

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA  
V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování**



**ZHODNOCENÍ PŘESNOSTI DIGITÁLNÍHO  
MODELU RELIÉFU (DMR5G) V  
KRKONOŠÍCH**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Kateřina GDULOVÁ

**BAKALANT:** Leona KUBCOVÁ

**2017**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Leona Kubcová

Vodní hospodářství

Název práce

**Zhodnocení přesnosti digitálního modelu reliéfu (DMR5G) v Krkonoších**

Název anglicky

**Accuracy assessment of digital elevation model (DMR5G) in Krkonose mountains**

---

### Cíle práce

Cílem práce je srovnat kvalitu celorepublikově dostupného modelu terénu (DMR5G) s daty leteckého laserového skenování v Krkonošském národním parku a vlastním měřením.

- Jak se liší přesnost DMR5G a modelu terénu generovaného z dat leteckého laserového skenování
- Dosahuje DMR5G přesnosti udávané CUZK?
- Liší se přesnost modelů v různých prostředích (například pro vodní tok a otevřenou krajinu)?

### Metodika

Digitální modely terénu (DEM) jsou zásadním vstupem v mnoha odvětvích environmentálního modelování (např. hydrologie, modelování druhové distribuce). V současné době lze nalézt různé zdroje DEM, které jsou obvykle získány odlišnými metodami (a tudíž mají různé rozlišení a vertikální přesnost). Na území ČR je dostupný model terénu DMR5G (rozlišení 2m) a pro KRNP také velmi přesná data leteckého laserového skenování (LiDAR). Autorka se v literární rešerši zaměří na prostorová data, jejich kvalitu a na dostupné digitální modely terénu. Dostupné modely terénu porovná s vlastním měřením na území Krkonošského národního parku.

**Doporučený rozsah práce**

30 – 40 stran

**Klíčová slova**

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

---

**Doporučené zdroje informací**

- Deng, Y., Wilson, J. P., & Bauer, B. O. (2007). DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(2), 187-213.
- Goodchild, M. F. (2011). Scale in GIS: An overview. *Geomorphology*, 130(1), 5-9.
- Józsa, E., Fábrián, S. Á., & Kovács, M. (2014). An evaluation of EU-DEM in comparison with ASTERGDEM, SRTM and contour-based DEMs over the Eastern Mecsek Mountains. *Hung. Geog. Bull*, 63, 401-423.
- Rexer, M., & Hirt, C. (2014). Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2. 1/v4. 1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2), 213-226.
- Tarquini, S., Vinci, S., Favalli, M., Doumaz, F., Fornaciai, A., & Nannipieri, L. (2012). Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers & geosciences*, 38(1), 168-170
- Vaze, J., Teng, J., & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(10), 1086-1098.
- Wong, W. V., Tsuyuki, S., Ioki, K., & Phua, M. H. (2014, October). Accuracy assessment of global topographic data (SRTM & ASTER GDEM) in comparison with lidar for tropical montane forest. In *35th Asian Conference on Remote Sensing 2014, ACRS 2014: Sensing for Reintegration of Societies*.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2016/17 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Kateřina Gdulová

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

---

Elektronicky schváleno dne 27. 3. 2017

**doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2017

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 06. 04. 2017

---

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Kateřiny Gdulové. Veškerou literaturu a ostatní prameny, z nichž jsem čerpala při zpracování práce, řádně cituji a uvádím v seznamu použité literatury. Dále prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze dne 24. 4. 2017

*(Leona Kubcová)*

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí své bakalářské práce, paní Ing. Kateřině Gdulové, za její nekonečnou trpělivost, ochotu, cenné rady a komentáře. Dále bych ráda poděkovala celé rodině za pochopení a podporu po celou dobu studia.

V Praze dne 24. 4. 2017

*(Leona Kubcová)*

# ABSTRAKT

## Zhodnocení přesnosti digitálního modelu reliéfu (DMR5G) v Krkonoších

Digitální modely terénu jsou v současnosti stále oblíbenější a používanější způsob prezentace povrchu planety Země. Používány jsou například k odhadu solárního potenciálu, analýzám viditelnosti a k modelování druhové distribuce. Hlavním cílem práce je zhodnocení kvality volně dostupného DMR5G (Digitální model reliéfu 5. generace) s rozlišením 2 m a ověření přesnosti tohoto modelu udávané ČÚZK (v zalesněném terénu 0.30 m, v oblastech s přímým výhledem na oblohu 0.18 m). Součástí práce je evaluace digitálních modelů v různých typech prostředí: terén bez vegetace, vodní tok v lese a vodní tok s přímým výhledem na oblohu. Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výsledné rozdíly DEM je jejich rozlišení. Ke zpracování digitálních modelů terénu byl použit geografický informační systém ArcGIS společnosti ESRI. Kontrolním měřením na třech lokalitách v Krkonoších bylo zjištěno, že DMR5G terén nadhodnocuje. Též bylo zjištěno, že v místech s odkrytým terénem DMR5G splňuje chybu 0.18 m. Vzhledem k tomu, že je laserový paprsek vodou pohlcován, dochází ve vodních tocích k větším rozdílům. I přes to dosahuje DMR5G dobrých výsledků a u vodního toku v lese se od skutečnosti liší v průměru o 0.352 m. U toku mimo les je průměrná odlišnost oproti pozemnímu měření -0.225 m.

**Klíčová slova:** digitální model terénu, DMT, LiDAR, rozlišení, přesnost

# ABSTRACT

## Accuracy assessment of digital elevation model (DMR5G) in Krkonose mountains

Digital elevation models are currently still the most popular and most common method of presenting the planet's Earth surface. For instance, they are used to estimate the solar potential, to analyse visibility and also for modelling distribution of species. The main objective of this thesis is to evaluate the quality of freely available DMR5G (Digital Terrain Model of the Czech Republic of the 5th generation) with resolution 2 m and verified accuracy of this model stated by ČÚZK (in forested terrain 0.30 m and in areas with a direct view on the sky 0.18 m). Part of the thesis is evaluation of digital models in various types of environment: a terrain without any vegetation, watercourse in forest, watercourse with a direct view on the sky. The most important factor influencing final results DEM is their resolution. In order to process data of digital elevation models I used a geographical information system ArcGIS, from ESRI company. Control measurement at three locations in Krkonoše showed that DMR5G overestimate the terrain. As well as that DMR5G makes a mistake of 0.18 m at locations with uncovered terrain. Due to a fact, that laser beam is absorbed, we can see bigger differences arising in watercourses. Nevertheless, DMR5G still achieves good results and the watercourse in forest differs from reality on average by 0,352 m. At the watercourse out of the forest the difference against the underground measurement is -0,225 m.

**Keywords:** digital elevation model, DEM, LiDAR, resolution, accuracy

# OBSAH

1. ÚVOD .....	11
2. CÍLE PRÁCE .....	13
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	14
3.1. Digitální modely .....	14
3.2. Dělení DEM podle způsobu jejich vytvoření .....	14
3.2.1. Vektor .....	15
3.2.2. Rastr .....	15
3.2.3. TIN .....	16
3.3. Měřítko v GIS .....	17
3.4. Metody sběru dat .....	18
3.4.1. Družicové polohové systémy .....	18
3.4.2. Laserové snímání .....	19
3.4.3. Radarové snímání .....	20
3.5. Využití digitálních modelů terénu .....	22
3.6. Digitální modely současnosti .....	23
3.6.1. DMR4G .....	23
3.6.2. DMR5G .....	23
3.6.3. SRTM .....	23
3.6.4. ASTER .....	24
3.6.5. DEM z LiDARových dat .....	24
4. METODIKA .....	25
4.1. Terénní měření .....	25
4.2. Postup zpracování .....	25
5. VÝSLEDKY .....	29
5.1. Svatý Petr .....	29
5.1.1. Statistické údaje .....	29
5.1.2. Nadmořské výšky .....	31
5.1.3. Kontrolní profil .....	33



5.2.	Malá Úpa – svah.....	34
5.2.1.	Statistické údaje .....	34
5.2.2.	Nadmořské výšky .....	36
5.2.3.	Kontrolní profil .....	38
5.3.	Malá Úpa – potok .....	39
5.3.1.	Statistické údaje .....	39
5.3.2.	Nadmořské výšky .....	41
5.3.3.	Kontrolní profil .....	43
6.	DISKUSE.....	44
7.	ZÁVĚR .....	46
8.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	47
9.	PŘÍLOHY.....	52

## **SEZNAM ZKRATEK**

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální

DEM – Digital elevation model

DMP – Digitální model povrchu

DMP1G – Digitální model povrchu 1. generace

DMR4G – Digitální model reliéfu 4. generace

DMR5G – Digitální model reliéfu 5. generace

DMT – Digitální model terénu

DMT2(1m) – Digitální model terénu generovaný z leteckého laserového skenování s rozlišením jeden metr

DPZ – Dálkový průzkum Země

DSM – Digital surface model

DTM – Digital terrain model

GIS – Geografické informační systémy

GPS – Globální polohový systém

KRNAP – Krkonošský národní park

LiDAR – Light Detection and Ranging

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

TIN – Triangulated Irregular network

VHR – Very high resolution

# 1. ÚVOD

Geomorfometrie je věda zabývající se kvantitativními analýzami povrchu Země. Často bývá také nazývána geomorfologická analýza nebo analýza terénu (Tuček, 1998). Tato vědní disciplína vychází z matematiky, vědě o Zemi a informatiky (Hengel et Reuter, 2009). Existuje několik způsobů reprezentace zemského povrchu v GIS. Oblíbenou prezentací povrchu se stal digitální model terénu (anglicky Digital Elevation Model – DEM). Jedná se o reprezentaci, v níž je terén rozdělen pravidelnou mřížkou (rastrem, gridem) a každá buňka gridu obsahuje informaci o nadmořské výšce. Jako první s touto reprezentací přišla americká vědeckovýzkumná vládní agentura U. S. Geological Survey (USGS) roku 1974. DEM bývají často mylně považovány za přesnou kopii reality, ale jak uvádí název, jedná se pouze o model, tedy o přibližný popis reality. Navíc neustále dochází ke změnám a terén se mění, např. antropogenními a přírodními vlivy (Hengel et Reuter, 2009). DEM jsou využívány v mnoha odvětvích environmentálního modelování. Například pro analýzy viditelnosti (Klouček et al., 2015), modelování druhové distribuce (Moudrý et Šímová, 2013) nebo odhad solárního potenciálu (Fogl et Moudrý, 2016). V poslední době mají obvykle autoři takových prací na výběr z mnoha modelů terénu, které se však svou kvalitou a vhodností pro daný účel liší.

Jednou ze zásadních charakteristik dostupných DEM je jejich rozlišení. Reálný terén je reprezentován pravidelnou mřížkou (tzv. grid), kde každá buňka tohoto gridu nese informaci o nadmořské výšce. Buňky jsou obvykle čtvercového tvaru a rozlišení udává délku hrany buňky. Např. SRTM - 1, které je od roku 2016 dostupné téměř pro celou Zemi, disponuje rozlišením třicet metrů (Satgé et al., 2015). Pro území České republiky jsou dostupné nejen modely SRTM GL1 a GL3 s rozlišením ~ 30 m, respektive ~ 90 m, a ASTER s prostorovým rozlišením 15 m, ale také modely s vysokým rozlišením (VHR, very high resolution). V současnosti jsou stále dostupnější data leteckého laserového skenování (LiDAR), které se řadí mezi data VHR. Z nich jsou odvozeny modely DMR5G (rozlišení 2 m) a DMR4G s rozlišením pět metrů.

Rozdílné metody sběru dat a tvorby DTM jsou příčinou rozdílů mezi modely. Například pro DMR5G, který je vytvořen z dat leteckého laserového skenování, platí, že v zalesněných terénech je chyba přesnosti vyšší, tudíž dochází k vyšším rozdílům oproti jiným modelům. Naopak na loukách, kde je přímý výhled na oblohu, dosahujeme přesnějších měření, ze kterých vznikají spolehlivější kopie terénu. Český úřad zeměměřický a katastrální garantuje střední chybu výšky v lesích třicet

centimetrů a 0,18 m v odkrytých terénech u DMR5G (ČÚZK, 2010). Dalším zdrojem rozdílů je způsob, jakým modely terén reprezentují. Například DMR4G (Digitální model reliéfu České republiky 4. generace) je tvořen pravidelnou sítí bodů 5x5 metrů, kdežto DMR 5G (Digitální model reliéfu České republiky 5. generace) tvoří síť trojúhelníková, nepravidelná (ČÚZK, 2010). Z uvedeného je patrné, že volba modelu může značně ovlivnit výsledky analýz, a proto je důležité přesnost DEM evaluovat (např. Vaze et al., 2010). Tato bakalářská práce se zabývá existujícími odlišnostmi v digitálních modelech terénu vzniklých pozemním měřením a leteckým laserovým skenováním.

## 2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je analýza a zhodnocení kvality volně dostupného modelu terénu DMR5G (rozlišení 2 m) s digitálním modelem (rozlišení 1 m) generovaným z dat leteckého laserového skenování (LiDAR) na území Krkonošského národního parku. Další částí práce je zhodnocení přesnosti těchto digitálních modelů podle vlastních naměřených dat v zájmových oblastech. Evaluace bude probíhat v různých typech prostředí – terén bez vegetace, vodní tok v zalesněném území a vodní tok v odkrytém terénu.

***Dílčími cíli je zodpovězení následujících otázek:***

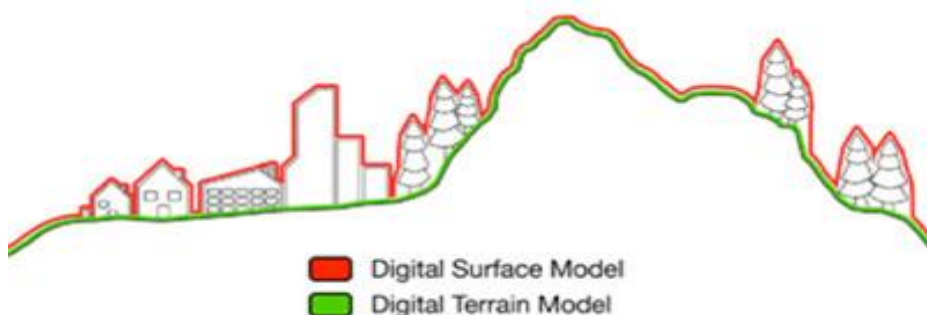
- *Liší se přesnost DEM v různých typech prostředí?*
- *Jak velké jsou chyby ve výšce jednotlivých DEM?*
- *Dosahuje DMR5G přesnosti udávané ČÚZK?*
- *Jak se liší přesnost DMR5G oproti modelu terénu generovaného z dat leteckého laserového skenování?*

## 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 3.1. Digitální modely

Digitální modely terénu se začaly využívat již kolem roku 1950. Prvotním účelem digitálních modelů bylo automatické vytváření vrstevnic. Digitální modely terénu jsou v současnosti nedílnou součástí při mnoha aplikacích geografických informačních systémů (GIS), např. ve stavebnictví a vodohospodářství (vytyčení zátopové oblasti u nově budovaných nádrží). Digitální model terénu označuje rastrový nebo vektorový model (vrstevnice), který obsahuje výškové body vztahované k určitému referenčnímu povrchu (Klimánek, 2006). Výškové poměry jsou u modelů nejčastěji prezentovány formou rastrů, které lze vytvořit několika způsoby. Vždy jsou rozděleny na menší části, které nesou informace o poloze a výšce, tzn. souřadnice x, y, z, mapovaného území (Maršíková, 2007).

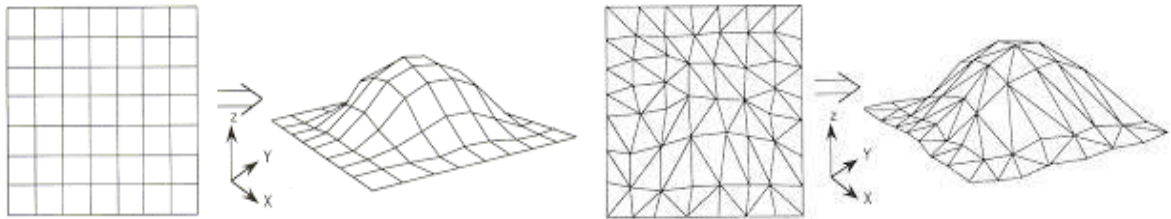
Digitální model povrchu – DMP (anglicky DSM, digital surface model) na rozdíl od modelu terénu prezentuje planetu s jejím pokryvem včetně budov a vegetace. Rozdíl mezi modelem povrchu a pokryvu vyplývá z obrázku č. 1.



Obr. 1: Rozdíl mezi DEM a DSM (Geoimage, 2012)

### 3.2. Dělení DEM podle způsobu jejich vytvoření

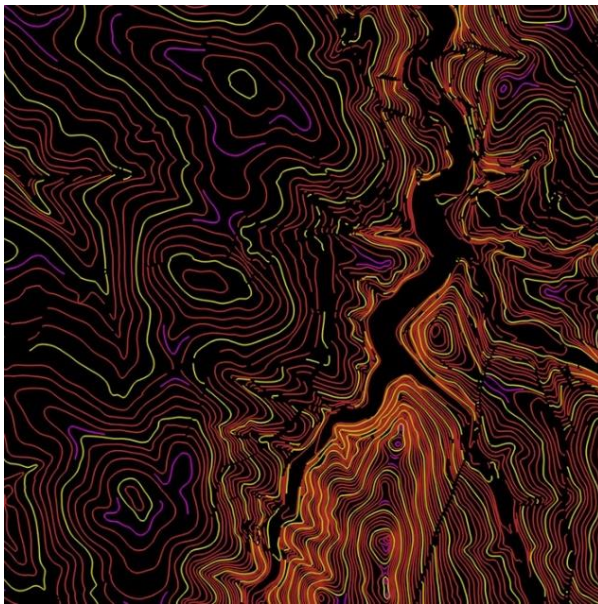
Jedním ze způsobů, jak vytvořit digitální modelu terénu, je rozdělení do pravidelné mřížky, kde každý čtverec sítě (grid) nese informace o souřadnicích. Tím vznikne rastr. Při vytváření rastru definujeme, jakého rozlišení chceme dosáhnout a podle toho vzniká síť čtverců o daných rozměrech. Druhým způsobem je zobrazení bodů bez přesně určených rozestupů, které jsou následně spojeny do náhodné trojúhelníkové sítě TIN – Triangulated Irregular Network (Kolář, 2003). V trojúhelníkové síti nese informace o nadmořské výšce každý vrchol trojúhelníků na sebe navazujících. Obrázek č. 2 popisuje základní geometrické jednotky digitálních modelů terénu. Třetím způsobem je prezentace povrchu liniovou vrstvou (vrstevnice).



Obr. 2: Prezentace DEM pomocí čtverců (1), trojúhelníků (2), (<http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp>)

### 3.2.1. Vektor

Digitální modely lze vytvářet z vektorových vstupních dat, které jsou znázorňovány vrstevnicemi (obrázek č. 3). Jedná se o liniovou vrstvu nesoucí informace o nadmořské výšce. V současné době jsou vrstevnice k vytvoření rastru na našem území spíše vzpomínkou, nicméně v rozvojových zemích stále jediným zdrojem výškopisných informací. Teoreticky nemá vektorové zobrazení vliv na rozlišení, nicméně často dochází k mylnému dojmu, že disponují rozlišením nekonečně jemným.

