

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra matematiky

Diplomová práce

Využití prostředí ArcGIS pro zpracování dat leteckého laserového skenování

Plzeň, 2013

Lucie Potřebová

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie POTŘEBOVÁ**
Osobní číslo: **A08N0026K**
Studijní program: **N3602 Geomatika**
Studijní obor: **Geomatika**
Název tématu: **Využití prostředí ArcGIS pro zpracování dat leteckého laserového skenování**
Zadávací katedra: **Katedra matematiky**

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

1. Princip technologie a výstupy leteckého laserového skenování
2. Východiska, postup a výsledky projektu tvorby nového výškopisu území České republiky
3. Správa a zpracování dat leteckého laserového skenování v prostředí ArcGIS
4. Ověření možností využití Terrain dataset pro generalizaci dat leteckého laserového skenování
5. Hodnocení výsledků generalizace metodou robustní kontroly výškopisu ve vybrané lokalitě

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 45 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:


- ŠÍMA, J.: Abeceda leteckého laserového skenování. Geobusiness, 2009, č.3.
- BRÁZDIL, K.: Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. Geodetický a kartografický obzor, 2009, č. 7.
- BRÁZDIL, K. et al: Realizační projekt zpracování výškopisných dat. Zeměměřický úřad a Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad, 2009.
- DOLANSKÝ, T. 2004. Lidary a letecké laserové skenování. 1.vyd. Ústí nad Labem: UJEP v Ústí nad Labem, 100 s. ISBN 80-7044-575-0
- PAVELKA, K. 2006. Laserové skenování – nová technologie sběru prostorových dat -Habilitační přednášky. 1. vyd. Praha: ČVUT, 32 s. ISBN 80-01-03501-8
- PAVELKA, K. HODAČ, J. 2008. Fotogrammetrie 3. 1. vyd. Praha: skriptum ČVUT, 187 s. ISBN 978-80-01-03978-6

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radek Fiala**
Katedra matematiky

Datum zadání diplomové práce: **1. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2012**


Doc. Ing. František Vávra, CSc.
děkan




Prof. RNDr. Pavel Drábek, DrSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. října 2011

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a následné obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí diplomové práce.

V Plzni dne 26. května 2013

.....

podpis diplomanta

Poděkování

Tímto bych chtěla velmi poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Bc. Radku Fialovi, Ph.D., za metodické vedení, cenné rady a připomínky při zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat za poskytnuté rady při řešení problémů nejen v ModelBuilder a v Python Ing. Karlu Jedličkovi, Ph.D. a všem ostatním z oddělení geomatiky, kteří mi byli nápomocni. Za poskytnutá data bych ráda poděkovala Zeměměřickému úřadu.

V neposlední řadě děkuji také celé své rodině, přátelům, kolegům v zaměstnání a hlavně příteli Michalovi za podporu a pochopení během celého mého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím dat leteckého laserového skenování k tvorbě digitálního modelu terénu. Teoretická část práce je věnována principům a využití leteckého laserového skenování, filtraci naměřených dat a popisu výškopisných databází České republiky. V praktické části diplomové práce je ukázán postup tvorby digitálního modelu reliéfu a digitálního modelu povrchu z dat leteckého laserového skenování nad vybranými územími. V prostředí software ArcGIS je prakticky ukázána tvorba různých typů pohledových pyramid a celý proces tvorby výškopisného modelu je automatizován pomocí skriptu v programovacím jazyce Python. Vytvořené digitální modely terénu jsou analyzovány a vzájemně porovnány. Výsledkem analýzy je pak soubor doporučení k metodám tvorby digitálních modelů terénu v prostředí ArcGIS v závislosti na typu terénu.

Klíčová slova

Letecké laserové skenování (LLS), digitální model reliéfu (DMR), digitální model povrchu (DMP), digitální model terénu (DMT), nepravidelná trojúhelníková síť (TIN), 3D Analyst, Terrain Management toolset, Terrain and TIN Surface toolset, terénní dataset, pohledové pyramidy, Python.

Abstract

The diploma thesis deals with the usage of aerial laser scanning data for the purpose of creating a digital terrain model. The theoretical part of the thesis is devoted to the rules, filtering and the usage of aerial laser scanning and describes hypsography databases of the Czech Republic as well. The practical part of the thesis explores the procedure of creating digital ground model and digital surface model based on aerial laser scanning data of selected areas. In software ArcGIS both creation of various types of terrain pyramids and the whole process of creating hypsography model automated through the script in programming language Python are practically shown there. The created digital terrain models are analysed and confronted. Then the result of the analysis is a set of suggestions for the methods used for creation of digital terrain models in ArcGIS according to the type of terrain.

Keywords

Aerial laser scanning (ALS), digital ground model (DGM), digital surface model (DSM), digital terrain model (DTM) triangulated irregular network (TIN), 3D Analyst, Terrain Management toolset, Terrain and TIN Surface toolset, terrain dataset, terrain pyramids, Python.

Obsah

Obsah.....	1
Seznam tabulek	3
Seznam obrázků	3
Seznam grafů.....	4
Seznam použitých zkratk.....	5
0 Úvod.....	9
1 Laserové skenování	11
1.1 Principy a využití laserového skenování.....	12
1.1.1 Možné výstupy z laserového skenování.....	13
1.2 Letecké laserové skenování (LLS).....	15
1.2.1 Princip LLS	15
1.2.2 Jednotlivé části palubního systému LLS.....	15
1.2.3 Příklady aplikací LLS.....	17
2 Východiska, postup a výsledky projektu tvorby nového výškopisu České republiky	19
2.1 Současný stav výškopisných databází.....	19
2.2 Postup a technologie zpracování	20
2.2.1 Filtrace dat leteckého laserového skenování.....	23
2.2.2 Filtrace v programu SCOP++.....	26
2.3 Výsledné produkty	28
3 Terény a pohledové pyramidy	31

3.1 Pohledová pyramida typu Window size.....	33
3.1.1 Parametr Sekundární ředění	34
3.2 Pohledová pyramida typu Z-tolerance	35
4 Práce v ESRI Geodatabázi	36
4.1 Separace dat.....	37
4.1.1 Vstupní data.....	37
4.1.2 Geodatabáze	40
5 Tvorba terénu a pohledových pyramid pomocí skriptů v jazyce Python.....	43
5.1 Tvorba terénu metodou Window size	43
5.2 Tvorba terénu metodou Z-tolerance	46
5.2.1 Hypotéza.....	46
5.2.2 Nástroje pro tvorbu terénu metodou Z-tolerance	48
5.2.3 Výsledky experimentu.....	50
6 Analýzy pohledových pyramid	52
6.1 Porovnání jednotlivých úrovní pohledových pyramid	54
6.2. Výpočty statistik a konverze dat	55
6.3 Analýzy nad pohledovými pyramidami	57
6.3.1 DMP – porovnání metod tvorby pohledových pyramid.....	59
6.3.2 DMR – porovnání metod tvorby pohledových pyramid	62
7 Závěr.....	65
Prameny a literatura	67
Seznam příloh.....	73

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Porovnání pohledových pyramid Window size a Z-tolerance, [1]	32
Tabulka 3.2: Srovnání metod u Window size, [1].....	33
Tabulka 5.1: Přehled výškových tolerancí pro DMP	50
Tabulka 6.1: Přehled systematických a náhodných chyb pro DMP.....	61
Tabulka 6.2: Přehled systematických a náhodných chyb pro DMR	64

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Ilustrace vztahů váhové funkce, [29].....	28
Obrázek 2.2: Pokrytí ČR datovou sadou DMR 5G k 16. 5. 2013, [21]	29
Obrázek 3.1: Ukázka TIN, [22].....	31
Obrázek 3.2: Ukázka ředění bodů pohledové pyramidy typu WS, [1]	34
Obrázek 4.1: Přehled zájmových oblastí na území města Plzně	38
Obrázek 4.2: Názvy souborů vstupních dat	39
Obrázek 4.3: Ukázka struktury vstupních dat ve formátu XYZ	40
Obrázek 4.4: Nastavení nástroje ASCII 3D to Feature class	41
Obrázek 4.5: Nastavení nástroje Clip.....	42
Obrázek 4.6: Výsledný model části Separace dat	42
Obrázek 5.1: Skript tvorby terénu metodou Window size	44
Obrázek 5.2: Uživatelské rozhraní skriptu tvorby terénu metodou Window size	44

Obrázek 5.3: Skript tvorby terénu metodou Z-tolerance.....	48
Obrázek 5.4: Uživatelské rozhraní skriptu tvorby terénu metodou Z-tolerance	49
Obrázek 6.1: Skript pro počítání analýz a zapisování výsledků do tabulek v prostředí Python.....	53
Obrázek 6.2: Uživatelské rozhraní skriptu pro počítání analýz a zapisování výsledků do tabulek v prostředí Python	54

Seznam grafů

Graf 5.1: Závislost počtu bodů pohledových pyramid na hodnotě Z-tolerance pro DMP	47
Graf 5.2: Závislost počtu bodů pohledových pyramid na hodnotě Z-tolerance pro DMR	47

Seznam použitých zkratk

Seznam použitých zkratk uvedený v této diplomové práci byl převážně zpracován na podkladech Terminologického slovníku zeměměřictví a katastru nemovitostí [38].

24. ZDL MO	24. základna dopravního letectva Ministerstva obrany
ASCII	Americký standartní kód pro výměnu informací (z angl. American Standard Code for Information Interchange) [2]
Bpv	výškový referenční systém Balt – po vyrovnání
Compass	projekt Čínské lidové republiky autonomního regionálního družicového polohového systému (někdy též známý jako Beidou-2)
CZEPOS	síť aktivních permanentních stanic určených technologií GNSS, rovnoměrně rozmístěných na území ČR
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DGNSS	diferenciální metoda GNSS
DMP	digitální model povrchu (se stavbami a rostlinným pokryvem)
DMP 1G	digitální model povrchu první generace
DMR	digitální model reliéfu
DMR 4G	digitální model reliéfu čtvrté generace
DMR 5G	digitální model reliéfu páté generace
DMT	digitální model terénu
EGNOS	Evropský geostacionární navigační systém (z angl. European Geostationary Navigation Overlay Service), který doplňuje a vylepšuje vlastnosti GPS NAVSTAR v Evropě

ETRS 89	Evropský terestrický referenční systém (z angl. European Terrestrial Reference System); číslo 89 je rok, kdy byl ETRS 89 koinkidován s ITRS
File GDB	souborová Geodatabáze, kterou používá systém ArcGIS
Galileo	globální navigační družicový systém budovaný Evropskou unií a Evropskou kosmickou agenturou
GIS	geografický informační systém
GLONASS	ruská obdoba amerického systému NAVSTAR GPS
GNSS	souhrnný termín užívaný k obecnému označení globálních družicových systémů (z angl. Global Navigation Satellite System)
GRID	mříž neboli rozložení bodů definující pravidelný vzorek, odvozený od rohů mozaikování určitého rámce nebo jeho vymezené části
GRS 80	Geodetický referenční systém 1980
GSM	globální systém pro mobilní komunikaci (angl. Global System for Mobile Communications, původně však francouzsky „Groupe Spécial Mobile“)
IMU	Inerciální měřicí jednotka (z angl. Inertial Measurement Unit), sloužící např. k určení úhlových prvků vnější orientace leteckých měřických snímků nebo leteckého laserového skeneru)
INSPIRE	Infrastruktura pro prostorové informace v Evropském společenství (z angl. Infrastructure for Spatial Information in Europe)
LAS	binární formát LIDAR dat pro výměnu dat mezi poskytovateli a uživateli
LIDAR	laserový skener (z angl. LIght Detection And Ranging)
LLS	letecké laserové skenování

MO ČR	Ministerstvo obrany ČR
MZe ČR	Ministerstvo zemědělství ČR
GPS - NAVSTAR	vojenský globální družicový polohový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických (z angl. Global Positioning System)
POLOM	externí stanice přijímající signály navigačního systému GPS-NAVSTAR (se systémem GLONASS není kompatibilní); k síti CZEPOS byla připojena v roce 2011 prostřednictvím VESOG, správcem stanice je VGHMÚř
RGB	barevný model červená-zelená-modrá je aditivní způsob míchání barev používaný ve všech monitorech a projektorech; monitor zobrazuje i v naprosté tmě
RINEX	protokol pro výměnu GNSS dat mezi různými typy přístrojů (z angl. Receiver Independent Exchange Format)
RTCM	mezinárodní standardizační komise pro námořní služby, která byla ustavena k tomu, aby definovala standard pro přenos diferenčních korekcí z referenční stanice k mobilním uživatelům v reálném čase (z angl. The Radio Technical Commission for Maritime Services)
SBAS	systémy pro šíření korekčních dat pomocí satelitů (z angl. Satellite Based Augmentation System) umožňující pokrytí rozsáhlých oblastí; významné zejména pro lodě a leteckou dopravu
S-JTSK	souřadnicový referenční systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
TIN	nepravidelná trojúhelníková síť (z angl. Triangulated Irregular Network)
UTM	univerzální transverzální Mercatorovo zobrazení (z angl. Universal Transversal Mercator)

VESOG	Výzkumná a experimentální síť pro observace GNSS
VGHMÚř	Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
WGS-84	Světový geodetický referenční systém 1984 (z angl. World Geodetic System 1984)
ZABAGED[®]	Základní báze geografických dat České republiky
ZÚ	Zeměměřický úřad

0 Úvod

Tvorba přesného digitálního modelu terénu (DMT) patří mezi nejnáročnější úkoly v oblasti geografických informačních systémů. Přesnost digitálního modelu reliéfu je zásadní pro výsledky celé řady analýz, které jako vstupní data využívají právě tohoto produktu. Do tvorby modelu terénu vstupují stále nové technologie. Jednou z nich je způsob pořízení zdrojových dat pomocí leteckého laserového skenování. Jedná se o průlomovou a pro mě osobně natolik atraktivní metodu sběru informací, že jsem se rozhodla na toto téma ve své diplomové práci zaměřit.

Společnost ESRI ve svém software nabízí nové funkce pro práci s daty leteckého laserového skenování. K vytváření DMT je možné využít dat leteckého laserového skenování, která se ukládají do datové sady terén (Terrain dataset). V nově navrženém formátu je možné využívat takzvaných pohledových pyramid, které na principu generalizace dat urychlují práci s modelem terénu v menších měřítcích. V manuálech a některých dalších pracích je možné se dočíst o vhodnosti jednotlivých metod tvorby pyramid, ale dosud chybí ucelené srovnání podepřené experimenty na reálných datech.

Cílem práce je vytvořit v prostředí ArcGIS vhodný postup pro vytvoření DMT ze zdrojových dat leteckého laserového skenování, ověřit možnosti tvorby pohledových pyramid pro data z leteckého laserového skenování a zhodnotit jejich vlastnosti. Na základě hodnocení pak doporučit nástroje vhodné pro různé typy území dat. Práce je na základě zadaných cílů rozvržena do následujících částí:

Úvodní část práce je věnována problematice laserového skenování. První kapitola popisuje způsoby pořizování prostorových dat, výsledky měření, které budou v práci nadále využity, vyjmenovává možné využití naměřených dat a blíže se zaměřuje na letecké laserové skenování.

Druhá kapitola patří také do teoretické části diplomové práce a jejím cílem je obeznámit čtenáře nejen se současným stavem výškopisných databází v České republice, ale také s plány do budoucna v této oblasti. Popisuje současný způsob pořizování a zpracování výškopisných dat a výsledné produkty, včetně způsobu jejich uložení. Důležitým bodem druhé kapitoly je část zabývající se filtrací dat z leteckého laserového skenování.

Třetí kapitola již plynule přechází do praktické části, protože je věnována pohledovým pyramidám. Ty se staly jedním ze stěžejních bodů této diplomové práce. Popsány a porovnány jsou dva typy pohledových pyramid Window size a Z-tolerance, které určují úroveň detailu povrchu pro různá měřítka, generovaného z databáze pro zvýšení efektivity práce s modelem terénu. Zároveň jsou zde uvedena obecná doporučení pro stanovení hodnot výškové tolerance metody Z-tolerance.

Následující části práce se již zaměřují na samotné zpracovávání výškopisných dat z leteckého laserového skenování v různých typech městského území (města Plzeň) v software společnosti ESRI. Jde o uložení naměřených dat do Geodatabáze, dále o nadefinování pohledových pyramid obou metod, o tvorbu samotných digitálních modelů terénu a v neposlední řadě jde ještě o výpočty analýz ke všem vytvořeným terénům. To je zčásti uskutečňováno s využitím prostředí ModelBuilder. V ostatních případech, kdy se prostředí ModelBuilder ukázalo jako nevyhovující, byl použit uživatelsky náročnější skriptovací jazyk Python. Pomocí skriptů, které byly vytvořeny v rámci práce, byl celý postup zautomatizován.

Vzniklé digitální modely s rozdílně nadefinovanými pohledovými pyramidami jsou v závěrečné části práce podrobeny analýze s cílem zjistit, který typ pohledových pyramid nejlépe generalizuje digitální model reliéfu i povrchu.

1 Laserové skenování

Laserové skenování (někdy též laserscanning) patří k nejmodernějším metodám pořizování velkého množství bodů v minimálním rozestupu za krátkou dobu observace. [43] Poskytuje data v takové kvalitě, že v některých směrech neexistuje srovnání se stávajícími metodami geodetického měření. V současnosti se jedná o bezkonkurenčně nejefektivnější metodu **hromadného** pořizování prostorových dat. Limitujícími faktory mohou být pouze velikost a hmotnost měřické soustavy, jakož i mimořádně vysoká pořizovací cena přístroje. Díky velké rychlosti měření a vysoké hustotě zaměřených bodů lze v krátké době získat s využitím předpokladů o jeho geometrii podrobný a přesný 3D model, jenž zobrazuje měřené objekty s centimetrovou přesností. Výsledkem je mimořádně věrný obraz skutečnosti, který nelze pořídit jiným způsobem. Velkou nevýhodou je spousta naměřených dat, pro která se obtížně hledá vhodný software na jejich zpracování. Nevýhodou bývá i to, že některé body jsou zaměřeny nesmyslně. Výhodou je též kompletnost naměřených dat.

Při porovnání rychlosti změření fasády budovy fotogrammetricky a laserovým skenováním bylo zjištěno, že stále nelze fotogrammetrii vyloučit z využitelných metod. Výsledky z obou měření se lišily minimálně, proto je v některých aplikacích fotogrammetrie stále výhodnější metodou i vzhledem k její ceně. [37]

Laserové skenování se dělí na **statické pozemní, mobilní pozemní a mobilní letecké**.

Statické pozemní skenování

Tato metoda se používá hlavně k přesné dokumentaci prostorově složitých objektů, jako jsou fasády historických budov, konstrukce, podzemní prostory, štoly, tunely atd. Při této metodě se přístroje (laserové skenery) umísťují obvykle na stativ, podobně jako teodolit. Výhodou je hlavně vysoká rychlost měření, přesnost řádově v milimetrech, bezkontaktní měření, možnost měření v nepřístupných či nebezpečných podmínkách, pokročilý stupeň automatizace, která dovoluje za velmi krátkou dobu vytvořit velké množství výstupů dle požadavků zákazníka (výškové analýzy, 3D modely terénu, sledování posunu terénu a objektů, animace a 3D vizualizace terénu). [20], [37], [43]

Mobilní pozemní skenování

Mobilní mapování se stalo velmi rychlou a ekonomickou metodou pro získávání dat pro GIS (společně s aktuálními fotografiemi měřených objektů). Oproti statické metodě lze naskenovat např. celá města, tisíce kilometrů dálnic i s jejich okolím či prostory ulic (chodníky, sloupy, hydranty, dopravní značky, kanálové vpusti apod.), a to za podstatně kratší dobu než klasickým geodetickým měřením pomocí totální stanice a GNSS. Zájmové území je tak pokryto tisíci snímky a mračny bodů (viz dále v kapitole 1.1.1), které dohromady tvoří kompaktní model pro měření a vizualizace. Kombinací leteckého laserového skenování (pohled shora) a mobilního laserového skenování (kolmý pohled na fasády budov) lze získat velmi přesný a podrobný model budov. Nevýhodou této metody je velký objem dat, se kterým je také spojen problém nalezení vhodného software pro zobrazení, oříznutí a následné zpracování dat. Další nevýhodou a zároveň základním rozdílem oproti statickému pozemnímu skenování je pohyb skeneru a s tím spojená nutnost informace o poloze a postavení skeneru v prostoru. Velkou výhodou je ovšem možnost skenování v noci při minimálním provozu na pozemních komunikacích. [19], [31], [43]

Mobilní letecké skenování

Tato metoda patří k nejnovějším technologiím pro pořizování prostorových dat o území. Principiálně funguje stejně jako pozemní skenery, pouze s použitím konstrukčně robustnějších a výkonnějších skenerů a dalších doplňkových komponent. Nosičem celého zařízení bývá letadlo či vrtulník. Lze skenovat (jako u každé metody laserového skenování) i za tmů a zhoršených světelných podmínek, což bývá nespornou výhodou oproti fotogrammetrii. Přesnost se při této metodě pohybuje v řádech centimetrů. [18], [37]

1.1 Principy a využití laserového skenování

Laserové skenování ve formátu 3D se využívá především v inženýrské geodézii, při dokumentaci hutních, chemických a průmyslových provozů, při modelování měst a plánování rozvoje výstavby, v architektuře při měření fasád, pro měření v tunelech, v archeologii pro dokumentaci kulturního dědictví, v důlním měřictví, při získávání scén pro virtuální realitu, v lesnictví pro kvalitativní i kvantitativní zachycení stavu lesa a poskytnutí vstupních dat pro modelování lesních ekosystémů a také v topografii.

Princip 3D laserového skenování je založen na optických zákonech průniku světelných paprsků prostorem a neprůchodnosti přes neprůsvitné překážky v něm. Z toho vyplývá, že tato metoda je omezeně použitelná či téměř nepoužitelná v hustých a hluboce rozvětvených porostech s výraznými korunovými překryty či v porostech s výrazným podrostem. Výhodou jsou ovšem velmi významné časové úspory, neboť eliminuje podíl lidského faktoru v terénním sběru dat (chyba měřiče při odečtu a záznamu dat při venkovním měření), a nabízí možnost zobrazit měřenou lokalitu v prostředí počítače jako digitální obraz reálného světa. Tím se reálně zvyšuje opakovatelná použitelnost těchto dat a snižuje se jejich cena. Všechna data jsou již primárně získána v digitální podobě, proto je celý proces měření a dalšího zpracování geodat z velké části automatizován.

1.1.1 Možné výstupy z laserového skenování

Mračno bodů

Jde o základní výstup z laserového skenování. Jedná se o „tisíce až miliony bodů, přičemž každý bod má souřadnice x , y , z . Souřadnicový systém je v tomto případě zatím místní s počátkem v místě pozice skeneru. Celé mračno lze transformovat do libovolného souřadnicového systému (např. do souřadnicového systému JTSK a výškového souřadnicového systému Bpv). Každý bod mračna může obsahovat i barevnou informaci. Buď to může být hodnota intenzity odrazu laserového paprsku převedená do stupně šedi (x , y , z , intenzita) nebo RGB informace získaná ze souběžně pořízeného digitálního obrazového záznamu (x , y , z , R, G, B).“ [22]

3D model

Z mračna bodů lze vygenerovat velmi přesný a podrobný 3D model (nejčastěji ve tvaru nepravidelné trojúhelníkové sítě). V kombinaci s digitálními obrazovými záznamy daného objektu lze vytvořit realistický 3D model.

Digitální model terénu, profily a vrstevnice

V této práci budou často používány pojmy **digitální model reliéfu**, **digitální model povrchu** a **digitální model terénu**. U těchto pojmů nebývá terminologie jednotná. V této práci bude použita terminologie z [38]:

- **digitální model reliéfu** (dále jen DMR) – digitální reprezentace zemského povrchu v paměti počítače, složená z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů,
- **digitální model povrchu** (dále jen DMP) – zvláštní případ digitálního modelu reliéfu konstruovaného zpravidla s využitím automatických prostředků (např. obrazové korelace ve fotogrametrii) tak, že zobrazuje povrch terénu a vrchní plochy všech objektů na něm (střechy, koruny stromů apod.),
- **digitální model terénu** (dále jen DMT) – v češtině užíván jako všeobecný termín zahrnující digitální model reliéfu i povrchu.

Různým software pro tvorbu digitálního modelu lze jednoduše z naměřených dat vytvořit digitální model reliéfu nebo povrchu (včetně vegetace a staveb) požadovaného území či objektu. Analýzou tohoto modelu můžeme zjistit údaje o objektu, jako jsou objemy, sklony, expozice svahů aj.

Přímo z mračna bodů nebo z DMT můžeme vygenerovat profily libovolného směru a vrstevnice ve zvoleném intervalu. Řezy a vrstevnice lze exportovat i ve vektorové formě.

Ortofoto, fotoplán

Data z laserového skenování lze přímo využít ve fotogrametrii při tvorbě ortofotografického zobrazení výškově členitého terénu, při kterém musíme disponovat digitálním modelem reliéfu nebo digitálním modelem povrchu v případě věrného (true) ortofota vyšších staveb v zastavěném území.

1.2 Letecké laserové skenování (LLS)

Letecké laserové skenování je velmi mladou technologií umožňující sběr výškopisných dat na velkých plochách území v bezkonkurenčně krátké době. První experimenty s leteckým laserovým skenováním se uskutečnily zhruba před 20 lety. Tato metoda byla vyvinuta pro rychlé a operativní mapování výškopisu rozsáhlých území, kde jsou dosavadní standardní metody (elektronická tachymetrie, technologie GNSS¹, fotogrammetrie) náročné a vesměs kapacitně nedostatečné.

1.2.1 Princip LLS

Jedná se o aplikaci laserového paprsku k měření délky (přeneseně řečeno jde o metodu prostorové polární metody). Laserový paprsek je k měření délek v běžné praxi geodety používán již řadu let (v současnosti se prakticky již nesetkáme s optickým nebo základnovým tachymetrem, případně bala-latí). Kombinací dvou víceméně vzdálených technologií – **laseru a skenování** – vznikl „základní měřicí přístroj“ letecký laserový skener. Ten pomocí výkyvu laserového paprsku ve směru napříč letové dráhy a vysílání krátkých pulzů dokáže vytvořit jeden řádek bodů a díky dopřednému pohybu nosiče (letadla) takto skenuje a měří souřadnice (x,y,z) v několika set metrů širokém pásu v zájmovém území.

Abychom mohli určit prostorovou polohu a směr vektoru laserového paprsku, musíme znát přesnou polohu letadla v okamžiku vyslání pulzu k zemskému povrchu a úhlové prvky vnější orientace laserového skeneru vůči projektované dráze letu. K tomu slouží měřicí systém IMU (angl. Inertial Measurement Unit) a palubní aparatura GNSS.

1.2.2 Jednotlivé části palubního systému LLS

Laserový skener

Pro laserový skener se občas používá zkratka LIDAR (angl. Light Detection And Ranging), jehož hlavní částí je pulzní skener, který emituje velmi krátké záblesky infračerveného světla a vysílá je k zemi. Tento impuls se odrazí od země zpět a senzorem je zaznamenána doba letu.

¹ GNSS, neboli globální navigační družicový systém, je dle [37] souhrnný termín užívaný k obecnému označení globálních družicových systémů (např. NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo, Compass).

Vynásobíme-li čas rychlostí světla, obdržíme dvojnásobek vzdálenosti senzoru od terénu. Světelné pulzy jsou k zemi vysílány velmi vysokou frekvencí, tzn. několik set tisíc Hz (např. výrobek firmy RIEGL s označením RIEGL LMS-Q680 má frekvenci pulzů 80 000 až 240 000 Hz, což odpovídá max. 240 000 měření za sekundu). Jeden snímaný řádek vznikne vychylováním paprsku v příčném směru vzhledem ke směru letu letadla (vesměs v rozsahu od 20° do 35°). Frekvence měření jednotlivých řádků může být několik stovek Hz (např. výrobek firmy RIEGL s označením RIEGL LMS-Q680 má tuto frekvenci 10 až 200 Hz). [26] Obecně lze říci, že podrobné body jsou zaměřeny hromadnou polární metodou (dvěma úhly a prostorovou vzdáleností).

Laserový paprsek je schopen proniknout mezi vegetací (listy, jehličím, stébly) a na senzor pak zpětně dopadá řada dílčích odrazů jediného pulzu v takové posloupnosti, v jaké se paprsek od vegetace odrazil. Z těchto několikanásobných odrazů jsou nejdůležitější první, který poskytuje informaci o vegetačním pokryvu (důležitý pro tvorbu DMP), a poslední, který může, ale nemusí, být odrazem od fyzického terénu (důležitý pro tvorbu DMR). Navíc lze registrovat intenzitu odraženého paprsku, čímž získáme obrazovou informaci o objektech na terénu. [14]

Navigační systém

Inerciální měřicí jednotka (z angl. Inertial Measurement Unit, dále jen IMU) je hlavní složka navigačních systémů, která je schopná měřit zrychlení a úhlovou rychlost. IMU je pevně spojena s tělesem klasické letecké měřické nebo digitální kamery a skládá se z trojice ortogonálních akcelerometrů, gyroskopů a elektroniky, která převádí analogové výstupy na digitální. Soustava gyroskopů dokáže velmi přesně určit náklony celého systému vzhledem k tížnici, přičemž jeden gyroskop je vždy svislý a ostatní jsou pak k němu kolmé. Akcelerometr měří zrychlení, což je derivace rychlosti podle času. „Akcelerometry jsou senzory pro měření statického nebo dynamického zrychlení, jsou vhodné nejen pro měření odstředivých a setrvačných sil, ale i pro určování pozice tělesa, jeho naklonění nebo vibrací.“ [23] Kombinací obou přístrojů lze tedy určit všech šest prvků vnější orientace skeneru. I když gyroskopy a akcelerometry dokáží měřit velmi přesně extrémně malé hodnoty, vlivem působení systematických chyb se vypočtená trajektorie letu od skutečné bude odchylovat a po několika sekundách (případně desítkách sekund) může odchylka překročit povolené meze.

