

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY  
A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ**

**VYUŽITÍ LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ PRO  
URBANISMUS A ÚZEMNÍ PLÁNOVÁNÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce: Ing. Kateřina Gdulová**

**Bakalant: Adéla Pelcová**

**2015**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adéla Pelcová

Územní plánování

Název práce

**Využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování**

Název anglicky

**The use of laser scanning for urbanism and urban planning**

---

### Cíle práce

Autorka zpracuje literární rešerši, která bude zahrnovat:

- teoretické principy laserového skenování a zpracování LIDAR dat
- dostupnost dat laserového skenování na území České republiky
- přehled využití laserového skenování v urbanismu a územním plánování

### Metodika

Laserové skenování se považuje za jednu z přesných metod získávání geografických dat. Díky přesnosti a rychlosti sběru našla tato "LIDARová" data své uplatnění v mnoha aplikovaných vědách. V urbanismu a územním plánování, jsou geografická data základním článkem analýz.

Bakalant zpracuje literární rešerši na téma laserové skenování, kde se zaměří zejména na možnost využití v urbanismu a územním plánování.

Součástí práce bude i zhodnocení dostupnosti odborných publikací na toto téma a určení hlavních hypotéz pro následnou diplomovou práci.

**Doporučený rozsah práce**

30 normostran textu

**Klíčová slova**

LIDAR, letecké skenování, mobilní skenování, digitální model terénu, digitální model povrchu

---

**Doporučené zdroje informací**

- Dolanský, T. (2004). Lidary a letecké laserové skenování. Univerzita JE Purkyně.
- Haala, N., & Brenner, C. (1999). Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 130-137.
- Haala, N., Brenner, C., & Anders, K. H. (1998). 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32, 339-346.
- Maas, H. G., & Vosselman, G. (1999). Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2), 153-163.
- Morgan, M., & Tempfli, K. (2000). Automatic building extraction from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/2; PART 3), 616-623.
- Rottensteiner, F., & Briese, C. (2002). A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 295-301.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2), 68-82.
- Wehr, A. (2009). LiDAR systems and calibration. *Topographic Laser Ranging and Scanning Principles and Processing*, 129.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2015/06 (červen)

**Vedoucí práce**

Ing. Kateřina Gdulová

Elektronicky schváleno dne 1. 4. 2015

**Ing. Petra Šímová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 4. 2015

**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**

Děkan

V Praze dne 15. 04. 2015

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování vypracovala samostatně pod vedením Ing. Kateřiny Gdulové, a že jsem uvedla všechny literární prameny a publikace ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 14. 4. 2015

.....

### **Poděkování**

Děkuji za cenné rady, odborné vedení a morální podporu své vedoucí Ing. Kateřině Gdulové. Svému bratrově Ing. T. H. Pelcovi děkuji za pomoc při výběru tématu mé bakalářské práce a inspirativní připomínky ke zpracované problematice.

## **Abstrakt**

Cílem této práce je zpracování literární rešerše na téma využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování. Je v ní řešena obecná charakteristika, principy, zpracování a využití laserového skenování. Dále se uvádí přehled používaného hardwaru a softwaru. Vysvětluje též pojmy digitální model povrchu a digitální model terénu, jako základní výstupy z laserového skenování a dostupnost těchto modelů na území ČR. Práce tak poskytuje ucelený přehled pro aplikaci laserového skenování v urbanismu a územním plánování. Přínosem této práce je shrnutí poznatků o využití LIDAR dat v urbanismu a územním plánování.

**Klíčová slova:** LIDAR, letecké skenování, mobilní skenování, digitální model terénu, digitální model povrchu

## **Abstract**

The aim of this work is to elaborate a literature review about the use of laser scanning for urbanism and urban planning. It deals with general characteristics, principles, processing and use of laser scanning. Furthermore, it provides an overview of hardware and software. Also explains the concepts of digital surface model and a digital terrain model, as a basic output of laser scanning and the availability of these models in the Czech Republic. The thesis provides a comprehensive overview of the application of laser scanning in urbanism and urban planning. The contribution of this work is summarizing findings on the use of LIDAR data in urban planning and land use planning.

**Keywords:** LIDAR, aerial scanning, mobile scanning , digital terrain model, digital surface model

# Obsah

OBSAH.....	7
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>2. CÍLE PRÁCE.....</b>	<b>10</b>
<b>3. LITERÁRNÍ REŠERŠE.....</b>	<b>11</b>
3.1 DEFINICE POJMU LASEROVÉ SKENOVÁNÍ A LIDAR .....	11
3.2 HISTORIE .....	11
3.3 PRINCIP LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ .....	12
3.4 METODY SKENOVÁNÍ .....	12
3.4.1 <i>Statické pozemní skenování</i> .....	12
3.4.2 <i>Mobilní pozemní skenování</i> .....	13
3.4.3 <i>Mobilní letecké laserové skenování</i> .....	13
3.5 STRUKTURA SYSTÉMU PRO MOBILNÍ SKENOVÁNÍ .....	14
3.5.1 <i>Laserová jednotka</i> .....	14
3.5.2 <i>Skener</i> .....	15
3.5.3 <i>Kontrolní jednotka</i> .....	17
3.5.4 <i>Navigační jednotka</i> .....	17
3.5.5 <i>GPS</i> .....	18
3.6 VÝSTUPY Z LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ.....	18
3.6.1 <i>Mračno bodů</i> .....	18
3.6.2 <i>CAD plán</i> .....	19
3.6.3 <i>3D model</i> .....	19
3.6.4 <i>DMT</i> .....	20
3.6.5 <i>Profily, vrstevnice</i> .....	20
3.6.6 <i>Ortofoto, fotoplán</i> .....	21
3.7 PŘESNOST SYSTÉMU .....	21
3.7.1 <i>Matematický model</i> .....	22
3.7.2 <i>Přesnost 3D polohování</i> .....	23
3.7.3 <i>Určení vzdálenosti</i> .....	23
3.7.4 <i>Časové odchylky</i> .....	23
3.7.5 <i>Další zdroje chyb</i> .....	24
3.7.6 <i>Kalibrace</i> .....	24
3.8 ZPRACOVÁNÍ DAT .....	25
3.8.1 <i>Transformace</i> .....	25
3.8.2 <i>Filtrace</i> .....	26

3.8.3 Klasifikace .....	27
3.9 TVORBA DIGITÁLNÍHO MODELU TERÉNU .....	27
3.9.1 Procesy digitálního modelování terénu .....	28
3.9.2 Tvorba nového výškopisu ČR.....	29
3.10 DOSTUPNÉ LASEROVÉ SKENERY .....	32
3.10.1 LYNX Mobile Mapper.....	32
3.10.2 Leica ScanStation P20.....	33
3.10.3 LiteMapper 6800 .....	34
3.11 DOSTUPNÉ PROGRAMY PRO ZPRACOVÁNÍ DAT.....	34
3.11.1 Leica Cyclone .....	35
3.11.2 Scene WebShare .....	35
3.11.3 ArcGIS Desktop .....	36
3.11.4 AutoCAD .....	37
3.12 VYUŽITÍ.....	38
3.12.1 Archeologie.....	38
3.12.2 Lesnictví .....	39
3.12.3 Ekologie .....	40
3.12.4 Hydrologie .....	40
3.12.5 Důlní měřičství .....	41
3.13 VYUŽITÍ LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ PRO URBANISMUS A ÚZEMNÍ PLÁNOVÁNÍ.....	41
3.13.1 Tvorba 3D modelu města.....	41
3.13.2 3D modely budov z dat laserového skenování.....	42
3.13.3 Městské virtuální prostředí.....	43
3.13.4 Návrh liniové infrastruktury.....	44
3.13.5 Hodnocení objemu zástavby.....	46
3.13.6 Posuzování vlivu nově navrhovaných staveb na panorama města .....	46
3.13.7 Analýza viditelnosti.....	47
3.13.8 Analýza zastínění .....	47
3.13.8 Městský tepelný ostrov (Urban Heat Island) .....	48
<b>4. CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ.....</b>	<b>49</b>
<b>5. DISKUZE.....</b>	<b>50</b>
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>53</b>



# 1. Úvod

Práce se zabývá problematikou laserových skenovacích systémů. Jedná se o poměrně novou a velmi přesnou technologii dálkového průzkumu Země (DPZ). Laserové skenování zprostředkovává nové možnosti v pořizování geodetických dat a výrazně rozšiřuje jejich využitelnost. Umožňuje získávání prostorových souřadnic bodu bezkontaktní metodou.

Vždy bylo třeba provádět průzkum krajiny a terénu, například pro zemědělské, urbanistické či vojenské účely. Jak uvádí Dolanský (2004), nejprve byly pro tyto účely využívány metody geodetického zaměřování - tachymetrie, ta je poměrně pomalá a nepřesná. Tuto metodu nahradila fotogrammetrie, která zpracovává prostorové informace z fotografických snímků. Tato metoda je velmi závislá na atmosférických vlivech. Pro dosažení dobrých výsledků je nutné slunečné počasí a lze použít jen přes den. Oproti tomu laserové skenery snímají povrch Země rychleji a nejsou závislé na atmosférických podmínkách a denní době.

Díky rychlosti a spolehlivosti sběru dat, našlo laserové skenování své využití v mnoha oborech lidské činnosti, například v archeologii, důlním měřičství, lesnictví, pobřežním inženýrství a mnoha dalších. Tato práce se zaměřuje na popis obecných principů laserového skenování a jeho využití pro urbanismus a územní plánování.

Urbanismus a územní plánování jsou vědy, které přímo ovlivňují náš život skrze určování podmínek pro formování urbánního prostředí. Dle Athénské charty je urbánní prostředí místem kde žijeme, chodíme do práce, relaxujeme a dopravujeme se mezi jednotlivými místy. Proto je důležité, abychom se v nich cítili dobře.

Využitím dat z laserového skenování pro urbanismus a územní plánování je možné rychle zjistit užitečné a přesné informace o prostorovém uspořádání sídel, která obýváme.

Tato práce přináší ucelený přehled o metodě laserového skenování a jeho využití pro urbanismus a územní plánování, což je v odborné literatuře opomíjená část využití.

## 2. Cíle práce

V rámci bakalářské práce bude zpracována literární rešerše na téma využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování, která bude obsahovat:

- Obecnou definici, princip a metody laserového skenování.
- Z čeho se laserové skenery skládají a jak jednotlivé části fungují.
- Obecný popis zpracování dat z laserového skenování. Bude popsáno, v jaké formě jsou dostupná data na území České republiky.
- Zhodnocení dostupnosti hardware a software, který zpracovává data laserového skenování.
- Přehled využití dat z laserového skenování.
- Využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování.

V rámci diskuse dojde ke zhodnocení dostupnosti literatury na toto téma.

## 3. Literární rešerše

### 3.1 Definice pojmu laserové skenování a LiDAR

Pojem laserové skenování je synonymem akronymu LiDAR. V práci bude užíváno obou pojmů. LiDAR je zkratkou anglických slov „Light Detection And Ranging“, volně to lze přeložit jako přístroj nebo technologii pro snadné získávání informace o objektu a jeho vzdálenosti díky světlu (Dolanský, 2004). LiDAR je v literatuře nazýván i dalšími způsoby např. Laser Imaging Radar, Laser Radar nebo Laser-Instrument Distance And Range. Zkratka LiDAR je tvořena obdobně jako zkratka RaDAR (Radio Detection And Ranging), proto bude v práci obdobně skloňována (Dolanský, 2004).

Laserové skenování je efektivní metoda získávání dat. Její předností je získání velkého množství prostorových bodů s minimálním rozestupem za krátkou dobu observace (Závorský, 2015). Jedná se o nejpřesnější geodetickou měřicí metodu, která je zároveň vysoce efektivní pro sběr dat. Díky rychlosti, přesnosti (na cm) a velké hustotě naměřených bodů lze díky laserovému skenování získat ve velmi krátkém čase složitý 3D model skutečné situace. Přenesením a zpracováním naměřených bodů do počítače vznikne digitální model terénu (dále DMT).

### 3.2 Historie

První LiDAR vznikl kolem 60. let 20. století, krátce po vynálezu klasického laseru. Poprvé byla tato technologie použita v meteorologii pro měření vzdálenosti mraků. Veřejnosti se užitečnost laserového skenování předvedla v roce 1971 během mise Apollo 15, kdy astronauti použili laserový výškoměr pro mapování povrchu Měsíce. I přes počáteční nespolehlivost (první přístroje měly provozní životnost jen 1000 hodin) následoval komerční úspěch, v 70. letech 20. století došlo k rychlému zavedení používání laserů v inženýrské geodézii a ve stavebnictví. V 80. a 90. letech se nové technologie chopili i vědci z oblasti životního prostředí a vzniklo mnoho nových programů pro zpracovávání environmentálních dat. (Heritage Large, 2009)

První komerčně distribuované LiDARy byly produkovány až od roku 1995, v této době byl největší problém s ukládáním získaných objemných dat (Heritage, Large, 2009). V podstatě až do současnosti se data ukládají na externí paměťové disky.

### **3.3 Princip laserového skenování**

Laserové skenování funguje na základních principech optiky, kdy je vyslán laserový paprsek, který neprojde neprůhlednými objekty. Z doby mezi vysláním impulsu a přijetím jeho odrazu je možné spočítat vzdálenost k místu odrazu (Pavelka, 2010).

Laserové skenery se zpravidla skládají z GPS jednotky a z laserové a skenovací jednotky. GPS jednotka slouží k určování pozice a používá inerciální navigační systém (INS). Systém INS slouží ke zjišťování údajů o náklonu zařízení nesoucího laserový skener. Jedná se o zařízení zaznamenávající aktuální hodnoty náklonu a zrychlení nosiče skeneru, k čemuž využívá soustavy několika gyroskopů a akcelerometrů (Lithopoulos et al., 1996). Laserová a skenovací jednotka posílá laserový paprsek na jednotlivé objekty a zaznamenává časovou hodnotu, za kterou se paprsek vrací (Wehr, Lohr, 1999).

Velkou výhodou laserového skenování je skutečnost, že není třeba využívat sluneční paprsky, ale pouze paprsky laseru, to znamená, že lze tuto metodu využívat i v noci (Závorský, 2015). Z hodnot intenzity odraženého světla je možno generovat pseudo - snímek a interpolací lze získat rastrový obraz, intenzita odraženého světla je dána povrchem, na který laserové záření dopadá. Díky tomu lze od sebe odlišit objekty s nízkou a vysokou odrazivostí v daném pásmu záření (Dolanský, 2004). Měří se převážně infračerveným světlem. Toto infračervené světlo je však z velké části pohlcováno vodou, nehodí se proto příliš pro měření hloubek pod vodní hladinou. Pro toto měření je vhodnější zelenomodré záření, které má lepší vlastnosti pod vodní hladinou, ale ani tímto světlem nelze z důvodu zakalení a rychlosti pohybu vody, měřit hlouběji než 50 m (Optech, 2012).

### **3.4 Metody skenování**

#### **3.4.1 Statické pozemní skenování**

Statický pozemní skener je umístěn na zemském povrchu většinou na stativu, je schopen za několik minut naměřit velké množství bodů (až několik milionů) s přesností v milimetrech. Nejprve je třeba vytvořit bodové pole pro určení výchozího postavení, poté probíhá automaticky vlastní skenování. Používá se pro objekty, které jsou obtížně dostupné, např. v lesním porostu nebo pro skenování historických fasád domů (Závorský, 2015).

### 3.4.2 Mobilní pozemní skenování

Mobilní pozemní skenování se provádí za pomoci pojízdné stanice umístěné nejběžněji na automobilu. Oproti pozemnímu skenování je velkou výhodou možnost nasnímat celá města či dálnice a ulice. Výhodou této metody je mnohem větší rychlost snímání, než u klasické geodetické totální stanice (Pikhartová, 2009).

Nevýhodou této metody je obrovské množství informací, pro které se těžko hledá vhodný program pro jejich zpracování.

