečných detailů terénu není použito měřítko menší než 1:1000, ale výrazně větší měřítko neposkytuje plnohodnotný stereoskopický vjem a je velmi obtížné získat představu o tvaru terénu.

Důležitým postupem bylo, aby se při vykreslování terénu kontury vrstevnic a lomových hran nekřížily. Při sestrojování modelu by mohly vznikat nepravděpodobné útvary kvůli drobným nesrovnalostem v H souřadnici, které by byly zahrnuty do výpočtu rastru modelu. Nežádoucí tvary neodpovídající realitě se dají v modelu dodatečně opravit například interpolací podle okolních bodů (viz Konečná úprava DEM), ale této práci navíc se lze vyhnout už při vyhodnocování právě nekřížením linií.

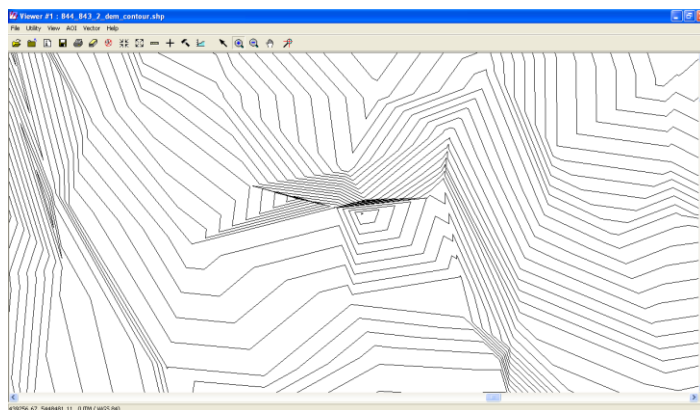
4.1.2 Kontrolní postup

Během vyhodnocování je třeba provádět průběžnou kontrolu zakreslených kontur. Na základě již vyhodnocených informací o terénu se vytvoří DEM včetně zpětně vygenerovaných vrstevnic. Zpětným nahráním vygenerovaných vrstevnic do projektu se zkontroluje kvalita a správnost dosud provedeno vyhodnocení výškopisných dat. Export dat probíhá v menu Feature – Export Features, do otevřeného okna se zadává typ dat (Shapefile) a cílová složka, do které se soubory s exportovanými daty uloží. Je vhodné si pro přehlednost předem vytvořit ve složce projektu složku další právě pro tyto exporty, aby se nezaměňovali soubory patřící do projektu a exportované. Model lze totiž vytvořit pouze na základě vyexportovaných shapefile souborů. Při zadávání dat a parametrů pro výpočet DEM jsem volila i možnost vygenerovat vrstevnice podle DEM, které se ukládají rovněž ve formátu shapefile (popis postupu ve Vytvoření DEM).

Výsledek dosavadní práce je možné kontrolovat vytvořeným DEM v prohlížeči VirtualGIS Viewer modulu VirtualGIS, importem vrstevnic do projektu Stereo Analystu a nebo prostým rovinným zobrazením vrstevnic v modulu Viewer. Zpětný import vrstevnic do projektu

se provádí v menu Feature – Import Feature, v otevřeném okně se zadává typ importovaných dat jako shapefile a vybírá soubor nesoucí informace o vrstevnicích. Vytvoří se pro ně nová třída prvků (Feature Class), jejíž vlastnosti se nastaví v automaticky otevřeném okně Edit Class Properties, zejména barva pro vrstevnice na kartě Display Properties. Volba barvy je zásadní pro přehlednost ve stereopáru, kde jsou zároveň vykreslené kontury. Je třeba zvolit takovou barvu, aby byla vidět skrze pravé i levé sklo anaglyfických brýlí a zároveň rozdíl ve viděných barvách byl co nejmenší. Během práce se osvědčenou barvou používanou pro vrstevnice stala tmavě zelená (DarkGreen), která je dobře vidět i po barevném vyfiltrování přes brýle a jednotlivým očím se jeví jako tmavě a světle zelená. Vrstevnice se promítnou na každý snímek zvlášť, takže je opět možné vidět je prostorově rozprostřené na povrchu terénu.

Jakékoliv křížení vrstevnic, vznik uzavřených útvarů na místech s prostým průběhem terénu nebo vrstevnice nekopírující přesně terén znamenají určitou chybu při sestrojování modelu. V místě této nesrovnalosti jsem ve vyhodnocených konturách hledala její příčinu. Jednalo se buď o překřížené kontury, nebo nesprávně vyhodnocený průběh terénu (Obr. 4). V takovém případě je nutné kontury ve stereopáru přehodnotit tak, aby popisovaly terén správně. V některých případech je takovou očividnou chybu nemožné najít, jedná se pravděpodobně o drobnou nuanci ve vyhodnocení, která se projeví až do výpočtu při interpolaci souřadnic. Redukci takové chyby lze tedy ponechat až na konečnou úpravu DEM.





Obr. 4 Vrstevnice vygenerované při tvorbě DEM chybně popisující terén. Překřížením vyhodnocovacích kontur vznikají nereálné útvary v modelu, které znázorňuje nejasný průběh vrstevnic. Interval mezi vrstevnicemi je 5 m.

