



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEODÉZIE**

INSTITUTE OF GEODESY

**ZPŘESNĚNÍ DIGITÁLNÍHO MODELU METODAMI  
LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ**

IMPROVEMENT OF DIGITAL MODEL BY LASER SCANNING METHODS

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MGR. NATALIYA TYAGUR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**DOC. ING. VLASTIMIL HANZL, CSC.**

**BRNO 2019**

## ABSTRAKT

Disertační práce pojednává o mobilním laserovém skenování a zpracování dat. Mobilní laserové skenování bylo realizováno v Moravském krasu v Suchém a Pustém žlebu v různém ročním období. Další skenování bylo provedeno ve Školním lesním podniku Masarykův les Křtiny. Pro sběr 3D dat byl použit Riegl VMX-450 skener. Datové soubory byly zpracovány v softwaru OPALS. Pro extrakci terénních a ne terénních bodů z laserového mračna byla použita kombinace hierarchické interpolace a robustního filtrování. Následně terénní body se použily pro modelování digitálních modelů terénů s mřížemi 0.05 x 0.05 m, 0.25 x 0.25 m, 1 x 1 m. Dále digitální modely z Moravského Krasu byly porovnány s Digitálním modelem reliéfu České republiky 4G a referenčními body. Digitální modely z Masarykova lesa Křtiny se porovnaly s fotogrammetrickými a pozemními daty. Výšková přesnost odvozených DMT je kolem 0.10 m. Vysoká kvalita odvozeného DMT může být použita pro monitorování a analýzu terénních změn a morfologických struktur.

**Klíčová slova:** laserové skenování, digitální model terénu, mračno bodů, robustní filtrování.

## ABSTRACT

The doctoral thesis deals with mobile laser scanning and data processing. Mobile laser scanning was carried out in the Moravian Karst in Suchy zleb and Pusty zleb at various seasons. Further scanning was carried out at the Training Forest Enterprise Masaryk Forest Křtiny. The Riegl VMX-450 scanner was used to collect 3D data. The data files were processed in the OPALS software. For the extraction of ground and non-ground points from the laser cloud, a combination of hierarchical interpolation and robust filtering was used. Subsequently, the terrain points were used to model digital terrain models with grids 0.05 x 0.05 m, 0.25 x 0.25 m, 1 x 1 m. Furthermore, digital models from Moravian Karst were compared with the Digital relief model of the Czech Republic 4G and reference points. Digital models from Masaryk Forest Křtiny were compared with photogrammetric and terrestrial data. The high accuracy of the derived DTMs is about 0.10 m. The high quality of the derived DTM can be used to monitor and analyze field changes and morphological structures.

**Keywords:** laser scanning, digital terrain model, point cloud, robust filtering

**Bibliografická citace VŠKP:**

TYAGUR, Nataliya. Zpřesnění digitálního modelu metodami laserového skenování: disertační práce. Brno, 2019. 89 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav geodézie. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala mému školiteli Vlastimilu Hanzlovi za pomoc a podporu během studia na VUT Brno, zejména za dohled, rady a připomínky při vypracování disertační práce.

Ráda bych poděkovala Norbertu Pfeiferovi, celé fotogrammetrické skupině TU Wien a týmu OPALS za příležitost realizovat svůj projekt a za jejich pomoc a rady během období praktické stáži ve Vídni.

Chtěla bych poděkovat Tomáši Mikitovi za možnost měření ve Školním lesním podniku Masarykův les Křtiny.

Nakonec bych ráda poděkovala své rodině za podporu během studia.

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>Kapitola 1. Bezkontaktní metody sběru prostorových dat .....</b>	<b>10</b>
1.1. Historické poznámky .....	11
1.2. Fotogrammetrie .....	12
1.3. Lidar .....	15
1.3.1. Letecké laserové skenery .....	16
1.3.2. Pozemní laserové skenery .....	19
1.3.3. Mobilní laserové skenery .....	20
1.3.4. Vlastnosti laserového skeneru .....	22
1.4. Digitální model terénu .....	25
1.4.1. Lidar vs. Fotogrammetrie .....	27
<b>Kapitola 2. Současný stav problematiky .....</b>	<b>29</b>
2.1. Letecké laserové skenování v České republice .....	34
2.1.1. Digitální model terénu 4. generace .....	34
2.1.2. Digitální model terénu 5. generace .....	35
<b>Kapitola 3 Materiály a metody .....</b>	<b>38</b>
3.1. Mobilní mapování .....	38
3.1.1 Scener Riegl VMX-450 .....	38
3.1.2 Software OPALS .....	41
3.1.3 Mobilní laserové skenování v Moravském Krasu a ML Křtiny .....	44
3.2. Zpracování dat .....	47
<b>Kapitola 4 Experimentální výsledky .....</b>	<b>56</b>
4.1. Moravský kras .....	56
4.1.1 Datový soubor květen .....	56
4.1.2 Datový soubor prosinec .....	65
4.2. Masarykův les Křtiny .....	70

<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>75</b>
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>77</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>87</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>89</b>

# ÚVOD

Intenzivní rozvoj vědy za posledních 100 let otevřel světu více příležitostí pro studium a monitorování životního prostředí. Jednou z rychle se rozvíjejících disciplín je dálkové snímání (ang. - remote sensing), které se dělí na dvě hlavní větve: fotogrammetrie a lidar (ang. – light detection and ranging). Pokud fotogrammetrie studuje svět pomocí snímků tak pak díky laserovým technologiím obdržíme mračno bodů v trojrozměrném souřadnicovém systému.

Technologie lidar je hojně využívána v mnoha aplikacích. Odvozené trojrozměrné údaje se pravidelně používají pro digitální modelování terénu a povrchu, což také často bývá prvním úkolem v řetězci zpracování laserových dat. Primární metodou pro sběr topografických dat a modelování výškových modelů je letecké laserové skenování. Zpracování naskenovaných dat však může být náročné v lesích, horninách, v úzkých a zakřivených údolích zejména pro letecká data. Kvůli okluzím v takovém náročném prostředí v datech často vznikají mezery nebo jejich kvalita je mnohem horší.

V této disertační práci bylo navrženo provést mobilní laserové skenování pro mapování okolí silnic Moravského Krasu a ve Školním lesním podniku Masarykův les Křtiny. Moravský kras je jedním z nejdůležitějších krasových oblastí střední Evropy s mnoha jedinečnými geologickými rysy, včetně jeskyní a roklin, terén je pokryt lesem.

Mobilní laserová data se liší od leteckých vysokou hustotou bodů a nepravidelným jejich rozložením v mračnu. I když mobilní laserové skenování se primárně používá ve městech, má potenciál být využito i v lesním prostředí, kde letecký laserový paprsek těžko může proniknout skrz hustou vegetaci.

*Cíle disertační práce:*

- provést mobilní laserové skenování v přírodním areálu;
- navrhnout metodu automatického filtrování dat s použitím robustního filtru;



- generace digitálního modelu terénu z mobilních laserových dat v lesním prostředí.

Tato disertační práce se skládá ze čtyř kapitol. V první kapitole jsou uvedené teoretické základy bezkontaktních metod sběru prostorových dat. Druhá kapitola projednává o současném stavu problematiky, o existujících filtrovacích metodách a možnostech využití laserových systémů pro různé aplikace. Kapitola třetí představuje použitý mapovací systém, popis aplikovaného softwaru a také prezentuje samu metodu pro filtraci terénních a neterénních mobilních laserových dat. Ve čtvrté kapitole jsou znázorněny experimentální výsledky a diskuze.

# Kapitola 1

## Bezkontaktní metody sběru prostorových dat

K bezkontaktním metodám sběru prostorových dat můžeme zařadit takové metody, při kterých objekty studujeme na dálku bez dotykové interakce. K nim patří zejména metody fotogrammetrie a laserového skenování. Získaným datům říkáme data dálkového průzkumu. Data dálkového průzkumu jsou součástí lidského života, aniž si to sami uvědomujeme. Pokaždé když sledujeme počasí, noviny, sledujeme pořad v planetáriu nebo používáme mapy, díváme se na zpracovaná data dálkového průzkumu [1].

Uvedme par definic dálkového průzkumu [2]:

- Termín "remote sensing-dálkové snímání" v jeho nejširším smyslu znamená jen "průzkum na dálku". (Colwell, 1966 [3])
- Dálkové snímání bylo různě definováno, avšak v podstatě je to umění nebo věda, kdy se studuje předmět, aniž byste se ho dotýkali. (Fischer et al., 1976 [4])
- Dálkové snímání je získávání fyzických dat objektu bez dotyku nebo kontaktu. (Lintz and Simonett, 1976 [5])
- Dálkovým snímáním je pozorování cíle zařízením, který je od něj odděleno. (Barrett and Curtis, 1976 [6])

Všechny definice mají mezi sebou společná slova: bez dotyku a na dálku. Jednoduše o dálkovém průzkumu můžeme říct jak o bezdotykovém studiu objektu, který nás zajímá. Pozorovat můžeme nejenom naši planetu, ale libovolný objekt vzdálený od nás.

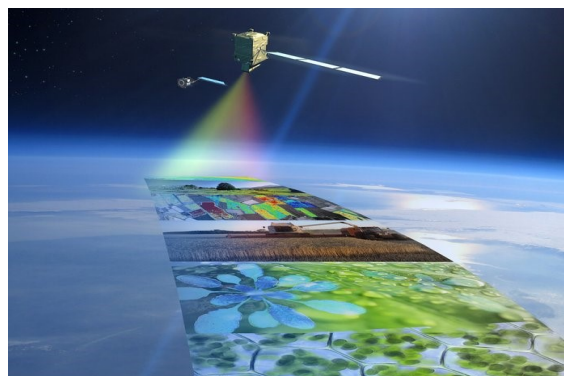
## 1.1. Historické poznámky

Historie dálkového průzkumu sahá hluboko do 19. století. Ve své knize, J.B. Campbell uvádí následující milníky v historii dálkového pozorování Země [2]:

<b>Datum</b>	<b>Milníky historie</b>
1839	<i>Začátek fotografické praxe</i>
1850-1860	<i>Fotografování z balónů</i>
1909	<i>Snímání z letadel</i>
1914-1918	<i>První světová válka: letecký průzkum</i>
1920-1930	<i>Vývoj a počáteční aplikace letecké fotografie a fotogrammetrie</i>
1939-1960	<i>Vojenský výzkum a vývoj</i>
1960-1970	<i>První použití dálkového snímání TIROS</i>
1972	<i>Spuštění Landsat 1</i>
1980-1990	<i>Landsat 4: nová generace snímačů Landsat</i>
1980	<i>Vývoj hyperspektrálních snímačů</i>
1990	<i>Globální systémy dálkového průzkumu, lidary</i>



a.



b.

**Obr. 1** Od holubů k moderním satelitům

Za počátek fotogrammetrie můžeme považovat vynález fotografie na začátku 19. století. V roce 1858 Gaspard-Felix Tournachon odfotografoval Paříž z balónu. Fotografování se provádělo nejenom z balónů, města fotografovali shora i holubi (viz. Obr.1). Pak s vývojem leteckého průmyslu počala svůj rozvoj klasická fotogrammetrie. Největším podnětem pro rozvoj fotogrammetrie se stala první světová válka. Byla to poměrně rychlá metoda shromažďování důležitých informací o nepřátelské zemi. Dlouhý čas fotogrammetrie se používala ve vojenském výzkumu. Pak její výhody začaly používat i vědci pro studium naše planety a vesmíru. V roce 1972 byla vypuštěna první umělá družice Landsat 1, a tím se zahájil první sběr dat dálkového průzkumu. Dále nastal pokrok ve zpracování digitálních snímků, vývoji hyperspektrálních snímačů a vypouštění dalších družic. Takový technologický pokrok vedl k rychlému rozkvětu dálkového průzkumu. V 90.tých letech se vyvíjí nová metoda, které říkáme lidar (letecké skenování), a přináší s sebou více kvalitních dat a přesnější průzkum 3D objektů.

## **1.2. Fotogrammetrie**

Fotogrammetrii můžeme definovat jako technologii pro odvození geometrických, radiometrických a sémantických informací o objektu trojrozměrného světa odvozené z digitálních snímků [7]. Výsledkem zpracování dat jsou tzv. primární produkty (parametry orientace snímků, prostorové souřadnice bodů, digitální model terénu, vektorové informace, ortofotosnímky) a sekundární produkty (ortofotomapy, digitální vektorové mapy, perspektivní pohledy, data pro GIS) [7]. Jednou z výhod fotogrammetrie je, že se jedná o bezkontaktní metodu měření, není nutné být v mapovaném území nebo být v kontaktu s měřeným objektem. Nevýhodou je závislost na počasí při snímkování, někdy se čeká i několik týdnů na vhodný den pro snímkování [7].

Podle polohy stanoviště, fotogrammetrii lze rozdělit na pozemní (blízkou), leteckou a bezpilotní. Podle počtu snímků fotogrammetrie je jednosnímková

(snímek se vyhodnocuje samostatně, lze získat pouze rovinné souřadnice), dvousnímková (stereofotogrammetrie, vyhodnocuje se dvojice snímků – stereopár, lze získat prostorové souřadnice), vícesnímková (metoda protínání dvou a více snímků).

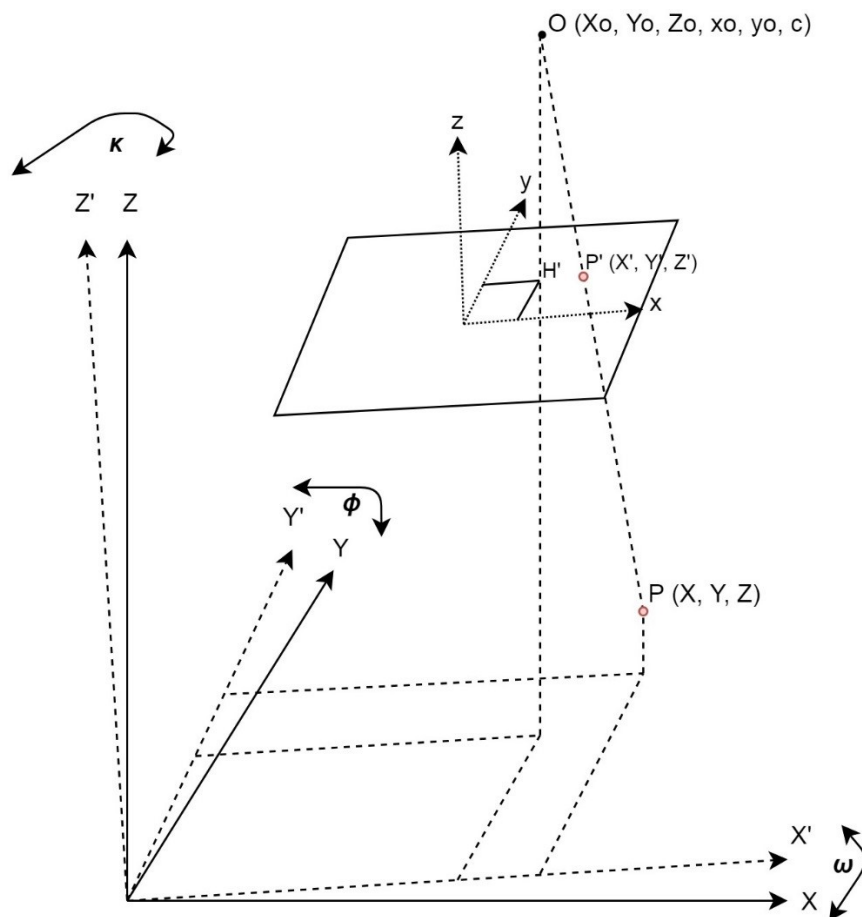
Pozemní fotogrammetrie se používá na malých územích, nejvíce ve stavebnictví a strojírenství, nebo v archeologii a geologii. K pozemní fotogrammetrii můžeme také zařadit mobilní fotogrammetrii, kde fotogrammetrická kamera je namontovaná na auto. V tomhle případě je to rychlejší způsob zmapovat větší část území, často se používá ve městech pro street mapping, nebo pro 3D modelování měst. Jelikož se často používá pro dokumentaci stavebních objektů, přesnost téhle metody dosahuje několik cm, max. vzdálenost k objektům několik desítek metrů.

V letecké fotogrammetrie kamera je umístěna do letadla nebo vrtulníku. Používá se pro mapování středních a velkých území za účelem vyhotovení map a ortofotomap. Data leteckého snímkování slouží také pro výrobu tematických map a produktů GIS. Vzdálenost k objektům může dosahovat několik kilometrů. Přesnost je nižší než u pozemní fotogrammetrii, hodně záleží na měřítku snímku a dalších faktorech.

Když se jedná o mapování malých území s vysokým rozlišením na pomoc přicházejí bezpilotní prostředky. Na rozdíl od klasické letecké fotogrammetrie, kamera se instaluje na dronech nebo malých vrtulnicích. Z důvodu kapacity baterie, doba letu je omezená, max. 60 min [8]. Metoda je vhodná pro monitoring menších přírodních objektů a tematické mapování s rozlišením až 1 cm. Lze dosáhnout polohové přesnosti až 0,01 cm, a výškové 0,035 cm [8]

Fotogrammetrické snímky můžeme považovat s určitou přesností za centrální projekci prostorových objektů (Obr.2). Vztah mezi snímkovými  $(x,y,z)$  a objektovými souřadnicemi  $(X,Y,Z)$  vyjadřuje podmínka kolinearity - bod na objektu  $P(X, Y, Z)$ , jemu odpovídající snímkový bod  $P'(X', Y', Z')$  a projekční centrum  $O$

$(X_o, Y_o, Z_o)$  leží na přímce. Systém  $(X', Y', Z')$  má osy rovnoběžné se systémem  $(x,y,z)$ .



**Obr. 2** Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi

Pro zpracování snímků je zapotřebí vědět prvky vnitřní i vnější orientace. Prvky vnitřní orientace  $x_o, y_o, c$  definují polohu projekčního centra ve snímkovém souřadnicovém systému;  $X_o, Y_o, Z_o$  a úhly  $\omega, \phi, \kappa$ , se nazývají prvky vnější orientace a definují polohu a pootočení kamery (snímkového systému) v objektovém souřadnicovém systému [9]. V současné době, prvky vnitřní orientace jsou známé z kalibračních parametrů kamery. V případě letecké nebo bezpilotní fotogrammetrie důležitým je určení prvků vnější orientace. Pro určení daných prvků se používá metoda aerotriangulace. Pomocí navazovacích bodů, se snímky spojí do jednoho bloku. Metoda je poloautomatická, software vyhledává podobné body na snímcích

automaticky. Do výpočtu vstupují prvky vnitřní orientace, přibližné hodnoty prvků vnější orientace, známé geodetické souřadnice vlíčovacích bodů a měřené snímkové souřadnice bodů vlíčovacích i určovaných [10]. V současné době se používá aerotriangulace s podporou GNSS, do výpočtu vstupují naměřené hodnoty projekčních centr jako doplňková měření. Výsledkem aerotriangulace jsou prvky vnější orientace každého snímku a geodetické souřadnice nově určených bodů X, Y, Z. Přesnost aerotriangulace závisí na měřítku snímku, přesnosti měření snímkových souřadnic, počtu navazovacích bodů, použitému matematickému modelu, geometrii bloku, počtu, poloze a přesnosti vlíčovacích bodů [7].

Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi vyjadřujeme pomocí rovnic:

$$x = x_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} \quad (1)$$

$$y = y_o - c \frac{r_{12}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)}$$

Rovnice (1) lze napsat i ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' - X'_o \\ Y' - Y'_o \\ Z' - Z'_o \end{bmatrix} = mR \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ z - z_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

kde m je měřítkový koeficient. R je matice rotace. Rotace v prostoru je definována třemi úhly rotací  $\omega$  (primární pootočení),  $\varphi$  (sekundární),  $\kappa$  (terciální) kolem tří os X, Y, Z.

### 1.3. Lidar

Na rozdíl od fotogrammetrie, která studuje svět pomocí snímků, přichází lidar (light detection and ranging) – technologie pro měření prostorové polohy objektu pomocí laserového paprsku. Výsledkem měření jsou mračna bodů (point clouds), se

souřadnicemi XYZ a dalšími atributy (echo (odraz), intenzita, čas apod.). Tato technologie je hojně využívána ve mnoha oborech, zejména pro 3D modelování prostředí, tvorbu map a digitálních modelů. Údaje získané pomocí laserového skenování se používají pro sledování a analýzu nejen terénu, ale také zdravotních stavů lidí, stavebních a přírodních objektů. Laserové skenery jsou relativně nezávislé na slunečním světle, což je značnou výhodou oproti klasické fotogrammetrii. Laserové systémy lze rozdělit na letecké, pozemní a mobilní laserové skenery.

### **1.3.1 Letecké laserové skenery**

Letecké laserové skenování se provádí z letadla, vrtulníku nebo pomocí bezpilotních prostředků. Proces skenování je založen na dvou hlavních součástech: systému laserového skenování, který měří vzdálenost od místa na zemi osvětlené laserem a kombinace GPS/IMU které měří polohu a orientaci systému [12].

Letecký laserový skener (LLS) se skládá z následujících komponentů (11):

- a) Laserová jednotka, která se skládá z laseru, přijímací a vysílací optiky, přijímače s digitalizační jednotkou pro sběr přijatých signálů, časového čítače měřícího čas mezi vyslaným a vráceným pulzem;
- b) Skener (skenovací mechanismus) – rotující zrcadlo, pomocí kterého pulz dopadá na zem;
- c) Počítačová jednotka, která pomáhá operátoru sledovat a zadávat parametry skenování;
- d) IMU/GNSS, měří pozice a orientaci LLS;
- e) Digitální kamera, která zároveň provádí snímkování (není nutná).

### **Skenovací šablona**

Důležitou vlastností každého skeneru je typ skenovací šablony (skenovací mechanismus). Skenovací šablona určuje hustotu a geometrii rozložení bodů.



Základní skenovací šablony jsou zobrazeny na Obr. 3. Vosselman a Maas ve své knize, tyto šablony popisují takto [12]:

### **Oscilační zrcadlo:**

Mnoho komerčních leteckých systémů využívá metodu oscilujícího zrcadla, ve které rotující zrcadlo směřuje laserový impuls. Body se generují v obou směrech skenování a tvoří cikcak strukturu bodů na zemi. Vzdálenost laserových bodů ve skenovacím řádku se mění, protože zrcadlo se neustále zrychluje a zpomaluje. Ve středu křivky, vzdálenost mezi body je větší; menší vzdálenosti mezi body je na konci, kde se zrcadlo otáčí zpět.

### **Rotující polygonální zrcadlo:**

V rotačních zrcadlových systémech je pro vychýlení paprsku použito rotující polygonové zrcadlo. Body jsou generovány pouze v jednom směru snímání. Skenovací řádky jsou paralelní a ve srovnání s oscilujícím zrcadlem, naměřený vzorek má rovnoměrnější rozložení bodů na zemi. Skener může být dokonce konfigurován tak, aby produkoval laserové body rovnoměrně rozmístěné ve směrech jak podél, tak napříč dráhy.

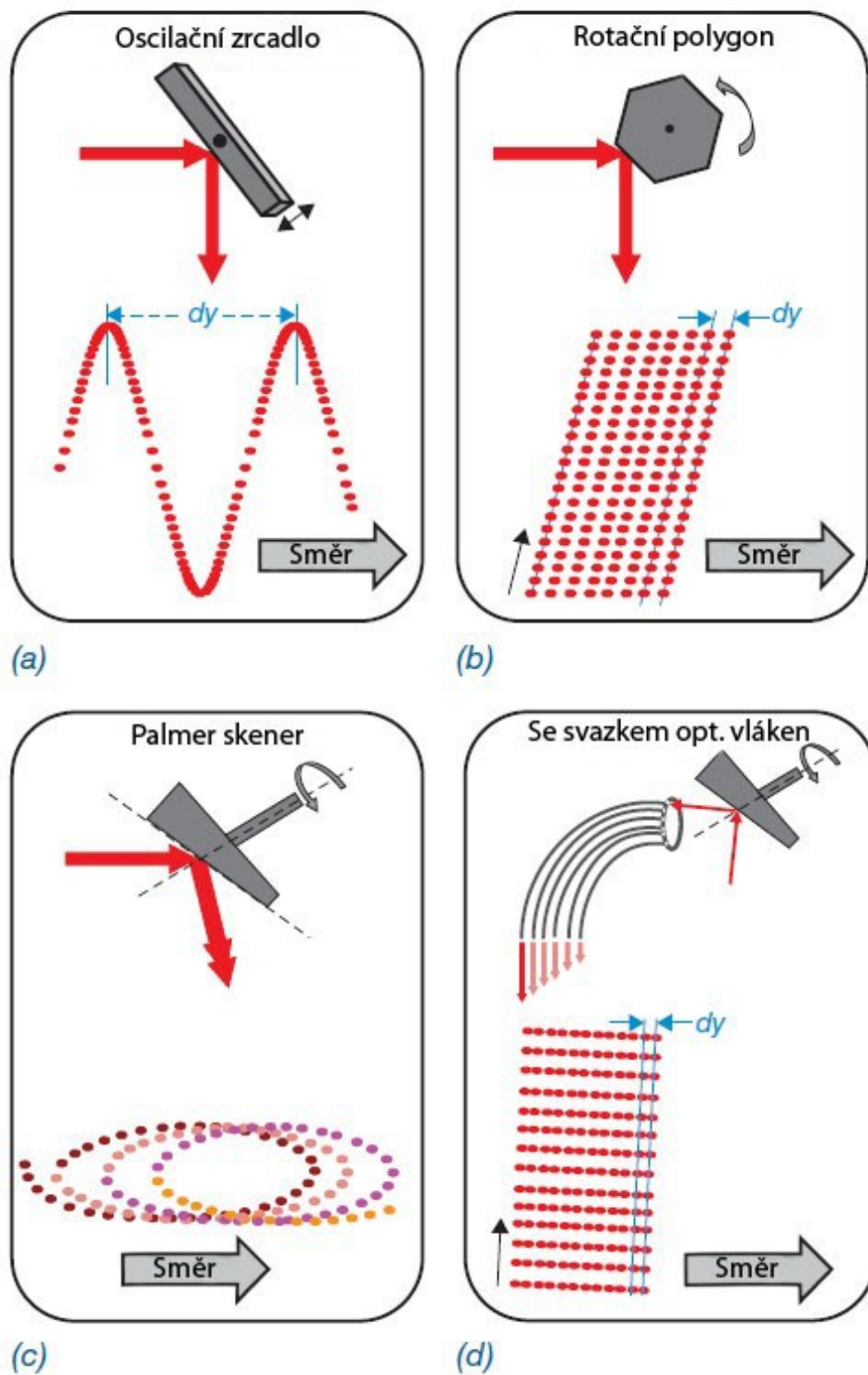
### **Palmer skener**

Zrcadlový přístroj pro směřování laserového paprsku je konstruován takovým způsobem, že zrcadlová plocha, a osa otáčení svírají úhel, který není roven  $90^\circ$ . Tyto systémy se hlavně používají v pozemních laserových skenerech. V případě vzdušných systémů je výsledný vzorek na zemi eliptický. V důsledku skenovacího mechanismu mohou být objekty dvakrát zachyceny (jednou v předním skenu a opět v zpětném skenu), čímž se snižuje výskyt zastíněných oblastí ve výškových datech z leteckého laserového skenování.