Obr. 3.1: Skener umístěný na automobilu



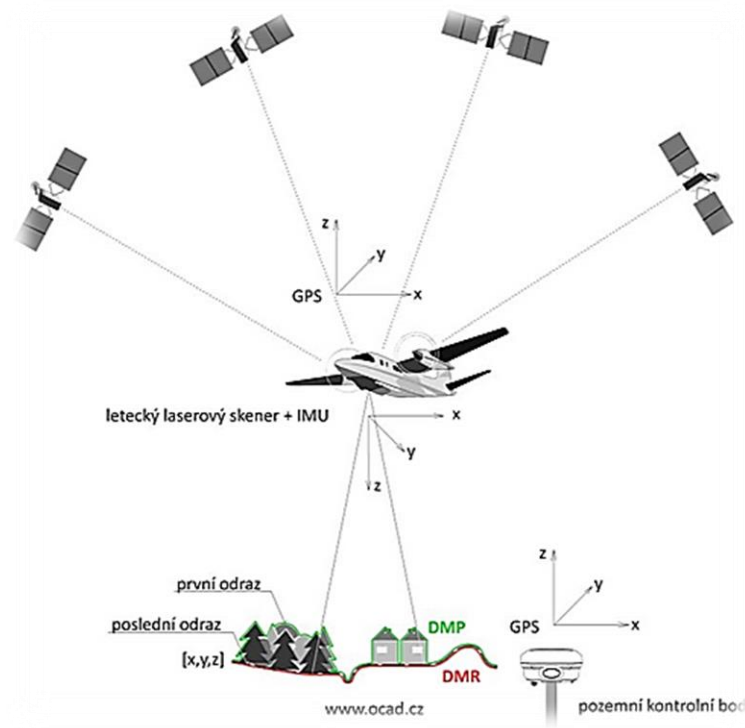
Zdroj: Laserový skener a georadar zjistí stav dálnic za pár dní;  
<[http://www.tyden.cz/rubriky/auta/laserovy-skener-a-georadar-zjistí-stav-dalnic-za-par-dni\\_198660.html#.VS342fmsXqk](http://www.tyden.cz/rubriky/auta/laserovy-skener-a-georadar-zjistí-stav-dalnic-za-par-dni_198660.html#.VS342fmsXqk)>

### 3.4.3 Mobilní letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování (ALS- airborne laser scanning) je jednou z nejnovějších metod získávání prostorových dat. U mobilního leteckého skenování je skener umístěn na letadle, vrtulníku či bezpilotním letadle (tzv. dronu). Letecký sběr dat umožňuje získání výškopisných dat na poměrně velkých plochách za velmi krátkou dobu (Dolanský, 2004).

V kombinaci s mobilním pozemním laserovým skenováním lze získat kompletní obraz (3D model) např. měst, díky leteckému pohledu shora a pohledu z mobilního skeneru přímo na fasády budov. Mobilní skenování se často kombinuje i se snímáním fotografickým, pro lepší tvorbu přesného modelu situace (Becker, Haala, 2009).

Obr 3.2: Letadlo, na jehož palubě je umístěn laserový skener



Zdroj: OCAD- Nová příručka; < <http://ocad.cz/> >

### 3.5 Struktura systému pro mobilní skenování

Laserové skenery se skládají z několika samostatných mapovacích technologií. Přestože se jednotlivé komerčně distribuované systémy navzájem odlišují, jsou postaveny s naprosto totožným základem - GPS a INS jako navigační systém a dále laserová a skenovací jednotka. Vnitřní parametry jednotlivých jednotek musí být určeny s vysokou přesností, proto musí být každá z těchto jednotek před měřením kalibrována (Dolanský, 2004).

#### 3.5.1 Laserová jednotka

Laserová jednotka posílá laserový paprsek na jednotlivé objekty a zaznamenává časovou hodnotu, za kterou se paprsek vrací. Obsahuje laserový vysílač a přijímač, jejich optická osa je stejná. Velikost naměřené stopy závisí na výšce letu a na divergenci světelného paprsku. Divergence světla tedy definuje okamžité zorné pole senzoru. Pro koherentní laserové záření je okamžité zorné pole zpravidla mezi 0,3 mrad až 2 mrad (Wehr, Lohr, 1999). Při výšce kolem 500 m nad terénem je laserová stopa na zemi kolem 30 cm. Většina komerčních laserových jednotek

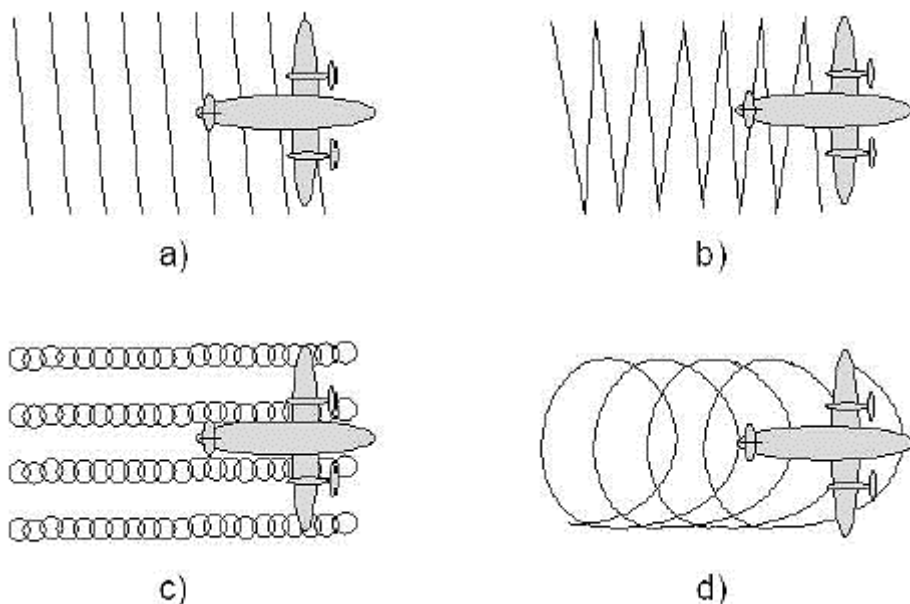
používá vlnovou délku záření v rozsahu mezi 1100-1200 nm, které odpovídá blízkému infračervenému záření. Moduly nebo komponenty s tímto typem laseru jsou na trhu běžně dostupné.

### 3.5.2 Skener

Pomocí laserové jednotky můžeme změřit vzdálenost k určitému objektu. Vychýlení paprsku kolmo na směr letu zajistí zpravidla rotující zrcátko. Na skeneru je pro vychylování paprsku mimo svou osu umístěno zpravidla rotující zrcadlo, které vychyluje paprsek v příčném směru. Posunutí paprsku v příčném směru je zajištěno vlastním pohybem plošiny (letadla). Ve směru příčném celkový úhel záběru definuje zorné pole, neboli šířku záběru, ta je většinou 20-30°, ale existují i systémy, které mají šířku záběru až 70° (Dolanský, 2004).

Rozlišujeme několik druhů skenerů, podle pohybu zrcadla: a) skener s rotujícím zrcadlem, b) skener s oscilujícím zrcadlem, c) skener se svazkem optických vláken, d) eliptický skener

Obr. 3.3: Druhy stop pro různé konstrukce skeneru



Zdroj: Dolanský, 2004

#### Skener s rotujícím zrcadlem

Pro skenování tímto skenerem je typické, že skenuje v souběžných řadách bodů na skenovaném povrchu. Vzdálenost jednotlivých linek je dána rychlostí rotace zrcadla a rychlostí nosiče a závisí na frekvenci skenování. Poloha konstantně rotujícího zrcadla je určena pomocí uhlového měřítka připevněného na rotující zrcadle, popř.

přímo na motoru otáčejícím zrcadlem. Chybám, vznikajícím akcelerací zrcadla, se zamezí konstantní rychlostí. Nevýhodou také je přerušení skenování v důsledku rotace zrcadla, které odrazí paprsek mimo zorný úhel skeneru. Těto časové prodlevě se dá zamezit použitím zrcadla s více plochami (Dolanský, 2004).

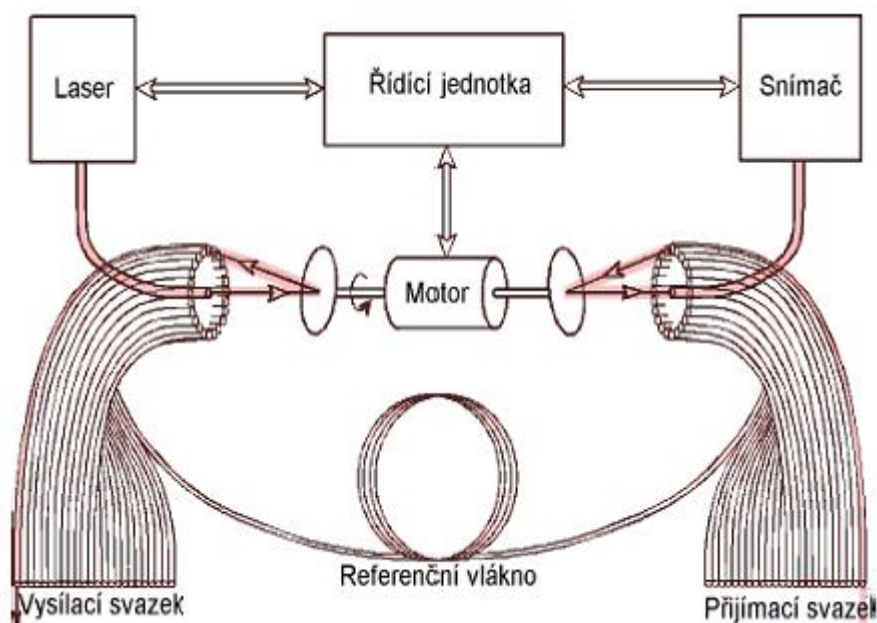
### Skener s oscilujícím zrcadlem

Tento typ skeneru je typický kontinuálním způsobem měření, tzn. paprsek je vždy odražen k povrchu a řady bodů na povrchu vykreslují typickou „pilovitou“ strukturu. Výhodou tohoto systému je možnost kompenzace pohybu mobilního skeneru a chyb tímto skenerem způsobených, pomocí údajů z INS. Naopak nevýhodou je, že v důsledku změn rychlostí a zrychlení vzniká torze mezi zrcadlem a uhlovým senzorem. Důsledkem změn rychlosti je také nerovnoměrná hustota bodů na povrchu (Dolanský, 2004).

### Skener se svazkem optických vláken

Skener se svazkem optických vláken byl původně navržen pro vojenské využití, kdy bylo potřeba skenovat ve vysokých rychlostech pohybu nosiče, což bylo nemožné realizovat konvenčními typy skenerů (Wehr, 2009). U skeneru se svazkem optických vláken jsou namísto velkého zrcadla použita dvě malá zrcadla a čočky, které konstantně rotují stejným směrem a jsou určeny k nasměrování laserového paprsku do lineárního svazku optických vláken.

Obr. 3.4: Konstrukce skeneru se svazkem optických vláken



Zdroj: Dolanský, 2004



Paprsek je díky konstrukci skeneru se svazkem optických vláken vyslán k povrchu vždy pod stejným úhlem a snímání lze považovat za synchronizované a sekvenční (Wehr, Lohr, 1999). Konstrukce tohoto skeneru ale obsahuje velmi málo pohyblivých částí oproti jiným typům a také jsou tyto části mnohem menší, čímž je dosaženo mnohem vyšší frekvence skenování a to až 415 Hz (Wehr, 2009).

Díky vysoké frekvenci skenování je hustota bodů ve směru podélném mnohem vyšší než ve směru příčném, rozložení bodů na povrchu tedy není ideální. Proto se používá tzv. swing mode, kdy jsou do stran synchronně vychylována optická vlákna emitoru a přijímače. Body na povrchu se díky tomu více blíží ideálnímu rozdělení a zlepšuje se detekce hran na povrchu, např. hrany budov a liniová vedení (Wehr, 2009).

### **Eliptický skener**

Tento systém je založen na jednom zrcadle (Wehr, Lohr, 1999), popř. na dvou zrcadlech (Dolanský, 2004) vychylujících paprsek tak, že vykresluje na povrchu kruhovou stopu, která je poté vlivem pohybu nosiče deformována na eliptickou dráhu. Výhodou systému je dvojitě skenování pokaždé z jiné perspektivy, čímž je dosaženo vyšší hustoty bodů na povrchu. Šířka záběru je u skenerů s jedním zrcadlem určena úhlem  $\alpha$ , což je úhel mezi osou rotace zrcadla a normálou. Nedostatkem tohoto skeneru je jeho mechanická složitost v případě dvou zrcadel, která vede k větší náchylnosti k chybám při synchronizaci zrcadel. Naopak systém s jedním zrcadlem je velmi jednoduchý a byl použit v 70. a 90. letech v multispektrálním skeneru na Skylab (Hug, 1994).

### **3.5.3 Kontrolní jednotka**

Laserová jednotka a skener spolu spolupracují pomocí kontrolní jednotky, někdy označované také jako řídící. Vnitřní hodiny této jednotky jsou pravidelně synchronizovány s hodinami GPS aparatur za pomoci Puls per second signálu (PPS), generovaným vnitřními hodinami GPS přijímače. Veškerá naměřená data, jako například délka nebo úhel, jsou provázána s časem vnitřních hodin a poté také za pomoci PPS- s časem GPS (Dolanský, 2004).

### **3.5.4 Navigační jednotka**

Inerciální měřicí jednotka (IMU) je hlavní složkou navigačních systémů, která je schopna změřit úhlovou rychlost a zrychlení. IMU je pevně spojena s tělesem klasické letecké měřičské nebo digitální kamery a skládá se z ortogonálních akcelerometrů,

gyroskopů a elektroniky, která převádí analogové výstupy na digitální. Soustava gyroskopů je schopna velmi přesně určit náklony celého systému vzhledem k tížnici, kde jeden gyroskop je vždy svislý a ostatní jsou k němu kolmé. Akcelerometr měří zrychlení, to vyjadřuje derivaci rychlosti podle času. Akcelerometry jsou senzory, které měří dynamické nebo statické zrychlení a jsou vhodné nejen pro měření setrvačných a odstředivých sil, ale také pro určování pozice tělesa, jeho vibrací, či jeho naklonění (Grewal et al., 2007).

Kombinací obou přístrojů je možno určit všech šest prvků vnější prostorové orientace skeneru. I když akcelerometry a gyroskopy umí měřit velmi přesně extrémně malé hodnoty, za působení systematických chyb se vypočtená trajektorie letu od skutečné bude odchylovat a po několika málo sekundách může odchylka překročit povolené meze. Proto je nutné zpřesnění pomocí GPS.

### **3.5.5 GPS**

Pro určení polohy nosiče skenovacího zařízení v referenčním systému se používá soustava GPS přijímačů s využitím metody INS. Nejjednodušší metodou je umístění jedné referenční stanice na palubě letadla a druhé na známém geodetickém bodě. Pokud se na palubě letadla umístí tři stanice, je možno s jejich pomocí provádět nejen výpočty aktuální polohy letadla, ale také jeho náklonů. Další funkcí stanice umístěné na palubě letadla je synchronizace času všech ostatních měřících systémů. Měření je prováděno zpravidla ve frekvenci 2Hz (Dolanský, 2004).

