

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROTŘEDÍ

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování



Zhodnocení přesnosti dostupných digitálních modelů terénu
v Krkonoších

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Luděk Hloušek

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Rok: 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Luděk Hloušek

Aplikovaná ekologie

Název práce

Zhodnocení přesnosti dostupných digitálních modelů terénu v Krkonoších

Název anglicky

Accuracy assessment of digital elevation models in Krkonose mountains

Cíle práce

Cílem práce je posoudit kvalitu dostupných digitálních modelů terénu na území Krkonošského národního parku (KRNAP).

- Jak se liší přesnost volně dostupných globálních modelů terénu (např. SRTM) od v Česku dostupného DMR4G?
- Dosahuje DMR4G přesnosti udávané CUZK?
- Liší se přesnost modelů v různých prostředích (například v lese a na loukách)?

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). Mezi globálně a volně dostupné patří SRTM (rozlišení 30m) nebo ASTER (rozlišení 30m). Na území ČR je navíc dostupný model terénu DMR4G a pro KRNAP také velmi přesná data leteckého laserového skenování (LiDAR). Autor se v literární rešerši zaměří na prostorová data, jejich kvalitu a na existující digitální modely terénu. Dostupné modely terénu porovná s vlastním měřením na území Krkonošského národního parku.

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran textu

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. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Zhodnocení přesnosti dostupných digitálních modelů terénu v Krkonoších* vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph. D. a že jsem uvedl veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 18. 4. 2017

.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za velkou míru trpělivosti, odborné vedení a cenné rady, bez kterých by nebylo možné tuto práci vytvořit. Mé díky patří také celé rodině za důvěru, trpělivost a podporu během celého studia a všem ostatním, kteří přispěli ke vzniku této práce.

Abstrakt

Z digitálních modelů terénu (DTM) můžeme získat základní topografické informace o zemském povrchu, které mají využití v mnoha oborech. Důležitým rysem DTM je jejich rozlišení, které má vliv na přesnost výsledné analýzy. V současné době lze nalézt různé zdroje DTM, které jsou získávány odlišnými metodami. Cílem této diplomové práce bylo porovnat volně dostupný SRTM (30 x 30 m), DMR 4G (5 x 5 m) a DTM vytvořený z leteckého laserového skenování (1 x 1 m) na území Krkonošského národního parku s hodnotami z terénního měření. Dále bylo hodnoceno, k jakým rozdílům v přesnosti dochází na různých typech stanovišť. Celkem bylo zaměřeno 812 kontrolních bodů na třech typech stanovišť, a to koryta vodních toků (219), svahy bez vegetace (194), svahy s vegetací (419). Hodnoty byly pak porovnány na základě výškového rozdílu (ΔH), směrodatné odchylky ($SD(\sigma)$) a střední kvadratické chyby (RMSE). Analýza ukázala, že SRTM má nejnižší přesnost a to především na lokalitách s vegetačním krytem RMSE 18, 31 m. DMR 4G dosahuje lepší vertikální přesnosti než SRTM a hodí se pro jemnější analýzy. Vertikální přesnost DMR 4G byla porovnána s oficiálními údaji udávanými ČÚZK; v otevřeném terénu (RMSE 0,3 m) a v zalesněném terénu (RMSE 1 m). Tyto údaje se neshodují s výsledky práce, kde v otevřeném terénu činí RMSE 1,01 m a v lokalitách s vegetací RMSE 1,59 m. Nejpresnějším DTM je model vytvořený z leteckého laserového skenování, který dosahuje nejvyšší přesnosti a zachovává i menší terénní charakteristiky. Konkrétně v otevřeném terénu RMSE 0,42 m a v zalesněném terénu RMSE 0,25 m. Tato práce ukazuje, jak je důležité zvolit vhodný DTM pro konkrétní analýzu a k jakým vertikálním nepřesnostem může docházet na různých typech stanovišť.