### **Svazek optických vláken**

V případě snímače se svazkem optických vláken se jednotlivé laserové impulsy následně přivádějí do sousedních optických vláken pomocí skenovacího

zrcadla. Optické vlákny jsou v lineárním uspořádání směřované dolů k zemi. Výhodou této technologie je, že skenovací mechanismus je extrémně stabilní, protože skleněná vlákna jsou při výrobě spojena.



**Obr. 3** Skenovací šablony [12]

### **1.3.2. Pozemní laserové skenery**

Pozemní laserový skener (PLS) – je systém, kde laserová jednotka je umístěna na stativ nehybně oproti povrchu Země. PLS se skládá z laserové jednotky, skenerů, GNSS a digitální kamery a také do systému je implementovaná počítačová jednotka. Před začátkem skenování se nastavují parametry přímo do skeneru – laserový svazek je naváděn podle určeného horizontálního a vertikálního úhlu a vzdálenosti na objekt. Podle skenovacího mechanismu PLS se dělí na 3 typy, viz. Obr. 4 [13]:

#### **Panoramatický skener**

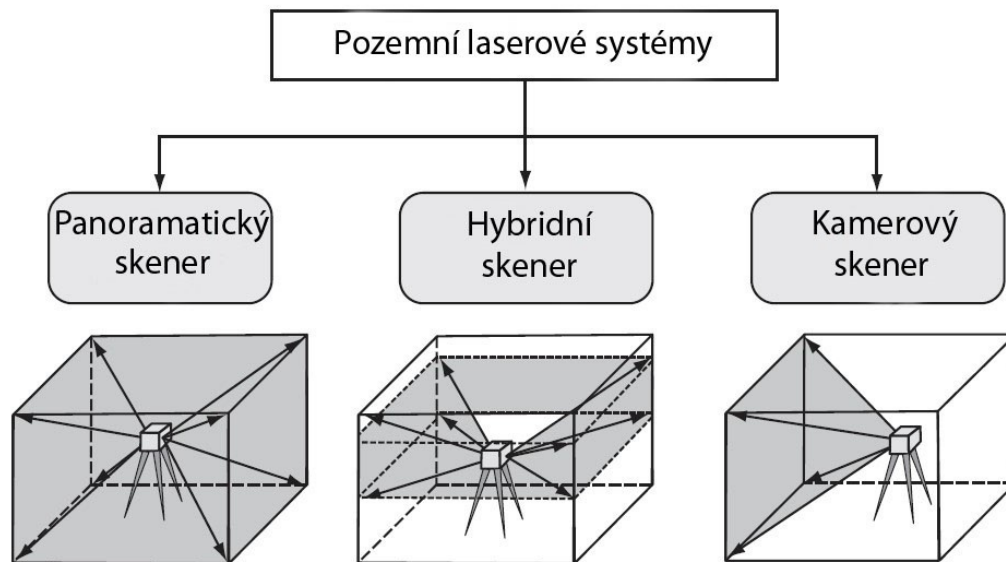
Panoramatické skenery provádí měření s plným  $360^\circ$  úhlovým pokrytím ve vodorovné rovině a obvykle minimálně  $180^\circ$  pokrytí ve svislé rovině. Jediná velká mezera, která nebude pokryta na skenu, je pod stativem. Takový typ skeneru nachází uplatnění všude od topografického mapování po inženýrské aplikace.

#### **Hybridní skener**

V hybridních skenerech vodorovný uhel otáčení není omezen, avšak vertikální uhlový pohyb je omezen na  $50^\circ - 60^\circ$ . Používá se pro topografické účely, kde není požadavek pro měření objektů nad hlavou.

#### **Kamerový skener**

Tyto skenery jsou mnohem omezenější v uhlovém rozsahu, typicky je to  $40^\circ \times 40^\circ$ . Kvůli tomu, nejsou moc populární.



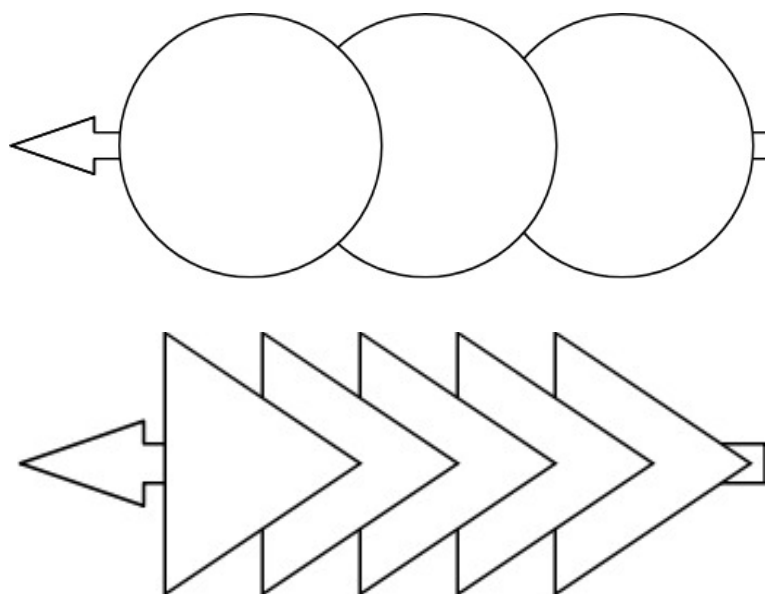
**Obr. 4** Typy pozemních laserových systémů [13]

### 1.3.3. Mobilní laserové skenery

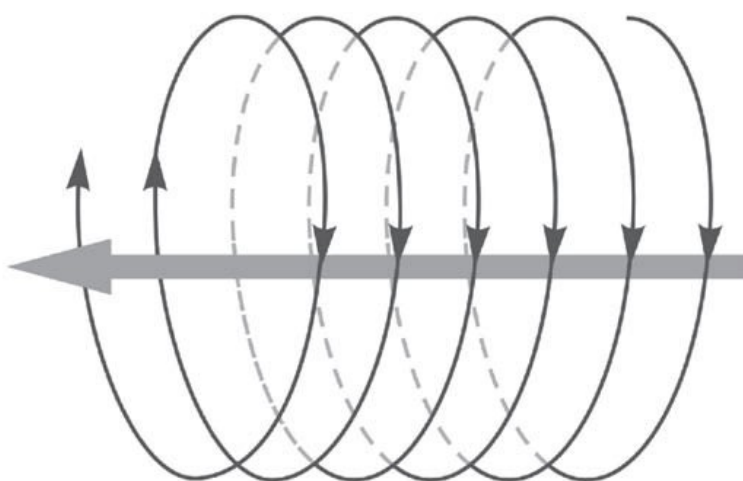
Mobilní laserový systém leží ve středu mezi pozemními a leteckými skenery ve smyslu hustoty bodů a dosažené 3D přesnosti [14]. Proces skenování je rychlý a nenáročný a umožňuje velmi přesné zachycení skutečnosti rychlým způsobem z důvodu blízkosti skenovaných objektů na rozdíl od leteckého skeneru, kde laserový paprsek nemusí proniknout hustou vegetací, a tím pádem není možné získat terénní data. Také kvůli své autonomnosti MLS má výhodu před pozemními statickými systémy, které operátor nucen přenášet po lokalitě. Proto systémy MLS začaly být populární nejen pro skenování liniových objektů, ale i pro zachycení přírodních areálů.

Na rozdíl od statického systému, mobilní laserový skener (MLS) se umísťuje ne na stativ, ale na pohybující se platformu, jako auto nebo loď. Nejčastěji MLS se používá pro skenování silnic, železničních drah, elektrických sítí, a pro tvorbu 3D modelů měst. Principy budovy a skenování MLS jsou stejné jako v LLS. Ve vodorovné rovině, uhlové pokrytí je  $360^\circ$ . Vertikální úhel skenování je  $360^\circ$  v dražších systémech (Optech, Riegl, Velodyne),  $270^\circ$ - $300^\circ$  (Leica, Faro), nebo méně než  $200^\circ$  pro levné skenery (Ibeo, Hokuyo) [15].

V současné době jsou do MLS implementovány dva režimy pozorování: „stop-and-go“ nebo „on-the-fly“ režim [12]. V stop-and-go modu lze provést skenování v panoramatickém nebo hemisférickém režimu (Obr.5). Vozidlo se zastaví, provede skenování, pak změní svou polohu, a provede další skenování. V “on the fly” modu, se vozidlo pohybuje podél trajektorie bez zastavení a laserový skener plynule skenuje okolí (Obr.6).



**Obr. 5** Diagram mobilního skenování ve “stop and go” modu [16]



**Obr. 6** Diagram mobilního skenování v “on the fly” modu [17]

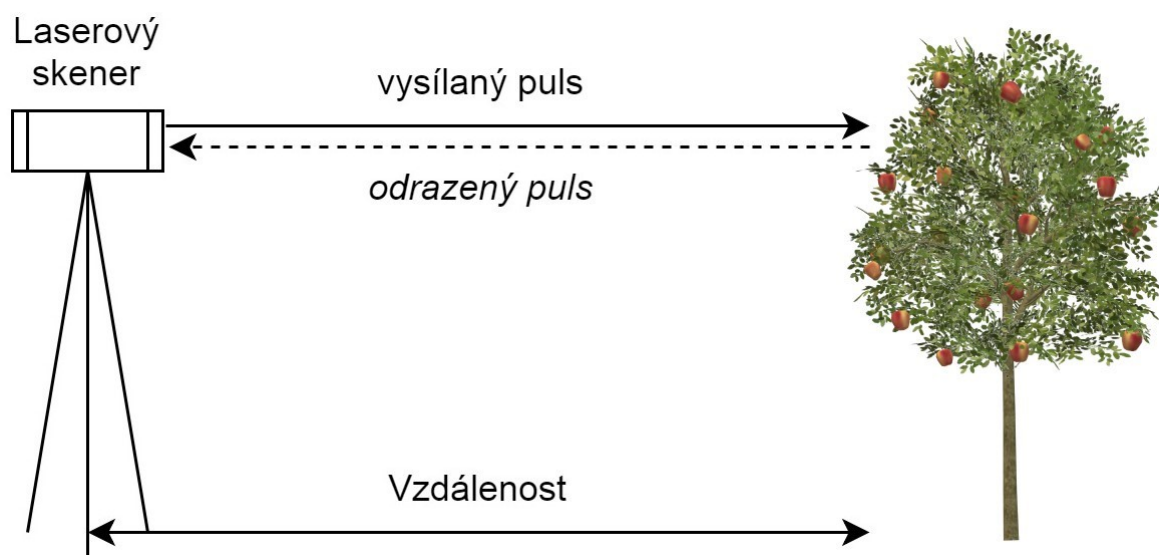
### 1.3.4. Vlastnosti laserového skeneru

Měření vzdálenosti pomocí laserového paprsku se může provádět za použití jedné ze dvou metod [13]:

První metoda zahrnuje měření času letu (time of flight) krátkého pulzu laserové radiace na zem. Laserová jednotka měří přesný čas letu pulzu od systému na objekt a zpět (Obr. 7). Vzdálenost mezi objekty je uvedena pomocí rovnice:

$$R = c \cdot \frac{\Delta T}{2} \quad (3)$$

kde R – vzdálenost; c – rychlost světla;  $\Delta T$  – časový interval

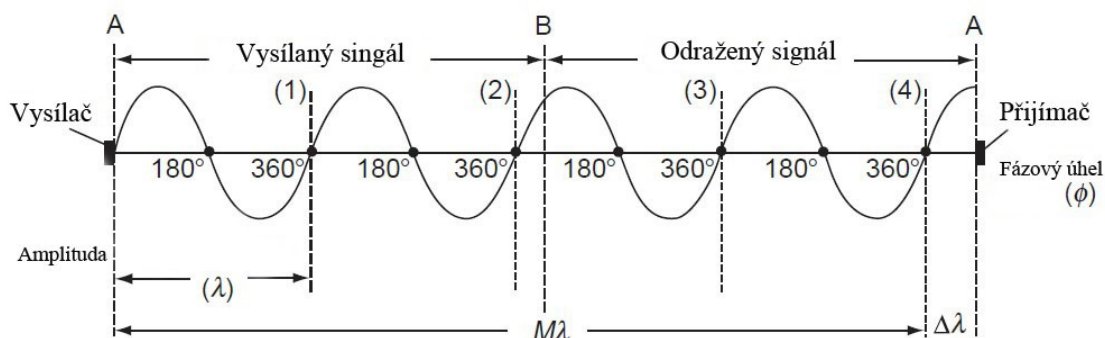


**Obr. 7** „Time of flight“ metoda laserového skenování [13]

Druhá metoda – laser místo pulzu vysílá nepřetržitou vlnu (Obr 8.). Tedy vzdálenost mezi objekty se vyjadřuje pomocí rovnice:

$$R = \frac{M \cdot \lambda + \Delta \lambda}{2} \quad (4)$$

kde M - celé číslo vlnových délek;  $\lambda$  - hodnota vlnové délky;  $\Delta \lambda$  - zlomková část vlnové délky =  $(\varphi/2\pi) \cdot \lambda$ , kde  $\varphi$  je fázový úhel



**Obr. 8** Fázová metoda laserového skenování [13]

Mezi významné vlastnosti leteckého laserového skeneru, které určují hustotu bodů na povrchu patří následující:

*i. Swath width (šířka skenovaného řádku) (Obr.9)*

Šířka řádku ( $S_R$ ) se vypočítá pomocí rovnice:

$$S_R = 2h * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

kde  $\theta$  – uhel skenování,  $h$  - výška nad terénem.

*ii. Stopa na terénu (Obr.9)*

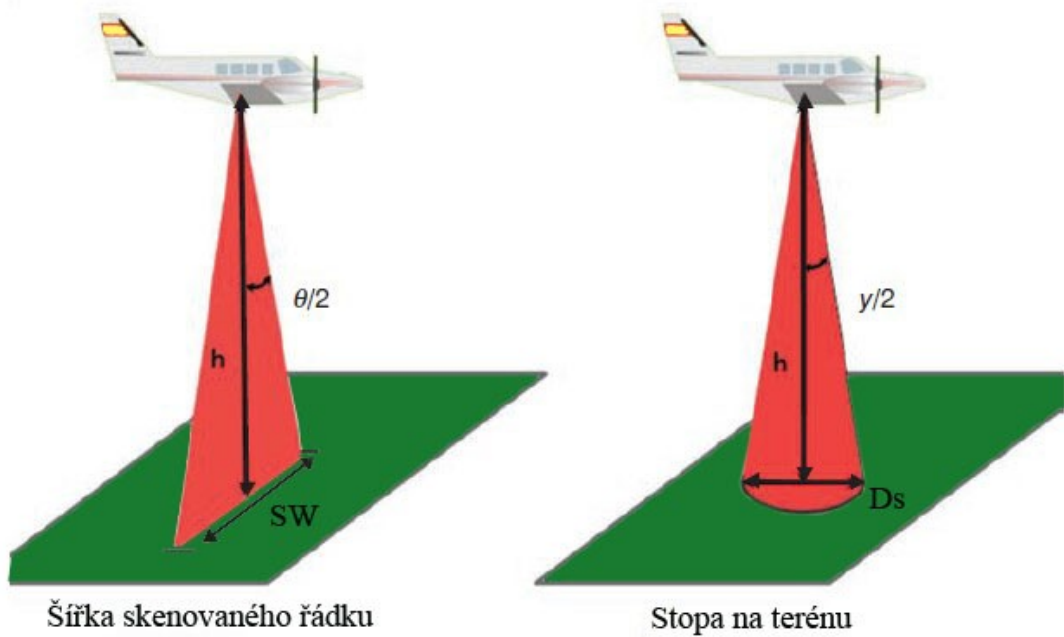
Diametr laserové stopy ( $D_S$ ) na terénu se vypočítá pomocí rovnice:

$$D_S = 2h * \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (6)$$

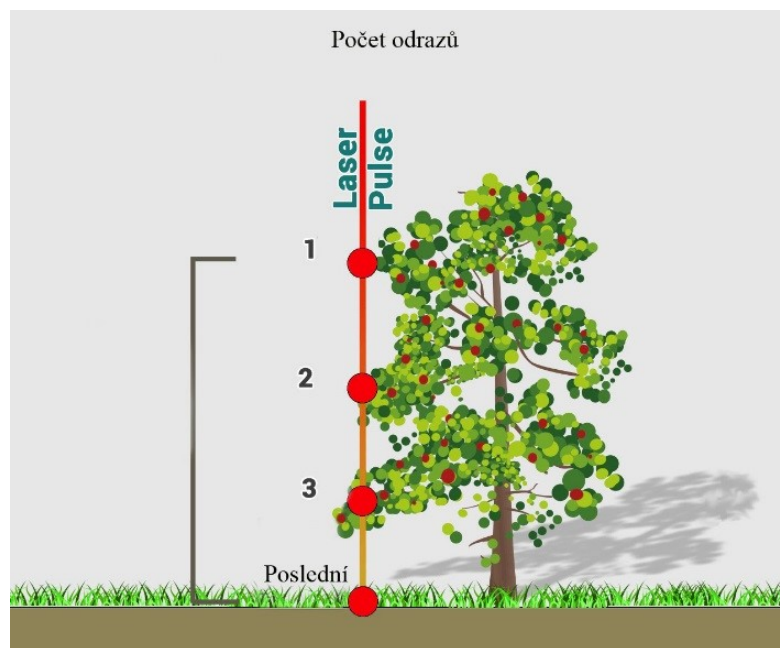
kde  $\gamma$  - míra rozšiřování svazku laserových paprsků,  $h$  - výška nad terénem.

*iii. Počet odrazů*

Před 20 lety bylo možné registrovat jen jeden odraz, v současné době můžeme registrovat více odrazů (Obr.10). Laserový paprsek je schopen procházet skrz vegetaci a při měření více odrazů poslední odraz s velkou pravděpodobností udává výšku skutečného terénu, avšak při průchodu paprsku hustou vegetací nemusí paprsek proniknout až na zem, ale odrazí se od lesního porostu, listů stromu i jiných objektů na jeho cestě [18].



**Obr. 9** Swath a stopa leteckého laserového systému [12]



**Obr. 10** Počet odrazů laserového paprsku [19]

Významnými parametry jsou také frekvence opakování pulzu a míra rychlosti skenování postupných profilů, oba parametry, společně s výškou letu a úhlem, tj. úhlová šířka skenovaného pruhu, určují hustotu bodů na povrchu Země [11]. S postupným vývojem laserových skenerů tyto parametry se jenom zlepšují.



## **Přesnost**

Jak už bylo zmíněno, podle použitého zařízení laserové skenery můžeme rozdělit na letecké, pozemní a mobilní, které sdílejí podobné vlastnosti a komponenty, avšak mají odlišnou geometrii a mechanismus. Letecké skenery zahrnují pilotní a bezpilotní systémy. Výška letu pro letecké systémy je přibližně od 200 m do 4000 m, výšková přesnost od 0.05 do 0.20 m, polohová přesnost 0.02 do 1 m. Hustota bodů může dosahovat několik desítek bodů na 1 m<sup>2</sup>. Pozemní laserové systémy jsou nehybné oproti zemi, dosah laserového paprsků je do 1000 m, přesnost záleží na vzdálenosti objektů, může dosahovat až 2 mm na krátkých (méně než 20 m) vzdálenostech. Hustota bodů je až několik desítek tisíc bodů na 1 m<sup>2</sup>. Mobilní laserové skenery jsou většinou montované na střechu auta nebo do lodě, dosah laserového paprsku do 800 m, přesnost záleží na rychlosti jízdy a je kolem 5 cm, hustota bodů až několik tisíc na 1 m<sup>2</sup>.

### **1.4. Digitální model terénu**

Data laserového skenování se používají pro analýzu povrchu Země a 3D modelování objektů. Základním produktem, který se vyrábí z lidarových dat jsou digitální výškové modely. K nim zahrnujeme – digitální model terénu/reliéfu, digitální model povrchu/území, nebo normalizovaný digitální model povrchu. Tyto modely jsou primárními produkty, a používají se pro další analýzu a zpracování, jak v dálkovém průzkumu, tak i ve fotogrammetrii a stavebnictví.

Digitální model terénu/reliéfu – je model přirozeného zemského nebo člověkem upraveného povrchu (jinak řečeno holá země). Dále, v této práci se bude používat termín digitální model terénu (DMT).

Pod pojmem digitální model povrchu (DMP) se rozumí model území zahrnující všechny objekty na něm, nejčastěji je odvozen z prvních odrazů laserového paprsku. Normalizovaný digitální model povrchu se vypočte pomocí

rozdílu mezi DMP a DMT, a tedy představuje výšku objektů na zemi (např. budov nebo stromů).

Před vývojem lidarů, digitální výškové modely se získávaly z fotogrammetrických dat, ale na rozdíl od fotogrammetrie, DMT vyrobeny z lidarových dat je mnohem informativnější, protože laserový paprsek může proniknout až pod vegetační porost. DMT nejenom, že nese významnou funkci pro monitoring změn na Zemi, ale i slouží jako základní prvek pro výrobu dalších fotogrammetrických a geoinformačních produktů. DMT se používá v následujících oborech: stavební inženýrství, věda o Zemi, plánování a řízení zdrojů, dálkové snímání a mapování, vojenské aplikace [20].

Termín digitální model terénu se obecně připisuje dvěma vědcům z Massachusettského technologického institutu, kteří začali se tím zabývat na konci 50.let [20]. C.L. Miller a R.A. Laflamme uvádí že digitální model terénu je statistickým znázorněním kontinuálního povrchu země velkým počtem vybraných bodů se známými souřadnicemi xyz v libovolném poli souřadnic [21].

Jinak řečeno, digitální model terénu je digitální reprezentace reliéfu, která je složena ze souřadnic XYZ, kde Z se odvozuje pomocí funkce  $z = f(x, y)$ . Pro použití výše uvedené definice, je třeba vyjasnit povahu terénu. Terén je zde definován jako hraniční plocha mezi pevnou zemí a vzduchem [13]. Tuto plochu je možné popsat funkcí  $z = f(x, y)$ , která se vypočte ze zdrojových dat - 3D bodů  $B_{ii} = (X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , kde  $n$  je počet bodů [13]. Pro vypočtení výšek se používají interpolační metody jako: vážené inverzní vzdálenosti, metoda nejmenších čtverců, krigování, triangulace. Problém klasifikace terénních bodů, a ne terénních vypadá tak: když všechny surové body označíme za množinu  $B$ , se souřadnici  $B_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ , tedy množina  $B_t$  je soubor terénních bodů kde  $(B_t \subseteq B)$  [13]. Alternativně lze tento problém vnímat jako přímé získání terénních bodů z množiny  $B_i$ , bez samotného třídění.

Úloha klasifikace terénních bodů není jednoduchá [13]:

- Objekty, které jsou výškově mírně nad zemí, mohou mít stejný geometrický vzhled jako menší terénní nerovnosti. Proto klasifikační kritérium založené pouze na základě sousedních bodů  $B_i$  může selhat v takových případech;

- Informace o attributech (jako echo) obvykle nemohou být použita ke klasifikaci bodů. Poslední echo se ne vždy vztahuje k zemi. Může pocházet z nižšího porostu v lesích. Nicméně, použití posledního odrazu pro extrakci terénu je běžný přístup.

Proces tvorby DMT z laserových dat lze rozdělit na tři kroky:

- Předběžné zpracování dat (úprava letových rad, georeferencování, uložení dat v potřebném formátu (las apod.))

- Filtrování dat (klasifikace terénních a neterénních bodů)

- Vlastně generování digitálního modelu terénu pomocí různých interpolačních metod

### 1.4.1 Lidar vs. Fotogrammetrie

Přesnost digitálního modelu ovlivňuje několik faktorů. Za prvé, je to kvalita laserového systému nebo fotogrammetrické kamery, přesnost signálu GPS a IMU a přesnost georeferencování. Za druhé – kvalita samotného filtrování bodů, a za třetí – přesnost vybrané interpolační metody.

Jak již bylo zmíněno, dříve pro generování výškových modelů se používaly fotogrammetrické metody. Ve fotogrammetrii, mračna bodů se generují metodou protínání paprsků, to znamená, že bod musí být viděn na obou snímcích. Problémy identifikovat bod často vznikají na zastíněných místech, na rozích budov apod. Velkou výhodou Lidaru vůči fotogrammetrii je, že proces skenování je nezávislý na poloze slunce, ale vzhledem k tomu, že úhel záběru kamery je větší než úhel záběru laserového skeneru, menší počet letových řad je nutný při fotogrammetrii pro pokrytí stejného prostoru [13]. Je potřeba podotknout, že přesnost souřadnic na okrajích snímku je horší než ve středu snímku, proto by měl být zajištěn dostatečný

podélný a příčný překryt snímků. Překryty v leteckém skenování zvyšují hustotu bodů, což je také nezbytné pro generování kvalitního modelů. Také, přesnost fotogrammetrických dat hodně záleží na měřítku snímku, proto přesnost výškových modelů se kolísá od 0,1 do 1 m, v leteckém skenování od 0,15 do 0,5 m. Ressler a kol. ve své práci porovnávají letecké skenování a letecké snímkování pro generace DMT (metodou DIM – dense image matching) [22]. Autoři přišli k závěru, že fotogrammetrická metoda je nejvíce vhodná v otevřeném terénu bez vegetace. Také, fotogrammetrická data měla přibližně na 20 % menší pokrytí terénu (tady se rozumí absolutní počet rastrových buněk klasifikovaných jako terén) než lidarové. V případě leteckého skenování směrodatná výšková odchylka byla v projektu 4.5 cm vs. 6.5 cm u DIM.