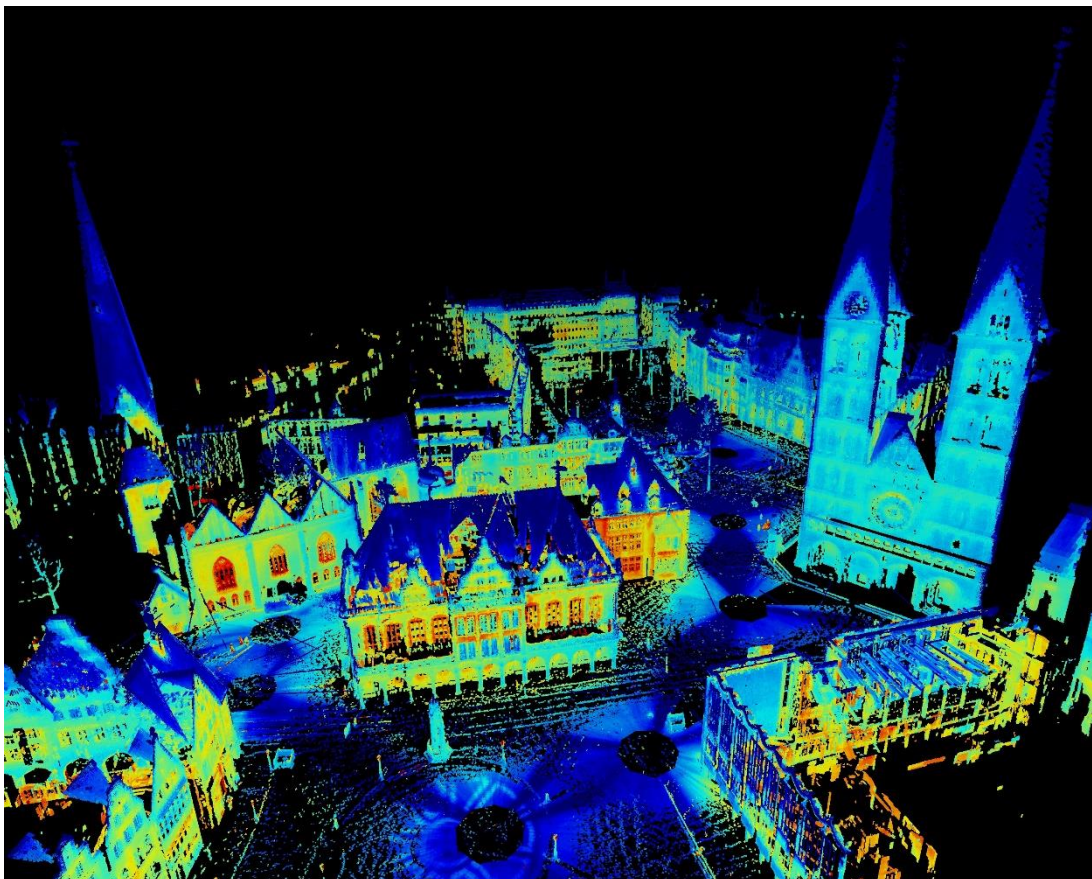
## **3.6 Výstupy z laserového skenování**

### **3.6.1 Mračno bodů**

Mračno bodů je datová struktura používaná k reprezentaci vícerozměrných bodů, běžně se používá k reprezentaci trojrozměrných dat, je základním výstupem z laserového skenování a jedná se o velké množství (tisíce až miliony) bodů. Každý bod má souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a může obsahovat i informaci o barvě, která je obrazem intenzity odrazu a může být ve stupních šedi ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , intenzita) nebo RGB, což je informace získaná z fotografie ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $B$ ). Pokud je k dispozici informace o barvě, bod mračna se stává 4D (GEOVAP, 2014).

Body vznikají rozmítáním laserového paprsku a jsou umístěny v souřadnicovém systému skeneru, jehož počátek leží v ose skeneru (Heritage, Large, 2009).

Obr. 3.5: Mračno bodů centra města Brémy v Německu



Zdroj: Robotic 3D Scan Repository; < <http://kos.informatik.uni-osnabrueck.de/3Dscans/>>

### 3.6.2 CAD plán

Z mračna bodů lze poté vyhodnotit libovolnou vektorovou kresbu za pomoci specializovaného počítačového softwaru (např. TopoL laserScan Stereo). Výsledná vektorová kresba se dá uložit v používaných formátech jako např. dgn, dxf, atd.

### 3.6.3 3D model

Velmi přesný 3D model lze vygenerovat z mračna bodů a obvykle má podobu nepravidelné trojúhelníkové sítě. Pakliže se tento model ještě zkombinuje s fotografiemi (digitálním obrazovým záznamem) dané oblasti, vznikne fotorealistický model.

### 3.6.4 DMT

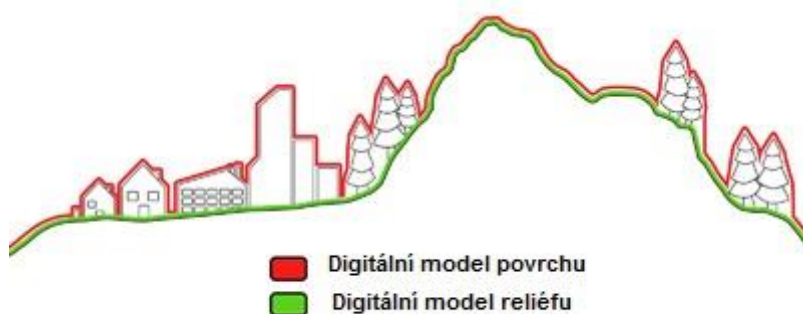
Digitální model terénu (DMT) zahrnuje dvě základní složky:

**Digitální model reliéfu (DMR)**- jedná se o digitální reprezentaci zemského povrchu v paměti počítače, skládá se z dat interpolačního algoritmu, který také umožňuje odvozovat výšky mezilehlých bodů (terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí).

DMR je tedy komplexní povrch zahrnující výšku (topografickou plochu bez vegetace) se zpřesňujícími a jednoznačnými liniovými a polygonovými geoprvky, jako jsou říční toky a koryta, násypy komunikací, vodní plochy a hrany na terénu (Kadlčíková, 2006).

**Digitální model povrchu (DMP)**- je model povrchu země i se všemi objekty, které na něm leží. Tento model vzniká primárně při použití automatizovaného sběru bodů za pomoci obrazové korelace ve fotogrametrii, pomocí laserového skenování nebo radarového měření v Dálkovém Průzkumu Země (DPZ). Z DMP se získává digitální model terénu teprve následným zpracováním. Ve své základní podobě se dá velmi dobře použít pro modelování a vizualizaci měst nebo krajiny včetně vegetace, vedení vysokého napětí atd. (Oršulák, Pacina, 2010).

Obr. 3.6: rozlišení digitálních modelů



Zdroj: Computa Maps; < <http://www.computamaps.com/> > (upraveno)

### 3.6.5 Profily, vrstevnice

Buď přímo z mračna bodů nebo z DMT můžeme vygenerovat profily libovolného směru a vrstevnice v různých intervalech. Řezy a vrstevnice lze vyexportovat i jako vektorovou kresbu.

Minimální rozestup vrstevnic na mapě by měl být 0,2 - 0,3 mm, aby nedošlo k jejímu splynutí při vykreslení. Vrstevnice se dělí na základní, zdůrazněné (hlavní), doplňkové a pomocné. Pro lepší určení výšek vrstevnic na mapě se zesílené vrstevnice kótují (Huml, Michal, 2005).

### **3.6.6 Ortofoto, fotoplán**

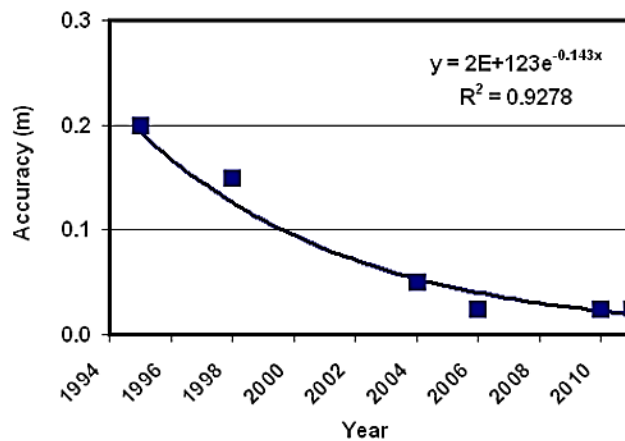
Data z laserového skenování je možno využít ve fotogrametrii při tvorbě ortofotografického zobrazení výškově členitého terénu, u kterého musíme disponovat digitálním modelem povrchu nebo reliéfu v případě věrného ortofoto snímku vyšších staveb v zastavěném území (GEOVAP, 2014).

## **3.7 Přesnost systému**

Jedním z nejzákladnějších a nejdůležitějších předpokladů, kterého je třeba pro hodnotný výsledek dosáhnout, jsou kvalitní data. Proto je důležité provádět kontrolu a zajištění kvality naměřených dat. Během procesu sběru dat vznikají systematické a náhodné chyby, především na nich je závislá celková přesnost dat z laserového skenování. Velikost chyb náhodných závisí především na přesnosti měření systému, mezi něž patří poloha a orientace měření z GPS (popř. INS), úhel natočení zrcadla a určení vzdálenosti. Na druhé straně chyby systematické jsou způsobeny odchylkami jednotlivých komponentů systému (Habib et al., 2008). Výsledná velikost chyby je kombinací více faktorů náhodných i systematických chyb (May, Toth, 2007).

Graf na obrázku 3.7 ukazuje postupné zlepšování přesnosti laserových skenerů v posledních letech. V 90. letech 20. století došlo k rychlému zlepšení, každých pět let alespoň o padesát procent, v posledních letech se však míra nárůstu ustálila. Je to dáno jednak přesností určování polohy nosiče GNSS, a také přesností metod pro určování polohy kontrolních bodů (Roth, 2011).

Obr. 3.7: Vývoj zlepšení chyb laserových skenerů



Zdroj: Roth, 2011

### 3.7.1 Matematický model

Zkombinováním všech měřených dat z laserového skenování, INS a GPS je možno provést výpočet prostorových souřadnic měřeného podrobného bodu, Dolanský (2004) uvádí tuto rovnici pro získání podrobného bodu:

$$r_i^m = r_{nav}^m(t) + R_b^m(t) [R_s^b * r^S + a^b] \quad ,$$

kde

$r_i^m$  jsou souřadnice podrobného bodu (i) v rámci lokálního souřadnicového systému

$r_{nav}^m(t)$  jsou souřadnice navigačního systému v rámci lokálního souřadnicového systému

$R_b^m(t)$  interpolovaná matice rotace pro náklon platformy v aktuálním čase (stav b)

$R_s^b$  rotační matice mezi INS a ALS (stav S)

$r^S$  vektor laserového paprsku

$a^b$  počáteční souřadnicový posun mezi stavy „b“ a „S“.

Toto je rovnice, která je obecnou rovnicí pro výpočet souřadnic podrobného bodu. Vektor laserového paprsku závisí na typu skeneru, který je použit. Pokud jsou známy vztahy mezi měřeními, je možné provést rozbor, jaký podíl mají jednotlivé chyby na celkové přesnosti souřadnic cíle. Proto může být celá chyba rozložena na

elementární části každé jednotky (ALS, INS, GPS, řídicí a kontrolní systémy). (Dolanský, 2004)

### **3.7.2 Přesnost 3D polohování**

Přesnost 3D souřadnic závisí na mnoha faktorech, těmi hlavními jsou: (a) přesnost rozmezí pohybu, (b) poloha laserového paprsku, (c) směr laserového paprsku. Přesnost rozmezí, postavení a směr paprsku jsou měřeny různými čidly, pokud dojde k chybnému změření, chyby ovlivní výsledky. Vzhledem k tomu, že výsledné souřadnice jsou obvykle uváděny v soustavě WGS84, závisí konečné výsledky na přesnosti transformace do lokálního souřadnicového systému (Baltsavias, 1999).

### **3.7.3 Určení vzdálenosti**

Jedná se o jeden z nejsložitějších faktorů přesnosti, ale má minimální vliv. Přesnost určení vzdálenosti závisí na síle signálu a na citlivosti prahového detektoru impulsu. Hlavním faktorem je zde strmost přijatého signálu, tj. doba náběhu impulsu. Typický laserový impuls, který trvá 10 ns, má dobu náběhu přibližně 1 ns (1 ns odpovídá přibližně 15 cm určované vzdálenosti (Baltsavias, 1999).

Dalšími faktory, které ovlivňují přesnost měření vzdálenosti, jsou například teplota a okolní úroveň osvětlení, nejlepších výsledků lze tedy dosáhnout v noci a nejhorších během jasného slunného dne. Přesnosti měření může také uškodit interakce laserového paprsku s částicemi vyskytujícími se v atmosféře. Při výskytu prachových částic či kouře ve skenovaném prostředí je snížen rozsah snímání. Ideální pro měření je suchá a čistá atmosféra bez výskytu vodních par (např. deště, mlhy či vlhkosti) a oxidu uhličitého (Baltsavias, 1999).

### **3.7.4 Časové odchylky**

Pro přesné měření je důležité, aby informace o poloze a orientaci leteckého měřiče byla přijata ve stejný čas, stejně jako informace o pořízení záznamu ke každému měřenému bodu. Pokud je mezi nimi časový posun, může to způsobit variabilní chybu. V závislosti na průběhu měření a rychlosti změn se navyšuje hodnota této chyby. Nejvyšších hodnot chyby je dosaženo v případě turbulentního letu (Baltsavias, 1999).

### 3.7.5 Další zdroje chyb

Jako další zdroj chybného měření lze uvést chybu zpoždění snímače, kdy dochází k nepřesnému záznamu úhlu a délky (Morin, 2002). Dalším zdrojem chyb může být například chyba skenovacího zařízení, tam může chyba vzniknout při měření úhlu pohybujícího se zrcadla. Polohu zrcadla lze určit několika způsoby. Další chybou skenovacího zařízení je torze oscilujícího zrcadla, tato chyba je způsobena změnami rychlosti a zrychlení pohybu zrcadla a projevuje se vzájemným posunem sousedních řádků (Dolanský, 2004).

### 3.7.6 Kalibrace

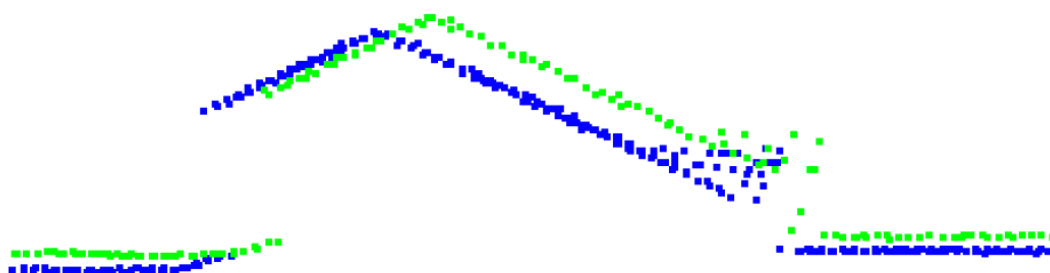
Aby bylo dosaženo určité přesnosti poskytovaných dat, je nutné provést opravu měření o hodnoty zjištěné při kalibračních postupech. V případě laserových skenovacích systémů však nejsou definovány žádné univerzální postupy. Proto si každý výrobce těchto systémů stanovuje vlastní metody kalibrace, které využívají různé standardy a testovací pole (Flood, 2002).

U ALS je pro dosažení nejvyšší přesnosti třeba provést kalibraci před i po náletu (Dolanský, 2004). Předletová kalibrace obsahuje metody, které se musí provést před každým náletem, a metody, které se provádějí příležitostně. Jedná se například o inicializaci inerciálních a navigačních systémů, které je nutno provést v klidovém stavu. Některé chyby lze však určit pouze po ukončení letu. (Morin, 2002)

Nejběžnější kalibrační metodou je metoda ručního vyrovnání. (Morin, El-Sheimy, 2002). Tato metoda je velmi časově náročná, náchylná k neobjektivitě a vyžaduje ovládání ze země. Údaje získané touto metodou jsou často citovány s přesností na 15 cm (Baltasvias, 1999). Tato metoda spočívá v tom, že se provede nálet nad územím s několika vlíčovacími body nebo s existujícím přesným modelem terénu (Dolanský, 2004). Profily se pak porovnají s daty z laserového skenování. Rozdíly jsou okamžitě viditelné v podobě vzájemného posunu obou profilů, jak je patrné na obrázku (Morin, 2002). Dalšími metodami kalibrace jsou například metoda vyrovnání nebo křížová metoda (Dolanský, 2004).



Obr. 3.8: Posun sousedních řad špatnou kalibrací



Zdroj: Morin, 2002

## 3.8 Zpracování dat

Po samotném naskenování objektů je velmi důležitou činností u laserového skenování zpracování získaných dat. Získaná data se převádějí do softwaru, kde jsou dále zpracovávána. Tato data se nazývají tzv. mračno bodů, tzn. nezpracovaná množina podrobných bodů objektu včetně chyb, které jsou dané špatnými nebo mnohočetnými nebo žádnými odrazy od objektu.