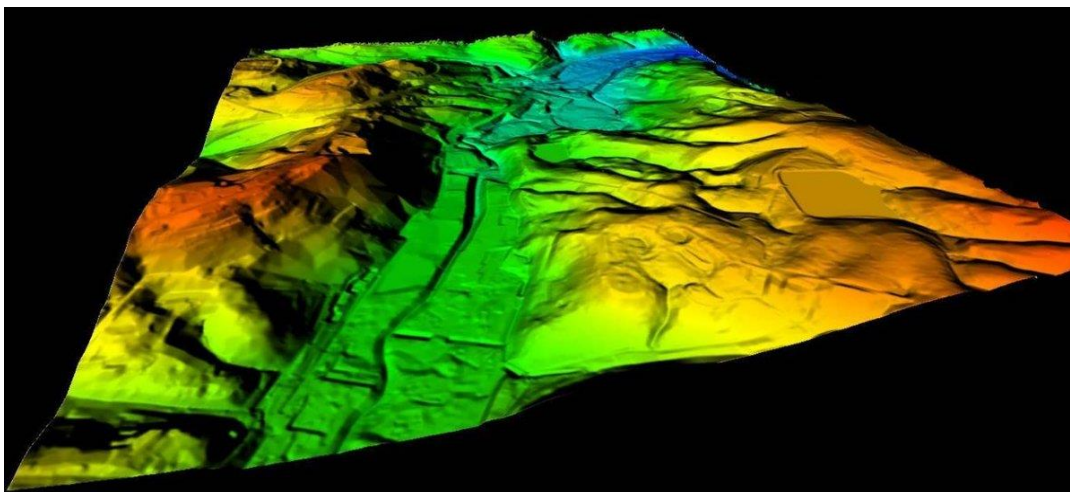


Obr. 3: ZABAGED – výškopis – 3D vrstevnice, (ČÚZK, 2010)

### 3.2.2. Rastr

Dle Krause (2000) lze rastr chápat ve dvou variantách. První považuje buňku rastru (pixel) za plošku (fasetu) uzavřenou čtyřmi body rastrové sítě. V této variantě může mít každý vrchol sítě jinou výšku. Výsledný model je tvořen „zborcenými“ čtyřúhelníky. Druhou – častější – variantou je, že každý pixel (cell) považujeme za

objekt prezentující výšku integrálně. Každá buňka nese informaci o nadmořské výšce jejího středu, která platí pro celou její plochu. Rastr (grid) se nejčastěji skládá ze čtverců, které mají stejný (definovaný) rozměr a polohu. Grid je tedy pravouhlou maticí bodů. (Martínek et al., 2007) Zpravidla bývá rastr užíván k prezentaci spojitého jevu nad zájmovou oblastí, kterým může být DEM a z něj odvozené (sklon, orientace, křivost atp.). Další prezentací spojitého jevu může být mapa srážek či znečištění ovzduší (Pacina et Brejcha, 2014). Obrázek č. 4 zobrazuje digitální model terénu.



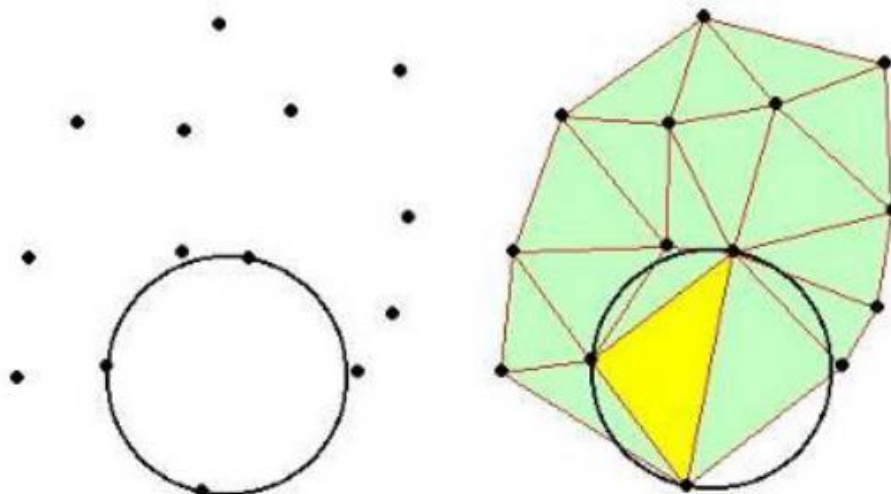
Obr. 4: Digitální model terénu, (LinkedIN, 2014)

### 3.2.3. TIN

Prezentace terénů metodou TIN je dle Krevelda (1997) velice všestranným způsobem. Síť trojúhelníků by měla co nejvíce přimykát skutečnému terénu, takže v oblastech s velkou variabilitou dochází k vytvoření mnoha malých trojúhelníků nejlépe popisujících realitu (Pacina et Brejcha, 2014).

U této metody je tedy terén prezentován trojúhelníky, resp. sadou vrcholů (vertices), hran (edges) a plošek (faces). Vrcholy nesou informace o poloze a nadmořské výšce (souřadnice  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Každá hrana spojuje dva vrcholy a rozděluje dvě plošky. Nejčastěji používanou triangulační metodou k vytváření TIN je Delaunayova triangulace, pro kterou platí, že uvnitř kružnice opsané kterémukoliv trojúhelníku, neleží žádný jiný bod. Princip triangulace vyplývá z obrázku č. 5. Výsledné trojúhelníky se pak blíží trojúhelníkům rovnostranným (Vaníček, 2009). V polyedrickém modelu jsou buď jednotlivě vloženy body spolu s informacemi o jeho sousedech, nebo se ukládají jednotlivé trojúhelníky jako polygony a nesou příslušné atributy (Klimánek, 2006).





Obr. 5: Delaunayova triangulace, (Pacina et Brejcha, 2014)

Mezi hlavní výhody TIN patří schopnost popisu povrchu v různých úrovních rozlišení a efektivita v ukládání dat. Naopak nevýhodou je, že v mnoha případech vyžaduje vizuální inspekci a manuální kontrolu sítě. Výhodou rastru je jeho jednoduchost na ukládání a k analýzám, další výhodou je jednoduchá integrace s rastrovými databázemi. Nevýhodou je nemožnost použití různé velikosti buněk k vyjádření povrchu (Pacina et Brejcha, 2014).

### 3.3. Měřítko v GIS

Mezi základní vlastnosti, které ovlivňují finální verzi digitálních modelů, patří měřítko. Každý rastr se skládá z pixelů, které nesou hodnotu určitého jevu (např. nadmořskou výšku, sklonitost). Délka hrany tohoto pixelu (buňky) udává rozlišení, kterého model dosahuje. Obecně lze říci, že čím menší je velikost těchto buněk, tím vyšším rozlišením DEM disponuje. Vysoké rozlišení detailněji znázorňuje reálný terén (Goodchild, 2011).

Při volbě měřítka musíme zohlednit, že ne vždy je vhodné volit velké rozlišení. Terén lze teoreticky modelovat až do milimetrů. V praxi je to ale nevhodné. S rostoucím rozlišením zároveň roste časová náročnost na vytvoření modelu. Za další negativní aspekt můžeme považovat, že se v modelech s vysokým rozlišením více projevují chyby měření. U modelu s rozlišením např. 30 m se chyby měření „skryjí“ a nevynikají tak, jako u modelu s rozlišením jeden metr. O možnostech volby měřítka se podrobněji zmiňuje Goodchild (2011).

### 3.4. Metody sběru dat

Metoda sběru vstupních dat ovlivňuje následnou kvalitu digitálních modelů z hlediska přesnosti. Data lze pořizovat několika metodami a při volbě konkrétní metody vhodné pro zpracování daného území musíme uvažovat o několika kritériích, mezi které patří: velikost území, časová a finanční náročnost, požadovaná hustota bodů, polohová a výšková přesnost, popř. výsledné rozlišení.

Obecně lze metody sběru dat rozdělit do těchto skupin:

- **Dálkový průzkum Země:** fotogrammetrie, radarové snímání a laserové snímání, jejichž výhodou je časová nenáročnost a pořizování dat pro velká území
- **Pozemní měření:** do této skupiny řadíme veškerá geodetická měření a měření pomocí GPS (globální polohové systémy), tyto metody jsou časově náročné, vhodné u menších pozorovaných území, ale oproti DPZ mnohem přesnější

#### 3.4.1. Družicové polohové systémy

V 60. letech 20. století uvedlo americké námořnictvo do provozu družicový polohový systém Transit. Jeho následovníkem byl na začátku 70. let systém Timation, jehož prioritním účelem bylo vysílání přesného časového signálu. Systém Cyklon tehdejšího SSSR (Svaz sovětských socialistických republik) vznikl ve stejném časovém období a měl i stejné nevýhody (pouze dvourozměrné souřadnice, nízká přesnost) jako Timation. Vzhledem k těmto nedostatkům počaly práce na nových systémech (GPS – NAVSTAR a GLONASS) (Klimánek, 2006).

V současné době se stále využívá systém GPS a od roku 2016 i nově spuštěný evropský systém GALILEO (Český kosmický portál, 2016). Hlavní nevýhodou GPS je omezení využití v budovách a místech, kde není přímý výhled na oblohu. Přijímače musí přijímat signál minimálně od 4 družic. Na rozdíl od GPS systém GALILEO funguje i v místnostech a tunelech a zároveň spolupracuje s GPS, takže dochází k mnohem vyššímu pokrytí (Chodúr et Novák, 2014). Systém GALILEO bude disponovat 24 provozními a 6 záložními družicemi (Český kosmický portál, 2016).

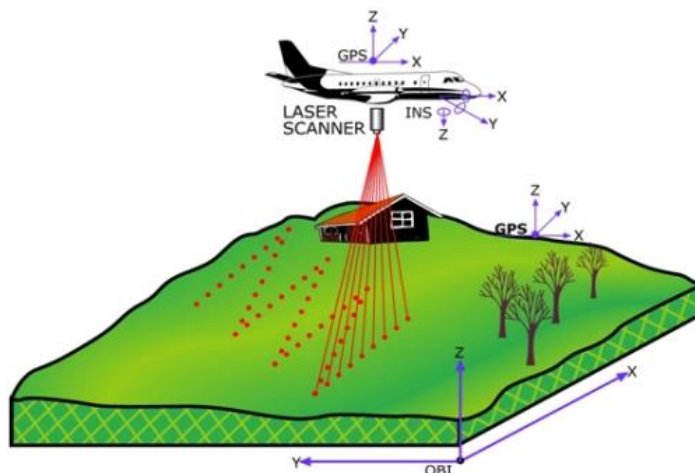
Prvním způsobem určování polohy pomocí družicového systému je dopplerovské měření, které funguje na principu zjišťování změny frekvence pro pohybující se zdroj (Rapant, 2002). Tento způsob se v praxi využívá velmi zřídka.

Další metodou je kódové měření. Základním principem je určení vzdálenosti mezi přijímačem a družicemi tzv. dálkoměrnými kódy. Ty jsou vysílány jednotlivými družicemi a přijímačem umožňují přečíst čas, v jaký byla část signálu vyslána (Rapant, 2002). Třetím způsobem je fázové měření, u něhož se zpracovávají vlastní nosné vlny vysílané mezi přijímačem a družicemi (Klimánek, 2006).

### 3.4.2. Laserové snímání

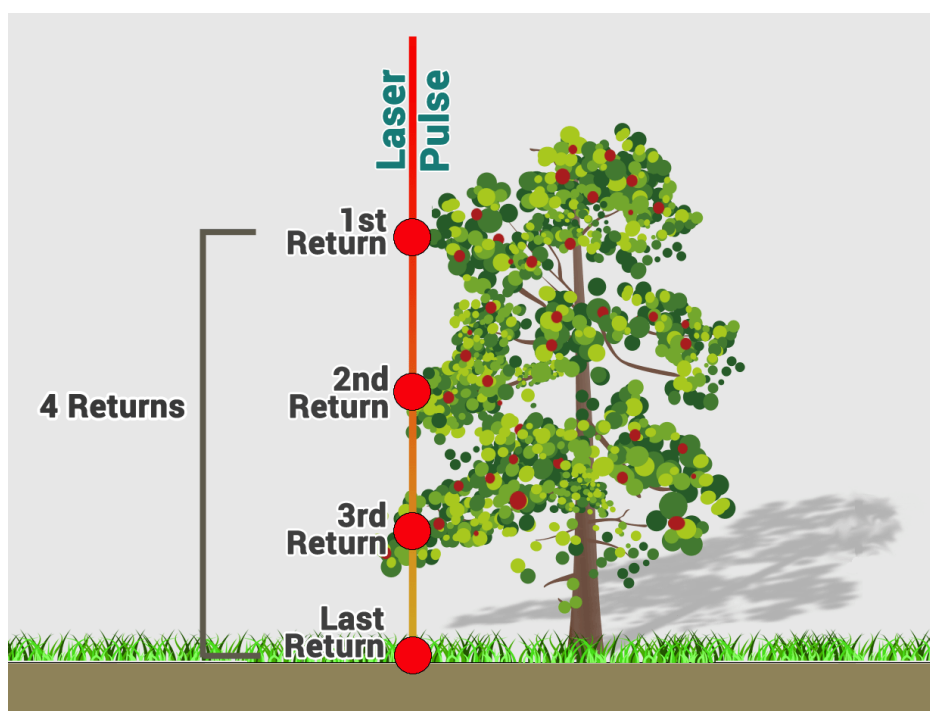
Letecké laserové skenování, též nazývané LiDAR (Light Detection and Ranging), je jednou z metod dálkového průzkumu Země. Vývoj této technologie započal zhruba před 20 lety a stále nabývá své oblibě. Letecké laserové snímání se v současné době nejvíce používá k získání dat a následnému vytváření modelů terénu, 3D modelů měst, analýze elektrického vedení či vegetačního pokryvu (Dolanský, 2004). Jedná se o technologii, která je výrazně rychlejší než měření pozemní a umožňuje sběr velkého množství polohopisných a výškopisných údajů. Další nespornou výhodou je možnost pořizování dat během noci, kdy je obloha čistější, jasnější a pozemní měření již nejsou možná.

Každé letadlo je vybaveno GPS přijímačem, díky kterému je zaznamenávána trasa letu a zaměřené body. Na letadle je umístěn laserový skener, který směrem k zemskému povrchu vysílá laserový puls (svazek paprsků) ve vysoké rychlosti. U laserového pulsu se měří čas, za který paprsek urazí cestu od skeneru k Zemi, kde se odrazí zpět k letadlu. Na letadle je umístěn citlivý detektor, který odražené paprsky zachycuje a spolu s velice přesnými hodinami měří čas, za který paprsek urazil dráhu tam i zpět. Známe tedy čas  $t$  a rychlost světla  $v$  ( $v = 299,79 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ ). Ze vztahu:  $t = 2d/v$  vypočteme vzdálenost bodu, od kterého se paprsek odrazil. Obrázek č. 6 znázorňuje způsob získávání lidarových dat a vysílání paprsků.



Obr. 6: Získávání dat, (Hippenstiel et Brownson, 2012)

Středové paprsky jsou vysílány kolmo k zemskému povrchu, okrajové pod úhlem až  $25^\circ$ . Každý paprsek má tvar kužele, jehož podstava je na odrazovém místě a vrchol u letadla. Čím větší je vzdálenost měřeného bodu od laserového skeneru, tím větší je základna kužele. (Klimánek, 2006). Na obrázku č. 7 můžeme vidět, jakým způsobem paprsek zachycuje různé vrstvy vegetace. Získaná data vytváří tzv. mračno bodů, které prezentuje zájmové území. Pomocí automatizovaných funkcí lze primární data rozdělit na skupiny bodů- např. terén, vegetace, budovy. Většina lidarových systémů vysílá paprsky v časovém intervalu 1 ns, čímž vzniká rozlišení zhruba 15 cm.



Obr. 7: Laserový paprsek zachycující odlišné vrstvy, (Gisgeography, 2017)

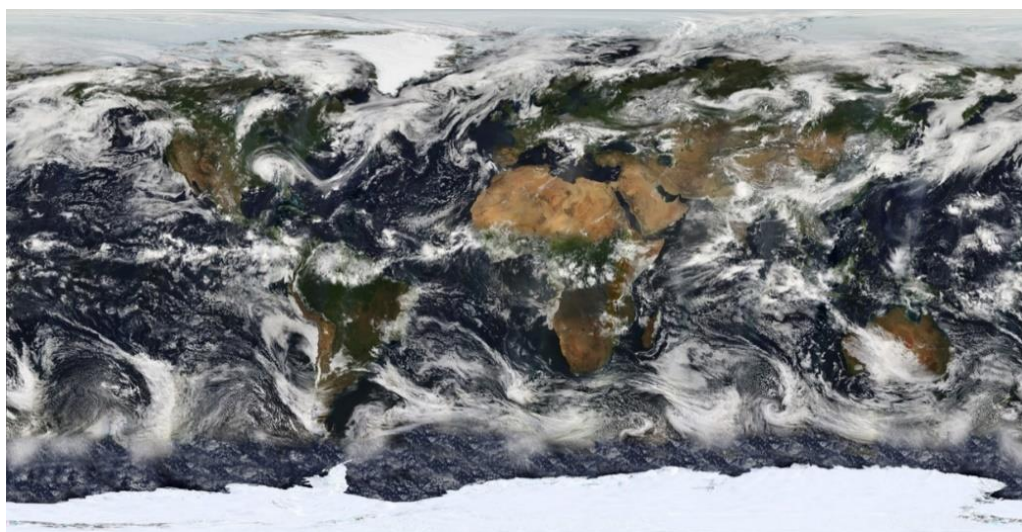
### 3.4.3. Radarové snímání

Mapování reliéfu Země pomocí radarových senzorů řadíme mezi aktivní systémy dálkového průzkumu již celou řadu let. Tato metoda pracuje na principu vysílání elektromagnetického záření, které je po odražení od zemského povrchu registrováno. Vlnová délka tohoto záření se pohybuje od 1 mm až po jeden metr. Díky nižší frekvenci záření můžeme získávat data i přes nepříznivé podmínky počasí (mlha, déšť), skrze vegetaci a pod sněhovou pokrývkou (Rapant, 2006). Radar (Radio Detection and Ranging) pořizuje snímky, které jsou velice nákladné na pořízení, a proto nebývají volně přístupné. Na rozdíl od leteckého laserového skenování se zde nejvíce pracuje se šikmými pozorovacími úhly ( $20^\circ$ - $50^\circ$ ).

Nejdůležitějšími metodami zabývajícími se terénem jsou radarová interferometrie a radarová altimetrie (Klimánek, 2006). Radarových dat se využívá nejen k mapování terénu, ale i v meteorologii. Tato data mají obrovskou úlohu při monitorování živelných katastrof. Např. Matgen (2010) popisuje typické chování vodních ploch během záplav a schopnost předpokládat velikost zátopových oblastí díky radarovým snímkům.

Práce radaru spočívající v měření vzdáleností nazýváme radarová altimetrie. Častým umístěním přístrojů bývají družice. Altimetry nejčastěji pracují na družicích ERS-1. Měření funguje na obdobném principu jako u laserového snímání, tzn. radar zaznamenává čas, za který se vyslaný signál odrazí od předmětu a vrátí zpět. Záření se šíří konstantní rychlostí, takže dokážeme zjistit výšku nosiče od povrchu, kde se záření odrazilo a následně lze tuto hodnotu přepočítat na absolutní výšku. Nejvíce se altimetrie využívá ke zjišťování výšek hladiny oceánů a povrchů, které zakrývá led (Český kosmický portál, 2013).

Na odlišném principu funguje radarová interferometrie. Ta je založena na získávání radarových dat zkoumaného místa z více zdrojů (družice, pozice letadla, část dráhy). Vlivem toho aspektu dochází k rozdílům ve fázích získaných z odlišných pozic. Po zpracování obrazových prvků vzniká tzv. interferogram, který slouží k určení relativních výškových rozdílů mezi prvky. Relativní výškové rozdíly lze následně převést na nadmořské výšky (Klimánek, 2006). Interferometrie spolupracuje s radarovými systémy družicových tandemů ERS-1 a ERS-2, ale i s radary na letadlových nosičích. Mezi nejvýznamnější z nich patří TOPSTAR a IFSARE. Na obrázku 8 družice Terra (z níž vznikl digitální model terénu ASTER), zachycuje svět z oběžné dráhy. Terra vypustila NASA na oběžnou dráhu již 18. prosince 1999 (100+1, 2013).