Také Pfeifer a kol. uvádějí průměrnou RMSE pro DMT z leteckého laserového skenování přibližně  $\pm 0,11$  m a zdůrazňují silné závislosti RMSE na typu povrchu [23]. V případě asfaltového povrchu ulice a správného georeferencování lze dosáhnout RMS 0,03 m, v oblastech s rostlinným pokrytím 0,15 m. Hrůza a kol. pro pozemní laserový skener uvádějí RMSE kolem 0,13 m v zalesněné části a 0,02 m pro asfaltový povrch [24]. V případě mobilního laserového skenování výšková RMS je od 0,03 do 0,06 m na asfaltovaném území [25], [26], [27].

## Kapitola 2

### Současný stav problematiky

S počátkem leteckého laserového skenování se postupně vyvíjely filtrovací metody laserových dat. Jak se po letech zlepšovaly vlastnosti skenerů, tak před pracovníky výzkumu a následně i soukromých firem stala otázka efektivnosti zpracování dat z hlediska automatizace procesu a rychlosti zpracování. Odstranit nadbytečná měření a šum, vyselektovat body terénu nebo jiné objekty v mračnu, pro tohle všechno bylo potřeba najít vhodné filtrovací metody.

Jak již bylo zmíněno, DMT je jedním z primárních výsledků z laserových dat, a proto tvorba kvalitního digitálního modelu je klíčový proces. Ačkoliv byl dosažen velký pokrok, generace DMT, zejména ve specifickém terénu, zůstává náročná [28]. Pro interpolování DMT se používají body na povrchu země, a proto je důležité tyto body správně klasifikovat. Pro tento účel bylo vyvinuto hodně filtrovacích metod a algoritmů.

Chen a kol. ve své práci provedli analýzu a rozdělili algoritmy pro filtrování laserových dat do několika kategorií [28]:

#### i. Adaptace povrchu

Adaptace povrchu na základě použití lokálního minima, je jednou z nejrozšířenějších metod. Předpokládá se, že všechny body patří k povrchu země a pak iterativně odstraní ty body, které nevyhovují aplikovanému “oknu”, které se posouvá podél mračna. Algoritmus je nejvíce vhodný pro zalesněný terén. Tuhle metodu použili Kraus a Pfeifer [29,30], Wack a Wimmer [31], Elmqvist [32].

#### ii. Morfologické filtrování

Tuto metodu lze obecně charakterizovat jako aplikování matematických operátorů, které popisují přípustné rozdíly ve výšce v závislosti na vodorovných vzdálenostech. Klasifikační prvek je umístěn v každém bodě a tento bod je

identifikován jako terénní bod, pokud výškový rozdíl vůči sousedním bodům je v rámci zadaného kritéria (prahové hodnoty filtru). Algoritmus je vhodný nejvíce pro otevřený terén bez velkých objektů. Použití této metody nebo její variace lze najít v pracích Vosselman [33], Sithole [34], Roggero [35].

### iii. Trojúhelníková nepravidelná síť (TIN)

Filtry této skupiny postupně tvoří terén. Aktuální soubor terénních bodů pomocí triangulace tvoří referenční povrch. Pro každý další trojúhelník jeden další bod se vypočítává pomocí vyšetřování nezařazených bodů uvnitř tohoto trojúhelníku. Algoritmus je vhodný pro strmý terén, ale není moc účinný ve městech. Tuto metodu nejvíce prozkoumali Axelsson [36], Sohn a Dowman [37].

### iv. Segmentace a klasifikace

Tato metoda pracuje se segmenty mračna na základě podobných bodových atributů (poslední odraz, intenzita apod.); pak se aplikuje klasifikace bodů v rámci segmentu. Používá se ve městských oblastech. Sithole a Vosselman [38], Tovari a Pfeifer [39].

### v. Statistická analýza

Nedávná metoda filtrování dat na základě statistické analýzy, funguje na obecně plochem terénu. Různé aplikace lze najít v Bartels a Wei [40, 41], Bretar a Chehata [42].

### vi. Vícestupňové porovnání

Tato kategorie zahrnuje několik předchozích kategorií: adaptace povrchu, morfologické filtrování a TIN. Algoritmus je vhodný pro městské oblasti. Zhang a kol. [43], Li a kol. [44], Chen a kol. [45], Maguya a kol. [46].

Ve svém článku autory uvádějí, že metody generování DMT mají podobné problémy, pokud jsou implementovány v ostře se měnícím terénu, oblastech s hustými necelostními rysy a složitými krajinami, také je komplikované použít jeden algoritmus ve všech situacích – i ve městě, i v zalesněné oblasti [28].

Porovnáním existujících algoritmů pro generování DMT, se zabývali i Sitthole s Vosselmanem spolu s vědci ze skupiny ISPRS Working Group III “3D Reconstruction from Airborne Laser Scanner and InSAR Data“ [47]. Každý z nich dostal experimentální datový soubor z různých oblastí (4 z městské oblastí a 4 ze zalesněné oblastí) a otestoval svůj algoritmus. Například Axelsson pro vyselektování terénních a neterénních bodů použil dříve zmíněnou metodu TIN [36]. Řídký TIN je odvozen od minima okolí a poté postupně zhušťován k laserovému mračnu bodů. V každé iteraci se přidá bod k TIN, pokud bod splňuje určitá kritéria (prahové hodnoty) ve vztahu k trojúhelníku, kterém se nachází. Na konci každé iterace jsou prahové hodnoty odvozené z dat přepočteny. Nové prahové hodnoty jsou vypočteny na základě hodnot mediánu odhadnutých z histogramů při každé iteraci. Iterativní proces končí, když již nejsou žádné body pod prahem. Sohn a Downman také používá metodu TIN [37]. Ale na rozdíl od Axelsona, Sohn použil dvoustupňové zhuštění TIN. Nejdříve bylo provedeno zhušťování TIN směrem dolů, k „nejnižšímu“ bodu. Ale směřování dolů nezachycuje všechny body holého terénu – některé body nad trojúhelníky mohou ještě patřit k holé zemi. Proto bylo aplikováno zhušťování směrem vzhůru. Dalším způsobem jsou detekovány hrany Brovelli a kol. [48]. Objekty v krajině vystupují z podkladu (holá země) tak, že mají zřetelné hrany, které tvoří uzavřenou hranici. Proto jsou všechny body uvnitř uzavřených hranic přijímány jako součást holé země. Při detekci hran mračno bodů je rozděleno do dlaždic. Každá dlaždice je nastavena tak, aby měla 200 splajnů, které jsou interpolovány z dat. Zjednodušeně (skutečný proces je mnohem podrobnější), body nad splajnem jsou potenciální objekty a body pod splajnem jsou potenciální body holé země. Hrany jsou na hranici mezi body objektů a body holé země. Navazující hrany jsou propojeny a pokud jsou uzavřeny, pak jsou body v rámci uzavřených hranic hran považovány za potenciální objekty za předpokladu, že jejich výška je stejná nebo větší než střední výška hrany. Metoda se liší od ostatních, protože používá také data prvních odrazů. Další možností je použití lokálního operátoru. V případě Vosselmanem [33] (Vosselman and Maas [49]) je jako lokální

operátor používán kužel. Chceme-li zlepšit výkon algoritmu v strmém terénu, sklon kužele se mění se sklonem terénu. Toho je dosaženo výpočtem rastrované mapy sklonů od nejnižších bodů v každé buňce. Filtr Roggero pracuje za podobným principem. Jeho operátor (kužel) se přizpůsobuje sklonu země v bodě [50]. Vzhledem k tomu, že holá země není známa, odhaduje se pomocí kritéria místní lineární regrese. Kraus, Pfeifer a Briese navrhli použití robustní interpolace – k mračnu bodů se aplikuje modelovaný povrch, všechny body, co jsou pod povrchem jsou (na základě výpočtu váhové funkce) přijímány jako holá země a následně stanovené prahové hodnoty [51] [52]. Wack a Wimmer použili hierarchicky blokový model – postupně vytvářející se digitální model povrchu, nejdříve 9x9 m, pak 3x3 m a tak dále, pak se odstraňovaly body rastru pomocí Laplacián Gaussova filtru, dokud nezbyly žádné body pro odstraňování [31]. Ve výsledků porovnání filtrovacích metod [47] se ukázalo, že algoritmy, které jsou úspěšné ve městech, nejsou zdaleka tak účinné v zalesněném terénu a naopak. Nejúčinnějšími se ukázaly metody TIN Axellsona a robust filtering od Pfeifera a Breise. Algoritmus Axellsona je také implementován do známého software TerraScan, a robust filtering od Krausa a Pfeifer používají software Opals nebo Scop++.

Tyto všechny metody byly navrženy pro zpracování dat leteckého laserového skenování, ale postupně bylo jejich aplikování testováno na datech TLS a MLS [52]. Nicméně, kvůli rozdílné geometrii skenování a větší hustotě bodů, algoritmy pro zpracování MLS a TLS dat musí být adaptované nebo vyvinuté zvlášť. Například, pro extrakci terénních bodů z MLS dat Pu a kol. použili analýzu extrahovaných velkých ploch na určité vzdálenosti při 3D trajektorii mobilního skeneru [53]; Nurunnabi a kol. použili robustní lokální váženou regresi [54]; Vallet a Papelard použili předpoklad, že rovina po které jede auto s MLS i bude zahrnovat terénní body [55]; Gezero a Antunes nejdříve zredukovali počet bodů v mračně na základě vzdálenosti mezi body, a pak použili TIN [56].



Data z MLS a TLS jsou mnohem hustší, a tím pádem zpracování takových dat je komplikovanější a delší. Také, pro 3D modelování nebo jiné účely není potřeba tak husté mračno bodů. Například pro zredukování velikosti bodů v TLS a MLS mračnec, Puttonen a kol. otestovali dvě metody “levelled“ histogram a inverzně vážené vzorkování vzdálenosti [57]. Cílem metod je snížit významnou část dat laserového mračna bodů při zachování většiny vlastností plného bodového mračna. Błaszczak-Bak a kol. představili modifikace algoritmu pro zredukování MLS dat – Optimum Single MLS Dataset metoda (OptD-single-MLS) [58], [59].

Mobilní skenování nachází své uplatnění i v oboru stavebního inženýrství – detekce změn na silnicích nebo extrakce silničních objektů. Velká hustota bodů na dálnicích pomáhá vytvořit velice přesný DMT pro analýzu stavu povrchu. Shen a kol. předvedli metodu extrakce povrchu vozovky, fasád budov a předmětů z rozptýlených bodů na základě analýzy hustoty a rozložení bodů v mračně [60]. Jaakola a kol. ve svém příspěvku navrhuje automatické metody klasifikace dopravního značení a bodů obrubníků a modelování povrchu vozovky pomocí TIN [61]. Wang a kol. modelovali horskou silnici z MLS dat a na základě vytvořeného DMT provedli analýzu průtoku vody z okolí a jak voda bude proudit po silnici při tání sněhu nebo při dešťových srážkách [62]. Guan a kol. nebo Kumar a Angelats použili data z MLS k vyhodnocení bezpečnosti silničního provozu na základě analýzy trhlin asfaltu nebo detekce nerovnosti silnic [63], [64]. Szulwic a Tysiac pomocí MLS prozkoumali technický stav silnic [65]. Rozpoznávání a extrakci objektů v okolí silnic lze najít také v práci autorů [14], [66].

Metodu mobilního laserového skenování lze také použít i pro monitorování pobřeží. Pro tyto účely MLS systém se instaluje na plavidlo [67], [68]. Data z mobilního laserového skenování jsou velice užitečná pro monitorování písčiny pobřeží [69] a mapování eroze v okolí řeky [70]. Nakonec, MLS se používá i pro automatickou detekci stromů [71], [72], [73]

## 2.1. Letecké laserové skenování v České republice

Letecké laserové skenování celé České republiky bylo započato v roce 2009. Na základě získaných dat byly vytvořeny digitální modely terénů (DMT) 4. a 5. generace. Ještě v 2006 roce za účasti ČÚZK a Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu bylo provedeno pilotní laserové skenování a snímkování, pro určení nejlepších parametrů letů [18]. Základní výška letu byla nastavena na 1500 m, příčné překrytí snímaných pásů bylo 35–50 %, dosažená průměrná hustota bodů – 1.6 bodů na 1 m<sup>2</sup> [18].

### 2.1.1. Digitální model terénu 4. generace

DMT 4G je jedním z realizačních výstupů společného projektu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního, Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství. Letecká data byla pořizovaná v letech 2010–2013. Skenování pásma „Střed“ se uskutečnilo v období od 22. března do 10. října 2010, skenování pásma „Západ“ se uskutečnilo v období od 9. března do 27. června 2012, skenování pásma východ se uskutečnilo v období od 8. dubna 2013 do 11. listopadu 2013 [74]. Skenování bylo realizováno systémem LiteMapper 6800 firmy IGI mbH s využitím LLS - RIEGL LMS – Q680 z průměrné výšky 1200 m nebo 1400 m nad střední rovinou terénu. Digitální model terénu České republiky 4. generace představuje zobrazení zemského povrchu v pravidelné síti (5 x 5 m) bodů o souřadnicích X, Y, Z, kde Z reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) [74]. DMT 4G je určen k analýzám terénních poměrů regionálního charakteru.

Postup tvorby DMT 4G [74]:

- Předzpracování leteckých laserových dat

Cílem tohoto procesu je analýza surových dat, georeferencování jednotlivých odrazů paprsků a transformace souřadnic do pracovního souřadnicového referenčního systému UTM/WGS84-G873 a výškových údajů do výškového referenčního systému Balt po vyrovnání (Bpv).

- Robustní filtrace

Cílem robustní filtrace je separovat body podle dopadu laserového paprsku na terén, vegetaci a stavby, a přitom identifikovat chybná měření (např. letící pták).

- Výběr reprezentativního uzlového výškového bodu

V každém čtverci 5 x 5 m je vybrán pravděpodobný uzlový bod reliéfu jako bod s nejnižší výškou.

- Manuální kontrola vybraných uzlových bodů – odstranění hrubých chyb
- Transformace uzlových bodů do S-JTSK
- Interpolace výškového modelu v síti 5 x 5 m

K 1. 2. 2014 DMT 4G byl dokončen pro území celé ČR. DMT 4G reprezentuje terénní reliéf včetně skalních útvarů. Vzhledem k typu gridu o rozměrech 5 x 5 m je přirozené, že takový model nemůže podrobně vystihnout lokální členitost a výskyt terénních anomálií menší než 5 m [74]. V Tab. 1, jsou uvedené přesnosti DMT 4G na různých částech povrchu [74].

Kat. povrchu a půdního krytu	Systematická chyba [m]	Úplná střední chyba [m]	Maximální chyba [m]
Terénní hrany	-0,25	0,34	0,77
Zpevněné plochy	-0,01	0,07	0,26
Orná půda	-0,01	0,13	0,66
Louky a pastviny	-0,09	0,18	0,85
Křoviny, a lesy	-0,02	0,13	0,85

**Tab. 1** Přesnost DMT 4G na různém povrchu

### 2.1.2. Digitální model terénu 5. generace

Na rozdíl od DMT 4G, který je ve čtvercové síti, DMT 5G je ve formě nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, Z (Bpv). DMT 5G

je základní zdrojovou databází pro tvorbu vrstevnic určených pro mapy velkých měřítek a počítačové vizualizace výškopisu v územně orientovaných informačních systémech vysoké úrovně podrobnosti [75].

Postup tvorby DMT 5G [75]:

- Předzpracování leteckých laserových dat
- Robustní filtrace
- Manuální kontrola výsledků robustní filtrace

K eliminaci chyb, vzniklých v místech nespolehlivé robustní filtrace, je prováděna následná interaktivní vizuální kontrola dat.

- Výběr reprezentativního výškového bodu reliéfu v zemědělsky obhospodařovaných oblastech

Vzhledem ke skutečnosti, že v některých oblastech, zejména naskenovaných v hlavním vegetačním období, nebylo možné provést manuální přeřazení všech bodů do kategorie vegetace a tyto body tedy zůstaly nesprávně zařazeny v kategorii terén, byla v této části technologie řešena generace modelu uvnitř určených polygonů výběrem reprezentativních výškových bodů v síti 5 x 5 m.

- Výběr reprezentativního výškového bodu terénu v ostatních areálech

Vzhledem k nehomogenitě dat, ale i s cílem odstranění nepodstatných nerovností terénu, byla dále řešena tvorba modelu výběrem reprezentativních výškových bodů v síti 1 x 1 m.

- Interpolace výškového modelu terénu v oblastech neobsahujících naměřená data.

Model byl v této fázi zpracování doplněn o uměle vytvořené body, v pravidelné síti 5 x 5 m.

- Zjednodušení modelu reliéfu při zachování maximální úplné výškové chyby.

Model je po předcházejících úpravách velmi detailní a jednotlivé body mohou být zatíženy drobnými chybami v důsledku nízké vegetace, je dále prováděno ředění bodů terénu metodou „hoblování“ vyvinutou firmou Atlas, spol. s.r.o.

- Odstranění systematické složky měření leteckým laserovým skenerem

Testování absolutní přesnosti výškového měření bylo provedeno na 178 komparačních základnách rozmístěných po celém pásmu Střed.

- Transformace výškových bodů do S-JTSK

V Tab. 2, jsou uvedené přesnosti DMT 5G na různých částech povrchu [75].

Kat. povrchu a půdního krytu	Systematická chyba [m]	Úplná střední chyba [m]	Maximální chyba [m]
Terénní hrany	-0,11	0,18	0,66
Zpevněné plochy	-0,09	0,13	0,37
Orná půda	-0,07	0,14	0,56
Louky a pastviny	-0,03	0,21	0,42
Křoviny lesy	-0,06	0,13	0,46

**Tab. 2** Přesnost DMT 5G na různém povrchu

## Kapitola 3

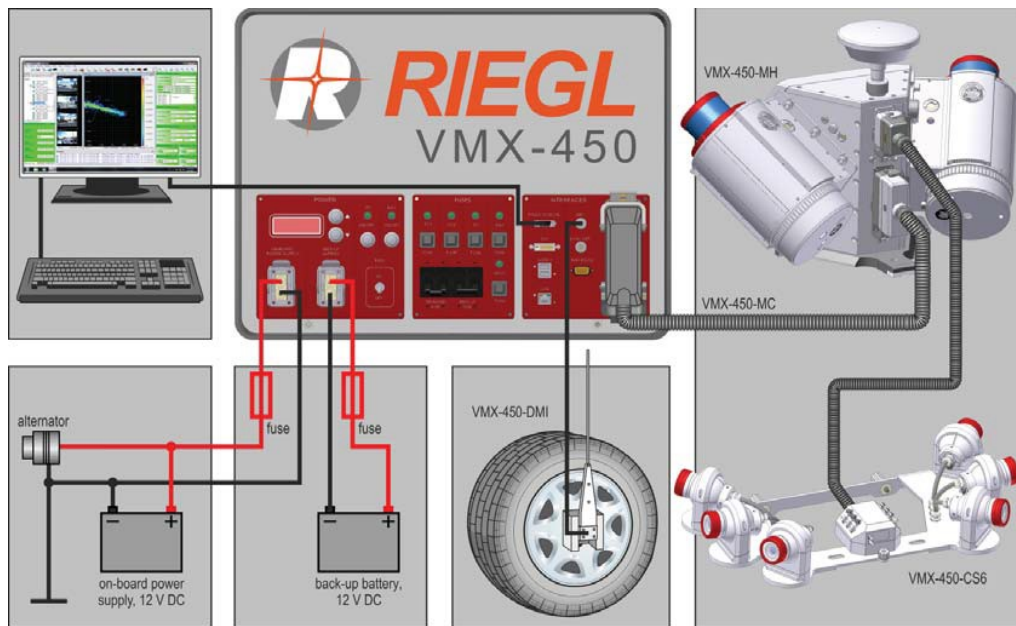
### Materiály a metody

#### 3.1. Mobilní mapování

V této disertační práci, bylo provedeno mobilní laserové skenování v Moravském Krasu a ve Školním lesním podniku Mendlové Univerzity “Masarykův les“ Křtiny (dále ML Křtiny). Skenování bylo realizováno skenerem Riegl VMX-450 (viz. 3.1.1). Data byla zpracovávána v softwaru OPALS (viz. 3.1.2).

##### 3.1.1 Scener Riegl VMX-450

Mobilní laserový skener RIEGL VMX-450 poskytuje hustá, přesná a bohatá mračna bodů i při vysokých rychlostech jízdy (Obr. 12). RIEGL VMX-450 obsahuje dva plně integrované a kalibrované laserové skenery, IMU a GNSS, volitelný podsystém fotogrammetrických kamer a odpovídající balíky softwaru RIEGL (Obr. 11). Každý z obou laserových skenerů RIEGL VQ-450 poskytuje 360° profily bez mezer. Rychlost měření 550 000 m/s a rychlost skenování je až 200 profilů za sekundu pro každý skener. Pomocí technologie digitalizace odrazů a online zpracování tvaru vlny, lze detekovat více terčů a obdržet kalibrované hodnoty amplitudy a odrazivosti pro každý bod bodového mračna. Softwarové balíčky RIEGL nabízejí komplexní a pohodlné funkce v oblasti zpracování dat, zahrnující vylepšené nástroje pro úpravu dat po skenování, synchronní měření ve skenovaných datech a obrázcích, obarvení bodů, a dokonce kombinace s jinými datovými sadami [76]. Nakonec lze vyexportovat georeferencovaná data pro zpracování v jiných softwarech. Obdržená 3D data s vysokou přesností a vysokým rozlišením poskytují základ pro řadu aplikací, jako je mapování silnic a železničních koridorů (např. inventář silnic, ochrana proti hluku), vodních cest, přístavů, a jiných městských a dalších oblastí [76]. Více informací lze nalézt v [76]



**Obr. 11** Komponenty systému RIEGL VMX-450 s volitelným kamerovým systémem VMX-450-CS6 [76]



**Obr. 12** Riegl VMX-450 namontovaný na střechu auta

Šikovní dotyková obrazovka, zpětná vazba o stavu zařízení a online monitoring usnadňují úkoly operátora v terénu (Obr. 13).



**Obr. 13** Dotyková obrazovka zobrazující online průběh měření

### Výkonnost měření laserových skenerů VQ - 450:

<i>Efektivní míra měření</i>	300 kHz	400 kHz	600 kHz	760 kHz	1.1 MHz
<i>Max rozsah měření</i>					
<i>přirozené cíle <math>\rho \geq 10 \%</math></i>	300 m	260 m	200 m	180 m	140 m
<i>přirozené cíle <math>\rho \geq 80 \%</math></i>	800 m	700 m	450 m	330 m	220 m

**Tab. 3** Výkonnost měření laserových skenerů VQ - 450

Další vlastnosti skenerů:

- Minimální dosah 1,5 m
- Přesnost 8 mm (stupeň shody naměřené veličiny s její skutečnou (pravou) hodnotou)
- Preciznost 5 mm (nazývaná také opakovatelnost, je stupeň, do kterého další měření vykazují stejný výsledek)
- Výkon IMU / GNSS 6)



- Poloha (absolutní): 20–50 mm;
- Poloha (relativní): typ. 10 mm;
- Roll and Pitch - 0.005°;
- Heading (Yaw) - 0.015°

### 3.1.2 Software OPALS

OPALS je program pro orientaci a zpracování dat Leteckého laserového skenování. Jedná se o modulární programový systém, který se skládá z malých modulů seskupených do balíčků. Program byl vytvořen pracovníky z Technické Univerzity ve Vídni, Katedry Geodézie a Geoinformatiky, výzkumné skupiny Fotogrammetrie a Dálkového průzkumu Země.

Důležité vlastnosti softwaru [77]:

- zpracování obrovských mračen bodů (biliony bodů);
- zachování bodových atributů: amplituda, echo, gps čas, intenzita apod.;
- vypočítání vlastnosti bodů: odhad lokální roviny, odrazivost apod.;
- zpracování a vyrovnání profilů, georeferencování, kontrola kvality;
- finální produkty: dtm, dsm, apod.

Moduly OPALS:

<i>AddInfo</i>	<i>Grid</i>	<i>Rasterize</i>
<i>Algebra</i>	<i>GridFeature</i>	<i>RobFilter</i>
<i>Bounds</i>	<i>Histo</i>	<i>Section</i>
<i>Cell</i>	<i>ICP</i>	<i>Segmentation</i>
<i>Contouring</i>	<i>Import</i>	<i>Shade</i>
<i>Convolution</i>	<i>Info</i>	<i>Simplify</i>
<i>DSM</i>	<i>Isolines</i>	<i>Snellius</i>
<i>DTM</i>	<i>LSM</i>	<i>StatFilter</i>

<i>Diff</i>	<i>LineModeler</i>	<i>StripAdjust</i>
<i>DirectGeoref</i>	<i>LineTopology</i>	<i>TIN</i>
<i>EchoRatio</i>	<i>Morph</i>	<i>TerrainMask</i>
<i>EdgeDetect</i>	<i>Normals</i>	<i>Translate</i>
<i>Export</i>	<i>Openness</i>	<i>Vectorize</i>
<i>FillGaps</i>	<i>Overlap</i>	<i>View</i>
<i>Fullwave</i>	<i>PointStats</i>	<i>ZColor</i>
<i>GeorefApprox</i>	<i>RadioCal</i>	

Software se systematicky vyvíjí a přibývají další moduly pro hlubší zpracování laserových dat. I když OPALS byl navrhován primárně pro zpracování dat leteckého laserového skenování, v důsledku rozšíření jeho vlastnosti lze ho použít i pro zpracování dat pozemního laserového skenování.