Primární data z laserového skenování jsou velmi nepřehledná, je nutno provést jejich transformaci pomocí automatizovaných funkcí. Dále se provede filtrace, kdy jsou vyhledány pouze body ležící na jednom určitém druhu povrchu (zpravidla na terénu) či klasifikace, kdy jsou všechny body postupně rozděleny do předdefinovaných tříd (Dolanský, 2004).

### 3.8.1 Transformace

Každý bod je popsán svými vlastními souřadnicemi, tyto souřadnice jsou vztahné ke zvolenému souřadnicovému systému. Geometrické transformace se mohou aplikovat buď na jednotlivé souřadnice objektu, který tím mění polohu, nebo přímo na souřadnicový systém (Žára et. al., 2005). Při porovnání polohy různých objektů je nutno transformovat (přepočítat) jejich geometrické údaje buď mezi jejich souřadnicovými systémy, nebo ze společného světového souřadnicového systému do lokálních souřadnicových systémů.

Všechna data z laserového skenování jsou ukládána v systému WGS-84, jelikož poloha získaných neupravovaných dat je určena v souřadnicovém systému, ve kterém byla určována poloha nosiče celého systému. Pro jejich další zpracování je

nejčastěji proveden převod do místního souřadnicového systému. V ČR je národním závazným souřadnicovým systémem JTSK. U laserového skenování se jedná o transformaci obrovského množství dat (souřadnic až několika milionů bodů), narůstají tím tedy i nároky na výpočetní techniku (Sukup, 2010).

### **3.8.2 Filtrace**

Při laserovém skenování dochází k odražení paprsku od těles na Zemi, některá tato tělesa jsou však nežádoucí pro výsledný 3D model a tvorbu digitálního modelu terénu, jsou to například stromy, auta či dráty vysokého napětí (Vosselman, 2000). Proto se musí provádět filtrace dat.

Editace mračna bodů se může provádět ručně, jelikož pro člověka není problematické určit, který bod na terénu leží či nikoliv, jednalo by se ale o velmi časově náročný úkol vzhledem k množství dat. Filtrace dat spolu s kontrolou zabere 60-80 % celkového času zpracování dat (Flood, 2001). Je třeba nalézt vhodné automatizované postupy, které provedou tuto práci dostatečně přesně a efektivně. Využívanými metodami filtrace dat jsou například filtry na bázi sklonu (Sithole, Vosselman, 2004), morfologické filtry a lineární predikce (Kraus, Pfeifer, 1998).

#### **Filtry na bázi sklonu (Slope Based Filters)**

Filtry založené na bázi sklonu je skupina filtrů, které používají pro zjišťování, zda bod leží na terénu či nikoli, porovnání s body v jeho nejbližším okolí. Zkoumá se hlavně výškový rozdíl mezi jednotlivými body a v závislosti na jejich vzájemné vzdálenosti je určen sklon. Poté, při rozšíření zkoumaného problému do prostoru, se dají body proložit plochou a může se hledat na této ploše maximální sklon. V případě že je mezi dvěma body nesmyslně velký výškový rozdíl, bude ten z bodů, který nenavazuje plynule na plochu, odstraněn (Vosselman, 2000).

#### **Morfologické filtry**

Při řešení problému filtrace užil Kilian et al. (1996) různé velikosti oken, do nichž umístil datové sady, každému bodu byla poté přiřazena podle důležitosti různá velikost okna. Ve srovnání s jinými metodami jsou morfologické filtry koncepčně jednoduché a může být snadné je implementovat. Morfologické filtry se užívají pro zpracování digitálního obrazu pro optimální rekonstrukci tvarů objektů, což může být velmi užitečné pro využití v urbanismu, konkrétně pro modelování zástavby. Jsou zde dva základní filtry, a to dilatace a eroze, jejich kombinací poté vznikají další filtry, např. otevření a uzavření (Dolanský, 2004).

## **Lineární predikce**

Lineární predikce neboli filtrování pomocí technik nejmenších čtverců patří mezi statistické interpolační metody, které lze použít pro interpolaci na modelu terénu. Nejdříve jsou v rámci aplikace definovány vztahy každého bodu s každým, a poté jsou pro každý bod vypočteny odchylky od přibližného průběhu terénu. Tyto body jsou poté podkladem pro určení vah, například bod pod terénem má číslo 0 a bod vysoko nad terénem 1, následně je vypočten nový průběh se zohledněním nově určených vah (Dolanský, 2004).

### **3.8.3 Klasifikace**

Klasifikace je metoda zpracování měřených dat, kde jsou body rozděleny podle jednotlivých druhů objektů, na kterých leží. Výstupem jsou tedy sady bodových dat se specifickými vlastnostmi (Filin, 2004). Třídí se do čtyř základních kategorií a to: terén, budova, vegetace, chybový šum. Dalšími třídami klasifikace mohou být např. vysoká vegetace, nízká vegetace, komunikace, body pod terénem, výšková vedení, voda.

Měřené body je možno klasifikovat dle odrazivosti z laserového měření, podle výškových poměrů v okolí bodu, ale také podle spektrálních vlastností získaných pomocí digitální komory.

Klasifikace se provádí v několika cyklech, při každém cyklu se vytřídí vždy jen jedna třída a poté se pokračuje pouze s neroztříděnými daty (Dolanský, 2004).

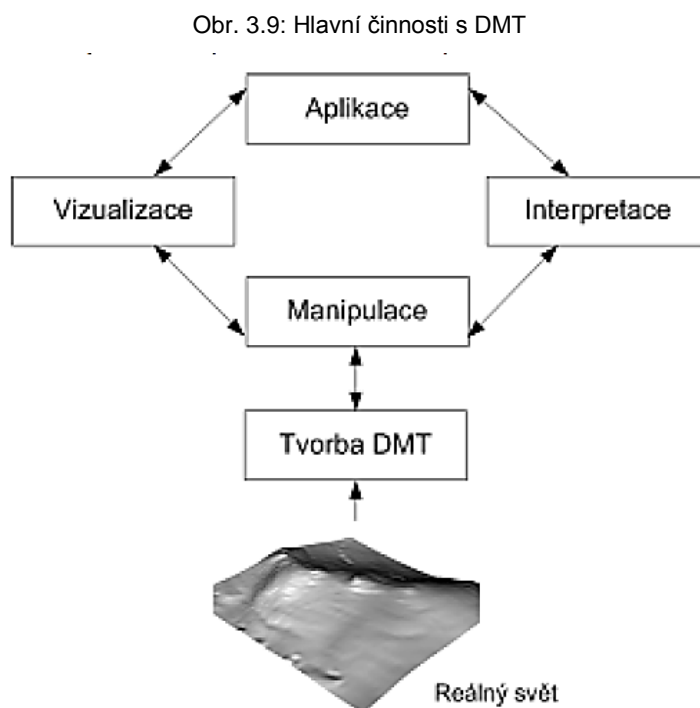
## **3.9 Tvorba digitálního modelu terénu**

Základní rozdělení a stručná definice byly uvedeny již v podkapitole 2.8.4. Znázornění terénu používali již naši předkové na starých mapách, nejdříve se používala kopečková metoda, poté se začalo používat různých typů šrafování a v současné době používáme vrstevnice doplněné o stínování (Oršulák, Pacina, 2010). Digitální modely terénu byly poprvé použity pro reprezentaci reálného povrchu na konci 50. let minulého století na Massachusetts Institute of Technology, kde sestavili tuto definici: „Digitální model terénu je jednoduše statistická reprezentace spojitého povrchu Země pomocí velkého množství bodů se známými souřadnicemi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  v definovaném souřadnicovém prostoru.“ (Habib et al, 2005) Od 50. let se vývoj a využití DMT posunul o velký kus kupředu a v dnešní době se můžeme setkat s DMT i v běžném životě aniž si to uvědomíme, například při simulaci povodní v předpovědi počasí, v telefonech a v ručních navigacích zobrazíme terén, po kterém se aktuálně

pohybujeme, Google Earth přináší celý svět ve 3D a mnoho dalších aplikací zobrazuje DMT.

### 3.9.1 Procesy digitálního modelování terénu

Tvorba a použití DMT zahrnuje následující činnosti- tvorbu, manipulaci, interpretaci, vizualizaci a aplikaci, viz obrázek 3.9 (Habib et. al., 2005)



Zdroj: Oršulák, Pacina (2010)

Zjednodušeně lze říci, že:

- **Tvorba DMT** zahrnuje získání výškových dat (letecké snímkování, vektorizace vrstevnic, pozemní měření, atd.) a následnou tvorbu výškového modelu.
- **Manipulace s DMT** znamená úpravy získaného DMT – vyhlazování, filtrování, odstranění chyb, konverze mezi jednotlivými typy.
- **Interpretace** obsahuje analýzu digitálního modelu terénu za účelem získání informací pro další zpracování v GIS modelování, popřípadě k dalším úlohám modelování terénu.

- **Vizualizace** je velmi důležitá pro vizuální porozumění a hodnocení. Je zaměřena na zobrazení DMT stejně tak, jako na vizualizaci informace odvozenou z DMT.
- **Aplikace DMT** je velmi široká. DMT se dostaly do bodu, kdy hrají klíčovou roli pro různé aplikace. Velký technologický pokrok v počítačové grafice, prostorové teorii, prostorových databázích a mnoha dalších oborech umožňuje aplikovat DMT na různé problémy.

### 3.9.2 Tvorba nového výškopisu ČR

V letech 1995 až 2000 vznikl první celoplošný digitální výškový model České republiky. Tento výškový model vznikl digitalizací vrstevnic základní mapy ČR 1:10 000. Takto byl vytvořen digitální model reliéfu, tzv. ZABAGED (Základní báze geografických dat České republiky). V následujících letech došlo ke zdokonalování tohoto modelu pomocí zahuštění výškových bodů v rovinatém území a stereofotogrammetrického vyhodnocení terénních hran. Tyto snahy vedly k tomu, že byly odstraněny nehomogenity původního vrstevnicového modelu, a došlo k redukci hrubých chyb. Poté v letech 2008 až 2010 byl hlavně pro účely počítačových aplikací z vektorového modelu vytvořen model gridový, tzv. ZABAGED (výškopis grid 10x10 m) (Šíma, 2011).

Na základě analýz, které byly provedeny v letech 2006-2008, bylo zhodnoceno, že dosavadní výškopisné modely ČR nejsou dostačující pro potřeby státní správy a územní samosprávy. Proto v roce 2008 byl na Zeměměřičském úřadě (ZÚ) zpracován Projekt tvorby nového výškopisu České republiky (Dušánek, 2014). V roce 2009 byla podepsána dohoda o spolupráci na realizaci nového výškopisného mapování v letech 2009 až 2015. Podepsali ji: Český úřad zeměměřičství a katastru (ČÚZK), Ministerstvo obrany (MO) a Ministerstvo zemědělství (Mze) (Brázdil, 2010). Jako nejvhodnější technologie byla zhodnocena metoda leteckého laserového skenování.

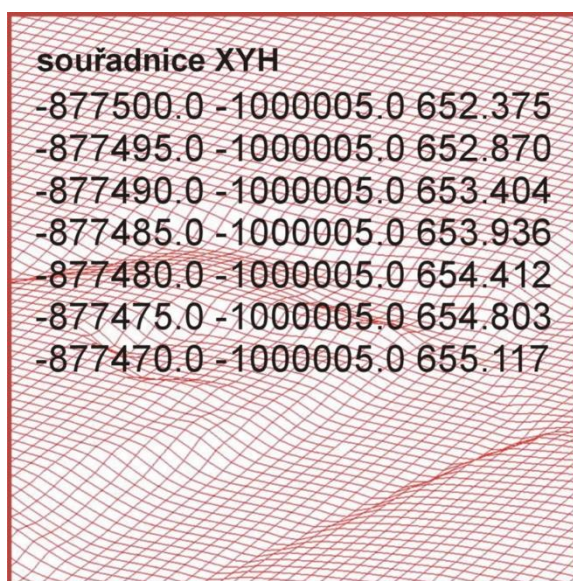
Pro účely leteckého laserového skenování bylo rozděleno území ČR do třech oblastí. Jako první pro skenování bylo zvoleno pásmo střed, které bylo naskenováno v roce 2010, v roce 2011 bylo naskenováno pásmo západ a v roce 2013 bylo mapování zakončeno pásmem východ (Dušánek, 2014).

V roce 2013 bylo dokončeno laserové skenování celého území ČR. Na základě toho skenování, vzniká několik produktů digitálního modelu terénu nebo reliéfu, jejichž specifikace bude uvedena dále.

### DMR 4G:

Digitální model reliéfu 4. generace je tvořen nejdříve víceméně automatickými postupy. Cílem je vytvoření první verze výškopisného modelu, který je důležitý jako podklad pro tvorbu Ortofota ČR. DMR 4G je základním podkladem pro ortogonalizaci leteckých měřičských snímků. Základními vstupními daty do procesu tvorby DMR 4G jsou data pro automatickou robustní filtraci, z těchto dat, která jsou vyhodnocena jako body na zemském povrchu, je vybrán nejnižší bod v pravidelné čtvercové síti 5x5 m.

Obr. 3.10: Digitální model reliéfu 4. generace



Zdroj: CUZK; <geoportal.cuzk.cz>

Výsledná množina bodů ale obsahuje manuálně editované zbytkové chyby z nesprávné klasifikace. Z vybrané množiny výškopisných bodů, což je nepravidelná síť bodů, je následně lineární predikcí interpolován výškopisný model v pravidelné mřížce výškopisných bodů v rozestupu 5x5 m. Interpolace je prováděna odděleně pro geodetický referenční systém WGS 84/UTM a SJTSK. DMR 4G je model, který se dodává ve formě pravidelné mříže (GRID) s rozlišením 5x5 m a se střední chybou určení výšky 1,00 m v terénu pokrytém vegetací a 0,30 m v odkrytém terénu (Brázdil, 2010, Dušánek, 2014).

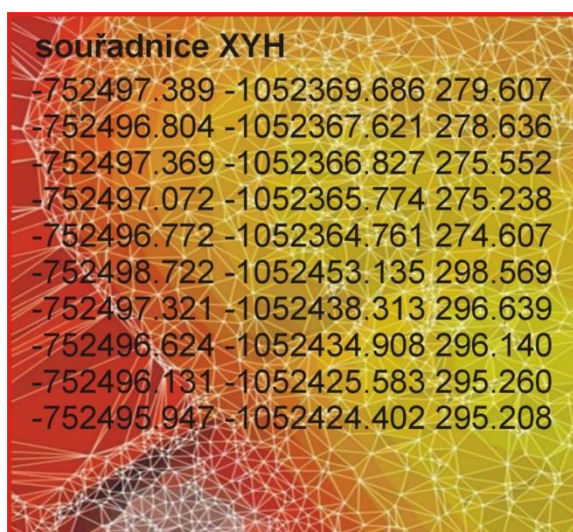
### DMR 5G:

Digitální model reliéfu 5. generace je tvořen daty v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti bodů o souřadnicích X, Y, H.

Data musí projít detailní manuální kontrolou a editací po automatické filtraci. Finální výsledek DMR 5G se po manuální editaci odvozuje ve třech krocích tzv.

vyhlazování modelu. V prvním kroku se vybere bod v pravidelné mříži 1x1 m, čímž je zredukován počet bodů v místech styku několika bloků a odstraní se zbytkový šum vyrovnání měřičských pásů. V druhém kroku se zredukují nežádoucí lokální nerovnosti (např. ornice), čímž se model vyhladí, výsledkem jsou původní body s upravenou výškou (max. 5 cm). V kroku třetím se původní mračno bodů zředí při dodržení stanovené střední výškové chyby, a k čemuž jsou použity automatizované algoritmy, které vyvíjí společnost ATLAS, spol. s.r.o. a zpracovává do programu ATLAS DMT (Dušánek, 2014).