Obr. 8: Svět z družice Terra v roce 2005, (100+1, 2013)

### 3.5. Využití digitálních modelů terénu

Využití DMT je v současnosti velice rozsáhlé a oblíbené. Nástroje, které slouží pro jejich tvorbu, jsou běžnou součástí softwaru pro geografické informační systémy. Dle Klimánka (2006) lze využití rozdělit do následujících skupin:

- **Geoinformační technologie** – v této kategorii je základním požadavkem přesnost DMT, neboť jsou na něm založeny další procesy. Do této skupiny řadíme obory jako je geodézie a dálkový průzkum Země.
- **Stavební inženýrství** – DMT poskytuje směrová a výškopisná data, do kterých uživatelé vytvářejí vizualizace výsledků činností v krajině. Též v oblastech stavebního plánování jsou modely využívány (zakreslování elektrického vedení, kalkulace přesunu hmot, těžební činnost atd.).
- **Hospodaření s přírodními zdroji** – široká oblast zahrnující zemědělství, lesnictví, meteorologii a logistiku. U těchto oborů je důraz kladen na analytické možnosti DMT: odhad potenciální půdní eroze, modelování klimatických veličin, pěstební a těžební teorie, optimalizace tras atp.
- **Přírodní vědy** – v této kategorii najdeme obory jako je geologie, pedologie, geomorfologie, hydrologie nebo ekologie. Pomocí digitálních modelů bývá modelován odtok vody z povrchu, míra zaplavení nebo šíření znečištění. Přírodní vědy jsou úzce spojeny s předchozí kategorií.
- **Vojenské účely** – v armádě je kladen velký důraz na přesnost a metodu pořizování vstupních dat. DEM slouží k analýze dostupnosti a dohlednosti, k optimalizaci tras nebo k fotorealistické vizualizaci bojiště.

Významným využitím DMT jsou hydrologické analýzy. Hydrologické analýzy jsou nejčastějším užitím digitálních modelů v praxi (Klimánek et Douda, 2006). V závislosti na DMT jsou modelovány kvantitativní i kvalitativní parametry odtoku – směr odtoku, akumulace odtoku, lze definovat hranice povodí, rozvodnice atd. Z nich se dále odvíjí dimenzování vodních děl a drobných vodních staveb, protierozních a protipovodňových opatření (Klimánek, 2006).

## **3.6. Digitální modely současnosti**

V současné době s oblibou digitálních modelů terénu roste i frekvence měření terénu na naší planetě. Vzhledem k tomu, že se neustále vyvíjejí technologie a přístroje obecně, jsou vytvářena data s vyšší přesností a rozlišením.

### **3.6.1. DMR4G**

Digitální model reliéfu čtvrté generace od Českého zeměměřického a katastrálního úřadu (ČÚZK), který je od roku 2013 průběžně aktualizován, vychází z pravidelné sítě 5x5 metrů. Jedná se o model v referenčním systému Balt po vyrovnání z leteckého laserového skenování výškopisu České republiky v letech 2009–2013. Jeho střední chyba výšky je 0,3 m v terénu odkrytém, v zalesněném je rovna jednomu metru (ČÚZK, 2010). DMR4G je dle autora určen k analýzám terénních poměrů, např. při projektování rozsáhlých a vodohospodářských záměrů apod.

### **3.6.2. DMR5G**

Pátá generace se od čtvrté liší především střední chybou. U tohoto modelu je výrazně nižší – v zalesněném terénu 0,3 m; v odkrytém 0,18 m. Model představuje zobrazení přirozeného, popř. lidskou činností upraveného, zemského povrchu. Dalším rozdílem je, že digitální model vznikl skenováním v nepravidelné trojúhelníkové síti TIN o rozlišení 2 m. Stejně jako DMR4G nese souřadnice X, Y a H, kde H prezentuje nadmořskou výšku. Na tvorbě výškopisu čtvrté i páté generace se podíleli tři resorty – Ministerstvo obrany, Ministerstvo zemědělství a Český úřad zeměměřický a katastrální. Letecké laserové skenování proběhlo v letech 2009 až 2013. Digitální model reliéfu páté generace je základní zdrojovou databází pro tvorbu vrstevnic a digitální vizualizace v územně orientovaných informačních systémech s vysokou úrovní podrobnosti (ČÚZK, 2010).

### **3.6.3. SRTM**

Shuttle Radar Topography Mission je digitální model terénu vytvořený v rámci amerického projektu ve spolupráci NASA a NGA za pomoci německých a italských kosmických agentur. Data pro téměř celou planetu byla pořízena během 11 dní z raketoplánu Endeavour v roce 2000. Opakovaným snímáním vznikly dva produkty – SRTM GL1 s rozlišením 30 m a SRTM GL3 s rozlišením 90 m (GISAT, 2008).

### **3.6.4. ASTER**

Global Digital Elevation Model vytvořený japonským Ministerstvem ekonomie, obchodu a průmyslu a NASA vznikl z družice Terra v roce 1999. Jedná se o model zpracovaný z 1,5 milionů družicových scén s rozlišením 15 metrů (Abrams et al., 2015).

### **3.6.5. DEM z LiDARových dat**

Light Detection and Ranging – metoda dálkového průzkumu Země, která je založena na skenování dat z letadla. Správa Krkonošského národního parku si touto metodou nechala od firmy GEODIS v roce 2012 naskenovat celou rozlohu národního parku. Sběr dat probíhal v rozmezí 25 dní a to od 24. července do 18. srpna. Skenování laserem RIEGL LMS Q680i bylo následně zpracováno pomocí software Terrascan 012.202. Hustota těchto dat je v průměru 5 b. /m<sup>2</sup>. Digitální model generovaný z LiDARu mi byl za účelem dalšího zpracování poskytnut od vedoucí práce již zpracovaný. V této práci budou práce prováděny se zpracovanými daty LiDAR do digitálního modelu terénu s rozlišením jeden metr. V dalších částech práce je kvůli přehlednosti a srozumitelnosti pro tento digitální model používána zkratka DMT2(1m). U grafů je tento model popsán obecným pojmem LiDAR.



## 4. METODIKA

### 4.1. Terénní měření

Sběr dat probíhal v červenci roku 2016 v zájmových oblastech ležících na území Krkonošského národního parku (KRNAP). K získání dat byl použit přístroj Leica GPS1200. Prvním změřeným terénem byl Lovecký potok nad Kvarcitovým vodopádem v zalesněném terénu a Svatopetrský potok pod soutokem s Loveckým. Celá lokalita se nachází východně od Špindlerova Mlýna. Druhým místem měření byl vodní tok Malá Úpa zhruba 200 m před soutokem se Sovím potokem a přilehlý svah s přímým výhledem na oblohu. Tato lokalita se nachází zhruba dva kilometry jižně od Horní Malé Úpy. Další měření probíhalo na sjezdovkách Černé hory v Jánských Lázních. Data třetího měření však nebyla v bakalářské práci použita.

### 4.2. Postup zpracování

Zpracování začalo u dat z vlastního pozemního měření. Z GPS byla k dispozici data ve formátu .csv. Veškeré údaje byly zaznamenány do jednoho řádku a odděleny čárkou. Díky tomu bylo možné je funkcí „Text do sloupců“ rozdělit a vložit tabulku do ArcMap. V ArcMap bylo nutné data exportovat do dBase table (.dbf), aby bylo možné tabulku upravovat a doplňovat. V nově vytvořené tabulce byly následně přidány dva sloupce, které byly dalším zpracováním obohaceny o souřadnice bodů. Zpracování probíhalo v souřadnicovém systému S-JTSK (S-JTSK Krovak EastNorth, WKID:5514), jehož souřadnice jsou záporné. Původní data byla kladná. Pomocí Field Calculator vynásobením kladných souřadnic hodnotou -1 byly nové sloupce doplněny o souřadnice x a y. Poté byl funkcí „Add XY Data“ vytvořen nový shapefile obsahující body našeho měření.

Vlastní data byla porovnávána s DMR5G (digitální model reliéfu páté generace) a s digitálním modelem terénu generovaným z LiDARu s rozlišením 1 m. DMR5G lze do ArcMap nahrát skrze Catalog a funkci Add ArcGIS Server. Poskytovaná data od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního se nachází pod odkazem: <http://ags.cuzk.cz/arcgis/services>. Od srpna roku 2016 jsou DMR4G, DMR5G a DMP1G (digitální model povrchu první generace) volně dostupné.

DMR5G se z výše zmíněného odkazu načítá jako GrayscaleHillshade. Ve vlastnostech této vrstvy v záložce Processing Templates bylo nutné změnit „Function“ na „None“ a s tímto modelem již bylo možné pracovat. Digitální model reliéfu nelze zobrazovat pouze po částech a při každém pohybu s mapou se model celé republiky

znovu načítal z internetového portálu. Tento proces výrazně prodlužoval další práce, proto bylo vhodné „oříznout“ data na menší části zahrnující pouze zájmové oblasti. To bylo umožněno funkcí Extract by Mask.

Extract value by point – funkce, kterou byly hodnoty pixelů extrahovány do bodové vrstvy. Z pozemního měření byly známy  $x$  a  $y$  souřadnice, podle kterých se body prolínaly do ostatních modelů a bylo možné zjistit hodnoty nadmořských výšek příslušných pixelů v digitálních modelech DMR5G a DMT2(1m).

Zpracování tabulek, grafů a statistik proběhlo ve statistickém programu R (R Project, 2017) s uživatelským rozhraním RStudio. Do prvního řádku RScript byl napsán příkaz: `hodnoty=read.table("clipboard", header=T)`, na druhý řádek skriptu: `head(hodnoty)`. V tabulce pro danou lokalitu byly označeny sloupce excelové tabulky obsahující potřebná data a posléze stisknuta kombinace kláves `Ctrl + c`. Poté byly příkazy z RScript odeslány do konzole a tím byla vytvořena tabulka s hodnotami (výřez č. 1). Tento postup byl opakován vždy, když bylo potřeba nahrát data z Excelu do programu RStudio a dále s nimi pracovat.

	Vyska_GPS	Vyska_DMR	Vyska_LiDAR
1	916.8537	916.5850	916.59
2	935.4991	926.4200	926.35
3	916.5622	916.3367	916.33
4	949.8258	949.5767	950.33
5	916.4506	916.1456	916.18
6	949.8896	949.5767	949.77
7	916.2419	916.1847	916.03
8	949.4080	949.5767	949.42
9	916.0287	915.9200	915.95
10	949.4204	949.4420	949.61

*Výřez 1: Tabulka v programu RStudio pro lokalitu Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)*

Pro každou lokalitu byla vytvořena nová excelová tabulka, do které byly zkopírovány z atributových tabulek vzniklých použitím funkce Extract value by point sloupce s hodnotami nadmořských výšek pozemního měření GPS a s hodnotami pixelů digitálních modelů. Grafy byly vytvořeny v programu R funkcí plot. Na osu  $x$  byla vkládána data pozemního měření a na osu  $y$  data vzniklá leteckým laserovým skenováním. Při porovnávání dat leteckého laserového skenování se na osu  $y$  vkládala data DMR5G vzhledem k nižšímu rozlišení. Generované DEM disponuje rozlišením jeden metr, kdežto DMR5G rozlišením 2 m.

Dalším způsobem evaluace bylo porovnání datových sad pomocí statistických údajů. Na odlišnosti tří různých datových sad nejlépe poukázaly tyto statistické údaje: minimální hodnota, maximální hodnota, 25 % kvantil (Q1), 50 % kvantil (medián) a 75 % kvantil (Q3). Funkce `summary` vypočetla všechny výše zmíněné statistické údaje kromě směrodatné odchylky, kterou lze dopočítat jednoduchým příkazem. Druhým způsobem vypočtení všech požadovaných a mnoha dalších statistických údajů bylo využití funkce `stat.desc`. Všechny použité příkazy, které byly vloženy do konzole, jsou na výřezu č. 2.

```
summary(Petr)

sd=sapply(Petr, sd, na.rm=TRUE)
sd

statistika=stat.desc(Petr, norm=TRUE)
```

Výřez 2: Výpočet statistických údajů v RStudiu, (Leona Kubcová, 2017)

Z krabicového grafu lze porovnávat zastoupení hodnot v procentech. Obecně lze říci, že kvantil dělí hodnoty rozdílů datových sad podle míry zastoupení. Tzn. program seřadil hodnoty vzestupně a rozdělil je na několik částí. U následujícího grafu spodní hrana „krabice“ prezentuje 25 % kvantil. To je hodnota, které dosahuje čtvrtina hodnot z datové sady. Z přímkou ve středu grafu se odečítá hodnota mediánu, který dělí sadu na dvě poloviny čítající stejný počet hodnot. Od horní hranice grafu se odečítá 75 % kvantil. K vytvoření boxplotu byl opět použit program R. Na výřezu č. 3 je vyobrazen skript, který byl použit k vytvoření krabicového grafu (boxplot).

```
par(mar=c(4,5,3,3),mgp = c(2, 0.6,0))
par(cex.lab=1.1)
par(cex.axis=0.75)
boxplot(Petr,range=0,las=1,width = NULL,
        varwidth = F,main="Svatý Petr- boxplot",
        col=c("grey","grey"),
        border=c("black"),
        xlab="Digitální model terénu",
        ylab="Rozdíl datových sad",
        ylim=c(0,1))
```

Výřez 3: Vytvoření boxplotu, (Leona Kubcová, 2017)

Následně byl vytvořen další graf – histogram rozdílů datových řad za účelem grafického znázornění počtu hodnot v určitém rozmezí. Zde bylo opět pracováno s rozdíly datových sad. Pro přehlednost je použitý skript opět vyobrazen (výřez č. 4).

```
breaks=c(-1,-0.5,0,0.2,0.4,0.6,1,1.5,5,10,15)
levs=levels(cut(unlist(Petr3), breaks=breaks))
temp=legend("topright", legend=c("DMR5G","LiDAR"), lty=c(1,1), col=c("black","grey"))
multhist(Petr3, breaks= breaks, names.arg=levs,space=c(0,0.1),
        varwidth = F,main="Svatý Petr - histogram",
        xlab="Rozdíl datových sad",
        ylab="Četnost")
```

Výřez 4: Vytvoření histogramu, (Leona Kubcová, 2017)

V neposlední řadě byla přesnost porovnána v zaměřeném kontrolním profilu. Ten prezentuje průběh nadmořských výšek ze dvou digitálních modelů ve stejných místech. Navíc byly průběhy terénu kontrolovány vlastním pozemním měřením. Hodnoty nadmořských výšek z DMR5G a DMT2(1m) pro tento profil byly získány v programu ArcMap v místech, kde probíhalo kontrolní měření, aby bylo možné do kontrolního profilu použít i vlastní kontrolní data.

Nejdříve byla vytvořena nová vrstva shapefile liniového typu. Do tohoto shapefile byly linie propojeny body kontrolního měření GPS. Následovalo omezení digitálních modelů podle výše zmíněné linie funkcí Extract by Mask. Nově vzniklé ořezy původních rastrů bylo nutné rozdělit na body. To umožnila funkce Raster to Point. V dalším kroku byl vytvořen nový shapefile, opět liniového typu, do kterého byly linie spojeny body vytvořené předchozí funkcí. Další použitou funkcí byla funkce Create points along lines. Jejím použitím byla předchozí přímka rozdělena na body s rozestupem jeden metr. V grafické prezentaci bylo tedy staničení jeden metr. Dalším krokem bylo získání hodnot nadmořských výšek bodů o rozestupu 1 m z porovnávaných modelů. Hodnoty byly získány funkcí Extract value by point. Následně byl vytvořen nový polygonový shapefile zahrnující vrstvu bodů z DMT2(1m). Tato vrstva byla funkcí Intersect propojena s GPS měřením. Tímto krokem byly získány body, které spadaly do pixelů digitálního modelu generovaného z LiDARu a byly vhodné k vytvoření kontrolního profilu. Přiřazení těchto hodnot k odpovídajícím bodům bylo provedeno přes Join atributových tabulek.

Grafická vizualizace dat byla opět provedena v programu R. Použitý skript pro vytvoření grafu typu plot je na výřezu č. 5.

```
plot(x=DMR5G, type="l", col="red", xlab = "Staničení (m)", ylab = "Nadmořská výška (m)",
     varwidth = F, main="Svatý Petr - kontrolní profil")

lines(x=LIDAR, type="l", col="blue")

points(x=GPS, pch=".", cex=2, col="black")
temp=legend("topright", legend=c("DMR5G", "LiDAR", "GPS"),
           lty=c(1,1), col=c("red", "blue", "black"))
```

*Výřez 5: Vytvoření kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)*

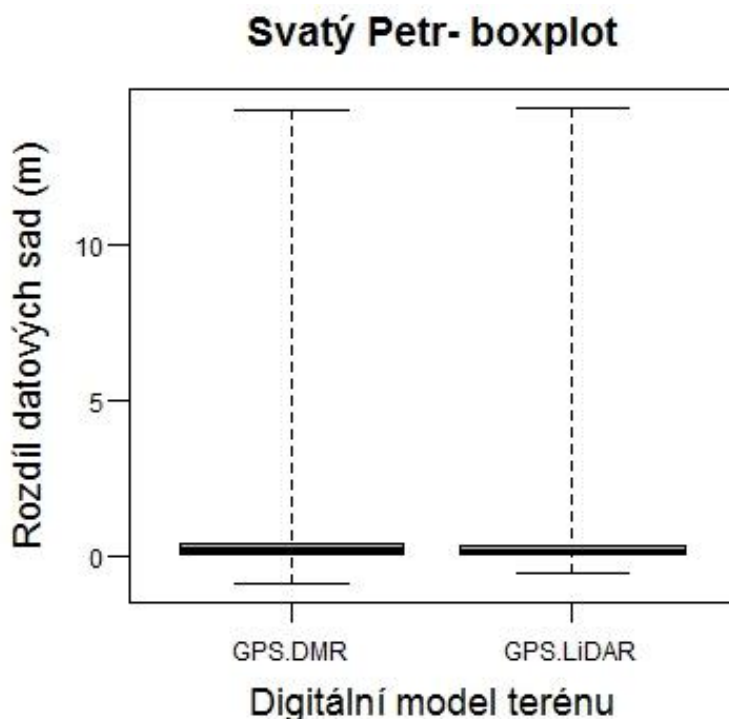
## 5. VÝSLEDKY

### 5.1. Svatý Petr

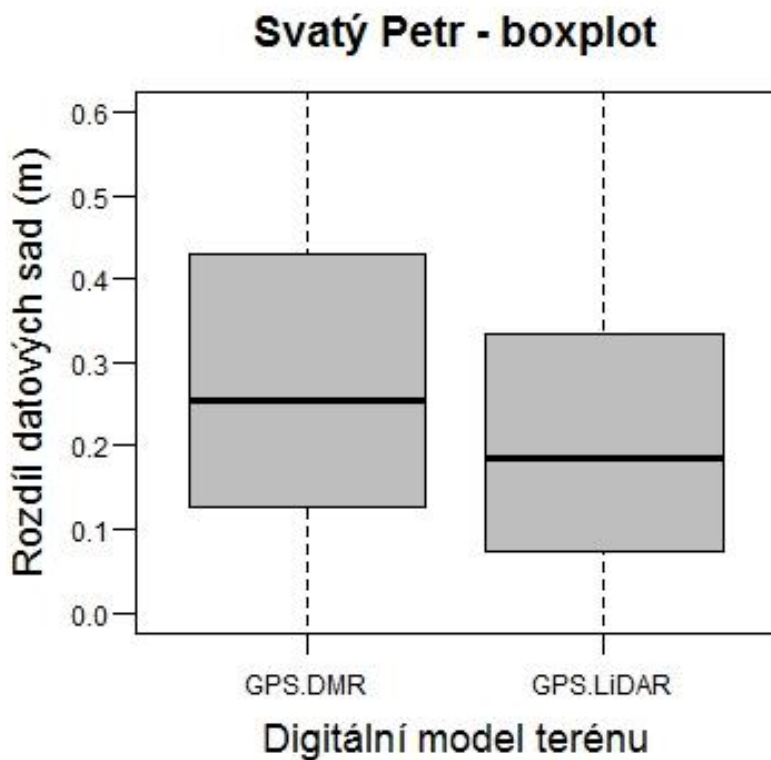
Svatý Petr je lokalita nacházející se zhruba dva kilometry východně od Špindlerova Mlýna v zalesněném údolí. V těchto místech byl evaluován Lovecký potok, který se vlévá do Svatopeterského potoka pod Kvarcitovým vodopádem. Pod soutokem byl zaměřen i Svatopeterský potok. Mapa zobrazující naměřené body a fotografie z terénního měření jsou vloženy do příloh.