Vzhledem ke své jedinečné koncepci, do programu lze načíst obrovské množství dat pro další zpracování. OPALS Data Manager (ODM) je klíčovou komponentou programu. ODM byl vyvinut pro účinný přístup k obrovským souborům prostorových dat a pro manipulaci libovolných atributů opouzdřených ke geometrii objektů [78]. Data jsou organizovány hierarchicky se dvěma úrovněmi [77]:

- úroveň 0 - index může být vnímán jako matice, oddíly se separují do 2 - rozměrných dlaždic, vhodná velikost dlaždic je automaticky určena při importování;
- úroveň 1 - index je zodpovědný za indexování bodů v rámci jedné dlaždice. V současné době se v ODM používá metoda kD-Stromů na úrovni 1, která je extrémně rychlá pro prostorové indexování.

Tyto způsoby přístupu k datům i umožnily zpracování větších množství pozemních dat, i když to trvá déle než u leteckých laserových dat, které mají pravidelnější strukturu.

Každý OPALS modul je myšlen tak, aby přijal některé vstupní údaje, aplikoval sadu algoritmů s určitými parametry, a nakonec produkoval žádaný výstup. Parametry patří do jedné ze čtyř tříd fakultativnosti: povinné, vypočtené, ignorovatelné, a přerušené.

K modulům lze přistupovat třemi různými způsoby [79]:

- z příkazového řádku;
- Python shell;
- z vlastního C ++ programů.

Parametry modulu lze klasifikovat do třech kategorií [77]:

- Specifické parametry – jsou typické pro každý modul.
- Společné parametry – funkcionální ovládací prvek, který je realizován pro všechny moduly. Z toho důvodu jsou podporovány všemi moduly, které mají vždy stejný typ a sémantiku.
- Globální parametry – také tvoří pevnou sadu možností podporované všemi moduly. Nicméně, hodnoty globálních voleb jsou považovány za konstantní po určité balíčky, uživatele nebo projekty, a proto se očekává, že budou uvedeny jen v konfiguračních souborech.

Operátor má přístup k modulům i parametrům a může zasahovat a zadávat nutné změny do algoritmu pro zlepšení výsledků zpracování.

V disertační práci se používají jenom některé z modulů, které jsou popsány níže [77]:

- **Import** – načítá vektorové a/nebo rastrová data v ODM pro další použití. Podporuje mnoho různých formátů, jako xyz, Las / Laz, shape, GDAL a další.
- **AddInfo** – vkládá nebo aktualizuje atributy ODM pomocí kombinací existujících atributů a/nebo gridových modelů.

- **Cell** – cílem modulu je odvození rastrového obrazu z vybraných parametrů (min, max, průměr atd.) definovaného datového atributu (Z, počet echo, amplituda apod.)
- **Grid** – odvozuje DMT nebo DMP, s použitím různých interpolačních technik (snap, moving planes, moving average apod.) a parametry (velikost mřížky, počet sousedů, poloměr vyhledávání apod.)
- **Algebra** – odvozuje nové síťové datové sady pomocí kombinace více vstupních mřížek. Nová mřížka se vypočítá pomocí algebraických vzorců pomocí hodnot vstupní sítě.
- **RobFilter** – cílem modulu je klasifikovat mračna bodů na terénní a ne terénní body pomocí robustní interpolace.
- **Export** – export vektorových dat včetně uložených atributů z ODM do různých datových formátů (původní formát, xyz, las, atd).
- **Histo** – odvozuje histogramy a popisné statistiky (min, max, průměr, rms atd.) pro datové sady ODM nebo grid/raster a ukládá výsledky graficky (SVG) nebo číselně (XML).
- **Shade** – odvozuje stínované reliéfní mapy.

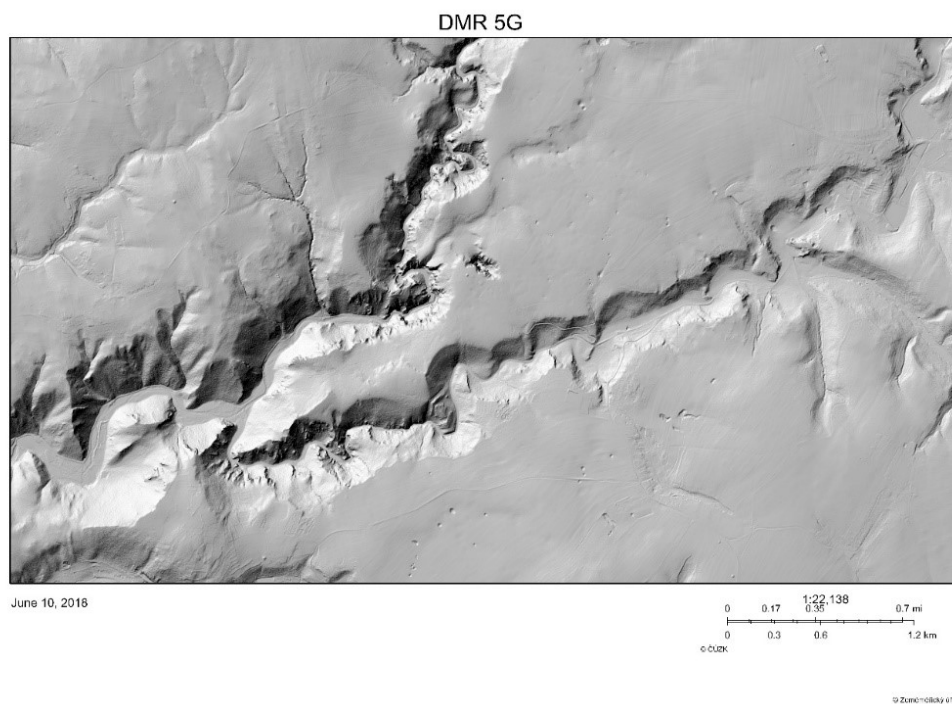
### 3.1.3 Mobilní laserové skenování v Moravském Krasu a ML Křtiny

**Moravský Kras** je umístěn ve východní části České republiky, na sever od Brna (Obr. 14-15). Mobilní laserové skenování se uskutečnilo v květnu 2015, proces zabral kolem dvou hodin. Skenování bylo provedeno skenerem Riegl VMX – 450 zapůjčeným z centra AdMaS. Celková délka dvou snímaných ploch je 3,9 km a 6,1 km – Suchý a Pustý žleb, s průměrnou šířkou 100 m. První sada dat (Suchý žleb) obsahuje 8 LAS souborů (4 z každého skeneru) s různými velikosti od 0,3 do 4,5 GB; druhá sada dat (Pustý žleb) obsahuje 12 LAS souborů (6 z každého skeneru) od 0,5 do 3,5 GB. Z velikosti obdržovaných dat, je vidět že soubory jsou moc velké, proto

uložení i zpracování dat se komplikuje. Další skenování v Moravském Krasu bylo provedeno v prosinci 2015, a bylo naskenováno území Suchého žlebu. Sada dat obsahuje 12 LAS souborů (6 z každého skeneru) od 1,5 do 3,8 GB.



**Obr. 14** Část Moravského Krasu – letecká mapa

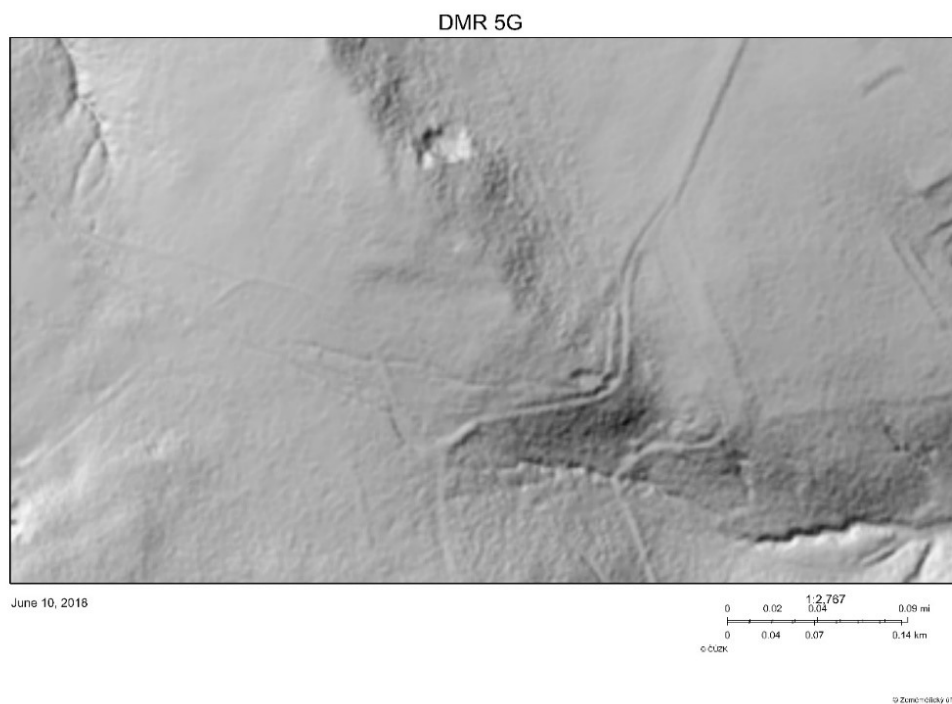


**Obr. 15** Pustý žleb a Suchý žleb – DMT 5G

Druhé skenování se uskutečnilo v červnu 2017 ve Školním lesním podniku “Masarykův les“ Křtiny (Obr. 16–17), *lesní cesta Hradská*. Celý proces trval cca jednu hodinu. Sada dat obsahuje 6 LAS souborů od 0,3 do 3 GB.



**Obr. 16** Lesní cesta Hradská – letecká mapa



**Obr. 17** Lesní cesta Hradská – DMT 5G

V obou případech před zahájením skenování bylo provedeno inicializaci skeneru v otevřeném prostoru. Inicializace byla provedena podle pokynů výrobce. Pro výpočet trajektorie byly použity data z permanentních stanic GNSS (vzorkování 30 s) sítě EUREF. Pro lepší srovnání byly použity údaje z několika stanic GNSS.

## 3.2. Zpracování dat

Jak již bylo zmíněno data byla zpracována v softwaru OPALS. Pro vyčištění a extrakci *terénních* bodů z mračna bylo použito kombinace několika filtrovacích metod. Nejdříve se použilo ředění bodů, a nakonec robustní filtr.

*Robustní filtr* je jedním z uznávaných metod filtrace terénních a ne terénních bodů. Jeho cílem byla filtrace leteckých dat ve svažitém lesním terénu [80]. Algoritmus robustní filtr nebo robustní interpolace integruje odstranění hrubých chyb a interpolací terénu v jeden proces.

Cílem tohoto algoritmu je vypočítat individuální váhu každého nepravidelně distribuovaného bodů takovým způsobem, že modelovaný povrch představuje terén [81].

Postup řešení: [81]

1. Interpolace modelu povrchu na základě individuální váhy každého bodu (na začátku se stanoví stejná váha pro každý bod).

2. Výpočet hodnot filtru (orientovaná vzdálenost mezi modelovaným povrchem a bodem) pro každý bod.

3. Výpočet nové váhy pro každý bod na základě hodnoty filtru.

Kroky se opakují iterativně. Výsledkem je klasifikace naměřených bodů do terénních a ne terénních. V prvním kroku je výpočet založen na základě funkcionálního modelu, který vyplývá z následujících rovnic. Máme  $n$  bodů  $B_i$ , a

jejích výšky  $Z_i$ , které byly redukovány odečtením rovinného povrchu (trend T). Dále  $Z$  pro bod  $B$ , se vypočte na základě rovnice:

$$Z = c^T C^{-1} z \quad (7)$$

kde,

$$c = (C(BB_1), C(BB_2), \dots, C(BB_n))^T \quad (8)$$

$$C = \begin{pmatrix} V_{ZZb_1} & C(B_1B_2) & \dots & C(B_1B_n) \\ & V_{ZZb_2} & & C(B_2B_n) \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & V_{ZZb_i} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^T \quad (10)$$

$c$  = faktor vypočtený z daných bodů [29].

Algoritmus závisí na hodnotě odchyly  $V_{ZZb_i}$ , velká odchylyka způsobuje velké hodnoty filtru, menší odchylyka nutí povrch přesně interpolovat bod [13]. Přesnost bodu  $B_i$  je:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_0^2}{B_i} \quad (11)$$

kde,  $\sigma_0^2$  je apriorní přesnost – předpoklad, že všechny body mají stejnou přesnost

Tedy, odchylyka:

$$V_{ZZb_i} = C(0) + \sigma_i^2 \quad (12)$$

kde,  $C(0)$  = kovariance na nulovou vzdálenost mezi body, vypočtena ze zadaných bodů [29].

Třetí krok je založen na váhové funkci ( $p$ ). Eliminace hrubých chyb je založená na základě váhové funkci. Váha  $p_i$ , závisí na hodnotě filtru  $f_i$  - je orientována vzdálenost mezi vypočteným modelem povrchu a měřeným bodem [81]. Tedy:



$$p_i = \frac{1}{1+(a(f_i-g)^b)} \quad (13)$$

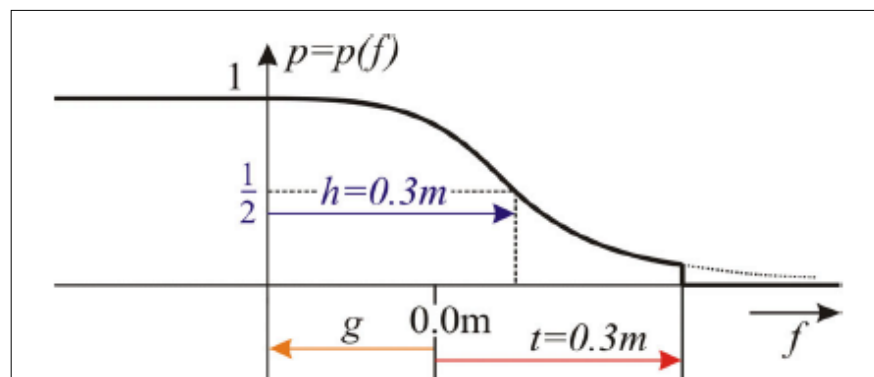
$f_i$  = hodnota filtru

$g$  = hodnota posunu funkce, vypočtena na základě hodnot filtru

$a = \frac{1}{h}$ , kde  $h$  je – polovina váhové funkce

$b = 4h + s$ , kde  $s$  – funkce sklonu

Podrobný popis této metody je uveden v [29].



**Obr. 18** Příklad váhové funkce pro eliminace ne terénních bodů [81]

Na Obr. 18 je znázorněn příklad použití funkce  $p = p(f)$ , pro filtrace bodů. Do terénních bodů jsou zaraženy ty body, které splňují kritérium  $t = 0.3 \text{ m}$  (hodnota filtru – vypočtená vzdálenost mezi modelovaným povrchem a skutečným bodem).

Primárně robustní filtr byl navržen pro zpracování dat leteckého laserového skenování. Data z mobilního laserového skeneru představují sebou mnohem větší nehomogenní mračno, s nepravidelnou hustotou bodů na metr čtvereční. Proto data z MLS by měla být zředěná a vyčištěna před použitím robustního filtrování. Použití robustního filtrování ihned v našem případě nebylo možné, software nemohl zvládnout tak velkou hustotu bodů a jejich nepravidelné rozložení na  $1 \text{ m}^2$ . Střední hustota bodů v surovém mračnu je kolem  $1000 \text{ [bodů/m}^2\text{]}$ . V některých oblastech na silnici, nebo pokud stromy a jiný lesní porost jsou velmi blízko k mobilnímu skeneru, je tohle číslo ještě vyšší – kolem  $1500 \text{ bodů/m}^2$ . Proto bylo aplikováno několik filtrovacích kroků pro přípravu dat. Souhrn použité metody je v Tab. 4.

OPALS modul		Popis	Parametry	
			<i>Moravský Kras</i>	<i>Masarykův les Křtiny</i>
1	<i>Import</i>	<i>Importování MLS dat</i>	Importování každého LAS zvlášť do OPALS odm (opals data manager)	
2	<i>Cell</i>	<i>Ředění bodů</i>	min Z-value, mřížka 0.15 x 0.15 m	
3	<i>Import</i>	<i>Import řaděných bodů z obou skenerů do jednoho odm souboru</i>	import všech odm z kroku 2 do jednoho velkého odm	
4	<i>Cell</i>	<i>Ředění bodů</i>	second min Z-value, mřížka - 1 m	
5	<i>Grid</i>	<i>Předběžné generování <math>DMT_{RMP}</math> založené na výstupu z kroku 4</i>	mřížka 1 x 1 m, interpolace – robust moving planes, max počet blízkých bodů: 12, rádius hledání 2 m	
6	<i>Grid</i>	<i>Předběžné generování <math>DMT_{TRI}</math> založené na výstupu z kroku 4</i>	grid 1 x 1 m, interpolace – delaunay	
7	<i>Algebra</i>	<i>Vyplňování mezer v <math>DMT_{RMP}</math></i>	použití $DMT_{TRI}$ pro vyplnění mezer v $DMT_{RMP}$	
8	<i>AddInfo</i>	<i>Vytvoření nového atributu v mračně bodů</i>	atribut – normalized Z	

9	Cell	<b>Ředění bodů</b>	2min Z-value, mřížka 0.25 x 0.25 m normalizedZ <[0.3] m a normalizedZ > [-1] m	2min Z-value, mřížka 0.25 x 0.25 m normalizedZ <[0.2] m a normalizedZ > [-0.5] m
10	Grid	<b>Předběžné generování <math>DMT_{RMP}</math> založené na výstupu z kroku 9</b>	mřížka 0.25x0.25 m, interpolace – robust moving planes, max počet blízkých bodů: 24, rádius hledání 2 m	
11	Grid	<b>Předběžné generování <math>DMT_{TRI}</math> založené na výstupu z kroku 9</b>	Grid 0.25x0.25 m, interpolace – delaunay	
12	Algebra	<b>Vyplňování mezer v <math>DMT_{RMP}</math></b>	použití $DMT_{TRI}$ pro vyplnění mezer v $DMT_{RMP}$ , výstupy z kroku 10 & 11	
13	Addinfo	<b>Obnova atributu</b>	atribut – normalized Z	
14	Robfilter	<b>Robustní filtrování založené na výstupu z kroku 3 a atributu z kroku 13</b>	interpolace – plane, normalizedZ <0.3 m	interpolace – plane, normalizedZ <0.2 m
15	Grid	<b>Konečná tvorba <math>DMT</math></b>	robust moving planes, delaunay (triangulation) a moving paraboloid	

**Tab. 4** Zpracování dat

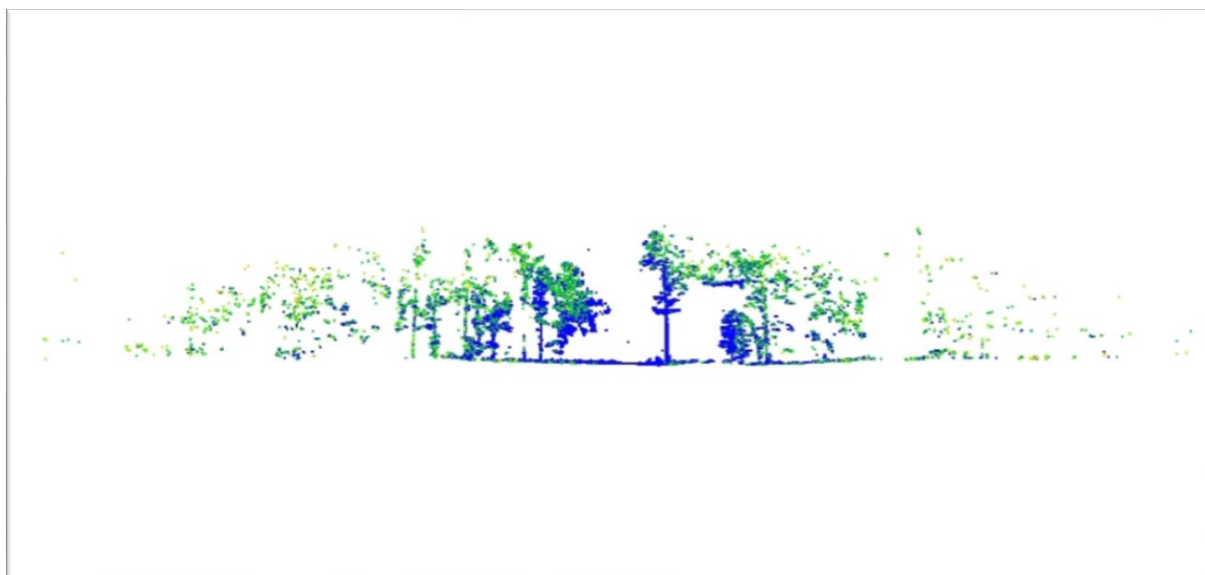
Velkou kapacitu datových sad je těžké uchovat a zpracovat. Za tímto účelem jsme importovali soubory (pro začátek data z každého skenerů zvlášť), jeden po druhém, do softwaru OPALS a aplikovali morfologické filtrování (kroky 1 a 2). V každé 0,15 x 0,15 m mřížce byl vybrán bod s nejmenší výškou, včetně všech odrazů. Nicméně, pomocí tohoto filtru se nemůžeme zbavit všech ne terénních bodů, což je představeno na Obr. 19. Také hraje roli i velikost mřížky – při velikosti 1 x 1 m, mračno bychom moc zredukovali, což by vedlo k velké ztrátě cenných dat, obzvlášť v Moravském Krasu, kde bylo důležité zachovat co nejvíce vlastnosti terénu. Dále řaděné datové sady nyní mohou být spojené do jedné sady dat (krok 3) pro další zpracování.

V krocích 4 až 8 a 9 až 13 různé kombinace hierarchických interpolací a morfologického filtrování jsou aplikovány pro přípravu dat pro robustní filtrování (potřebujeme spočítat hodnotu filtru). Před první interpolací, jsme použili morfologický filtr znovu (krok 4). Nyní, pro každou mřížku 1 x 1 m, jsme zvolili druhu nejmenší Z-hodnotu. Cílem tohoto kroku je minimalizovat odlehlé hodnoty (šum v datech) a udělat data více homogenními. Tahle data budou použita pro předběžné generování DMT. Poté, dvě interpolační techniky (tj robust moving planes a triangulace) jsou aplikovány (grid - 1 x 1 m) (kroky 5 a 6). Pro robust moving planes maximální počet bodů použitých pro interpolaci je 12 v poloměru hledání 2 m. S použitím kombinace dvou vytvořených mřížek – triangulace a robust moving planes jsme vyplnili mezery ve druhé mřížce (DMT<sub>RMP</sub>) (krok 7), které se ještě objevovaly na pozicích stromů (všechny mezery by měly být vyplněny pro výpočet hodnoty filtru podél všeho terénu). Dále, atribut "normalized Z" (hodnota filtru) byl přidán do mračna bodů (z kroku 3) odečtením předběžného DMT ze Z-hodnot (krok 8).

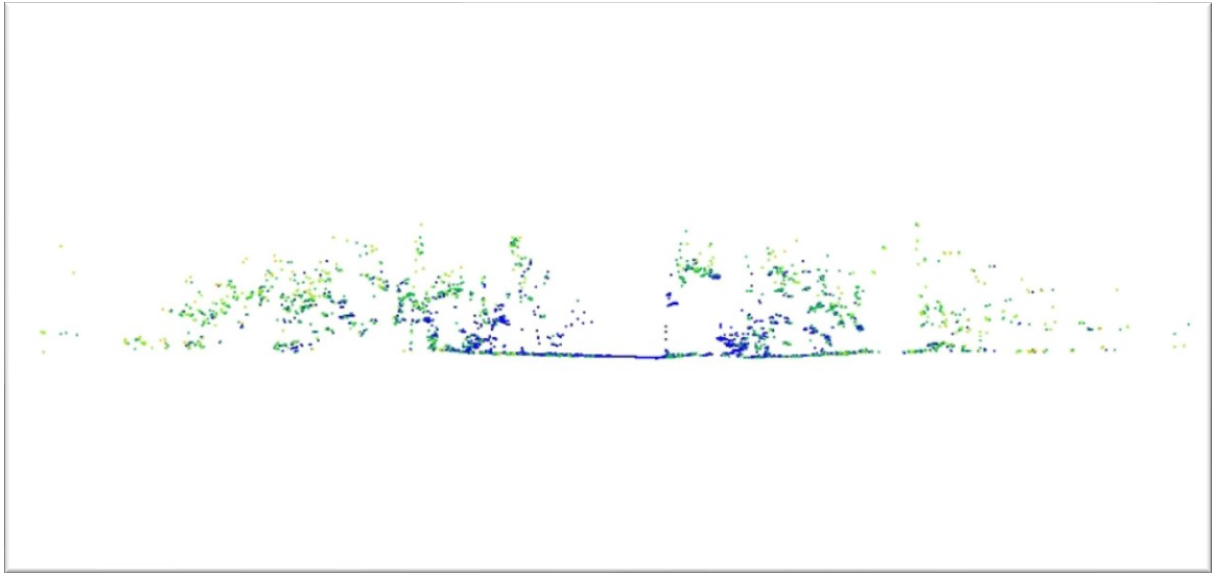
Dále, jsme provedli ještě dvě interpolace, ale s jinými parametry (kroky 9–13). Nyní, pro každou (0,25 x 0,25 m) mřížku jsme si vybrali druhou nejmenší výšku a na základě atributu „normalized Z“ byla zadána prahová výška (krok 9). Z důvodu, že lokality Moravský Kras a ML Křtiny mají rozdílnou terénní sklonitost a

vlastnosti, tato prahová výška byla různá. V případě Moravského krasu:  $\text{normalizedZ} < [0.3]$  m a  $\text{normalizedZ} > [-1]$  m; Ve ML Křtiny:  $\text{normalizedZ} < [0.2]$  m a  $\text{normalizedZ} > [-0.5]$  m. Tyhle parametry byly stanoveny experimentálně testováním různých hodnot a porovnáním výsledků. V případě Moravského krasu, kde je velký sklon terénu, asymetrická prahová výška byla použita pro zajištění, že za terénní body budou považovány všechny body, které jsou nižší než přiléhající rovina. V ML Křtiny bylo hodně nízké vegetace proto  $\text{normalizedZ} < [0.2]$  m. Potom jsme opět interpolovali dvě mřížky s velikostí buněk (0,25 x 0,25) m a obnovili atribut "normalized Z" (kroky 10–13).