Proto je nutné tato měření zpřesnit měřením prostorové polohy s frekvencí obvykle 2 Hz. K tomu slouží třetí část systému LLS – DGNSS. [14]

Diferenciální metoda GNSS (DGNSS)

V případě leteckého laserového skenování je žádoucí, aby prostorová poloha senzoru skeneru byla určena s přesností kolem 0,10 m. K tomu slouží zpřesňování GNSS měření pomocí referenční stanice, která zaznamenává GNSS data na bodě o známých souřadnicích a vypočítává korekce. Pokud ovšem není nutné nebo možné provádět měření polohy v reálném čase, naměřené hodnoty se vhodně uloží a později se při postprocessingu v kanceláři zpracují. [36] „Tyto korekce jsou následně posílány ve formě protokolu (RTCM) pomocí internetu, GSM nebo dlouhovlnného elektromagnetického signálu do přijímače GNSS. V současnosti existuje mnoho sítí permanentních referenčních stanic, např. americká SBAS, evropská EGNOS nebo česká CZEPOS. Pro potřeby mobilního skenování se většinou využívají přenosné referenční stanice, jež lze umístit v blízkém okolí skenovaného území a tím zajistit nejlepší kvalitu korekcí. Přesnost diferenciálního měření je v různých zdrojích uváděna různě, ale většinou v rozsahu 1,5 až 3 cm.“ [25]

Jmenované tři části tvoří ucelený systém pro letecké laserové skenování. Každý z nich používá k měření času vlastní, velmi přesné hodiny, které jsou vzájemně na sobě nezávislé. Všechna naměřená data jsou spojena do jednoho bloku až při vlastním zpracování pomocí speciálního programového vybavení (software). [14]

1.2.3 Příklady aplikací LLS

Tvorba DMP a DMR

Primárním výsledkem LLS je mračno bodů a následně z něj DMP, který vznikne z hodnot prvního odrazu. Tam, kde roste vegetace a jsou registrovány i hodnoty posledního odrazu, je pravděpodobné, že paprsek dosáhl až na skutečný terén a lze z těchto měření získat i DMR. Vytvoření DMR a DMP je předmětem rozsáhlého projektu ústředních správních orgánů – Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství – vytvořit v letech 2009 až 2015 nový, přesnější výškopis celého území České republiky ve verzi DMR i DMP. Tento projekt je přiblížen ve druhé kapitole diplomové práce.

Tvorba 3D modelu města

Pokud zvolíme dostatečně úzký úhel záběru, aby za budovami byly co nejmenší zákryty, a realizujeme-li podrobnou síť měřených bodů (ve vzdálenostech menších než 0,4 m), můžeme takto získaný DMP použít pro vytvoření podrobného 3D modelu města. Dále lze vytvořit 3D virtuální obraz města, jestliže digitální model povrchu pokryjeme ortofotem.

Sledování elektrického vedení

Ačkoli jsou dráty elektrického vedení velice slabé, je velká pravděpodobnost, že několik paprsků se od nich odrazí, jestliže skener působí ve výšce jen několika set metrů. Vznikne tak sice řídký, ale přesto dobře patrný obraz průběhu vedení a terénu pod ním. Pak už je jednoduché sledovat geometrii drátů nebo jejich ohrožení vzrostlou vegetací.

Měření výšky lesního porostu

Pokud laserový paprsek dokáže projít skrz koruny stromů až na terén a je registrován první a poslední odraz, je výška stromů rozdílem obou takto změřených výšek. [27]

Inventarizace lesů

Technologii LLS lze použít například i k inventarizaci lesů, pro kterou tato metoda poskytuje inovativní, přesný a nákladově efektivní přístup. Data LLS jsou využívána k získání informací týkajících se charakteristik stromů (hlavně výška stromu, průměr kmenu a průměr koruny). Z dat LLS lze vypočítat objem dřeva a biomasy. [40]

2 Východiska, postup a výsledky projektu tvorby nového výškopisu České republiky

2.1 Současný stav výškopisných databází

Výškopisná data a výškopisné produkty na území České republiky (dále jen ČR) jsou v současnosti vedeny v rámci Základní báze geografických dat (ZABAGED[®]). Tato data poskytují informace o výškových poměrech terénního reliéfu a spravuje je „Zeměměřický úřad v souborovém systému podle jednotných zásad jako výškopisnou část ZABAGED[®] a součást informačního systému zeměměřictví.“ [21] Výškopisnou část ZABAGED[®], kterou tvoří 3 typy objektů vrstevnic se základním intervalem 5, 2 a 1 m, doplňuje DMR v podobě pravidelné mříže (10 x 10 m) trojrozměrně vedených bodů. Tento DMR je odvozený z digitálního modelu reliéfu generovaného z vrstevnic a terénních hran ZABAGED[®].

Digitalizací vrstevnic Základní mapy 1:10 000 (dále jen ZM 10) byla v letech 1995 až 2000 pořízena výškopisná část ZABAGED[®]. Jelikož tyto vrstevnice pocházejí z topografického mapování České republiky z let 1957 až 1965, jsou v určitých oblastech zastaralé, nehomogenní a nevyhovují přesností ani kvalitou řadě standardů. Proto v letech 2005 až 2009 proběhla celoplošná kontrola a aktualizace výškopisných databází fotogrammetrickými metodami. Tímto byl minimalizován výskyt hrubých chyb a doplnily se vybrané terénní hrany (např. náspů, výkopů, břehů, nádrží, apod.). [21] Přesnost výšky vrstevnic v projektu ZABAGED[®] – **výškopis 3D vrstevnice** je závislá na členitosti a sklonu terénu a dosahuje 0,7–1,5 m v odkrytém terénu, 1–2 m v intravilánu a 2–5 m v zalesněném terénu. [6], [11] Data z tohoto projektu jsou zpřístupněna prostřednictvím prohlížečích služeb na webových stránkách *geoportal.cuzk.cz*.

V roce 2009 byl na celém území ČR dokončen odvozený digitální model reliéfu v podobě **pravidelné mříže (GRID) 10 x 10 m** trojrozměrně vedených bodů. Přesnost výšky vrstevnic v tomto odvozeném modelu dosahuje 1,5–2,5 m v odkrytém terénu, 2–3 m v intravilánu a 3–7 m v zalesněném terénu. [6], [11]

I přes následné aktualizace a modifikace dostupných výškopisných produktů se nepodařilo udržet aktuálnost a homogenitu výškopisných databází. Proto vyvstala potřeba znovu provést výškopisné mapování metodou, která by byla dostatečně přesná, neomezovala rozvoj informačních technologií a byla ekonomicky a produkčně nejefektivnější. Touto technologií se v dnešním digitalizovaném světě stalo letecké laserové skenování.

Výsledkem kritického zhodnocení současného stavu zpracování výškopisných databází na území České republiky a všech analýz proveditelnosti nového mapování výškopisu byl „Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky“. Projekt byl vypracován roku 2008 v Zeměměřickém úřadě (dále jen ZÚ) v Praze. Tento je realizován v rámci Dohody o spolupráci při tvorbě digitálních databází výškopisu území ČR mezi Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (dále jen ČÚZK), Ministerstvem zemědělství České republiky (dále jen MZe ČR) a Ministerstvem obrany České republiky (dále jen MO ČR). Základním cílem realizačního projektu LLS je nejen provést nové mapování výškopisu na území ČR, ale hlavně vytvořit nové **digitální databáze výškopisu**, které uspokojí potřeby a požadavky všech orgánů nejen státní správy a územní samosprávy České republiky, ale i Evropské unie, která rovněž využívá geografická data z našeho území. [7]

2.2 Postup a technologie zpracování

Na celém projektu spolupracují odborná pracoviště 24. základny dopravního letectva MO (24. ZDL), ZÚ a Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad (dále jen VGHMÚř). [8]

Letecké laserové skenování (LLS) je realizováno za pomoci systému LiteMapper 6800 firmy IGI GmbH s využitím leteckého laserového skeneru RIEGL LMS - Q680 s GPS a IMU. Nosičem leteckého laserového skeneru je letoun Ministerstva obrany ČR typu L 410 FG, což je speciální vojenské fotogrammetrické letadlo. Skenuje se z průměrné výšky 1200 nebo 1400 m nad střední rovinou terénu v jednotlivých blocích dle [8] a v závislosti na vegetaci. Pro realizaci LLS se bloky (převážně o šířce 10 km) s podobnými výškovými poměry a členitostí spojují do celků o maximální délce 60 km. Skenování pásma „Střed“ se uskutečnilo v období od 22. března do 10. října 2010, skenování pásma „Západ“ probíhalo od 9. března do 27. června 2011. [9], [10]

Další fází postupu **zpracování leteckých laserových dat je jejich předzpracování**, kdy se provádí jak analýza nezpracovaných dat s cílem nalezení jednotlivých odrazů laserového paprsku, tak i georeferencování jednotlivých odrazů paprsků. Zároveň probíhá i transformace souřadnic (do pracovního souřadnicového referenčního systému UTM/WGS84 G873²) a výškopisných údajů (do výškového referenčního systému Balt po vyrovnání; dále jen Bpv). „Pro georeferencování byla používána referenční data ve standardizovaném formátu RINEX nebo ve formátu Leica ze systému permanentních referenčních stanic CZEPOS, dále ze stanic spravovaných vědeckými a akademickými pracovišti v rámci výzkumné sítě VESOG a částečně také ze stanice POLOM spravované VGHMÚř. Výsledkem řešení jsou mračna výškových bodů georeferencovaná v souřadnicovém referenčním systému UTM (Universal Transversal Mercator) na elipsoidu GRS 80 (ETRS 89) a v systému elipsoidických výšek vztaženému k elipsoidu GRS 80. Veškeré následné zpracování dat se po dohodě s MO ČR uskutečnilo v souřadnicovém referenčním systému UTM na elipsoidu WGS 84-G873 a ve výškovém systému Bpv.“ [9]

Následuje **robustní filtrace** s využitím programu SCOP++ (viz kapitola 2.2.2) verze 5.4 firmy INPHO GmbH, který vyseparuje pomocí automatizovaných metod zaměřené výškové body ze vstupních mračen dat do samotných datových souborů. Tato data se roztřídí podle dopadu laserového paprsku na: terén (včetně skal), vegetaci, stavby, výškové překážky leteckého provozu a chybná měření (tzn. chybné odrazy od objektů mimo zemský povrch, např. letící pták). Úspěšnost správné klasifikace výškových bodů velmi závisí na stupni rozvinutí vegetace. V období březen – květen je úspěšnost přibližně 90%, v období červen – září orientačně 30-40%. [9], [10]

Dále následuje **interaktivní vizuální kontrola výsledků robustní filtrace**, která se provádí kvůli eliminaci chyb vzniklých v místech nespolehlivé robustní filtrace. Cílem je odhalení a přeřazení chybně zařazených bodů do odpovídajících datových souborů.

Jelikož výsledkem robustní filtrace pro kategorii „reliéf“ nejsou výhradně jen body ležící na terénu (jde zpravidla o body na nízké vegetaci), je nutné pro tvorbu DMR 5G

² „Písmeno G představuje zkratku GPS a číslo 873 znamená pořadové číslo týdne od zahájení fungování GPS, ve kterém byla do navigační zprávy signálu GPS zavedena zpřesněná varianta geodetického systému WGS84.“ [24]

ve čtverci sítě 5 x 5 m **vybrat reprezentativní výškový (uzlový) bod reliéfu v zemědělsky obhospodařovaných oblastech**. Zpracovávané oblasti se rozdělí na čtverce o délce strany 5 m, ve kterých se vybere jeden uzlový bod jako bod s nejnižší výškou. U tohoto se předpokládá, že reprezentuje terénní reliéf. Zároveň se kontroluje, zda se jeho výška příliš neodlišuje od okolních bodů. Pokud ano, lze jej uznat za „zbloudilý“ bod, a proto se vybere bod jiný, který podmínky uzlového bodu splňuje. Výsledkem této fáze postupu je množina nerovnoměrně rozložených bodů reliéfu, která je jeho generalizovaným modelem.

Výběr reprezentativního výškového bodu terénu probíhá následně i v **ostatních zemědělsky neobhospodařovaných oblastech**. Tato část postupu je řešena generalizací modelu výběrem reprezentativních výškových bodů v síti 1 x 1 m. Zpravidla se jedná o stejný postup (s podobnými výstupy) jako v předchozím odstavci této práce.

Dále se pokračuje **interpolací výškového modelu terénu v oblastech neobsahujících naměřená data** (např. vodní plochy, pod budovami a částečně i v hustých vegetačních prostorech). Z nepravidelné sítě okolních blízkých výškových bodů reliéfu se interpolují body reprezentující výšku v těchto místech. Model se doplní o „uměle vytvořené body v pravidelné síti 5 x 5 m zobrazeného souřadnicového referenčního systému UTM/WGS 84 G873“ [10]. Při tomto procesu se využívá interpolační funkce programu SCOP++ s využitím metody adaptabilní lineární predikce³. [9], [10]

Další fází procesu je **zjednodušení modelu reliéfu při zachování maximální úplné výškové chyby**. Při řešení toho problému dochází k odstranění nadbytečných bodů a zároveň k úpravě výšky bodů (povolená maximální úprava výšky je 0,16 m). Podrobněji je uvedeno v literatuře [10].

Následně se **odstraní systematická složka chyby měření leteckým laserovým skenerem**. Na 178 komparačních základnách rozmístěných po celém pásmu Střed bylo provedeno testování absolutní přesnosti výškového měření. Vyhodnocením byla zjištěna v pásmu Střed systematická složka chyby měření po vyrovnání sousedních pásů a bloků, která byla z dat DMR 5G hromadně odstraněna. Více informací se nachází v literatuře [10].

³ Adaptabilní lineární predikce využívá adaptivní filtr k odhadu budoucích hodnot signálu založeného na předchozích hodnotách signálu. [42]

Po odstranění systematické složky chyby měření přichází na řadu **separace uměle vytvořených výškových bodů**, při které se vytvoří „podklad pro eventuální identifikaci uměle vytvořených výškových bodů (viz výše) v DMR 5G. Jedná se o místa, která mohou mít sníženou kvalitu výškových dat. Uměle vytvořené body jsou v modelu charakteristické svými zaokrouhlenými souřadnicemi E, N (mají hodnoty *0,00, respektive *5,00 m). Tyto body jsou ponechány v DMR 5G, současně jsou kopírovány do speciálního souboru, ale nejsou standardně distribuovány.“ [10]

Poslední fází procesu je **transformace výškových bodů do S-JTSK**. Ve výškovém referenčním systému Bpv jsou tyto body již od počátku zpracovány (viz výše). [9], [10], [33]

Zpracovávaná data jsou ukládána jednak v „Systému řízení databáze TopDM s databázovým systémem Oracle“ (dále jen TopDM/Oracle) a jednak v souborové struktuře vhodné pro následná zpracování v programech SCOP++ Lidar, DTMaster, LaserSupport a dalších. Správu dat v jednotlivých úložištích zabezpečují stanovení pracovníci správy dat. Jiní pracovníci nemají k datovým úložištím v databázi TopDM/Oracle přímý přístup. Podrobněji je uvedeno v literatuře [8].

2.2.1 Filtrace dat leteckého laserového skenování

Přestože největší předností LLS je schopnost laserového paprsku proniknout vegetací až na úplný terén pod ní, jsou leteckým laserovým skenováním měřeny nejen body terénu, ale i body na objektech, které se na terénu nachází (např. budovy, silnice, elektrické vedení, atd.). Zpracování dat LLS se děje pomocí metod filtrace a klasifikace bodů, které jsou klíčové pro další práci s daty. Filtrace znamená, že jsou vyhledávány pouze body ležící na určitém povrchu (zpravidla terénu) a klasifikace představuje proces, kdy jsou všechny body roztrženy do předdefinovaných tříd. Metod a principů filtrací je mnoho a je třeba dostatečně zvážit, na jaká data se bude filtrace aplikovat a jaké výsledky při klasifikaci potřebujeme získat. Důležitými kritérii při výběru filtru je zahrnutí počtů odrazů a typu odrazu dat z LLS, postup zpracování dat, formát vstupních dat, charakteristiky iterace, definice blízkého okolí⁴ a dalších klíčových faktorů používaných v pozemním filtrovacím procesu. [15], [30]

⁴ Studie prokázaly, že velikost dvourozměrného okolí je rozhodující pro výkon filtrace. [30]

Pro filtraci dat LLS existuje několik typů filtrací, jejichž postupy budou v této kapitole blíže popsány. Mnoho informací lze získat i v literatuře [15].

Mezi jeden z typů filtrace dat LLS řadíme například **filtr založený na sklonu** (např. Sithole, Roggero), ve kterém se měří sklon nebo výškový rozdíl mezi dvěma body. V případě, že je hodnota sklonu vyšší než daná prahová hodnota nejvyššího bodu, pak se předpokládá, že patří k objektu.

Dále sem patří **filtr blokového minima** (např. Wack), ve kterém je definována diskriminační funkcí vodorovná rovina s odpovídající obalovou zónou nad ní. Obalová zóna definuje oblast ve 3D prostoru (očekává se, že body „holé země“ jsou uvnitř ní).

Další typ **filtru**, který je **založen na povrchu** (např. Pfeifer, Elmqvist, Axelsson, Sohn), funguje na stejném principu jako filtr blokového minima pouze s tím rozdílem, že diskriminační funkcí je parametrický povrch.

Dalším typem filtru je **filtr založený na shluku/segmentaci** (např. Brovelli), kde platí, že všechny body shluku patří do objektů na zemském povrchu (shluk se nachází nad blízkým okolím). Při provádění klasifikace shlukováním lze použít např. informaci o poloze bodu, výškového rozdílu na sousední body a popis parametru z hlediska jeho tečné roviny. [34], [35]

Dále sem patří **morfologické filtry**, které se zabývají strukturou prvku. Používá se popis přípustného výškového rozdílu v závislosti na vodorovné vzdálenosti. Čím menší je vzdálenost mezi bodem na povrchu a jeho sousedními body, tím nižší výškový rozdíl může být mezi nimi akceptován. Morfologické filtry mají schopnost celkově odstranit objekty mimo zemi, jako jsou budovy a stromy, ovšem problém mají při odstraňování objektů na zemském povrchu různých velikostí.

Dále sem zahrnujeme **filtr směrového skenování**, který počítá sklon svahu a výškový rozdíl podél skenovací čáry. Porovnává body se svými bezprostředními sousedy a bylo prokázáno, že je velmi citlivý při odstraňování bodů v nízké vegetaci a na náhlé změny povrchu terénu.

Následuje **filtr založený na vrstevnicích**, který funguje podobně jako síť postupně odstraněných bodů mimo terén na základě měřené síly, jako například gravitace a přitažlivost. Tento algoritmus využívá aktivní tvar modelu představující trojrozměrné vrstevnice.

Lze sem zahrnout i iterativní **filtr založený na TIN** (neboli algoritmus the despiked Virtual Deforestation, VDF) odstraňující body mimo terén v závislosti na plynulosti země. Tento algoritmus předpokládá, že oblasti na zemi jsou většinou hladké povrchy bez ostrých hran v holém povrchu terénu. Proto jsou body s ostrými hranami definovány jako body mimo terén. Tento filtr úspěšně odstraňuje drobné stavby a většinu mostů, ale nedaří se mu odstraňovat některé rozlehlé nízké budovy. Špatně odstraňuje i některé záporné hrubé chyby, které mají extrémně nízké hodnoty a často jsou odstraňovány jako šum v některém předcházejícím procesu.

Filtr založený na interpolaci je dalším typem filtru. Zde se porovnává výška bodů s odhadem hodnot prostřednictvím různých interpolačních metod. Často se používá metoda lineární interpolace potřebná k použití iteračního procesu pro minimalizaci vlivu místních bodů, které nejsou na povrchu. Omezená použitelnost této metody je při aplikaci na povrch s nerovným terénem a prudkým sklonem svahu.

Posledním typem filtru je **filtr založený na modelu povrchu celistvého souboru bodů** (datasetu), který se iterativně blíží povrchu terénu. První model povrchu se používá k výpočtu rozdílů mezi body a povrchem modelu. V případě, že měřené body leží nad ním, mají v další iteraci menší vliv na tvar povrchu, v případě, že leží bod pod ním, mají tyto body vliv větší. Lze použít i *lineární predikci* (Této metodě, jelikož ji používá program SCOP++, je věnována kapitola 2.2.2) s individuální bodovou přesností pro model povrchu a váhovou funkci s pevným nastavením pro výpočet váhy na základě rozdílů mezi body a povrchem modelu. Body s vysokou vahou mají malé zbytky a tím i větší vliv na průběh povrchu. Body s nízkou vahou mají velké zbytky a odpovídajícím způsobem menší vliv. Existuje i metoda, která je dána hierarchickým přístupem pro zpracování velkých budov a pro snížení výpočetního času. [30], [39]

Dále lze filtrační algoritmy rozdělit na dvě skupiny. Některé filtrační algoritmy **klasifikují body při jednom průchodu algoritmu** (např. Sithole, Roggero), zatímco jiné využívají **iterace** (Pfeifer, Elmqvist, Axelsson, Sohn,...), a tím klasifikují body ve více

průchodech. Výhodou algoritmů s jedním průchodem je výpočetní rychlost. Ta je ovšem vykoupena přesností metody iterace s odůvodněním, že při každém průchodu iterace jsou shromažďovány informace o sousedních bodech, a tím lze získat spolehlivější klasifikaci. [34]

Následně lze přístupy filtrací rozdělit na metodu **redukce** či **nahrazování**. Metoda redukce (např. Sithole, Roggero, Axelsson, Pfeifer, Sohn) operuje tak, že filtrovaný bod odstraní z mračna bodů, a je typická pro algoritmy, které operují na nepravidelně rozmístěných mračnech bodů. Oproti tomu stojící metoda nahrazování (např. Elmqvist, Brovelli, Wack), která je typická pro algoritmy operující s pravidelně rozmístěnými mračny bodů, filtrovaný bod vrátí do mračna bodů s rozdílnou výškou (obvykle interpolované ze svého okolí). [34]

Posledním rozdělením filtračních metod je **použití pouze prvního odrazu pulsu** (např. Brovelli) a **použití více odrazů pulsu**. Více odražených impulsů lze využít v zalesněné oblasti, kde je namíste získávat více odrazů kvůli správné identifikaci vegetace (první odraz je obvykle koruna stromů, následné odrazy jsou z povrchu pod korunami stromů). Doplnkem k této metodě vícečetných registrací odrazů je intenzita vráceného pulsu. Rozdílné povrchy na Zemi mohou impulsy různě absorbovat, popř. odrážet, a proto lze tyto informace použít při klasifikaci bodů. Je nutné podotknout, že žádná z filtračních metod nevyužívá intenzitu odrazu. [34]

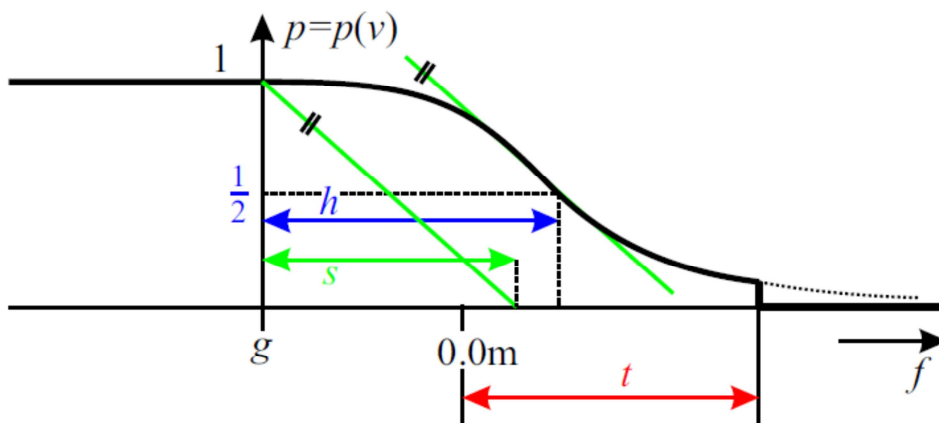
Nejnovější generace tzv. „**full-wave**“ **skenerů** poskytuje informace o tvaru a šířce odrazu pulsu, které je pak možné využít při filtraci. Bylo zjištěno, že při následném vytvoření DMT je tento přístup přesnější než obvyklé filtrační metody. Takto jsou účinněji odstraněny body v husté nízké vegetaci. Výkon stávajících filtračních algoritmů závisí na typu krajiny, pomocí generace „full-wave“ skenerů je možné automaticky zjistit charakteristiku krajiny a tím zvýšit automatizaci filtračního postupu. [28]

2.2.2 Filtrace v programu SCOP++

Program SCOP++ interpoluje lineární predikcí hybridní rastrový DMR na základě nepravidelných bodů a vektorových dat. Tato metoda je založena na předpokladu, že výšky bodů terénu jsou po odstranění trendu korelovány (korelace je funkce horizontální vzdálenosti mezi body). „V rámci aplikace algoritmu lineární predikce jsou definovány vazby každého bodu s každým. Ty jsou podkladem pro určení vah, například bodu pod úrovní přibližného

terénu je přiřazena váha 1 a bodu vysoko nad terénem váha 0. Následně je vypočten nový průběh terénu se zohledněním nově určených vah. Tento postup je iterační a je opakován tak dlouho, dokud všechny body nejsou klasifikovány buď jako bod na terénu a nebo body ostatní.“ [15]

Pokud se vyskytnou hrubé chyby, bude lineární predikce nestabilní. Proto je třeba nalézt robustnější přístup. Tím je robustní interpolace, která byla vyvinuta pro DMR generovaný z dat leteckého laserového skenování v zalesněných oblastech. V tomto procesu je současně prováděno odstranění hrubých chyb a interpolace terénu. Robustní interpolace se skládá ze tří kroků. **Nejdříve** se provede interpolace z modelového povrchu lineární predikcí s ohledem na jednotlivé váhy každého bodu (v počátku se předpokládá, že všechny váhy se rovnají). **Poté** následuje výpočet vah filtru, na základě vertikální vzdálenosti měřených bodů od interpolovaného povrchu. **Nakonec** se realizuje zpětný výpočet vah jednotlivých bodů. Ten se provede v závislosti na hodnotách filtru za pomoci váhové funkce přizpůsobené stochastickým vlastnostem hodnot filtru z bodů nacházejících se mimo terén. Tento postup je v iteračním procesu realizován tak dlouho, dokud nejsou všechny hrubé chyby eliminovány. Odstranění hrubých chyb (bodů mimo terén) řídí váhová funkce, která je regulována třemi parametry (viz obrázek 2.1): poloviční váha h (poloha hodnoty filtru, které dosáhne váha 0,5), sklon s (kotangens na svahu při $v = h$) a oříznutý bod t . Hodnoty pro h , s a t lze nastavit nezávisle pro kladné i záporné větve váhové funkce, tj. pro body nad a pod interpolovaným povrchem v předchozí iteraci. V důsledku toho může být váhová funkce asymetrická. To umožňuje upřednostnit body na nebo pod středním povrchem (body považovány za body terénu) a na snížení váhy bodů nad střední hodnotou povrchu, pro které je více pravděpodobné že budou mimo terén. Tato funkce je také posunutá o hodnotu g . Toto by měla také kompenzovat skutečnost, že pro průměrovaný povrch je více pravděpodobné, že bude výše než terén pod ním. Výběrem váhové funkce asymetrické nebo excentrické se modeluje skutečné rozložení chyby bodů mimo terén s ohledem na terén. [5], [17], [29]



Obrázek 2.1: Ilustrace vztahů váhové funkce, [29]

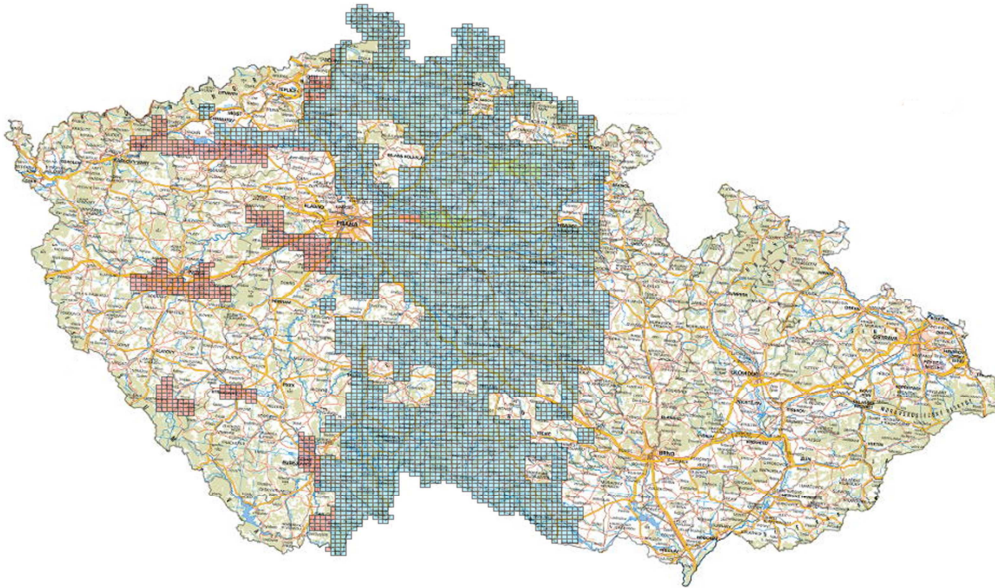
2.3 Výsledné produkty

Výslednými produkty „Projektů tvorby nového výškopisu území České republiky“ by měly být (dle [8]):

1. Digitální model reliéfu území České republiky 4. generace (**DMR 4G**) ve formě mříže (GRID) 5 x 5 m s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. Termín dokončení je konec roku 2013. Začátkem roku 2011 bylo zahájeno poskytování dat tohoto produktu z cca 1/3 území ČR.
2. Digitální model reliéfu území České republiky 5. generace (**DMR 5G**) ve formě nepravidelné sítě výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Termín dokončení je konec roku 2015.
3. Digitální model povrchu území České republiky 1. generace (**DMP 1G**) ve formě nepravidelné sítě výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohrazené (lesy a další prvky rostlinného půdního krytu). Termín dokončení je konec roku 2015.