#### 5.1.1. Statistické údaje

Z boxplotu (graf č. 1, popř. jeho detail – graf č. 2) je patrné, že se rozdíly datových sad oproti sobě výrazně liší. U rozdílu dat získaných GPS a DMR5G je medián hodnot 0.254, kdežto u rozdílu GPS a DMT2(1m) je medián roven 0.185. Nejvyšší odlišnost je mezi DMR5G a GPS 14.300 m a nejnižší -0.820. U DMT2(1m) je nejnižším rozdílem -0.504 m a rozdílem nejvyšším 14.337 m. V této lokalitě je tedy terén u modelů leteckého skenování oproti našemu kontrolnímu měření podhodnocován. Průměrný rozdíl datových sad je u DMR5G 0.352 m. U digitálního modelu DMT2(1m) je odlišnost vůči měření s GPS 0.251. Mezikvartilové rozpětí je u prvního sloupce 0.302, u druhého 0.262. Měření GPS v této lokalitě dosahovalo přesnosti 0.051 m.

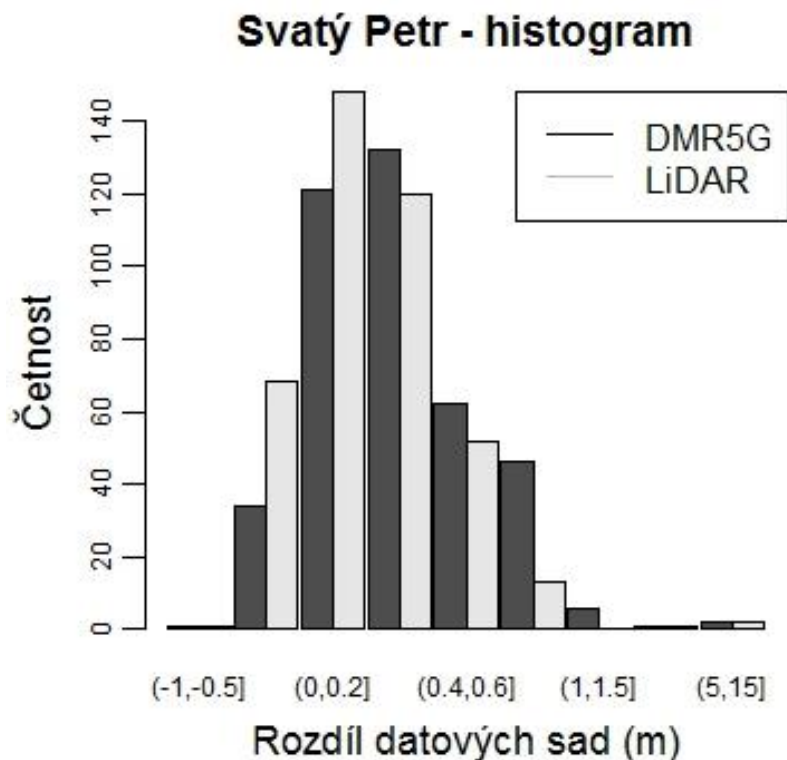


Graf 1: Boxplot rozdílu datových sad na lokalitě Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)



Graf 2: Zvětšení boxplotu rozdílu datových sad na lokalitě Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)

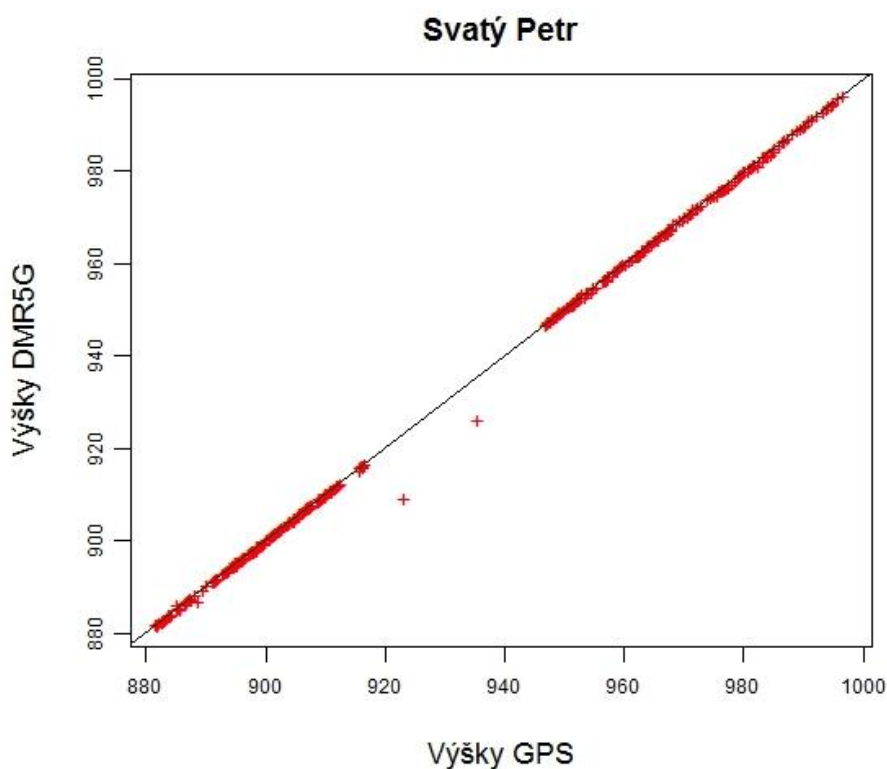
Na následujícím grafu (graf č. 3) je znázorněno rozdělení odlišností. Na ose x je udáván interval, do něhož rozdíl dat spadá, a na ose y je graficky prezentována jeho četnost. U obou datových sad leteckého skenování je nejvíce rozdílů v intervalu od 0 do 0.4.



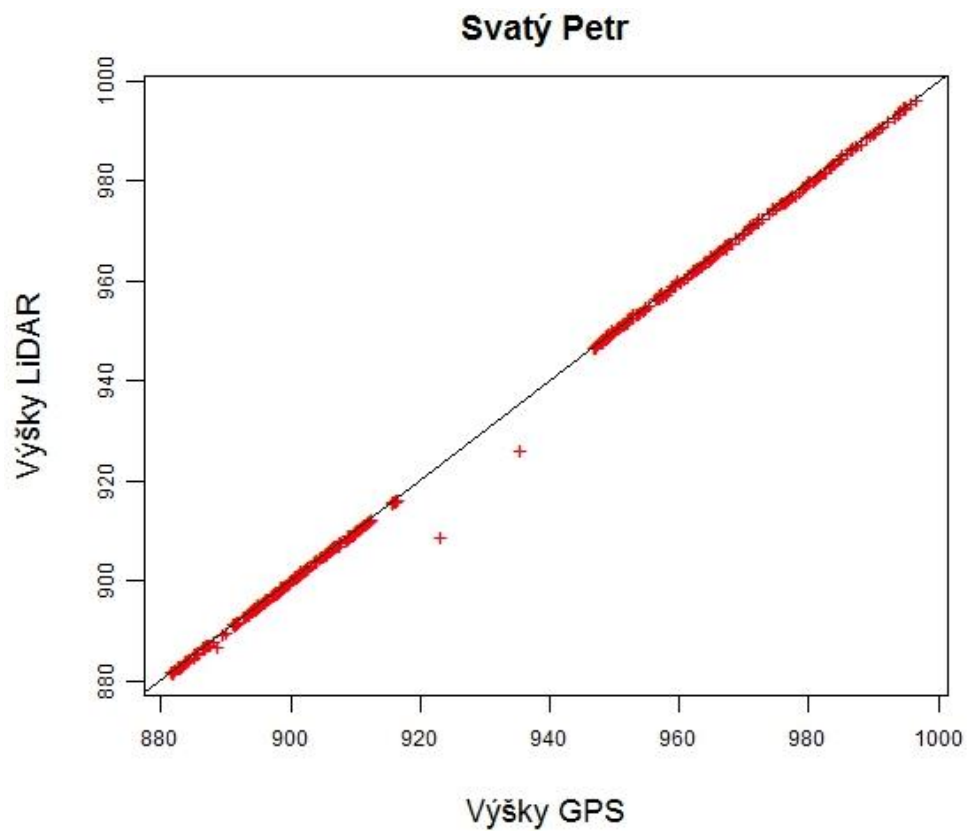
Graf 3: Histogram rozdílu datových sad na lokalitě Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)

### 5.1.2. Nadmořské výšky

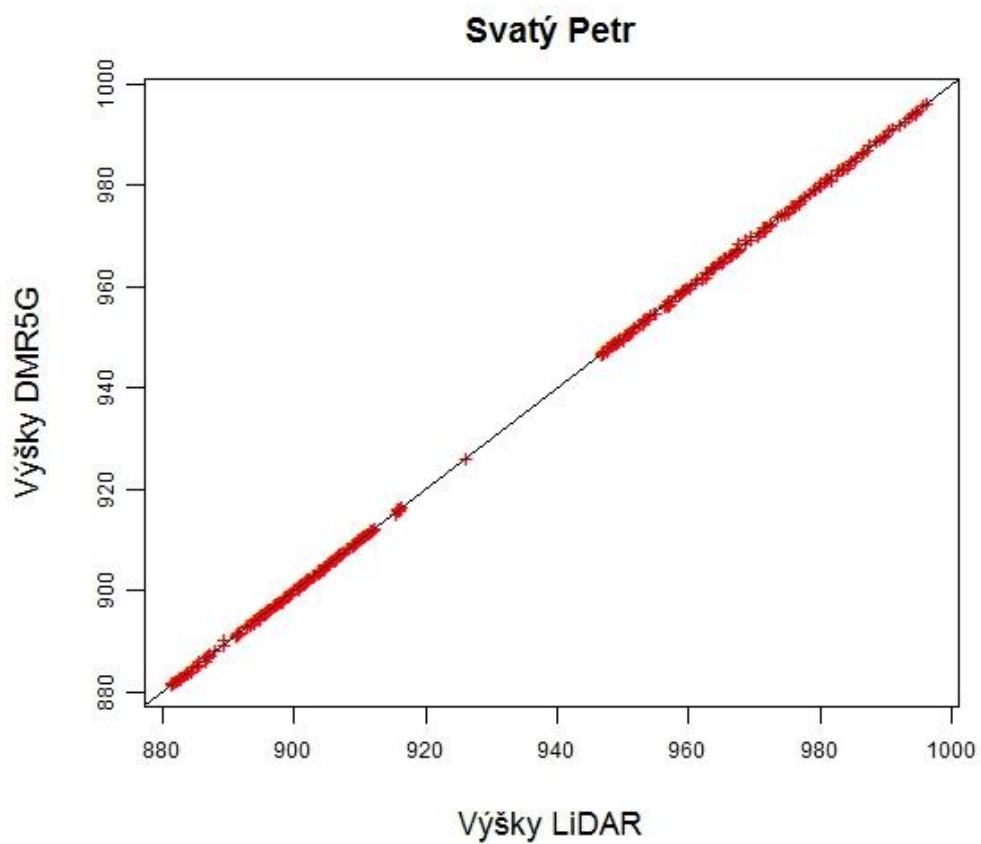
Tvrzení, že je terén u dat leteckého laserového skenování na této lokalitě podhodnocován, vyplývá i z grafů 4, 5 a 6, které graficky prezentují nadmořskou výšku bodů. Vzhledem k tomu, že se jedná o lineární graf, hodnoty obou os by se měly protínat na přímce  $y=x$ . Při grafickém srovnávání nadmořských výšek bodů považujeme GPS za realitu. U dat naměřených s GPS je nejnižším změřeným bodem 881.900 m, kdežto u zbylých datových sad je nejnižší hodnota 881.800 m. Naopak nejvyšší hodnoty jsou: 996.308 u DMR5G, 996.440 u DMT2(1m) a 996.838 u GPS. Průměrnou nadmořskou výškou této lokality je dle GPS 929.500 m. U ostatních modelů je průměrná výška nižší, tj. konkrétně 929.200 m u DMR5G a 929.300 m DMT2(1m).



Graf 4: Grafické porovnání hodnot GPS a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)



Graf 5: Grafické porovnání hodnot GPS a LiDAR, (Leona Kubcová, 2017)



Graf 6: Grafické porovnání hodnot LiDAR a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)



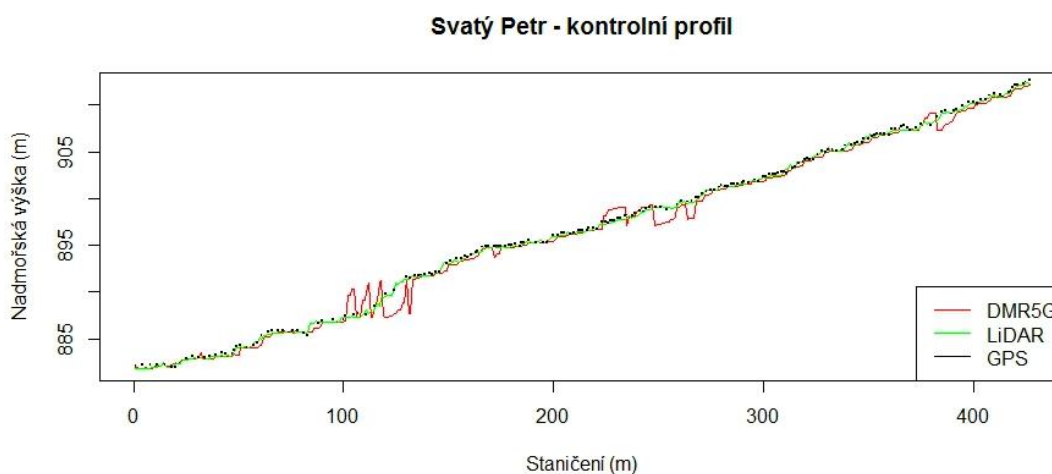
### 5.1.3. Kontrolní profil

Na obrázku č. 9 jsou znázorněny body zahrnuté do kontrolního profilu. Jedná se o zalesněný Svatopeterský potok pod Kvarcitovým vodopádem.



Obr. 9: Body kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)

V grafu č. 7 je vyobrazen průběh nadmořských výšek odlišných digitálních modelů terénu (DMR5G a DMT2(1m)) a ověřen kontrolními body pozemního měření. Největším rozdílem mezi hodnotami GPS a DMT2(1m) je 0.472 m, nejmenším rozdílem -0.583 m. Minimálním rozdílem pozemního měření a DMR5G je -2.276 m, maximální rozdíl je 3.779 m. Modely leteckého laserového skenování jsou o sebe odlišné o tyto hodnoty: min: -3.223, max: 3.779 m a průměr: 0.208 m. Průměrný rozdíl DMR5G oproti GPS je 0.275 m, DMT2(1m) oproti GPS 0.098. Graf v plné velikosti je umístěn v přílohách.



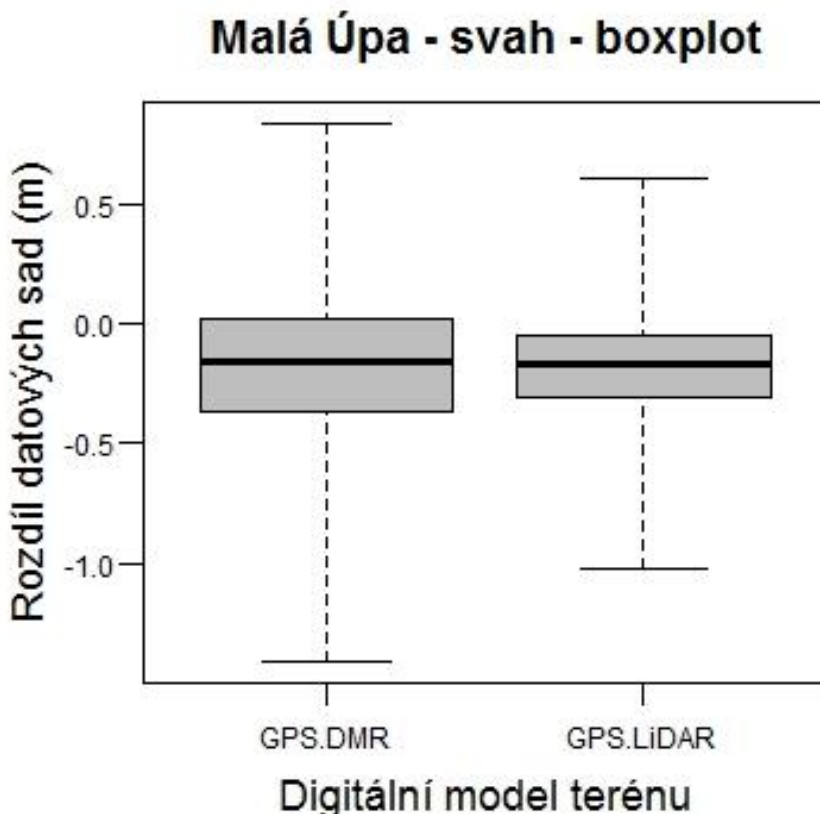
Graf 7: Kontrolní profil pro lokalitu Svatý Petr (Leona Kubcová, 2012)

## 5.2. Malá Úpa – svah

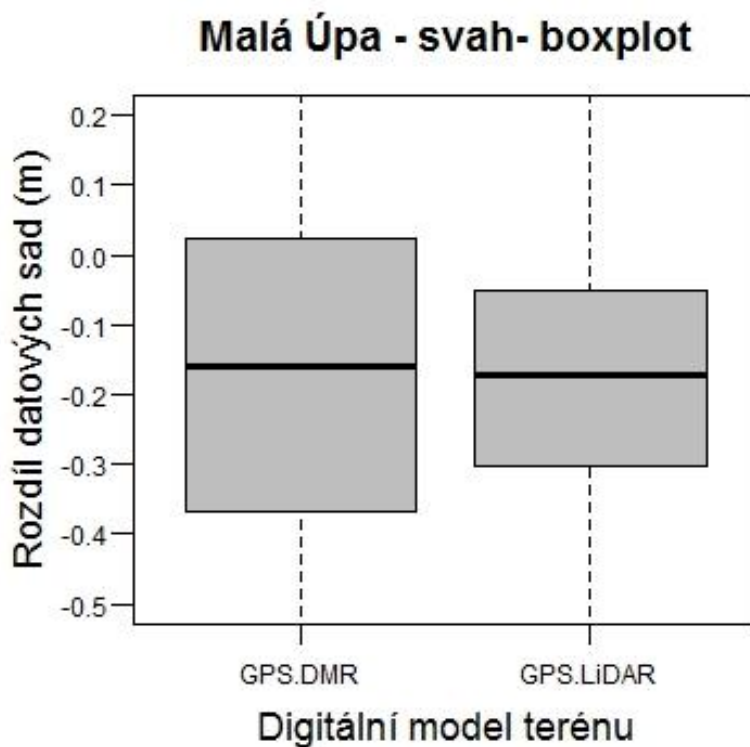
Tento svah se nachází zhruba 200 m proti proudu od soutoku vodního toku Malá Úpa se Sovím potokem. Lokalita je vzdušnou čarou vzdálena cca 1,7 km severozápadně od Dolní Malé Úpy a od Horní Malé Úpy 2,2 km jihozápadně. Mapa týkající se této lokality a fotografie jsou vloženy do příloh. Během kontrolního měření byl svah zcela vykácený, tudíž se jedná o terén s přímým výhledem na oblohu. Podle leteckých snímků nad touto oblastí tomu tak bylo již v roce 2009, kdy byly započaty práce na Digitálním modelu reliéfu páté generace. Mapové podklady a fotografie jsou součástí přílohy.