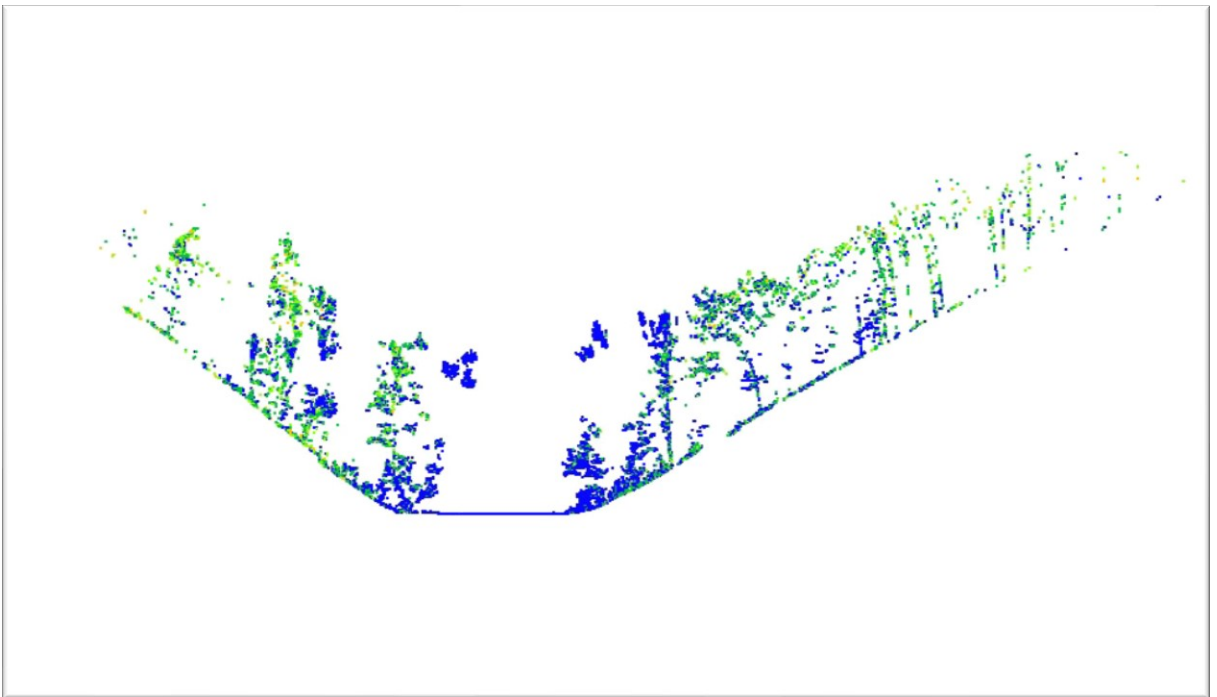
Nakonec bylo použito robustní filtrování založené na výstupu z kroku 3 a atributu z kroku 13 s parametry: poloměr hledání 1 m; rovinná interpolace; maximální počet iterací 100; směrodatná odchylka 0.30; v případě Moravského Krasu hodnota filtru byla stanovena: „normalized Z <0.3 m“, v případě ML Křtiny „normalized Z <0.2 m“. Výstupem filtrování je klasifikované terénní mračno bodů, ze kterého lze modelovat finální digitální model terénu. Výsledky modelování a diskuse jsou představeny v Kapitole 4.



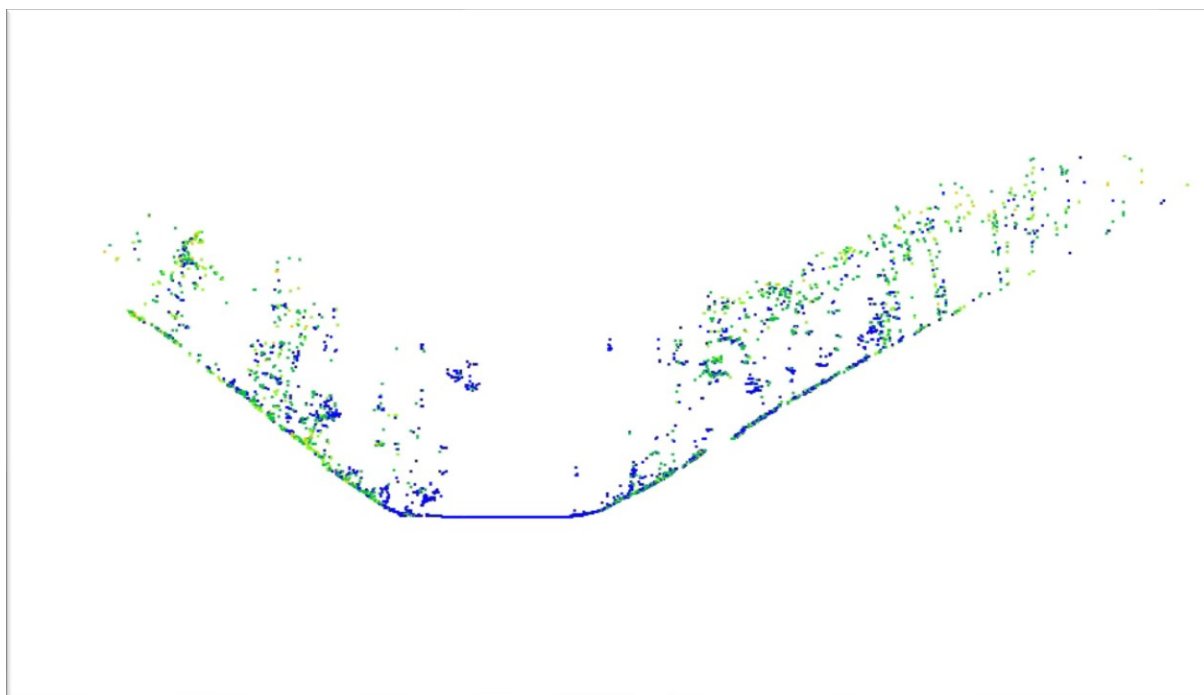
a. ML Křtiny cesta Hradská před ředěním bodů



b. ML Křtiny cesta Hradská po ředění bodů



c. Moravský Kras prosinec před ředěním bodů



d. Moravský Kras prosinec po ředění bodů

**Obr. 19** Obarvené profily podle odrazů (modrá (první odraz) - zelená – žlutá – červená (poslední)): a, c – surové mračno bodů z jednoho skeneru; b, d – ředěné mračno z jednoho skeneru

# Kapitola 4

## Experimentální výsledky

### 4.1. Moravský kras

#### 4.1.1 Datový soubor květen

Jak již bylo zmíněno, odfiltrované terénní body se použily pro generování digitálního modelu terénu. Nejdříve se podíváme na výsledky filtrování mračen bodů, které jsou uvedeny v Tab. 5.

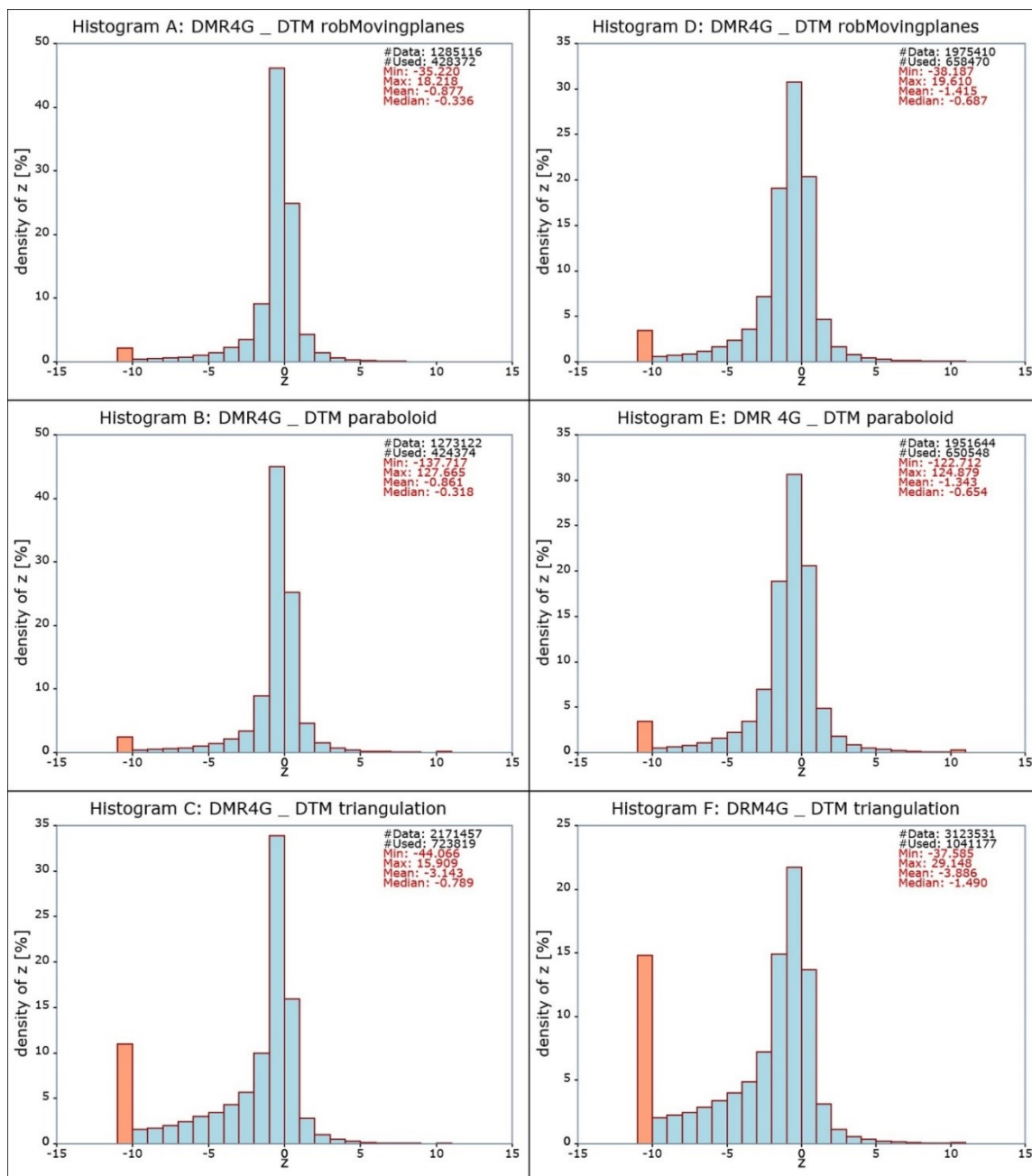
	Surové body	Před robustním filtrováním	Klasifikované terénní body
Suchý žleb	715,244,450	22,021,269	13,090,319
Pustý žleb	959,079,445	40,884,798	16,873,583

**Tab. 5** Počet bodů před a po filtrování MK kveten

V Tab. 5 je uveden počet surových bodů, bodů před a po robustním filtrování. Filtrované terénní body zabírají v průměru 2 % měřené datové sady. 98 % ostatních bodů odfiltrovány za pomoci našeho algoritmu. Průměrná hustota klasifikovaných terénních bodů je kolem 33 bodů/m<sup>2</sup> (původní hustota bodů dosahovala až 1000 bodů/m<sup>2</sup>). Pro interpolace terénu byly použity tři interpolační techniky: robust moving planes (DMT<sub>RMP</sub>), moving paraboloid (DMT<sub>MP</sub>) a triangulation (DMT<sub>TRI</sub>). Každá technika má své parametry. Pro robust moving planes – počet bodů použitých pro interpolaci je 35 v poloměru hledání 1.5 m. Pro moving paraboloid – počet bodů použitých pro interpolaci je 50 v poloměru hledání – 1.5 m. Pro triangulaci byl použit poloměr hledání 2 m. Každý DMT je generován ve mřížce 1 x 1 m. Tři různé interpolační techniky byly zvolené z důvodu porovnání vlivu interpolačních metod na kvalitu DMT. Výstupní DMT se porovnávali s digitálním modelem terénu České republiky 4G. Pro porovnání digitálních modelů je zapotřebí mít stejnou velikost



mřížky, proto data DMT 4G, kde velikost mřížky je 5 m, byly přeinterpolované metodou “nearest neighbour“ v softwaru OPALS na 1 x 1 m.



**Obr. 20** Porovnání DMT 4G a DMT z MLS dat (květen)

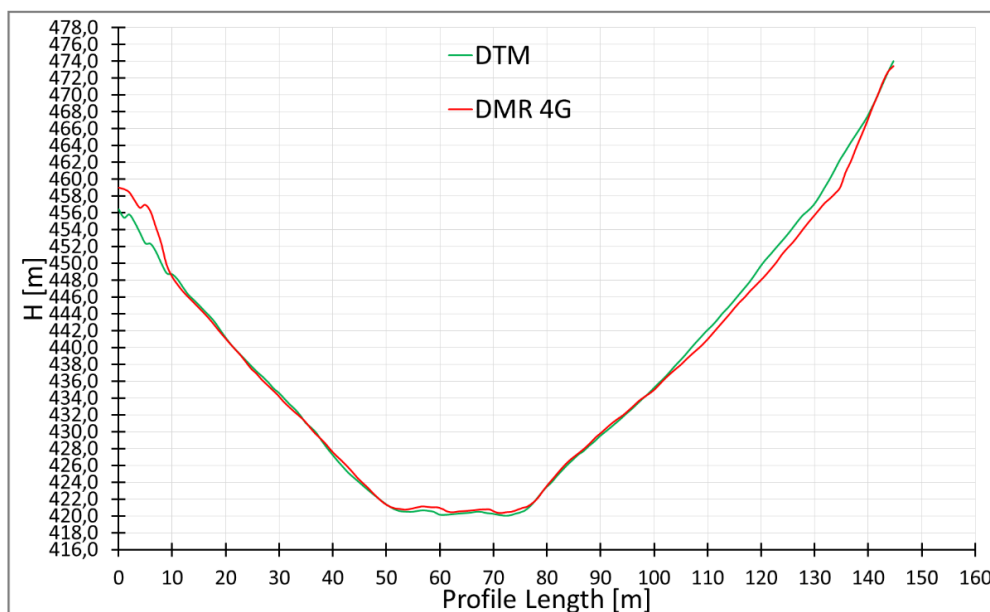
Výsledky porovnání digitálních modelů jsou zobrazené na Obr. 20 a v Tab. 6. Tabulka 6 uvádí rozdíl mezi DMT 4G a DMT interpolovanými různými interpolačními technikami. Tyto rozdíly jsou shrnuty z histogramů na Obr. 20. Histogramy A, B a C ukazují výškové rozdíly od porovnání DMT 4G a datové sady Suchý žleb, histogramy D, E, F – porovnání DMT 4G a datové sady Pustý žleb.

		Interpolační metoda		
Suchý žleb	Výškový rozdíl [m]	RobMoving Planes	Moving Paraboloid	Triangulace
	<i>Min</i>	-35.220	-137.717	-44.066
	<i>Max</i>	18.218	127.665	15.909
	<i>Mean</i>	<b>-0.877</b>	<b>-0.861</b>	<b>-3.143</b>
	<i>Median</i>	<b>-0.336</b>	<b>-0.318</b>	<b>-0.789</b>
Pustý žleb	<i>Min</i>	-38.187	-122.712	-37.858
	<i>Max</i>	19.610	124.879	29.148
	<i>Mean</i>	<b>-1.415</b>	<b>-1.343</b>	<b>-3.886</b>
	<i>Median</i>	<b>-0.687</b>	<b>-0.654</b>	<b>-1.490</b>

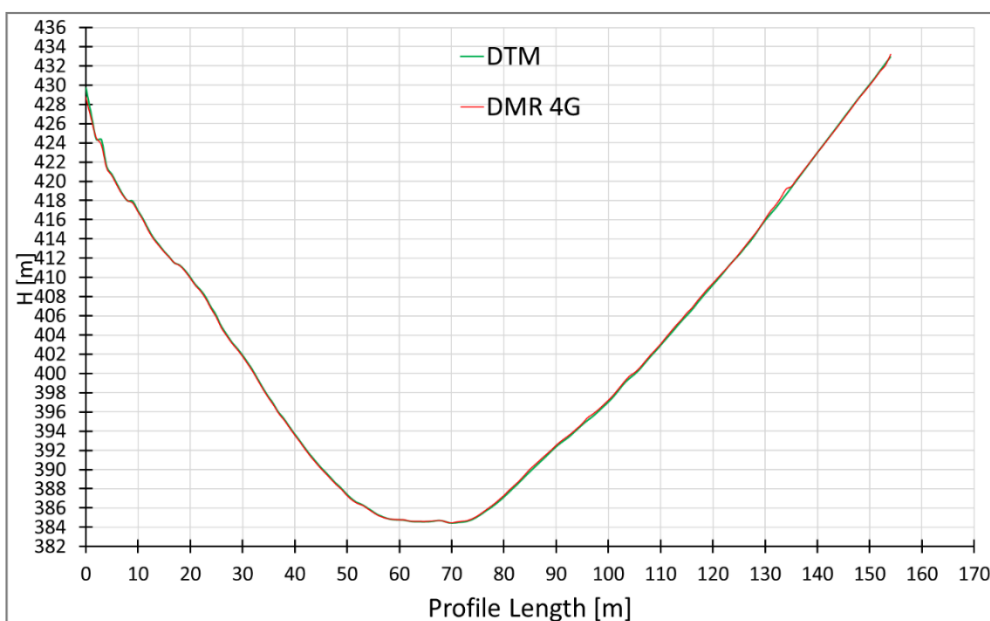
**Tab. 6** Výškové rozdíly mezi DMT a DMT 4G Suchý žleb a Pustý žleb (květen)

Jak lze vidět z Tab. 6 a histogramů C a F, výškové rozdíly mezi DMT 4G a DMT<sub>TRI</sub> ukazují nejhorší výsledky. Průměrný výškový rozdíl mezi zmíněnými modely je větší než 3 m, když mezi ostatními je přibližně 1 m. Na histogramech C a F je zobrazeno, že i výškové rozdíly větší než 10 m mají v obou případech téměř 15 %. Tohle svědčí že metoda triangulace není vhodná pro generování DMT z MLS dat v této lokalitě. Naplňuje mezery lépe, ale také spojuje izolované body, které ovlivňují celkovou přesnost mřížky. Průměrný výškový rozdíl mezi DMT 4G a DMT<sub>RMP</sub> je -0,877 m (Suchý žleb) a -1,415 m (Pustý žleb); V případě DMT<sub>MP</sub> je -0,861 m; -1,343 m respektive. Avšak při DMT<sub>MP</sub> jsou minimální a maximální výškové rozdíly s DMT 4G mnohem větší než u DMT<sub>RMP</sub>: -138 m a +128 m oproti -35 m a +18 m (dataset Suchý žleb). Tyto výsledky naznačují, že v generovaných DMT se nacházejí odlehlé body, nejvíce u DMT<sub>MP</sub>. S těchto výsledku také lze udělat závěr, že metoda robust moving planes je nejvhodnější pro generování DMT v této lokalitě. Na histogramu A (DMT 4G a DMT<sub>RMP</sub> porovnání) se ukazuje, že většinou 70 % srovnávaných dat má výškové rozdíly v rozmezí od -1 do 1 m. Na Obr. 21 lze najít grafy porovnání mezi DMT 4G (červená čára) a DMT<sub>RMP</sub> (zelená čára). Osa X je délka profilu v metrech a osa Y je výška terénu. Na Obr. 21(a) (Suchý žleb) je vidět, že rozdíly mezi daty se zvyšují na okrajích. Ve staničení 10–100 m jsou rozdíly mezi výškami menší než 1 m, ale na okrajích se blíží 2 m nebo více. Obvykle jsou tyto oblasti pokryty skalkami a také jsou špatně dosažitelné pro laserové

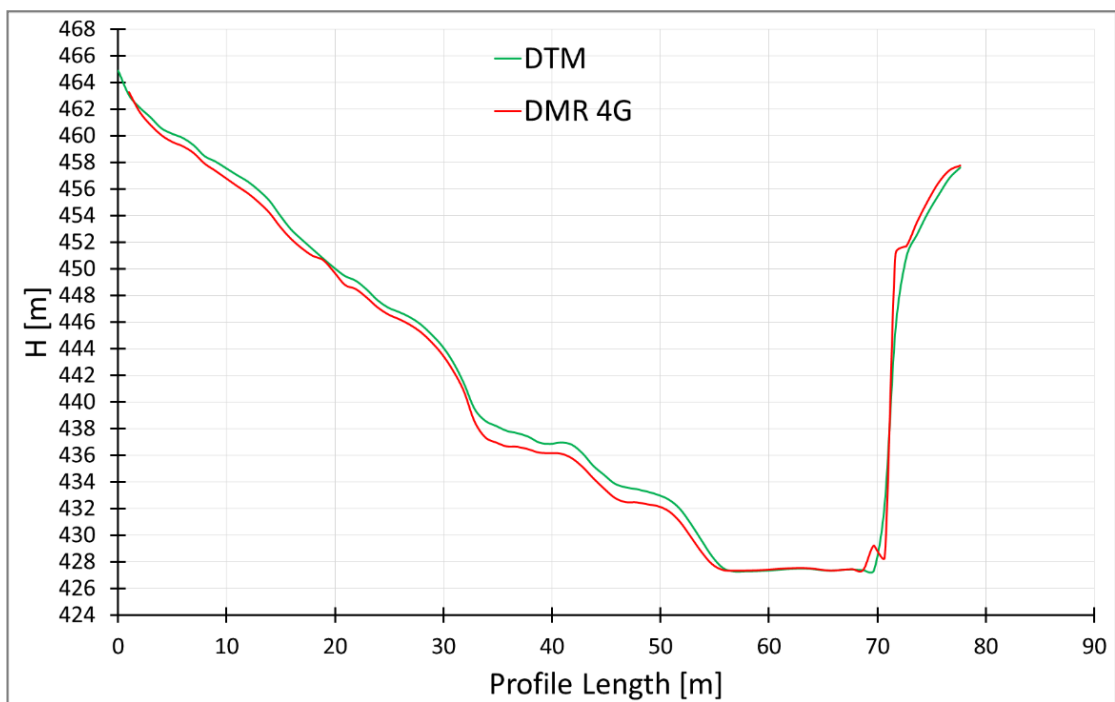
skenery v hustých lesích. Na Obr. 21(b) vidíme že profily se prolínají, tohle znamená, že v některých místech digitální modely se shodují. Histogram D ukazuje rozdíly mezi DMT 4G a DMT<sub>RMP</sub> z datové sady Pustý žleb. Na histogramu lze vidět, že pouze 50 % porovnávaných dat má rozdíly mezi -1 a 1 m. Oblast Pustého žlebu je strmější a kamenitější než u Suchého žlebu. Na Obr. 21(c) a Obr. 21(d) (Pustý žleb) se ukazuje, že větší rozdíly se objevují podél celého profilu.