Klíčová slova: Digitální model terénu, přesnost, SRTM, DMR 4G, LiDAR

Abstract

Fundamental topographic information about Earth surface can be accessed from digital terrain models (DTM). These can have meaningful use in various fields. Important DTM feature is its resolution which has an impact on the analysis results. Currently, various sources of DTM which are collected with different methods can be found. Aim of this thesis was to compare freely accessible SRTM (30 x 30 m), DMR 4G (5 x 5 m) and DTM created from light detection and ranging data (1 x 1 m) in the Krkonoše mountains national park with the data collected from own terrain measurement. It also evaluates specific differences on various habitats. Total of 812 control points were collected on three habitat types – stream channels (219), hillslope without vegetation (194), hillslope with vegetation (419). The values were compared based on height difference (ΔH), standard deviation ($SD(\sigma)$) and root mean square error (RMSE). The analysis showed that the SRTM has the lowest accuracy and large part of the spatial data are being lost. The worst situation is on the localities with vegetation RMSE 18, 31 m. The DMR 4G values are far more accurate than SRTM and are useful for more precise analysis. The DMR 4G values were compared with the accuracy information from ČÚZK which is RMSE 0,3 m in terrain without vegetation and RMSE 1 m in terrain with vegetation. These data do not match with the results from this thesis, which resulted in RMSE 1,01 m in terrain without vegetation and RMSE 1,59 m in terrain with vegetation. The most accurate is the model created from light detection and ranging data, which has the best accuracy and captures even the smaller terrain characteristics. RMSE 0,42 m in terrain without vegetation and RMSE 0,25 m in terrain with vegetation. This thesis shows the importance of choosing the most suitable DTM for the particular analysis and the potential loss of spatial information in various habitats.

Key word: Digital terrain model, accuracy, SRTM, DMR 4G, LiDAR

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD	11
2 LITERÁRNÍ REŠERŠE	13
2.1 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU	13
2.2 DATOVÁ REPREZENTACE DTM.....	14
2.2.1 Vektorová struktura	15
2.2.2 Rastrový model.....	15
2.2.3 Trojúhelníková nepravidelná síť bodů (TIN)	16
2.3 ZDROJOVÁ DATA PRO DTM.....	16
2.3.1 Nivelace	17
2.3.2 Tachymetrie	18
2.3.3 Globální navigační satelitní systémy	18
2.3.4 Fotogrammetrická analýza	19
2.3.5 Radarové snímání	20
2.3.6 Laserové skenování	21
2.3.7 Existující digitální a analogová data	21
2.4 ZDROJE DIGITÁLNÍCH MODELŮ TERÉNU	22
2.4.1 SRTM	22
2.4.2 ASTER GDEM	22
2.4.3 DMR 4G.....	22
2.4.4 DMR 5G.....	23
2.4.5 DMP 1G.....	23
3 METODIKA.....	24
3.1 POPIS DAT	24
3.2 SBĚR DAT.....	24
3.3 ZÁKLADNÍ ANALÝZA DAT	25
3.4 SKLON	25
3.5 STATISTICKÁ ANALÝZA	25
4 VÝSLEDKY	27
4.1 KORYTA VODNÍCH TOKŮ	27
4.1.1 Výškový profil.....	27
4.1.2 Sklonitostní poměry.....	28
4.1.3 Statistické ukazatele	29
4.2 SVAHY BEZ VEGETACE.....	31
4.2.1 Výškový profil.....	31

4.2.2	<i>Sklonitostní poměry</i>	32
4.2.3	<i>Statistické ukazatele</i>	33
4.3	SVAHY S VEGETACÍ	35
4.3.1	<i>Výškový profil</i>	35
4.3.2	<i>Sklonitostní poměry</i>	37
4.3.3	<i>Statistické ukazatele</i>	38
4.4	CELKOVÉ SROVNÁNÍ.....	39
5	DISKUZE	41
6	ZÁVĚR	44
7	REFERENCE	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ	52
	SEZNAM TABULEK	53
	PŘÍLOHY	55