Obr. 3.11: Digitální model reliéfu 5. generace

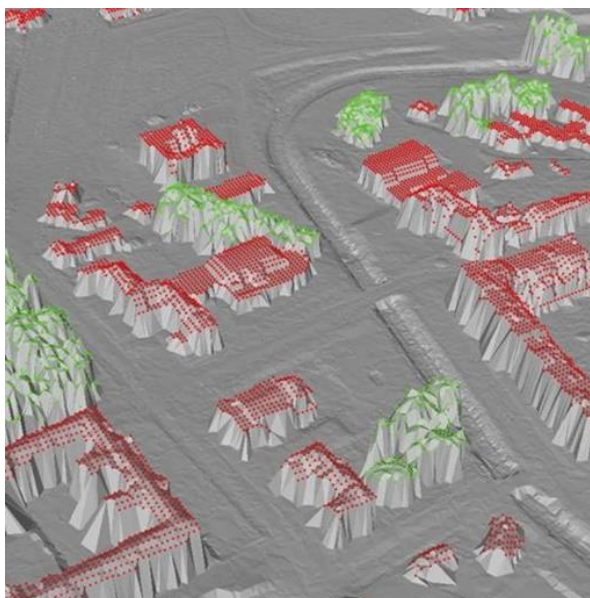


Zdroj: CUZK; <geoportal.cuzk.cz>

### DMP 1G:

Digitální model povrchu 1. generace je vlastně DMR 5G, doplněný o objekty nad zemským povrchem, a je odvozen automatizovanými postupy. V intravilánu se přidávají body, které se automatickou filtrací vyhodnocují jako budovy, a to jen v místech, kde se shodují údaje laserového skenování s obrysy budov z katastru nemovitostí. V případě vegetace se zařazují body, které se nacházejí nad zemským povrchem a jejichž minimální rozloha je 25 m<sup>2</sup>. DMP 1G se běžně dodává ve formě jednoho souboru (Dušánek, 2014).

Obr. 3.12: Digitální model povrchu 1. generace



Zdroj: CUZK; <geoportal.cuzk.cz>

### 3.10 Dostupné laserové skenery

V posledních letech zaznamenaly geoinformační technologie pro pořizování primárních 3D dat velký rozmach. Letecké laserové skenování na celém světě již částečně nahradilo leteckou fotogrammetrii a dálkový průzkum Země, které v minulých letech dominovaly v oblasti geodetického velkoplošného pořizování informací o zemském povrchu. Stejně rychle se rozvíjí také i pozemní skenování, kdy jsou výrobci těchto technologií uváděny na trh stále dokonalejší zařízení. Díky neustále klesajícím cenám se laserové skenery stávají stále dostupnějšími (Brejcha, 2015). Dále budou uvedeny laserové skenery, které jsou používány na území ČR. Záměrně byly vybrány tři, protože budou uvedeny zástupci každé metody laserového skenování, tedy statický pozemní skener, mobilní pozemní skener a mobilní letecký skener.

#### 3.10.1 LYNX Mobile Mapper

Laserový skener LYNX Mobile Mapper slouží pro mobilní skenování a je vyráběn kanadskou společností Optech Incorporated. Systém je určen pro sběr lidarových dat na zeměměřičské úrovni při více než 200 000 měřeních za sekundu a s úhlem záběru (FOV) 360°. Mobilní mapovací zařízení LYNX je přizpůsobeno až čtyřem snímacím hlavám a slučuje data z lidarů se zabudovaným pozičním a orientačním systémem Trimble/Applanix POS LV a s vyzkoušenou, ověřenou operační softwarovou



platformou. Výsledkem jsou velmi přesná 3D data, získaná z vozidla jedoucího rychlostí až 50 km/h (GEOVAP, 2015).

Využití tohoto laserového skeneru mohou být například zaměření (pasportizace silnic, mapování komunikací a okolí), měření (vzdálenost, průjezdný profil komunikace), modelování (hlukové studie, uliční řády, podklad pro navigační systémy), vizualizace (urbanismus a územní plánování, projekce), monitoring.

#### **Technické parametry LYNX Mobile Mapper dle GEOVAP (2015):**

Maximální dosah: > 200 m (při 20% odrazivosti)

Absolutní přesnost: +/- 5 cm (v závislosti na kvalitě GPS dat)

Úhel záběru: 360°

Rychlost skenování: 200 000 vyslaných impulsů za vteřinu

Provozní teplota: -20° až 40°C

Prostorové rozlišení: do 1 cm při rychlosti 50 km/h

#### **3.10.2 Leica ScanStation P20**

Jedná se o laserový skener pro statické pozemní skenování vyrobený švýcarskou firmou Leica Geosystems. Mezi hlavní vlastnosti tohoto laserového skeneru patří velmi vysoká rychlost, velká přesnost, minimální míra šumu a velká odolnost vůči okolnímu prostředí.

Tento typ skeneru je vhodný zejména pro využití při animaci a 3D vizualizaci terénu, tvorbě výškové analýzy, vektorové mapy, 3D modelu terénu, sledování posunu terénu a objektů, vizualizaci historických fasád domů, atd. (Gefos, 2015)

Obr. 3.13 : Statický pozemní skener společnosti Leica



Zdroj: GEFOS, 2015

### **Technické parametry Leica ScanStation P20 dle (GEFOS, 2015):**

Maximální dosah: Až 120 m na povrch s 18% odrazivostí (minimální vzdálenost 0,4 m)

Absolutní přesnost: 2 mm standardní odchylka do 50 m

Úhel záběru: 360° x 270°

Rychlost skenování: Až 1 000 000 bodů za vteřinu

Provozní teplota: -20° až 50°C

Úhlová přesnost: až 8"

### **3.10.3 LiteMapper 6800**

Tímto typem skeneru pro letecké snímkování byl realizován Projekt tvorby nového výškopisu České republiky (Dušánek, 2014). Mechanismus skenování je založen na rotujícím polygonálním zrcadlu, to poskytuje plně lineární, jednosměrné a paralelní rozkladové řádky. LiteMapper skenery snímají povrch v paralelních linkách s pravidelným bodem rozteče v příčném i podélném směru, aby poskytl co nejpresnější povrchovou reprezentaci. Rychlost snímkování se liší v závislosti na tom jak kvalitní a podrobný je třeba záznam (IGI, 2014)

### **Technické parametry LiteMapper 6800 dle IGI (2014):**

Maximální dosah: maximální výška letu 3000 m

Absolutní přesnost: 0,10 m

Úhel záběru: 60 °

Rychlost skenování: 10-200 řádků za sekundu

Frekvence laserových pulzů: 60-240 kHz

## **3.11 Dostupné programy pro zpracování dat**

Primárním výsledkem leteckého a pozemního skenování je tzv. mračno bodů. Dá se říci, že donedávna nebyla tato primární data pro běžného uživatele jednoduše použitelná. A to hlavně z důvodu velké objemnosti dat a také, protože mračna bodů jsou ukládána ve specifických datových formátech, které běžně dostupné programy jako CAD, GIS a další nepoužívaly. V dnešní době jsou do těchto programů, které se zabývají zpracováním geografických dat, integrovány funkce i pro práci s mračny

bodů. Například společnost Autodesk začleňuje již třetím rokem do svého software základní nástroje pro načtení a základní úpravy mračna bodů. Pro pokročilejší zpracování výsledků laserového skenování existuje celá řada softwarových produktů (Brejcha, 2015).

### **3.11.1 Leica Cyclone**

Leica Cyclone je program, kterým se mohou připravovat projekty, řídit skenovací proces, provádět vzájemné propojování mračen bodů a modelovat výsledný CAD výkres s následnou konverzí do běžně používaných formátů (Šantora, 2002).

Skenovací proces se provádí tak, že po založení projektu se snímá obraz scény pomocí digitální kamery. Na tomto obrazu se poté vymeze hustota bodů a zorné pole pro skenování. Samotné skenování je dlouhé jen několik málo minut. V další fázi se pro orientaci s velkou hustotou naskenují terče. Při užití standardně dodávaných terčů, lze využít funkci, které jejich polohu automaticky vyhledají. Stejným způsobem se to provádí při potřebě více záběrů. Poté následuje kancelářské zpracování.

Proces spojování více skenů do jednoho a jejich umístění do požadovaného souřadnicového systému se nazývá registrace. Polokulovité terče se zde užívají jako identické body. Před registrací se z bodového mračna vymodelují plochy terčů, přes jejich středy poté probíhá identifikace. Výsledkem ze všech skenů je mračno bodů v jednotném souřadnicovém systému.

Nakonec se provádí modelování, při kterém mračno bodů převádíme do přesného vektorového CAD modelu. Pro tento účel je v programu Cyclone dostupná řada funkcí, které pasují předdefinované tvary (např. válce, sféry, roviny,...) na předem označené části mračna bodů.

Leica Cyclon se skládá z několika softwarových modulů, které tyto procesy provádějí, např. Cyclon Register, Cyclon Model, Cyclone Průzkum, atd. (Leica, 2015)

### **3.11.2 Scene WebShare**

Software Scene WebShare nabízí společnost Faro Technologies. Tento program umožňuje vizualizaci naskenovaných dat. A umožňuje analýzu zaměřených objektů přímo v internetovém prohlížeči, bez nutnosti použití jakéhokoliv dalšího software (BWPS, 2015).

Scene Webshare ukazuje jednotlivé naskenované obrazy jako panoramatické fotografie, ve kterých lze odměřovat vzdálenosti, posouvat se mezi pozicemi skeneru

a prohlížet zaměřené okolí. Služba dále umožňuje zobrazit přehledovou mapu celého měření, ve které lze identifikovat, k jaké pozici skeneru náleží aktuální panoramatické zobrazení. Pomocí přehledové mapy se dají měřit vzdálenosti i plochy.

Do programu Scene WebShare je možné stáhnout originální naskenovaná data pro pokročilé zpracování. K datům Scene WebShare je umožněn přístup z internetu. Tento software je bezplatný a 3D data z laserového skenování spravuje na serveru klienta (BWPS, 2015).

Obr. 3.14: Prostředí Scene WebShare v internetovém prohlížeči



Zdroj: BW precision systems s.r.o.; <<http://www.bwps.eu/>>

Jsou dvě možnosti záznamu obrazu – Cloud to Cloud nebo Top View Based. Metoda Cloud to Cloud je vhodná pro určování správné pozice v exteriéru a to i za nepříznivých atmosférických podmínek a lze využít GPS navigaci laserových skenerů. S Top View Based lze odstranit umělé cíle jako šachovnice nebo kruhy. Možnost vynechat některé cíle ze skenování se dá využít v interiérech, kde nelze najít správné GPS umístění (CAD, 2015).

### 3.11.3 ArcGIS Desktop

ArcGIS Desktop je software americké společnosti ESRI, jejímž hlavním směřováním je vývoj softwaru pro práci s geografickými informačními systémy. V České republice je hlavním distributorem produktů firmy ESRI společnost ARCDATA Praha s.r.o.

Tento software tvoří sada produktů pro vytváření, analýzu, správu a vizualizaci geodat, která umožňuje budování geografického informačního systému. Funkcionalitu ArcGIS lze rozšířit o různé uživatelské nadstavby, které se vyvíjejí

ve standardních programovacích prostředích. Program ArcGIS je licencován ve třech úrovních- Basic (dříve ArcView), Standard (dříve ArcEditor) a Advanced (dříve ArcInfo), které se liší svojí funkcionalitou (ARCDATA, 2015).

Produkty z kategorie ArcGIS for Desktop tvoří aplikace ArcCatalog a ArcMap. Pro analýzu a správu geografických dat je v obou aplikacích k dispozici bohatý soubor nástrojů, který je umístěn v uživatelském rozhraní ArcToolbox. Pro náročnější postupy je možné využít integrovaný programovací jazyk Python (ARCDATA, 2015).

Pro práci s mračny bodů obsahuje ArcMap a ArcScene prvek LAS Dataset, do kterého je možné nahrát mračna bodů ve formátu .las. Při nastavování LAS Dataset lze zjistit i základní údaje o datech, například minimální a maximální výška bodů či celkový počet bodů. Díky tomuto panelu mohou být data zobrazena jako mračno bodů, které se roztřídí buďto podle intenzity bodů, výšky bodů či tříd (pokud jsou určeny). Dále může být mračno bodů zobrazeno jako trojúhelníková síť (TIN). Body lze také prohlížet ve 3D nebo může být vyhotoven profil části zájmového území. Tento LAS Dataset však neumožňuje žádnou další úpravu dat, a proto se používá následující postup. Pomocí funkce „LAS to Multipoint“ se data ve formátu .las převedou do dvou bodových vrstev. Jedna vrstva obsahuje body ležící na zemském povrchu, druhá vrstva obsahuje všechny ostatní body. Poté se tyto dvě vrstvy převedou do rastru, pomocí funkce „point to raster“. Díky tomuto kroku se dá odečíst vrstva zemského povrchu a zbyde vrstva nadzemních bodů, tzn. vegetace, budovy, atd. (ARCDATA, 2015).

#### **3.11.4 AutoCAD**

AutoCAD je populární software vyvinutý firmou Autodesk pro 2D a 3D projektování a konstruování. Na jádru Autodesk byla Autodeskem vyvinuta sada profesních aplikací určených pro CAD v oblasti stavební projekce a architektury, strojírenské konstrukce, mapování a terénních úprav. AutoCAD je vhodnou otevřenou platformou pro aplikace třetích firem, jelikož poskytuje řadu API rozhraní.

Tím nejzákladnějším produktem je například AutoCAD 2011, který je prvním z řady AutoCAD, který umí pracovat s bodovými mračny, daty vytvořenými v 3D laserových zařízeních. AutoCAD dokáže tato data načíst a poté vizualizovat. Takto je možné zobrazit až dvě miliardy bodů a pracovat s nimi. AutoCAD neumožňuje stylizovat mračna bodů, pouze měnit barevnou vizualizaci a intenzitu. Dalším produktem je AutoCAD Map 3D. Nástroj zabudovaný v tomto produktu umožňuje

importovat, spravovat a stylizovat mračna bodů dle LAS klasifikace, nadmořské výšky, prostorového rozsahu nebo intenzity (Koláčková, 2010).

Základními výstupními formáty 3D povrchů a objektů tvořených z mračen bodů a zeměměřičských dat jsou GeoTiff, ESRI ASC. Dalším produktem umožňující práci s mračny bodů z oblasti stavebnictví je AutoCAD Civil 3D. Podobně jako AutoCAD Map 3D umožňuje i tento software stylizovat mračna bodů dle LAS klasifikace, prostorového rozsahu, RGB, intenzity nebo nadmořské výšky.

Kromě možnosti načtení podkladů a jejich stylizování ve výkresu, je možné použít tyto body pro vytvoření velmi přesného modelu terénu.

Autodesk 3ds Max a 3ds Max Design nástroj pro tvorbu vizualizace a animace umožňuje práci s mračny bodů po stažení nástroje Point Cloud Tool for 3ds Max and 3ds Max Design, který je možné stáhnout na stránkách Autodesk Labs.

Pro aplikace AutoCAD Map 3D a Civil 3D ve verzích 2011 je zveřejněn Hotfix, který umožňuje počítat index i pro data bez souřadnicového systému a následně vytvořit vytvoří „cloud data store“ – soubor s koncovkou isd (AUTODESK, 2015).

## **3.12 Využití**

Využití laserového skenování je velmi široké. Původně bylo využíváno v meteorologii a ke skenování povrchu měsíce. Dnes je však využíváno v geodézii, stavebnictví, hydrologii, lesnictví, archeologii, územním plánování, stavebnictví, vojenství, fyzice, astronomii, atd.

Tato práce se zaměřuje na využití laserového skenování v urbanismu a územním plánování, což bude podrobně rozebráno v druhé části práce, ale je mnoho dalších oborů, ve kterých je laserové skenování použito. Zde je přehled některých z nich:

### **3.12.1 Archeologie**

V archeologii našlo laserové skenování využití díky tomu, že klasické metody letecké archeologie již nejsou dostačující, vzhledem k velkému zalesnění archeologických stanovišť. V dnešní době dosahuje zalesnění na území České republiky přibližně 34% a stále roste (od 30. let minulého století se rozloha lesů na našem území téměř zdvojnásobila). Velkou výhodou leteckého laserového skenování v archeologii je především ve velkých plochách, které je možno naskenovat. Tvorba 3D modelu terénu v zalesněných oblastech je samozřejmě v určitých směrech omezená,

důležitým faktorem je hustota korun stromů a dalších úrovní lesního porostu. Naprosto skvělých výsledků je možné dosáhnout při zkoumání listnatých nebo modřínových lesů v době, kdy stromy ztratí olistění a vysoký podíl laserového impulsu dopadne až na terén. Metoda laserového skenování je vhodná pro odhalení liniových prvků s historickou minulostí. Mimo jiné je možno zaznamenat zemní práce, jako jsou polní systémy, příkopy, přístupové cesty, odvodňovací kanály nebo bývalou důlní činnost (Gojda et al., 2011).