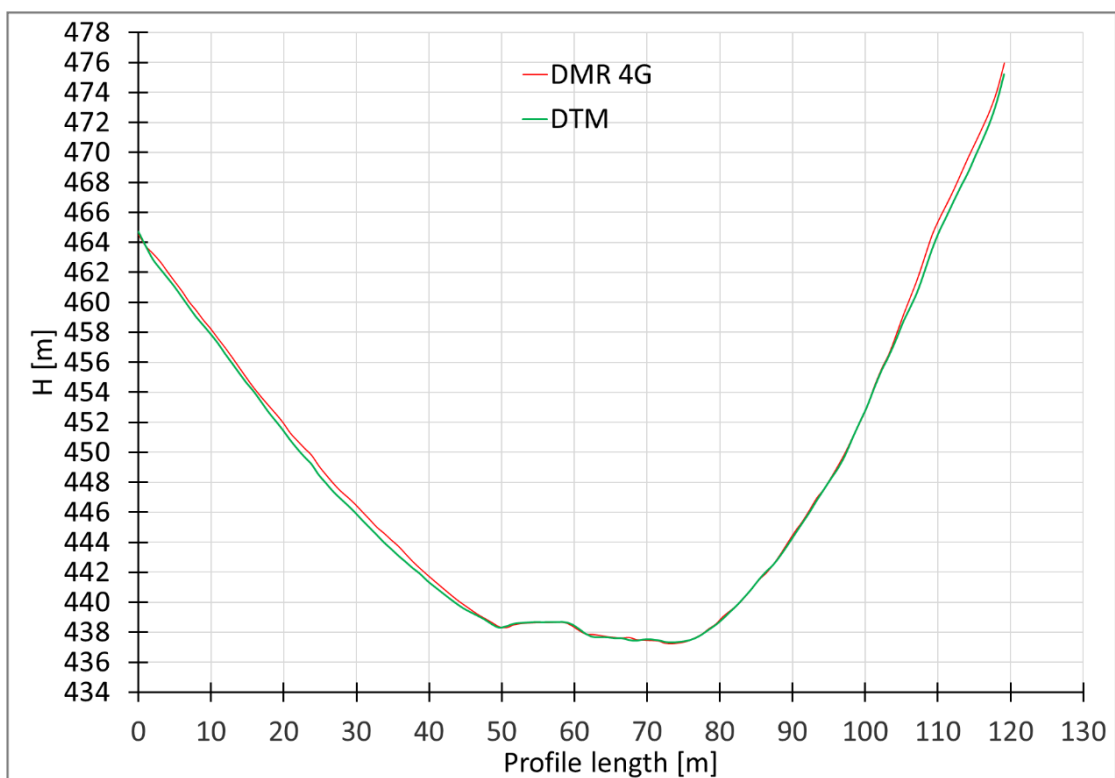
(a)



(b)



(c)

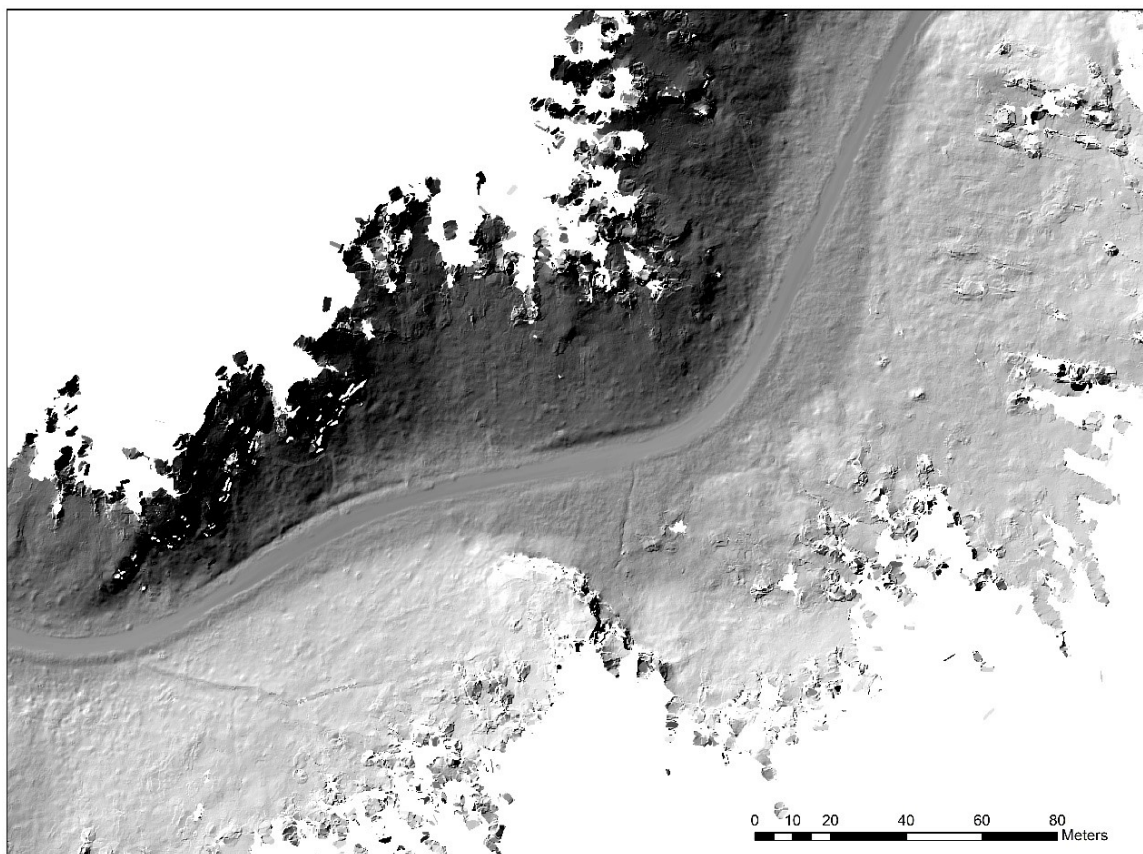


(d)

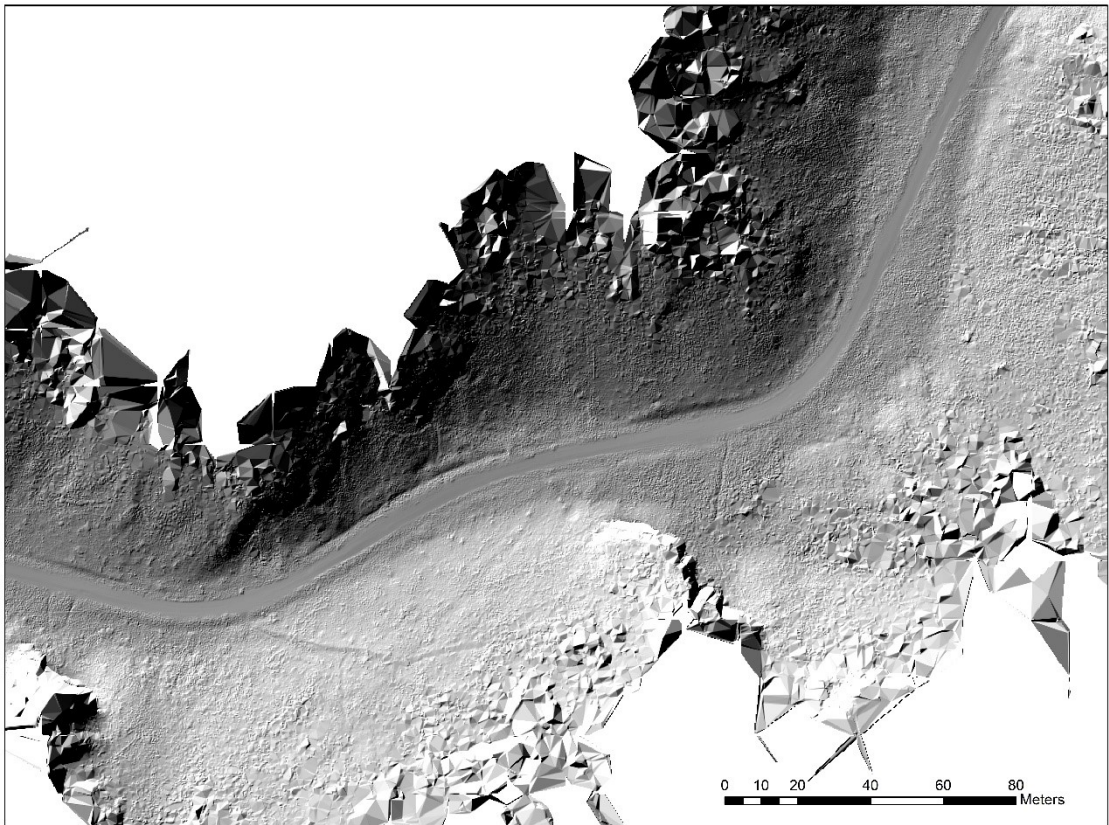
**Obr. 21** Porovnání profilů DMT (DMR) 4G a  $DMT_{RMP}$ :

(a);(b) Suchý žleb, (c);(d) Pustý žleb

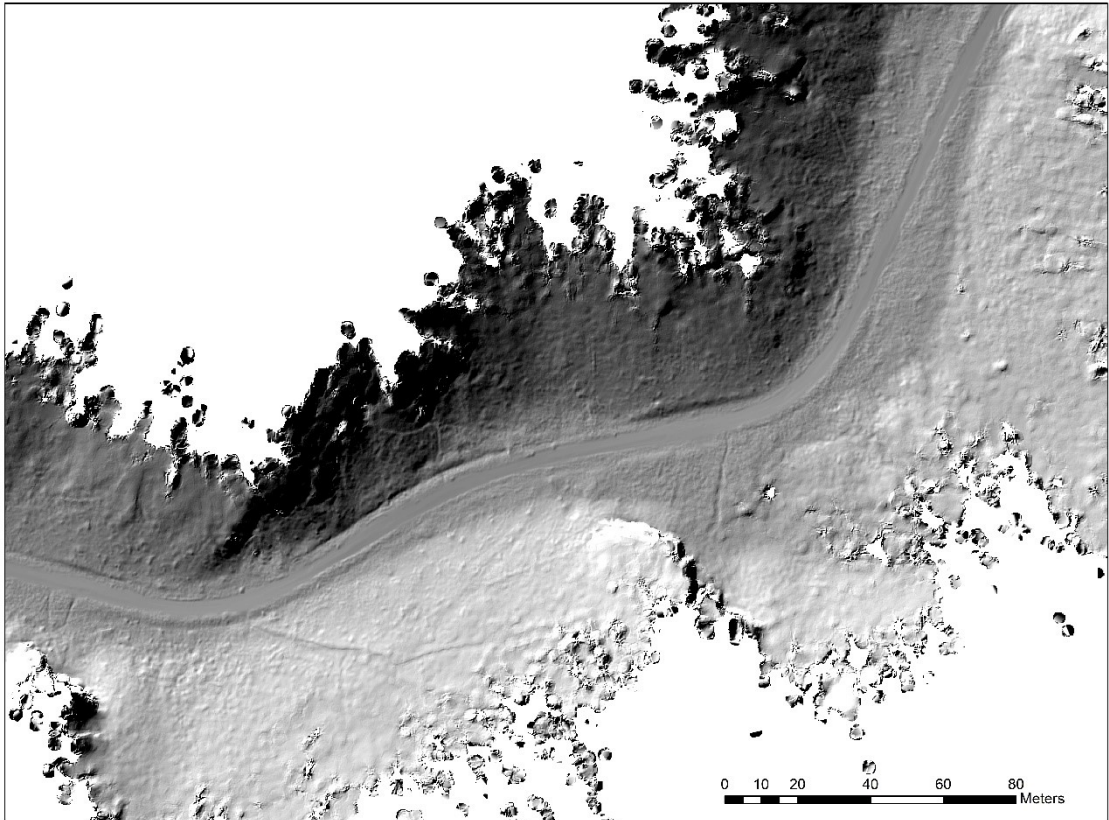
Jelikož hustota bodů v mračcích zůstává i po filtrování vysoká, lze digitální model terénu generovat i s menší mřížkou. Proto jsme vygenerovali DMT v Suchém žlebu s mřížkou 0,25 x 0,25 m s použitím stejných interpolačních metod. Výsledky jsou znázorněny na obrázcích 22 až 24. Vidíme že  $DMT_{TRI}$  (Obr. 23) je ostřejší, a  $DMT_{RMP}$  (Obr.22) a  $DMT_{MP}$  jsou více vyhlazené (Obr. 24).



**Obr. 22** Suchý žleb stínovaný  $DMT_{RMP}$  0,25 x 0,25 m.

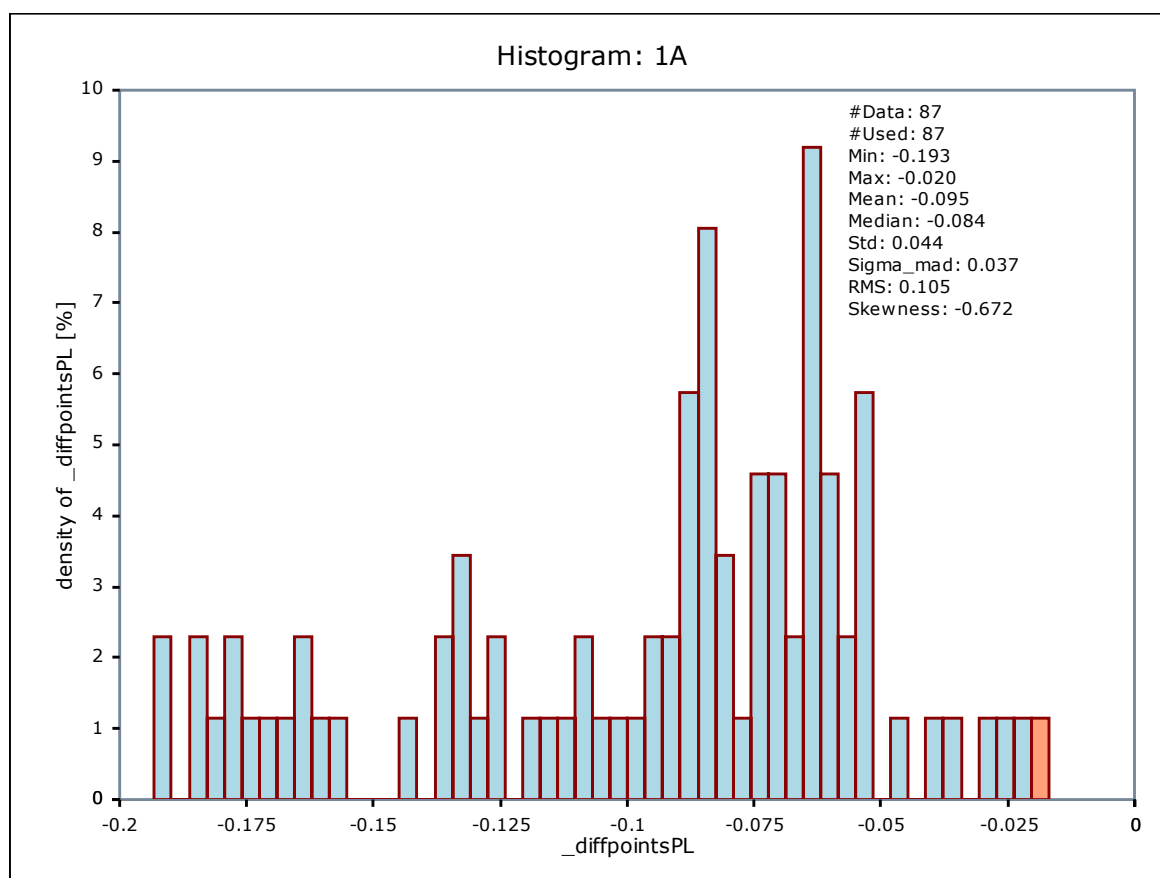


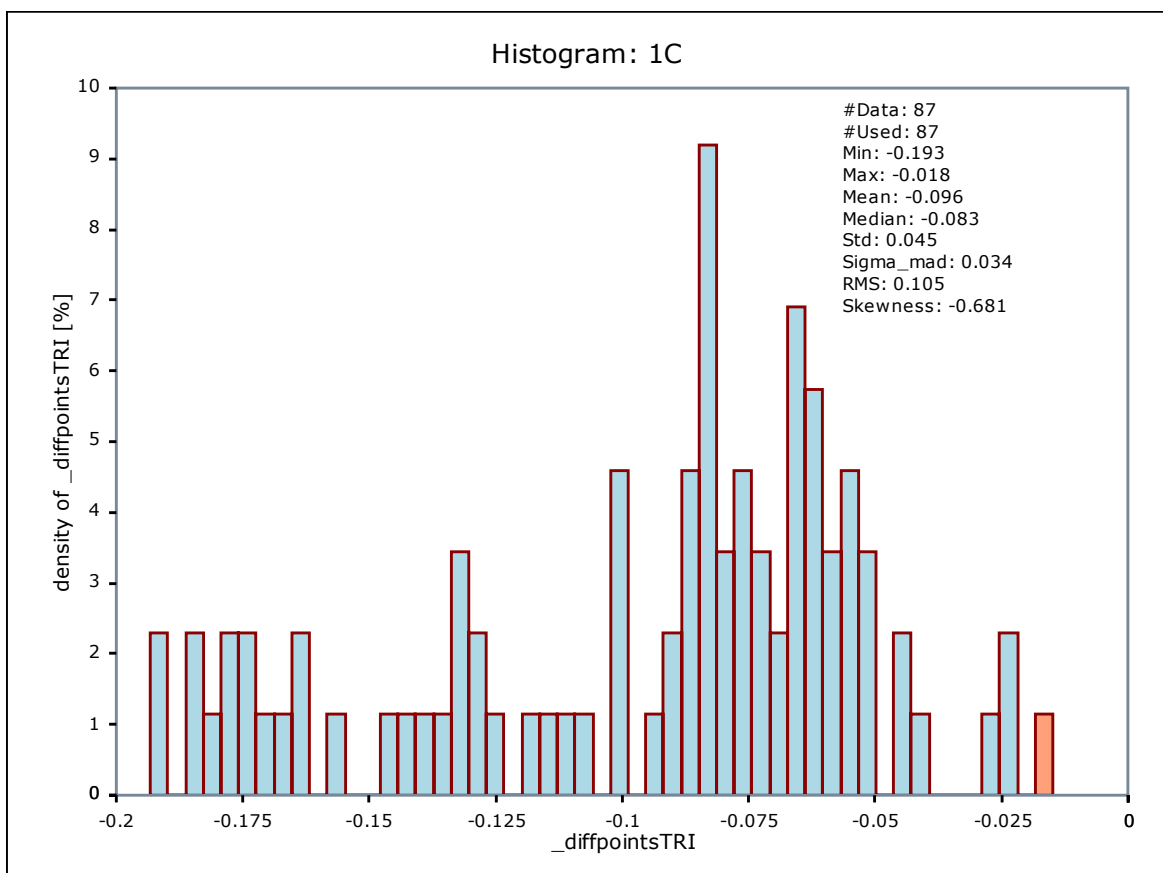
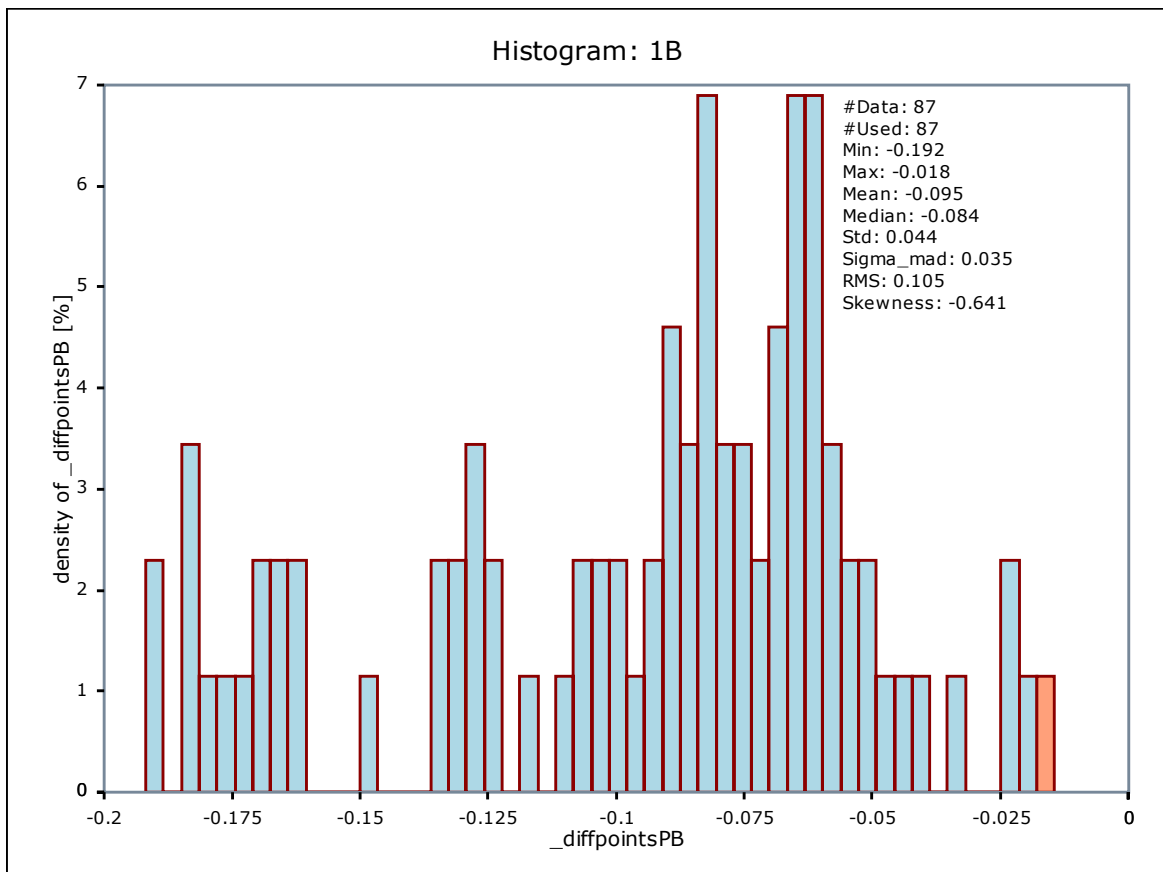
**Obr. 23** Suchý žleb stínovaný  $DMT_{TRI}$  0,25 x 0,25 m



**Obr. 24** Suchý žleb stínovaný  $DMT_{MP}$  0,25 x 0,25 m

Pro ověření přesnosti DMT s mřížkou 0,25 x 0,25 m byly použity zaměřené geodetické body (87 bodů) podél silnice, délka zaměřeného profilu je kolem 1 km. Výškové rozdíly mezi referenčními body a DMT jsou uvedeny v histogramech 1A, 1B a 1C na Obr. 25. Na histogramu 1A je zobrazen rozdíl mezi referenčními body a  $DMT_{RMP}$ , průměrný výškový rozdíl je -0,095 m, RMS je 0,105, největší rozdíl je -0,193 m. Na histogramu 1B je zobrazen rozdíl mezi referenčními body a  $DMT_{RMP}$ , průměrný výškový rozdíl je také -0,095 m, RMS je 0,105, největší rozdíl je -0,192 m. Nakonec, na histogramu 1C je zobrazen rozdíl mezi body a  $DMT_{TRI}$ , průměrný výškový rozdíl je -0,096 m, RMS je 0,105, největší rozdíl je -0,192 m. Tyto výsledky ukazují na vysokou kvalitu odvozeného DMT v rámci lesní cesty u všech třech interpolačních metod. Na histogramech také můžeme sledovat, že všechny hodnoty jsou negativní, to znamená, že referenční výšky jsou nižší než výšky DMT. Taková systematická chyba je pravděpodobně způsobena zhoršeným příjmem signálu GNSS při mobilním skenování v úzkém údolí.





**Obr. 25** Výškové rozdíly mezi ref. body a DMT 0,25 x 0,25 m (květen)



#### 4.1.2 Datový soubor prosinec

Jak již bylo uvedeno v Kapitole 3, Moravský kras byl skenován dva krát, v květnu a prosinci 2015. V prosinci 2015 bylo uskutečněno laserové skenování v Suchém žlebu. Data byla zpracována stejnou metodou (Tab. 4).

Dataset	Surové body	Před robustním filtrováním	Klasifikované terénní body
květen	715,244,450	22,021,269	13,090,319
prosinec	959,079,445	40,884,798	16,873,583

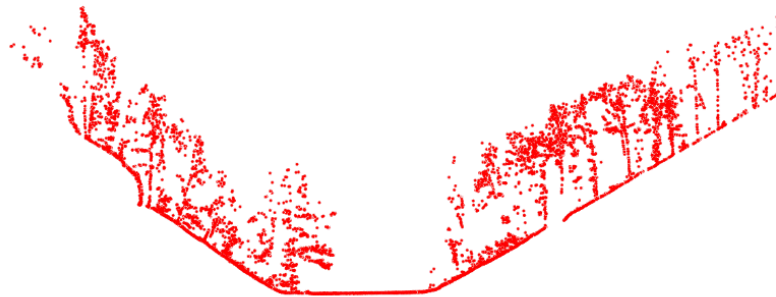
**Tab. 7** Počet bodů před a po filtrování dataset Suchý žleb

V Tab. 7 vidíme počet bodů před a po filtrování. Počet terénních bodů v prosinci je větší, tohle může být způsobeno obdobím bez vegetace, kde laserový paprsek měl více šancí proniknout na holou zem.

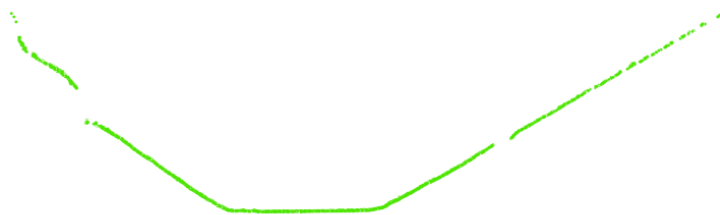
Na Obr. 26 můžeme pozorovat výkonnost algoritmu. Na Obr.26(a) jsou zobrazené surové body před filtrováním, kde je vidět, že i když se jedná o prosinec, na stromech zůstává listí. Na Obr.26(b) jsou zobrazené body po aplikovaném ředění – nejnižší bod v 0,15 x 0,15 m mřížce. Taková malá mřížka byla zvolena pro zachování vlastnosti mračna a abychom mohly odstranit část bodů a zjednodušit tím pádem zpracování dat. Na Obr.26(c) vidíme výsledek aplikování hierarchického robustního filtru – klasifikované terénní body, bez vegetace.



a) Surové body



b) Po ředění a před robustním filtrováním



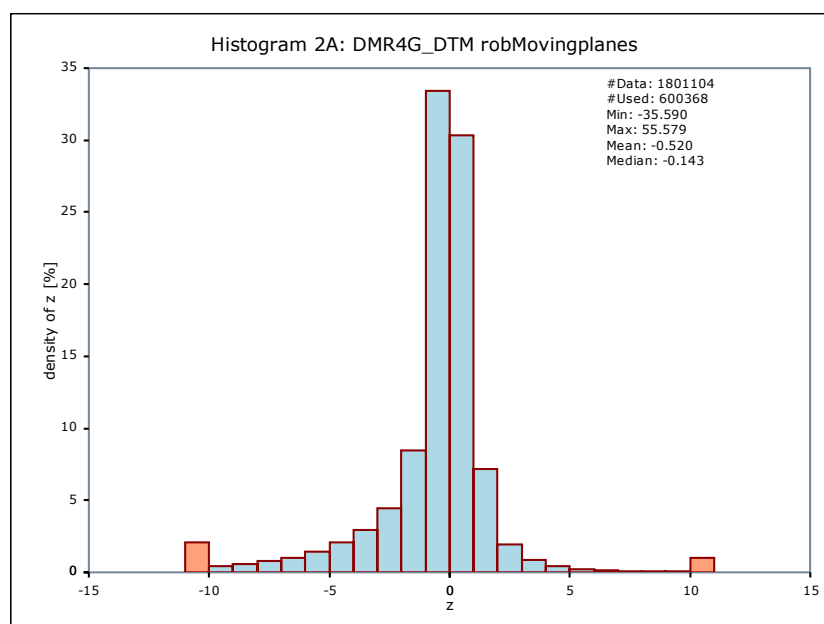
c) Klasifikované terénní body

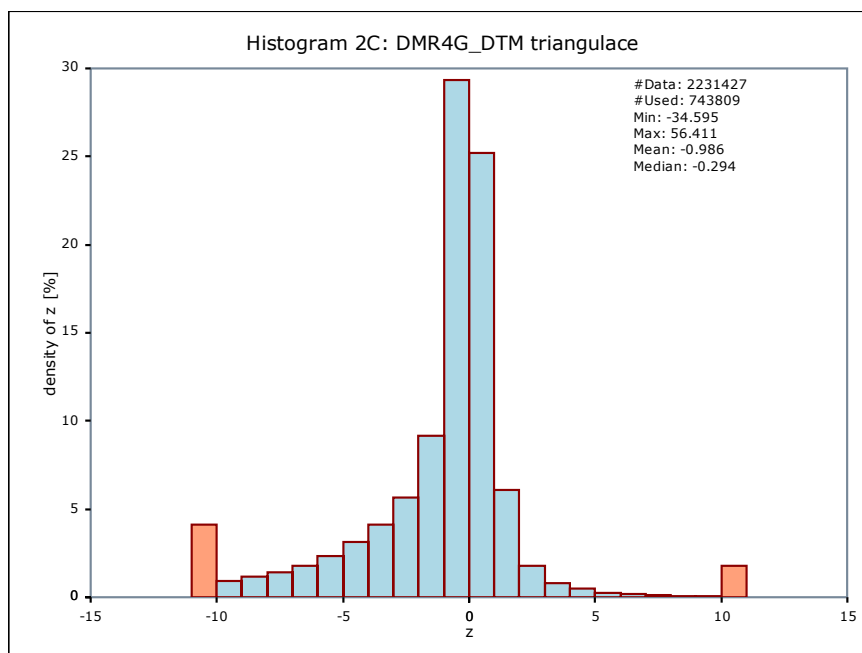
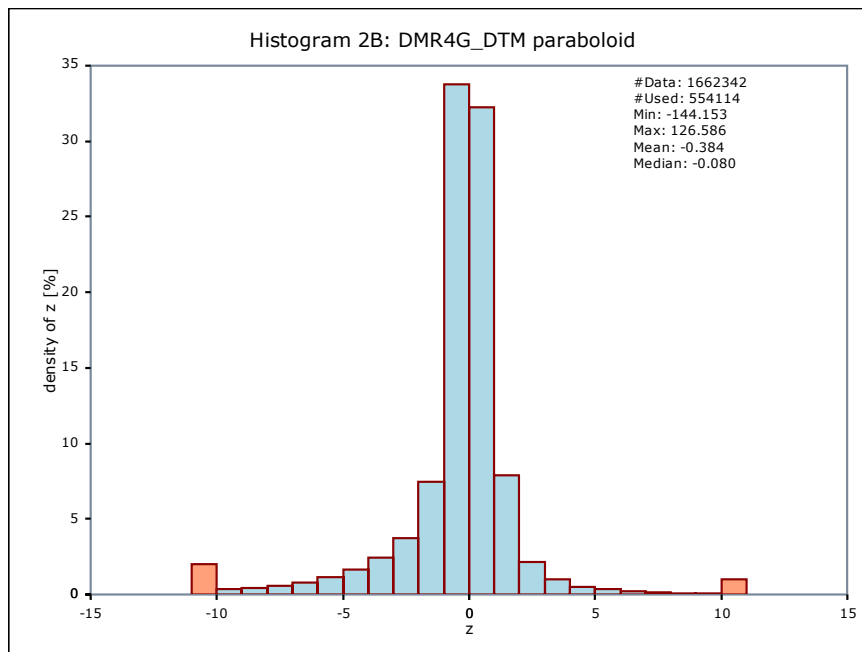
**Obr. 26** Body před a po robustním filtrování (datový soubor prosinec)

Stejně jako s daty v květnu, byly z dat z prosince vygenerovány tři DMT s velikostí mřížky 1 x 1 m a bylo provedeno porovnání z DMT 4G. Po empirické analýze, prosincové DMT byly generované s jinými parametry než květnové. Pro robust moving planes parametry: počet bodů použitých pro interpolaci je 50 v poloměru hledání 3 m. Pro moving paraboloid – číslo bodů použitých pro interpolaci je 150 v poloměru hledání – 2 m. Pro triangulace byl použit poloměr hledání 3 m. Každý DMT je generován ve mřížce 1 x 1 m. V květnových DMT byl poloměr hledání 1,5 m s nižším počtem použitých bodů. Bylo rozhodnuto, že pro mřížku 1 x 1 m tyto parametry měly být větší pro získání kvalitnějšího DMT. Výsledky porovnání dat z DMT 4G lze najít v Tab.8 a v histogramech na Obr. 27.