Seznam použitých zkratk

2 D	Dvourozměrný svět
3 D	Trojrozměrný svět
ASTER	Globální digitální model terénu, (<i>The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflecton Radiometer</i>)
GDEM	
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DEM	Digitální výškový model, (<i>Digital Elevation Model</i>)
DEN	Digitální model objektů přírody, (<i>Digital model of objects nature</i>)
DMP 1G	Digitální model povrchu 1. generace
DMR	Digitální model reliéfu
DMR 4G	Digitální model reliéfu 4. generace
DMR 5G	Digitální model reliéfu 5. generace
DMÚ 25	Digitální model území 1:25 000
DPM	Digitální polohopisný model, (<i>Digital planimetric model</i>)
DPZ	Dálkový průzkum země
DSM	Digitální model povrchu, (<i>Digital surface model</i>)
DTM	Digitální model terénu, (<i>Digital terrain model</i>)
GLONASS	Navigační systém, (<i>Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma</i>)
GNSS	Globální navigační satelitní systémy, (<i>Global Navigation Satellite Systém</i>)
GPS	Navigační systém, (<i>Global Positioning System</i>)
INSAR	Interferometrie
LiDAR	Laserové skenování, (<i>Light Detection and Ranging</i>)
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NGA	Americká mapovací agentura (<i>National Geospatial - Inteligence Agency</i>)
RADAR	Radarové snímání, (<i>Radio detecting and ranging</i>)
SAR	Radar se syntetickou aparaturou, (<i>Synthetic aperture radar</i>)
SDM	Model druhové distribuce, (<i>Species Distribution Modeling</i>)
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SRTM	Globální digitální model terénu, (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>)
TIN	Trojúhelníková nepravidelná síť bodů, (<i>Triangulated irregular network</i>)

UAV Bezpilotní letecké prostředky, (*Unmanned Aerial Vehicle*)
VGIS Vojenský geoinformační systém
ZABAGED Základní báze geografických dat

1 Úvod

Topografická data čili informace o zemské povrchu tvoří základní vstupní parametry v mnoha aplikacích a procesech, kde je vyžadována terénní analýza. Hlavním zdrojem těchto informací je digitální model terénu (DTM) (Wilson, 2012; Athmania et Achour 2014). Odvětví, kde se DTM využívají je celá řada. Například v hydrologii se využívají pro navrhování protipovodňových opatření (Qi et Altinakar, 2011), nebo k výpočtům rozlohy povodí a akumulaci vody v krajině (Lacroix et al., 2002), v zemědělství a lesnictví pro analýzy půdní eroze (Claessens et al., 2005), nebo analýzy půdních vlastností (Florinsky et al., 2002; Klimánek, 2006). Dále se využívají v klimatických a rizikových studiích, při hodnocení sesuvů půdy (Kusák et al., 2016), nebo při hodnocení úbytku ledovců (Paul et Haeberli 2008; Nuth et Kääb, 2011). V Ekologii a ochraně přírody jsou DTM základním geomorfologickým parametrem pro tvorbu modelů druhové distribuce (SDM), (Anderson et al., 2002; Hernandez et al., 2008; Guisan et Thuiller, 2005; Matějka, 2012).

DTM existuje celá řada, můžeme je rozdělit na základě rozlohy, pro kterou jsou vytvořeny, existují globální DTM, jako je ASTER a SRTM, dále jsou pak modely, které reprezentují menší územní celky například státy (Mukherjee et al., 2013). V rámci ČR jsou asi nejznámější DMR 4G a DMR 5G (Hubáček et al., 2014). Existuje celá řada metod sběru dat, ze kterých jsou modely vytvořeny, fotogrammetrie, sběr laserem nebo radarem a jiné klasické geodetické metody. Nejčastějším typem reprezentace DTM je pak pravidelná rastrová mříž různého rozlišení (např. 1 m, 30 m, 90 m). Právě toto rozlišení je základním parametrem pro reprezentaci reálného zemského povrchu a čím horší je toto rozlišení, tím dochází k výraznějšímu zkreslení prostorových informací. Navíc často se vzhledem k množství prostorových dat provádí tzv. komprese čili převzorkování, při kterém dojde k snížení rozlišení výchozího zdroje DTM (např. 100 m, 1000 m). Tím pádem dojde ještě k větší ztrátě prostorových informací, což může způsobit celkové zkreslení výsledné analýzy (Wolock et McCabe, 2000; Guo-an et al., 2001; Smith et Sandwell, 2003; Lassueur et al., 2006; Deng et al., 2007; Höhle et Höhle, 2009; Vaze et al., 2010; Mudron et al., 2013; Grieve et al., 2016; Purinton et Bookhagen, 2017). Nabízí se tedy otázka, k jak velkým ztrátám

prostorových informací dochází při použití různých DTM s různým rozlišením a jak se tyto modely chovají v různých typech terénního prostředí nebo v lesním porostu.