4.1.3 Zálohování projektu

Vzhledem k relativně velkým objemům dat, se kterými se v projektu pracuje, a náročnosti na operační paměť počítače, občas nebylo vyloučené, že projekt nešel načíst, došlo k jeho poškození a nebylo možné v práci pokračovat. Naštěstí postup práce umožňuje vytvořit si projekt nový a nahrát do něj exportované kontury z původního projektu. Nový projekt se zakládá podle postupu popsaného na začátku kapitoly Metodika – Stereo Analyst. Postupem pro importování dat (viz kapitola Kontrolní postup) jsou zpět postupně voleny soubory ind_cont.shp, inter_cont.shp a sup_cont.shp ze složky s exportovanými konturami z původního projektu. Teoreticky by bylo možné importovat i soubory přímo ze složky projektu, ale v nich mohla být právě příčina jeho poškození. Pokud se zálohování exportem provádí pravidelně, není ztráta vyhodnocených dat zásadně veliká.

4.1.4 Vytvoření DEM

K dopočítání chybějících výškových souřadnic bodů ležících mimo zakreslené kontury slouží nástroje modulu Interpreter, konkrétně topografické analýzy (Topographic Analysis) a z nich výpočet povrchu (Surface). V otevřeném okně s názvem 3D Surfacing jsou vlevo nahoře umístěné ikony pro načtení nových dat  a zadání parametrů pro výpočet . Při zadávání vstupních dat (okno Input Data) je třeba zvolit, že jde o Breakline Data, typ souboru shapefile, název (a umístění) vstupního souboru a jakým způsobem se mají kontury obsažené ve vybraném souboru na výpočtu výškové souřadnice mezilehlých bodů podílet (Breakline Type). V souboru ind_cont.shp jsou obsaženy kontury mající význam jako vrstevnice, vystihují terén spíše plošně, a není u nich předpoklad, že by mezi nimi terén výrazně měnil svůj průběh. Z tohoto důvodu se jim přisuzuje typ Soft Link. Naopak kontury lomových hran (soubor inter_cont.shp), jak název napovídá, sdružují body, kolem kterých se terén významně mění. Nastavením typu Hard Link je jim tato vlastnost ponechána a v modelu kolem nich zůstane patrná ostrá změna průběhu terénu. Kontury v souboru sup_cont.shp vymezují hladiny jezer, v jejich vnitřním prostoru se předpokládá vodorovná plocha, bez jakéhokoliv náznaku terénních nerovností, proto je vystihuje typ Sharp Link.

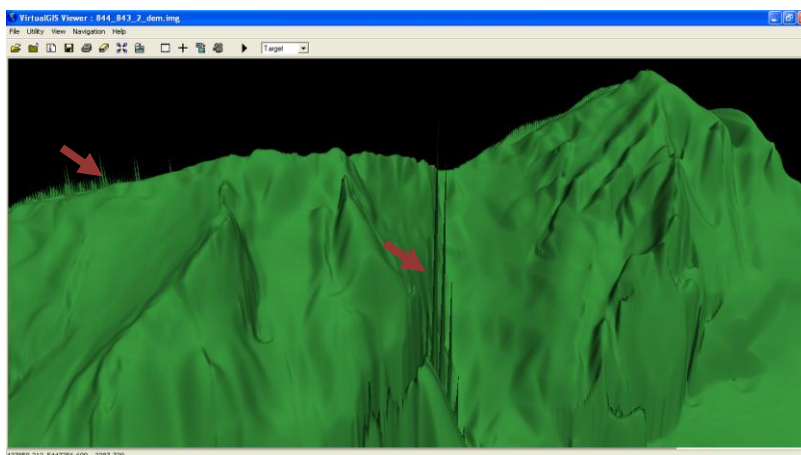
Zvolením druhé ikony se otevře okno Surfacing, ve kterém se zadává název a umístění (Output File) výstupního souboru ve formátu IMAGINE Image (*.img), metoda výpočtu povrchu (Surfacing Method), velikost buňky rastru, souřadnice bodů vymezujících modelované území, typ výstupních rastrových dat (Output Data File), možnost vytvořit vrstevnice (Create a Contour Map) a jejich interval (Contour Interval). Pro přirozenější vzhled modelu a vrstevnic je vhodnější používat metodu výpočtu Non-Linear Rubber Sheeting. Velikost buňky rastru se volí podle požadované přesnosti. V případě tvorby DEM v této práci je použita čtvereční velikost 1 m, souřadnice krajních bodů modelu ponechané automaticky vyplněné, typ výstupních rastrových dat Single Float. Vygenerování vrstevnic podle DEM se musí povolit zaškrtnutím a zvolit interval mezi vrstevnicemi. Ke kontrole vyhodnocených dat byl volen interval vrstevnic 5 m. Vytvořené vrstevnice se automaticky uloží pod názvem *_contour.shp do stejné složky, jako soubory s daty představujícími souřadnice buněk rastru modelu *.img a *.rrd.