Primárně se archeologické projekty zaměřovaly, na topografické mapování krajiny. V České republice byl v roce 2010 zahájen projekt na katedře archeologie Západočeské univerzity v Plzni pod vedením Prof. PhDr. Martina Gojdy, CSc., který navazuje na praxi v tomto oboru. Úkolem bylo testovat metody ALS a zpracovat získaná data. Pro mapování bylo zvoleno v severozápadní části ČR šest polygonů s dostatečným lesním porostem a archeologickými objekty (pravěké hradiště, důlní činnost, mohylová pohřebiště atd.) (Gojda et al., 2011).

### **3.12.2 Lesnictví**

V lesnictví je laserové skenování používáno zejména ke třem typům úloh: identifikace stromů, měření parametrů stromů, tvorba digitálního modelu povrchu korun stromů. Využitím technologie leteckého laserového skenování mohou být různé lesnické činnosti provedeny rychleji a efektivně. Při tvoření datových souborů v zalesněných územích se mohou laserové pulsy odrážet od různých vrstev vegetačního krytu, zahrnujícího nejvyšší hladinu vegetace (první odraz), střední hladiny (druhý a následující odrazy) a zemský povrch (poslední odraz). Na základě prvního a dalších následujících odrazů je možno odhadnout některé parametry jednotlivých stromů nebo i porostů, jako jsou například zakmenění, plocha koruny nebo výška stromu (Mikita et al., 2013).

Novějším přístupem při zkoumání stromových a porostních charakteristik je využití informace z odrazů celého průběhu vlny, tedy nejen z diskrétních odrazů a jejich intenzit (Heinzel, Koch 2011). DMT z tohoto měření v lesních porostech může pomoci navrhnout nové terénní klasifikace těžebně-dopravních technologií s ohledem na možnosti harvesterových systémů nebo navrhnout a optimalizovat lesní dopravní síť (Akay, Sessions 2005).

### 3.12.3 Ekologie

V ekologii je laserové skenování využíváno například ke zjišťování objemu nadzemní biomasy, kde byla prokázána závislost vertikálního rozložení korunového patra na výčetní ploše a velikosti nadzemní biomasy (Lefsky et al., 1999). Nejvyšších hodnot korelace bylo dosaženo mezi velikostí nadzemní biomasy a kvadratickou výškou zápoje. Takto je prováděna predikce nadzemní biomasy z výšek lesního porostu.

Data z laserového skenování se dají dále využít k predikci ptačích stanovišť. K předpovědi reprodukční úspěšnosti ptačích druhů v místě určitých zalesněných lokalit se využívají údaje o výškách lesního porostu (Bradbury et al., 2005).

Může být také zjišťována a klasifikována struktura vodní vegetace. K tomu se využívá LIDAR se specifickými vlnovými délkami.

### 3.12.4 Hydrologie

Pro mapování vodních ploch a dna pomocí LIDARových systémů je podstatné chování laserového paprsku v blízkosti vodních ploch. Skenery vhodné k celoplošnému mapování používají laser v blízkém infračerveném spektru. Ze spektrální charakteristiky vody je známo, že voda toto záření téměř zcela pohlcuje. Pro zjištění geometrie inundačního území nebo pro zjištění hranice vodní plochy (u povodní například záplavovou čáru), je tato vlnová délka vhodná. V samotných výsledných datech se bude vodní plocha jevit jako oblast s velmi nízkou hustotou bodů. Výška hladiny lze zjistit z výšek bodů odražených přímo od břehů (Uhlířová, Zbořil, 2009).

Pro mapování pod vodní hladinu je v případě laseru nutné použít modrozelenou nebo zelenou část spektra, která vodou není pohlcována a může tak projít až ke dnu a od něj se odrazit zpět. Ve světě existují i systémy pro mapování pobřežních vod využívající principu duálního použití jak infračerveného záření (mapuje hladinu), tak i současně záření zelenomodrého (mapuje dno). Systém se nazývá DIAL – Differential Absorption Lidar. U velmi klidné a průzračné hladiny vody lze mapování provádět teoreticky až do hloubky 50 m. Pro tyto systémy je potřeba výrazně nižší výška letu (200 – 400 m) (Uhlířová, Zbořil, 2009).

V datech leteckého laserového skenování jsou velmi dobře rozpoznatelná koryta toků, což je vhodné pro analýzu možností zpřesnění geometrie vodního toku.



Podklad pro stanovení záplavových území z leteckého LIDARu patří- vedle klasického geodetického zaměření údolních profilů a profilu koryta a vedle fotogrammetrického mapování inundací- k základním metodám pro pořizování geodetických podkladů pro hydraulické modely (Uhlířová, Zbořil, 2009). Stanovení záplavových území je velmi důležitým prvkem plánování nové zástavby v rámci územního plánování.

### **3.12.5 Důlní měřičství**

V důlním měřičství se využívají především pozemní laserové skenery. Tyto skenery jsou vhodné pro komplexní monitoring dat při důlní činnosti a měření kubatur. Díky monitoringu je možné sledovat přesný průběh těžby a sledovat objemy hald a naspů vytěženého nerostného materiálu. Laserové skenování je nejpřesnější metodou získávání dat pro důlně měřičskou inventarizaci a dokumentaci, kterou primárně tvoří základní důlní mapy, mapy povrchu, provozní mapy, charakteristický řezy a další digitální či tiskové výstupy (Sirotek, 2003).

## **3.13 Využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování**

### **3.13.1 Tvorba 3D modelu města**

Velmi přesný 3D model města můžeme získat tak, že nastavíme minimální grid pro měření, jen třeba několik desítek centimetrů, a zvolíme velmi úzký úhel záběru, aby vrhaly budovy, co nejmenší stíny. Takto získaný digitální model reliéfu lze snadno použít například pro tvorbu virtuálního města, zvláště pokud je DMR pokryt ještě ortofoto snímkováním (Haala, Brennen, 1999).

Dalšími aplikacemi v urbanismu a technice jsou: bezdrátová komunikace, plánování nouzových únikových cest, management při předvídání a ochraně při povodních, eroze, aj. (Pavelka, 2010)

Obr. 3.15: 3D model hlavního města Prahy



Zdroj: GEOPORTAL, 2015

Podrobné 3D modely měst mohou posloužit především pro urbanistické plánování. Digitální 3D modely usnadňují posuzování plánů urbanistického rozvoje, analýzy zástavby a schvalování rekonstrukcí. S použitím 3D modelu je plánování rozvoje města realističtější a názornější. Například při plánování stavby komunikací, rozvoje industriálních zón, letišť atd. Již téměř každá architektonická studie v dnešní době vyžaduje vhodnou vizualizaci navrhovaného objektu v návaznosti na jeho nejbližší okolí. Bez kvalitní vizualizace návrhu není možno objektivně schválit větší územní změny (Sukup, Kotolan 2002)

### 3.13.2 3D modely budov z dat laserového skenování

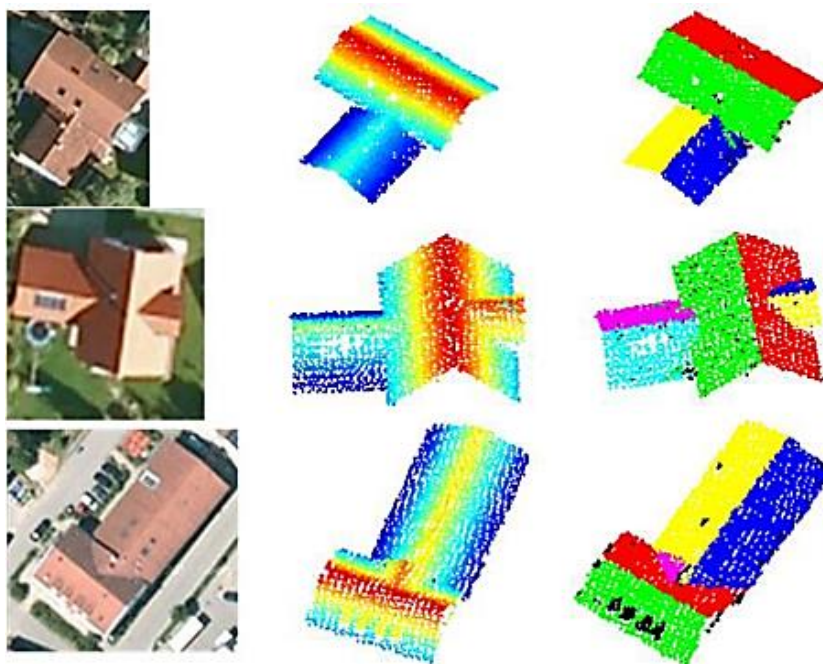
Letecké laserové skenery snímají povrch seshora. Při skenování budov touto metodou se vyskytne většina zaměřených bodů na střechách, jen minimum odražených paprsků pochází ze stěn budov. To jestli se jedná o střešní rovinu nebo o chybně nalezenou rovinu ležící na zemském povrchu, je možné zjistit pomocí málo bodů naměřených ve výškovém rozsahu stěn budovy (Schwalbe et al., 2005).

Skutečnost, že lze získat z ALS jen malé množství informací o stěnách, není vlastně tak důležitá, protože stěny budovy jsou zobrazeny jako vertikální roviny spojující dolní okraj střechy s povrchem. Modelace střech z dat leteckého laserového skenování se zaměřuje hlavně na určení polohy a skutečného tvaru střech.

Pro 3D vizualizaci je možné znázornit také střešní přesah. Ten je určen buď odhadem, anebo přesněji může být vypočítán z územního plánu. Popřípadě lze stěny vytvořit (Rottensteiner, Briese, 2002). Informace o stěnách budovy je možné doplnit

například pomocí pozemního laserového skenování. Zde je používán laserový skener s kamerou, společně umístěný na autě k vytvoření 3D modelu fasád. V kombinaci s leteckými snímky a daty ALS vytvářejí modely městských částí či celkové modely města (Pavelka, 2010).

Obr. 3.16: Ukázka dat získaných leteckým skenováním - mračna bodů střech vizualizovaná dle výšky



Zdroj: Fan et al. (2014)

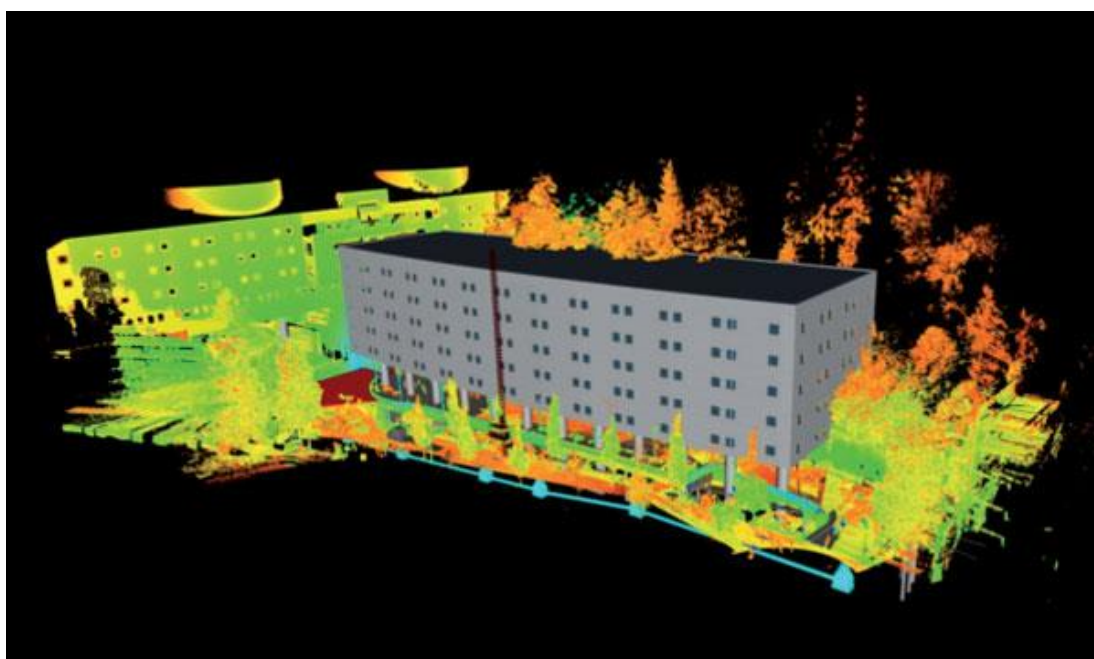
Velké množství metod pro vytvoření 3D modelů budov z dat laserového skenování lze rozdělit do dvou hlavních kategorií – metody řízené modelem a metody řízené daty. Hlavní rozdíly spočívají v tom, že metody řízené modelem se snaží datům ALS přizpůsobit nějaký typ umělého modelu (Haala et al., 1998). Volí tedy rozdílný postup oproti metodám řízenými daty, které v datech bodového mračna ALS nejprve hledají plochy, a ty pak spojují do modelů budov (Maas, Vosselman, 1999).

### 3.13.3 Městské virtuální prostředí

Využití virtuálního prostředí v prezentaci urbanistických návrhů je zatím v prvopočátcích, přesto několik projektů již bylo realizováno. Příkladem jsou virtuální modely Berlína nebo Atlanty, jednalo se však pouze o modely malých částí měst (Tomášek, 2011).

Nejsnadnější formou simulace městského prostředí jsou pasivní aplikace, které se chovají jako film. Takové prostředí je možno vnímat pouze vizuálně, nelze se v něm však pohybovat, ani nic cítit. Tento způsob prezentace je využíván pro představení nových architektonických a urbanistických návrhů nebo historických měst (Caneparo, 2004).

Obr. 3.17: Osazení modelu budovy do terénu



Zdroj: Využití virtuálního modelu budovy (BIM) ve stavební praxi; < <http://www.casopisstavebnictvi.cz/>>

Druhým stupněm jsou aktivní aplikace. V tomto případě již uživatel může prostředí libovolně zkoumat. Je možno se v prostředí pohybovat a prohlížet si ho ze všech stran i slyšet odpovídající zvuky, avšak chybí zde zpětná hmatová vazba. Nejvyspělejší formou je interaktivní pojetí virtuálního města. Zde se spojuje možnost nejen zkoumat městské prostředí, ale také jej modifikovat a analyzovat pomocí datové klávesnice. Je zde možné brát virtuální předměty do ruky a přemísťovat je, popřípadě pracovat s virtuálními nástroji. Schopnost manipulovat s nábytkem, vzít stěnu a posunout ji nebo vložit do ulice stromořadí a přitom se v takovém prostředí neustále pohybovat, posunuje možnosti architektury a urbanismu o velký krok dopředu. Zatím nám však nejsou takové aplikace široce dostupné. Rozvoj virtuální reality však postupuje velmi rychle kupředu (Tomášek, 2011).

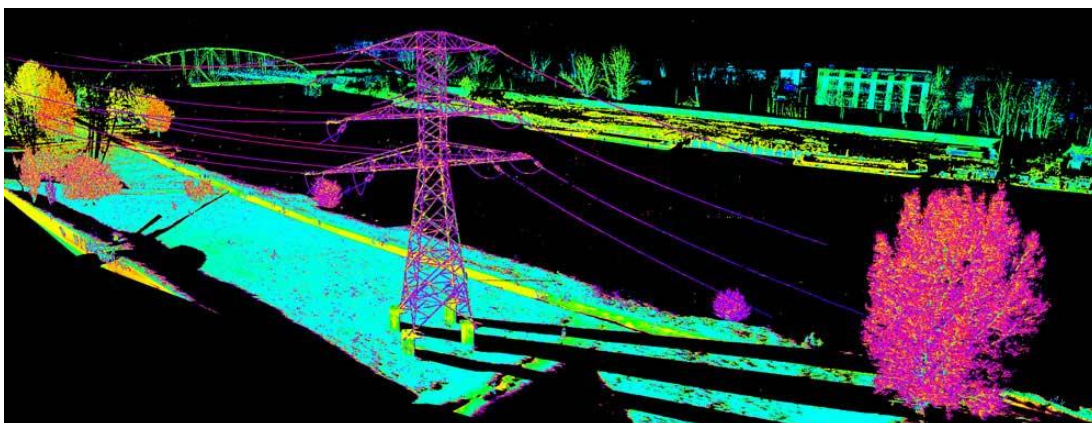
#### 3.13.4 Návrh liniové infrastruktury

Návrh liniové infrastruktury jakou jsou voda, kanalizace nebo vedení elektrického napětí, stejně tak silniční nebo železniční doprava vyžadují podrobná 2D a 3D data.