Suchý žleb		Interpolační metoda		
Dataset květen	Výškový rozdíl [m]	RobMoving Planes	Moving Paraboloid	Triangulace
	<i>Min</i>	-35.220	-137.717	-44.066
	<i>Max</i>	18.218	127.665	15.909
	<i>Mean</i>	<b>-0.877</b>	<b>-0.861</b>	<b>-3.143</b>
	<i>Median</i>	<b>-0.336</b>	<b>-0.318</b>	<b>-0.789</b>
Dataset prosinec	<i>Min</i>	-35.590	-144.153	-34.595
	<i>Max</i>	55.579	126.586	56.411
	<i>Mean</i>	<b>-0.520</b>	<b>-0.384</b>	<b>-0.986</b>
	<i>Median</i>	<b>-0.143</b>	<b>-0.080</b>	<b>-0.294</b>

**Tab. 8** Výškové rozdíly mezi DMT a DMT 4G Suchý žleb (květen a prosinec)

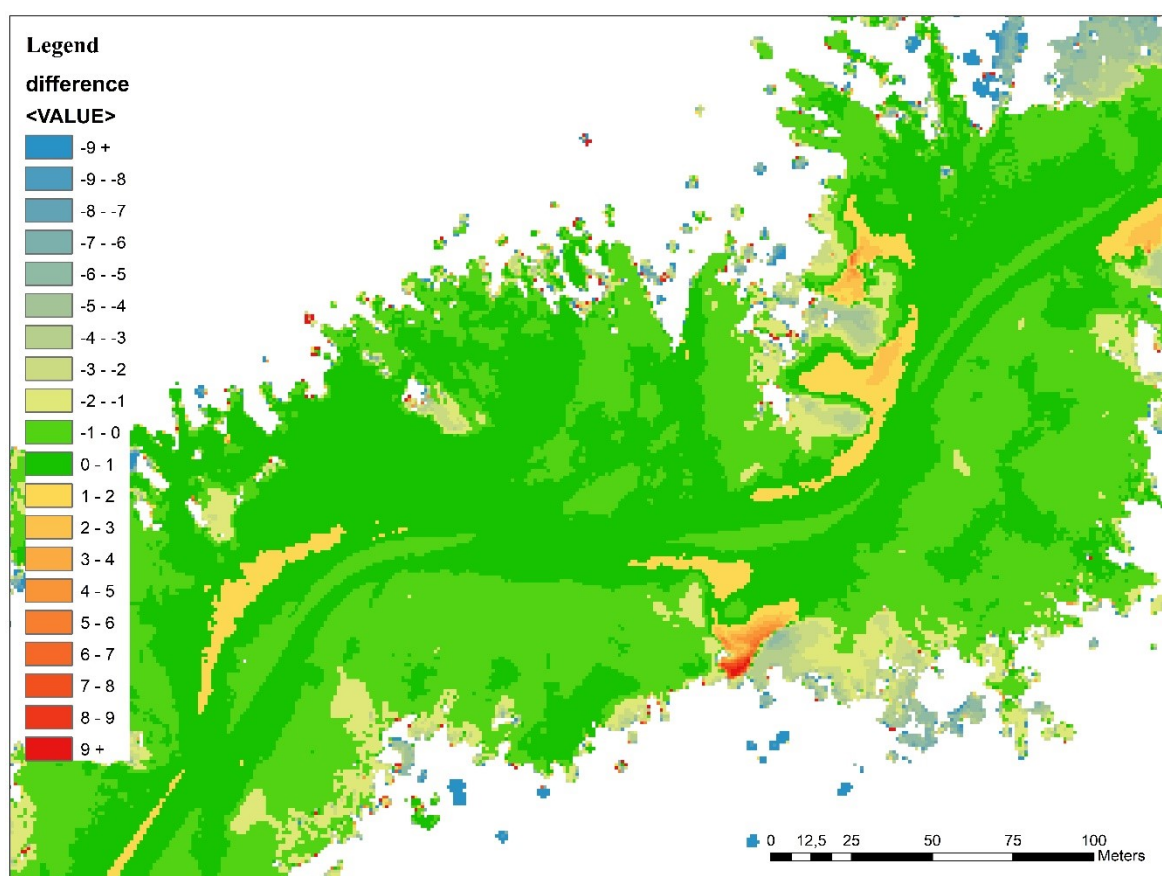




**Obr. 27** Porovnání DMT (DMR) 4G a DMT z MLS dat Suchý žleb (prosinec)

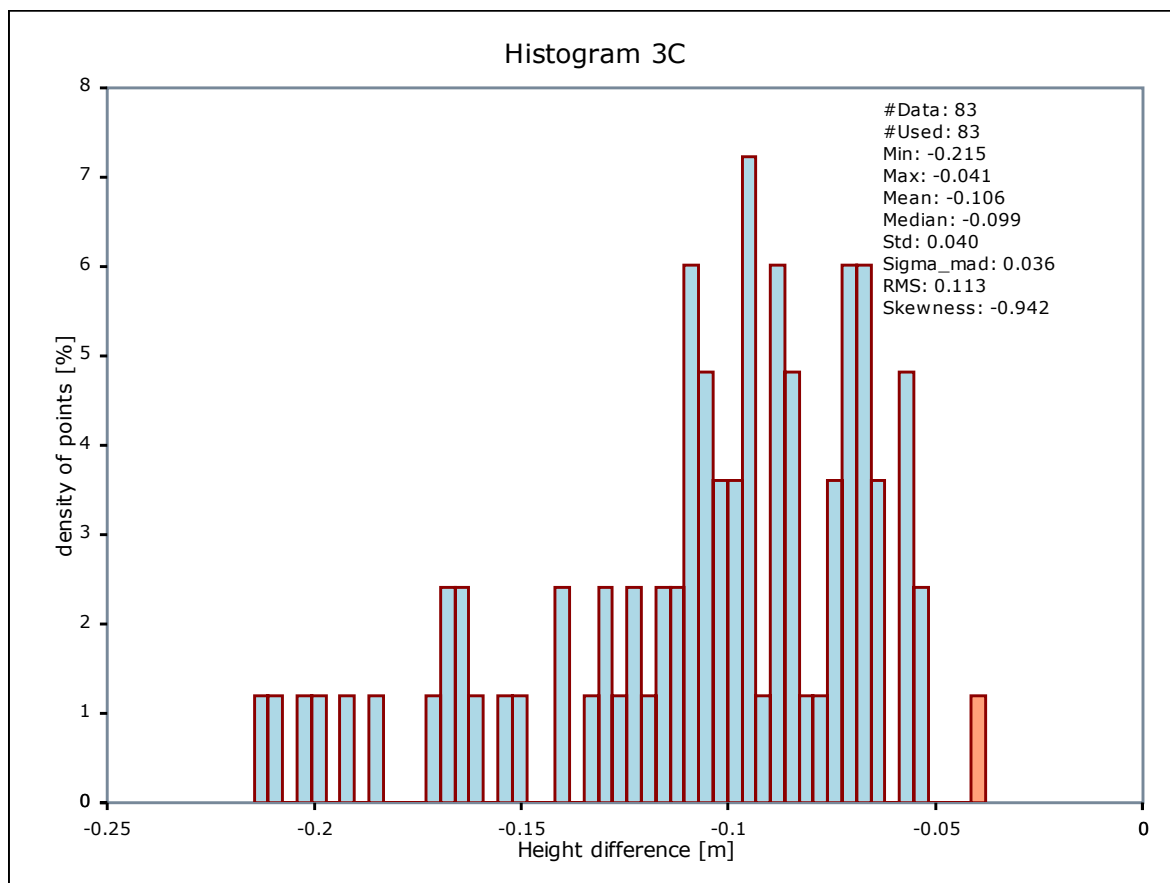
Z Tab. 8 vidíme, že střední výškový rozdíl z DMT 4G se zmenšil. Například, v  $DMT_{RMP}$  byl střední rozdíl  $-0.877$  m (dataset květen), v prosinci byl  $-0.520$  m (dataset prosinec). Zlepšil se i  $DMT_{TRI}$ , jestliže v květnu byl střední rozdíl více než 3 m, v prosinci byl  $-0.986$  m. Nejlepší výsledek je u  $DMT_{MP}$ , kde střední výškový rozdíl byl  $-0.384$  m. Takové zlepšení je způsobeno menším vlivem nízkého porostu, kterého v prosinci bylo mnohem méně než v květnu a také jinými parametry

modelování. Vysoké hodnoty min a max jsou způsobené pozůstatkem bodů na okrajích DMT (Obr. 28). Na Obr. 28 vidíme barevnou mapu zobrazující rozdíly mezi DMT 4G a  $DMT_{RMP}$  z MLS dat (datová sada prosinec). Na mapě vidíme, že největší rozdíly jsou na okrajích, kde lze pozorovat jenom částečně interpolované oblasti. V rámci silnice a ve většině lesní části výškový rozdíl je v rozmezí -1 až +1 m. V některých místech rozdíly sahají až 2-3 m – tohle může být způsobeno větším množstvím skalek v terénu a špatnou dosažitelností laserového paprsku.



**Obr. 28** Barevná mapa rozdílu mezi DMT 4G a  $DMT_{RMP}$  Suchý žleb (prosinec)

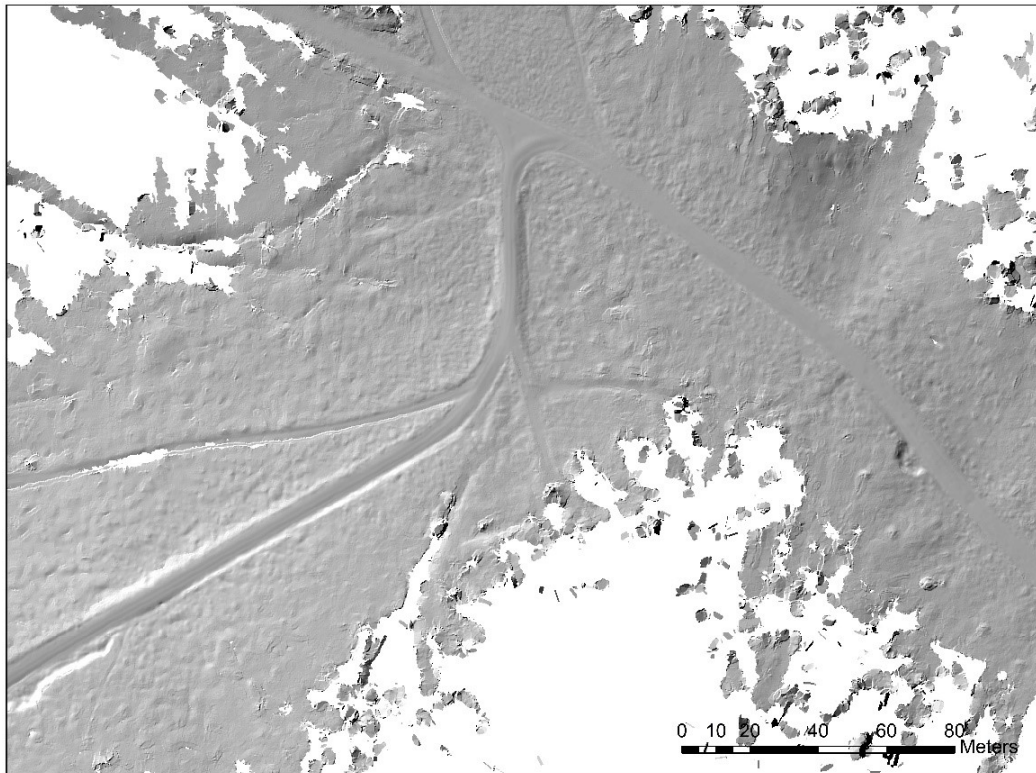
Na závěr jsme vygenerovali  $DMT_{RMP}$  z velikosti mřížky 0,25 x 0,25 m a použili 83 body pro ověření výškové přesnosti DMT. Výsledky jsou zobrazené na Obr. 29, kde průměrný výškový rozdíl je -0,106 m; RMS je 0,113, největší rozdíl je -0,215 m. Vidíme, že se výsledky zhoršili o 1 cm v porovnání s  $DMT_{RMP}$  v květnu. Pro porovnání bylo použito o 4 body méně, z důvodu, že byly mimo vygenerovanou oblast DMT v prosinci.



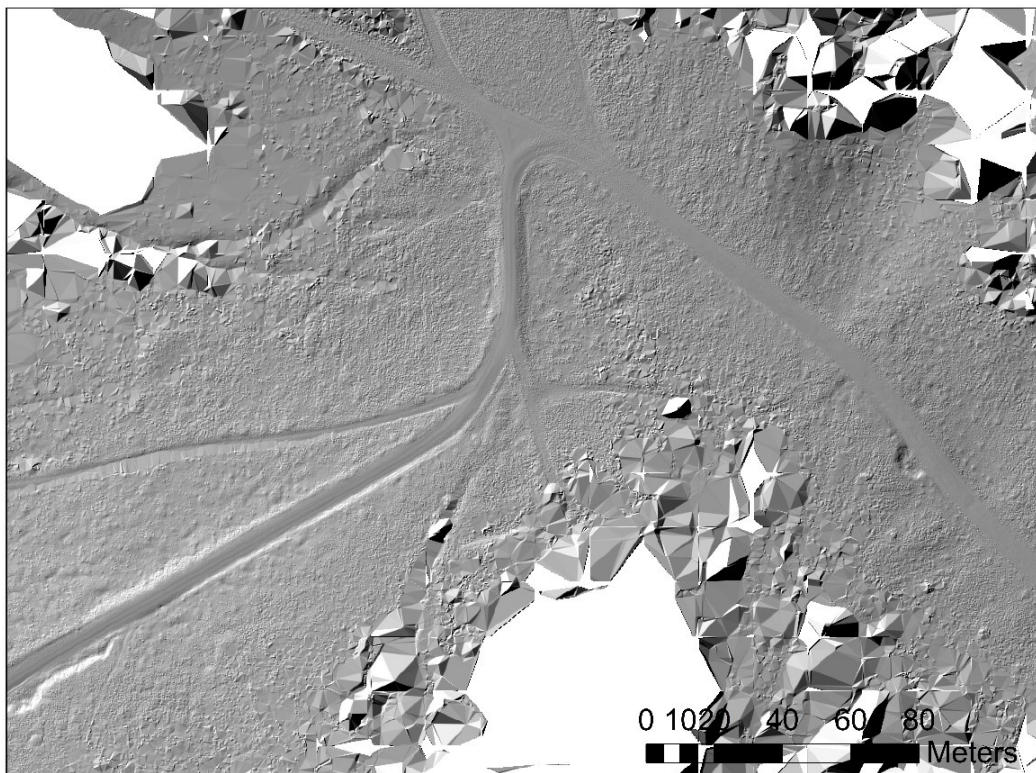
**Obr. 29** Výškové rozdíly mezi ref. body a  $DMT_{RMP}$  0,25 x 0,25 m (prosinec)

## 4.2. Masarykův les Křtiny

Datová sada z Křtin na cestě Hradská obsahovala 438,279,444 milionů bodů. Po aplikování hierarchického robustního filtrování jsme vyseletovali 16,093,393 milion terénních bodů. Hustota bodů v surovém mračně je kolem 1029 bodů/m<sup>2</sup>, hustota terénních bodů je 26 bodů/m<sup>2</sup>. Pro generování digitálního modelu terénu byla použita metoda robust moving planes a triangulace. Pro začátek jsme vygenerovali  $DMT_{RMP}$  s mřížkou 0,25 x 0,25 m, poloměr hledání 2 m, počet sousedních bodů 50 a  $DMT_{TRI}$  s poloměrem hledání 2 m (viz. Obr. 30). Dále se také vygenerovali  $DMT_{RMP}$  s mřížkou 0,05 x 0,05 m, poloměr hledání 1 m, počet sousedních bodů 30 a  $DMT_{TRI}$  s poloměrem hledání 1 m.

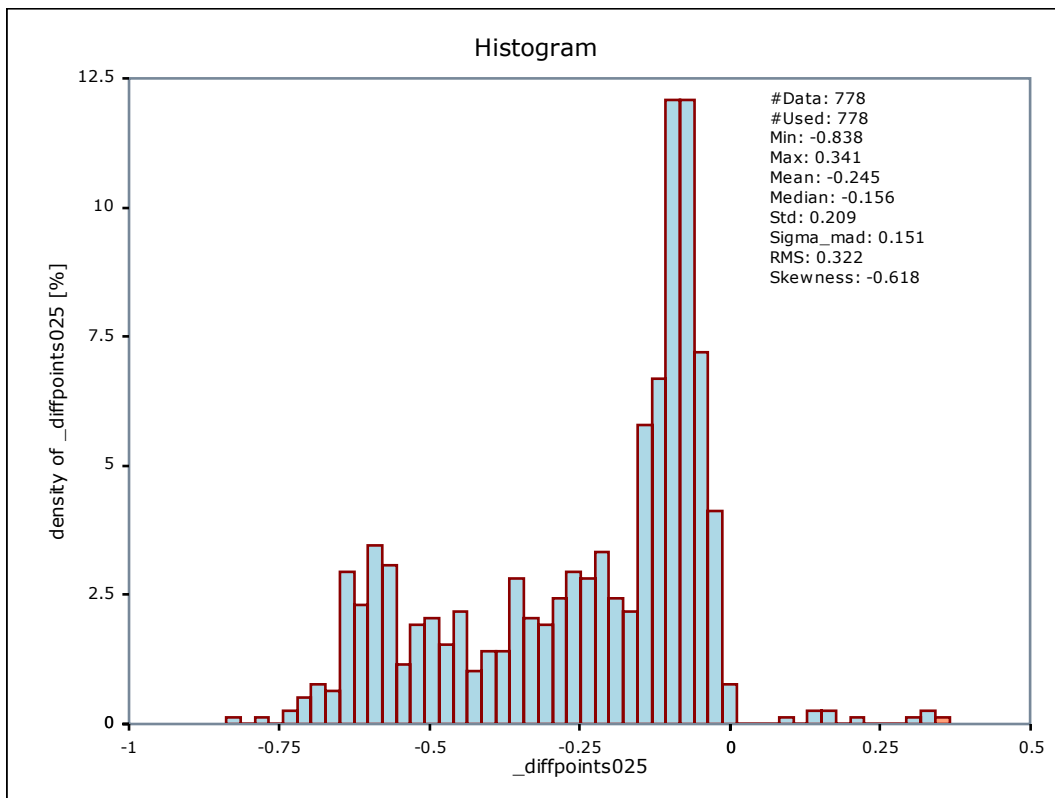


(a)

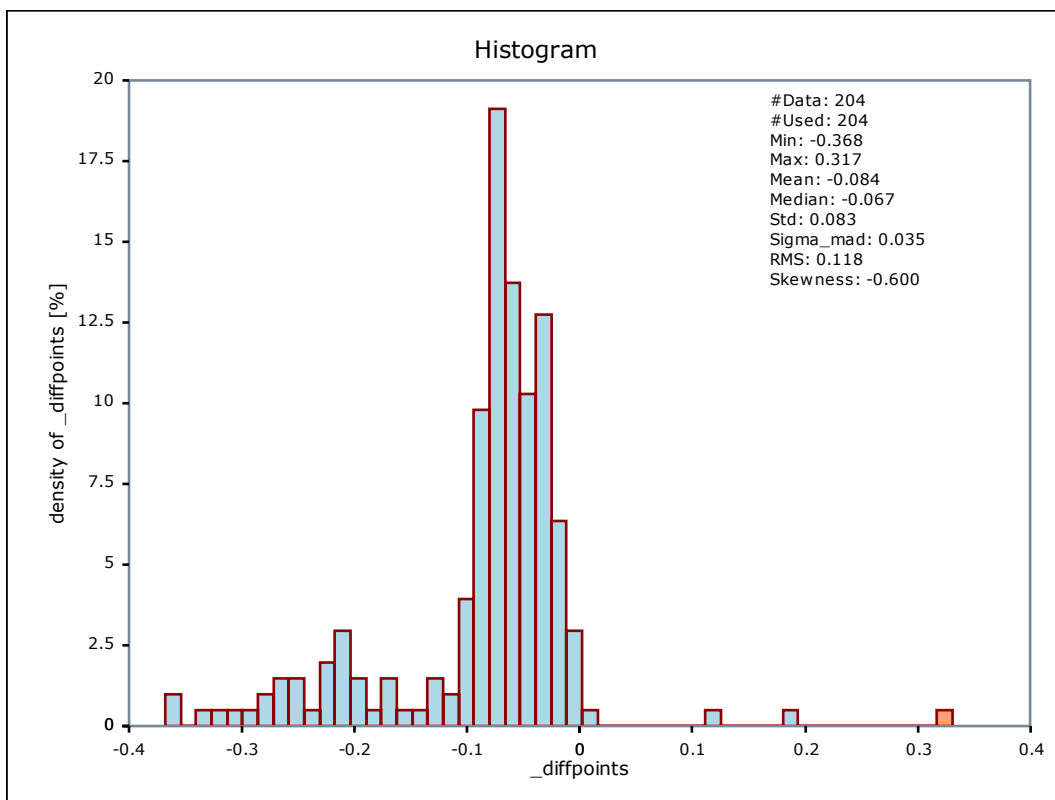


(b)

**Obr. 30**  $DMT_{RMP}$  a  $DMT_{TRI}$  respektive, 0.25 x 0.25 m, ML Křtiny



**Obr. 31** Výškové rozdíly mezi ref. body a DMT<sub>RMP</sub> ML Křtiny 0,25 x 0,25 m



**Obr. 32** Výškové rozdíly mezi ref. body (2) a DMT<sub>RMP</sub> ML Křtiny 0,25 x 0,25 m



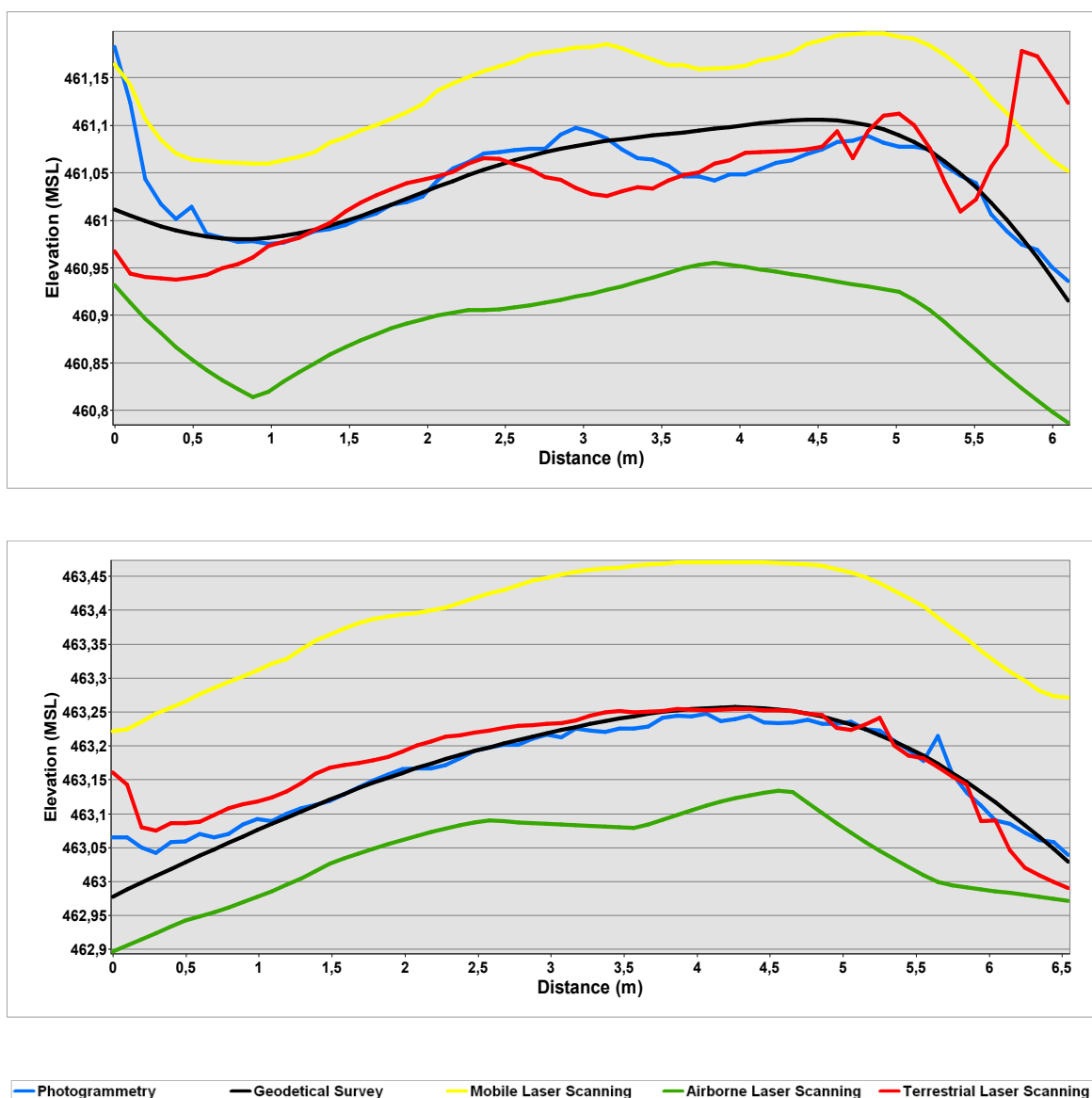
Pro vyhodnocení výškové přesnosti modelu byly použité 778 geodeticky zaměřených bodů [24] v rámci lesní cesty a jejich okrajů. Na Obr. 31 je představen histogram výškových rozdílů mezi referenčními body a  $DMT_{RMP}$  z velikosti mřížky 0,25 x 0,25 m. Průměrný výškový rozdíl je -0,245 m; RMS je 0,322, největší rozdíl je -0,838 m. Takové výsledky jsou horší v porovnání z Moravským Krasem, jsou způsobeny mnohem horším signálem GNSS. I když se očekávalo, že v okolí Masaryková lesu budou lepší výsledky, vidíme pravý opak. Na druhém obrázku (Obr. 32) je představen histogram výškových rozdílů, kde byla zkontrolována část cesty mimo les, s použitím 204 geodetických bodů. Průměrný výškový rozdíl je -0,084 m; RMS je 0,118, největší rozdíl je -0,368 m. Vidíme, že za podmínky otevřeného prostoru lze dosáhnout přesnosti cca 10 cm, což se shoduje i s výsledky dosaženými v Moravském Krasu. Celkově datová sada z Křtin byla složitější pro zpracování než data z Moravského Krasu. V Křtinách je hustší vegetace, a také měření probíhalo v červnu, tráva a porost kolem silnice nebyly vysekány, proto vznikly i větší výškové rozdíly v DMT.