4.1.5 Konečná úprava DEM

Vytvořený 3D model lze prohlížet v prohlížeči VirtualGIS Viewer modulu VirtualGIS. S modelem v prohlížeči se může manipulovat v různých módech, nastavitelných ve svrchním panelu přibližně uprostřed (Set Navigation Mode). Během práce se osvědčil mód target, kdy je kurzor středem otáčení modelu. Celkového přiblížení/oddálení modelu se dosáhne stiskem středního kolečka myši a jejím posunem dopředu/dozadu. Základní zobrazení je málo podrobné, takže pro zjištění například nedostatků a chyb konstrukce modelu je nutné nastavit podrobnější náhled: menu View – Level of Detail Control a pro maximální detail zvolit 100% úroveň DEM i rastru. V témže okně je udána i velikost paměti, kterou model aktuálně zabírá. Manipulace s modelem v maximální detailní úrovni je však výrazně pomalejší a neplynulá, takže je nejideálnější si nastavit a přiblížit zájmové místo, v nižším rozlišení a teprve poté detail zvětšit. Dalším nástrojem pro usnadnění pozorování povrchu modelu je nastavení osvětlení: menu View - Sun positioning se posunem kolečka po terči volí směr a úhel nasvícení. Úhel a směr je vhodné volit podle orientace svahu tak, aby nerovnosti povrchu slabě vrhaly stín, a byly tak lépe patrné.

Zobrazením vytvořeného DEM ve VirtualGIS Vieweru s nejvyšší úrovní detailu se objeví chyby na modelu (viz závěr kapitoly Výsledky - Stereofotogrammetrické vyhodnocení a kapitola Diskuse), patrné na Obrázku 5. Odstranění těchto nesrovnalostí a úprava okraje modelu jsou závěrečnou fází jeho tvorby. K redukci nechtěných útvarů uvnitř modelu program nabízí metodu

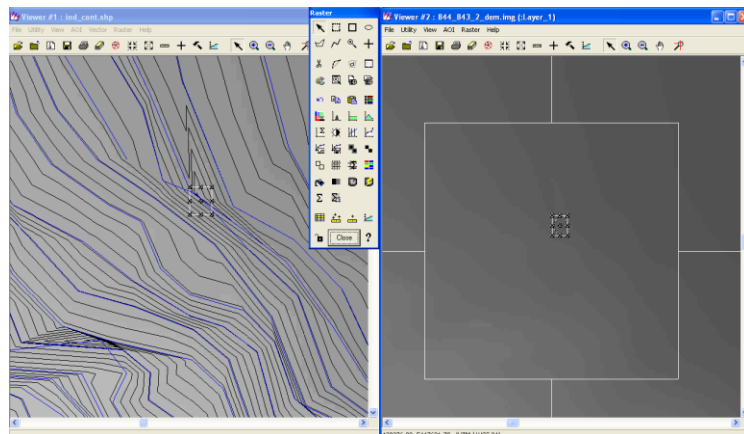
interpolace podle okolních bodů v modulu Viewer. Postup pro věrohodnou a správnou korekci byl náročný na koordinaci, protože bylo nutné opravované místo sledovat v 3D modelu (VirtualGIS Viewer), dodatečně ve stereopáru (Stereo Analyst), zdali útvar opravdu není součástí terénu, a v propojených oknech Viewru (Classic Viewer) s načtenými vrstvami vygenerovaných vrstevnic podle modelu, vyhodnocených kontur ze stereopáru a opravovanou rastrovou verzí DEM.






Obr. 5 DEM se zjevnými chybami v popisu terénu. 3D zobrazení DEM v prohlížeči VirtualGIS Viewer ve 100% detailu odhaluje data chybně popisující výškové souřadnice terénu. Chybová místa jsou v obrázku označena červenými šipkami.

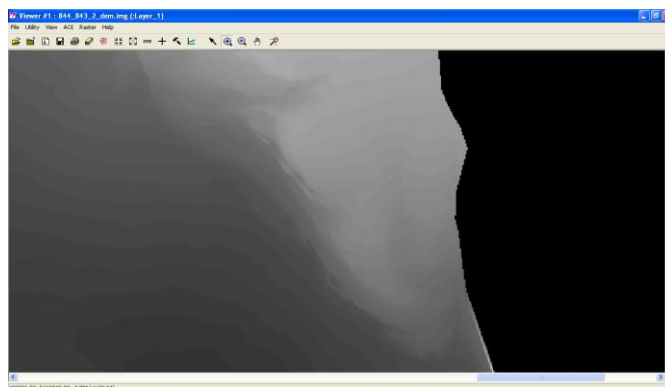
Způsob prostorového propojení oken prohlížeče je vhodná možnost, jak se orientovat podle vrstevnic a kontur a zároveň upravovat rastr modelu. V prohlížeči s nahanými celkem 3 vrstvami (soubor modelu (*.img), soubor vrstevnic (*.shp) a soubor ind_cont.shp) se pracuje jen s vrchní vrstvou, takže pro úpravu rastrové vrstvy je nutné přesunout ji přetažením v menu View – Arrange layers navrch. Rastr byl sice škálou šedé barvy výškově rozčleněn, ale pro zvýšení kontrastu v rámci modelu bylo třeba změnit rozsah škálování. V menu Raster – Contrast – Breakpoints se hodnotě, které se má ještě přiřadit nejtmaší barva (černá), zadá graficky nejvyšší možná výšková hladina, která ještě není zastoupena v modelu, v okně Breakpoint Editor aktivací ikony Histogram Edit Tools. Přenesením do popředí jedné z vektorových vrstev je opět umožněna její úprava. Pro přehlednost mezi vektorovými vrstvami je v menu Vector – Viewing Properties vhodné liniím jedné z vrstev přiřadit barvu, aby se odlišily od linií vrstvy druhé. S nově otevřeným oknem prohlížeče s nahanou vrstvou rastru modelu (škála šedi by již měla být nastavená) lze původní prohlížeč geograficky propojit: menu View – Link/Unlink Viewers – Geographical, kliknutím do vedlejšího okna podle zobrazeného návodu dojde k propojení, to znamená, že partie zobrazovaná v jednom okně se automaticky objeví v okně druhém. To má