Cílem této diplomové práce je posoudit kvalitu volně dostupných globálních DTM a jak se liší od digitálních modelů dostupných v České republice. V rámci porovnání byly zvoleny tři zdroje DTM: SRTM, DMR 4G a DTM vytvořený z dat leteckého laserového skenování, dále v rámci této práce označovaný jako LiDAR. Dalším cílem je porovnat, zda přesnost u DMR 4G, udávaná Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK) odpovídá skutečnému stavu. Dále pak k jakým změnám dochází u jednotlivých DMT na různých stanovištích, jako jsou svahy bez vegetace, svahy s vegetací či koryta potoků.

2 Literární rešerše

2.1 Digitální model terénu

V oblasti digitálních modelů terénu existuje celá řada termínů, které však nemusí být vždy zcela správně chápány či interpretovány. Základním termínem je digitální model terénu (DTM, *Digital Terrain Model*) nebo digitální model reliéfu (DMR), což je digitální reprezentace reliéfu zemského povrchu (georeliéfu) složeného z dat, polí číselných hodnot a interpolačního algoritmu, pomocí kterého lze odvozovat výšky protilehlých bodů (Jedlička, 2009). Li (2005) uvádí, že DTM je matematické vyjádření různých typů informací o terénu. Herbei et al. (2010) uvádí, že DTM se dále dělí na 3 podsystemy:

1. Digitální elevační (výškový) model (DEM, *Digital Elevation Model*)
2. Digitální polohopisný model (DPM, *Digital planimetric model*)
3. Digitální model objektů přírody (DEN, *Digital model of objects nature*)

DEM se občas nesprávně považuje za synonymum DTM a to především ve Spojených státech amerických (Petrie et Kennie, 1987). DEM reprezentuje nadmořskou výšku terénu, ze které potom můžeme odvozovat další údaje, jako jsou sklon, orientace ke světovým stranám atd. Výškové modely patří mezi nejpoužívanější prostorové informace (Moore et al., 1991). Nejčastěji se využívají pro hydrologické modelování, například pro modelování průtoku, akumulace vody (Teng et al., 2008). Dále se DEM používají, jako vstupní data pro odvozování modelů druhové distribuce (SDM, *Species Distribution Modeling*) (Van Niel et al., 2004). DPM je model, který v sobě nese polohopisné údaje a informace o terénu a v DEN jsou zaznamenány informace pedologického, geologického a hydrologického charakteru (Smuleac et al., 2012).

Dalším pojmem, se kterým se můžeme setkat, je digitální model povrchu (DSM, *Digital surface model*). Ten je reprezentací povrchu terénu se všemi objekty, které se na něm nacházejí, jako jsou vegetace či budovy. Tyto modely mají velké využití

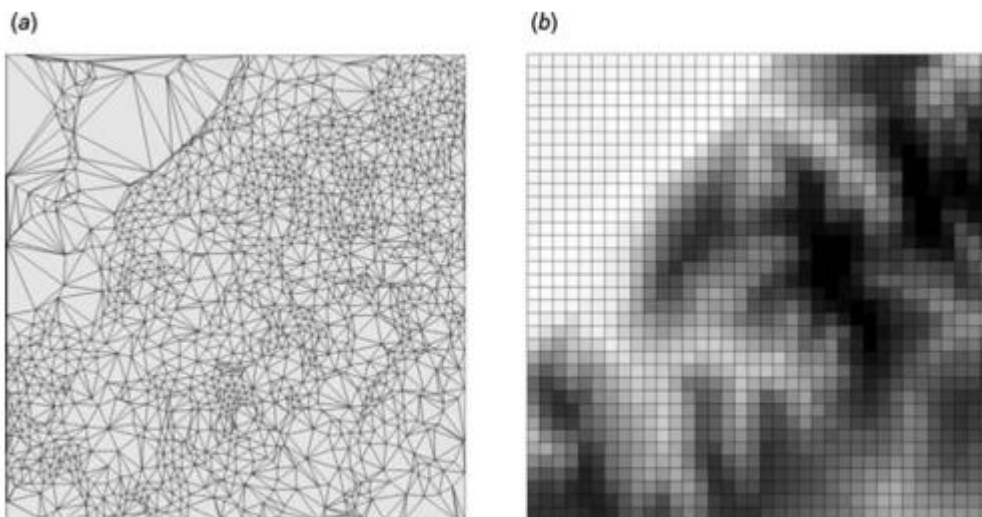
především ve sledování různých změn, ať už se jedná o změny vegetace či změny infrastruktury měst (Altmaier et Kany, 2002).