### 5.2.1. Statistické údaje

Na této lokalitě je medián rozdílů datových sad oproti GPS přibližný. U DMR5G je medián rozdílu -0.159, u DMT2(1m) -0.171. Vyšších diferencí ovšem nabývají kvantily těchto sad. Tato odlišnost je graficky vyobrazena na boxplotu v grafu 8 a jeho detailu (graf č. 9). Mezikvartilové rozpětí u DMR5G je 0.388, kdežto u DMT2(1m) 0.251. Průměrně se DMR5G od GPS liší o -0.174 a digitální model DMT2(1m) od GPS o -0.187. Přesnost pozemního měření v této lokalitě je rovna 0.023 m.

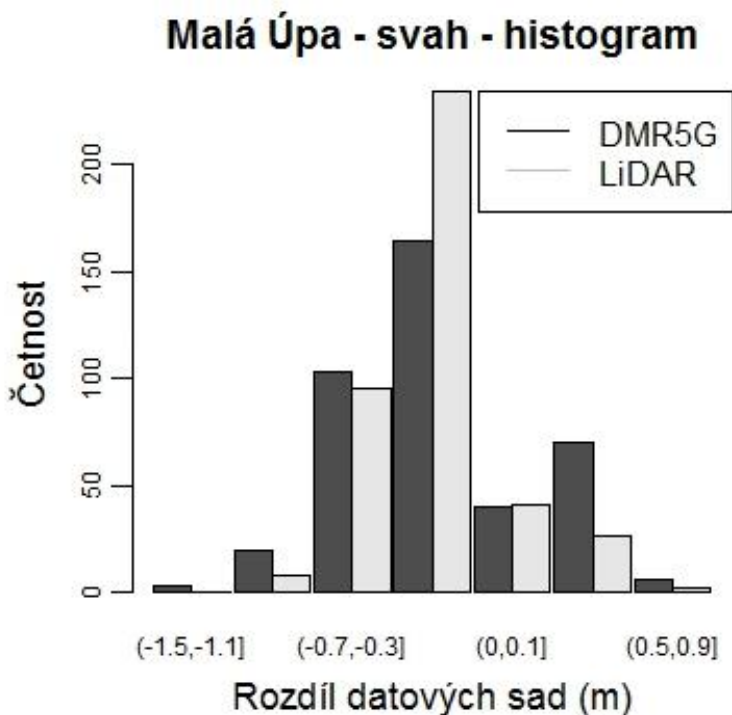


Graf 8: Boxplot rozdílů datových sad na lokalitě Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)



Graf 9: Zvětšení boxplotu rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2012)

Na následujícím grafu (graf č. 10) je v podobě histogramu poukázáno na četnost odlišností v konkrétních intervalech. Odlišnosti u DMT2(1m) jsou nejvíce soustředěny v intervalu od -0.3 do 0, u rozdílu DMR5G se nejvíce hodnot pohybuje v rozmezí od -0.7 do 0. V této lokalitě dostupné digitální modely terénu oproti měření s GPS nadhodnocují.

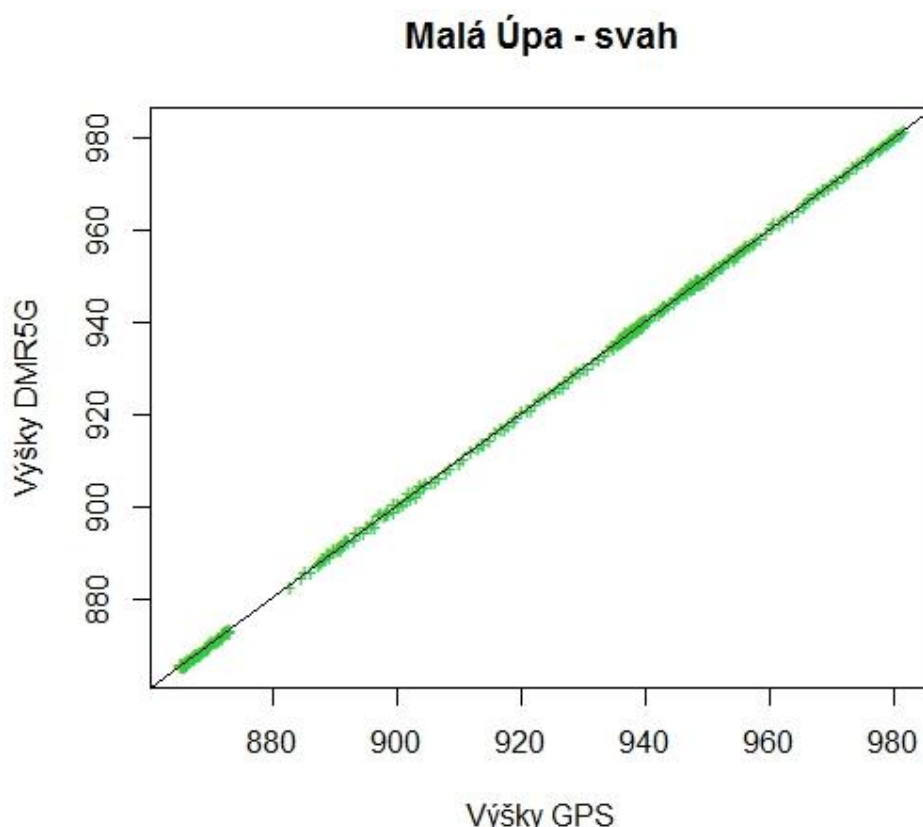


Graf 10: Histogram rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)

U této lokality může docházet k nadhodnocování povrchu terénu vlivem toho, že laserové paprsky při leteckém skenování nedosáhly až na skutečný terén. Svah je porostlý mechem a borůvkám a jsou zde pozůstatky po těžbě dřeva (větve a houští), takže se laserové paprsky nemusely dostat až na zem. V takovém případě je skutečný terén zaměněn s rostlinným pokryvem nejnižšího patra.

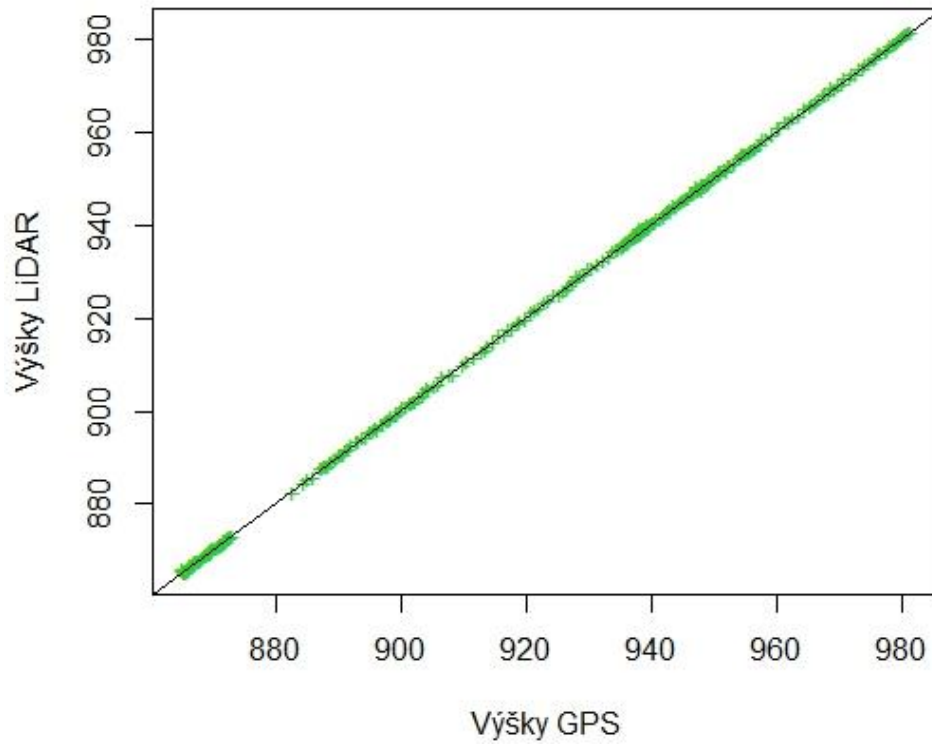
### 5.2.2. Nadmořské výšky

Z následujících grafů (graf č. 11, 12 a 13) je vidět, jak jsou nadmořské výšky identických bodů odlišné v závislosti na tom, z jakého modelu byly převzaty. Stejně jako v kapitole 5.2.1 se jedná o lineární graf, kde za ideálního předpokladu platí  $y=x$ . Při srovnání GPS s ostatními daty je odchylka patrná. Pokud srovnáváme data leteckého laserového skenování, je zde k ideálnímu předpokladu blíže než u srovnání s GPS. Nejnižší naměřené hodnoty jsou: 865.080 m u GPS, 865.450 m u DMR5G a u posledního modelu 865.400 m. Pozemní měření disponuje maximální naměřenou hodnotou 981.510 m, DMR5G 981.740 m a poslední model hodnotou 981.670 m. Z grafů a údajů o minimálních a maximálních naměřených hodnotách je jasné, že modely z leteckého laserového skenování oproti GPS nadhodnocují, ale vzájemně jsou si tyto modely přibližně podobné.



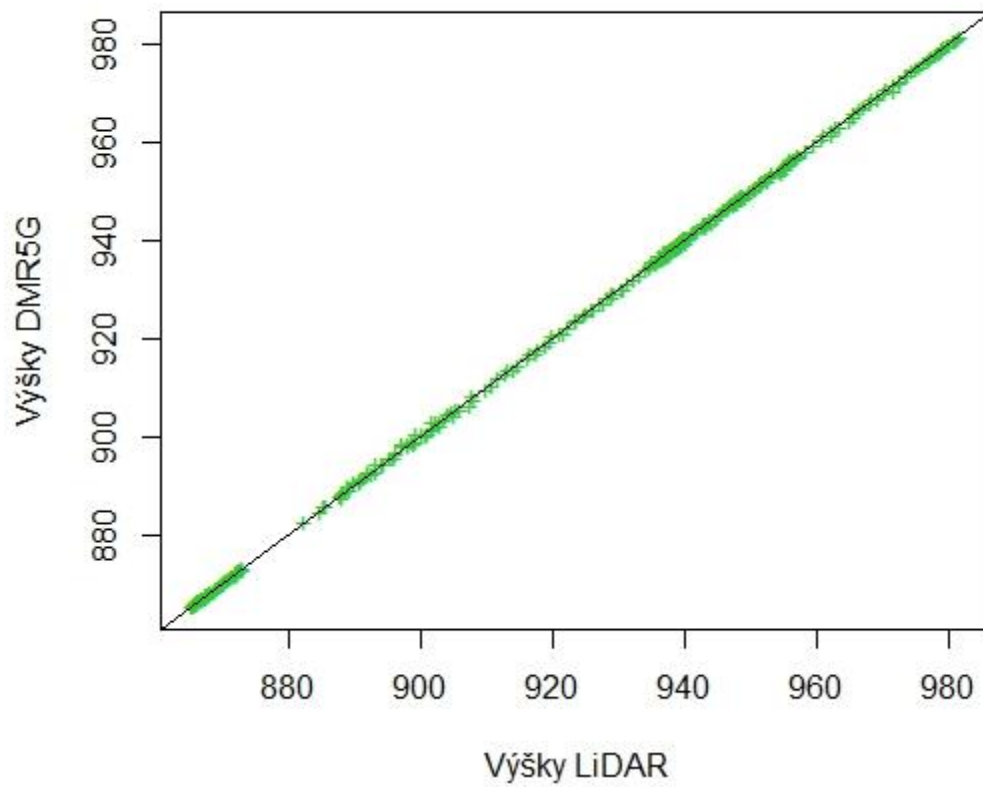
Graf 11: Grafické porovnání hodnot GPS a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)

### Malá Úpa - svah



Graf 12: Grafické porovnání hodnot GPS a LiDAR, (Leona Kubcová, 2017)

### Malá Úpa - svah



Graf 13: Grafické porovnání hodnot LiDAR a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)

### 5.2.3. Kontrolní profil

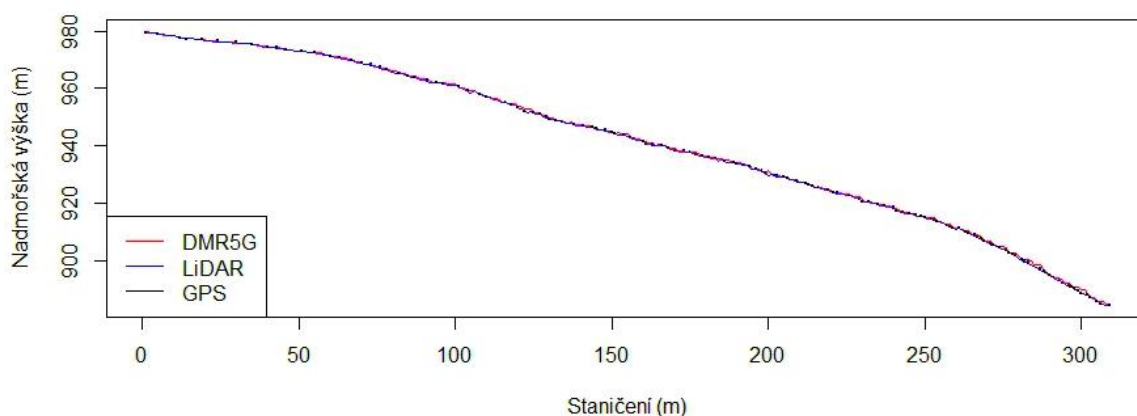
Na obrázku č. 10 jsou znázorněny body zahrnuté do kontrolního profilu. Jedná se o prudký svah v odkrytém terénu, tzn. s přímým výhledem na oblohu.



Obr. 10: Body kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)

Na tomto svahu dosahují odlišnosti DMT2(1m) oproti GPS těchto hodnot: minimální rozdíl je roven -0.660 m, maximální rozdíl 0.547 m. Průměrná odlišnost těchto dat je 0.056 m. Rozdílnost DMR5G oproti GPS disponuje průměrným rozdílem -0.310 m, nejnižší hodnotou rozdílu -1.409 m a nejvyšší odlišností 0.383 m. Data leteckého laserového skenování se od sebe průměrně liší o -0.311 m. Nejmenším rozdílem je hodnota -1.760 m, nejvyšším 0.435 m. Průběh nadmořských výšek odlišných datových sad vizualizován v grafu č. 14. Graf v plné velikosti je součástí příloh. Terén digitálních modelů je zde ověřen body z pozemního měření.

Malá Úpa - svah - kontrolní profil



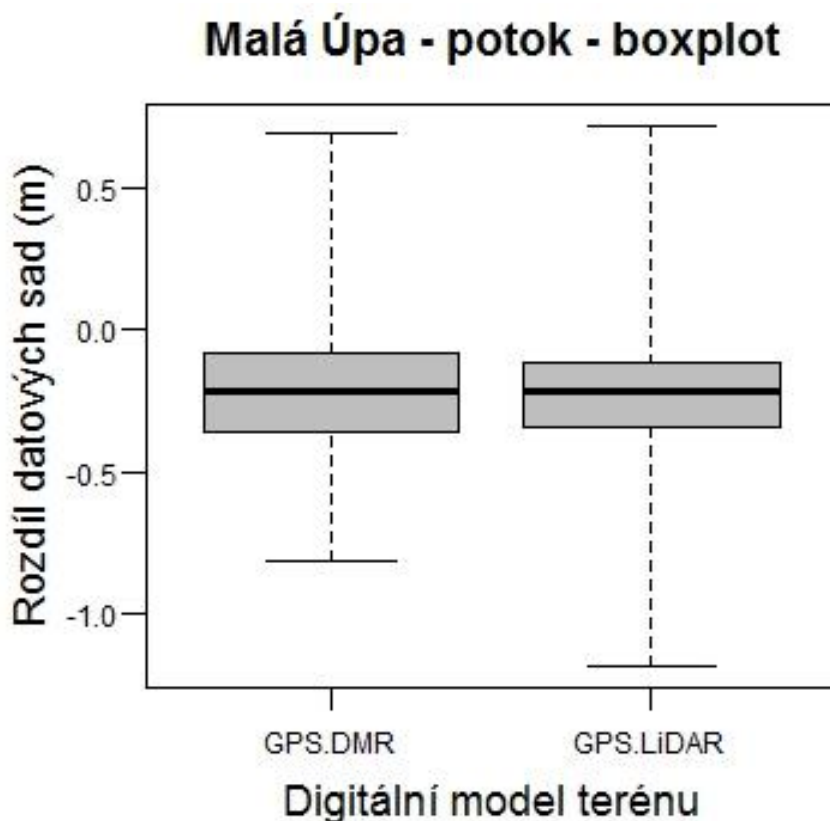
Graf 14: Kontrolní profil pro lokalitu Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)

### 5.3. Malá Úpa – potok

Potok se nachází těsně pod svahem, který je popisován v předchozí části (5.2 Malá Úpa – svah). Bylo zde zaměřeno cca 200 metrů vodního toku v odkrytém terénu. Říčka Malá Úpa je menším vodním tokem, jehož délka je zhruba 11 km. Těsně pod námi zaměřenou částí se vlévá do Sovího potoka. Průměrný roční průtok této říčky je  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mapa zaměřených bodů je vložena do příloh.

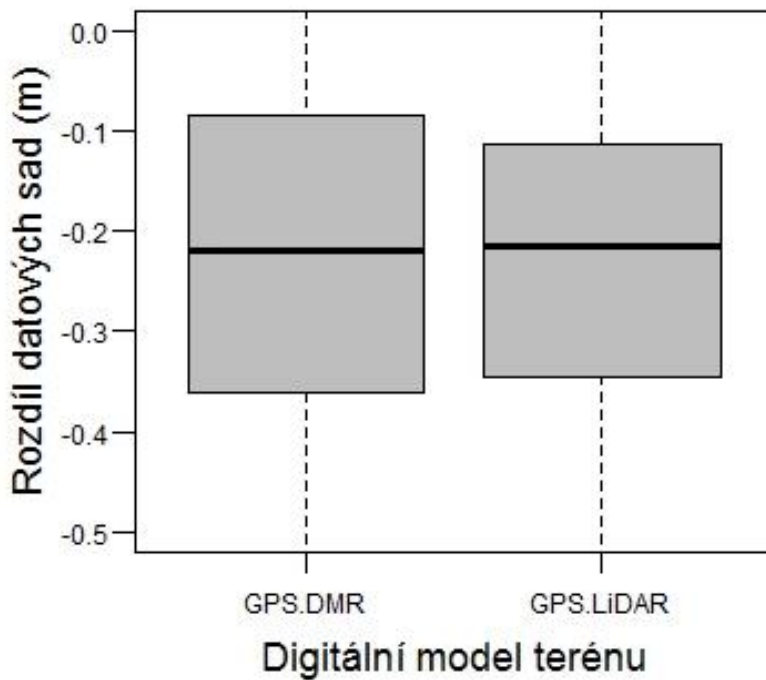
#### 5.3.1. Statistické údaje

Na této lokalitě je medián rozdílu u DMR5G  $-0.220$ , u druhého modelu  $-0.247$ . Medián je tedy přibližně stejný. Větších odlišností nabývá u kvantilů. Q1 (25%) je u DMR  $-0.356$ , u DMT2(1m)  $-0.343$ . Kvantil 75 % je u DMT2(1m)  $-0.114$  a DMR5G  $-0.084$ . Mezikvartilové rozpětí je tedy vyšší u DMR5G. Průměrný rozdíl modelu páté generace je oproti hodnotám z GPS  $-0.225$ , u druhého modelu je průměr  $-0.247$ . Odlišnost jednotlivých kvantilů je patrná z grafů č. 15 a 16. Dosažená přesnost měření GPS je  $0.039 \text{ m}$ .