výhodu nejen v možnosti různého zvětšení stejné oblasti pro každé okno zvlášť, ale především ve zvolení odlišné vrstvy jako vrchní, takže je možné rastr upravovat a zároveň mít viditelné vrstevnice a vyhodnocené kontury přesně v místě úpravy (Obr. 6).

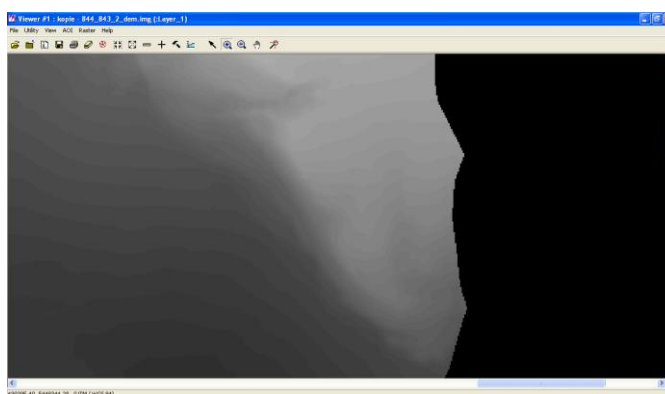


Obr. 6 Propojená okna prohlížeče Viewer s otevřenou paletou nástrojů a označenou AOI k interpolaci. Propojení oken slouží k lepší orientaci v upravovaném modelovém rastru.


Použitý způsob vyhledávání chybových míst spočíval v jejich primárním vyhledávání v rastru. Chybné údaje potvrzovaly i chaoticky vypadající souřadnice, nepřírozně působící útvar v 3D modelu jako špičky a jámy, absence v reálném terénu (překontrolování stereopárem). V případě nalezení chybných míst bylo seskupení takových bodů ohraničeno oblastí zájmu (AOI – Area of Interest) aktivní ikonou  pro vytvoření polygonální oblasti zájmu z palety nástrojů rastru . Kolem bodů s nesprávnou nadmořskou výškou bylo nutné označit také body správné, podle kterých byla prováděna následná interpolace a původní H souřadnice přepočítána v souladu s okolními body. Korekce byla prováděna ikonou okamžité interpolace . Rozdíl před interpolací a po interpolaci rastru je patrný ze středních částí Obrázků 7 a 8. Po interpolaci je nutné aktuální vrchní vrstvu (AOI) uzavřít bez jejího ukládání, změna na rastru zůstane, samozřejmě je ale nutné uložit soubor modelu.



Obr. 7 Digitální výškový model v rastrovém zobrazení před interpolačními úpravami. Nesrovnalosti ve výškových souřadnicích buněk rastru se projevují náhlými kontrastními přechody.



Obr. 8 Digitální výškový model v rastrovém zobrazení po interpolačních úpravách. Interpolací podle sousedních buněk se správnými hodnotami výškových souřadnic jsou chybná místa opravena. Hodnoty buněk okraje modelu nezakládající se již na fotogrammetrickém vyhodnocení jsou vyplněny konstantně nulou.

Vzhledem k tomu, že byly při automatickém výpočtu DEM nelineární interpolací dopočítány i body mimo území vyhodnocovaného povodí, vznikly na okraji modelu opět neexistující útvary, které bylo třeba odstranit. V rastrovém zobrazení modelu byla místa, která již do modelu nepatří a nemají správnou vypovídací hodnotu o terénu, rozeznána podle chybějících kontur ze stereofotogrammetrického vyhodnocení snímků a přiřazena konstantní nulová hodnota H souřadnice. K odstranění nadbytečného okraje rastru opět označeného polygonem AOI byla tentokrát použita ikona pro vyplnění oblasti (Fill Area) . Tímto způsobem upravený model neobsahoval již žádné nepřírozené útvary.

Ne příliš intuitivní je v programu Erdas Imagine postup zpětného vygenerování vrstevnic z upraveného modelu ve formátu shapefile (pouze jako rastrová vrstva IMAGINE Image).