2.2 Datová reprezentace DTM

Dle Hengl et Evans (2009) můžeme rozdělit datovou reprezentaci DTM dle typu struktury a formátu na:

1. Vektorová struktura – body, linie
2. Rastrová struktura – pravidelná síť bodů (*regular grid*)
3. Trojúhelníková nepravidelná síť bodů (*triangulated irregular network, TIN*)

Každá výše zmiňovaná metoda má své výhody, ale i úskalí a jejich použitelnost do značné míry vychází ze základních údajů, tedy metody, pomocí které byly informace o terénu pořízeny a dále zpracovány. Bez ohledu na přístup zachycení dat, jsou rastrová a TIN struktura nejpoužívanější formát pro elektronické ukládání, manipulaci a analýzu DTM (Carrara et al., 1997).



Obr. 1. Různé typy DTM: TIN reprezentace (a), Rastrová reprezentace (b). Převzato z Hengl et Evans 2009.

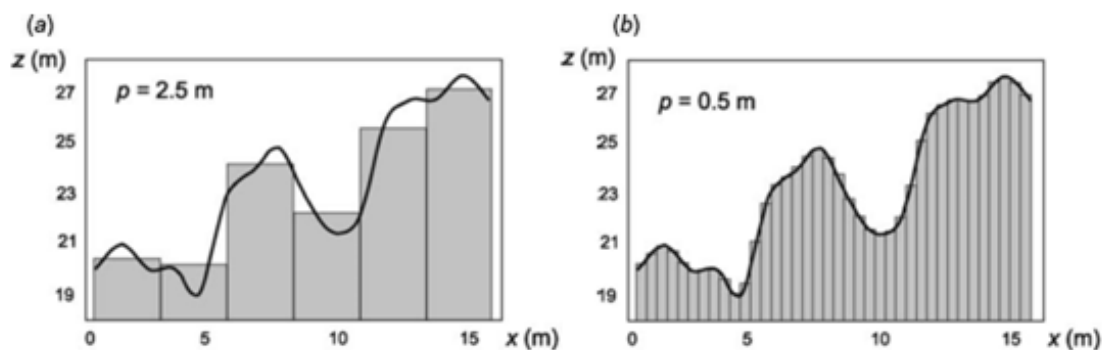
2.2.1 Vektorová struktura

Vektorová reprezentace terénu může být vytvořena přímo z bodů naměřených v terénu pomocí nějaké geodetické metody, nebo pomocí laserového skenování. Bodové zobrazení nám může poskytnou přesnou prostorovou informaci v místech, kde dochází například k ostrým změnám nadmořské výšky, nebo v místech geologických poruch. Tento typ reprezentace terénu je vzhledem k náročnosti sběru neuspořádaný, a proto se pro jeho kompletizaci využívají různé transformace na pravidelné modely, jednou z možností je triangulace (Hengl et Evans, 2009).

Další možností reprezentace terénu pomocí vektorových dat jsou vrstevnice. Vrstevnice jsou definovány jako linie tvořené body o rovinných souřadnicích x , y se stejnou výškou. Vrstevnice nejčastěji vychází z vektorizace topografických map, které jsou připraveny přímo z leteckých snímků, nebo terénního průzkumu. (Moore et Grayson, 1991). Přesnost DTM generovaných z vrstevnic se odvíjí od intervalů mezi vrstevnicemi a použité interpolační metody (Wise, 2000; Hengl, 2006).

2.2.2 Rastrový model

Rastrová struktura reprezentovaná pravidelnou sítí bodů je asi nejpoužívanější datová reprezentace DTM. Povrch je v této struktuře rozdělený do matice buněk (grid cell), které mají nejčastěji čtvercový tvar. Velikost mřížky x , y je konstanta obvykle udávaná v metrech (2 x 2 m). Každá buňka pak reprezentuje informaci o terénu, nadmořskou výšku (Pike et al., 2009). Přesnost rastrového modelu se odvíjí od velikosti jednotlivých buněk. Čím menší budou buňky, tím vyšší bude prostorová přesnost. Naopak u rastrových modelů nižšího rozlišení dochází ke ztrátě prostorových informací (viz obr. 2) (Hengl et Evans 2009).