K 16. 5. 2013 pokrývají datové sady DMR 4G celé pásmo „Střed“ a „Západ“, což odpovídá 67,9 % z celkové rozlohy České republiky. Datové sady DMR 5G pokrývají k témuž datu 33,4 % území České republiky (viz obrázek 2.2) a DMP 1G je zatím vytvořen (k témuž datu) pro přibližně 33 % území České republiky. Dle aktuálních informací

ze Zeměměřického Úřadu se v pásmu „Východ“ skenovalo po roční přestávce až letošním roce. V tomto pásmu je nyní leteckým laserovým skenováním provedeno přibližně 59 % území.



Obrázek 2.2: Pokrytí ČR datovou sadou DMR 5G k 16. 5. 2013, [21]

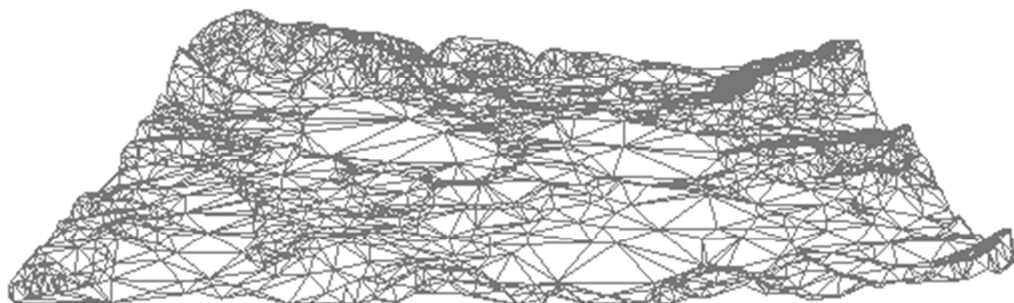
Díky výše uvedenému projektu a jeho výsledným produktům by měly být vytvořeny zcela nové výškopisné databáze na území ČR. DMR 5G se stane základní a trvale aktualizovanou výškopisnou databází, ze které budou generovány odvozené výškopisné produkty a databáze pro různé aplikace a informační systémy veřejné správy ČR. Tím by se mělo dosáhnout výrazného zlepšení např. při aplikaci přesných výškopisných modelů v oblastech rozvoje krizového řízení, v územním plánování, při národní inventarizaci lesů, ale i kontaminovaných míst, při výpočtech objemů srážek a odtoků z povodí, při vymezení záplavových území a také při projektování pozemní, dopravní a vodohospodářské výstavby. [7]

V resortu ČÚZK umožní kvalitnější výškopis tvorbu nové generace Ortofot ČR s rozlišením 0,25 m v území s absolutní polohovou přesností lepší než 0,5 m, dále i zvýšení přesnosti ZABAGED® až o 50 % současné polohové přesnosti a v neposlední řadě i zkvalitnění tvorby vrstevnic ve státních mapových dílech v měřítku 1:5000 a 1:10 000. [6]

V nadnárodním měřítku by tento projekt měl pomoci např. při vytvoření a aktualizaci registru půdy pro administraci a kontrolu zemědělských dotací na skutečně obdělávanou plochu a v neposlední řadě na poskytování geoprostorových obrazových dat z území ČR pro účely Evropské unie v rámci projektu INSPIRE. [6], [33]

3 Terény a pohledové pyramidy

Datová sada terén (dále jen Terrain dataset) obecně slouží ke zpracování 3D dat, jejich správě a efektivnímu zobrazení ve formě TIN (z angl. triangulated irregular network). TIN (viz obrázek 3.1) je nepravidelná trojúhelníková síť sestavená z navazujících a nepřekrývajících se trojúhelníků, přičemž uvnitř každého trojúhelníku je povrch reprezentován plochou trojúhelníku). Každý vrchol trojúhelníku je reprezentován svými souřadnicemi x , y , z . Terrain dataset může uvnitř File GDB pomoci efektivně spravovat, zpracovávat a integrovat mračna bodů (viz výše v kapitole 1.1.1) z 3D dat, které se dají pořídit pomocí sonarů, LIDAR a dalších technologií.



Obrázek 3.1: Ukázka TIN, [22]

Do Terrain dataset lze naimportovat data z různých formátů, přičemž existuje mnoho nástrojů pro import dat do Terrain dataset. Za zmínku stojí např. nástroj **LAS To Multipoint**, který umožňuje importovat data v binárním souborovém formátu LAS. Pokud jsou poskytnutá data ve formátu XYZ (tzn. s kódováním ASCII), je nutné tento typ dat importovat pomocí nástroje **ASCII 3D To Feature class** (viz dále v kapitole 4.1.2).

V rámci Terrain dataset je možné vytvořit *pohledové pyramidy* (Terrain pyramids) založené na vektorových datech, které umožňují rychlejší zobrazování dat. Pohledové pyramidy jsou úrovně detailu povrchu generované z Terrain datasetu pro zvýšení efektivity práce s DMP. Používají se pro generalizace terénu závislé na měřítku. Jednotlivé úrovně pohledové pyramidy fungují na principu ředění bodů dle různých postupů (viz dále v kapitolách 3.1 a 3.2). Pohledové pyramidy jsou ve svém pojetí a účelu podobné rastrovým pyramidám, ovšem jejich implementace se liší.

Pohledové pyramidy jsou generovány pomocí ředění bodů (vypuštění podstatné části bodů TIN), které se používají k sestrojení TIN. Tím se snižuje počet měření (např. bodů), kterými je reprezentován povrch pro danou oblast. Pro každý další vyšší stupeň pohledové pyramidy se používá méně bodů a zmenšují se požadavky na přesnost. Pro tvorbu vyšších úrovní pohledových pyramid se používají původní data, nikoliv tedy data odvozená, průměrovaná a „převzorkovaná“.

Tvorba pohledových pyramid je časově velmi náročná, proto je nutné celé nastavení a postup práce předem důkladně zvážit. [1]

Existují dva typy pohledových pyramid: **Window size** (dále jen WS) a **Z-tolerance**. Základní rozdíl mezi těmito dvěma typy pohledových pyramid je, že pyramida typu WS je založená na polohovém kritériu, kdežto pyramida typu Z-tolerance je založena na kritériu výškovém. Podrobnější vlastnosti obou typů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

	Window size	Z-tolerance
Silné stránky	Při tvorbě časově rychlejší.	Pro tvorbu úrovní pyramid je třeba znát orientační vertikální přesnost naměřených dat.
	Účinnost ředění je nezávislá na variabilitě povrchu.	Ředění dat se přizpůsobí variabilitě povrchu, zachová naměřené body pouze v případě potřeby.
	Znamé rozlišení horizontálního vzorkování.	
	Jednotlivé pyramidové úrovně mají předvídatelný (maximální) počet vzorkování	
Slabé stránky	Rovinná nebo málo sešikmená území mohou být „nadhodnocena“.	Při tvorbě časově náročnější.
	Vegetace nebo budovy mohou být „podhodnocené“.	Řídká data obsahují nedostatek stavebních objektů a vegetace.
	Vertikální přesnost zředěných dat je neznámá.	
Vhodné pro data	Vhodné pro všechny typy povrchů.	Vhodné pro data „holého terénu“ (DMR) a batymetrická data (batymetrie je obor zabývající se měřením hloubky moře).

Tabulka 3.1: Porovnání pohledových pyramid Window size a Z-tolerance, [1]

3.1 Pohledová pyramida typu Window size

Pohledová pyramida typu WS „řadí“ body pro každou pyramidovou úroveň na základě rozdělení území zdrojových dat do stejných oken (čtverců), jak je patrné z ukázky ředění bodů metodou WS na obrázku 3.2. Ze shora zleva jsou postupně zobrazena data v plném rozlišení (bez použití metody WS), data v první, v druhé a třetí úrovni pyramidy. Z těchto čtverců je vybrán vždy jen jeden bod⁵ pro reprezentaci terénu. Například pro WS 4 to znamená, že ve čtverci o velikosti 4 x 4 m se vybere ze všech bodů, které se na čtverci nachází, jen jeden bod, a to v závislosti na zvolené metodě WS:

- **WS max** vybere bod s nejvyšší nadmořskou výškou,
- **WS min** s nejnižší nadmořskou výškou,
- **WS mean** s průměrnou nadmořskou výškou,
- **WS minmax** tato metoda vybírá body dva, a to s nejvyšší a nejnižší nadmořskou výškou. [1]

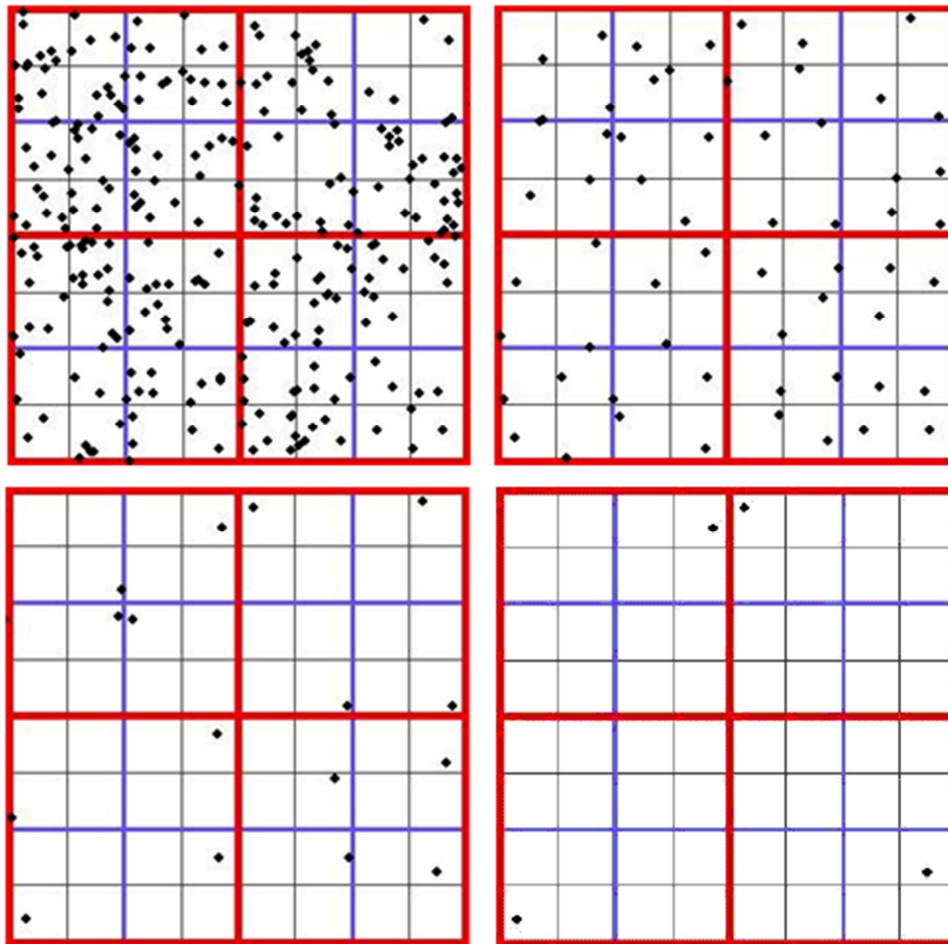
Metody	Zaměření	Doporučené aplikace
WS min	Zaměřuje se na lokální minima (např. řeky, údolí).	<ul style="list-style-type: none"> • vodní prvky pro vodní zdroje • body DMR
WS max	Zaměřuje se na lokální maxima (např. hřebeny, vrcholky).	<ul style="list-style-type: none"> • body DMP • výše položená místa pro leteckou navigaci • mělká místa pro vodní plavbu
WS mean	Vyhýbá se extrémům.	<ul style="list-style-type: none"> • obecné zastoupení pro topografické mapování
WS minmax	Zachycuje extrém, nemá tak úzké zaměření jako WS min a WS max.	<ul style="list-style-type: none"> • vysoko a nízko položené body pro topografické mapování

Tabulka 3.2: Srovnání metod u Window size, [1]

Vzorkovat (volit velikost okna) má smysl začít na dvojnásobku průměrné vzdálenosti bodů, tzn. pro point spacing 1 m je doporučeno začít s Window size 2. [1] Hodnoty WS pro další pyramidy pak rostou vždy dvakrát vzhledem k předchozí velikosti okna (tedy např. 2, 4, 8, 16, ...).

⁵ V případě metody WS minmax jsou vybrány body dva.

Růst velikosti okna by měl být ukončen tehdy, pokud šířka území v metrech vydělená WS spadne do rozmezí 1/500 až 1/1000. Vychází to z rozsahu území a ředění bodů okny. [1]



Obrázek 3.2: Ukázka ředění bodů pohledové pyramidy typu WS, [1]

3.1.1 Parametr Sekundární ředění

Při používání metody Window size se při jejím nastavení objeví možnost použít kromě výše popsaného primárního ředění bodů také ředění sekundární. Sekundární ředění může zredukovat počet bodů pohledových pyramid nad rámec ředění provedeného přes primární okno filtrování. Sekundární ředění začíná pracovat od „nejhrubší“ pohledové pyramidy tak, že zkoumá data v každém okně. Pokud je rozsah Z souřadnic sousedních bodů menší než uživatelem definovaná prahová hodnota (viz dále v kapitole 5.1), je území považováno za rovinné. Účinek sekundárního ředění je více patrný na nižších úrovních pyramidy (tzn. z většího měřítka), protože menší rovné plochy jsou častější než rovné plochy o větší rozloze.

Prahová hodnota sekundárního ředění by měla být nejméně tak velká jako vertikální přesnost zadaných dat kvůli odstranění šumu nad prahovou hodnotou. Pokud se zadá vyšší hodnota, zředí se tím více bodů a tím dojde k rychlejšímu vykreslování terénu. Schopnost rozlišit povrchové útvary se ale bude snižovat, což platí o práci s pyramidami obecně.

Dále je možno zvolit tři způsoby sekundárního ředění: mírné, přiměřené a silné.

Mírné ředění (mild) – nejlépe zachovává lineární nespojitosti (např. hranice staveb a lesů). Doporučuje se pro LIDAR data, která zahrnují body z digitálního modelu reliéfu i z digitálního modelu povrchu. Tato metoda ředí nejméně bodů, proto bude použita v praktické části této práce (viz dále v kapitole 5.1).

Přiměřené ředění (moderate) – poskytuje kompromis mezi výkonem a přesností. Nezachovává takové podrobnosti jako Mírné ředění, ale celkově ředí více bodů. Metoda Přiměřeného ředění je vhodná pro všechny typy dat.

Silné ředění (strong) – ředí nejvíce bodů. Zároveň je méně pravděpodobné, že zachová ostře vykreslené prvky. Jeho použití by mělo být omezeno na povrch, kde má svah tendenci postupně se měnit. Silné ředění je vhodné například pro data LIDAR z DMT a batymetrii. [1]

3.2 Pohledová pyramida typu Z-tolerance

Pohledová pyramida typu Z-tolerance aproximuje (zjednodušuje) terénní členitosti v důsledku zjednodušení popisu terénu (ukázka ředění bodů je zřejmá z Přílohy A). Vertikální přesnost pyramidové úrovně Z-tolerance je vždy v poměru k vertikální přesnosti zdrojových (původních) dat (tzn. dat v plném rozlišení). Například pokud mají zdrojová data známou vertikální přesnost 0,15 m a Z-tolerance první úrovně pyramidy je 0,15 m, nebude absolutní přesnost první úrovně pyramidy horší než 0,3 m.

Počet úrovní pohledových pyramid lze odvodit z měřítka, které bude při nastavení přiřazeno určité úrovni pohledové pyramidy, z vrstevnic, z rozsahu Z souřadnic a z výškové variability terénu (zároveň bude nutné přihlídnout i k počtu bodů v jednotlivých úrovních, viz dále v kapitole 6.3). Nastavená výšková tolerance první úrovně pyramidy by měla být buď rovna, anebo větší než přesnost naměřených dat. [13]

4 Práce v ESRI Geodatabázi

Převážná část této diplomové práce se zakládá na výpočtech z LIDAR dat, na zhodnocení výsledků těchto výpočtů a na doporučeních při podobné práci s LLS daty pro další uživatele. K dosažení cílů bylo nutné provést výpočty s použitím dat ve vhodném programu. Využit byl software ArcGIS verze 10.

Stručný popis postupu práce s LLS daty bude rozdělen do tří základních částí a v dalších kapitolách rozveden podrobným vysvětlením, kterému by měl porozumět pokročilý uživatel software ArcGIS.

První částí je separace dat. V této části se nejprve všechna vstupní data naimportují do Geodatabáze, kde se rozdělí (oříznou) na vybrané oblasti.

V druhé části dochází ke tvorbě terénů. V každé oblasti se z dat pro vytvoření DMR i DMP vytvoří TIN. Ten lze v programu ArcGIS vytvořit dvěma různými metodami (Window size a Z-tolerance), přičemž každá metoda má své přístupy k tvorbě digitálních modelů terénů, čímž vznikají rozdílné výsledky. Nad těmito různými terény se dále vytvoří pohledové pyramidy (viz kapitola 5).

V poslední části, analýzy pohledových pyramid, se budou jednotlivé úrovně pohledových pyramid digitálních modelů terénu odečítat od základního (nezřaděného) původního terénu. Provedou se výpočty rozdílů objemů jednotlivých trojúhelníků TIN v různých úrovních pohledových pyramid a také výpočty systematických a náhodných chyb, které budou následně analyzovány. Důležitou součástí práce je také převod TIN na body, jež TIN tvoří. Tato konverze je významná k určení celkového počtu bodů, který vstupuje do vytvořeného modelu, a tudíž k pochopení, jak funguje ředění bodů pro pohledové pyramidy.

Pro přehlednost, uživatelskou jednoduchost i intuitivní práci bude první část postupu práce prováděna v ModelBuilder. Celý postup je rozdělen do výše uvedených tří částí; uživatel je může použít každou zvlášť bez ohledu na předchozí či následující krok. To umožňuje mnohostranněji využít každou část samostatně. Samozřejmě lze tyto tři kroky následně spojit. Je potřeba podotknout, že druhou (tvorbu terénů) a poslední část (analýzy terénů a jejich pohledových pyramid) bylo nutné provést skriptovacím jazykem v prostředí

Python, neboť při složitějších nastaveních a analýzách se nástroje ModelBuilder ukázaly jako nedostatečné.

Cílem této práce je určení nejvhodnější metody tvorby pohledových pyramid v programu ArcGIS pro různé typy území. Software ArcGIS byl použit z důvodu návaznosti na mé dřívější semestrální práce z různých předmětů oboru Geomatiky na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

4.1 Separace dat

4.1.1 Vstupní data

V rámci diplomové práce bylo nejprve nutné zjistit bližší informace o použitých LIDAR datech. Data pochází z území snímkování pásma „Západ“, přesněji z území města Plzně. Výšková absolutní přesnost těchto dat je zhruba 0,15–0,30 m [41] a průměrná vzdálenost bodů (angl. Average point spacing) je přibližně 1 m (tato vlastnost byla ověřena pomocí nástroje **Point File Information**, který se nachází mezi nástroji software ArcGIS v nabídce *3D Analyst* → *Conversion* → *From File*).

Byly vybrány celkem 4 zkušební oblasti (viz obrázek 4.1), které reprezentují různé typy městského území. První zájmové území (označené zelenou barvou) je panelová zástavba města se zázemím, jako je např. škola, školka, hřiště, obchod a silnice (v tomto případě jde o městskou část Bolevec). Druhé zájmové území (označené žlutou barvou) představuje souvislý lesní porost (jde o městskou část Valcha). Třetím zájmovým územím (označeném fialovou barvou) je vesnická zástavba s přílehlým okolím, jako jsou např. louky, pole a remízky (zde bylo vybráno rozhraní dvou městských částí Křimice a Radčice). Posledním zájmovým územím (označeném modrou barvou) je střed města s pravidelnou blokovou zástavbou.



Obrázek 4.1: Přehled zájmových oblastí na území města Plzně

Vybrané oblasti jsou čtvercového tvaru o délce strany 1000 m a výšková variabilita je od 292 do 447 m n. m., tzn. rozsah výškové souřadnice Z (angl. Z-range) je 155 m (tyto vlastnosti byly také ověřeny pomocí nástroje **Point File Information**).

Na tomto místě je vhodné podotknout, že „Diplomová práce vznikla s využitím dat, která poskytl Zeměměřický úřad.“ Poskytnutá data byla dodána v sedmi souborech, jejichž název se skládá z čísla skenovaného pásu a připojení jednoho písmena abecedy (viz obrázek 4.2). Tato písmena vznikla po automatické filtraci programem SCOP ++ LIDAR (viz kapitola 2.2.2). *Písmeno g* (z angl. ground) znamená „holý terén“, *písmeno v* (z angl. vegetation) znamená vegetace a *písmeno b* (z angl. buildings) znamená budovy. *Písmeno m* znamená mosty. Do tohoto souboru by měly být přidány při manuální editaci mostovky. *Písmeno h* představuje „výškovou chybu“ či „výškové překážky“, které byly vyhodnoceny ve výšce 46 m nad terénem. Do souborů s *písmenem f* doplnil program SCOP ++ LIDAR pravidelnou mřížku 5 x 5 m tam, kde se nacházelo málo LLS dat (např. vodní plochy, místa pod budovami). *Písmeno e* znamená „hrubé chyby“, což představuje body, které byly pomocí SCOP ++ LIDAR vyhodnoceny jako body nacházející se 10 m pod terénem. V lesním porostu

došlo ke klasifikaci terénu do korun stromu, proto se může v tomto případě jednat, i když jen výjimečně, o skutečný terén.

Název	Přípona	Velikost
[.]		<DIR>
pf_378_5506_b	xyz	1 899 810
pf_378_5506_e	xyz	0
pf_378_5506_f	xyz	33 858
pf_378_5506_g	xyz	139 855 428
pf_378_5506_h	xyz	3 458
pf_378_5506_m	xyz	57 950
pf_378_5506_v	xyz	36 245 008

Obrázek 4.2: Názvy souborů vstupních dat

Pro zhodnocení postupu tvorby digitálních modelů terénu v prostředí ArcGIS budou pro každý druh území vytvořeny dva typy dat (DMR a DMP). Digitální model povrchu využívá všechny dodané soubory měření (tzn. *písmeno b, e, f, g, h, m a v*) a digitální model reliéfu využívá pouze souborů s *písmenem g* („holý terén“).

LIDAR data jsou uložena ve formátu XYZ. „Je to velmi jednoduchý formát pro zaznamenávání bodů v 3D prostoru. XYZ soubor má jednoduchou strukturu a řídí se jednoduchými pravidly:

- Řádky s komentářem začínají znakem "#" v prvním sloupci a mohou se objevit kdekoli v dokumentu.
- Prázdné řádky se mohou taktéž objevit kdekoli.
- Souřadnice bodu jsou zapsány na jednom řádku a jsou oddělené mezerami.“

[12]

Z obrázku 4.3 je patrné, že první souřadnice odpovídá v souřadnicovém systému JTSK souřadnici Y, druhá souřadnici X a třetí souřadnice představuje souřadnici H ve výškovém systému Balt po vyrovnání.

ID	X	Y	Z
1	-825730.093	-1071102.124	356.550
2	-825730.279	-1071103.635	356.554
3	-825730.466	-1071105.057	356.510
4	-825730.668	-1071106.605	356.467
5	-825730.867	-1071108.063	356.395
6	-825731.084	-1071109.624	356.295
7	-825731.132	-1071101.327	356.521
8	-825731.299	-1071102.771	356.565
9	-825731.477	-1071104.228	356.575
10	-825731.695	-1071105.765	356.463

Obrázek 4.3: Ukázka struktury vstupních dat ve formátu XYZ

4.1.2 Geodatabáze

Pro jednoduché ovládání a přehlednost je vhodné výpočty realizovat v ESRI *Geodatabázi*. Pro tento účel byla vytvořena *souborová Geodatabáze* (dále jen File GDB), jejíž výhodou je, že každý datový soubor této File GDB je uložen jako samostatný soubor na disku počítače a může mít velikost až 1 TB. Tato vlastnost je při manipulaci s daty LLS téměř nutností (viz obrázek 4.2, sloupec Velikost). Dále se uvnitř File GDB vytvoří *prvkový datový set* (dále jen Feature dataset), ve kterém se nastaví souřadnicový systém (S-JTSK).

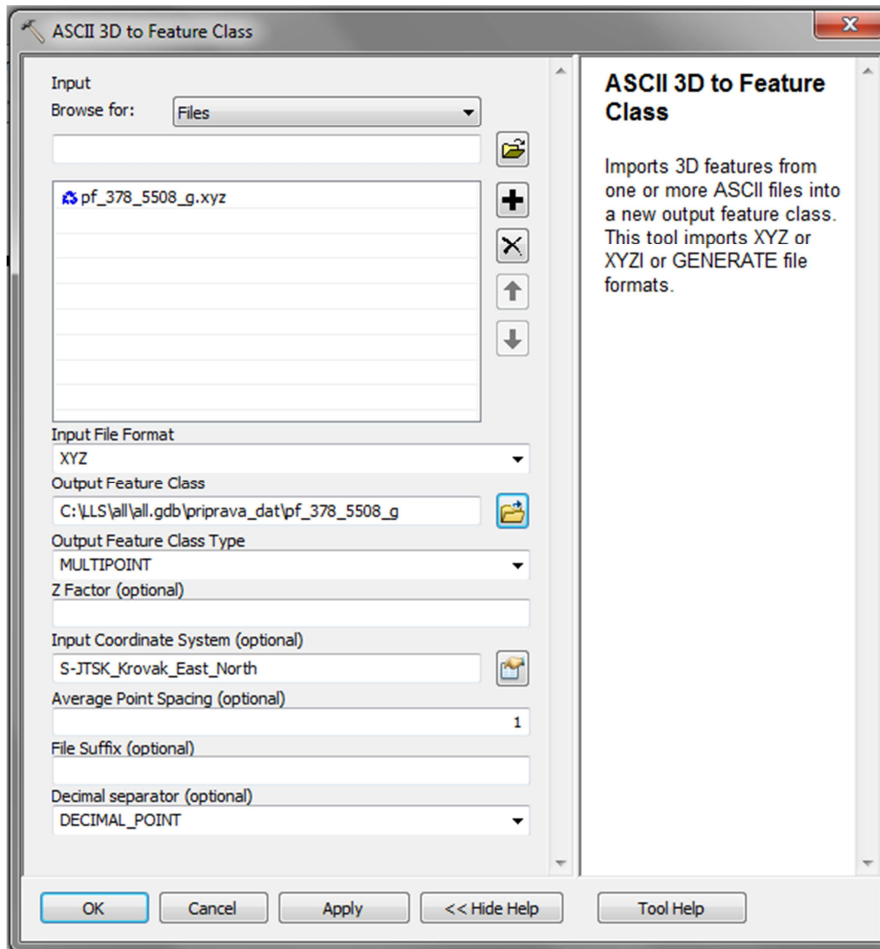
Po vytvoření Geodatabáze lze přistoupit k naplnění Geodatabáze daty. Pomocí nástroje **ASCII 3D to Feature class**⁶, který se nachází v nabídce nástrojů programu ArcGIS (angl. Toolbox) *3D Analyst* → *Conversion* → *From File*, byla naimportována data do prvkové třídy (Feature class). Nastavení je zřejmé z obrázku 4.4. Jako typ prvkové třídy byl zvolen *MULTIPOINT*⁷, protože práce s tímto typem je rychlejší.

Posledním nástrojem v části Separace dat je nástroj **Clip** neboli oříznutí dat do vybraných území. Tento nástroj lze najít v nabídce *Analysis Tools* → *Extract*. Před spuštěním nástroje je nutné si připravit polygon představující vybrané zkoumané území,

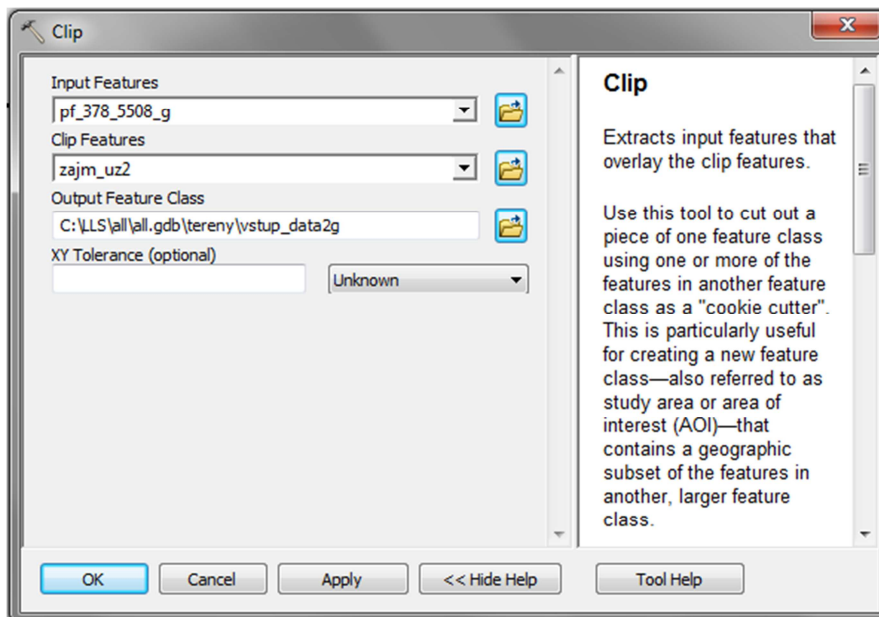
⁶ ASCII pochází z angl. American Standard Code for Information Interchange, Americký standartní kód pro výměnu informací. [2]

⁷ MULTIPOINT je jeden prvek, kterým lze reprezentovat množinu bodů. Jeden multipoint má více souřadnic uložené v jedné řádce atributové tabulky. Multipoint má výhodu v rychlejším vykreslování dat.

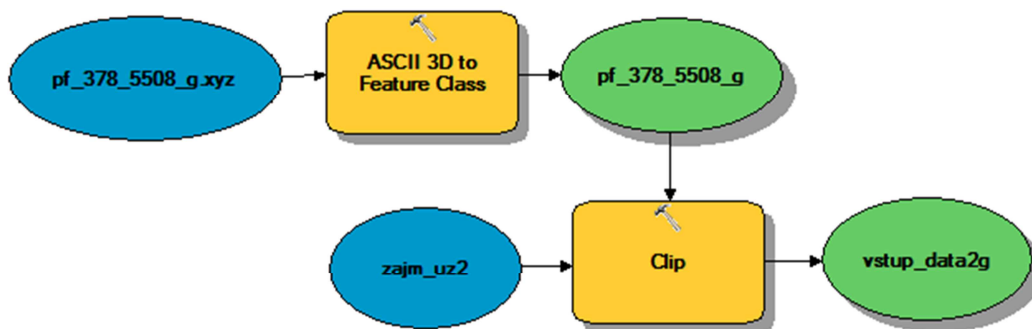
kterým budeme připravená data ořezávat. Nastavení nástroje Clip je zřejmé z obrázku 4.5, výsledný model Separace dat je pak uveden na obrázku 4.6.