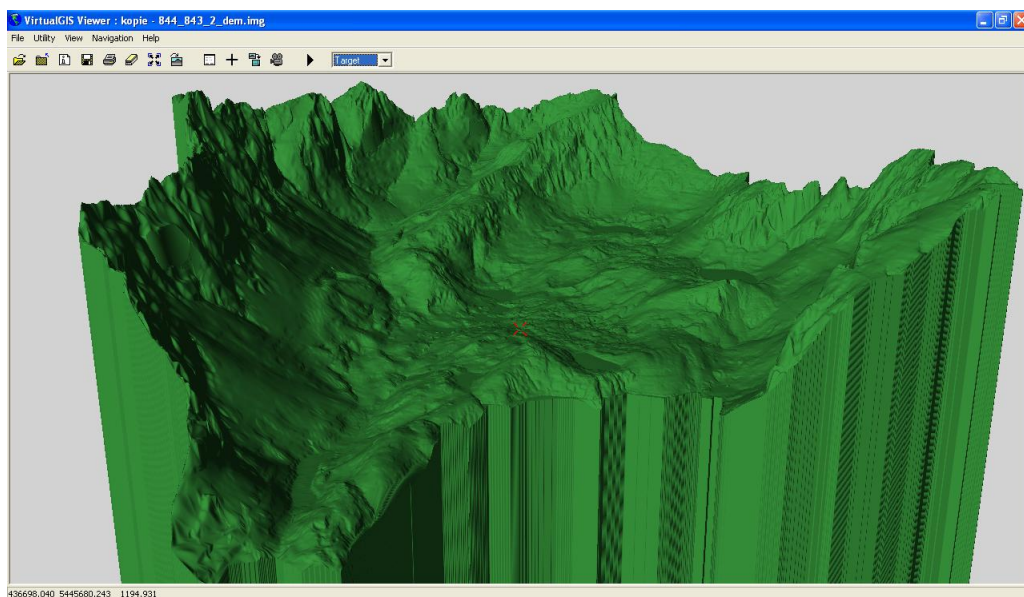
K tomu jsem použila program Quantum Gis. V menu Rastr – Extrakce – Izolinie jsem zadala název souboru upraveného modelu (*.img) a tvořeného vrstevnicového souboru (*.shp), interval mezi vrstevnicemi 10 m (5 m), atribut Z. Samozřejmě čím menší interval mezi vrstevnicemi se vytvoří, tím představují terén přesněji, ale zároveň se zvětší velikost souboru a je zdlouhavější a problémovější jeho načítání.

4.2 Výstupy práce

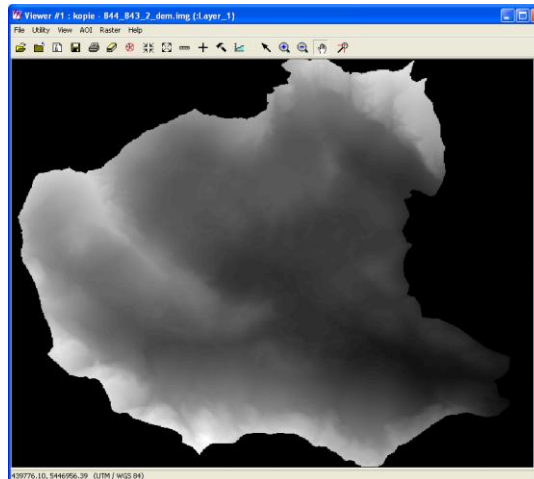
Výsledkem práce je digitální výškový model horského terénu s rozlišením rastru 1x1 m přiložený (příloha A) ve formátu souboru IMAGINE Image (*.img). Model lze zobrazit buď jako 3D model (Obr. 9) nebo v rastrové podobě (Obr. 10). Půdorys DEM nemá geometricky pravidelný tvar, ale představuje vybraná povodí tamních jezer.

Podle DEM jsou vygenerovány také vrstevnice území v intervalu 5 m a 10 m (Obr. 11) ve formátu shapefile (*.shp), (příloha B a C).

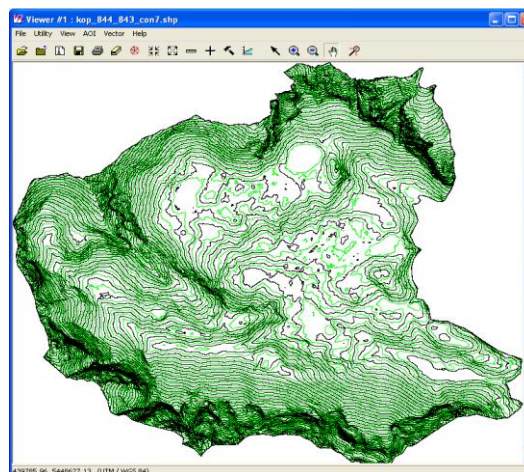
Výstupem ze stereofotogrammetrického vyhodnocení snímků jsou soubory s konturami ve formátu (*.shp), což jsou vektorová data obsahující informace o všech třech souřadnicích bodů terénu (Obr. 12).