Obr. 2: Schéma ukazující vliv velikosti buňky na ztrátu informací profilu, profil (a) (2,5x2,5 m), profil b (0,5x0,5 m). Převzato z Hengl & Evans 2009.

2.2.3 Trojúhelníková nepravidelná síť bodů (TIN)

Trojúhelníková nepravidelná síť (TIN), jak již název napovídá, je síť složená z nepřekrývajících se trojúhelníků, vypočítaná z nepravidelně rozmístěných bodů x , y , z (Maune, 2010). Generace TIN modelu vychází z Delauneyho triangulace, kdy jsou trojúhelníky voleny tak, aby uvnitř kružnice opsané trojúhelníku neležel žádný jiný bod. Vstupní body by měli být voleny tak, aby co nejlépe vystihovaly členitost reliéfu, zůstanou tak zachovány důležité terénní charakteristiky, jako hřebeny, vrcholy, zlomy nebo údolnice (Lee, 1991). TIN je vhodnější než klasický rasterový model, protože zachovává i přesnou polohu drobných povrchových prvků, příkopů nebo koryt toků (Maune, 2010).

2.3 Zdrojová data pro DTM

Zdrojová data pro tvorbu DTM se dají získat mnoha způsoby z různých zdrojů za použití rozdílných metod. Použití jednotlivých metod má své výhody i nevýhody a při výběru vhodné metody bychom měli vycházet z námi definovaných kritérií pro podobu a kvalitu výsledného DTM. Rozhodujícím faktorem je také následné využití modelu. Svoji roli hrají samozřejmě i časová a finanční dostupnost (Pecina et Brejcha 2014). Metody způsobu sběru dat můžeme rozdělit dle Klimánka (2008) do následujících kategorií:

Pozemní měření

- Geodetické měření (Nivelace, Tachymetrie)
- Globální navigační satelitní systémy (GNSS)

Dálkový průkum Země (DPZ)

- Fotogrammetrická analýza
- Radarové snímání (RADAR)
- Laserové skenování (LiDAR)

Existující digitální a analogová data

- Základní báze geografických dat (ZABAGED)
- Digitální model území 25 (DMÚ 25)

2.3.1 Nivelace

Nivelace je metoda, pomocí které výšky neměříme přímo, ale měříme výškový rozdíl mezi dvěma body A a B. Rozdíl se stanovuje ze svislé vzdálenosti od určené horizontální vzdálenosti. Existují dvě základní metody nivelace – nivelace kupředu a nivelace ze středu (Chamout et Skála 2008).

Při nivelaci kupředu se na bod A umístí nivelační přístroj se známou výškou a na bod B se umístí nivelační lať. Výsledné převýšení se vypočítá, jako rozdíl výšky přístroje V_p a laťového úseku l_B (viz Rovnice 1).

$$\Delta H_{AB} = V_p - l_B \quad (1)$$

Při měření převýšení delších úseků, vyšším převýšení nebo terénech překážkách, se vzdálenost rozděluje na kratší úseky a výsledné převýšení je potom součet převýšení

jednotlivých úseků. Tato metoda se v praxi vzhledem ke své pracnosti a nižší přesnosti téměř nepoužívá.

Nivelace ze středu se určuje tak, že na bodech A a B jsou umístěny nivelační latě. Do středu mezi ně se umístí nivelační přístroj. Záměrná přímková následně vytne na latích laťové úseky l_A , l_B . Výsledné převýšení se spočítá, jako rozdíl vzdálenosti dvou laťových úseků (viz Rovnice 2) (Čada, 2017).

$$\Delta H_{AB} = l_A - l_B = z - p \quad (2)$$

Tato metoda je nejpřesnější a v dnešní době nejpoužívanější nivelační metodou pro zjišťování převýšení mezi dvěma body (Blažek et Skořepa 2004).