Graf 15: Boxplot rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)

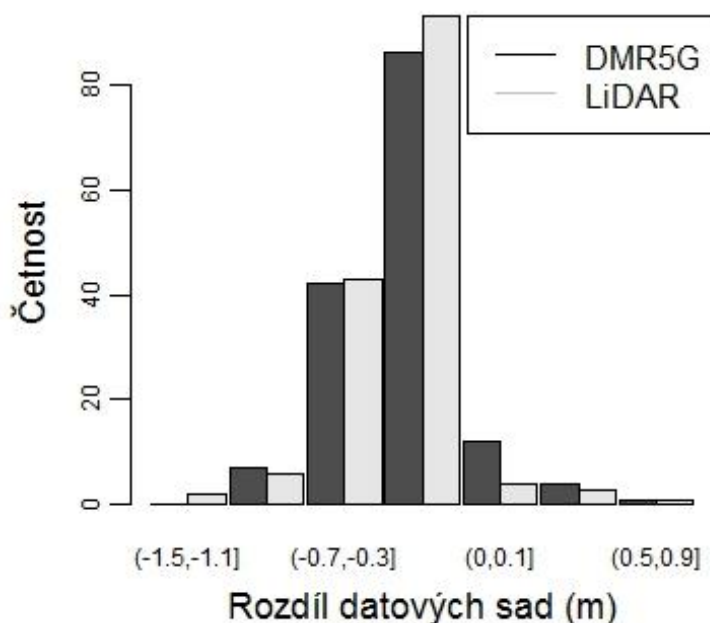
## Malá Úpa - potok - boxplot



Graf 16: Zvětšení boxplotu rozdílů datových sad na lokalitě Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)

Na grafu 17 je vizualizováno zastoupení rozdílů v intervalech. Na této lokalitě je u digitálních modelů nejvíce odlišností v intervalu od -0.3 do 0. Interval od -0.7 do -0.3 je též hojně zastoupen. Nejvyšší rozdíl mezi GPS a DMR5G je roven 0.693 m, u druhého modelu je nejvyšší rozdíl 0.717 m. Nejmenšími rozdíly jsou -0.816 m (DMR5G) a -1.184 m (DMT2(1m)).

## Malá Úpa - potok - histogram



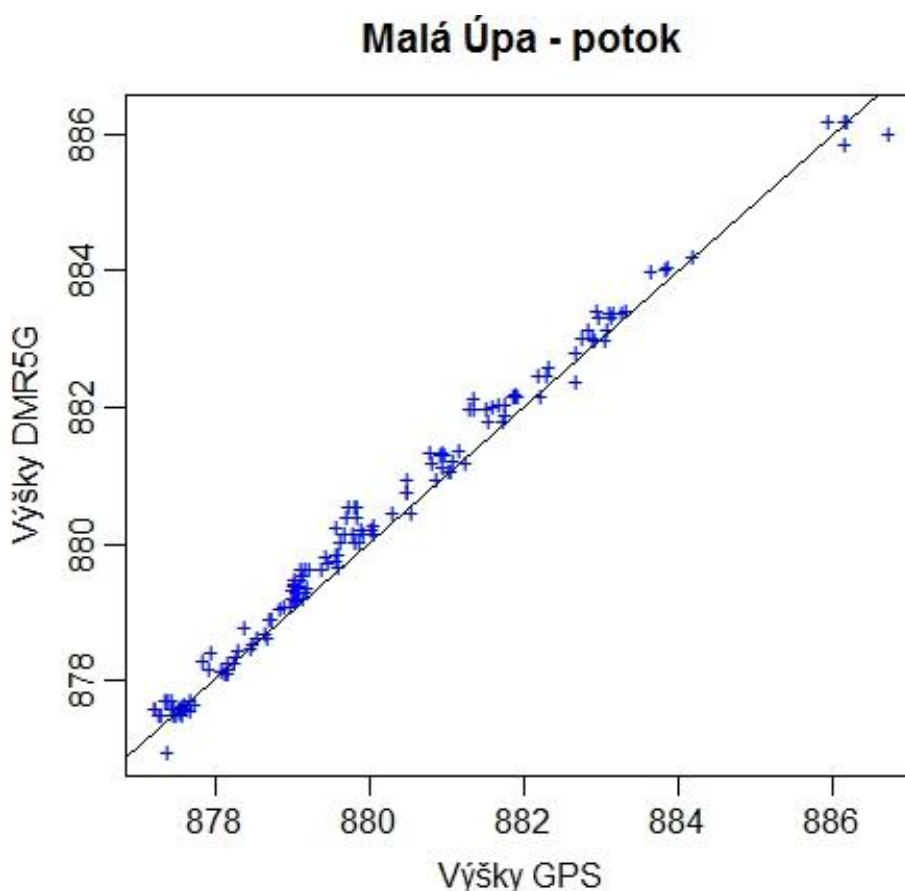
Graf 17: Histogram rozdílů datových sad na lokalitě Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)



Při tomto měření vznikalo nejvíce odlišností. Nejspíše je to způsobeno tím, že jsou laserové paprsky vodou pohlcovány a nedochází tak ke snímání skutečného dna ve vodním toku.

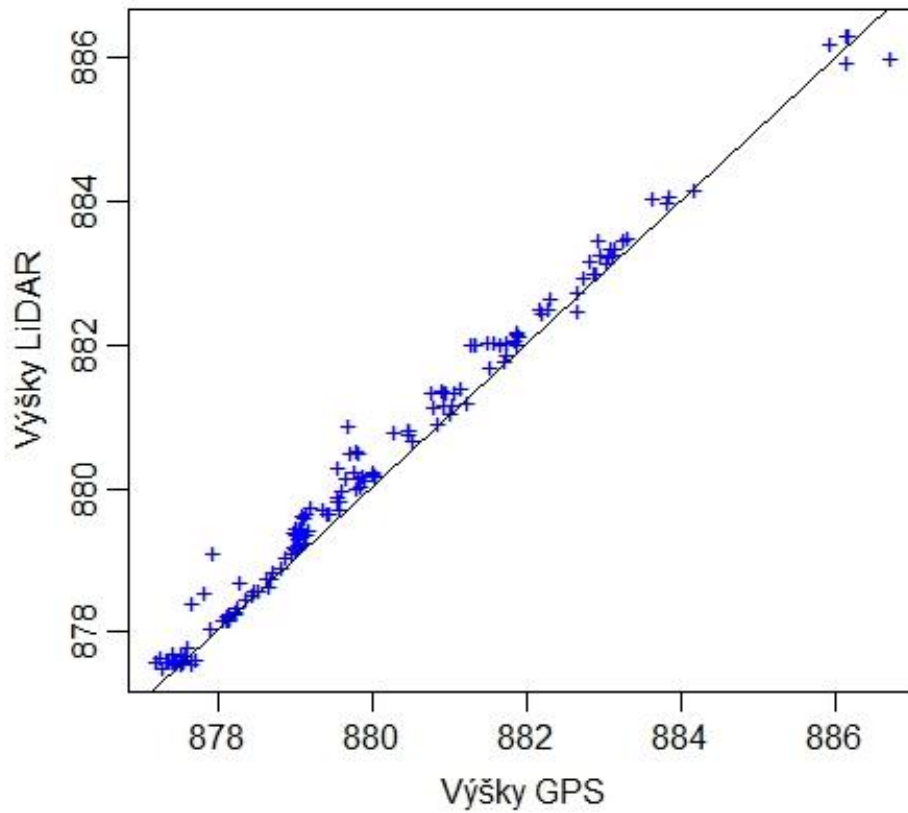
### 5.3.2. Nadmořské výšky

V této kapitole jsou porovnány nadmořské výšky identických bodů z odlišných digitálních modelů. Grafické porovnání je provedeno na lineárních grafech (graf 18, 19 a 20). Vzhledem k tomu, že se jedná o místa se shodnými souřadnicemi, platí předpoklad  $y=x$ . Minimální naměřená hodnota přístrojem GPS je 877.200 m, u DMR5G je nejnižší hodnota 877.000 m. U DMT2(1m) je nejnižším bodem místo s nadmořskou výškou 877.500 m. Nejvyššími hodnotami jsou 886.700 m u GPS, 886.200 m u DMR5G a u posledního modelu 886.300 m. U modelů vzniklých leteckých laserovým skenováním je viditelná podobnost. Ve srovnání s pozemním měřením GPS je terén u modelů vzniklých z dat dálkového průzkumu Země v této lokalitě nadhodnocován. Průměrná nadmořská výška této zaměřené části potoka je dle DMT2(1m) a DMR 880.400 m, u GPS 880.100 m.



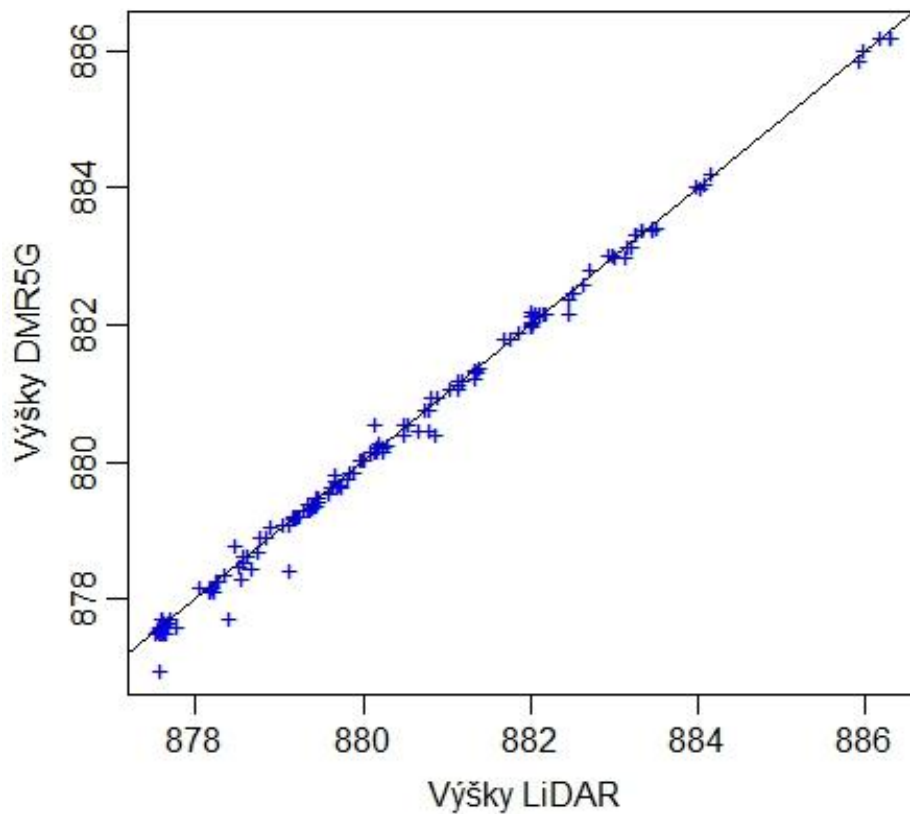
Graf 18: Grafické porovnání hodnot GPS a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)

### Malá Úpa - potok



Graf 19: Grafické porovnání hodnot GPS a LiDAR, (Leona Kubcová, 2017)

### Malá Úpa - potok



Graf 20: Grafické porovnání hodnot LiDAR a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)

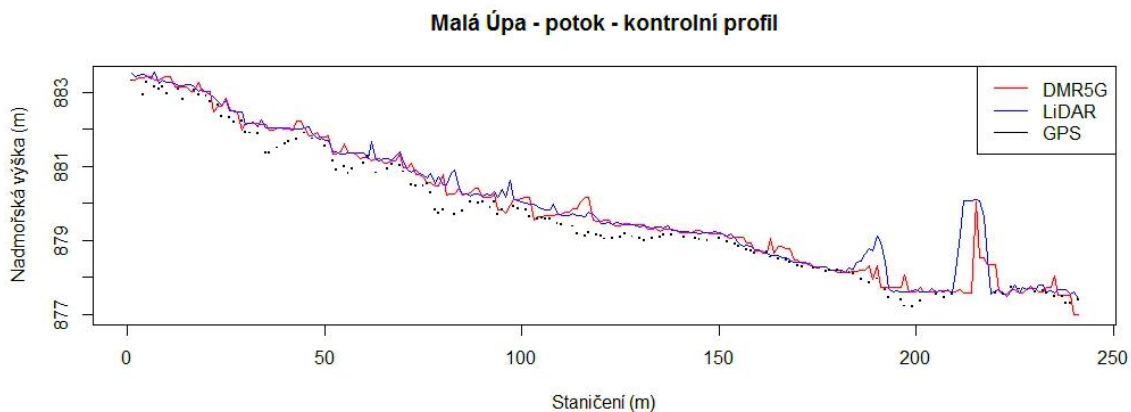
### 5.3.3. Kontrolní profil

Následující obrázek (obr. 11) zobrazuje body, které jsou zahrnuty do kontrolního profilu lokality Malá Úpa – potok. V těchto místech je z potoka přímý výhled na oblohu, vyjma cca 10 m v dolní části, kde nad tokem vede most s lesní cestou.



Obr. 11: Body kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)

Graf č. 21 je vizualizací průběhu nadmořských výšek v potoce. Terén je zde prezentován daty leteckého laserového skenování a ověřen vlastním kontrolním měřením. Nejnižším rozdílem je v tomto případě -1.184 m mezi GPS a DEM(1m). U těchto sad je průměrnou odchylkou -0.268 m a nejvyšší odchylkou 0.107 m. Odlíšnosti pozemního měření oproti DMR5G nabývají těchto hodnot: min -1.036 m, max 0.396 m a průměrný rozdíl -0.260 m. Průměrný rozdíl datových sad leteckého laserového skenování je 0.083 m. Největší rozdíl je 2.490 m a naopak nejmenší -0.800 m.



Graf 21: Kontrolní profil pro lokalitu Malá Úpa – potok (Leona Kubcová, 2017)

## 6. DISKUSE

Pro celou Evropu jsou stejně jako pro Českou republiku dostupné digitální modely terénu ASTER (rozlišení 15 m), SRTM GL1 a GL3 s rozlišením 30 a 90 m. Pro území téměř celé Evropy je též dostupný digitální model MONA PRO, který je odvozený zejména z topografických map v měřítku 1:50 000 (GISAT, 2008). MONA PRO je model dostupný v souřadnicovém systému WGS84 s výškovou přesností 5 m v rovinách, 10 m v kopcích a s 20 m v horských oblastech. Dalším dostupným modelem je SPOT 3D s výškovou přesností 10 – 20 m.

Přesnost digitálních modelů evaluoval již Dolanský (2008), který porovnával přesnost DEM z laserového měření s měřením pozemním na území národního parku České Švýcarsko. Největší zjištěnou odchylkou je 10.54 m mezi skalami, kde byla zjištěná přesnost celkově nižší. Odchylna bodů ležících na skále dosahuje přesnosti 0.12 m. Přesnost LiDARových dat potvrzuje i Tencer (2012). Podle jeho experimentu je dosahovaná přesnost kolem 0.10 m. Rozdíly datových sad v této práci poukazují na značné rozdíly mezi digitálními modely terénu vytvořenými z dat leteckého laserové skenování a GPS měřením. Nejvíce se od sebe liší v lokalitě Svatý Petr u Špindlerova Mlýna. Průměrná chyba DMR5G oproti GPS je zde 0.352 m, u druhého modelu DMT2(1m) je průměrný rozdíl 0.251 m. Použité DEM se od sebe odlišují průměrně o 10 cm. Průměrná přesnost měření GPS je v tomto terénu 0.051 m. Na svahu u Malé Úpy se DMT2(1m) od GPS průměrně liší -0.187 m a DMR5G o -0.174 m. Přesnost GPS zde dosáhla 0.023 m. Průměrný rozdíl se tedy u dat dálkového průzkumu Země rovná 13 mm. Pravděpodobně nebyl laserovými paprsky zachycen skutečný terén, ale nízký vegetační pokryv. Posledním analyzovaným místem je vodní tok v odkrytém terénu. Zde je povrch též nadhodnocován, stejně jako u svahu. Průměrný rozdíl DMR5G oproti GPS je zde -0.225 m, druhého DEM oproti GPS - 0.247 m a přesnost GPS 0.039 m.

Obecně lze říci, že v odkrytém terénu použité digitální modely z dálkových průzkumů Země povrch nadhodnocují. To je způsobeno především zachycováním nízké vegetace místo půdy. U lokality Svatý Petr může k podhodnocení docházet kvůli tomu, že GPS nedisponuje takovou přesností v oblastech bez přímého výhledu na oblohu jako v ostatních lokalitách. Nižší přesnost je způsobena tím, že přístroj komunikuje s menším počtem družic a nemůže přijmout informace z více zdrojů. Chyba GPS u zalesněného terénu je o 0.020 m vyšší než v lokalitách s přímým výhledem na oblohu.

Další příčinou rozdílů může být metoda vytvoření digitálního modelu terénu a jeho rozlišení. U lokalit s dobrým výhledem na oblohu DEM s rozlišením 1 m nabývá vyšších odchylek než DMR5G s rozlišením 2 m. Dalším zdrojem odlišností DEM je počet bodů, které byly na daném území naměřeny. U dat leteckého laserového skenování se musí před samotným vytvořením modelu nejprve surová data (tzv. mračno bodů) zpracovat a rozdělit do skupin. Nejnižší body jsou považovány za povrch Země. Z bodů vyšších vrstev se generují digitální modely povrchu nebo vegetačního krytu. Hustota bodů leteckého laserového skenování, ze kterého byl vytvořen digitální model terénu s rozlišením 1 m, je v průměru 5 bodů na m<sup>2</sup> pro území Krkonošského národního parku. DMR5G byl vytvořen s počáteční hustotou 1.6 b./ m<sup>2</sup> (Vojenské zeměpisné a povětrnostní služby, 2017). Rozdělením mračna bodů do klasifikačních částí se zabývá Dolanský (2004), který popisuje způsob členění bodů na několik typů (vegetaci, budovy a terén).

Výsledné modely ovlivňuje nejen hustota bodů, ale i časové období, ve kterém proběhlo skenování, a to především kvůli stupni rozvinutí vegetace. DMR5G má sice nižší hustotu bodů, ale sběr dat proběhl v příznivějším ročním období. V období bez vegetace (od března do května) je úspěšnost automatického zatřídění dat 90 %, naopak od června do září je úspěšnost automatického rozřídění pouze 30–40 % (ČÚZK, 2016). Skenování na území Krkonoš, z něhož je generován LiDAR s rozlišením 1 m, probíhalo firmou GEODIS na přelomu července a srpna. Sběr dat za účelem vzniku DMR5G probíhal v několika fázích. Zájmové území spadá do pásma „střed“, které bylo skenováno v období od 22. března 2010 do 10. října 2010 (ČÚZK, 2016).