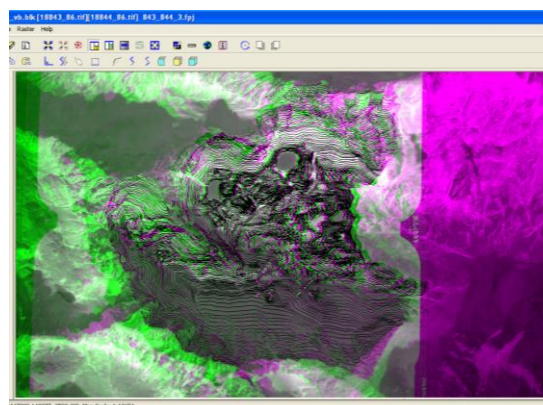
Obr. 9 Snímek trojrozměrného zobrazení modelu. Pohled na 3D model od jihovýchodu, v 100% detailu. Rozlišení rastru 1x1 m.



Obr. 10 DEM v rastrové podobě. Výškové souřadnice buněk rastru jsou představovány škálou šedé. Černá znamená nulovou hladinu, čím světlejší odstín šedé, tím je výšková souřadnice buňky větší. Jedna buňka rastru představuje jeden čtvereční metr.



Obr. 11 Vrstevnice stvořené podle DEM s intervalem 5 m a 10 m. Černě jsou zabarveny vrstevnice s 10-ti metrovým intervalem, obě barvy dohromady představují vrstevnice s 5-ti metrovým intervalem.



Obr. 12 Stereopár s vykreslenými vrstevnicovými konturami. Vyhodnocené kontury sdružující body terénu ve stejné výškové hladině nesou spolu s konturami lomových hran hlavní informace o průběhu terénu.

5. Diskuse

Při tvorbě DEM jsem se naučila stereofotogrammetricky vyhodnocovat složitý horský terén, řešit poničení projektu způsobené z neznámých příčin programem anebo nedostatečnou kapacitou počítače pracovat s objemnými soubory dat, orientovat se ve zmíněných modulech Erdas Imagine, postup zadání dat k výpočtu DEM a jeho dodatečnou úpravu.

Automatické generování DEM (umožňuje modul OrthoBase) pouze na základě velikostí paralax identických bodů na obou snímcích stereopáru neposkytuje výsledky odpovídající skutečnosti, nebo jsou nepřipustně zkreslené. Je to pochopitelné vzhledem k někdy až nepřehlednému obrazu, který poskytuje překrytí snímků. Ve vyhodnocení takových členitých míst pomůže lidská zkušenost s pravděpodobností průběhu terénu, kterou program nemá. Navíc člověk si může správnost svého úsudku při vyhodnocování porovnat s fotografiemi oblasti, které jsou dnes většinou dostupné z internetu.

Místa komplikující jednoduché vnímání průběhu terénu jsou například ostré zářezy ve svahu, které jsou na snímcích temné anebo byly skryté okolním masivem při pořizování snímků. V takových případech nezbyvá než vyhodnotit bezpečně rozpoznatelná místa, a nechat podle nich program výškové souřadnice interpolací dopočítat. Dalšími problémovými úseky jsou téměř kolmé skalní stěny, stereoskopicky vnímané s velkým rozdílem horizontální paralaxy mezi horním a dolním koncem, u nichž je rovněž těžké udržet pozornost na průběh terénu. V těchto svazích tak může dojít ke křížení vrstevnic a vzniku neexistujících útvarů. Řešením problému je dělat větší intervaly mezi kreslenými konturami vrstevnic, nebo jen pomocí lomových kontur. Pokud by stěna tvořila dokonce převis, program by nedokázal aplikovat algoritmus pro výpočet DEM na křížící se vyhodnocovací kontury správně, a takový převis by musel být vyhodnocen jako kolmá stěna. Určit, kde se kurzor nachází těsně na povrchu, je také obtížné, až nemožné, na svazích se sluncem ozářenou sněhovou pokrývkou, která se i při stereoskopickém vnímání jeví jako jednolitá bílá plocha. Naštěstí se i v takových plochách občas vyskytnou holé kameny nebo skalky, a podle nich je pak snadnější se zorientovat. Podobný efekt jako sníh mohou mít ale i plně ozářená suťová pole. Suťová pole představují jiný problém z hlediska relevantnosti modelu. Jako výsledek erozní činnosti nejsou stálá, přibývají uvolňováním dalších kamenů, mohou se posouvat. Z jejich vnějšího vzhledu ani nejde přesně určit směr odtoku srážek, protože jako

pórovitá masa vody propouští do spodních partií, a ta odtéká až po nepropustném podloží. Vegetace je v modelovaném území zastoupena pouze společenstvem horských luk, nevyskytují se zde žádné stromy ani kosodřevina (borovice kleč *Pinus mugo*). Ovšem při vyhodnocování ostatních stereopárů bude nutné se s vysokou vegetací vyrovnat podhodnocením výškové souřadnice o předpokládanou výšku porostu.

Přesnost modelu bude posuzována v rámci celého zamýšleného modelovaného území na základě porovnání reálných souřadnic vličovacích bodů a jejich souřadnic v modelu. Předpokládanou podrobnost v rámci celého modelovaného území bude představovat rastrový model s rozlišením 2 x 2 m.