Obrázek 4.4: Nastavení nástroje ASCII 3D to Feature class



Obrázek 4.5: Nastavení nástroje Clip



Obrázek 4.6: Výsledný model části Separace dat

5 Tvorba terénů a pohledových pyramid pomocí skriptů v jazyce Python

Mezi cíle této práce patří vytvořit v prostředí ArcGIS vhodný postup tvorby digitálních modelů terénu z dat LLS, prozkoumat možnosti tvorby pohledových pyramid a zhodnotit jejich vlastnosti. Vytvořené terény budou vstupovat do dalších výpočtů, které odhalí jejich vlastnosti, proto je více než nutné vytvořit správný postup tvorby digitálních terénů a korektně nadefinovat jejich pohledové pyramidy.

Tvorba terénů si žádá důkladné pochopení výše uvedené problematiky a je časově velmi náročná. Při složitějších výpočtech se ukázalo prostředí aplikace ModelBuilder jako nevyhovující a tvorba modelů pouze pomocí jednoduchých na sebe navazujících nástrojů z nabídky programu ArcGIS jako velmi neefektivní. Z těchto důvodů byl použit uživatelsky náročnější skriptovací jazyk Python. V něm bylo vytvořeno několik skriptů, kterými byl celý postup zautomatizován.

Postup tvorby terénu metodou Window size i Z-tolerance je prakticky stejný. S ohledem na jejich základní rozdíl, tedy že pyramida typu WS je založená na polohovém kritériu a pyramida typu Z-tolerance je založena na kritériu výškovém, byla tvorba těchto terénů rozdělena do dvou samostatných skriptů.

5.1 Tvorba terénu metodou Window size

Skript pro tvorbu terénu metodou WS se skládá ze 4 nástrojů, které postupným zřetěžením vytvoří požadovaný terén (viz obrázek 5.1). Uživatelské rozhraní skriptu pro tvorbu terénu je zřejmý z obrázku 5.2. Všechny použité nástroje se nachází v nabídce *3D Analyst* → *Terrain Management*.

```

import arcpy, os

fd          = arcpy.GetParameterAsText(0)
fd          = fd.replace("\\", '/')
pyramids   = arcpy.GetParameterAsText(1)
metody     = ["ZMIN", "ZMAX", "ZMINMAX", "ZMEAN"]

vstupni_data = arcpy.GetParameterAsText(2)
p_list     = pyramids.split(',')

for metoda in metody:
    for vstup in vstupni_data.split(";"):
        inFeatures = vstup.replace("\\", '/') + " Shape masspoints 1 0 8 true false <None> <None> false"
        jmeno_terenu = "WS_" + metoda + "_" + os.path.basename(vstup)
        # nastroj CreateTerrain
        arcpy.CreateTerrain_3d(fd, jmeno_terenu, 1, 7000, "", "WINDOWSIZE", metoda, "MILD", 0.15)
        arcpy.AddMessage("Adding terrain pyramid levels...")

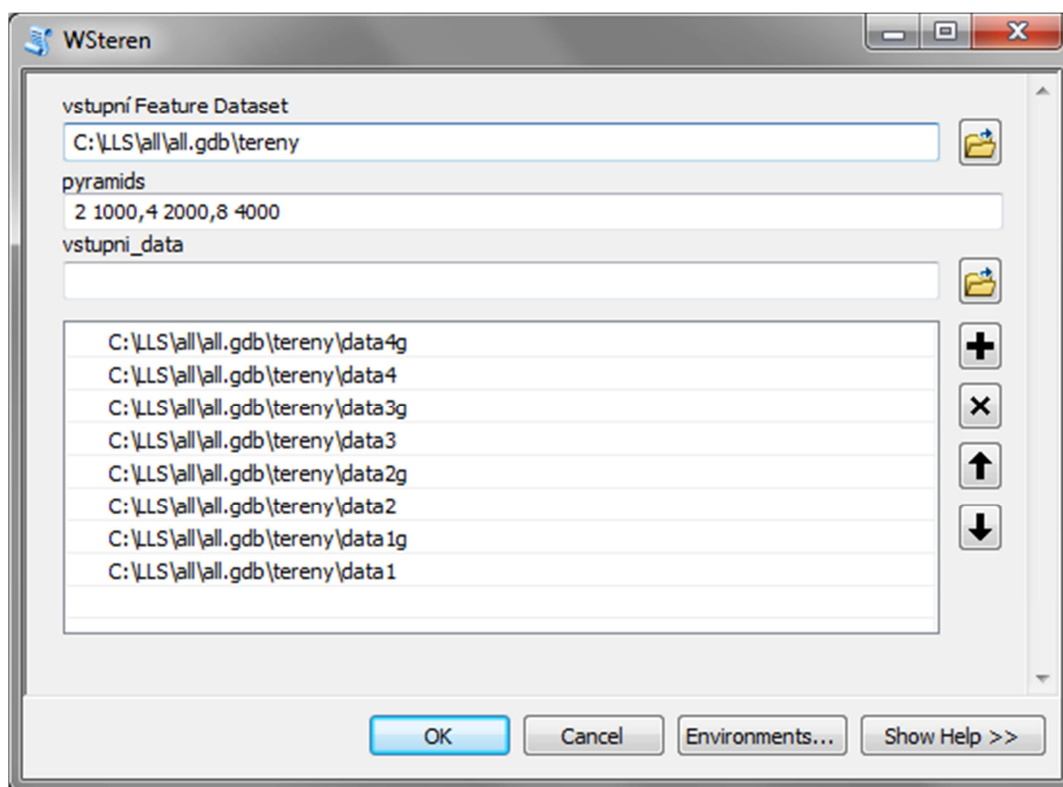
        # nastroj AddTerrainPyramidLevel
        arcpy.AddTerrainPyramidLevel_3d(fd + "/" + jmeno_terenu, "", p_list)
        arcpy.AddMessage("Adding features to terrain...")

        # nastroj AddFeatureClassToTerrain
        arcpy.AddFeatureClassToTerrain_3d(fd + "/" + jmeno_terenu, inFeatures)
        arcpy.AddMessage("Building terrain...")

        # nastroj BuildTerrain
        arcpy.BuildTerrain_3d(fd + "/" + jmeno_terenu, "NO_UPDATE_EXTENT")
        arcpy.GetMessages()

```

Obrázek 5.1: Skript tvorby terénu metodou Window size



Obrázek 5.2: Uživatelské rozhraní skriptu tvorby terénu metodou Window size

Jako první je použit nástroj **Create Terrain**, který vytvoří prázdný terén. Tento nástroj vyžaduje zadání následujících parametrů:

- Vstupní prvkový datový set (Feature dataset) - cesta k souboru, ze kterého se budou načítat vstupní body (viz import dat z formátu XYZ v kapitole 4.1.2). Název výstupního terénu vznikne automaticky spojením řetězce „WS“, metody tvorby terénu Window size (tedy zmin, zmax, zminmax nebo zmean) a připojením názvu vstupního souboru. Tento parametr musí zadat uživatel.
- Průměrná vzdálenost bodů (Average point spacing) - automaticky nastavena na 1 m (viz kapitola 4.1.1).
- Maximální měřítko (Maximum overview size) - automaticky nastaveno na 7000, protože přibližně v tomto měřítku je možné celou zájmovou oblast zobrazit najednou na monitoru počítače.
- Typ pyramidy (Pyramid type) - v tomto případě automaticky nastaven Window size.
- Parametr sekundárního ředění (Secondary thinning method) – automaticky nastaven na mild, poněvadž tento typ ředí nejméně bodů a nejlépe zachovává lineární nespojitosti (viz kapitola 3.1.1).
- Prahová hodnota sekundárního ředění (Secondary thinning threshold) - automaticky nastavena na 0,15 m, je odvozena z vertikální přesnosti zadaných dat (viz kapitola 3.1.1).

Více podrobností je uvedeno v literatuře [1].

Dalším nástrojem v modelu tvorby terénu metodou WS je **Add Terrain Pyramid Level**, který k prázdnému terénu přidá pyramidové úrovně. V tomto nástroji je nutné nastavit parametry:

- Vstupní terén – cesta na disku počítače ke vstupnímu terénu. Tento parametr musí zadat uživatel.
- Pyramidové úrovně s příslušnými měřítky. Tento parametr musí opět zadat uživatel.

Volba pyramidových úrovní včetně měřítek je závislá na vlastnostech vstupních dat (viz výše v kapitole 3.1). Jako výchozí hodnoty jsou dle doporučení z literatury [1] zvoleny úrovně: pro WS 2 měřítko 1:1000, pro WS 4 měřítko 1:2000 a pro WS 8 měřítko 1:4000.

Následující nástroj **Add Feature class to Terrain** připojí k terénu zvolenou prvkovou třídu (Feature class) vstupních bodů uložených ve výše nadefinovaném Prvkovém datovém setu (Feature dataset). Vstupní prvková třída je parametr, který musí zadat uživatel.

Pomocí posledního nástroje **Build Terrain** se podle předchozího nastavení vytvoří terén. Zde je možnost nastavit parametr Update Extent neboli aktualizaci rozsahu Terrain dataset⁸. Zde je zvolen výchozí textový řetězec NO_UPDATE_EXTENT.

Jelikož metody tvorby terénu WS jsou čtyři, bylo nutné pro následující analýzy vytvořit terény se všemi typy těchto metod. Dále zde vyvstal problém s automatizací tvorby terénů tak, aby se tvořily terény pro všechna vstupní data zadaná uživatelem. K těmto účelům slouží ve skriptu dva **cykly FOR**, z nichž první prochází všechny metody WS a druhý prochází vstupní data. Je nutné počítat s tím, že tvorba terénu je výpočetně náročná a délka výpočtu je závislá na rozsahu vstupních dat. V našem případě se doba výpočtu pohybovala v řádu hodin. (Pozn. pro pokročilé uživatele skriptovacího jazyka Python: defaultní hodnoty všech nástrojů se nastavují ve vlastnostech skriptu, kde lze nastavit i parametry).

5.2 Tvorba terénu metodou Z-tolerance

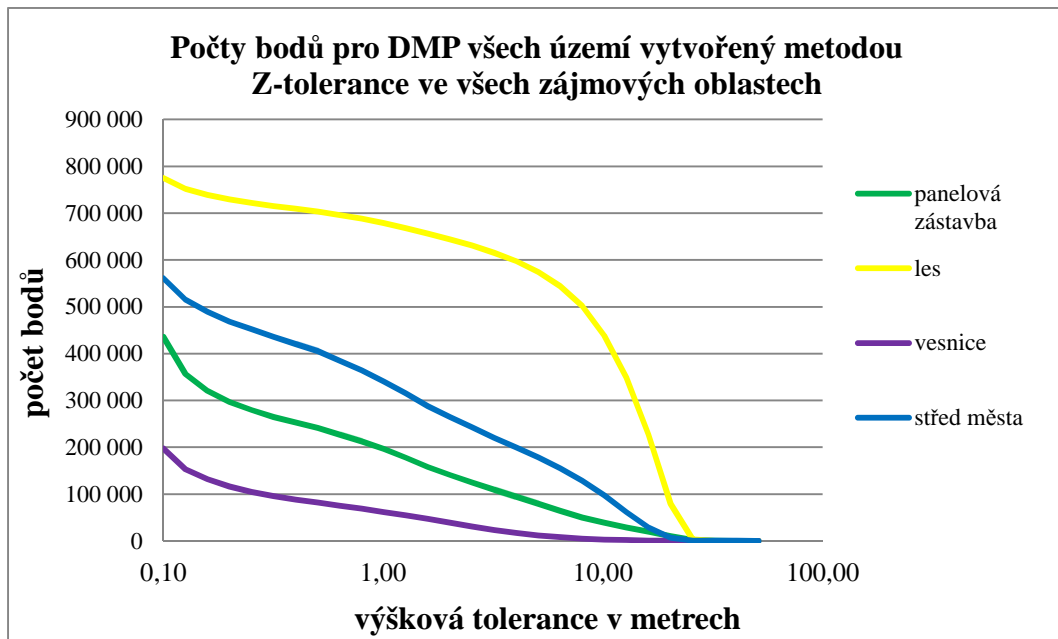
5.2.1 Hypotéza

Jelikož je tento typ terénu (oproti WS) založen na výškovém kritériu, je nutné nejdříve zvolit vhodné hodnoty Z-tolerance. Jedním z výsledků této práce měl být soubor doporučení o vhodných hodnotách výškové tolerance v závislosti na vlastnostech a typu konkrétního území. Doporučení měla být založena na hypotéze, že počet bodů pyramidové vrstvy DMP **neklesá rovnoměrně** s růstem hodnoty výškové tolerance odpovídající charakteristickým výškám objektů na terénu, např. křoviny, stromy, domy.

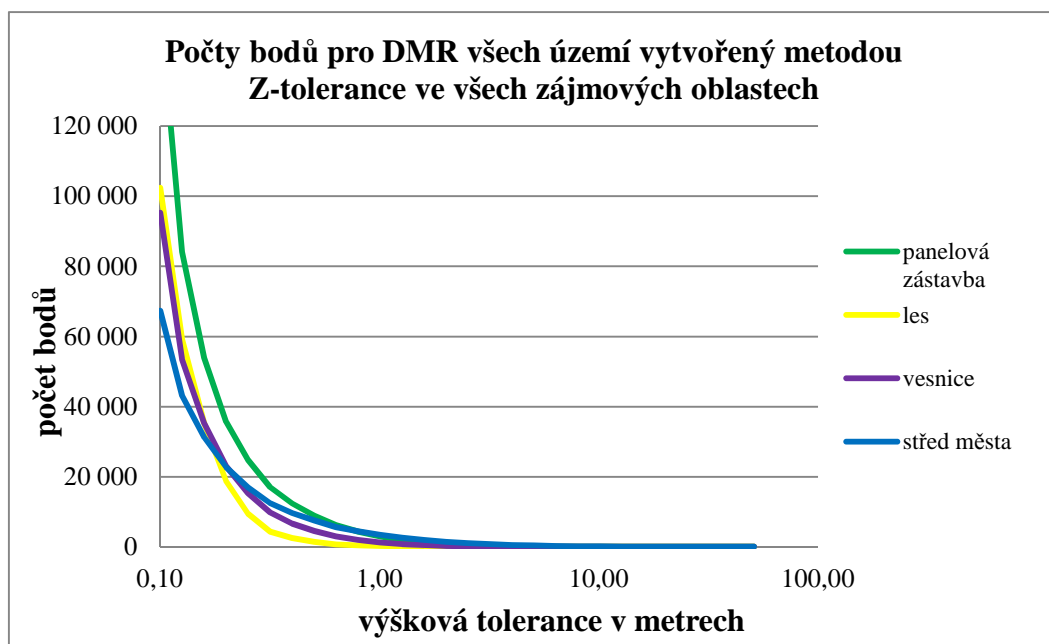
Pro ověření této hypotézy a zjištění vhodných hodnot výškové tolerance byl uskutečněn experiment, ve kterém byl proveden výpočet pohledových pyramid s hodnotami výškové tolerance pokrývající celý rozsah obvyklých lokálních rozdílů výšek od 0,10 m do 50 m. Vzhledem k časové náročnosti byly výpočty provedeny pro hodnoty výškové

⁸ Toto slouží k případnému přepočítání rozsahu terénu velikosti okna WS na základě vstupních dat. Pokud jsou v nástroji Create Terrain nastaveny všechny hodnoty, není nutné toto přepočítávat.

tolerance tvořící geometrickou posloupnost s kvocientem rovným třetí odmocnině ze dvou. Pro ověření hypotézy budou pro charakteristické typy městského území vypočteny závislosti počtu bodů každé pohledové pyramidy na hodnotě výškové tolerance. Tyto závislosti jsou zřejmé z grafů 5.1 a 5.2. Počty bodů pro různé hodnoty výškové tolerance lze vyčíst z tabulky v Příloze B.



Graf 5.1: Závislost počtu bodů pohledových pyramid na hodnotě Z-tolerance pro DMP



Graf 5.2: Závislost počtu bodů pohledových pyramid na hodnotě Z-tolerance pro DMR

5.2.2 Nástroje pro tvorbu terénu metodou Z-tolerance

Pro tvorbu terénů metodou Z-tolerance byly vytvořeny dva skripty (viz obrázek 5.3) v jazyce Python. **První (experimentální) skript** slouží k ověření hypotézy a následnému experimentu pro určení správných hodnot výškových tolerancí. **Druhý (originální) skript** je vytvořen pro tvorbu terénů s výškovými tolerancemi pohledových pyramid odvozených z experimentu. Oba skripty mají stejný kód, liší se pouze v předdefinovaných hodnotách (defaultní hodnoty výškových tolerancí pohledových pyramid). Uživatelské rozhraní skriptu pro tvorbu terénu je zřejmé z obrázku 5.4.

Skripty pro tvorbu terénů se stejně jako ve skriptu pro metodu WS skládají ze čtyř nástrojů, které postupným zřetěžením vytvoří požadovaný terén. Pro zautomatizování zde byl použit jeden **cyklus FOR**, který plní funkci tvoření terénu ze všech zadaných dat.

```
import arcpy, os

fd          = arcpy.GetParameterAsText(0)
fd          = fd.replace("\\", '/')
pyramids    = arcpy.GetParameterAsText(1)
vstupni_data = arcpy.GetParameterAsText(2)
p_list      = pyramids.split(',')

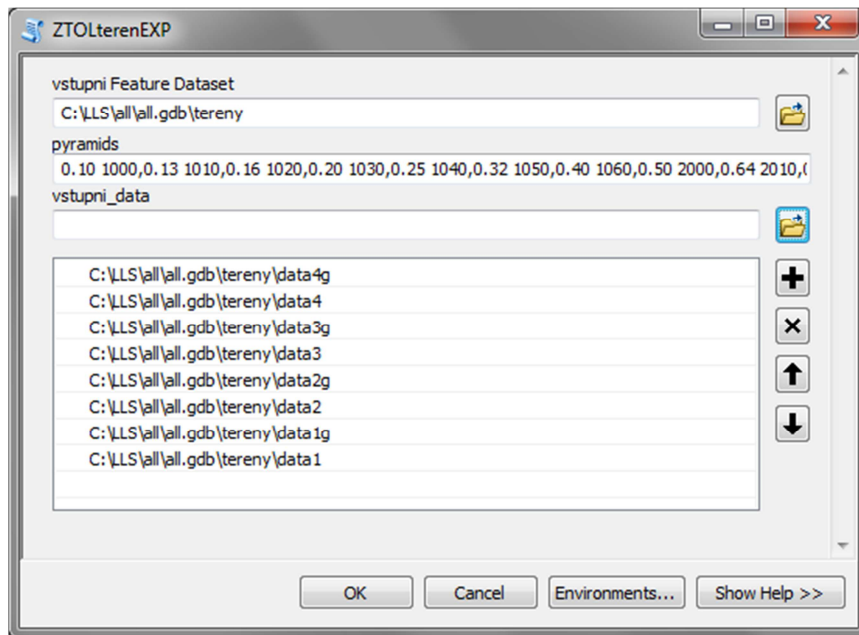
for vstup in vstupni_data.split(";"):
    jmeno_terenu = "ZTOL" + "_" + "orig" + "_" + os.path.basename(vstup)
    inFeatures   = vstup.replace("\\", '/') + " Shape masspoints 1 0 20.32 true false <None> <None> false"
    # nastroj CreateTerrain
    arcpy.CreateTerrain_3d(fd, jmeno_terenu, 1, 7000, "", "ZTOLERANCE", "", "", "")
    arcpy.AddMessage("Adding terrain pyramid levels...")

    # nastroj AddTerrainPyramidLevel
    arcpy.AddTerrainPyramidLevel_3d(fd + "/" + jmeno_terenu, "", p_list)
    arcpy.AddMessage("Adding features to terrain...")

    # nastroj AddFeatureClassToTerrain
    arcpy.AddFeatureClassToTerrain_3d(fd + "/" + jmeno_terenu, inFeatures)
    arcpy.AddMessage("Building terrain...")

    # nastroj BuildTerrain
    arcpy.BuildTerrain_3d(fd + "/" + jmeno_terenu, "NO_UPDATE_EXTENT")
    arcpy.GetMessages()
```

Obrázek 5.3: Skript tvorby terénu metodou Z-tolerance



Obrázek 5.4: Uživatelské rozhraní skriptu tvorby terénu metodou Z-tolerance

Jako první je použit nástroj **Create Terrain**, který vytvoří prázdný terén. Tento nástroj vyžaduje zadání následujících parametrů (stejně jako v kapitole 5.1):

- Vstupní prvkový datový set (Feature dataset) - cesta k souboru, ze kterého se budou načítat vstupní body. (Název výstupního terénu je automaticky generován na řetězec složený ze slova ZTOL a připojením názvu vstupních dat.). Tento parametr musí zadat uživatel.
- Průměrná vzdálenost bodů (Average point spacing) - nastavena stejně jako v metodě WS v kapitole 5.1 na 1 m.
- Maximální měřítko (Maximum overview size) - nastaveno shodně jako v metodě WS v kapitole 5.1 na 7000.
- Typ pyramidy (Pyramid type) - v tomto případě automaticky nastaven Z-tolerance.

Dalším nástrojem v modelu tvorby terénu metodou Z-tolerance je **Add Terrain Pyramid Level**, který přidá k prázdnému terénu pyramidové úrovně. V tomto nástroji se nastavení skriptů pro tvorbu terénu metodou Z-tolerance liší v hodnotách výškových tolerancí pohledových pyramid (viz výše).

Následuje nástroj **Add Feature class to Terrain**, který připojí k terénu zvolenou prvkovou třídu (Feature class) vstupních bodů uložených ve výše nadefinovaném Prvkovém

datovém setu (Feature dataset). Vstupní prvkový datový set je parametr, který musí zadat uživatel.

Posledním nástrojem je **Build Terrain**, který podle předchozího nastavení vytvoří terén. Zde je nastavení stejné jako při metodě WS.

5.2.3 Výsledky experimentu

V případě **DMR** nejsou dle očekávání zřejmé žádné hodnoty Z-tolerance, kde se výrazně mění průběh křivky v závislosti na druhu zkoumaného území (viz graf 5.2). Proto byly pro účely porovnání vhodnosti metod Window size a Z-tolerance zvoleny hodnoty výškové tolerance tak, aby byly počty bodů v jednotlivých úrovních přibližně stejné jako v případě metody Window size mean. Tomuto závěru odpovídají hodnoty Z-tolerance: 0,10 m pro měřítko 1:1000, 0,13 m pro měřítko 1:2000 a 0,25 m pro měřítko 1:4000.

Jelikož byla původní hypotéza o nerovnoměrném poklesu počtu bodů pohledové pyramidy DMP experimentem vyvrácena, byl zvolen následující postup. Hodnoty Z-tolerance pro **DMP** je vhodné vzhledem k různým typům území rozdělit. Počty bodů pro jednotlivá území jsou rozdílné. Změny hodnot jsou z grafu 5.1 sice málo výrazné, ale patrnější než v případě DMR (viz graf 5.2). Z tohoto důvodu musely být zvoleny různé hodnoty výškové tolerance pro vybrané oblasti, aby byl dodržen podobný počet bodů výsledného modelu jako počet bodů v modelu vzniklým metodou WS mean.

Hodnoty výškové tolerance pro první, druhé, třetí i čtvrté území jsou nastaveny dle tabulky 5.1.

	Území 1	Území 2	Území 3	Území 4
	panelová zástavba	les	vesnice	střed města
1. úroveň	0,2	16,13	0,1	1,6
2. úroveň	5,08	20,32	0,8	12,8
3. úroveň	16,13	25,6	4,03	20,32

Tabulka 5.1: Přehled výškových tolerancí pro DMP

Věrnost jednotlivých úrovní pohledových pyramid byla zhodnocena porovnáním objemových rozdílů mezi terénem původním a terénem generalizovaným ve vyšších úrovních pohledové pyramidy, a také porovnáním systematických a náhodných chyb (viz kapitola 6).

6 Analýzy pohledových pyramid

Aby bylo možné určit, která z výše uvedených metod tvorby digitálního modelu reliéfu a terénu je pro LIDAR data a zadaná území nejvhodnější, je nutné provést určité analýzy dosažených výsledků.

Jelikož při složitějších analýzách nestačilo prostředí ModelBuilder požadavkům práce, bylo potřeba pracovat se skriptovacím jazykem Python. Všechny analýzy jsou součástí **jednoho skriptu** (viz obrázek 6.1), který je podrobně popsán v následujících kapitolách 6.1 a 6.2. Uživatelské rozhraní skriptu je zřejmé z obrázku 6.2. Automatizace výpočtů analýz si z důvodů mnoha vstupních terénů a jejich vícečetných úrovní opět vyžádala použití dvou **cyklů FOR**. První cyklus je nastaven tak, aby se výpočty provedly se všemi dříve vytvořenými terény. Druhý cyklus je vnořený do cyklu prvního a postupně počítá rozdíly objemů vytvořené úrovně terénu a původního terénu (nultá úroveň). Úroveň zdrojové vrstvy je označena v následujících porovnáních jako nultá úroveň pyramidy („0“), ostatní úrovně jsou číslovány od jedné do tří (pro metodu Z-tolerance jsou označeny hodnotou výškové tolerance v metrech).

```

import arcpy, os

surfaces      = arcpy.GetParameterAsText(0)
urovne        = arcpy.GetParameterAsText(1)
refuroven     = arcpy.GetParameterAsText(2)
kam_vystupy   = arcpy.GetParameterAsText(3)
kam_csv       = arcpy.GetParameterAsText(4)

statsFields = [{"spocteno", "SUM"]}

#Tvorba tabulky
pocety_bodu_soubor = open(kam_csv + "\\pocety_bodu_vse.csv",'w+')
pocety_bodu_soubor.write("Difference;Pocet bodu\n")

for surface in surfaces.split(";"):
    surface = surface.replace("\\", '/')
    for uroven in urovne.split(";"):
        arcpy.AddMessage("Zpracovavam uroven " + uroven + "...")
        outpoly = kam_vystupy + "\\\" + os.path.basename(surface) + "_" + uroven + "_" + refuroven
        outpoly = outpoly.replace(",","")
        #Nástroj Surface Difference
        arcpy.SurfaceDifference_3d(surface, surface, outpoly, uroven, refuroven)

        #Nástroj Add Field, Calculate Field, Statistics Analysis
        arcpy.AddField_management(outpoly, "spocteno", "DOUBLE", "", "", "", "", "", "", "", "", "", "")
        arcpy.CalculateField_management(outpoly, "spocteno", "!Volume! * !Code!", "PYTHON","")
        arcpy.Statistics_analysis(outpoly, outpoly + "_statistics", statsFields, "")

        uroven_text = uroven.replace(",","")
        #Nástroj Terrain To Points
        arcpy.TerrainToPoints_3d(surface, surface + "_TTP_" + uroven_text, uroven, "<NONE>", "POINT")
        arcpy.AddMessage(outpoly + "_TTP4")

        #Nástroj Table Select, Statistics Analysis
        arcpy.TableSelect_analysis(outpoly, outpoly + "_objemy_kladne", ' "spocteno" > 0 ')
        arcpy.Statistics_analysis(outpoly + "_objemy_kladne", outpoly + "_objemy_kladne" + "_statistics", statsFields, "")

        #Nástroj Table Select, Statistics Analysis
        arcpy.TableSelect_analysis(outpoly, outpoly + "_objemy_zaporne", ' "spocteno" <= 0 ')
        arcpy.Statistics_analysis(outpoly + "_objemy_zaporne", outpoly + "_objemy_zaporne" + "_statistics", statsFields, "")

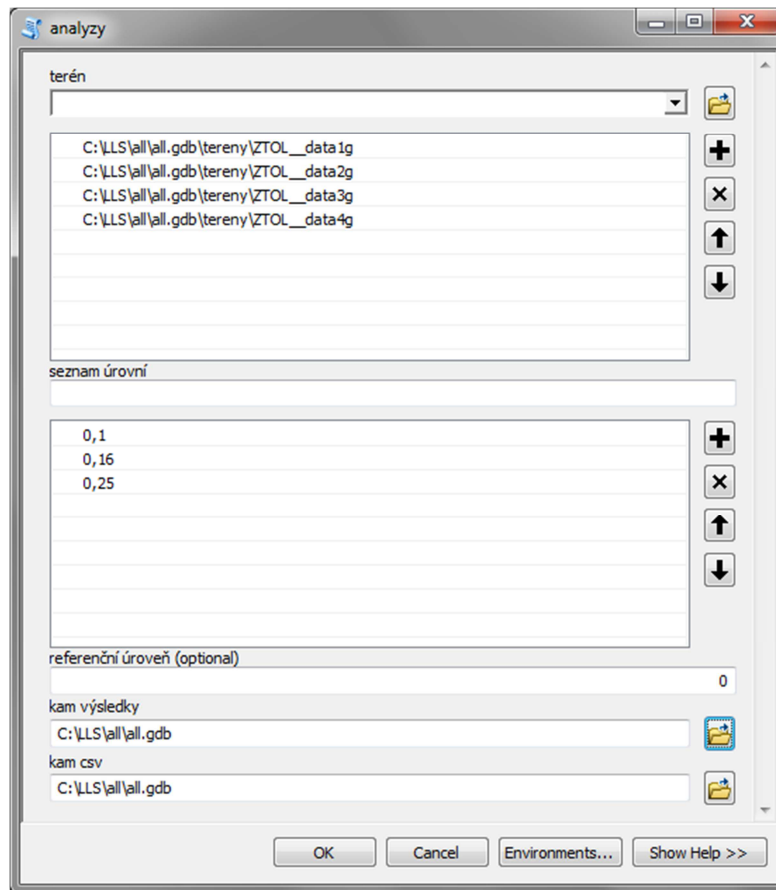
        #Nástroj Get Count, zapsání do vytvořené tabulky
        pocet = arcpy.GetCount_management(outpoly + "_body")
        arcpy.AddMessage(os.path.basename(surface) + "_" + uroven + "_" + refuroven + " Pocet bodu: " + str(pocet))
        pocety_bodu_soubor.write(os.path.basename(surface) + "_" + uroven + "_" + refuroven + ";" + str(pocet) + "\n")

        #Nástroj Get Count, zapsání do vytvořené tabulky
        pocet = arcpy.GetCount_management(surface + "_TTP_" + uroven_text)
        arcpy.AddMessage(os.path.basename(surface) + "_TTP_" + uroven_text + " Pocet bodu: " + str(pocet))
        pocety_bodu_soubor.write(os.path.basename(surface) + "_TTP_" + uroven_text + ";" + str(pocet) + "\n")

pocety_bodu_soubor.close()

```

Obrázek 6.1: Skript pro počítání analýz a zapisování výsledků do tabulek v prostředí Python



Obrázek 6.2: Uživatelské rozhraní skriptu pro počítání analýz a zapisování výsledků do tabulek v prostředí Python

6.1 Porovnání jednotlivých úrovní pohledových pyramid

Pro objektivní zhodnocení negativního vlivu generalizace DMR a DMP na přesnost modelu provedeme porovnání jednotlivých úrovní pohledových pyramid. Abychom mohli provést toto srovnání, je potřeba získat rozdílové objemy mezi jednotlivými pohledovými pyramidami a původním negeneralizovaným modelem a celkové počty bodů. Z těchto výsledků se posléze spočítají hodnoty chyb (průměrná, systematická, odhad základní úplné střední chyby a odhad základní střední náhodné chyby, které jsou popsány v kapitole 6.3).