Příkladem využití jsou analýzy signálu telekomunikačních společností ve městě (Tomášek, 2011).

Dalším příkladem může být bezpečnost elektrického vedení, která významně ovlivňuje náš každodenní život, a především oblast průmyslu. Včasné a přesné monitorování elektrického vedení umožňuje předejít možným nebezpečným situacím, např. výpadku elektrického proudu. V současnosti provádějí kontrolu určené osoby, to je ovšem zdlouhavý a velmi drahý proces a v neposlední řadě jde o poměrně nebezpečnou práci.

Obr. 3.18: Ukázka dat vzniklých laserovým skenováním vedení vysokého napětí



Zdroj: 3d Laser scanning of power line masts; < <http://www.3deling.com/>>

V poslední době byl systém ALS představen jako cenově efektivní nástroj pro získání informací, které umožní rychle zachytit 3D scénu elektrického vedení s hustotou bodů až okolo 30 bodů/m<sup>2</sup>. Taková hustota bodů dává obrovský prostor pro možnost automatizace procesu rekonstrukce 3D scény okolí elektrického vedení, což je první z kroků k automatické kontrole jejich bezpečnosti (Pavelka, 2010).

V oblasti silničního stavitelství je laserové skenování využíváno především k pořízení podkladů pro projekci rekonstrukcí nebo nových staveb, dále pro dokumentaci povrchů vozovek, případně k monitoringu kubatur zemních prací. Data lze využít i pro pasportizaci již existujících staveb a pro potřeby dokumentace skutečného provedení stavby (Sirotek, 2015).

Obr. 3.19: Mračno bodů víceúrovňové křižovatky ve Velké Británii



Zdroj: LIDAR pictures of the day; < <http://bloglidar.com/>>

Pokud se celý projekt vede ve 3D, je možné tato data přímo využít pro automatické řízení zemních strojů s pomocí GPS a umožnit tak v podstatě non-stop stavební práce. Ve 3D je mnohem snadnější provádět kontrolu postupu výstavby, lze zefektivnit logistiku zemních prací a provádět kontrolu jejich kubatur. Pomocí 3D laserového skenování je možné provádět kontrolu přesnosti provedení stavby a kvality finálních povrchů vozovek. Díky těmto informacím o průběhu stavby, může investor ušetřit vynaložené finanční prostředky a eliminovat nákladné práce navíc (Sirotek, 2015).

### **3.13.5 Hodnocení objemu zástavby**

Rozložení zástavby a tvar uličních kaňonů hraje důležitou roli při proudění vzduchu ve městech. Objem je charakteristikou, jež částečně tento problém popisuje. Výpočet se provádí jako součin plochy střechy a výšky budovy (Hernández L. A., Hernández S., 1997).

Díky zjištění objemu budov je možné provádět také další analýzy, jako například analýzy zastavěnosti nebo různá srovnání ploch ve městech.

### **3.13.6 Posuzování vlivu nově navrhovaných staveb na panorama města**

Digitální model terénu je v oblasti územního plánování využíván především pro zákresy nově navrhovaných staveb a posuzování jejich vlivu na panorama města, například pohledů z a do památkové rezervace.

Mimo terénní útvary a stavební dominanty mají zásadní vliv na panorama města také plochy zástavby vytvářející podnož kompozici významných stavebních

dominant. Charakter a forma zástavby může být různorodá. Pro vnímání panoramatu je však nejdůležitější poměr výškové hladiny zástavby a výšek dominant v území. Kromě vnímané výškové hladiny je důležitá také míra vyrovnanosti výšek zástavby. Na vnější projev pak mají vliv také formy parcelace a s tím související způsob a míra zástavby pozemků či bloků. Jednotlivá dílčí území s různými formami zástavby vytvářejí do určité míry autonomní strukturální, panoramatické celky, které je možné vzájemně odlišit. V panoramatu jednak podle výšky, ale také podle morfologie střech (různé typy a způsob orientace sedlových, šikmých či plochých střech) a podle použitých materiálů a barevnosti střešní krytiny (IPRPRAHA, 2015).

### **3.13.7 Analýza viditelnosti**

Výpočet viditelnosti patří mezi jednu z nejzákladnějších GIS analýz, probíhajících nad digitálním modelem terénu. V historii bylo těchto analýz využíváno především k vojenským účelům. S rozšířením GIS do soukromé sféry se objevila široká škála využití v mnoha oborech lidské činnosti (Popelka, 2010).

Analýzy viditelnosti (z linie, z bodu) umí odpovědět například na následující otázky: jak často je vidět dané místo z linie (dálnice - vyhledání nejvhodnější lokality pro reklamu), které oblasti je možné a nemožné vidět z daného bodu (rozhledny na tomto kopci), kolik musím minimálně postavit rozhleden a kde, aby bylo viditelné celé zájmové území. Po modifikaci je možné analýzy viditelnosti převést na obecné analýzy šíření signálu, což může sloužit například ke studii nalezení vhodné lokality pro komunikační buňku pro signál mobilních telefonů.

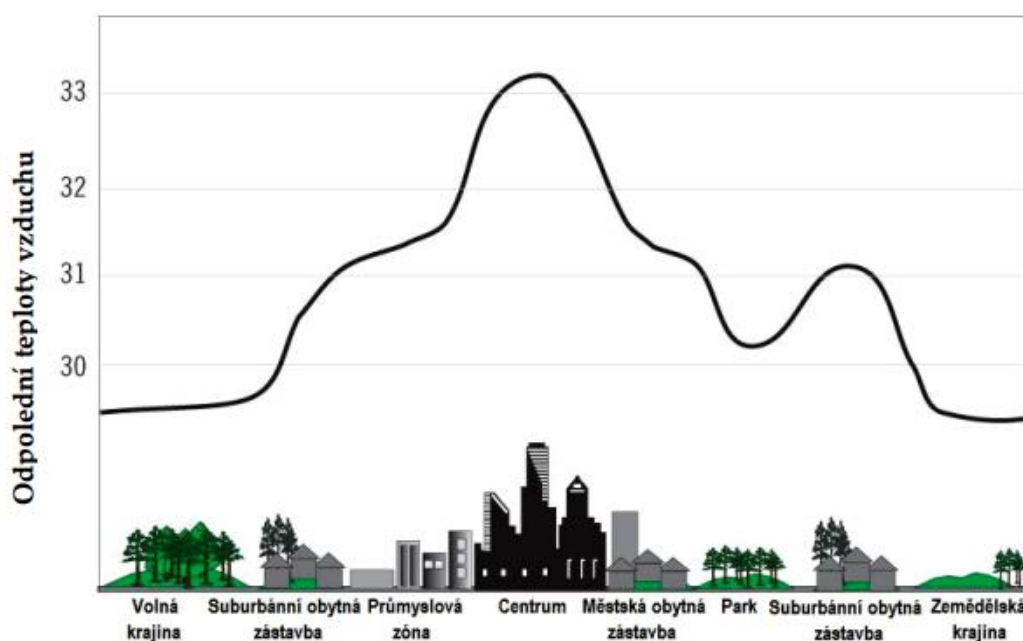
### **3.13.8 Analýza zastínění**

Kromě posouzení střešních rovin z hlediska sklonitosti a expozice, je každá potenciální střešní rovina zasazena zpět do 3D mračna bodů, v němž jsou hledány blízké objekty, které by na ni mohly vrhat stín - vegetace, střechy, komíny atd. Výsledkem analýzy slunečního potenciálu je roční suma přijatého a rozptýleného slunečního záření pro každou střešní rovinu a detailní analýza rozložení záření v rámci jedné střechy. Díky použití dat z blízké meteorologické stanice je v získaných výsledcích zahrnuta i oblačnost – pomocí indexu dní s jasnou oblohou (Pavelka, 2010).

### 3.13.8 Městský tepelný ostrov (Urban Heat Island)

Urbánní klima lze hodnotit pomocí 3D analýz v programu ArcGis. Hlavním projevem městského tepelného ostrova je výskyt výrazně vyšších teplot v intravilánu, tedy směrem ke středu zástavby, v porovnání s okolní venkovskou krajinou. Tento jev se nejvíce projevuje v nočních hodinách, kdy teplotní rozdíl v přízemní vrstvě atmosféry může v nejméně přírodních případech dosáhnout až 3 - 10°C. To má přímý vliv nejen na lidské zdraví, ale důsledky to nese i pro ekonomiku (Oke, T. 1997). Mezi faktory nejvíce ovlivňující vznik a vývoj tepelného ostrova města patří podíl zastavěných a vodních ploch, tzv. sky view factor, výška budov a vzdálenost od centra (Botlyán et al., 2005).

Obr. 3.20: Modelový příklad rozdílu teplot mezi městskou a příměstskou krajinou



Zdroj: The Urban Heat Island (UHI) Effect; <<http://www.urbanheatlands.com/>> (upraveno)



## 4. Charakteristika studijního území

Jak uvádí Pavelka (2010) je trend využití 3D skenerů znatelný i v České republice. V roce 2003 byly v ČR 3 pozemní skenery, v roce 2005 jich bylo již 7 a v roce 2010 jejich počet překročil dvacítku. V současné době je jich již několikanásobně více, včetně několika leteckých laserových skenerů. Laserové skenery jsou již dostupné běžným uživatelům. V kapitole dostupné laserové skenery jsou uvedeny příklady skenerů, které se využívají na území ČR, např. letecký LIDAR LiteMapper 6800 byl využit při tvorbě nového výškopisu ČR.

V České republice jsou data z laserového skenování využívána pro tvorbu nového výškopisu ČR. Tento projekt zastřešuje český úřad zeměměřičský a katastrální ve spolupráci s ministerstvem zemědělství ČR a ministerstvem obrany ČR. Jsou vytvořeny tři základní produkty: digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G), digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G) a digitální model povrchu 1. generace (DMP 1G). DMR 4G je od ledna 2014 poskytován v plném územním rozsahu ČR. DMR 5G existuje v současné době v území o rozloze 36 923 km<sup>2</sup> a digitální model povrchu 1. generace DMP 1G v území o rozloze 36 340km<sup>2</sup> (Dušánek, 2014).

Jedním ze známých projektů laserového skenování na území ČR je Laserové skenování pro tvorbu 3D modelu vybrané části NP České Švýcarsko. Cílem tohoto projektu bylo vytvořit kvalitní a zároveň efektivní postup DMT, který by bral ohled na různé geomorfologické typy krajiny. Dalším projektem je například laserové skenování historického centra Českého Krumlova a hradu Karlštejn pro potřeby Národního muzea v Praze. Výsledný 3D model byl zhotoven tiskárnou pro 3D tisk (G4D, 2015).

Institut plánování a rozvoje hlavního města Prahy bude mít od roku 2015 k dispozici kvalitní 3D model města z dat laserového skenování.

## 5. Diskuze

V práci byly shrnuty dosavadní teoretické poznatky o laserovém skenování. LIDAR je velmi rychle se vyvíjející technologií. Rozvoj 3D laserového skenování dokumentuje neoficiální počet referátů z oblasti 3D skenování na světových akcích ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, <http://www.isprs.org/>) a CIPA (International Committee for Documentation of Cultural Heritage, <http://cipa.icomos.org/>). V roce 1996 se konal 18. kongres ISPRS ve Vídni, byly zde prezentovány 2 příspěvky, a to pouze o leteckých laserových metodách. V roce 2000 bylo prezentováno již 11 příspěvků a v roce 2004 to bylo již 22 přímých referátů a celkem cca 70x citováno „laser scanning“ jako klíčové slovo. V roce 2007 na 21. symposiu CIPA se prakticky polovina referátů zabývala 3D skenováním (Pavelka, 2010).

Laserové skenování má jako každé jiné měření řadu výhod, ale i nevýhod. Jako výhoda může být uvedena například nezávislost na klimatických podmínkách, velká přesnost měření nebo rychlost sběru dat a rychlost tvorby výsledných produktů. Nevýhodou jsou velké náklady na pořízení laserových skenerů.

Část práce byla věnována využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování. Přestože se tato technologie jeví jako velmi vhodná díky získávání velmi přesných 3D modelů měst, bylo zjištěno, že neexistuje ucelený literární přehled o využití technologie laserového skenování pro urbanismus a územní plánování. Tyto 3D modely měst se dají využít k velkému množství analýz a stále vznikají nové. Nejnovější technologií 3D modelování města a velkou budoucností je tvorba městského virtuálního prostředí (Tomášek, 2011), při využití interaktivního virtuálního prostředí bude možno například plánovat města, když se budete nacházet přímo v daném prostředí. Bude možné pohybovat například s domy, nábytkem, nebo se zelení a zkoumat různé možnosti jejich umístění.

Při propojení územního plánování a urbanismu s jinými obory, které využívají laserové skenování, může vzniknout řada dalších analýz. Například při spojení s ekologií či lesnictvím, mohou vzniknout různé analýzy zeleně (Balabánová, Kyselka, 2013). Spojení s archeologií může být výhodné při různých druzích historických analýz, kupříkladu při plánování nové zástavby je dobré vědět, že v dané lokalitě se zástavba již nacházela, a to je možné pomocí LIDAR technologie zjistit.

Literatury na zvolené téma, tedy využití laserových skenerů pro urbanismus a územní plánování, je velmi málo psané v českém jazyce. O tématu využití LIDAR

píše např. Pavelka (2010). Tomášek (2011) píše o využití 3D modelu pro urbanismus. O laserovém skenování byla v českém jazyce napsána pouze publikace Lidary a letecké laserové skenování (Dolanský, 2004) a několik odborných článků. V zahraniční literatuře to není o mnoho lepší, knihu o laserovém skenování a jeho využití v environmentálních vědách napsali Wehr a Lohr (1999), dále Maas a Vosselman (2010) napsali knihu o leteckém a pozemním skenování, další dvě knihy o laserovém skenování napsali Shan a Toth (2008) a Marshall a Stutz (2011), jiné relevantní a na území ČR dostupné výsledky nebyly nalezeny. Je mnoho odborných článků o laserovém skenování, ale o jeho využití pro urbanismus jich není mnoho. Do světových databází odborných článků bylo zadáváno: urbanism and laser scanning, urban planning and lidar, use lidar for urban planning, atd. Byly nalezeny články, zabývající se převážně tvorbou 3D modelu zástavby (Haala, Brennen, 1999; Schwalbe et al., 2005; Rottensteiner, Briese, 2002; Haala et al., 1998; Maas, Vosselman, 1999), popř. přímo obecným využitím pro urbanismus (Nichol et al., 2007), nebo využitím 3D modelu měst pro územní plánování (Hernández, Hernández, 1997).

Zpracovaná rešerše bude využita pro následnou diplomovou práci, kde bude využito LIDAR dat Institutu plánování a rozvoje hlavního města Prahy. Jako nejvhodnější program pro zpracování analýz se jeví program ArcGis. Pomocí prostorových analýz budou vypočítány základní hodnoty, sloužící k dalšímu rozhodování v území. Na této práci budu úzce spolupracovat s hlavním městem Praha.

## 6. Závěr

Laserové skenování je novou a velmi rychle se rozvíjející metodou dálkového průzkumu Země. Využívá se ve velkém množství oborů lidské činnosti. Během posledních let se tato metoda stala jednou z hlavních metod získávání prostorových geodetických dat. V práci byly uvedeny obecné informace o laserovém skenování a zpracování výstupních LIDAR dat. Byly zde uvedeny konkrétní příklady používaného hardwaru a softwaru, který se používá v České republice. Nejčastějším výstupem laserového skenování je digitální model terénu. V práci bylo uvedeno, v jakých formách se zatím vyskytuje tento model na území ČR.