Časová náročnost tohoto postupu tvorby digitálního modelu je značná. Samozřejmě záleží na velikosti území a tvarech terénu, zdatnosti ve stereofotogrammetrickém vyhodnocování, nutnosti dodatečných korekcí DEM a na parametrech počítače. Můj hrubý odhad času potřebného k dokončení DEM vybraného území je cca 200 hodin. Nejvíce časově náročná je stereofotogrammetrická část, při které je třeba korektně zaznamenat průběh terénu a průběžně provádět kontroly zakreslených kontur. Kvůli nutnosti pozorování obrazu anaglyfickými brýlemi a používání zraku nestandardním způsobem je vhodné během vyhodnocování dělat přestávky pro odpočinek očí. Při provádění dodatečné úpravy modelu trvá vyhledávání nesrovnalostí a jejich oprava. S programem Erdas Imagine 8.6 se mi po prvotním zorientování pracovalo uspokojivě, jeho výhodou jsou takřka všudypřítomné odkazy k nápovědám. Jediným nedostatkem tohoto programu byl pro mne nejednoznačný přístup k možnosti vygenerovat z DEM vrstevnicovou vrstvu ve formátu shapefile, pouze jako IMAGINE Image, který nejde nahrát do stereopáru. Trénink stereofotogrammetrického vyhodnocování složitého terénu, získaná orientace v programu a lepší hardwarové vybavení by tedy podle mne další práci na tvorbě modelu urychlily.

Provádění výpočtů, načítání souborů a vrstev do prohlížečů, manipulace s vrstvami a podobné procesy byly zejména k závěru vyhodnocování náročné pro procesor počítače, alespoň tak lze usuzovat podle dlouhé čekací doby, než byl požadovaný proces vykonán, v horším případě program "zamrzl". Podíl na problémech při operacích programu Erdas Imagine 8.6 může mít neúplná kompatibilita staršího programu s novějšími operačními systémy počítače.

Usnadnění vyhodnocení by mohla přinést například možnost vidět terén v jeho skutečných barvách, použitím barevných snímků a jiné metody utvoření stereovjemu. Z povahy horského terénu, který není na mnoha místech běžně přístupný, vyplývá, že výšková data musejí být získána bezkontaktní metodou. Jiná metoda připadající v úvahu k získání výškových souřadnic modelovaného území je laserové snímání terénu (LIDAR – Light Detection and Ranging). Použití této metody by však znamenalo provést nový letecký záznam terénu skenovaného laserovými paprsky a jejich následné vyhodnocení. Skenovací zařízení sice rovnou získává na základě odražených paprsků georeferencované souřadnice X , Y , Z o bodech terénu, ale během snímání je vytvořeno velké množství dat, některá data je třeba odfiltrovat apod. V horském terénu opět není vyloučena chybovost automatizovaného postupu a následná úprava dat se může přiblížit k náročnosti aerotriangulace a manuálního vyhodnocení terénu při stereofotogrametrii (Baltsavias, 1999). Avšak jako novější digitální a automatizovaná technologie by mohla být využívána při nových projektech, (Oršulák a Pacina, 2010).

6. Závěr

V této bakalářské práci je popsán metodický postup tvorby digitálního výškového modelu složitého horského terénu, který neumožňuje použít automatizovanou metodu vyhodnocení. Hlavním předpokladem k vytvoření DEM výše popsaným způsobem byly letecké stereofotogrammetrické snímky sestavené do stereopárů. Kroky při sestavování modelu byly: získání výškových souřadnic vybraných bodů z vyhodnocované stereodvojice, automatizované dopočítání výškových souřadnic pro ostatní body (vnik DEM), korekce nedostatků ze stereofotogrammetrie a automatického výpočtu DEM. Modelované území Vysokých Tater je malou částí zkoumané horské oblasti, jejíž DEM je zamýšleno vytvořit. Digitální výškový model bude sloužit zejména k limnologickým analýzám vysokohorských povodí.

7. Seznam literatury

Baltsavias, Emmanuel P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, Issues 2–3, July 1999, Pages 83-94, ISSN 0924-2716

Böhm, Josef. Fotogrammetrie. Učební texty. Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut geodézie a důlního měřičství, Ostrava 2002

Dostupné z: <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>

Callow, J. N., Van Niel, K. P., Boggs, G. S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? Journal of Hydrology, Volume 332, Issues 1–2, 1 January 2007, Pages 30-39, ISSN 0022-1694

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406003325>

Chen, Y., Shi, P., Li, J., Deng, L., Hu, D., Fan, Y. DEM accuracy comparison between different models from different stereo pairs. International Journal Of Remote Sensing. 2007, Oct 10. 28(19): 4217-4224. Available from: Environment Complete.