K porovnání jednotlivých úrovní pyramid digitálních terénů slouží v prostředí ArcGIS nástroj Surface Difference, který funguje na principu odečítání povrchů a stanovuje objemové rozdíly mezi porovnávanými terény. Tento nástroj se nachází v nabídce *3D Analyst* → *Terrain and TIN Surface*. Nástroj Surface Difference je první částí skriptu *Analýzy* (viz obrázek 6.1).

Nástroj **Surface Difference**, který počítá rozdílové objemy, vyžaduje zadání následujících parametrů:

- Vstupní povrch – terén (popř. terény), který bude vstupovat do výpočtu. Tento parametr musí zadat uživatel.
- Referenční úroveň – úroveň pohledové pyramidy, od které se budou odečítat ostatní úrovně pohledových pyramid (Vždy se bude odečítat vyšší úroveň pohledové pyramidy od nulté - základní, zdrojové vrstvy bez zředěných bodů.). Tento parametr je tedy přednastaven na 0.
- Seznam úrovní – úrovně pohledových pyramid, které se budou odečítat od referenční úrovně. Tento parametr musí zadat uživatel.
- Umístění výstupních souborů – cesta k souborové databázi, do které se budou zapisovat výsledky výpočtu. Tento parametr musí opět zadat uživatel.

V tomto nástroji (skriptu) lze postupovat pro všechny typy terénů a všechny jejich úrovně pohledových pyramid stejně. Pro účel této práce je důležitá míra objemové shody zvolené úrovně generalizace (zvolená porovnávaná úroveň pohledové pyramidy) se zdrojovou vrstvou negeneralizovanou, tedy využívající všech vstupních bodů.

Porovnání objemových rozdílů lze provést i v programu ATLAS DMT [4] a to nástrojem **Výpočet objemu**, který se nachází v nabídce *DMT*. „Pomocí tohoto nástroje lze vypočítat objem prostorového útvaru omezeného hlavním a srovnávacím modelem terénu.“ [32] Srovnávacím modelem může být např. jiný model, který zachycuje v půdoryse stejnou zájmovou oblast jako terén hlavní. [3] „Objem tělesa vymezeného dvěma modely terénu (hlavní a srovnávací) se stanoví součtem objemů výpočtových trojbokých hranolů. Podstavy těchto hranolů zobrazené v půdorysu tvoří trojúhelníkovou síť, která vznikne protnutím trojúhelníkových sítí obou modelů. Výšky výpočtových hranolů ve vrcholech jejich trojúhelníkových podstav jsou stanoveny jako výškové rozdíly nevyhlazené plochy hlavního a srovnávacího modelu v daných místech.“ [32]

6.2. Výpočty statistik a konverze dat

Abychom dosáhli objektivního porovnání terénů, a jejich pohledových pyramid je nutné znát počty bodů v jednotlivých úrovních. Počty bodů nám odhalí korektnost vytvořených terénů,

a také to, zda s rostoucí úrovní pohledových pyramid počty bodů tvořící terén klesají. Což se také potvrdilo (viz Příloha C a grafické znázornění v Příloze D). Vzájemně pak lze porovnat jednotlivé metody, kterými byly digitální modely vytvořeny, mezi sebou, tzn. která metoda „ředí“ více a která méně bodů se vzrůstající úrovní pohledové pyramidy.

Celkový počet bodů v **jednotlivých pyramidových úrovních terénů** a zároveň ve **všech typech terénů** získáme tak, že nejprve provedeme konverzi vytvořených terénů do bodových prvků (dosud byly tyto terény reprezentovány TIN). To lze v software ArcGIS uskutečnit pomocí nástroje **Terrain To Points**, který se nachází v nabídce *3D Analyst* → *Conversion* → *From Terrain*. Celkový počet bodů v terénu následně získáme nástrojem **Get Count** (z nabídky *Data Management* → *Table*).

Všechny počty bodů budou zaneseny do nové, pro tento účel vytvořené tabulky. Uživatel skriptu pouze nastaví místo jejího uložení na počítačovém disku.

Na základě skriptu (viz obrázek 6.1) vznikly tabulky v Příloze C a grafy v Příloze D s přehledem počtů bodů všech terénů i všech jejich pohledových úrovní.

Pokud chceme porovnávat pohledové pyramidy z hlediska rozdílů objemů jednotlivých úrovní pohledových pyramid, musíme ještě provést dílčí výpočty, které nám k těmto analýzám pomohou. Jedním z nich je sečtení všech objemů hranolů tvořících model terénu. Doposud máme vypočítané objemy (viz nástroj **Surface Difference** v kapitole 6.1) v jednotlivých úrovních pohledových pyramid pouze v absolutní hodnotě. Abychom zjistili hodnoty rozdílových objemů v kladném i záporném smyslu, a zároveň mohli proces zautomatizovat pro naprogramování postupu v jazyce Python, byl použit následující složitější a zároveň účinnější postup.

Nejprve pomocí nástroje **Add Field** přidáme do atributové tabulky všech porovnávaných úrovní pyramid další sloupec, který byl nazván *Spocteno*. Velikost rozdílu objemů se znaménkem je možné do nově vytvořeného sloupce vypočítat vynásobením sloupce Objem (angl. Volume) a sloupce Kód (angl. Code) nástrojem **Calculate Field** z nabídky *Data Management* → *Fields*. Sloupec *Objem* je absolutní hodnota rozdílu objemů. Sloupec *Kód* obsahuje hodnotu -1, která znamená, že hodnocený model má menší výšku než model referenční, a hodnotu +1, která znamená, že hodnocený model má větší výšku než model referenční. Zde by bylo vhodné upozornit na označení objem *Nad* a objem *Pod*,

které je využíváno v hodnoceních v kapitole 6.3, v Příloze E a v Příloze F, a které vychází právě z tohoto rozdělení objemů. Po získání velikosti rozdílů objemů se znaménky lze přistoupit k nástroji, který spočítá součet všech objemů (v absolutních hodnotách). Výsledkem nástroje **Summary Statistics** (v nabídce *Analysis* → *Statistics*) je nová tabulka.

Abychom získali rozdílové objemy zvlášť kladné a zvlášť záporné, musíme dle nově vytvořeného sloupce *Spocteno* vybrat z tabulky jednotlivé prvky. To provedeme tak, že zvolíme modely, které jsou z hlediska objemu vyhodnocené s nižší výškou než model referenční a modely, které jsou z hlediska objemu vyhodnocené s výškou vyšší než model referenční. Tento výběr lze uskutečnit pomocí nástroje **Table Select** (v nabídce *Analysis* → *Extract*). Výstupem budou dvě samostatné tabulky. Z těchto dvou tabulek opět pomocí nástroje **Summary Statistic** následně spočítáme součty kladných i záporných objemů.

Hodnoty vypočtené pomocí skriptu (viz obrázek 6.1) jsou uvedeny v příloze E a graficky znázorněny v Příloze F.

6.3 Analýzy nad pohledovými pyramidami

Pro každý typ území vzniklo 5 digitálních modelů povrchu a 5 digitálních modelů reliéfu, které byly získány použitím různých metod pro tvorbu pohledových pyramid. Každý digitální model má vytvořené 3 úrovně pohledových pyramid, které jsou definovány pro stejná měřítka.

Prvním (vizuálním) hodnocením modelů bylo zjištěno, že žádný z modelů neobsahuje významné výškové nepřesnosti, či jiné nekorektnosti. Ukázka modelů (DMP a DMR) pro vizuální kontrolu je zobrazena v Přílohách G a H na třetím typu území (vesnická zástavba) pro druhou úroveň pohledových pyramid.

Vhodnost použití metody tvorby pohledových pyramid se liší podle **druhu tvořeného modelu**, podle **druhu území**, pro který je digitální model tvořen, a také podle **účelu**, pro který bude model použit. Všechny metody fungují na principu ředění vstupních bodů, avšak přístupy se liší (viz kapitola 3). K porovnání digitálních modelů byla zvolena metoda objemové shody mezi modelem původním a modely generalizovanými. Z hodnot objemů se spočítají hodnoty systematických a náhodných chyb.

Nejprve se pozastavme u celkového **počtu bodů**. Aby bylo dosaženo objektivního porovnání, jsou hodnoty Z-tolerance voleny tak, aby počet bodů v úrovních Z-tolerance odpovídal počtu bodů metody WS mean v daném území (viz kapitola 5.2). Jak ukazují tabulky v Příloze C, počty bodů s rostoucí úrovní pohledových pyramid klesají. Z kapitoly 4.1.1 je zřejmé, že počet vstupních bodů je větší u DMP. Zvláště v území 2 (les) a 4 (střed města) je počet vstupních bodů téměř dvojnásobný oproti DMR, zatímco v místech s menší zástavbou (území 3 - vesnice) je podle předpokladu počet vstupních bodů DMP a DMR téměř srovnatelný. Ředění vstupních dat je tak patrnější u DMP, protože na základě algoritmu dané metody se vyloučí více bodů (viz grafické znázornění v Příloze D).

V souvislosti s počtem bodů stojí za povšimnutí, že se počty bodů mezi jednotlivými druhy metod Window size liší. Nízký počet bodů vykazují shodně metody WS min, WS max a WS mean. Počty bodů metody WS mean se od metod WS min a WS max mírně odlišují v závislosti na druhu území (viz Přílohy C a D). Avšak počet bodů u metody WS minmax je ve všech úrovních pohledových pyramid téměř dvojnásobný, což je dáno principem metody, protože vybírá pro každé čtvercové území dva body (oproti ostatním metodám Window Size). Pro naše porovnání bude nejdůležitější metoda WS mean, protože jde o metodu, kterou pravděpodobně budou uživatelé software ArcGIS používat nejčastěji.

Při porovnání **míry objemových shod** je patrná závislost objemových rozdílů na počtu bodů tvořících terén. S klesajícím počtem bodů (rostoucí úrovní pohledových pyramid) objemové rozdíly rostou. Zároveň jsou patrné přístupy jednotlivých metod. Příloha E a grafické znázornění v Příloze F dokumentují rozdílný přístup metod WS min a WS max. Terén generalizovaný metodou WS min je oproti původnímu podhodnocen, protože hodnota objemu *Pod* je ve všech odečítaných úrovních několikrát větší než objem *Nad*, čemuž odpovídají také hodnoty systematických chyb v tabulkách 6.1 a 6.2. Všechny hodnoty systematických chyb metody Window Size min mají záporné hodnoty. Pro metodu WS max platí opak. Ta terén nadhodnocuje a hodnota systematické chyby je proto ve všech případech (tj. ve všech územích a úrovních DMP i DMR) kladná.

Sečtením objemů *Nad* a *Pod* získáme objem *Absolutní*, tedy celkový rozdílový objem mezi jednotlivými porovnávanými terény.

Velikost objemů je závislá na ploše zkoumaného území. Proto z výše uvedených objemů terénů provedeme výpočty **průměrných, systematických a náhodných chyb**, které jsou pro interpretaci výsledků srozumitelnější. Pro výpočet chyb použijeme následující vztahy:

$$a_H = \frac{V_{(+)} + |V_{(-)}|}{A}$$

$$c_H = \frac{V_{(+)} - |V_{(-)}|}{A}$$

$$\hat{m}_H = 1,25 \cdot a_H$$

$$\hat{\sigma}_H = \sqrt{\hat{m}_H^2 - c_H^2}$$

kde a_H je průměrná chyba,

c_H je systematická chyba,

\hat{m}_H je odhad základní úplné střední chyby charakterizující reálnou přesnost,

$\hat{\sigma}_H$ je odhad základní střední náhodné chyby.

Označení $V_{(+)}$ znamená *Objem Nad*, označení $V_{(-)}$ znamená *Objem Pod* a A znamená celkovou plochu testované lokality. Na základě těchto vztahů vznikly Přílohy I, J, K a L. [16]

6.3.1 DMP – porovnání metod tvorby pohledových pyramid

Interpretace vypočítaných hodnot srovnávající metody tvorby pohledových pyramid DMP je složitější než u DMR, což můžeme přisoudit také většímu počtu zpracovávaných dat a větší složitosti modelu. Je nutné podotknout, že i hodnoty systematických a náhodných chyb jsou v případě DMP mnohonásobně vyšší než u DMR.

Z hlediska **systematické chyby** se jeví pro DMP jako obecně **nejlepší metody WS mean a Z-tolerance** ve všech úrovních pohledových pyramid. Pro připomenutí představuje hodnota systematické chyby míru výškového posunu generalizovaného terénu ve srovnání s původním terénem.

Pokud bychom hodnocení těchto dvou metod rozdělili na jednotlivá území, tak dle tabulky 6.1 a Příloh I a J pro území s **panelovou zástavbou** vychází nejlépe **metoda WS mean**. Pro území **souvislého porostu lesa** je v prvních dvou úrovních nejlepší metodou **Z-tolerance**, ale ve třetí úrovni pohledové pyramidy tohoto území je hodnota systematické chyby více než dvojnásobná než hodnota chyby metody **WS mean**. Na území **vesnické zástavby** vykazují metody **WS mean** i **Z-tolerance** velmi malé systematické chyby ve všech úrovních pohledových pyramid. Na území **středu města** vychází nejlépe metoda **Z-tolerance** ve všech úrovních pohledových pyramid.

Metody **WS min** a **WS max** dosahují několikanásobně vyšších hodnot systematických chyb ve všech územích a úrovních. Nejvyšších hodnot tyto metody dosahují v území lesa. Absolutně nejvyšší systematické chyby dosahuje metoda **WS max** v území souvislého lesního porostu ve třetí úrovni pohledové pyramidy, a to téměř 12 m. Vzhledem k principům tvorby těchto modelů jsme ani nepředpokládali, že by tyto modely nejlépe generalizovaly původní model, ale na druhou stranu je nutné připomenout, že tyto metody tvorby DMP využívají ze všech metod nejméně bodů tvořících zjednodušený model.

Hodnoty systematických chyb metody **WS minmax** se pohybují ve všech územích velmi blízko metod **WS mean** a **Z-tolerance**, musíme ovšem zdůraznit, že metoda ve srovnání například s metodou **Z-tolerance** využívá pro tvorbu terénu až dvojnásobný počet bodů.

Z vizuální kontroly (viz Příloha G) vychází nejlépe opět metoda **WS mean**. Na základě těchto skutečností je možné konstatovat, že s výjimkou území středu města se **pro tvorbu DMP jako nejlepší jeví metoda WS mean**.

Náhodné chyby představují, jak „věrně kopíruje“ generalizovaný terén terén původní. Čím větší jsou hodnoty náhodných chyb, tím hůře vystihuje generalizovaný terén tvar původního terénu. Jejich hodnoty strmě stoupají se zvětšující se úrovní pohledové pyramidy.

Při nízké úrovni generalizace (v první úrovni pohledové pyramidy) dosahuje ve všech územích nejlepších výsledků metoda **Z-tolerance**. V dalších úrovních pro území **panelové zástavby** vychází z hlediska hodnoty náhodných chyb nejlépe metoda **WS mean**. V **souvislém porostu lesa** dosahuje nejmenších hodnot náhodné chyby metoda **WS min**. V území **vesnické zástavby** jsou nejmenší hodnoty ve všech úrovních pohledových pyramid

u metody **Z-tolerance** a ve **středu města** vychází jako nejlepší z hlediska velikosti náhodné chyby metoda **WS mean**.

Chyba systematická a náhodná pro DMP

Metoda		Z-tolerance	WS mean	WS min	WS max	WS minmax
Území	Úroveň	systematická chyba c_H (m)				
1 (panelová zástavba)	1	-0,005	0,023	-0,548	0,469	-0,020
	2	0,176	-0,001	-1,516	1,226	-0,024
	3	0,496	-0,014	-2,486	2,959	0,393
2 (les)	1	-0,028	0,739	-3,755	4,628	0,404
	2	0,270	0,762	-5,559	8,551	1,126
	3	2,666	1,176	-5,828	11,776	2,225
3 (vesnice)	1	-0,004	0,000	-0,135	0,158	0,015
	2	-0,017	-0,014	-0,330	0,426	0,069
	3	0,004	-0,017	-0,519	0,997	0,271
4 (střed města)	1	0,034	0,091	-1,195	0,786	-0,197
	2	-0,080	0,217	-4,050	1,906	-0,801
	3	-0,078	0,333	-6,326	4,256	-0,818
Území	Úroveň	náhodná chyba $\hat{\sigma}_H$ (m)				
1 (panelová zástavba)	1	0,120	0,476	0,543	0,475	0,387
	2	1,069	0,959	1,293	1,079	1,098
	3	2,010	1,804	1,910	2,432	2,206
2 (les)	1	0,366	3,575	3,380	4,074	3,144
	2	6,366	4,862	4,251	6,529	5,569
	3	8,761	5,556	4,387	8,861	7,118
3 (vesnice)	1	0,054	0,136	0,139	0,155	0,104
	2	0,146	0,238	0,286	0,360	0,286
	3	0,235	0,390	0,405	0,783	0,581
4 (střed města)	1	0,589	0,886	1,142	0,869	0,801
	2	2,804	1,733	3,478	1,831	2,306
	3	4,345	3,320	4,780	3,741	4,155

Pozn.: Červeně jsou zvýrazněny nejnižší hodnoty chyb.

Tabulka 6.1: Přehled systematických a náhodných chyb pro DMP

6.3.2 DMR – porovnání metod tvorby pohledových pyramid

Pro DMR, tedy pro digitální model holého reliéfu, jsou výsledky částečně odlišné. Podle Přílohy E a grafického znázornění v Příloze F dosahovaly nejhorších výsledků opět metody WS min a WS max.

Při posouzení **systematických chyb** nad DMR dosahuje nejlepších výsledků metoda **Z-tolerance** a **WS minmax** (viz tabulka 6.2 a Přílohy K a L).

Pokud bychom hodnotili systematické chyby pro jednotlivá území, pak pro území **panelové zástavby** dosahují nejlepších výsledků metody **Z-tolerance** a **WS minmax** (hodnoty všech chyb se pohybují do 4 mm). Pro území **souvislého porostu lesa** dosahují v první úrovni pohledové pyramidy shodně hodnoty nula metody Z-tolerance a WS minmax, ovšem v ostatních úrovních pohledových pyramid má nejnižší hodnoty systematické chyby metoda **WS mean**. Pro **vesnické území** dosahuje nejnižších hodnot ve všech úrovních pohledových pyramid metoda **Z-tolerance**, ovšem je nutné podotknout, že v nejnižší úrovni generalizace (první úrovni pohledové pyramidy) dosahují shodné hodnoty (1 mm) i hodnoty WS mean a WS minmax. V území **středu města** se dá z hlediska výškového posunu generalizovaného DMR považovat za nejlepší opět metoda **Z-tolerance**.

Metody **WS min** a **WS max** stejně jako v DMP vykazují nejhorší výsledky systematických chyb - maximální hodnota je 18 cm pro území středu města a metodu WS min ve třetí úrovni pohledové pyramidy.

Z výše uvedených skutečností lze říci, že **pro tvorbu digitálního modelu reliéfu jsou nejlepšími metodami metody Z-tolerance a WS minmax**. Velmi nízkých hodnot systematických chyb dosahuje také metoda WS mean, která za těmito dvěma metodami o mnoho „nezaostává“.

Hodnoty **náhodných chyb** DMR jsou několikanásobně menší než u DMP a velmi rychle stoupají s rostoucí úrovní pohledové pyramidy. V celkovém pohledu dosahují nejlepších výsledků metody **WS minmax** a **Z-tolerance**.

Na základě tvrzení v kapitole 3 a tabulce 3.1 jsme předpokládali, že nejlepší výsledky poskytne metoda Z-tolerance. Je překvapivé, že ve **všech územích** vychází jako nejlepší metoda v prvních dvou úrovních pohledových pyramid **WS minmax** (v území lesního porostu

má nejmenší hodnoty náhodných chyb dokonce ve všech úrovních). Rozdíly mezi metodou WS minmax a Z-tolerance v prvních dvou úrovních generalizace jsou ale velmi malé (1 – 3 cm).

Metoda Z-tolerance ukázala, že její generalizovaný terén v nejvyšší míře generalizace (třetí úroveň pohledové pyramidy) nejlépe vystihuje tvar původního terénu (kromě území souvislého lesního porostu, kde shodné hodnoty náhodné chyby jako metoda WS minmax dosáhla i metoda WS mean). Ve všech třetích úrovních hodnoty náhodných chyb metody Z-tolerance dosáhly maximálně 9 cm. V prvních dvou úrovních dosahuje metoda Z-tolerance také velmi uspokojivých výsledků, a to i přesto, že počet bodů ve druhé a především v první úrovni pohledové pyramidy nejlepší metody WS minmax je podstatně větší.

Pokud bychom měli srovnat metody **WS mean** a **Z-tolerance**, dosahuje lepších výsledků pro DMR metoda Z-tolerance, protože vykazuje lepší výsledky pro druhou a třetí úroveň pohledových pyramid, tedy pro největší míry generalizace.

Chyba systematická a náhodná pro DMR

Metoda		Z-tolerance	WS mean	WS min	WS max	WS minmax
Území	Úroveň	systematická chyba c_H (m)				
1g (panelová zástavba)	1	0,000	-0,003	-0,032	0,028	-0,001
	2	-0,003	-0,006	-0,073	0,063	-0,002
	3	-0,004	-0,012	-0,145	0,135	0,001
2g (les)	1	0,000	-0,001	-0,022	0,021	0,000
	2	-0,002	-0,001	-0,056	0,049	-0,003
	3	-0,007	-0,001	-0,097	0,078	-0,008
3g (vesnice)	1	-0,001	0,001	-0,034	0,035	-0,001
	2	-0,003	0,004	-0,072	0,072	-0,006
	3	-0,005	0,008	-0,140	0,134	-0,012
4g (střed města)	1	0,003	-0,005	-0,028	0,020	0,000
	2	0,000	-0,008	-0,079	0,058	-0,001
	3	-0,004	-0,013	-0,179	0,131	-0,005
Území	Úroveň	náhodná chyba $\hat{\sigma}_H$ (m)				
1g (panelová zástavba)	1	0,038	0,037	0,042	0,037	0,023
	2	0,056	0,070	0,084	0,076	0,053
	3	0,077	0,134	0,149	0,148	0,099
2g (les)	1	0,035	0,024	0,024	0,024	0,011
	2	0,055	0,040	0,050	0,046	0,035
	3	0,078	0,061	0,081	0,069	0,061
3g (vesnice)	1	0,034	0,034	0,034	0,035	0,020
	2	0,050	0,058	0,064	0,067	0,043
	3	0,074	0,100	0,118	0,119	0,076
4g (střed města)	1	0,045	0,042	0,049	0,038	0,016
	2	0,064	0,084	0,100	0,081	0,053
	3	0,090	0,153	0,190	0,153	0,108

Pozn.: Červeně jsou zvýrazněny nejnižší hodnoty chyb.

Tabulka 6.2: Přehled systematických a náhodných chyb pro DMR

7 Závěr

Diplomová práce ukázala zajímavé skutečnosti při zpracování zdrojových dat LLS do výsledných digitálních modelů terénu. Pro tvorbu digitálních modelů byla použita mračna bodů z leteckého laserového skenování a v rámci práce byly vytvořeny skripty pro automatizaci výpočtu.

Přínos teoretické části diplomové práce je především v popisu současného stavu výškopisných databází v ČR a metod filtrace dat pořízených leteckým laserovým skenováním. Metodám filtrace se důkladně věnují kapitoly 2.2.1 a 2.2.2.

Základní problematikou práce je správné využití pohledových pyramid pro data z leteckého laserového skenování. Práce konfrontovala všechny dostupné metody pohledových pyramid programu ArcGIS. Toto srovnání proběhlo ve čtyřech zvolených oblastech s různým typem městského území.

Na začátku této práce existovala hypotéza o nerovnoměrném poklesu počtu bodů pyramidy Z-tolerance v případě digitálního modelu povrchu. Experimentem, který pro 28 výškových úrovní pyramid vypočetl počet bodů tvořících terén, bylo ukázáno, že pokles počtu bodů se zvyšující se pyramidovou úrovní je téměř rovnoměrný (viz graf 5.1). Výsledky experimentu pro metodu Z-tolerance DMP jsou podobné pro všechny druhy zkoumaných území s výjimkou území lesa, u kterého je patrný výrazný pokles počtu bodů u hodnoty výškové úrovně 20,32 m (obvyklá výška lesa). Vyvrácením hypotézy nebylo možné podat obecná doporučení k volbě hodnot výškových úrovní Z-tolerance, které by odrážely skokové (nerovnoměrné) změny v počtu bodů pohledové pyramidy v závislosti na hodnotě výškové tolerance.

Časová náročnost výpočtu modelů byla pro obě metody přibližně stejná v řádu hodin. Na základě objemové shody, počtu bodů a systematických a náhodných chyb byly pro vyhodnocení zobrazení DMP a DMR porovnány vlastnosti jednotlivých úrovní pohledových pyramid. Bylo potvrzeno úzké zaměření metod WS min a WS max, které se hodí pro speciální úlohy a v celkovém srovnání proto dopadly nejhůře. Výpočty nepotvrdily doporučení v dokumentaci k programu ArcGIS, že metoda WS max je vhodná pro DMP. Metoda Window Size mean je patrně nejuniverzálnější metodou, protože je možné

ji použít jak pro DMR, tak pro DMP, kde při větším ředění bodů (vyšší úroveň pohledové pyramidy) dosahuje nejlepších výsledků z pohledu objemových rozdílů. Totéž lze říci o metodě WS minmax, ovšem jejím záporem je větší počet bodů zahrnutých do DMP i DMR.

Metody Z-tolerance a WS mean dopadly nejlépe také z pohledu systematických a náhodných chyb. Velmi dobrých výsledků dosáhla také metoda WS minmax. Pořadí těchto tří metod se měnilo v závislosti na tvořeném terénu a také podle vybraného území, což je podrobně popsáno v kapitolách 6.3.1 a 6.3.2. Systematické chyby metod WS min a WS max jsou mnohem větší než u ostatních metod a jejich znaménko odpovídá způsobu tvorby terénu těmito metodami.

V neprospěch metody Z-tolerance hovoří vizuální vyjádření vytvořených DMP i DMR, které nepůsobí tak detailně, jako například terén z pohledové pyramidy WS mean nebo WS minmax. U metody WS minmax jsou čtenější ostré přechody z důvodu vybírání minimálních a maximálních hodnot, pro jednotlivá Window size.

Tvorba terénů vyžaduje hluboké znalosti výše uvedených skutečností a je časově velmi náročná. Proto byly v rámci práce vytvořeny skripty napomáhající automatizaci tvorby digitálních modelů terénu a k vyhodnocení přesnosti. S pomocí těchto skriptů bylo dosaženo cílů práce, které byly stanovené v úvodu. Mohou být užitečné pro navazující práce, které by mohly problematiku zpracování dat LLS dále prohloubit.

Prameny a literatura

- [1] ARCGIS HELP. *Desktop 10 – Terrain pyramids*. [on-line]. USA, 2011
[cit. 2011-08-21]. Dostupné z
<<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//005v00000010000000.htm>>.
- [2] *ASCII*. [on-line]. WIKIPEDIA, The Free Encyklopedia [cit. 2011-09-20]. Dostupné z
<<http://en.wikipedia.org/wiki/ASCII>>.
- [3] ATLAS DMT. *Manuál k programu Atlas* [on-line]. Atlas, spol. s r. o., Praha, 2011
[cit. 2011-09-28]. Dostupné z <<http://www.atlasltd.cz/show.php?key=Manualy>>
- [4] ATLAS DMT, *Oficiální stránky firmy ATLAS* [on-line]. Atlas, spol. s r. o., Praha, 2011
[cit. 2011-09-28]. Dostupné z <<http://www.atlasltd.cz>>
- [5] BAUERHANSL, C. H. ROTTENSTEINER, F. BRIESE, C. *Determination of terrain models by digital image matching methods*. Conference Paper of XXth ISPRS Congress in Istanbul [on-line]. USA, 2004 [cit. 2013-2-11]. Dostupné z
<<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm4/papers/383.pdf>>.
- [6] BRÁZDIL, K. *Nové zdroje geoprostorových dat pokrývajících území státu*. [on-line]. Pardubice: Zeměměřický úřad – Zeměměřický Odbor Pardubice, 2011 [cit. 2012-03-02]
Dostupné z <https://www.iss.cz/archiv/2011/download/prezentace/brazdil_zu.pdf>.
- [7] BRÁZDIL, K. Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. In *Geodetický a kartografický obzor*. Praha: ČÚZK, 2009, č. 7. s. 145-151. ISSN 0016-7096.
- [8] BRÁZDIL, K. *Realizační projekt zpracování výškopisných dat*. Interní předpis. ZÚ a VÚGTK, 2009.
- [9] BRÁZDIL, K. *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G)*. [on-line]. Pardubice: Zeměměřický úřad – Zeměměřický Odbor Pardubice, 2012
[cit. 2012-03-05] Dostupné z
<http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G_15012012.pdf>.