2.3.2 Tachymetrie

Tachymetrie je metoda, pomocí které určujeme současně výšku i polohu bodu. Údaje o poloze se získávají měřením polárních souřadnic, tj. vodorovný úhel, svislý úhel a délka ze stanoviska jednotlivých bodů. Údaje o výšce se získávají trigonometricky. Součástí měrné soustavy je měřicí přístroj, tachymetr nebo v současné době nejvíce používaná totální stanice a tyč s odrazným hranolem. Přístroj zaznamenává vodorovné a svislé úhly a šikmou vzdálenost k optickému hranolu v cílovém bodě. Z těchto veličin lze následně vypočítat vodorovnou vzdálenost a převýšení (Vondrák, 2004). Přesnost tachymetrie je velmi vysoká, přičemž z jednoho stanoviska lze měřit vzdálenosti větší než 200 m. Tato forma sběru dat je vhodná pro tvorbu přesného DTM. Metoda se také využívá pro doměřování zakrytých částí území například vegetací, kde nebylo možné použít jinou metodu, jako je DPZ (Oršulák et Pacina, 2012).

2.3.3 Globální navigační satelitní systémy

Globální navigační satelitní systémy (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) umožňují pomocí signálu vysílaného z navigačního satelitu určit polohu přijímače kdekoli na světě za jakýkoliv povětrnostních podmínek ve dne i v noci.

V současné době existují dva GNSS v plném provozu, ve Spojených státech amerických GPS NAVSTAR všeobecně známější jen jako GPS (*Global Positioning System*) a ruský GLONASS (*Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema*). Dalším vyvíjeným systémem je Evropský GALILEO. Další navigační systémy vyvíjí například Čína nebo Indie (Bhatta, 2010). Princip výpočtu polohy výše zmiňovaných systémů je stejný, jedná se o dálkoměrnou metodu, kde je poloha určena na základě měřené vzdálenosti mezi družicí a přijímačem GPS. Pro měření vzdálenosti se využívá měření času, přesněji řečeno doba šíření signálu od družice k přijímači (Šebesta, 2012). Pro měření v terénu a přesné určení polohy je potřeba signál minimálně ze 4 družic. Tato metoda je oproti klasickým geodetickým metodám velmi účinná a pro sběr bodů pro tvorbu DTM velmi vhodná. Přesnost závisí především na aktuální konstelaci družic a kvalitě navigačního přijímače. Kvalitním přijímačem lze získat polohovou přesnost až v milimetrech. Největší omezení této metody, je její použití v lesním porostu (Pecina et Brejcha 2014; Klimánek, 2008).

2.3.4 Fotogrammetrická analýza

Fotogrammetrie je vědní disciplína o získávání informací z fotografického záznamu o geometrických vlastnostech povrchu a objektech na něm. Informace o objektech můžeme rozdělit do čtyř kategorií: geometrické informace zahrnující prostorovou a polohovou informaci, fyzikální vlastnosti, jako elektromagnetické záření, sémantické informace o významu obrazu a časové informace, které nás informují o změně objektů, povrchu v čase (Schenk, 2005). Pomocí fotogrammetrie můžeme získat kvalitní zdroje dat pro tvorbu DTM, DSM, 2D a 3D rekonstrukce a klasifikace objektů pro mapování (Baltsavias, 1999). Princip fotogrammetrické analýzy je stereoskopický překryv dvou snímků. Snímek může být buď družicový, nebo letecký. K vyhodnocování se využívá buď stereoplotr, nebo digitální fotogrammetrická stanice. Před samotným vyhodnocením je nejprve potřeba určit prvky vnitřní a vnější orientace snímku. Výstupem zpracování je potom matice čísel, na jejímž základě je možné snímky ortorektifikovat (Böhm, 2002). Ortorektifikace je nejpresnější metoda, jak letecké nebo družicové snímky převést do zvoleného mapového zobrazení. Klíčovým faktorem ortorektifikace je použití přesného a robustního algoritmu a existence dostatečně přesných vlíčovacích bodů (Čada, 2017).

Přesnost fotogrammetrie závisí na použitém záznamovém zařízení, kvalitě obrazu, rozlišení a vzdálenosti od objektu. Přesnost DTM vytvořených pomocí fotogrammetrie se pohybuje v rozmezí centimetrů až metrů. Fotogrammetrie je vhodná metoda pro tvorbu DTM v rozmezí měřítek 1:1000 až 1:500 000 nebo více (Fabris et Pesci, 2005).