Čížek, Petr. Prostorové zobrazování. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky. Plzeň 2005

Dostupné z: http://herakles.zcu.cz/~skala/vid/Data/PetrCizek_DP2005.pdf

ERDAS IMAGINE 8.6 Tour Guides. Chapter Thirteen, Terrain Surface Interpolation. Leica Geosystems 2002

Fiala, Radek. Disertační práce. Robustní postupy hodnocení kvality digitálních modelů reliéfu. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd. Plzeň 2011

Dostupné z:

<https://stagws.zcu.cz/ws/services/rest/kvalifikacni prace/downloadPraceContent?adipIdno=45994>

Heipke, Christian. Automation of interior, relative, and absolute orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 52, Issue 1, February 1997, Pages 1-19, ISSN 0924-2716

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271696000299>

Heritage, G. L., Milan, D. J., Large, A. R.G., Fuller, I. C. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology*, Volume 112, Issues 3–4, 15 November 2009, Pages 334-344, ISSN 0169-555X

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X09002591>

Heron, S., Lages, M. Screening and sampling in studies of binocular vision, *Vision Research*, Volume 62, 1 June 2012, Pages 228-234, ISSN 0042-6989

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698912001277>

Hronček, Stanislav a Kočický, Dušan. DEM záverečná správa. Digitálny výškový model reliéfu, interpolovaný na základe ZM: 1:10 000. Zostavovanie geologických máp v mierke 1:50 000 pre potreby integrovaného manažmentu krajiny. ESPRIT, s. r. o., Pletiariska 2, P.O. BOX 27, 969 27 Banská Štiavnica. 2007.

Dostupné z http://www.esprit-bs.sk/stranka_data/subory/dem-zaverecna-sprava.pdf

Imagine OrthoBase User's Guide. Leica Geosystems. 2002

Li, Deren. From Photogrammetry to Inconic Informatics - On the Historical Development Of Photogrammetry and Remote Sensing. 306 – 310. 1988. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. XVIth ISPRS Congress: Kyoto 1988, Japan

Dostupné z: http://www.isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part6/306_XXIX-part6.pdf

Leberl, F., Thurgood, J. The Promise of Softcopy Photogrammetry Revisited. Proceedings of the ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. 2005

Dostupné z: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/370.pdf>

Mapa Vysokých Tatier SK-PL 1:25 000. Marco Polo.

Dostupná z <http://www.tatry.nfo.sk/mapa.html>

Moore D., Grayson R. B. and Ladson A. R. Digital Terrain Modelling: A Review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, Vol. 5, 3-30. 1991

Nečasová, Hana. Dvojtředové promítání, Anaglyfy. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, Ústav matematiky a statistiky. Brno 2007

Oršulák, Tomáš a Pacina, Jan. UJEP. 3D modelování a virtuální realita. 1. vyd. Ústí nad Labem: Centrum digitálních služeb MINO, 2012. ISBN 978-80-904927-4-5

Dostupné v předtiskové verzi: Oršulák, Tomáš a Pacina, Jan. 3D modelování a virtuální realita. Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, Ústí nad Labem 2010

<http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>

Pastoor, Siegmund a Wöpking, Matthias. 3-D displays: A review of current technologies, *Displays*, Volume 17, Issue 2, 1 April 1997, Pages 100-110, ISSN 0141-9382, 10.1016/S0141-9382(96)01040-2.

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938296010402>

Šíma, J. a Fiala, R. Průzkum současných možností přímého georeferencování leteckých měřických snímků. Komentář k počítačové prezentaci. GEOS 2006

Dostupné z:

http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/jine/geos06/paper/51_sima_fiala/paper/51_sima_fiala.pdf

Švec, M. Binokulární vidění a výroba anaglyfů. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno 2009, 52 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Fedra

Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16616

Welch, R. A., Jordan, R.R. Digital Orthophoto Production in the Desktop Environment. *Geomatics Info Magazine*. Vol. 10, No. 7, 1996

Yue, Tian-Xiang, Du, Zhen-Ping, Song, Dun-Jiang, Gong, Yun. A new method of surface modeling and its application to DEM construction. *Geomorphology*, Volume 91, Issues 1–2, 30 October 2007, Pages 161-172, ISSN 0169-555X

8. Seznam obrázků

- Obr. 1 Projekt Stereo Analystu s nahraným stereo modelem.
- Obr. 2 Výběr stereopáru.
- Obr. 3 Vyhodnocení lomové hrany a linie bodů se stejnou nadmořskou výškou.
- Obr. 4 Vrstevnice vygenerované při tvorbě DEM chybně popisující terén.
- Obr. 5 DEM se zjevnými chybami v popisu terénu.
- Obr. 6 Propojená okna prohlížeče Viewer s otevřenou paletou nástrojů a označenou AOI k interpolaci.
- Obr. 7 Digitální výškový model v rastrovém zobrazení před interpolačními úpravami.
- Obr. 8 Digitální výškový model v rastrovém zobrazení po interpolačních úpravách.
- Obr. 9 Snímek trojrozměrného zobrazení modelu.
- Obr. 10 DEM v rastrové podobě.
- Obr. 11 Vrstevnice stvořené podle DEM s intervalem 5 m a 10 m.
- Obr. 12 Stereopár s vykreslenými vrstevnicovými konturami.

9. Seznam příloh

- Příloha A – Digitální výškový model terénu, rastr 1x1 m
- Příloha B – Vrstevnice vygenerované podle digitálního výškového modelu terénu s 5-ti metrovým intervalem
- Příloha C – Vrstevnice vygenerované podle digitálního výškového modelu terénu s 10-ti metrovým intervalem