- [10] BRÁZDIL, K. *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)*. [on-line]. Pardubice: Zeměměřický úřad – Zeměměřický Odbor Pardubice, 2012 [cit. 2013-03-07] Dostupné z <http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf>.
- [11] BRÁZDIL, K. *Tvorba ortofot*. [on-line]. Prezentace. ČÚZK, 2009 [cit. 2013-03-03] Dostupné z <http://www.cuzk.cz/GenerujSoubor.ashx?NAZEV=999-S_DMVS-brazdil>.
- [12] BURKARDT, J. *XYZ Files*. [on-line]. The Florida State University - Dept. of Scientific Computing, Tallahassee, 2008 [cit. 2011-09-21]. Dostupné z <<http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/data/xyz/xyz.html>>.
- [13] CRAWFORD, C. ArcGIS Blogs. Lidar Solutions In ArcGIS_part7: *Minimizing noise from lidar for contouring and slope analysis* [on-line]. USA, 2011 [cit. 2011-08-21]. Dostupné z <http://blogs.esri.com/dev/blogs/geoprocessing/archive/2009/09/02/lidar-solutions-in-arcgis_5f00_part7_3a00_-minimizing-noise-from-lidar-for-contouring-and-slope-analysis.aspx>.
- [14] DOLANSKÝ, T. *Laserové skenování – DMT za letu*. [on-line]. Ostrava: VŠB – TUO, 2001 [cit. 2012-02-25] Dostupné z <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2001/Sbornik/Referaty/Dolanskyr.htm>.
- [15] DOLANSKÝ, T. *Lidary a letecké laserové skenování*. [on-line]. Ústí nad Labem: ÚJEP, 2004 [cit. 2012-05-08] Dostupné z <<http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf>>.
- [16] FIALA, R. *Robustní postupy hodnocení kvality digitálních modelů reliéfu*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. Disertační práce.
- [17] GASIOR, M. *Laserové skenování pro tvorbu 3D modelu terénu vybrané části NP České Švýcarsko*. Diplomová práce, vedoucí T. Dolanský. Ústí nad Labem, 2006. ÚJEP v Ústí nad Labem. Fakulta životního prostředí. Dostupné z <http://gis.vsb.cz/GISacek/GISacek_2006/sbornik/gasior/gasior.pdf>.
- [18] GEODIS BRNO. *Letecké laserové skenování - LIDAR*. [on-line]. Brno: GEODIS BRNO, spol. s r.o., 2012 [cit. 2012-02-23] Dostupné z <<http://www.geodis.cz/sluzby/letecky-laserscanning>>.

- [19] GEODIS BRNO. *Mobilní mapování*. [on-line]. Brno: GEODIS BRNO, spol. s r.o., 2012 [cit. 2012-02-23] Dostupné z <<http://www.geodis.cz/sluzby/mobilni-mapovani>>.
- [20] GEODIS BRNO. *Pozemní laserové skenování*. [on-line]. Brno: GEODIS BRNO, spol. s r.o., 2012 [cit. 2012-02-23] Dostupné z <<http://www.geodis.cz/sluzby/pozemni-laserscanning>>.
- [21] *Geoportál ČÚZK*. ČÚZK. [cit. 2012-04-02] Dostupné z <<http://geoportal.cuzk.cz/>>.
- [22] GEOVAP. *Laserové skenování – 3D vizualizace*. [on-line]. GEOVAP, spol. s r. o., Pardubice, 2011 [cit. 2011-09-20]. Dostupné z <http://www.geovap.cz/html/laser_scan_aplikace.htm>.
- [23] HARANT, J. *Elektronický snímač letových parametrů*. Diplomová práce, vedoucí J. Šebesta. Brno, 2009. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14368>.
- [24] JANUS, P. MARŠA, J. *Zavedení geodetického systému WGS84 do AČR*. [on-line]. Dobruška: Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad, 2006 [cit. 2013-03-07] Dostupné z <http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/jine/geos06/paper/22_janus_marsa/paper/22_janus_marsa.pdf>.
- [25] JON, J. *Testování mobilní sestavy inerciální jednotky a laserové hlavy*. Diplomová práce, vedoucí K. Pavelka. Praha, 2011. ČVUT v Praze. Fakulta stavební. Dostupné z <<http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/dp/2011/jakub-jon-dp-2011.pdf>>.
- [26] KEY, H. *Airborne Lidar Sensors*. [on-line]. Federick (USA): Professional Surveyor Magazine, 2009 [cit. 2012-02-24] Dostupné z <<http://www.profsurv.com/assets/magazines/articles/70254/AirborneLidarSensors.pdf>>.
- [27] LAND MANAGEMENT. *Metoda Laserové skenování*. [on-line]. Praha: LA-MA, oborový portál, 2011 [cit. 2012-02-29] Dostupné z <<http://www.la-ma.cz/?p=88>>.

- [28] LIN, Y. -C. MILLS, J. P. INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. *Integration of full-waveform information into the airborne laser scanning data filtering process*. [on-line]. ISPRS, 2009 [cit. 2013-03-20] Dostupné z <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/3-W8/papers/p39.pdf>>.
- [29] *Manual SCOP ++*. [on-line]. Vienna: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing TU WIEN, 2010 [cit. 2013-2-11]. Dostupné z <<http://www.ipf.tuwien.ac.at/euroedr/download/scopman.pdf>>.
- [30] MENG, X. CURRIT, N. ZHAO, K. MULTIDISCIPLINARY DIGITAL PUBLISHING INSTITUTE. *Ground filtering Algorithms for Airborne LIDAR data: A review of Critical Issues*. [on-line]. MDPI, 2010 [cit. 2013-04-20] Dostupné z <www.mdpi.com/2072-4292/2/3/833/pdf>.
- [31] PIKHARTOVA, L. *Využití mobilního prostředku laserového skenování v projektu dokumentace dálnice D11*. [on-line]. Praha: Fsv ČVUT, 2009 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z <<http://lfgm.fsv.cvut.cz/mdcr/publikace/2009/10.pdf>>.
- [32] POSPÍŠILOVÁ, J. *Příprava vzorových úloh pro předmět Laserové skenování*. Diplomová práce, vedoucí T. Křemen. Praha, 2009. ČVUT v Praze. Fakulta stavební. Dostupné z <<http://gama.fsv.cvut.cz/~cepek/proj/dp/2010/jana-pospasilova-dp-2010.pdf>>
- [33] RAPANT, P. *Digitální modelu reliéfu XIV – Nový výškopis ČR: Laserové skenování*. [on-line]. Ostrava: VŠB – TUO, 2010 [cit. 2012-03-04] Dostupné z <http://gis.vsb.cz/rapant/vyukove_materialy/LS/DMR/Prezentace/DMR_2009_XV.pdf>.
- [34] SITHOLE, G. VOSSELMAN, G. INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. *Experimental comparison of filter algorithms for base-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds*. [on-line]. ISPRS, 2004 [cit. 2013-04-20] Dostupné z <http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Journal_Articles/pdfs/Experimental%20comparison%20of%20filter%20algorithms%20for%20base-Earth%20extraction%20from%20airborne%20laser%20scanning%20point%20clouds.pdf>.

- [35] SITHOLE, G. VOSSelman, G. INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. *Report: ISPRS Comparison of Filters*. [on-line]. ISPRS, 2003 [cit. 2013-04-20] Dostupné z <<http://www.itc.nl/isprswgiii-3/filtertest/MainDoc.htm>>.
- [36] ŠEBESTA, J. *Družicové navigační systémy III. – přednáškový text k předmětu Radiolokační a radionavigační systémy*. [on-line]. Brno: FEKT VUT v Brně, Ústav radioelektroniky, 2011 [cit. 2013-1-11]. Dostupné z <www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/MRAR/P12/CZ12.ppt>.
- [37] ŠTONER, M. *Přednáškové texty k předmětu stavební geodézie*. [on-line]. Praha: ČVUT, 2011 [cit. 2012-02-23]. Dostupné z <k154.fsv.cvut.cz/~stroner/SGE/pred_8.pdf>.
- [38] *Terminologický slovník zeměměřičtví a katastru nemovitostí*. VÚGTK. [cit. 2012-04-02] Dostupné z <<http://geoportal.cuzk.cz/>>.
- [39] TÓVÁRI, D. PFEIFER, N. INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. *Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering*. [on-line]. ISPRS, 2005 [cit. 2013-03-20] Dostupné z <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/079.pdf>>.
- [40] VAZIRABAD, Y. F. KARSLIOGLU, M. O. INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. *Airborne laser scanning data for tree characteristics detection*. [on-line]. ISPRS, 2010 [cit. 2013-03-20] Dostupné z <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1-W17/10_Vazirabad.pdf>.
- [41] VOJTEK, D. *Zpracování dat LIDARových měření v ArcGIS*. [on-line]. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Institut Geoinformatiky, 2010 [cit. 2011-08-21]. Dostupné z <http://gis.vsb.cz/vojtek/content/seminars/files/2010_LIDAR/LIDAR.pdf>.
- [42] ZAMAZAL, Z. *Číslíková zpracování signálů v reálném čase*. Diplomová práce, vedoucí O. Rášo. Brno, 2011. VUT v Brně. Fakulta elektrotechniky a telekomunikačních technologií. Dostupné z <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38750>.

[43] ZÁVRSKÝ, M. *Laserové skenování*. [on-line]. Ledeč nad Sázavou: Geodézie Ledeč nad Sázavou, 2012 [cit. 2012-02-21] Dostupné z <<http://www.geodezieledec.cz/laserove-skenovani/>>.

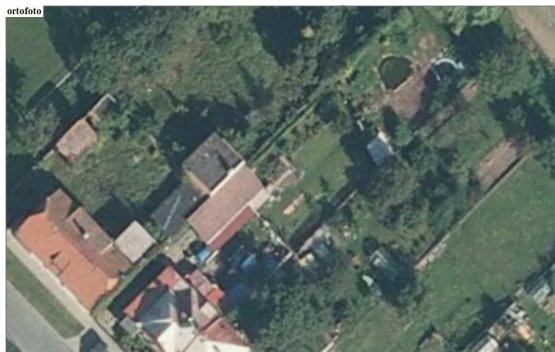
Seznam příloh

- A. Ukázka ředění bodů metodou Z-tolerance (území 3 - vesnice)
- B. Počty bodů pro experiment metody Z-tolerance (DMP a DMR)
- C. Počty bodů v původních datech modelu terénu a jednotlivých úrovních pohledových pyramid ve všech vybraných územích - tabulky
- D. Počty bodů v původních datech modelu terénu a jednotlivých úrovních pohledových pyramid ve všech vybraných územích - grafy
- E. Objemové rozdíly mezi původním modelem terénu a modely terénu pohledových pyramid ve všech vybraných územích se všemi metodami tvorby terénu - tabulka
- F. Objemové rozdíly mezi původním modelem terénu a modely terénu pohledových pyramid ve všech vybraných územích se všemi metodami tvorby terénu – grafy
- G. Digitální model povrchu v měřítku 1:1000 v území s vesnickou zástavbou
- H. Digitální model reliéfu v měřítku 1:1000 v území s vesnickou zástavbou
- I. Přehled chyb pro DMP – tabulky
- J. Přehled chyb pro DMP - grafy
- K. Přehled chyb pro DMR – tabulky
- L. Přehled chyb pro DMR - grafy
- M. Obsah přiloženého DVD

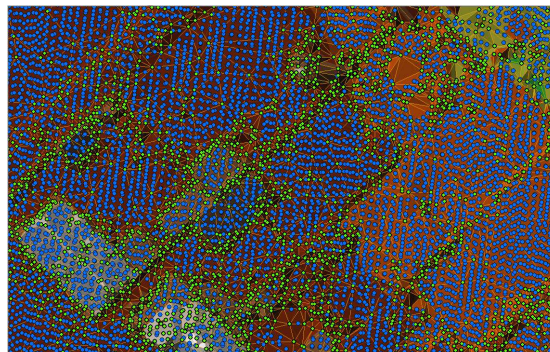
Přílohy

Příloha A

Ukázka ředění bodů metodou Z-tolerance (území 3 - vesnice)



Ortofotosnímek



- úroveň 0,10 m
- úroveň 0 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,13 m
- úroveň 0,10 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



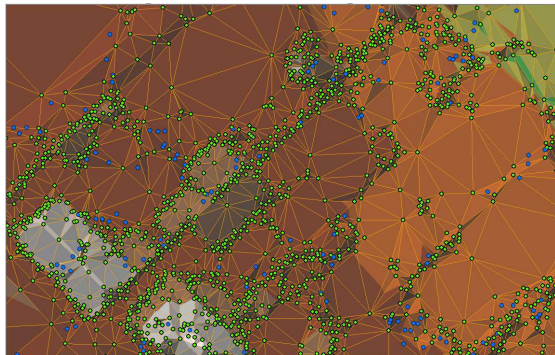
- úroveň 0,16 m
- úroveň 0,13 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



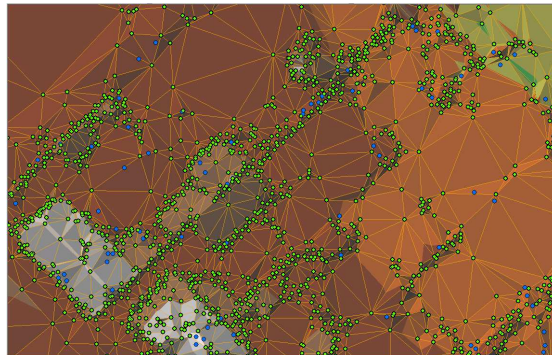
- úroveň 0,20 m
- úroveň 0,16 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,25 m
- úroveň 0,20 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,32 m
- úroveň 0,25 m (zředité body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,40 m
- úroveň 0,32 m (zředité body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,50 m
- úroveň 0,40 m (zředité body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,64 m
- úroveň 0,50 m (zředité body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 0,80 m
- úroveň 0,64 m (zředité body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 1,01 m
- úroveň 0,80 m (zředité body)
- hrany TIN (DMT)



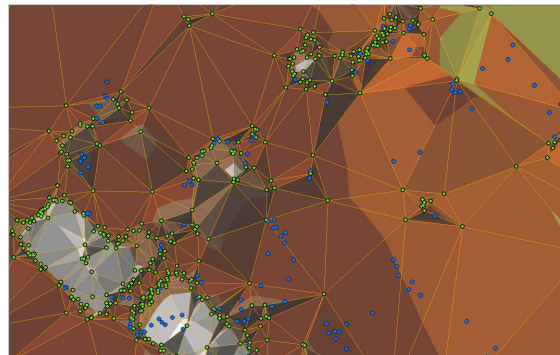
- úroveň 1,27 m
- úroveň 1,01 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 1,60 m
- úroveň 1,27 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 2,02 m
- úroveň 1,60 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



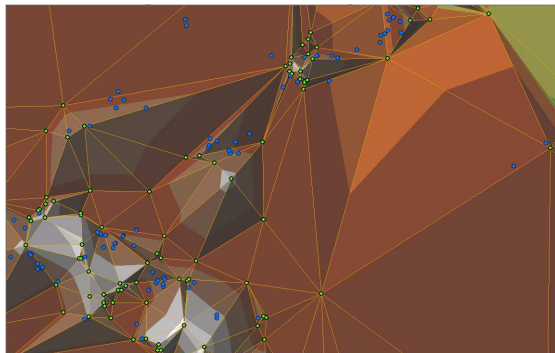
- úroveň 2,54 m
- úroveň 2,02 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



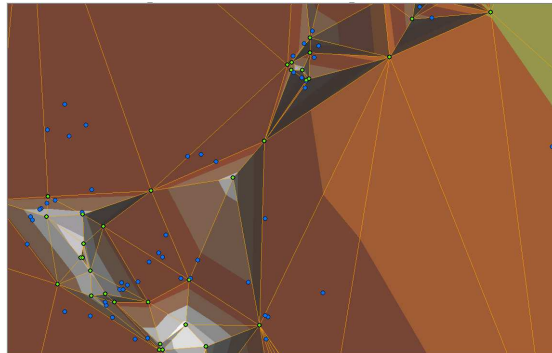
- úroveň 3,20 m
- úroveň 2,54 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



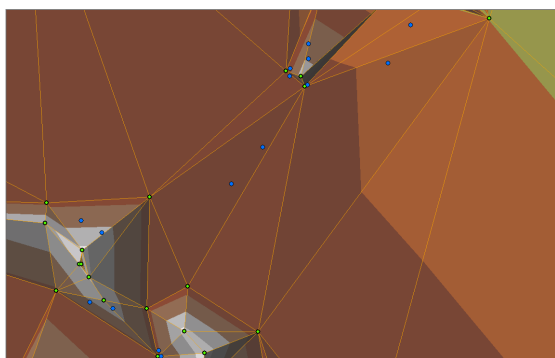
- úroveň 4,03 m
- úroveň 3,20 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



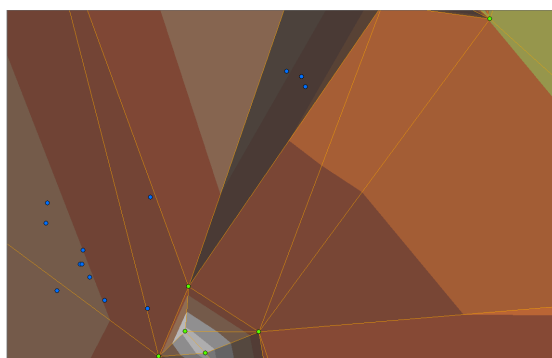
- úroveň 5,08 m
- úroveň 4,03 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



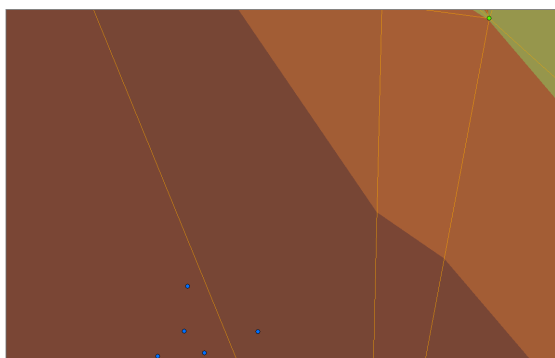
- úroveň 6,40 m
- úroveň 5,08 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



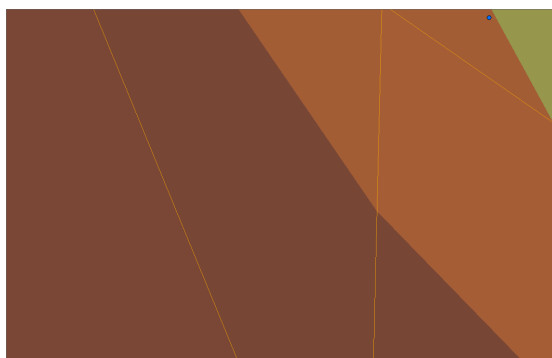
- úroveň 8,06 m
- úroveň 6,40 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 10,16 m
- úroveň 8,06 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 12,80 m
- úroveň 10,16 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)



- úroveň 16,13 m
- úroveň 12,80 m (zředěné body)
- hrany TIN (DMT)

Příloha B

Počty bodů pro experiment metody Z-tolerance (DMP a DMR)

Odečítané úrovně (v metrech)	DMP				DMR			
	Území 1	Území 2	Území 3	Území 4	Území 1g	Území 2g	Území 3g	Území 4g
	panelová zástavba Počet bodů	les Počet bodů	vesnice Počet bodů	střed města Počet bodů	panelová zástavba Počet bodů	les Počet bodů	vesnice Počet bodů	střed města Počet bodů
0,10	435 919	774 894	197 748	561 302	153 250	102 338	95 235	67 374
0,13	356 625	752 139	153 231	515 106	84 137	59 365	53 534	43 160
0,16	320 853	739 118	132 007	489 251	53 921	35 355	35 396	31 307
0,20	296 729	729 266	116 231	468 411	35 698	18 696	22 969	22 698
0,25	279 502	721 838	104 838	452 043	24 824	9 478	15 338	16 945
0,32	264 623	715 000	95 597	435 472	17 069	4 433	9 904	12 544
0,40	252 824	709 286	88 332	420 653	12 391	2 537	6 652	9 702
0,50	240 968	703 365	81 940	405 025	8 986	1 496	4 580	7 559
0,64	226 972	696 015	75 014	384 810	6 343	771	2 999	5 717
0,80	212 725	688 097	68 782	364 073	4 400	462	2 020	4 519
1,01	196 247	678 495	61 671	340 137	3 040	306	1 294	3 456
1,27	177 600	667 883	54 620	315 053	1 954	198	844	2 712
1,60	157 670	656 534	46 946	287 553	1 269	160	529	2 047
2,02	140 531	643 985	38 826	264 698	779	116	312	1 520
2,54	124 498	630 647	30 983	242 294	443	108	210	1 120
3,20	109 030	615 262	23 327	220 223	241	101	146	823
4,03	94 271	597 185	17 031	199 511	156	92	122	603
5,08	79 175	574 138	11 877	178 371	123	92	113	444
6,40	63 866	544 298	7 885	155 421	107	88	99	277
8,06	50 140	501 755	4 880	128 676	98	87	98	203
10,16	38 701	438 338	2 793	97 153	89	87	98	161
12,8	28 564	348 822	1 657	61 313	89	87	98	130
16,13	19 528	226 757	766	28 506	89	87	98	111
20,32	10 161	78 965	273	7 046	89	87	98	100
25,60	1 768	3 343	152	913	89	87	98	96
32,25	504	186	123	327	89	87	98	96
40,64	162	175	123	267	89	87	98	96
51,20	150	175	123	214	89	87	98	96

Příloha C

Počty bodů v původních datech modelu terénu a jednotlivých úrovních pohledových pyramid ve všech vybraných územích

Území 1 - sídliště, škola, hřiště, ulice

DMP					DMR				
	terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň		terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Z-tolerance	1225200	296729	79175	19528	Z-tolerance	876305	155416	88362	19330
WS mean	1225212	301693	79055	18983	WS mean	876310	247390	71877	18293
WS min	1225212	248305	64539	18178	WS min	876310	205483	57628	17427
WS max	1225212	247774	63446	16859	WS max	876310	205553	57521	17270
WS minmax	1225212	490321	127822	35017	WS minmax	876310	395961	113852	34482

Území 2 - souvislý porost lesa

DMP					DMR				
	terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň		terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Z-tolerance	1043562	226 757	78 965	3 343	Z-tolerance	574502	103296	60030	9408
WS mean	1043568	272097	71223	17744	WS mean	574504	204982	75319	18916
WS min	1043568	240161	64057	17898	WS min	574504	196128	75319	17811
WS max	1043568	239721	63122	16526	WS max	574504	196105	61808	18048
WS minmax	1043568	457412	127001	34408	WS minmax	574504	346387	120436	35739

Území 3 – vesnice, pole, louky, meze

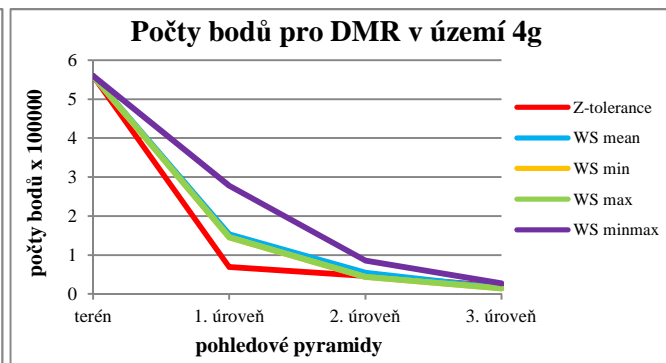
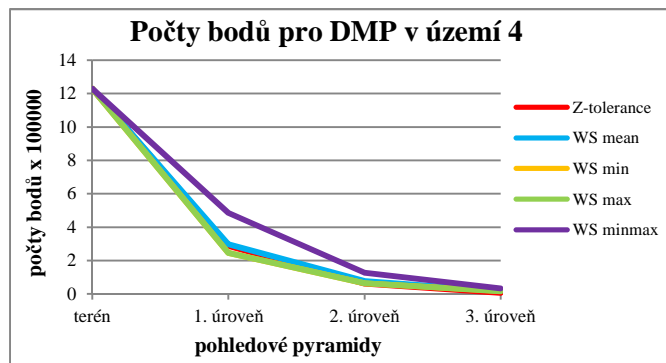
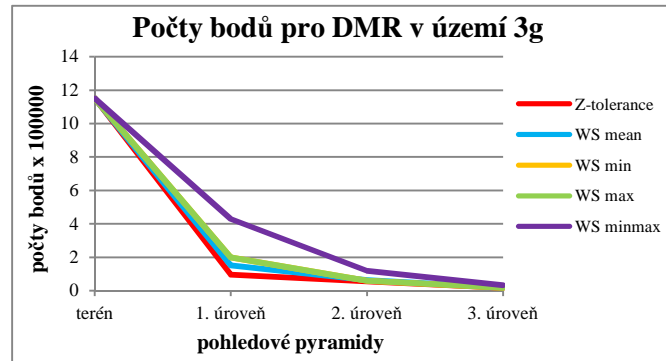
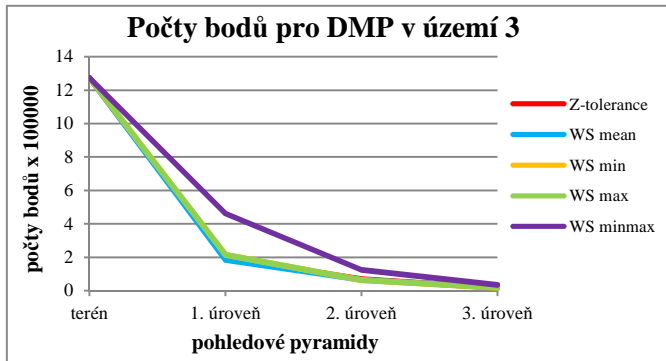
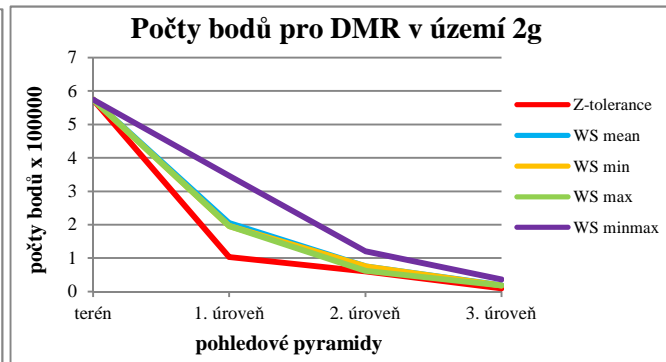
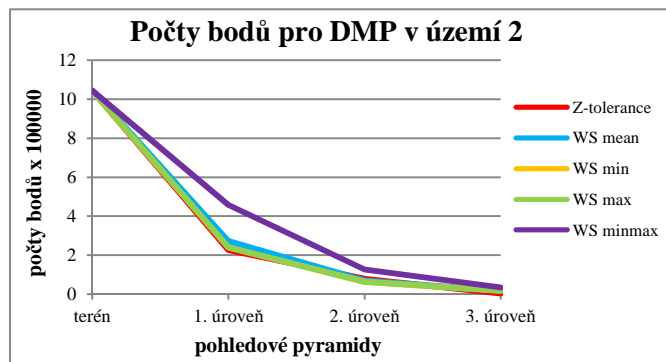
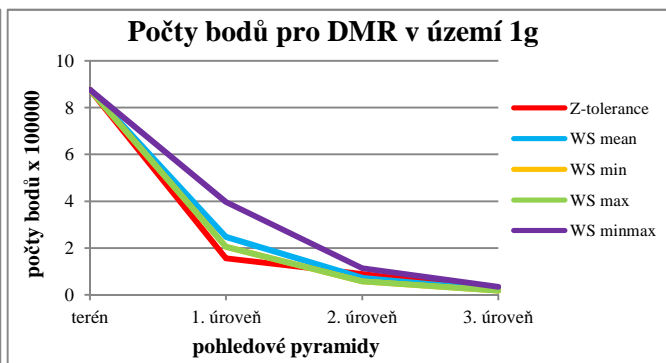
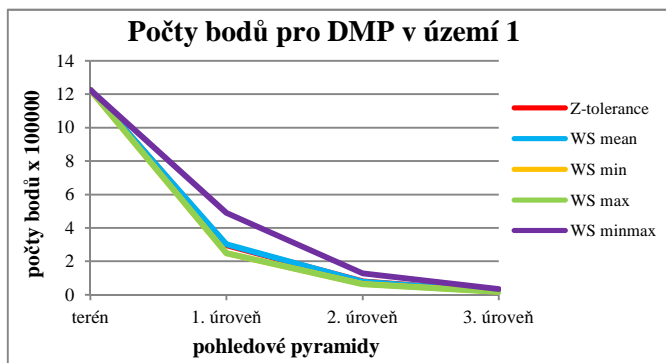
DMP					DMR				
	terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň		terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Z-tolerance	1273364	197748	68782	17031	Z-tolerance	1151004	95846	55688	17366
WS mean	1273376	183179	65731	18992	WS mean	1151015	151099	62495	18543
WS min	1273376	215467	62492	17235	WS min	1151015	199582	59674	16726
WS max	1273376	215458	62436	17028	WS max	1151015	199669	59816	16812
WS minmax	1273376	461074	123794	34145	WS minmax	1151015	428806	118836	33440

Území 4 – střed města

DMP					DMR				
	terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň		terén	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Z-tolerance	1228704	287553	61313	7046	Z-tolerance	559664	69305	46082	20030
WS mean	1228721	298477	77722	18028	WS mean	559670	152650	54291	15070
WS min	1228721	246327	63372	16850	WS min	559670	145832	43655	13903
WS max	1228721	246472	63261	16515	WS max	559670	145809	43686	13867
WS minmax	1228721	485494	126383	33349	WS minmax	559670	277835	85503	27357

Příloha D

Počty bodů v původních datech modelu terénu a jednotlivých úrovních pohledových pyramid ve všech vybraných územích