$DMT_{RMP}$  z velikosti mřížky 0,05 x 0,05 m byl vytvořen pro porovnání kvality DMT lesní cesty s jinými metodami. Pro porovnání, Hruza a kol. [24] provedli pozemní skenování a fotogrammetrické snímkování stejné lesní cesty. Následně, byli vyhotovené digitální modely z pozemního skenování a fotogrammetrických dat s mřížkou 0,05 x 0,05 m [24]. Dále, pro porovnání bylo použito 30 geodeticky zaměřených profilů (404 bodů), detaily lze najít v [24]. Výsledky porovnání jsou uvedené v Tab. 9. Z tabulky lze vidět, že nejhorší výsledky vykazuje mobilní skenování, ale musíme podotknout, že fotogrammetrická a pozemní data byla georeferencována pomocí vlíčovacích bodů [24], což v případě MLS nebylo provedeno. Autoři ve svém článku také publikují profily pro porovnání všech metod (viz. Obr. 33). Z Obr. 33 lze vidět, že přesnost mobilního mapování hodně ovlivnila kvalita GNSS signálu, ale také můžeme pozorovat výkonnost našeho filtrování. Na profilech z ostatních dat vidíme pozůstatky vegetace a křivka není plynulá, kde

naopak křivka MLS (žlutá) vizuálně je podobná s křivkou geodetického měření (černá).

Metoda	Mean	Max	Min	RMSE
Mobilní laserové skenování	-0,2517	0,0049	-0,8459	0,4228
Pozemní laserové skenování	-0,0396	0,1160	-0,8930	0,1315
Fotogrammetrie	-0,0259	0,0400	-0,4389	0,0658
DMT 5G	0,1130	0,3539	-0,1469	0,1309

**Tab. 9** Statistické hodnocení vytvořených modelů [24]



**Obr. 33** Porovnání různých zdrojů dat [24]

# ZÁVĚR

V současné době automatizace výroby, velký význam má rychlost a jednoduchost zpracování geografických údajů. Při výrobě geoinformačních produktů hodně času zabírá manuální kontrola a oprava předzpracovaných dat. Proto se zkoumají způsoby pro urychlení produkčních procesů.

Disertační práce se zabývá mobilním laserovým skenováním v přírodním prostředí. Skenování bylo realizováno v Moravském krasu a ve školním lesním podniku Masarykův les Křtiny v různém ročním období.

V této práci je představený plně automatický algoritmus pro generování digitálního modelu terénu z mobilních laserových dat pořízených v lesním prostředí. Filtrovací algoritmus zahrnuje ředění bodů a hierarchické robustní filtrování. Žádná manuální oprava na filtrovaných datech nebyla provedena. Výhodou algoritmu je, že je možné provádět úpravu parametrů zpracování v závislosti na lokalitě a geometrii dat, na rozdíl od jiných softwarů, kde operátor nemá plnou kontrolu nad procesem. Proto také, algoritmus lze používat i na datech pořízených pozemním laserovým systémem.

Po extrakci terénních bodů, následně byly vygenerované digitální modely terénů pomocí různých interpolačních metod: robust moving planes, moving paraboloid, a triangulace. Bylo zjištěno, že nejučinnější metodou je robust moving planes, nejhůř se projevila metoda triangulace. DMT se vygenerovali s mřížkou 0,05 x 0,05 m; 0,25 x 0,25 m; 1 x 1 m. Průměrná výšková chyba činí -0,10 m; RMS 0,105 v Moravském krasu, a -0,08 m; RMS 0,118 v lesním podniku Masarykův les Křtiny podél silnice.

Vygenerované DMT v Moravském krasu byly porovnané s Digitálním modelem terénu České Republiky 4G. Největší výškové rozdíly se vyskytují na skalních místech, které jsou obtížně dosažitelné pro laserový paprsek. Ale i za těchto podmínek, střední výškový rozdíl mezi DMT 4G a  $DMT_{RMP}$  činí -0,52 m.

Metoda mobilního laserového skenování, může být použita jako doplňková metoda k leteckému skenování pro upřesnění digitálních výškových modelů v těžko dostupných lokalitách.

Odvozený digitální model terénu lze použít pro analýzu topografických změn terénu a monitorování morfologických struktur, modelování lesních silnic, prozkoumání geologických charakteristik a pro extrakce stromu podél cest. Také lze provádět mapování lesních cest a monitorování jejich stavu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. LAVENDER, S. a A. LAVENDER. *Practical handbook of remote sensing*. Boca Raton ISBN 978-149-8704-335.
2. CAMPBELL, J. B. a R. H. WYNNE. *Introduction to remote sensing*. 5th ed. New York: Guilford Press, 2011. ISBN 978-1609181765.
3. COLWELL, R. Uses and Limitations of Multispectral Remote Sensing. *In Proceedings of the Fourth Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor: Institute of Science and Technology, University of Michigan, 1966, pp. 71–100.
4. FISCHER, W. A., W. R. HEMPHILL, a A. KOVER. *Progress in Remote Sensing. Photogrammetria*, 1976, Vol. 32, pp. 33–72.
5. LINTZ, J., and D. S. SIMONETT. *Remote Sensing of Environment*. Reading, MA: Addison- Wesley. 1976, 694 pp.
6. BARRETT, E. C., and C. F. CURTIS. *Introduction to Environmental Remote Sensing*. New York: Macmillan, 1976, 472 pp.
7. HANZL, V., *Fotogrammetrie: Teoretické základy fotogrammetrie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
8. PAVELKA, K., J. ŠEDINA, J. PACINA, L. PLÁNKA, J. KARAS a V. ŠAFÁŘ. *RPAS - Remotely Piloted Aircraft System*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN ISBN978-80-01-05648-6.
9. KRAUS, K. *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. De Gruyter, 2007. ISBN 978-311-0190-076.
10. STANĚK, J., *Kapitoly z fotogrammetrie*. Praha: Střední průmyslová škola zeměměřická v Praze, 2013.

11. ZEMEK, F. a kol. *Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů*. Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR, 2014 ISBN 978-80-87902-07-3.
12. VOSSELMAN, G., a H., MAAS. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath: Whittles, 2010. ISBN 978-1439827987.
13. SHAN, J. a Ch. K. TOTH. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. Boca Raton: CRC Press/Taylor, 2009, ISBN 14-200-5142-3.
14. LEHTOMAKI, M., JAAKKOLA, A., HYYPPA, J., LAMPINEN, J., KAARTINEN, H., KUKKO, A., PUTTONEN, E., HYYPPA, H. Object Classification and Recognition From Mobile Laser Scanning Point Clouds in a Road Environment. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, vol. 54, no. 2, pp. 1226-1239.
15. JAAKKOLA, A. *Low-cost Mobile Laser Scanning and its Feasibility for Environmental Mapping*. Helsinki: School of Electrical Engineering, 2015, 168 s. Dostupné také z: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-6198-6>. DOCTORAL DISSERTATIONS. Aalto University.
16. HARING, A. Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestutzten Objekterfassung. Ph.D. thesis, Technical University Vienna, 2017. Dostupné také z: [https://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo\\_2043.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_2043.pdf)
17. HESSE, Ch., KUTTERER, H. A mobile mapping system using kinematic terrestrial laser scanning (KTLS) for image acquisition. In: *Proceedings of the 8th Conference on Optical*. 2007.
18. PAVELKA, K., 2012. Letecké laserové skenování v ČR a možnosti využití dat pro dokumentaci historické těžby nerostných surovin. In: *Sborník studentské vědecké konference, Telč 2012*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. ISBN 978-80-01-05134-4.

19. Počet odrazů laserového paprsku, *Gisgeography* [online]. [cit. 2018-09]. Dostupné z: <https://gisgeography.com/>
20. EL-SHEIMY, N., C. VALEO a A. HABIB. *Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications*. Norwood: Artech House, 2005. ISBN 15-805-3921-1.
21. MILLER, Ch. L., LAFLAMME, R. *The Digital Terrain Model-: Theory & Application*. MIT Photogrammetry Laboratory, 1958.
22. RESSL, C., BROCKMANN, H., MANDLBURGER, G., a PFEIFER, N. Dense Image Matching vs. Airborne Laser Scanning—Comparison of two methods for deriving terrain models. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2016(2), 57-73.
23. PFEIFER, N., STADLER, P., and BRIESE, C. 2001. Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm.
24. HRŮZA, P., T. MIKITA, N. TYAGUR, Z. KREJZA, M. CIBULKA, A. PROCHÁZKOVÁ a Z. PATOČKA. Detecting Forest Road Wearing Course Damage Using Different Methods of Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2018, 10(4).
25. LIM, S.; THATCHER, C.A.; BROCK, J.C.; KIMBROW, D.R.; DANIELSON, J.J.; REYNOLDS, B.J. Accuracy assessment of a mobile terrestrial lidar survey at Padre Island National Seashore. *Int. J. Remote Sens.* 2013, 34, 6355–6366.
26. ZHOU, L.; VOSSelman, G. Mapping curbstones in airborne and mobile laser scanning data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2012, 18, 293–304.
27. GUAN, H.; LI, J.; YU, Y. 3D urban mapping using a Trimble MX8 mobile laser scanning system: A validation study. *In Proceedings of the 8th International*

*Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2013)*, Tainan, Taiwan, 1–3 May 2013.

28. CHEN, Z., GAO, B., & DEVEREUX, B. State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data. *Sensors*, 2017, 17(1), 150.
29. KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 1998, 53, 193–203.
30. KRAUS, K.; PFEIFER, N. Advanced DTM generation from LIDAR data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 2001, 34, 23–30.
31. WACK, R.; WIMMER, A. Digital terrain models from airborne laser scanner data — a grid based approach. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2002, 34, 293–296.
32. ELMQVIST, M. Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2002, 34, 114–118.
33. VOSSSELMAN, G. Slope based filtering of laser altimetry data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 2000, 3, 935–942.
34. SITHOLE, G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2001, 34, 203–210.
35. ROGGERO, M. Dense DTM from laser scanner data. *In Proceedings of the OEPEE Workshop on Airborne Laser Scanning and Interferometric SAR*, Stockholm, Sweden, 1–3 March 2001.
36. AXELSSON, P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 2000, 4, 110–118.
37. SOHN, G., DOWMAN, I. Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the mdl criterion. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* 2002, 34, 336–344.



38. SITHOLE, G. a VOSSSELMAN, G. Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005, 36(Part 3/W19), 66–71.
39. TÓVÁRI, D., a PFEIFER, N. Segmentation based robust interpolation-a new approach to laser data filtering. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005, 36(3/19), 79-84.
40. BARTELS, M., WEI, H. Towards DTM generation from LIDAR data in hilly terrain using wavelets. *In Proceedings of the 4th International Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing in Conjunction with ICPR 2006*, Hong Kong, China, 20–24 August 2006; pp. 33–36.
41. BARTELS, M., WEI, H. Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data. *Pattern Recognit. Lett.* 2010, 31, 1089–1099.
42. BRETAR, F., CHEHATA, N. Terrain Modeling from Lidar Range Data in Natural Landscapes: A Predictive and Bayesian Framework. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2010, 48, 1568–1578.
43. ZHANG, K.Q., CHEN, S.C., WHITMAN, D., SHYU, M.L., YAN, J.H., ZHANG, C.C. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003, 41, 872–882.
44. LI, S.W., SUN, H.B., YAN, L. A. Filtering Method for Generating DTM based on Multi- scale Mathematic Morphology. *In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, 7–10 August 2011; pp. 693–697
45. CHEN, C.F.; LI, Y.Y.; LI, W.; DAI, H.L. A multiresolution hierarchical classification algorithm for filtering airborne LiDAR data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2013, 82, 1–9.

46. MAGUYA, A.S.; JUNTILA, V.; KAURANNE, T. Algorithm for Extracting Digital Terrain Models under Forest Canopy from Airborne LiDAR Data. *Remote Sens.* 2014, 6, 6524–6548.
47. SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G. Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2004, 59, 85–101.
48. BROVELLI, M.A., CANNATA, M., LONGONI, U.M. Managing and processing LIDAR data within GRASS. Proc. GRASS Users Conference, Trento, Italy, 11 – 13 September. University of Trento, Italy, 2002, 29 pp.
49. VOSSELMAN, G., MAAS, H. Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. *Proc. OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, 1-3 March, OEEPE Publication, 2001, no. 40, 11 pp.
50. ROGGERO, M. Airborne laser scanning: clustering in raw data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 2001, XXXIV (Pt. 3/W4), 227– 232.
51. PFEIFER, N., KOSTLI, A., KRAUS, K. Interpolation and filtering of laser scanner data—implementation and first results. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXII*, 1998, (Pt. 3/1), 153–159.
52. PFEIFER, N., STADLER, P., BRIESE, C. Derivation of digital terrain models in the SCOP environment. *Proc. OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, 1 – 3 March, OEEPE Publication, 2001, no. 40, 13 pp.
53. PU, S., RUTZINGER, M., VOSSELMAN, G., ELBERINK, S. O. Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6), pp. S28-S39.

54. NURUNNABI, A., WEST, G., a BELTON, D. Robust locally weighted regression for ground surface extraction in mobile laser scanning 3D data. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2013, 1(2), pp. 217-222.
55. VALLET, B. and PAPELARD, J. P. Road orthophoto/DTM generation from mobile laser scanning. In: *International Annals of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015, 3, W5, pp. 377-384.
56. GÉZERO, I.; ANTUNES, C. A. Registration method of point clouds collected by mobile lidar using solely standard las files information. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2017, 42.
57. PUTTONEN, E., LEHTOMÄKI, M., KAARTINEN, H., ZHU, L., KUKKO, A., a JAAKKOLA, A. Improved sampling for terrestrial and mobile laser scanner point cloud data. *Remote Sensing*. 2013, 5(4), 1754-1773.
58. BŁASZCZAK-BAK, W. New Optimum Dataset method in LiDAR processing. *Acta Geodyn. Geomater.* 2016, 13, 379–386.
59. BŁASZCZAK-BAK, W.; SOBIERAJ-ZŁOBINSKA, A.; KOWALIK, M. The OptD-multi method in LiDAR processing. *Meas. Sci. Technol.* 2017, 28, 075009.
60. SHEN, Y., SHENG, Y., ZHANG, K., TANG, Z. and YAN, S. Feature extraction from vehicle-borne laser scanning data. In *International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA)*. 2008, (Vol. 7285, p. 72850R).
61. JAAKKOLA, A.; HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H.; KUKKO, A. Retrieval algorithms for road surface modelling using laser-based mobile mapping. *Sensors* 2008, 8, 5238–5249.

62. WANG, J.; GONZALEZ-JORGE, H.; LINDENBERGH, R.; Arias-Sanchez, P.; Menenti, M. Geometric road runoff estimation from laser mobile mapping data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2014, 2, 385–391.
63. GUAN, H.; LI, J.; CAO, S.; YU, Y. Use of mobile LiDAR in road information inventory: A review. *Int. J. Image Data Fusion* 2016, 7, 219–242.
64. KUMAR, P.; ANGELATS, E. An automated road roughness detection from mobile laser scanning data. *ISPRS Arch.* 2017, 42, 91–96.
65. SZULWIC, J.; TYSIAC, P. Searching for road deformations using mobile laser scanning. *MATEC Web Conf.* 2017, 122.
66. YAN, L.; LI, Z.; LIU, H.; TAN, J.; ZHAO, S.; CHEN, C. Detection and classification of pole-like road objects from mobile LiDAR data in motorway environment. *Opt. Laser Technol.* 2017, 97, 272–283
67. BÖDER, V.; KERSTEN, T.P.; THIES, T.; SAUER, A. Mobile laser scanning on board hydrographic survey vessels—Applications and accuracy investigations. *In Proceedings of the FIG Working Week.* 2011, Marrakech, Morocco, 18–22 May 2011. Bridging the Gap between Cultures.
68. MITCHELL, T.; SUAREZ, G.; CHAZALY, B. Evaluation of coastal vulnerability with mobile laser scanning from a vessel. *In Proceedings of the IEEE Oceanic Engineering Society (OCEANS 2013), San Diego, CA, USA; 2013; pp. 1–5.*
69. BITENC, M.; LINDENBERGH, R.; KHOSHELHAM, K.; VAN WAARDEN, A.P. Evaluation of a LiDAR land-based mobile mapping system for monitoring sandy coasts. *Remote Sens.* 2011, 3, 1472–1491.
70. VAAJA, M., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, H., & ALHO, P. Mapping topography changes and elevation accuracies using a mobile laser scanner. *Remote Sensing.* 2011, 3(3), 587-600.

71. LINDENBERGH, R. C., BERTHOLD, D., SIRMACEK, B., HERRERO-HUERTA, M., WANG, J., EBERSBACH, D. Automated large scale parameter extraction of road-side trees sampled by a laser mobile mapping system. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015, 40(3), pp. 589-594.
72. GORTE, B., ELBERINK, S. O., SIRMACEK, B., WANG, J. IQPC 2015 track: Tree separation and classification in mobile mapping lidar data. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015, 40(3), pp. 607-612
73. KUKKO, A.; KAIJALUOTO, R.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; HYYPPÄ, J. Graph SLAM correction for single scanner MLS forest data under boreal forest canopy. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2017, 132, 199–209.
74. BRÁZDIL, K., 2015a. Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G), Czech Republic, <http://geoportal.cuzk.cz/> (15 March. 2016).
75. BRÁZDIL, K., 2015b. Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G), Czech Republic, <http://geoportal.cuzk.cz> (15 March. 2016).
76. Riegl data sheet [online]. [cit. 2018-05-27]. Available from: [riegl.com](http://riegl.com)
77. OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data. [online]. [cit. 2019-01-01]. Available from: <http://geo.tuwien.ac.at/opals/html/index.html>
78. OTEPKA, J., BRIESE, C. and NOTHEGGER, C. First steps to a topographic information system of the next generation. In: Symposium of ISPRS Commission IV - Geo Spatial Databases for Sustainable Development, Goa, India, 2006.
79. MANDLBURGER, G., J. OTEPKA, W. KAREL, W. WAGNER and N. PFEIFER. Orientation and Processing Of Airborne Laser Scanning Data (OPALS) - Concept and First Results Of A Comprehensive ALS Software. In: *IAPRS*. 2009, 55 - 60. Vol. XXXVIII: Part 3/W8. ISSN 1682-1750.

80. PFEIFER, N., KRAUS, K., KÖSTLI, A. Restitution of airborne laser scanner data in wooded areas. *GIS-HEIDELBERG*. 1999, 12, pp. 18-21.
81. BRIESE, C., PFEIFER, N., a DORNINGER, P. Applications of the robust interpolation for DTM determination. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2002, 34(3/A), 55-61.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Od holubů k moderním satelitům .....	11
Obr. 2 Vztah mezi snímkovými a objektovými souřadnicemi .....	14
Obr. 3 Skenovací šablony.....	18
Obr. 4 Typy pozemních laserových systémů .....	20
Obr. 5 Diagram mobilního skenování ve “stop and go” modu.....	21
Obr. 6 Diagram mobilního skenování v “on the fly” modu.....	21
Obr. 7 „Time of flight“ metoda laserového skenování .....	22
Obr. 8 Fázová metoda laserového skenování.....	23
Obr. 9 Swath a stopa leteckého laserového systému .....	24
Obr. 10 Počet odrazů laserového paprsku.....	24
Obr. 11 Komponenty systému RIEGL VMX-450 s volitelným kamerovým systémem VMX-450-CS6.....	39
Obr. 12 Riegl VMX-450 namontovaný na střechu auta .....	39
Obr. 13 Dotyková obrazovka zobrazující online průběh měření.....	40
Obr. 14 Část Moravského Krasu – letecká mapa.....	45
Obr. 15 Pustý žleb a Suchý žleb – DMT 5G.....	45
Obr. 16 Lesní cesta Hradská – letecká mapa .....	46
Obr. 17 Lesní cesta Hradská – DMT 5G .....	46

Obr. 18 Příklad váhové funkce pro eliminace ne-terénních bodů .....	49
Obr. 19 Obarvené profily podle odrazu .....	55
Obr. 20 Porovnání DMT 4G a DMT z MLS dat (květen) .....	57
Obr. 21 Porovnání profilů DMT 4G a DMT <sub>RMP</sub> : .....	60
Obr. 22 Suchý žleb stínovaný DMT <sub>RMP</sub> 0,25 x 0,25 m.....	61
Obr. 23 Suchý žleb stínovaný DMT <sub>TRI</sub> 0,25 x 0,25 m.....	62
Obr. 24 Suchý žleb stínovaný DMT <sub>MP</sub> 0,25 x 0,25 m .....	62
Obr. 25 Výškové rozdíly mezi ref. body a DMT 0,25 x 0,25 m (květen) .....	64
Obr. 26 Body před a po robustním filtrování (datový soubor prosinec).....	66
Obr. 27 Porovnání DMT 4G a DMT z MLS dat Suchý žleb (prosinec).....	68
Obr. 28 Barevná mapa rozdílů mezi DMT4G a DMT <sub>RMP</sub> Suchý žleb (prosinec)...	69
Obr. 29 Výškové rozdíly mezi ref. body a DMT <sub>RMP</sub> 0,25 x 0,25 m (prosinec).....	70
Obr. 30 DMT <sub>RMP</sub> a DMT <sub>TRI</sub> respektive, 0.25 x 0.25 m, ML Křtiny .....	71
Obr. 31 Výškové rozdíly mezi ref. body a DMT <sub>RMP</sub> ML Křtiny 0,25 x 0,25 m.....	72
Obr. 32 Výškové rozdíly mezi ref. body (2) a DMT <sub>RMP</sub> ML Křtiny 0,25 x 0,25 m	72
Obr. 33 Porovnání různých zdrojů dat .....	74



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přesnost DMT 4G na různém povrchu .....	35
Tab. 2 Přesnost DMT 5G na různém povrchu .....	37
Tab. 3 Výkonnost měření laserových skenerů VQ - 450.....	40
Tab. 4 Zpracování dat.....	51
Tab. 5 Počet bodů před a po filtrování MK kveten.....	56
Tab. 6 Výškové rozdíly mezi DMT a DMT 4G Suchý žleb a Pustý žleb (květen)	58
Tab. 7 Počet bodů před a po filtrování dataset Suchý žleb .....	65
Tab. 8 Výškové rozdíly mezi DMT a DMT 4G Suchý žleb (květen a prosinec) ...	67
Tab. 9 Statistické hodnocení vytvořených modelů .....	74