Tato práce poskytla základní přehled o tom, jak se využívá laserové skenování pro urbanismus a územní plánování, a kde se laserové skenování využívá pro tvorbu 3D modelů. Tyto modely se poté využívají k velmi přesným vizualizacím a mnoha analýzám. Mezi tyto analýzy patří například analýza viditelnosti, posuzování vlivu nově navrhované zástavby nebo analýza zastínění. Pomocí leteckého laserového skenování se také může provádět návrh liniové infrastruktury, což díky rychlosti měření ušetří projektantům mnoho času a práce. Tvorba městského virtuálního prostředí je pak novou metodou, která má velký potenciál stát se velmi užitečnou součástí plánování a projektování městského i venkovského prostředí. V práci je také uvedeno využití v ostatních oborech, se kterými se v mnoha případech analýzy v územním plánování a urbanismu prolínají. Přínosem této práce je shrnutí poznatků o využití laserového skenování pro urbanismus a územní plánování.

## Přehled literatury a použitých zdrojů

- AKAY A.E., SESSIONS J., 2005: *Applying the decision support system, TRACER, to forest road design*. *Western Journal of Applied Forestry*, 20 (3): 184–191.
- ARCDATA PRAHA, 2015: *ArcGIS for Desktop*. ARCDATA PRAHA s.r.o., Praha, online: <http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/software/arcgis/arcgis-for-desktop/>, cit.: 30. 3. 2015.
- AUTODESK, 2015: *AUTODESK PRODUCTS*. online: <http://www.autodesk.com/>, cit.: 20. 2. 2015.
- BALABÁNOVÁ P, KYSELKA I., 2006: *Principy a pravidla územního plánování Kapitola C – Funkční složky C.5 Zeleň*. online: <http://www.uur.cz/images/5-publikacni-cinnost-a-knihovna/internetove-prezentace/principy-a-pravidla-uzemniho-planovani/kapitolaC/C5-2013.pdf>, cit. 20. 3. 2015.
- BALSAVIAS E. P., 1999: *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2):199-214.
- BECKER S., HAALA N., 2009: *Grammar supported facade reconstruction from mobile lidar mapping*. *ISPRS Workshop, CMRT09-City Models, Roads and Traffic*. vol. 38: 229-234.
- BOTTYÁN, Z., KIRCSI, A., SZEGEDI, S., UNGER, J., 2005: *The Relationship Between Built-Up Areas and the Spatial Development of the Mean Maximum Urban Heat Island in Debrecen, Hungary*. *International Journal of Climatology*, 25: 405 – 418.
- BRADBURY R. B., HILL R. A., MASON D. C., HINSLEY S. A., WILSON J. D., BALZTER H., BELLAMY P. E., 2005: *Modelling relationships between birds and vegetation structure using airborne LiDAR data: a review with case studies from agricultural and woodland environments*. *Ibis*, 147(3): 443-452.
- BRÁZDIL K., 2010: *Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky*. Zeměměřičský úřad, Sborník – Sympozium GIS Ostrava, (nestránkováno), online: [http://gis.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2010/sbornik/Lists/Papers/CZ\\_5\\_2.pdf](http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2010/sbornik/Lists/Papers/CZ_5_2.pdf).
- BREJCHA M., 2014: *Produkty laserového skenování jako zdroj dat pro tvorbu digitálních modelů terénu*. datasystem s.r.o., online: <http://www.datasystem.cz/produkty-laseroveho-skenovani-jako-zdroj-dat-s-131-m-8.html>, cit.: 10. 12. 2014.

- BWPS, 2015: *naskenovaná 3D data na internetu - Scene WebShare*. BW precision systems s.r.o., online: <http://www.bwps.eu/content/naskenovana-3d-data-na-internetu-scene-webshare>, cit.: 10. 3. 2015.
- CAD, 2015: *Faro přichází se Scene v5.3 a Scene WebShare Cloud v1.5*. CAD.cz, online: <http://www.cad.cz/component/content/article/5237.html>, 11. 2. 2015.
- CANEPARO L., 2001: *Shared virtual reality for design and management: the Porta Susa project*. Automation in Construction, 10(2): 217-228.
- DOLANSKÝ, T., 2004: *Lidary a letecké laserové skenování*. Acta Universitatis Purkynianae, 99, Studia geoinformatica. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 100 s. ISBN 80-7044-575-0.
- DUŠÁNEK P., 2014: *Nové výškopisné mapování České republiky*. Zeměměřický úřad, Sborník – Sympozium GIS Ostrava, (nestránkováno), online: [http://gis.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf](http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/sbornik/papers/gis2014526faa8a434ef.pdf).
- FAN H., YAO W., FU Q. (2014). *Segmentation of Sloped Roofs from Airborne LiDAR Point Clouds Using Ridge-Based Hierarchical Decomposition*. Remote Sensing, 6(4): 3284-3301.
- FILIN S., 2004: *Surface classification from airborne laser scanning data*. Computers & Geosciences, 30: 1033-1041.
- FLOOD M., 2001: *LiDAR activities and research priorities in the commercial sector*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 34: 3-8.
- G4D, 2015: *Digitální 3D model Českého Krumlova*. Online: <http://www.g4d.cz/reference>, cit.: 25. 3. 2015.
- GEFOS, 2015: *ScanStation P20*. GEFOS a.s., Praha, online: <http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produkty/202/scanstation-p20>, cit. 12. 2. 2015.
- GEOVAP, 2015: *Aplikace laserového skenování*. GEOVAP spol. s.r.o., Pardubice, online: <http://www.quantum3d.cz/website/mainmenu/aplikace-laseroveho-mapovani/>, cit. 10. 2. 2015.
- GOJDA M., JOHN J., STARKOVÁ L., 2011: *Archeologický průzkum krajiny pomocí leteckého laserového skenování Dosavadní průběh a výsledky prvního českého projektu*. Archeologické rozhledy, 63(4): 680-698.

- GREWAL M. S., WEILL L. R., ANDREWS A. P., 2007: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley & Sons, New Jersey, 416 s.
- HAALA N., BRENNER C., 1999: *Extraction of buildings and trees in urban environments*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2): 130-137.
- HABIB A., BANG K. I., KERSTING A. P., LEE D. CH., 2008: *Error budget of lidar systems and quality control of the derived point cloud*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences. Vol. 37: 203-209.
- HABIB A., EL-SHEIMY N., VALEO C., 2005: *Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications*. MA: Artech House, Boston, 257 s.
- HEINZEL J., KOCH B., 2011: *Exploring full-waveform ALS parameters for tree species classification*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13 (1): 152–160.
- HERITAGE G. L., LARGE A. R. G., 2009: *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Blackwell Publishers, Oxford, 288 s.
- HERNÁNDEZ L. A., HERNÁNDEZ S., 1997: *Application of digital 3D models on urban planning and highway design*. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de La Coruña, Campus de Elviña, La Coruña, Spain, online: <http://videalab.udc.es/files/stuff/pdf/ing1997.pdf>, cit.: 25. 1. 2015.
- HUG, C., 1994: *The scanning laser altitude and reflectance sensor – an instrument for efficient 3D terrain survey*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30, 1: 100-107.
- HUML M., MICHAL J., 2005: *Mapování 10*. České vysoké učení technické, Praha, 319 s.
- IGI, 2015: *LiteMapper 6800*. IGI mbH, Kreuztal, Germany, online: <http://www.igi.eu/lm-6800.html>, cit. 20. 2. 2015
- IPRPRAHA, 2012: *Územně analytické podklady hl. m. Prahy 2012*. Institut plánování a rozvoje hlavního města Prahy, online: [http://www.iprpraha.cz/uploads/assets/soubory/data/UAP/UAP2012/2\\_4\\_pamatkova\\_ochrana\\_mesta\\_a\\_kulturni\\_hodnoty.pdf](http://www.iprpraha.cz/uploads/assets/soubory/data/UAP/UAP2012/2_4_pamatkova_ochrana_mesta_a_kulturni_hodnoty.pdf), cit.: 2. 2. 2015.
- KADLČÍKOVÁ J., 2007: *Testování a výběr interpolačních metod DMR v závislosti na typu georeliéfu*. Geomorphologia Slovaca et Bohemia. 7.2: 14-18.

- KILIAN J., HAALA N., ENGLISH M., 1996: *Capture and evaluation of airborne laser scanner data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 31: 383-388.
- KOLÁČKOVÁ K., 2010: *Mračna bodů, jejich správa a vizualizace*. Sitewell, online: <http://www.sitewell.cz/aktuality/2010/07/26/mracna-bodu-jejich-sprava-a-vizualizace/>, cit.: 20. 2. 2015.
- KRAUS K., PFEIFER N., 1998: *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing, 53: 193-203.
- LEFSKY M. A., HARDING D., COHEN W. B., PARKER G., SHUGART H. H., 1999: *Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland*. USA, Remote Sensing of Environment, 67(1): 83-98.
- LEICA, 2015: *Leica Cyclone: 3D Point Cloud Processing Software*. Leica Geosystems AG, St. Gallen, online: [http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-Cyclone\\_6515.htm](http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-Cyclone_6515.htm), cit. 2. 3. 2015.
- LITHOPOULOS E., REID B., SCHERZINGER B., 1996: *The position and orientation system (POS) for survey applications*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, 31/B3: 467-471.
- MAAS H. G., VOSELMAN G., 1999: *Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data*. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 54(2): 153-163.
- MARSHALL G. F.; STUTZ G. E. (ed.), 2011: *Handbook of optical and laser scanning*. CRC Press, 788 s.
- MAY N. C., TOTH CH. K., 2007: *Point positioning accuracy of airborne LiDAR systems: A rigorous analysis*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. vol. 36: 107-112.
- MIKITA M., CIBULKA T., KLIMÁNEK M., 2013: *Hodnocení metod interpolace dat leteckého laserového skenování pro detekci stromů a měření jejich výšek*. Zprávy lesnického výzkumu, 58.2: 99-106.
- MORIN K. W., 2002: *Calibration of airborne laser scanners*. UCGE Reports, University of Calgary, 125 s.
- MORIN K., EL-SHEIMY N., 2002: *Post-mission adjustment methods of airborne laser scanning data*. FIG XXII International Congress, Washington, DC USA.



- NICHOL J., KING B., QUATTROCHI D., DOWMAN I., EHLERS M., DING X., 2007: *Earth Observation for Urban Planning and Management*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 973 – 979.
- OKE, T., R., 1997: *Urban Climates and Global Environmental Change*. In Applied Climatology (eds: Thompson, R. D. and Perry, A.). Routledge, London - New York, s. 273 – 287.
- OPTECH, 2012: Lidar Bathymetry.-CZMIL system. Optech Inc., online: <http://www.optech.com/>, cit. 17. 12. 2014.
- ORŠULÁK T., PACINA J., 2012: *Geoinformatika*. Centrum digitálních služeb MINO, Ústí nad Labem, 60 s.
- PAVELKA K., 2010: *Výroční zpráva projektu č. CG 912-105-520, Možnosti monitorování stavu a změn v okolí hlavních komunikací metodami dálkového průzkumu Země a laserového skenování a jejich využití pro realizaci udržitelného rozvoje dopravy*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 113 s.
- PIKHARTOVÁ L., 2009: *Využití mobilního prostředku laserového skenování v projektu dokumentace dálnice D11*. Fsv ČVUT, Praha, online: <http://fgm.fsv.cvut.cz/mdcr/publikace/2009/10.pdf>, cit. 25. 1. 2015.
- POPELKA S., 2010: *Analýzy viditelnosti a jejich vizualizace*. Katedra Geoinformatiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, online: [http://gis.vsb.cz/GISacek/GISacek\\_2010/sborniky/ing/Popelka.pdf](http://gis.vsb.cz/GISacek/GISacek_2010/sborniky/ing/Popelka.pdf), cit.: 25. 2. 2015.
- ROTH R., 2011: *Leica ALS70– Point Density Multiplication for High Density Surface Acquisition*. MA USA, Westford, online: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/240Roth.pdf>, cit. 20. 1. 2015.
- ROTTENSTEINER F., BRIESE C., 2002: *A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data*. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/A): 295-301.
- SHAN J., TOTH C. K. (Eds.), 2008: *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC Press. 616 s.
- SCHWALBE E., MAAS H. G., SEIDEL F., 2005: *3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections*. Proceedings of ISPRS WG III/3, III/4, 3: 12-14.
- SIROTEK J., 2003: *Využití laserscanningu při dokumentaci těžební činnosti a určování kubatur*. Brno, Těžební unie, 4/2003: 22.

- SIROTEK J., 2015: *3D laserové skenování, silniční stavitelství, aplikace*. BLOM imaging the world, online: <http://www.blomasa.com/ftp/Blom%20Czech%20Republic/3D%20Laserove%20skenovani%20v%20silnicnim%20stavitelstvi.pdf>, cit.: 20. 2. 2015.
- SITHOLE G., VOSELMAN G., 2004: *Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 59: 85-101.
- SUKUP K., 2010: *Možnosti využití nových technologií pro pořizování prostorových informací o území*. GEODIS NEWS, Podnikový časopis společnosti GEODIS Brno s.r.o., roč. 9, 1: 20–21.
- SUKUP K., KOTOLAN J., 2002: *Digitální model CyberCity*. Computer Design, 3/2002: 42-44.
- ŠANTORA D., 2002: *3-D laserový skener firmy Cyra Technologies, Inc.* Zeměměřič, 3/2002, online: <http://www.zememeric.cz/02-03/skener.html>, cit.: 2. 2. 2015.
- ŠÍMA J., 2011: *Nové zdroje geoprostorových dat pokrývajících celé území státu od roku 2010 – První výsledky výzkumu jejich kvalitativních parametrů*. Zeměměřičský úřad, Sborník – Sympozium GIS Ostrava 2011, Ostrava, (nestránkováno), online: [http://gis.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2011/sbornik/papers/Sima.pdf](http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2011/sbornik/papers/Sima.pdf).
- TOMÁŠEK P., 2011: *Úvod do 3D modelování v oblasti urbanismu*. Urbanismus a územní rozvoj, 6/2011: 16-20.
- UHLÍŘOVÁ K., ZBOŘIL A., 2009: *Možnosti využití Laserového snímání povrchu pro vodohospodářské účely*. Vod. Hospodář, 59(12): 11-15.
- VOSELMAN G., 2000: *Slope based filtering of laser altimetry data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33: 935-942.
- WEHR A., 2009: *LiDAR systems and calibration*. Topographic Laser Ranging and Scanning Principles and Processing, 4.: 129-172.
- WEHR A., LOHR U., 1999: *Airborne laser scanning - an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 54.2: 68-82.
- ZÁVRSKÝ M., 2012: *Laserové skenování*. Ledec nad Sázavou: Geodézie Ledec nad Sázavou, online: <http://www.geodezieledec.cz/laserove-skenovani/>. cit. 21. 2. 2015

- ŽÁRA J., BENEŠ B., SOCHOR J., FELKEL P., 2005: *Moderní počítačová grafika*. Computer press, Praha, 609

## Seznam obrázků

3.1	Skener umístěný na automobilu	13
3.2	Letadlo, na jehož palubě je umístěn laserový skener	14
3.3	Druhy stop pro různé konstrukce skeneru	15
3.4	Konstrukce skeneru se svazkem optických vláken	16
3.5	Mračno bodů centra města Brémy v Německu	19
3.6	Rozlišení digitálních modelů	20
3.7	Vývoj zlepšení chyb laserových skenerů	22
3.8	Posun sousedních řad špatnou kalibrací	25
3.9	Hlavní činnosti s DMT	28
3.10	Digitální model reliéfu 4. generace	30
3.11	Digitální model reliéfu 5. generace	31
3.12	Digitální model povrchu 1. generace	32
3.13	Statický pozemní skener společnosti Leica	33
3.14	Prostředí Scene WebShare v internetovém prohlížeči	36
3.15	3D model hlavního města Prahy	42
3.16	Ukázka dat získaných leteckým skenováním - mračna bodů střech vizualizovaná dle výšky	43
3.17	Osazení modelu budovy do terénu	44
3.18	Ukázka dat vzniklých laserovým skenováním vedení vysokého napětí	45
3.19	Mračno bodů víceúrovňové křižovatky ve Velké Británii	46
3.20	Modelový příklad rozdílu teplot mezi městskou a příměstskou krajinou	48