Příloha E

Objemové rozdíly mezi původním modelem terénu a modely terénu pohledových pyramid ve všech vybraných územích se všemi metodami tvorby terénu Z-tolerance

Objemy (v m ³)	Území 1 (DMP)			Území 1g (DMR)			Území 2 (DMP)			Území 2g (DMR)			Území 3 (DMP)			Území 3g (DMR)			Území 4 (DMP)			Území 4g (DMR)		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Nad	41846	367153	1101278	15063	18178	29008	1920678	2683627	4996371	14070	17615	27764	15915	62683	225342	13156	16001	26894	177506	1011658	2901278	19666	23135	34003
Pod	47456	179535	1047655	15345	19622	32888	1752666	2413629	2329915	14389	18811	34981	20359	65735	154795	14250	17622	32096	129394	1155167	2665607	16861	21037	38137
Absolutní	89302	546688	2148933	30408	37800	61896	3673344	5097256	7326286	28459	36426	62745	36274	128418	380137	27406	33623	58990	306900	2166825	5566885	36527	44172	72140

WS mean

Objemy (v m ³)	Území 1 (DMP)			Území 1g (DMR)			Území 2 (DMP)			Území 2g (DMR)			Území 3 (DMP)			Území 3g (DMR)			Území 4 (DMP)			Území 4g (DMR)		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Nad	202570	383204	714423	13301	25387	47878	1829632	2349576	2859538	9480	15888	23710	53985	88549	147849	14275	25100	44014	401729	806762	1501448	14476	29786	54898
Pod	179073	383754	728913	16031	30976	59473	1091111	1587194	1683736	10047	16498	25125	54467	102573	164504	13305	21184	36501	311159	590216	1167984	19489	37304	68373
Absolutní	381643	766958	1443336	29332	56363	107351	2920743	3936770	4543274	19527	32386	48835	108452	191122	312353	27580	46284	80515	712888	1396978	2669432	33965	67090	123271

WS min

Objemy (v m ³)	Území 1 (DMP)			Území 1g (DMR)			Území 2 (DMP)			Území 2g (DMR)			Území 3 (DMP)			Území 3g (DMR)			Území 4 (DMP)			Území 4g (DMR)		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Nad	34503	39068	11039	5148	7970	10692	143411	19728	3797	1955	1994	2198	10204	9529	3689	2058	2513	3244	63675	110274	8544	8425	11520	15060
Pod	582987	1554736	2496792	37357	80564	155819	3898144	5579066	5831553	24300	58466	99000	144914	340009	523056	36381	74668	142842	1258374	4160638	6334189	36809	90374	193830
Absolutní	617490	1593804	2507831	42505	88534	166511	4041555	5598794	5835350	26255	60460	101198	155118	349538	526745	38439	77181	146086	1322049	4270912	6342733	45234	101894	208890

WS max

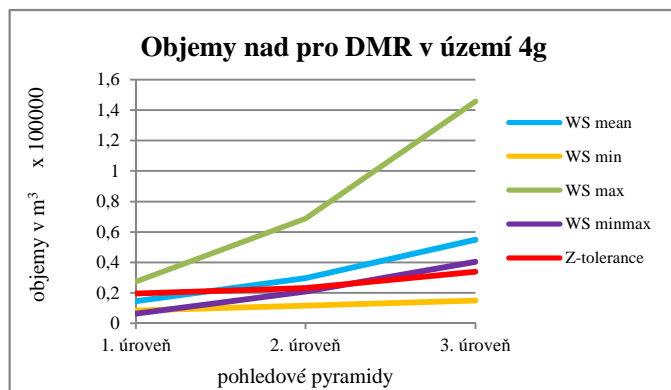
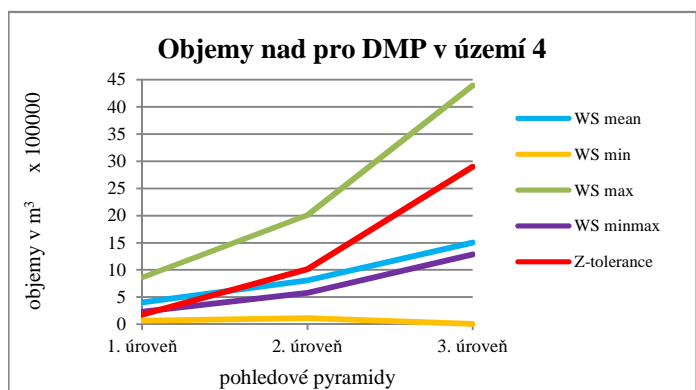
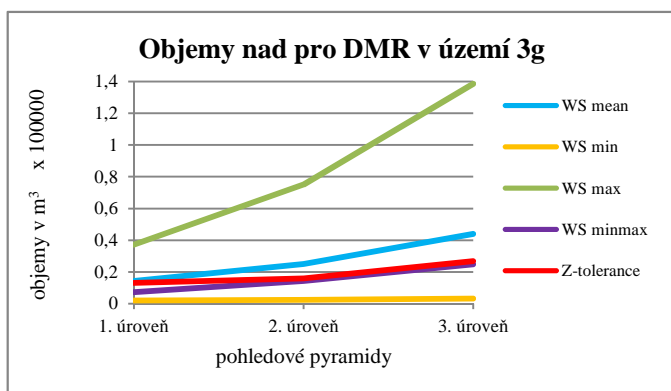
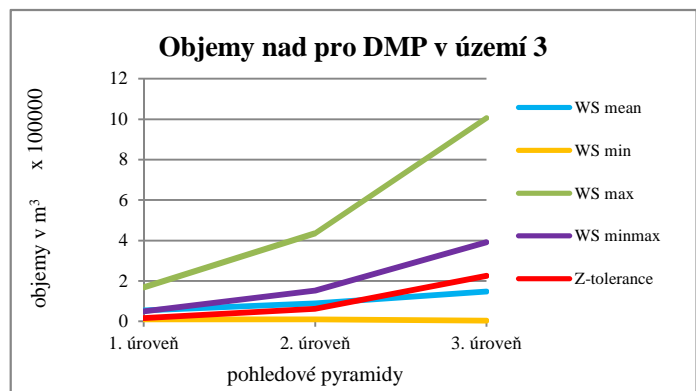
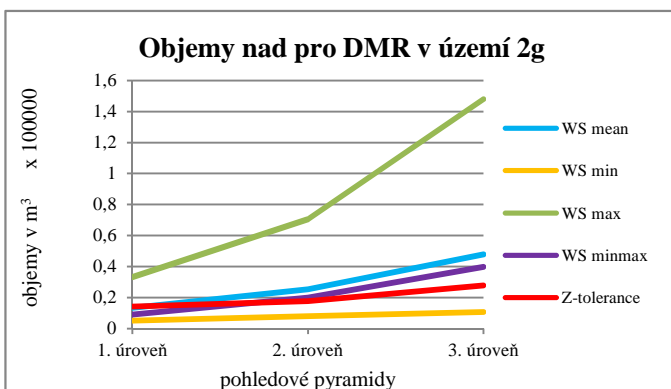
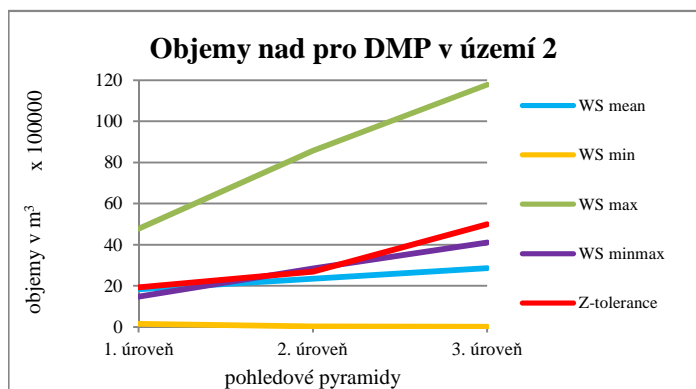
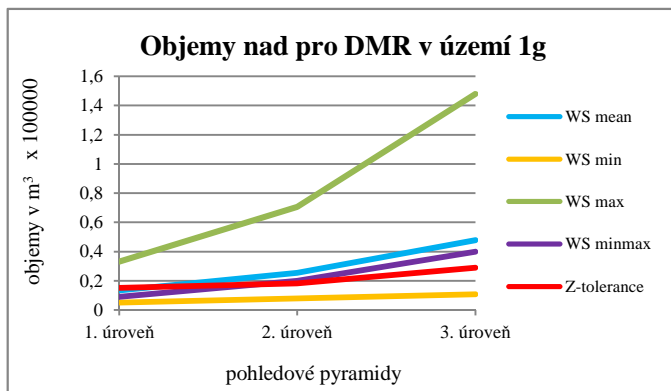
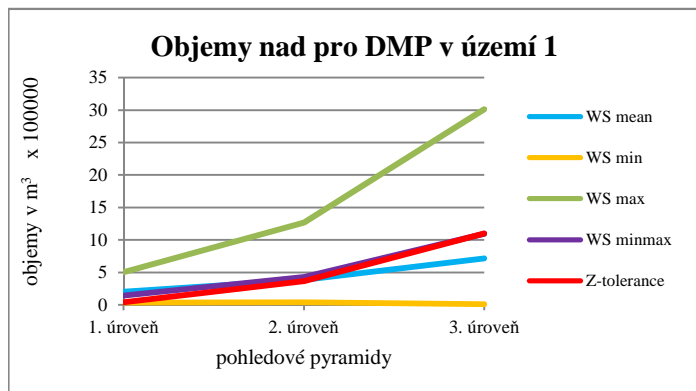
Objemy (v m ³)	Území 1 (DMP)			Území 1g (DMR)			Území 2 (DMP)			Území 2g (DMR)			Území 3 (DMP)			Území 3g (DMR)			Území 4 (DMP)			Území 4g (DMR)		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Nad	501558	1266275	3011502	33057	70549	147909	4780196	8578657	11783081	23400	51464	80772	167867	436310	1005305	37059	75134	138592	861864	2010078	4394497	27405	68852	145725
Pod	32661	40363	52481	4559	8022	12534	152367	28028	6882	2105	2280	2726	9458	10141	8756	2344	3452	4803	75564	104274	138501	6915	10751	15105
Absolutní	534219	1306638	3063983	37616	78571	160443	4932563	8606685	11789963	25505	53744	83498	177325	446451	1014061	39403	78586	143395	937428	2114352	4532998	34320	79603	160830

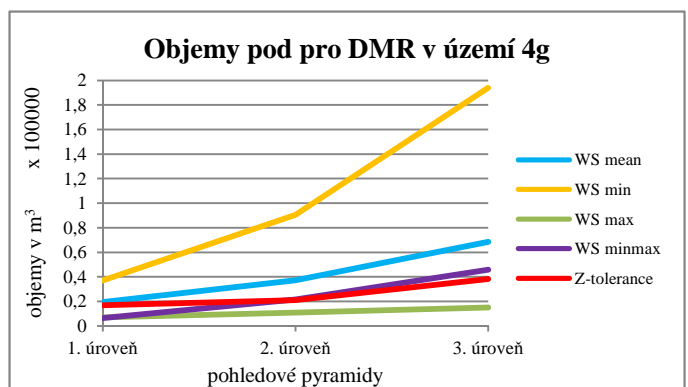
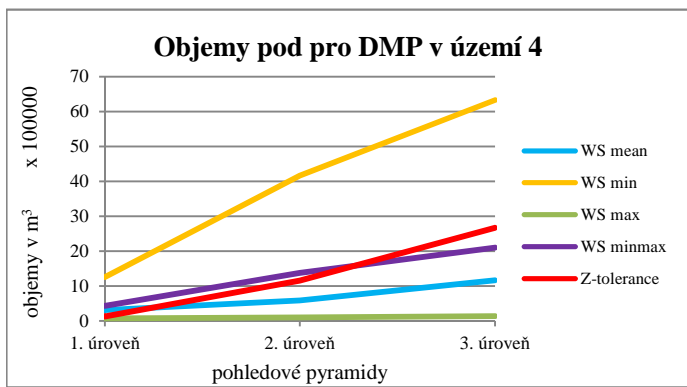
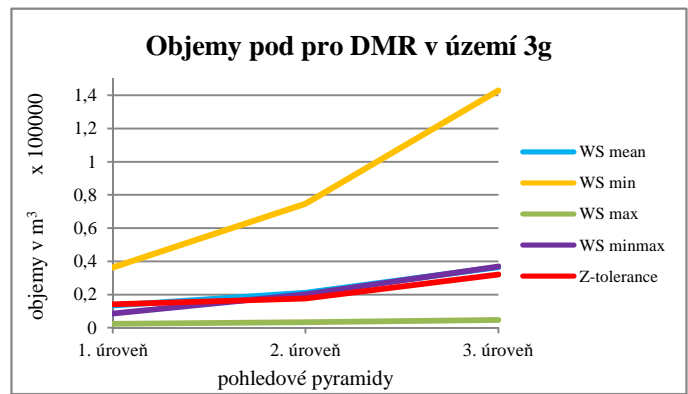
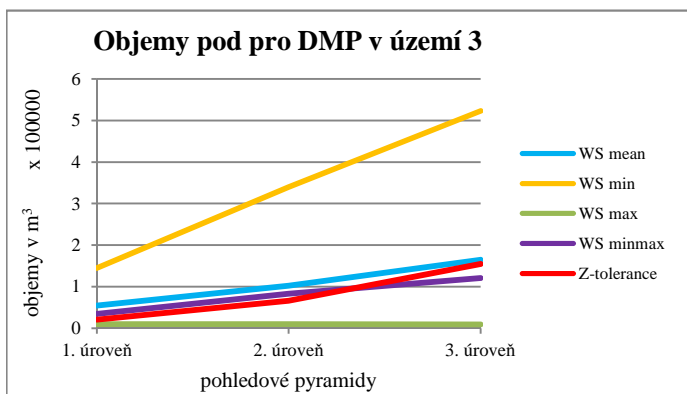
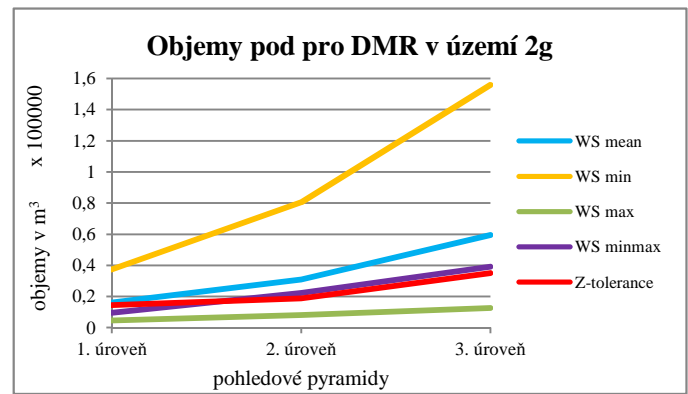
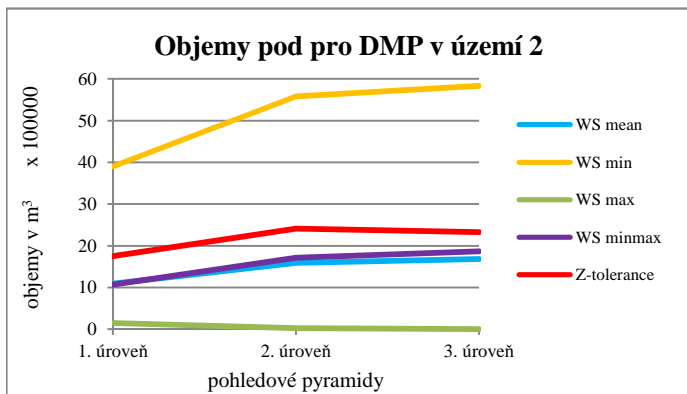
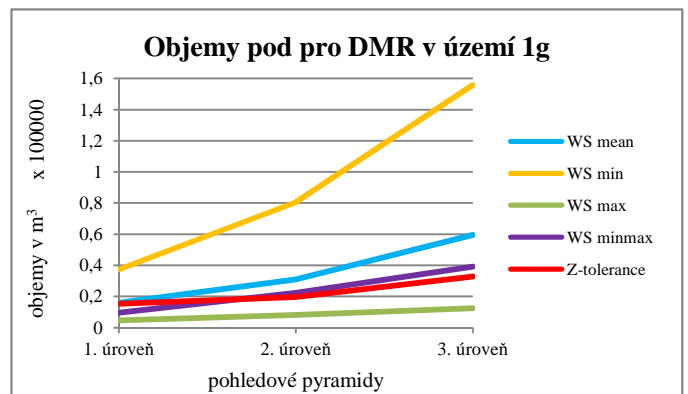
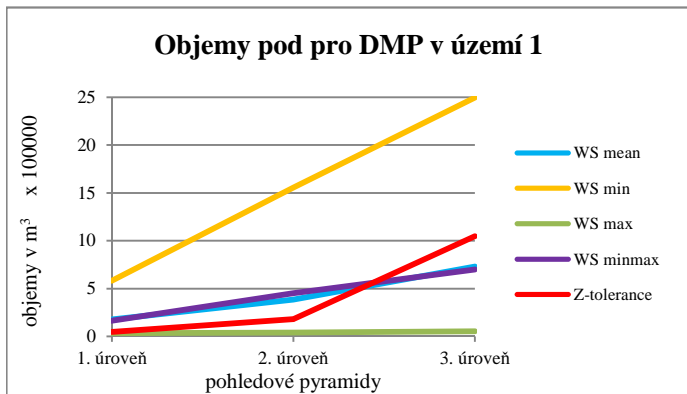
WS minmax

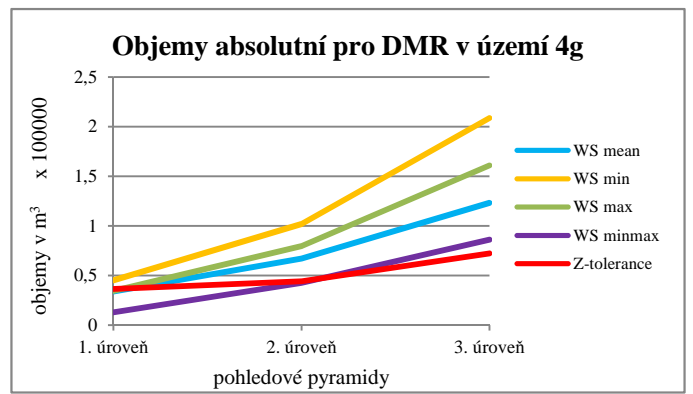
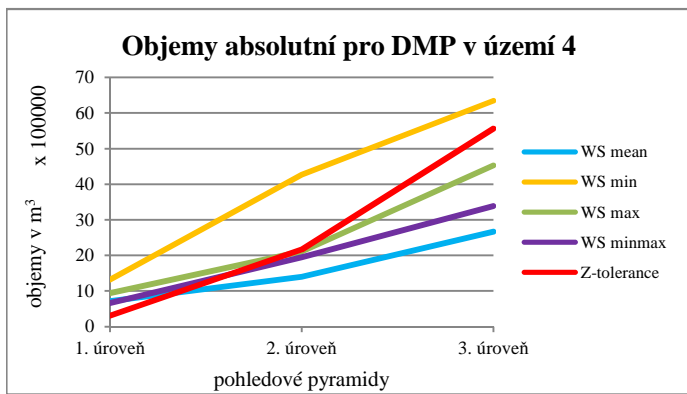
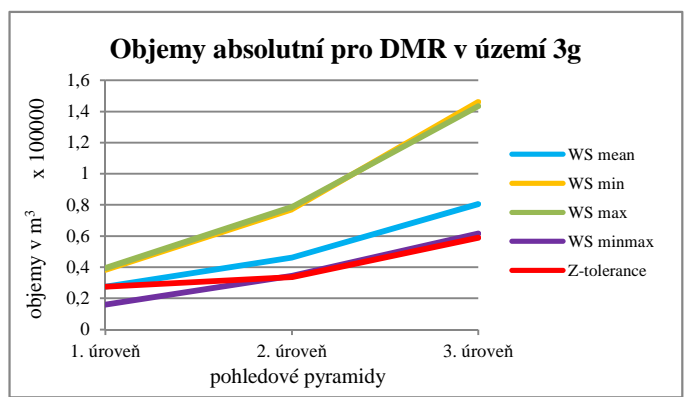
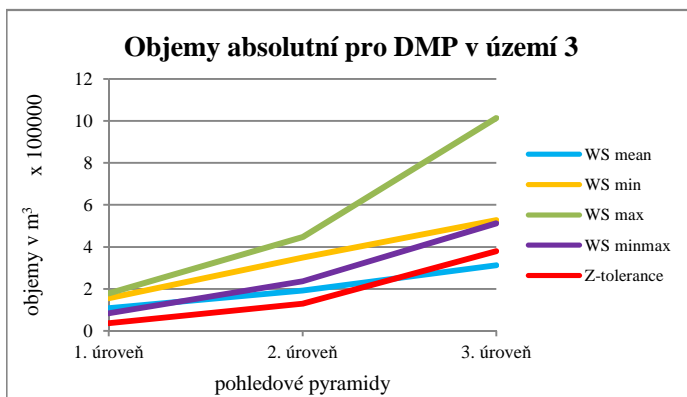
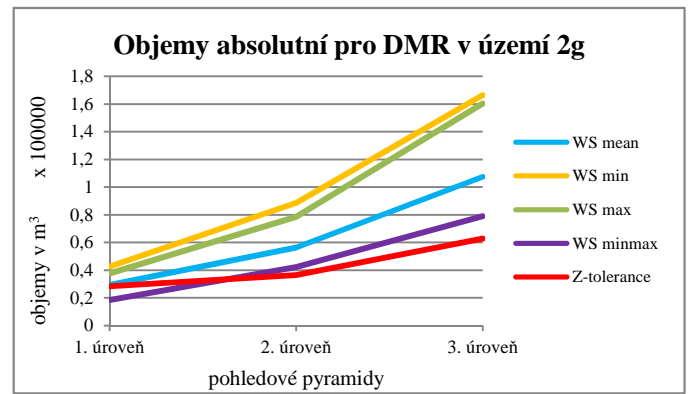
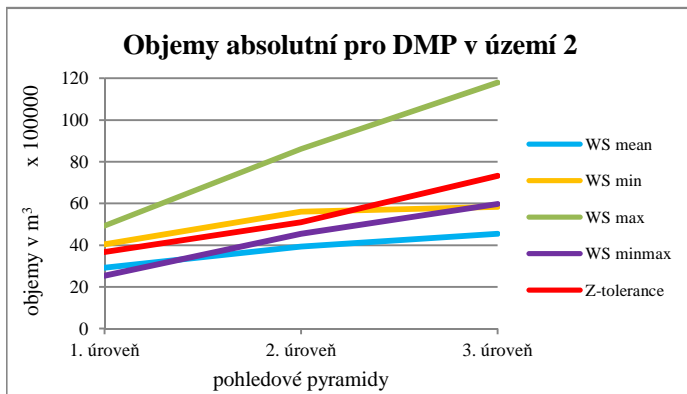
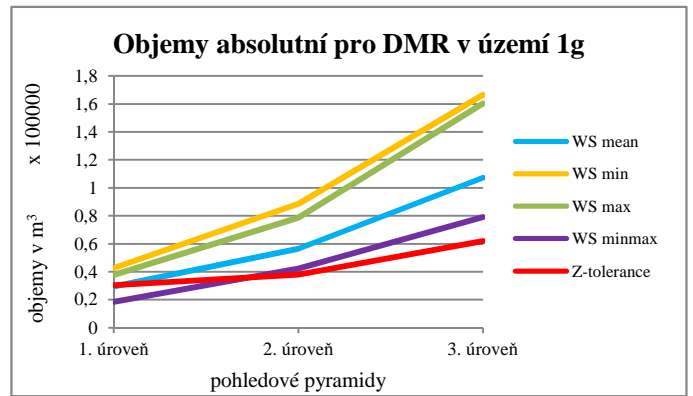
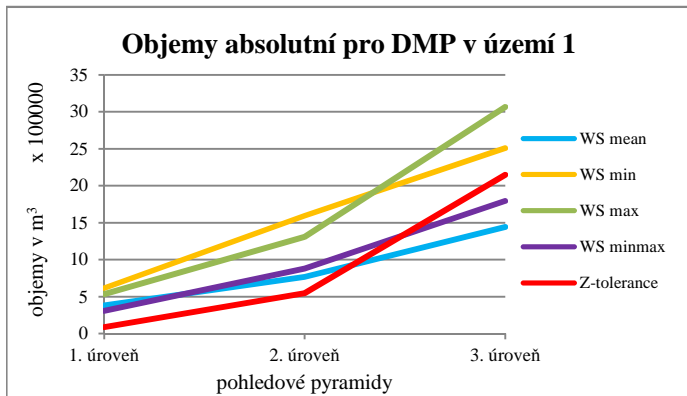
Objemy (v m ³)	Území 1 (DMP)			Území 1g (DMR)			Území 2 (DMP)			Území 2g (DMR)			Území 3 (DMP)			Území 3g (DMR)			Území 4 (DMP)			Území 4g (DMR)		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
Nad	145226	427558	1092680	8900	19930	39849	1469570	2835829	4095833	4342	12278	20221	49171	152021	391933	7229	14421	24778	231355	575763	1285027	6315	20773	40379
Pod	164866	451063	699744	9486	22288	39164	1065988	1709870	1870467	4787	15620	28713	34664	83388	120712	8664	20144	36851	428511	1377068	2103013	6355	21604	45739
Absolutní	310092	878621	1792424	18386	42218	79013	2535558	4545699	5966300	9129	27898	48934	83835	235409	512645	15893	34565	61629	659866	1952831	3388040	12670	42377	86118

Příloha F

Objemové rozdíly mezi původním modelem terénu a modely terénu pohledových pyramid ve všech vybraných územích se všemi metodami tvorby terénu







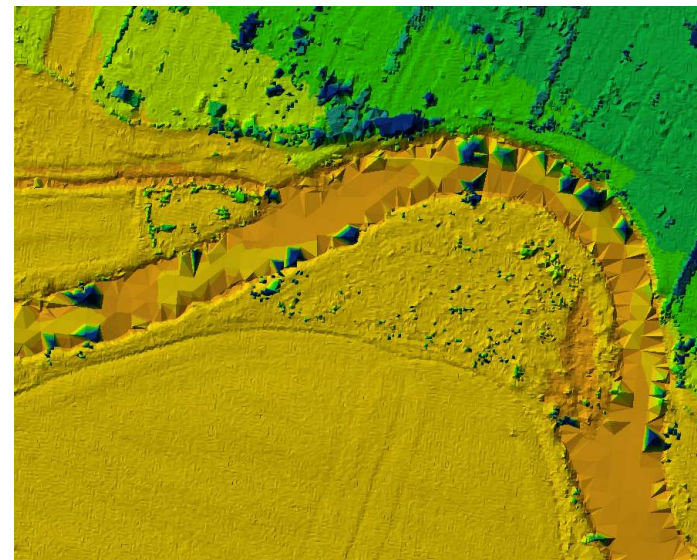
Příloha G

Digitální model povrchu v měřítku 1:1000 v území s vesnickou zástavbou pro druhou úroveň pohledových pyramid

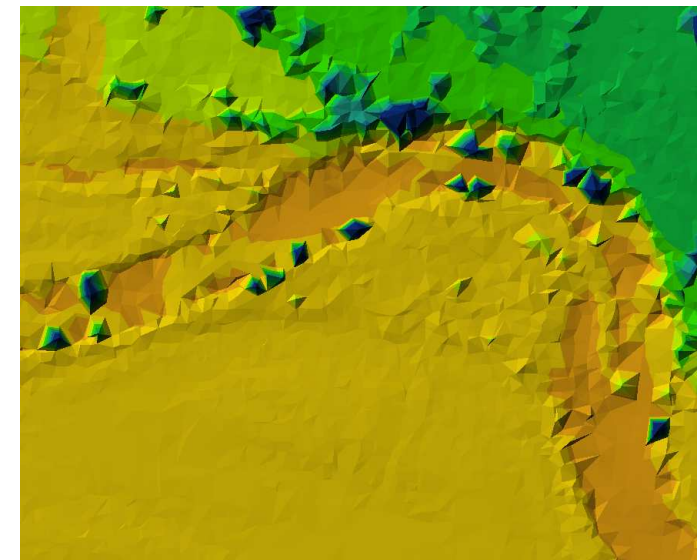
Ortofotosnímek



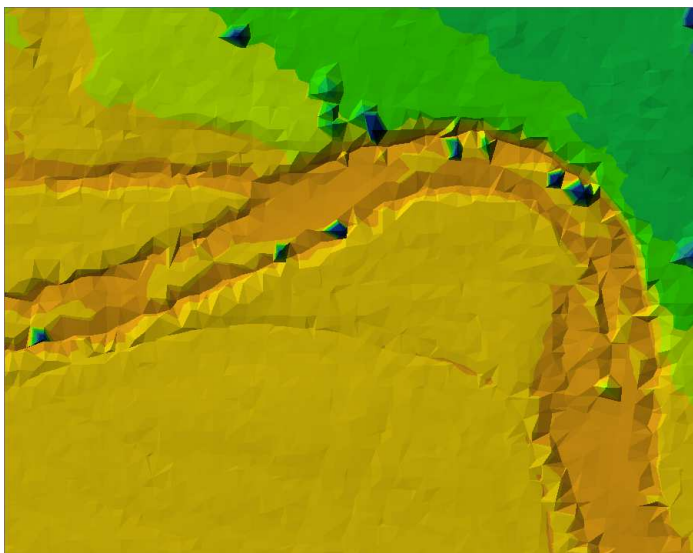
Původní DMP



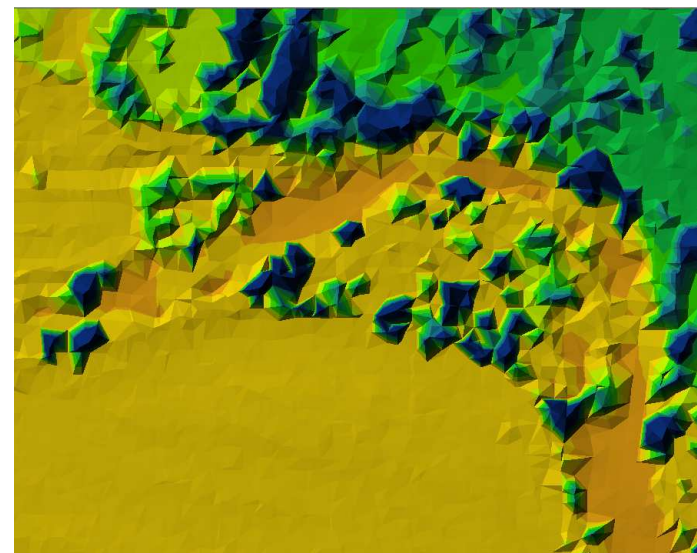
Terén vytvořený metodou WS mean



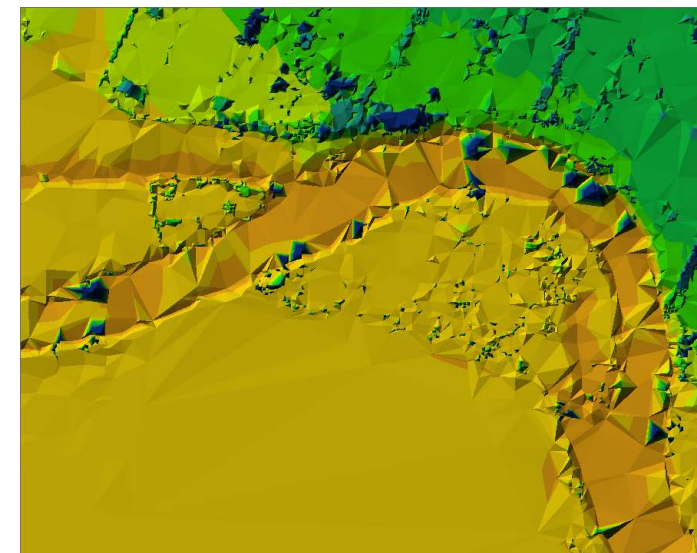
Terén vytvořený metodou WS min



Terén vytvořený metodou WS max



Terén vytvořený metodou Z-tolerance



Legenda:
nadm. výška (v m)