Český úřad zeměměřický a katastrální garantuje chybu 0.180 m v odkrytém terénu a 0.300 m v zalesněném terénu (ČÚZK, 2010). Zalesněná lokalita Svatý Petr disponuje průměrnou odchylkou od GPS o 0.352 m a chybou GPS 0.051 m. U otevřených lokalit nabývá odlišnost oproti realitě -0.174 m na svahu a -0.225 m ve vodním toku. Garantovaná chyba je tedy splněna u lokality Malá Úpa – svah. Průměr rozdílů digitálního modelu reliéfu u terénu s přímým výhledem na oblohu je roven 0.199 m. Průměrná přesnost pozemního měření v otevřeném terénu je 0.031 m. Ve vodních tocích tedy není splněna garantovaná chyba. Příčinou může být to, že je laserový paprsek vyslaný z letadla vodou pohlčován a dochází tedy k nepřesnému měření. To potvrzuje Nováková et al. (2014), která ve své studii posuzuje vykreslení tvaru koryta z dat leteckého laserového měření.

## 7. ZÁVĚR

Výsledky práce ukazují, že rozlišení, metoda sběru dat a způsob zpracování mají vliv na výslednou podobu prezentace terénu digitálními modely. Dalším faktorem, který zásadně ovlivňuje přesnost digitálních modelů, je typ prostředí. Při leteckém laserovém skenování nemusí poslední odraz dosáhnout skutečného povrchu a reálný terén je v digitálních modelech zaměňován např. s kameny nebo vegetačním pokryvem.

Díky kontrolnímu měření bylo zjištěno, že DMR5G nesplňuje všechny parametry, které ČÚZK (2010) garantuje. V zalesněné lokalitě je chyba DMR5G 0.352 m oproti GPS a chyba měření s GPS je 0.051. Směrodatná odchylka rozdílu DMR5G a GPS je 0.865. Z toho vyplývá, že je zde terén podhodnocován a DMR5G nedosahuje přesnosti 0.300 m udávané ČÚZK. V lokalitách s otevřeným výhledem je terén naopak nadhodnocován, průměrně o 0.199 m. Pokud je terén s přímým výhledem na oblohu rozdělen na svah a vodní tok, je parametr přesnosti udávané ČÚZK splněn u svahu. Zde je výsledný průměrný rozdíl GPS a DMR5G -0.174 m, směrodatná odchylka 0.322 m a chyba měření GPS 0.023 m. Terén ve vodním toku se odlišuje o -0.225 m od GPS, chyba GPS je 0.039 a směrodatná odchylka rozdílu je 0.218 m. Ani zde není garantovaná chyba 0.180 m splněna. Ve vodních tocích se DEM tedy liší více než v ostatních typech prostředí.

Digitální modely terénu generované z dat leteckého laserového skenování oproti sobě nenabývají takových odlišností. V odkrytých oblastech se od sebe průměrně liší o 0.022 m ve vodním toku a na svahu o 0.013 m. Větších rozdílů se dostává až v zalesněném vodním toce, kde se rozcházejí o 0.176 m. Celkový průměrný rozdíl digitálních modelů z dat leteckého laserového skenování je tedy 0.070 m. U lokalit s přímým výhledem je terénu bližší DMR5G s rozlišením 2 m, ale ve vodním toku v lese se realitě více blíží digitální model s rozlišením 1 m.

## 8. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### Odborné publikace, články:

ABRAMS M., TSU H., HULLEY G., IWAO K., PIERI D., CUDAHY T. et KARGEL J., 2015: The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38 (15), 292-301.

DOLANSKÝ T., 2004: Lidary a letecké laserové skenování. *Acta Universitatis Purkynianae* 99, Ústí nad Labem, 100 s.

DOLANSKÝ T., 2008: Porovnání přesnosti DMT z laserového skenování s pozemními měřeními. *Příspěvek GIS Ostrava*, Ostrava, 6 s.

FOGL M. et MOUDRÝ V., 2015: Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66 (16), 73-80.

GOODCHILD M. F.M, 2011: Scale in GIS: An Overview. *Geomorphology*, 130 (11), 5-9.

HENGEL T. et REUTER I. H., 2009: *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Soil Science 33, Amsterdam, Oxford, 765 s.

KLIMÁNEK M., 2006: *Digitální modely terénu*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 85 s.

KLIMÁNEK M. et DOUDA P., 2006: Hydrologické modelování v GIS Idrisi na základě DMT. *Informační a poradenské centrum PEF v Praze*, Praha, 1-7 s.

KLOUČEK T., LAGNER O. et ŠÍMOVÁ P., 2015: How does data influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. *Applied Geography*, 64 (15), 46-54.

KOLÁŘ J., 2003: *Geografické informační systémy 10*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 161 s.

KRAUS K., 2000: *Photogrammetrie Band 3*. Dümmler Verlag, Bonn, 459 s.

KREVELD M., 1997: *Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 78 s.

MARŠÍKOVÁ M. et MARŠÍK Z., 2007: *Dějiny zeměměřičství a pozemkových úprav v Čechách a na Moravě v kontextu světového vývoje*. Libri, Praha, 83 s.

MARTÍNEK K., KOPAČKOVÁ V., ŠTYCH P., BRAVENÝ L., 2007: GIS a DPZ v geologických vědách v prostředí ArcGIS a jeho extenzí. *Citt Praha*, Praha, 156 s.

MATGEN P., HOSTACHE R., SCHUMANN G., PFISTER L., HOFFMANN L., SAVENIJE H. H. G., 2010: Towards an automated SAT-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 7-8 (11), 241-252.

MOUDRÝ V. et ŠÍMOVÁ P., 2013: Relative importance of climate , topography, and habitats for breeding wetland birds with different latitudinal distributions in the Czech Republic. *Applied Geography*, 44 (13), 165-171.

NOVÁKOVÁ H., MAKOVCOVÁ M., UHLÍŘOVÁ K., LEVITUS V., VALENTA P., VALENTOVÁ J, 2014.: Klasifikace přesnosti vymezení stávajících záplavových území v ČR. *VTEI*, 6 (14), 1-5.

PACINA J. et BREJCHA M., 2014: Digitální modely terénu. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 73 s.

RAPANT P., 2002: Družicové polohové systémy. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 200 s.

RAPANT P., 2006: Geoinformatika a geoinformační technologie. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 500 s.

TUČEK J., 1998: Geografické informační systémy, principy a praxe. Computer Press, Praha, 424 s.

VAZE J., TENG J. et SPENCER G., 2010: Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environment Modelling & Software*, 25 (10), 1086-1098.

## Internetové zdroje:

ČESKÝ KOSMICKÝ PORTÁL, ©2017: Radarová altimetrie chytla s misí GOCE druhý dech (online) [cit. 2017.04.04], dostupné z <<http://www.czechspaceportal.cz/7-sekce/aktuality/radarova-altimetrie-chytla-s-misi-goce-druhy-dech.html>>.

ČESKÝ KOSMICKÝ PORTÁL, ©2017: Tisková zpráva: Evropský navigační systém Galileo zahajuje svůj provoz (online) [cit. 2017.03.03], dostupné z <<http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/tiskova-zprava-evropsky-navigacni-system-galileo-zahajuje-svuj-provoz.html>>.

ČÚZK, ©2010: Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR4G) (online) [cit. 2016.08.08], dostupné z <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(bminsy1qusdrn2hcb5pym5dd\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=301](http://geoportal.cuzk.cz/(S(bminsy1qusdrn2hcb5pym5dd))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301)>.

ČÚZK, ©2010: Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR5G) (online) [cit.2016.08.08], dostupné z <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(qlyumkoyquaybq2pnfckydy4\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(qlyumkoyquaybq2pnfckydy4))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)>.

ČÚZK, ©2016: Prohlížeč sloužba Esri ArcGIS Server (online) [cit.2017.04.22], dostupné z <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(2gswpamb4ds1lrabzpu0gh\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.AGS&metadataID=CZ-CUZK-AGS-ZM-P&metadataXSL=metadata.sluzba&head\\_tab=sekce-03-gp&menu=3140](http://geoportal.cuzk.cz/(S(2gswpamb4ds1lrabzpu0gh))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.AGS&metadataID=CZ-CUZK-AGS-ZM-P&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3140)>.



ČÚZK, ©2016: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace DMR5G (online) [cit.2017.04.22], dostupné z <[https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA\\_ZPRAVA\\_DMR\\_5G.pdf](https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf)>.

GISAT, ©2008: ASTER GDEM (online) [cit. 2016.08.09], dostupné z <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/aster-dem>>.

GISAT, ©2008: MONA PRO (online) [cit. 2017.04.22], dostupné z <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/mona-pro>>.

GISAT, ©2008: SPOT 3D (online) [cit. 2017.04.22], dostupné z <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/spot-3d>>.

GISAT, ©2008: SRTM DEM (online) [cit. 2016.08.09], dostupné z <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/srtm-gdem>>.

IS MUNI, © 2012: TENCER T.: LiDAR- Pořizování 3D dat (online) [cit. 2017-04-22], dostupné z <[https://is.muni.cz/el/1421/podzim2012/AEA\\_73/Tencer\\_-\\_LiDAR\\_-\\_Porizovani\\_3D\\_dat.pdf](https://is.muni.cz/el/1421/podzim2012/AEA_73/Tencer_-_LiDAR_-_Porizovani_3D_dat.pdf)>.

R Project, © 2017: R-3.3.3 for Windows (online) [cit. 2017-04-04], dostupné z <<https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>>.

SLIDEPLAYER, ©2017: NOVÁK J. et CHODÚR M.: Globální družicové polohové systémy Galileo a GLONASS (online) [cit. 2017.03.03], dostupné z <<http://slideplayer.cz/slide/3740292/>>.

VANÍČEK T., ©2009: Triangulace (online) [cit. 2017.03.10], dostupné z <[http://kix.fsv.cvut.cz/~vanicek/vyuka\\_z09/Triangulace.ppt](http://kix.fsv.cvut.cz/~vanicek/vyuka_z09/Triangulace.ppt)>.

VOJENSKÉ ZEMĚPISNÉ A POVĚTRNOSTNÍ SLUŽBY, ©2017: Základní informace o průběhu a rozsahu leteckého laserového skenování celého území ČR a o produktech ze získaných dat (online) [cit. 2017.04.22], dostupné z <[http://www.vojzesl.cz/aktuality.php?a=zakladni\\_informace\\_o\\_laserovem\\_snimkovani.html](http://www.vojzesl.cz/aktuality.php?a=zakladni_informace_o_laserovem_snimkovani.html)>.

100+1, © 2017: Planeta Země okem družice Terra (online) [cit. 2017-03-10], dostupné z <<http://www.stoplusjednicka.cz/planeta-zeme-okem-druzice-terra>>.

## Seznam obrázků:

Obr. 1: Rozdíl mezi DEM a DSM (Geoimage, 2012)	14
Obr. 2: Prezentace DEM pomocí čtverců (1), trojúhelníků (2), ( <a href="http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp">http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp</a> )	15
Obr. 3: ZABAGED – výškopis – 3D vrstevnice, (ČÚZK, 2010)	15
Obr. 4: Digitální model terénu, (LinkedIn, 2014)	16
Obr. 5: Delaunayova triangulace, (Pacina et Brejcha, 2014)	17
Obr. 6: Získávání dat, (Hippenstiel et Brownson, 2012)	19
Obr. 7: Laserový paprsek zachycující odlišné vrstvy, (Gisgeography, 2017)	20
Obr. 8: Svět z družice Terra v roce 2005, (100+1, 2013)	21
Obr. 9: Body kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)	33
Obr. 10: Body kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)	38
Obr. 11: Body kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)	43

*URL1:* < <http://www.geoimage.com.au/DEMS/dems-overview> > [cit. 2017.02.25]

*URL2:* < <http://wtlab.iis.u-tokyo.ac.jp/~wataru/lecture/rsgis/rsnote/cp6/6-10-2.gif> > [cit. 2017.03.03]

*URL3:* <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(nrx5usbuo4qjpcpywy3p2vi0\)\)/Ukazky/velke/CZ-CUZK-ZABAGED-VV.jpg](http://geoportal.cuzk.cz/(S(nrx5usbuo4qjpcpywy3p2vi0))/Ukazky/velke/CZ-CUZK-ZABAGED-VV.jpg)> [cit. 2017.04.04]

*URL4:* <<https://www.linkedin.com/pulse/20141024094504-2211428-know-your-geospatial-industry-part-2-introducing-digital-elevation-model>> [cit. 2017.04.04]

*URL6:* < [https://www.e-education.psu.edu/geog481/l1\\_p3.html](https://www.e-education.psu.edu/geog481/l1_p3.html) > [cit. 2017.03.09]

*URL7:* <<http://gisgeography.com/lidar-light-detection-and-ranging/>> [cit. 2017.03.09]

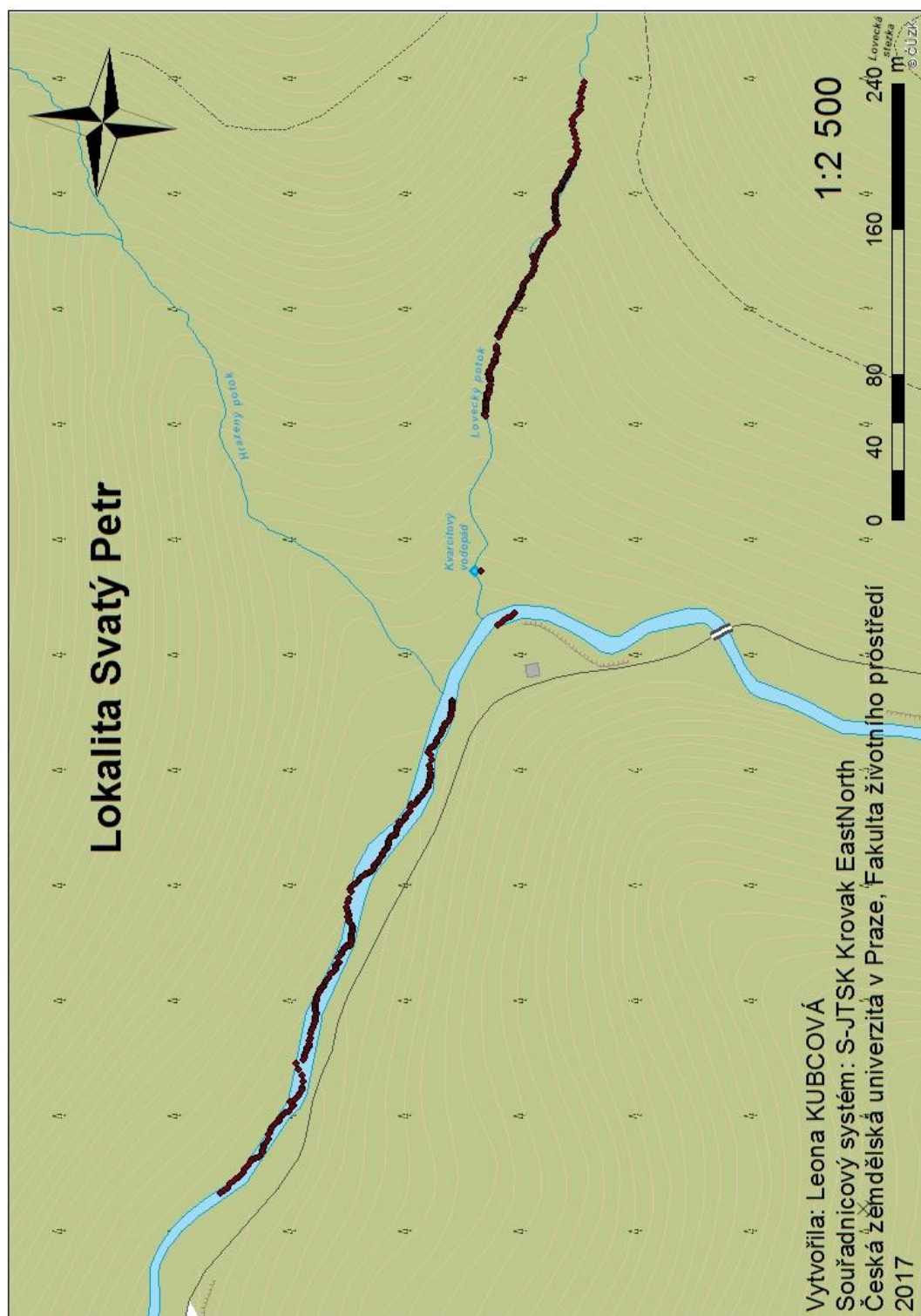
## Seznam výřezů:

Výřez 1: Tabulka v programu RStudio pro lokalitu Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)	26
Výřez 2: Výpočet statistických údajů v RStudiu, (Leona Kubcová, 2017)	27
Výřez 3: Vytvoření boxplotu, (Leona Kubcová, 2017)	27
Výřez 4: Vytvoření histogramu, (Leona Kubcová, 2017)	27
Výřez 5: Vytvoření kontrolního profilu, (Leona Kubcová, 2017)	28

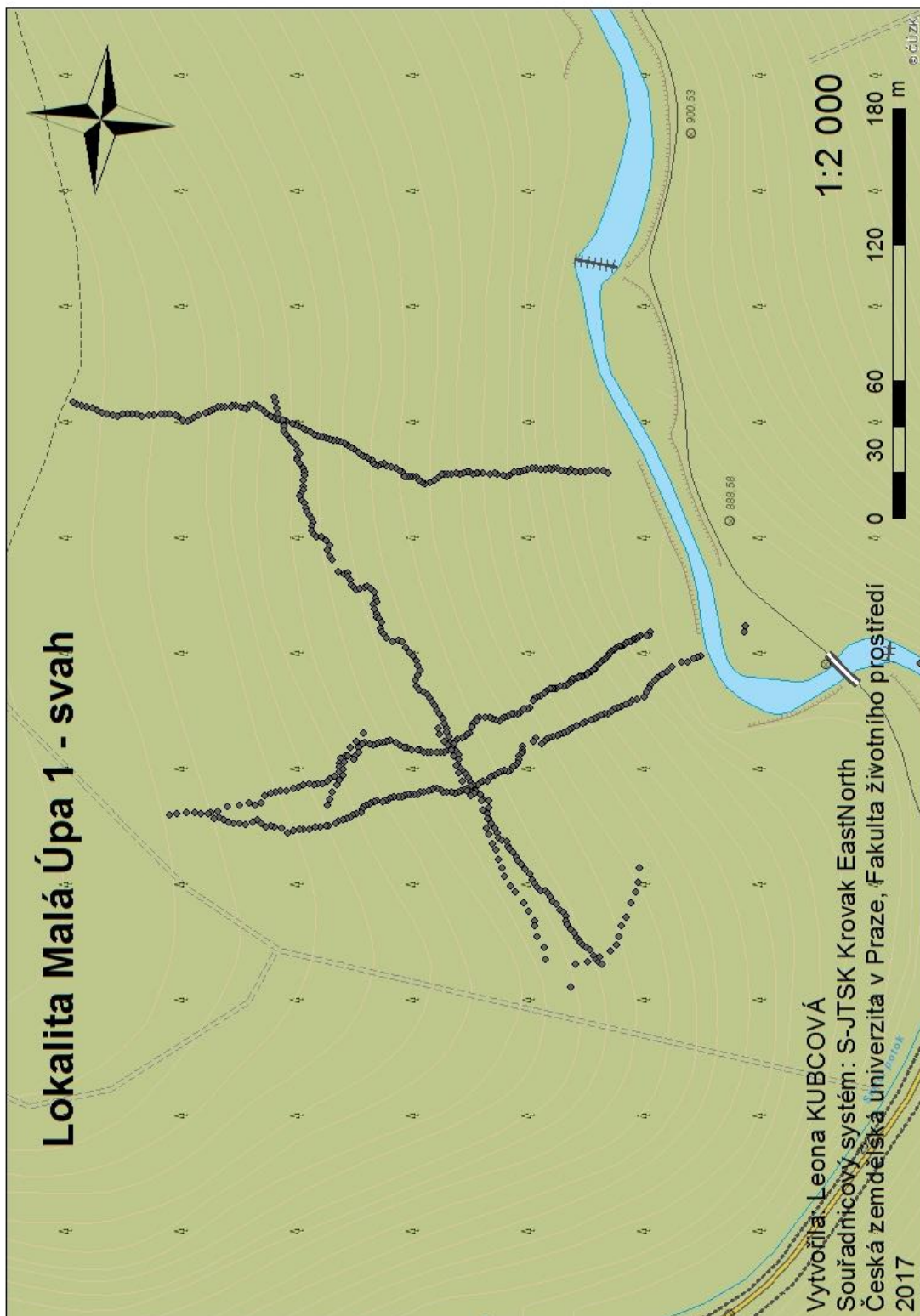
## Seznam grafů:

Graf 1: Boxplot rozdílu datových sad na lokalitě Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)	29
Graf 2: Zvětšení boxplotu rozdílu datových sad na lokalitě Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)	30
Graf 3: Histogram rozdílu datových sad na lokalitě Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)	30
Graf 4: Grafické porovnání hodnot GPS a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)	31
Graf 5: Grafické porovnání hodnot GPS a LiDAR, (Leona Kubcová, 2017)	32
Graf 6: Grafické porovnání hodnot LiDAR a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)	32
Graf 7: Kontrolní profil pro lokalitu Svatý Petr (Leona Kubcová, 2012)	33
Graf 8: Boxplot rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)	34
Graf 9: Zvětšení boxplotu rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2012)	35
Graf 10: Histogram rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)	35
Graf 11: Grafické porovnání hodnot GPS a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)	36
Graf 12: Grafické porovnání hodnot GPS a LiDAR, (Leona Kubcová, 2017)	37
Graf 13: Grafické porovnání hodnot LiDAR a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)	37
Graf 14: Kontrolní profil pro lokalitu Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)	38
Graf 15: Boxplot rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)	39
Graf 16: Zvětšení boxplotu rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)	40
Graf 17: Histogram rozdílu datových sad na lokalitě Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)	40
Graf 18: Grafické porovnání hodnot GPS a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)	41
Graf 19: Grafické porovnání hodnot GPS a LiDAR, (Leona Kubcová, 2017)	42
Graf 20: Grafické porovnání hodnot LiDAR a DMR5G, (Leona Kubcová, 2017)	42
Graf 21: Kontrolní profil pro lokalitu Malá Úpa – potok (Leona Kubcová, 2017)	43

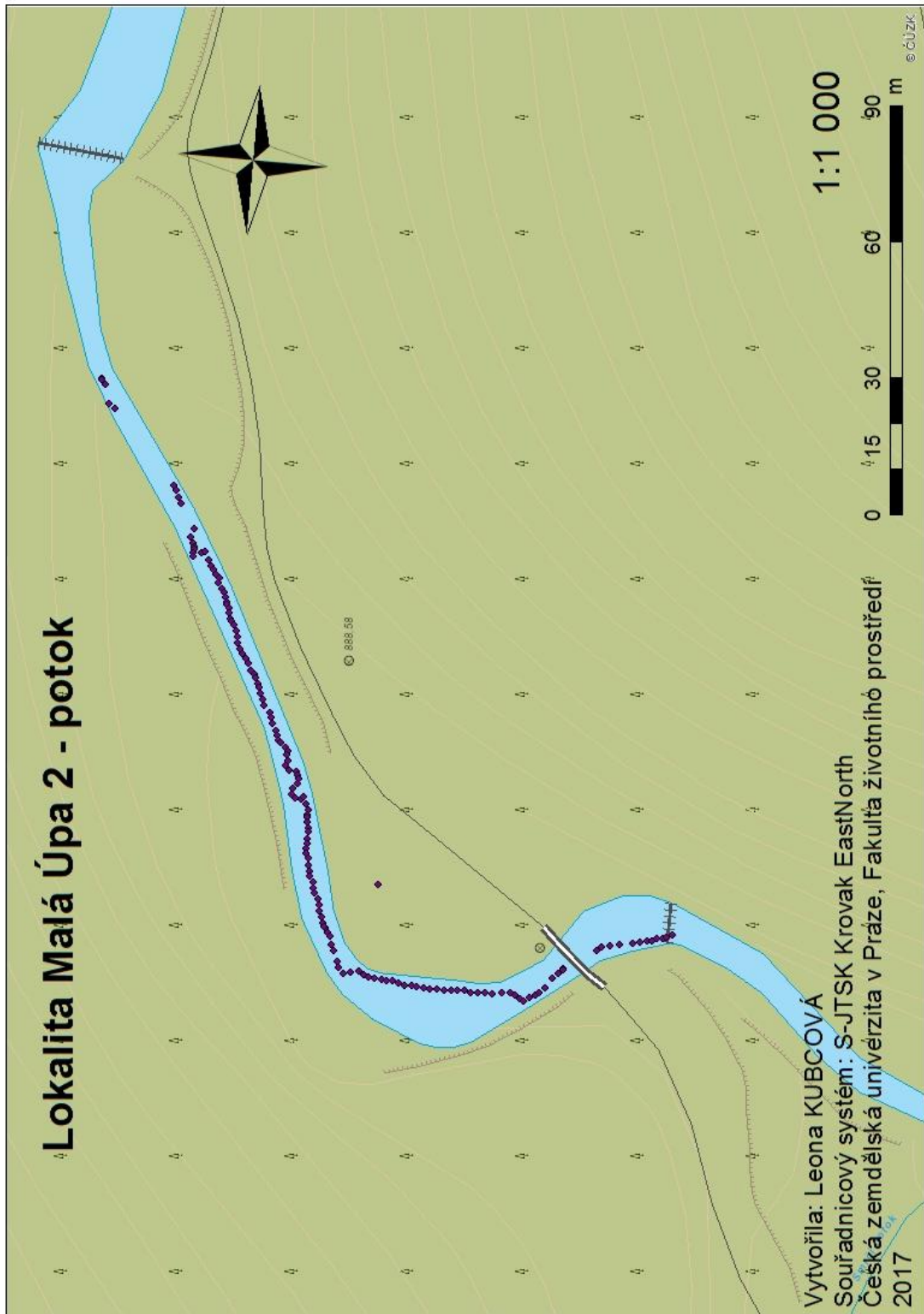
## 9. PŘÍLOHY



Příloha 1: Mapa lokality Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)

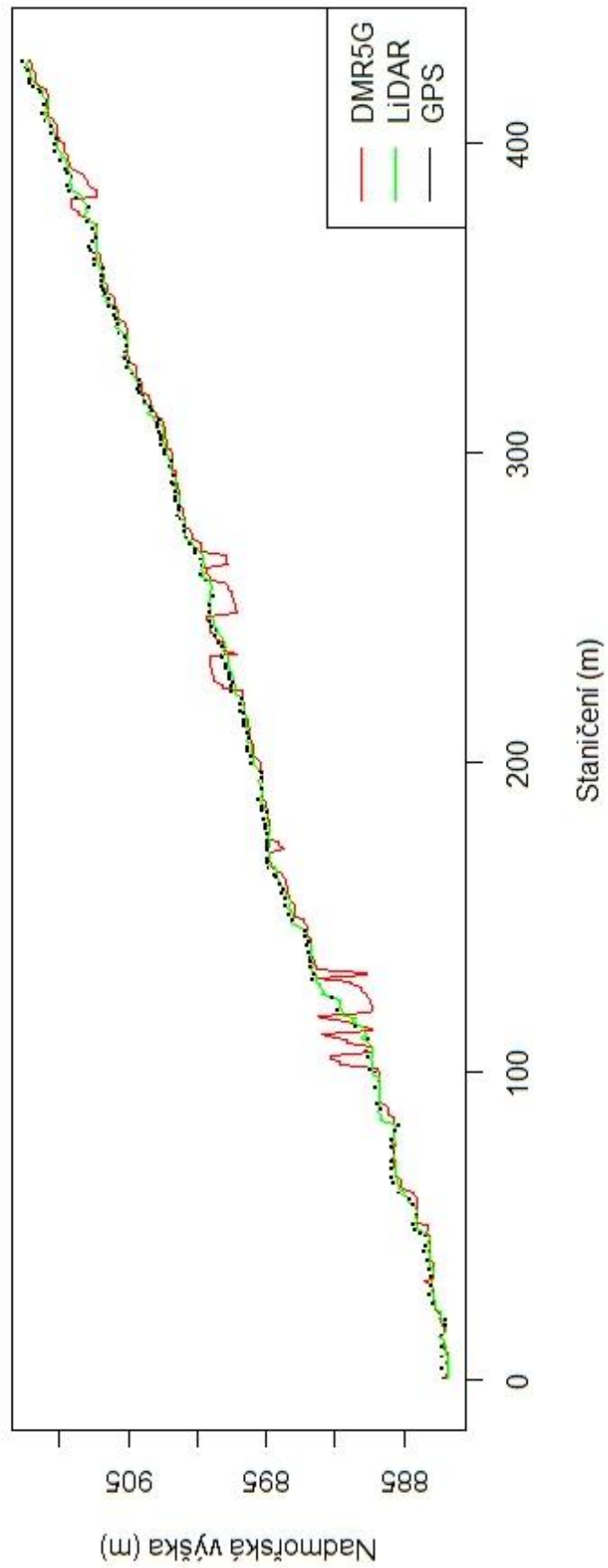


Příloha 2: Mapa lokality Malá Úpa - svah, (Leona Kubcová, 2017)



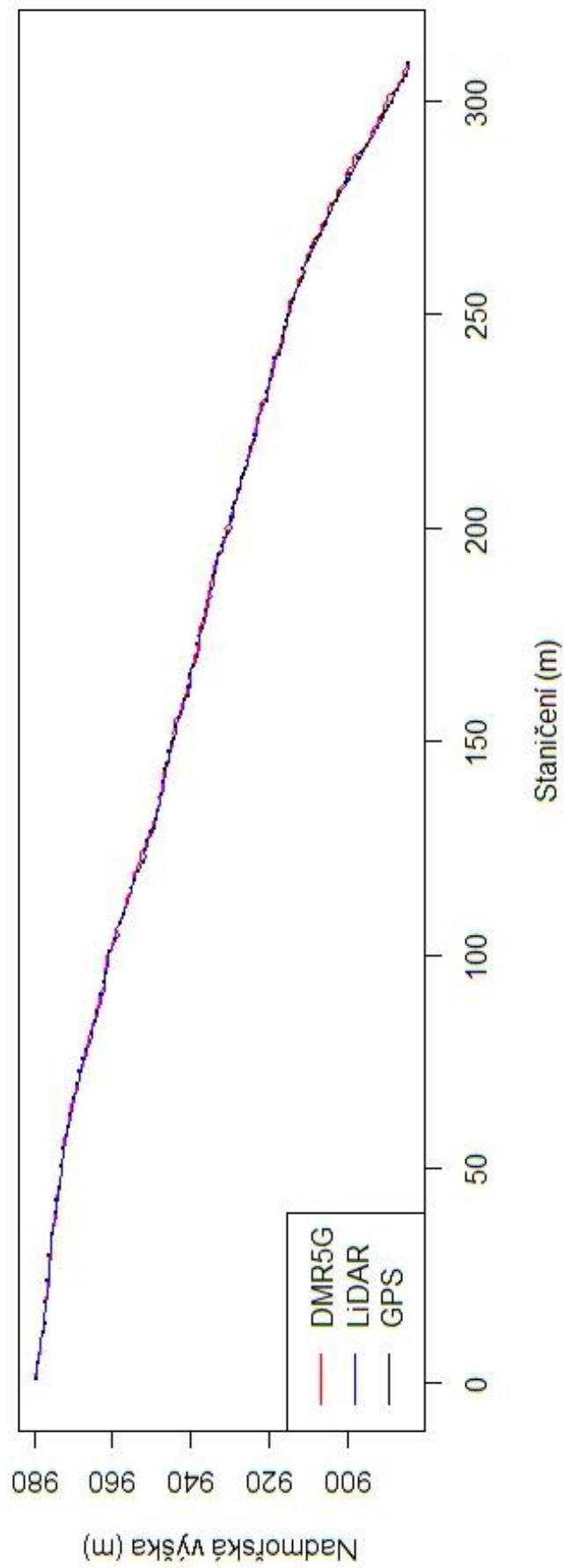
Příloha 3: Mapa lokality Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)

### Svatý Petr - kontrolní profil



Příloha 4: Kontrolní profil lokality Svatý Petr, (Leona Kubcová, 2017)

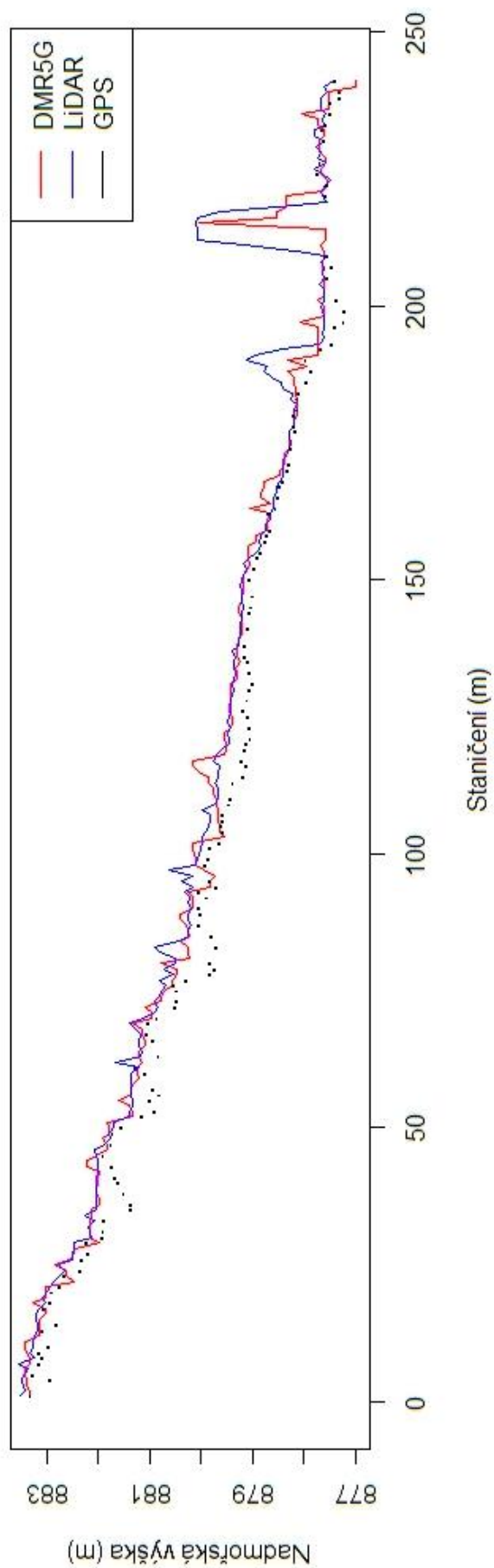
### Malá Úpa - svah - kontrolní profil



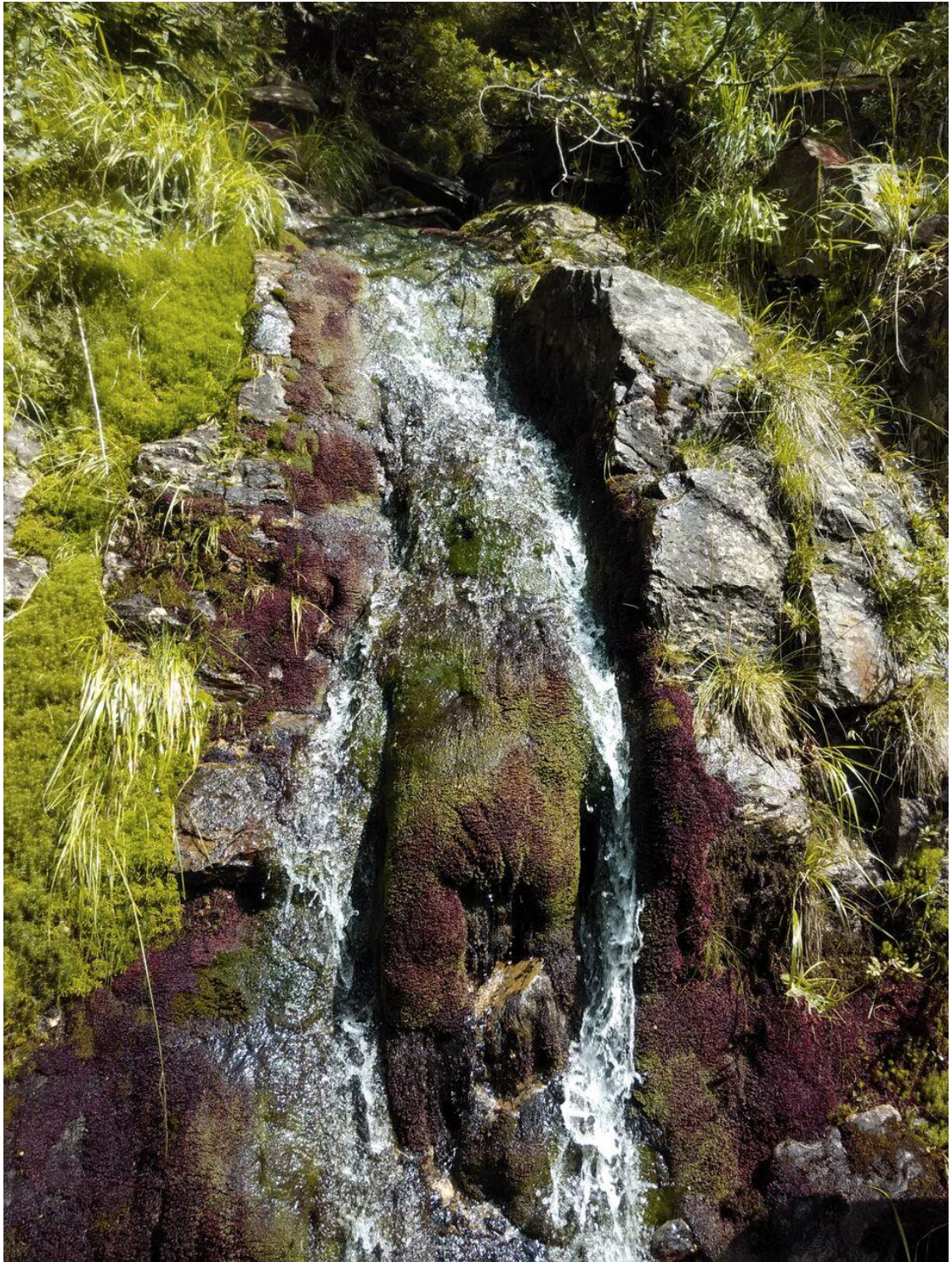
Příloha 5: Kontrolní profil lokality Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)



### Malá Úpa - potok - kontrolní profil



Příloha 6: Kontrolní profil lokality Malá Úpa – potok, (Leona Kubcová, 2017)



*Příloha 7: Kvarcitový vodopád, (Leona Kubcová, 2017)*



*Příloha 8: Hrazený potok, (Leona Kubcová, 2017)*



*Příloha 9: Malá Úpa – svah, (Leona Kubcová, 2017)*



*Příloha 10: Malá Úpa – svah, pohled od potoka, (Leona Kubcová, 2017)*



*Příloha 11: Vedoucí práce při měření v potoce Malá Úpa, (Leona Kubcová, 2017)*



Příloha 12: Náročné podmínky kontrolního měření, (Leona Kubcová, 2017)



Příloha 13: Měření na sjezdovkách Černé Hory, (Leona Kubcová, 2017)