- 309,518 - 310
- 310 - 311
- 311 - 312
- 312 - 313
- 313 - 314
- 314 - 315
- 315 - 316
- 316 - 317
- 317 -

Pozn.: „Produkt vznikl s využitím dat, která poskytl Zeměměřický Úřad.“

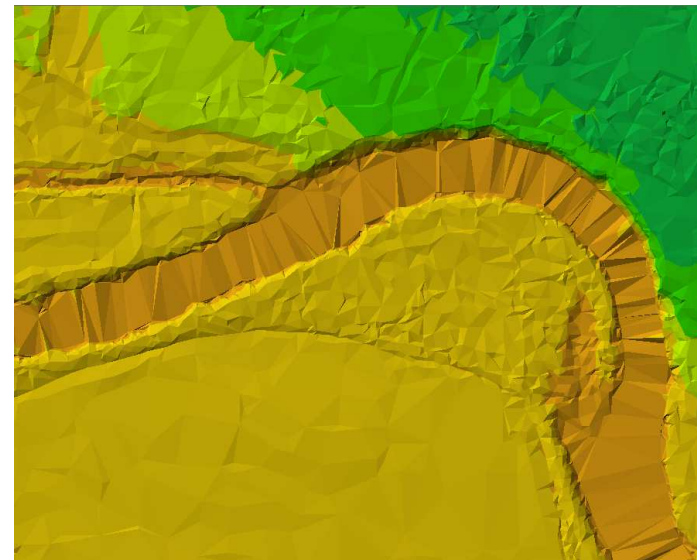
Příloha H

Digitální model reliéfu v měřítku 1:1000 v území s vesnickou zástavbou pro druhou úroveň pohledových pyramid

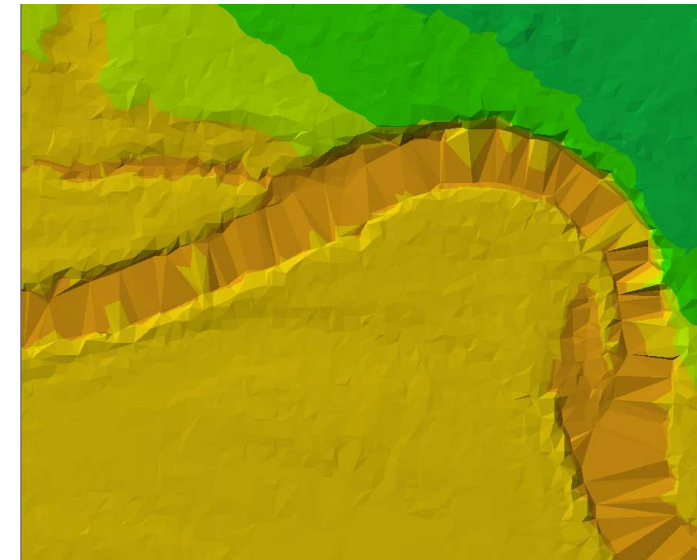
Ortofotosnímek



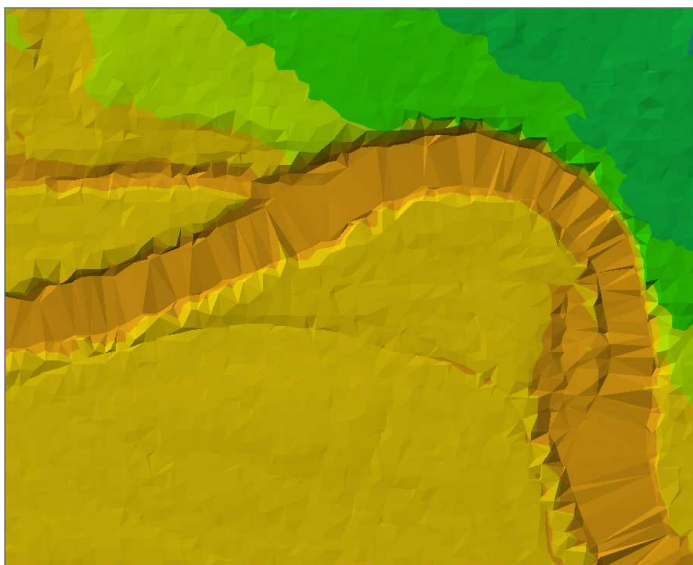
Původní DMR



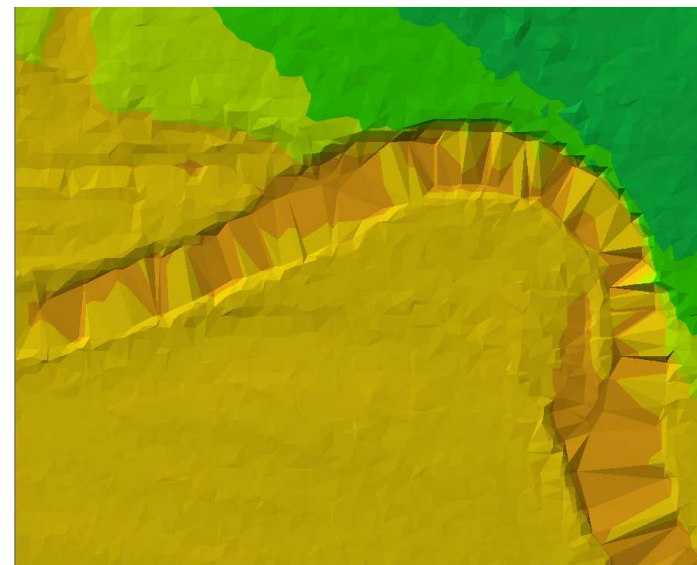
Terén vytvořený metodou WS mean



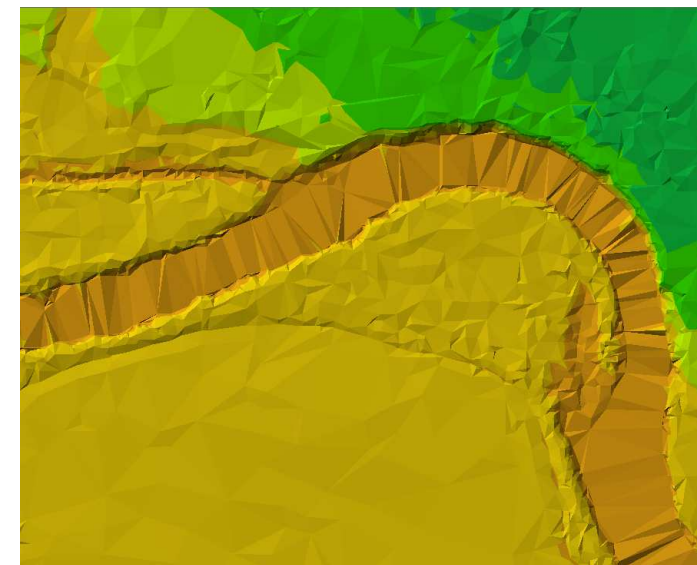
Terén vytvořený metodou WS min



Terén vytvořený metodou WS max



Terén vytvořený metodou Z-tolerance



Legenda:
nadm. výška (v m)

- 309,518 - 310
- 310 - 311
- 311 - 312
- 312 - 313
- 313 - 314
- 314 - 315
- 315 - 316
- 316 - 317
- 317 -

Pozn.: „Produkt vznikl s využitím dat, která poskytl Zeměměřický Úřad.“

Příloha I

Přehled chyb pro DMP

Území 1

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,096	0,866	1,656	0,382	0,767	1,443	0,617	1,594	2,508	0,534	1,307	3,064	0,310	0,879	1,792
c_H	-0,005	0,176	0,496	0,023	-0,001	-0,014	-0,548	-1,516	-2,486	0,469	1,226	2,959	-0,020	-0,024	0,393
m_H	0,120	1,083	2,071	0,477	0,959	1,804	0,772	1,992	3,135	0,668	1,633	3,830	0,388	1,098	2,241
σ_H	0,120	1,069	2,010	0,476	0,959	1,804	0,543	1,293	1,910	0,475	1,079	2,432	0,387	1,098	2,206

Území 2

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,294	5,097	7,326	2,921	3,937	4,543	4,042	5,599	5,835	4,933	8,607	11,790	2,536	4,546	5,966
c_H	-0,028	0,270	2,666	0,739	0,762	1,176	-3,755	-5,559	-5,828	4,628	8,551	11,776	0,404	1,126	2,225
m_H	0,367	6,372	9,158	3,651	4,921	5,679	5,052	6,998	7,294	6,166	10,758	14,737	3,169	5,682	7,458
σ_H	0,366	6,366	8,761	3,575	4,862	5,556	3,380	4,251	4,387	4,074	6,529	8,861	3,144	5,569	7,118

Území 3

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,043	0,117	0,188	0,108	0,191	0,312	0,155	0,350	0,527	0,177	0,446	1,014	0,084	0,235	0,513
c_H	-0,004	-0,017	0,004	0,000	-0,014	-0,017	-0,135	-0,330	-0,519	0,158	0,426	0,997	0,015	0,069	0,271
m_H	0,054	0,147	0,235	0,136	0,239	0,390	0,194	0,437	0,658	0,222	0,558	1,268	0,105	0,294	0,641
σ_H	0,054	0,146	0,235	0,136	0,238	0,390	0,139	0,286	0,405	0,155	0,360	0,783	0,104	0,286	0,581

Území 4

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,472	2,244	3,477	0,713	1,397	2,669	1,322	4,271	6,343	0,937	2,114	4,533	0,660	1,953	3,388
c_H	0,034	-0,080	-0,078	0,091	0,217	0,333	-1,195	-4,050	-6,326	0,786	1,906	4,256	-0,197	-0,801	-0,818
m_H	0,590	2,806	4,346	0,891	1,746	3,337	1,653	5,339	7,928	1,172	2,643	5,666	0,825	2,441	4,235
σ_H	0,589	2,804	4,345	0,886	1,733	3,320	1,142	3,478	4,780	0,869	1,831	3,741	0,801	2,306	4,155

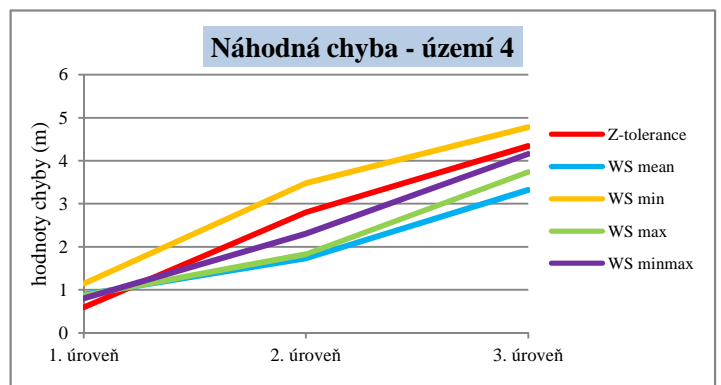
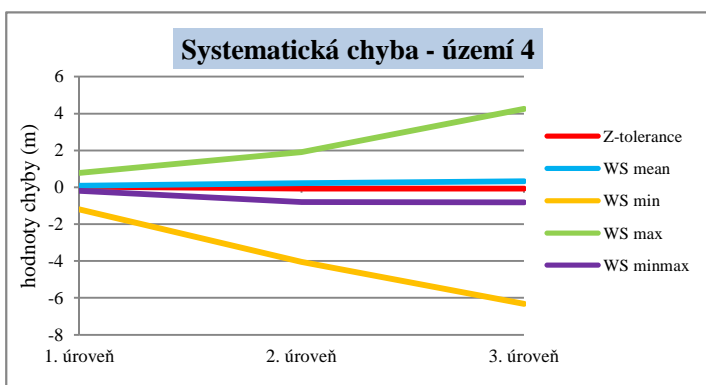
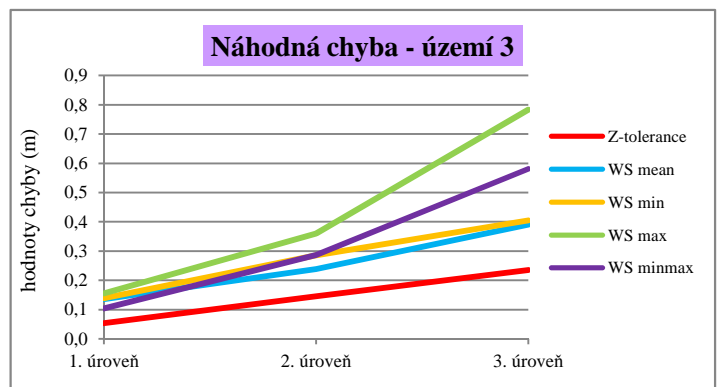
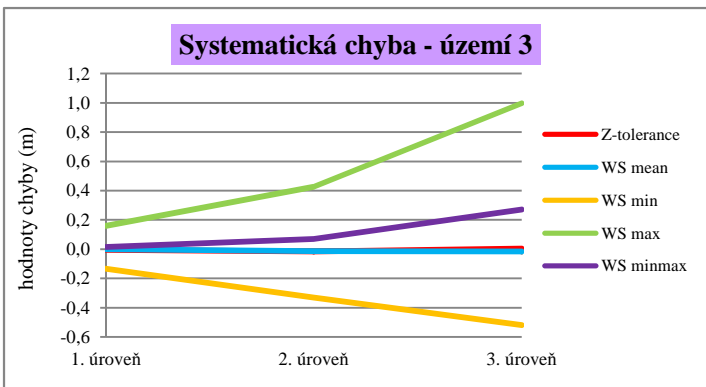
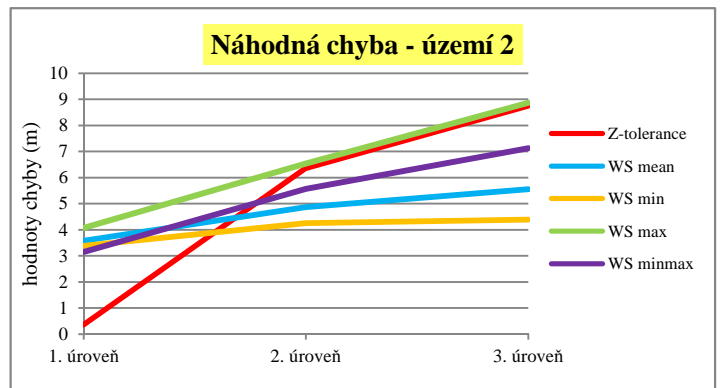
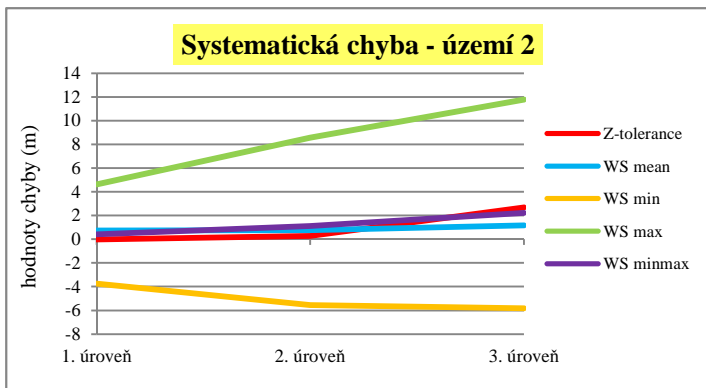
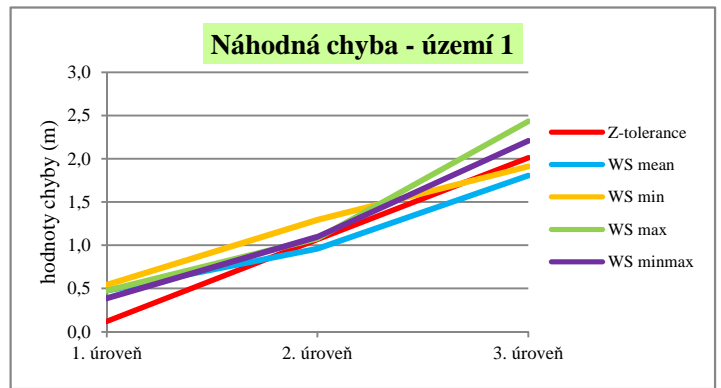
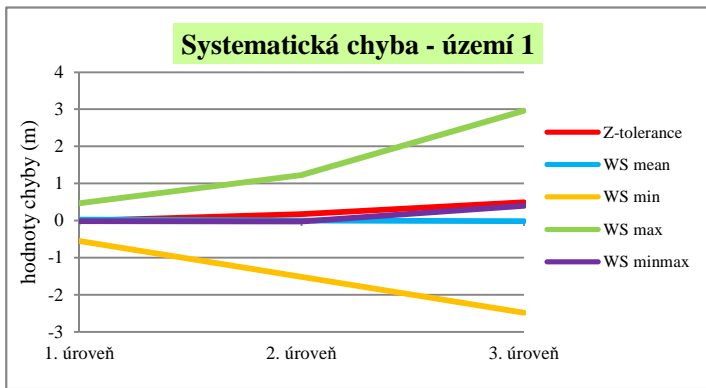
Poznámka:

- a_H je průměrná chyba,
- c_H je systematická chyba,
- m_H je odhad základní úplné střední chyby charakterizující reálnou přesnost,
- σ_H je odhad základní střední náhodné chyby.

Více v kapitole 6.3 této práce.

Příloha J

Přehled chyb pro DMP



Příloha K

Přehled chyb pro DMR

Území 1g

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,030	0,044	0,062	0,029	0,056	0,107	0,043	0,089	0,167	0,038	0,079	0,160	0,018	0,042	0,079
c_H	0,000	-0,003	-0,004	-0,003	-0,006	-0,012	-0,032	-0,073	-0,145	0,028	0,063	0,135	-0,001	-0,002	0,001
m_H	0,038	0,056	0,077	0,037	0,070	0,134	0,053	0,111	0,208	0,047	0,098	0,201	0,023	0,053	0,099
σ_H	0,038	0,056	0,077	0,037	0,070	0,134	0,042	0,084	0,149	0,037	0,076	0,148	0,023	0,053	0,099

Území 2g

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,028	0,044	0,063	0,020	0,032	0,049	0,026	0,060	0,101	0,026	0,054	0,083	0,009	0,028	0,049
c_H	0,000	-0,002	-0,007	-0,001	-0,001	-0,001	-0,022	-0,056	-0,097	0,021	0,049	0,078	0,000	-0,003	-0,008
m_H	0,035	0,055	0,078	0,024	0,040	0,061	0,033	0,076	0,126	0,032	0,067	0,104	0,011	0,035	0,061
σ_H	0,035	0,055	0,078	0,024	0,040	0,061	0,024	0,050	0,081	0,024	0,046	0,069	0,011	0,035	0,061

Území 3g

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,027	0,040	0,059	0,028	0,046	0,081	0,038	0,077	0,146	0,039	0,079	0,143	0,016	0,035	0,062
c_H	-0,001	-0,003	-0,005	0,001	0,004	0,008	-0,034	-0,072	-0,140	0,035	0,072	0,134	-0,001	-0,006	-0,012
m_H	0,034	0,050	0,074	0,034	0,058	0,101	0,048	0,096	0,183	0,049	0,098	0,179	0,020	0,043	0,077
σ_H	0,034	0,050	0,074	0,034	0,058	0,100	0,034	0,064	0,118	0,035	0,067	0,119	0,020	0,043	0,076

Území 4g

chyby	Z-tolerance			WS mean			WS min			WS max			WS minmax		
	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň	1. úroveň	2. úroveň	3. úroveň
a_H	0,036	0,051	0,072	0,034	0,067	0,123	0,045	0,102	0,209	0,034	0,080	0,161	0,013	0,042	0,086
c_H	0,003	0,000	-0,004	-0,005	-0,008	-0,013	-0,028	-0,079	-0,179	0,020	0,058	0,131	0,000	-0,001	-0,005
m_H	0,045	0,064	0,090	0,042	0,084	0,154	0,057	0,127	0,261	0,043	0,100	0,201	0,016	0,053	0,108
σ_H	0,045	0,064	0,090	0,042	0,084	0,153	0,049	0,100	0,190	0,038	0,081	0,153	0,016	0,053	0,108

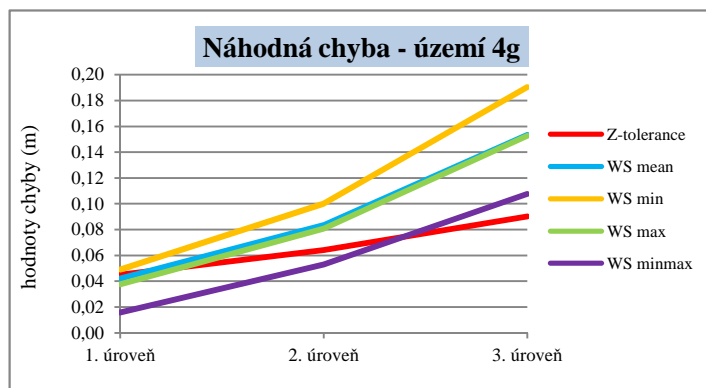
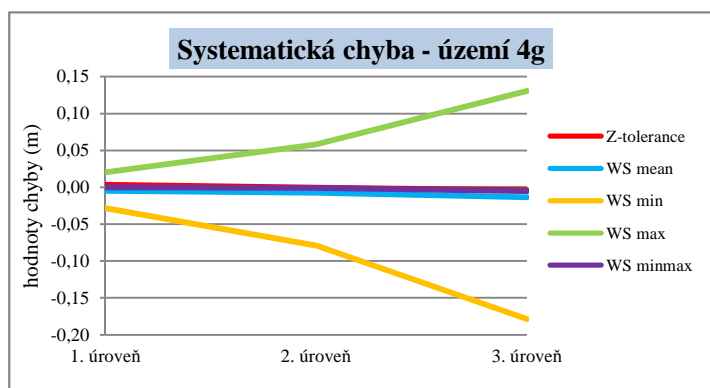
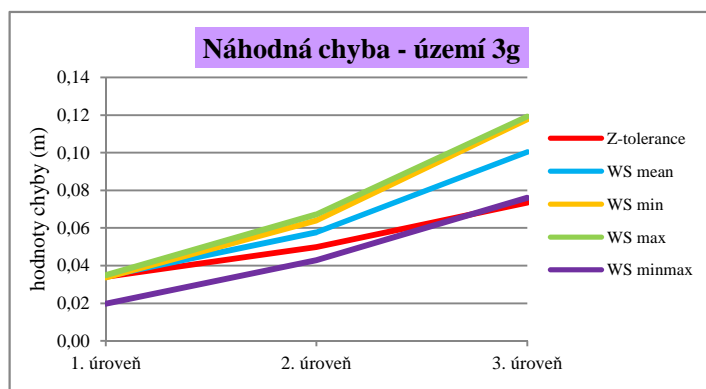
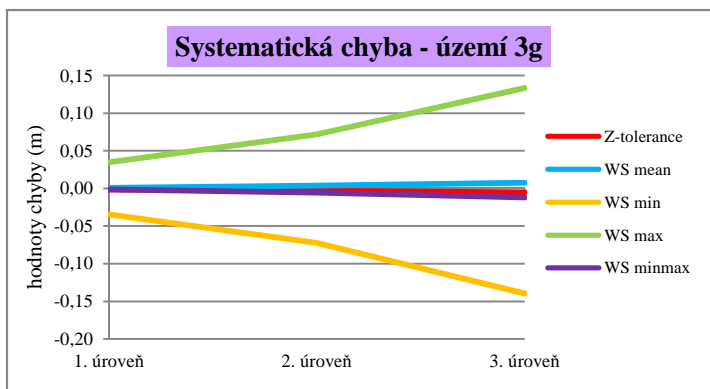
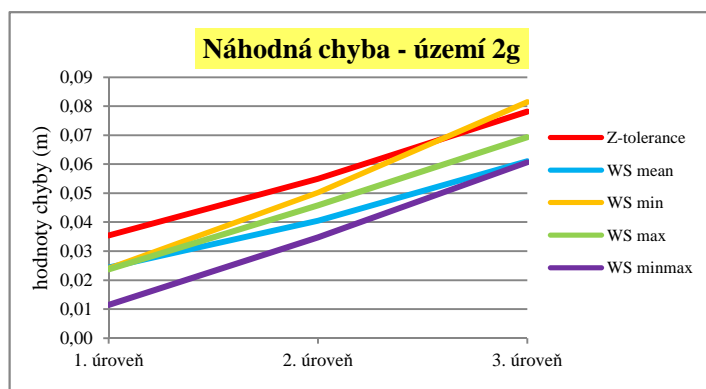
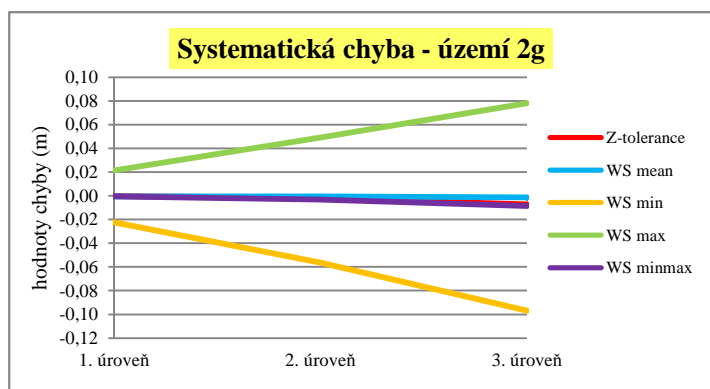
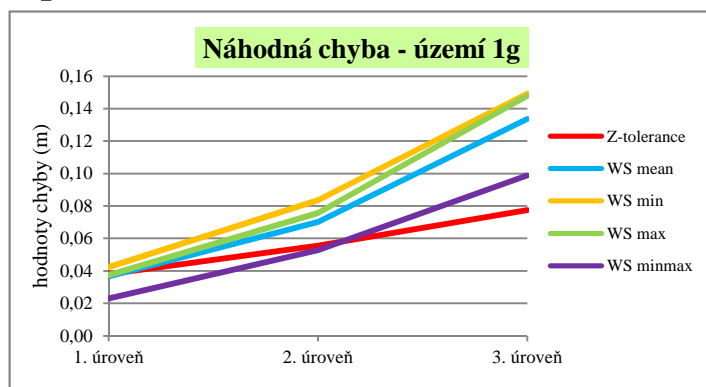
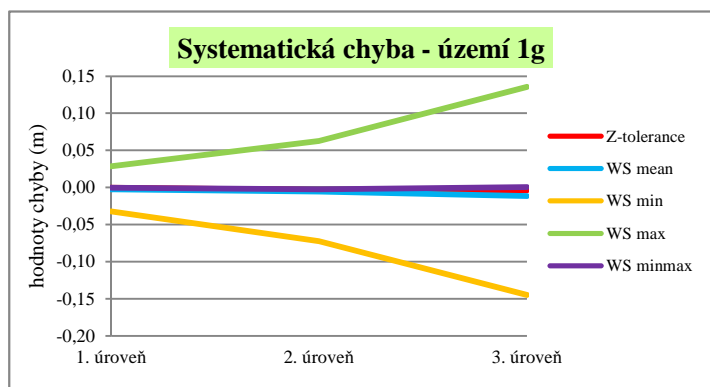
Poznámka:

- a_H je průměrná chyba,
- c_H je systematická chyba,
- m_H je odhad základní úplné střední chyby charakterizující reálnou přesnost,
- σ_H je odhad základní střední náhodné chyby.

Více v kapitole 6.3 této práce.

Příloha L

Přehled chyb pro DMR



Příloha M

Schéma struktury přiloženého DVD:

- Složka `Diplomova_prace_Lucie_Potrebova_2013`
 - Složka **skripty**
 - *analyzy.py* – skript pro tvoření analýz
 - *terrain_WS.py* – skript pro tvorbu terénu metodou Window size
 - *terrain_ZTOL_experiment.py* – skript pro tvorbu experimentálního terénu metodou Z-tolerance
 - *terrain_ZTOL_original.py* - skript pro tvorbu originálního terénu metodou Z-tolerance
 - **DP_Potrebova_2013.pdf** – verze diplomové práce ve formátu .pdf
 - **Priloha_A.gif** – videosoubor ve formátu .gif s ukázkou ředění bodů metodou Z-tolerance
 - **Readme.doc** – textový soubor s obsahem přiloženého DVD

„Produkt vznikl s využitím dat, která poskytl Zeměměřický úřad.“