V rámci fotogrammetrického sběru dat, se v posledních letech rozvíjí využití bezpilotních leteckých prostředků (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*). V geografii, kartografii, geodezii a jiných příbuzných oborech se tato metoda stala velmi populární pro sběr obrazových dat a tvorbu různých 3D modelů povrchů, budov, DMT nebo orotofotomozaiky. Efektivnost této metody tkví v její operativnosti, kdy jsme schopni zachytit velké množství prostorových informací v poměrně krátké časové době (Rock et al., 2011; Sládek et Rusnák 2013). Další výhodou je i finanční dostupnost oproti klasickým letadlům a možnost sběru dat i v oblastech, ve kterých může dojít k ohrožení lidského života (radioaktivní zóny) (Tsach et al., 2010). UAV tvoří tři moduly: letecký, ovládací a modul na zpracování dat. Letecký modul je tvořen nosičem, na kterém je umístěno záznamové zařízení (videokamera, spektrální kamera, LiDAR, fotoaparát). Pohyb letadla je řízen ovládacím modulem, buď přímo manuálně nebo automaticky, kdy se dráha letu naprogramuje předem. Oba dva způsoby se dají i kombinovat. Zpracovací modul je pak tvořen nějakým softwarem, vhodným pro zpracování konkrétních dat (Sládek et Rusnák 2013).

2.3.5 Radarové snímání

Radar (*Radio detecting and ranging*) je proces, při kterém dochází k přenosu elektromagnetického záření, které se odrazí od objektu a v deformovaném stavu se vrací zpět (Richards et al., 2010). Pro zachycování zemského povrchu v rámci DPZ se využívá radar se syntetickou aperturou (SAR, *Synthetic aperture radar*). SAR vysílá přesné impulzy elektromagnetického záření, které se následně odrazí od zemského povrchu a jsou zpětně zachyceny anténou. Pro určení polohy místa odrazu se využívá měření impulzu a Dopplerova jevu. Mezi nejpoužívanější metody sběrů dat pomocí radarové techniky patří radarová interferometrie (INSAR) a radargrammetrie (Yu et al., 2010; Imperatore et al. 2015).

Radarová interferometrie (INSAR) spočívá v porovnání dvou družicových snímků SAR, které jsou vytvořeny s vhodným časovým odstupem, při mírně odlišné poloze družice. Měření nadmořské výšky pak vychází z rozdílu přijatého signálu z odlišné pozice. Metoda se využívá při sledování změn reliéfu terénu, jako jsou poklesy a sesuvy svahů, deformace, pohyby ledovců nebo sopečná aktivita či zemětřesení. Radargrammetrie je metoda velice podobná fotogrammetrii. Jedná se vlastně o stereoskopický překryv dvou radarových snímků. Radargrammetrie je méně ovlivňována atmosférickými vlivy oproti metodě INSAR. (Crosetto et Pérez 2000; Lazecký et Bláha, 2014).

2.3.6 Laserové skenování

Laserové skenování (LiDAR, *Light Detection and Ranging*) je v současné době asi nejpreciznější metoda pro sběr výškových dat. Vertikální přesnost se pohybuje mezi 15 cm – 1 m, vertikální 50–200 cm (Murphy et al., 2007). Jedná se o multisenzorový systém, sestavený minimálně ze tří senzorů, polohová jednotka GPS, inerciální navigační systém (INS) a laserové skenovací zařízení. Krom těchto senzorů může být součástí i fotogrammetrická kamera, spektrální sensory, případně i standartní fotoaparát či kamera. GPS jednotka slouží k určení pozice, INS zaznamenává údaje o poloze, náklonu a zrychlení nosiče. (Baltsavias, 1999; Wehr et Lohr, 1999). Laserové skenovací zařízení vysílá laserový paprsek. Jedná se o stovky tisíc krátkých impulzů za sekundu a část této energie se odráží zase zpět k senzoru. Výsledkem je tzv. mračno bodů. Tyto body obsahují velmi přesné souřadnice X, Y, Z, ze kterých se pak vytváří výsledný obraz. (Lang et al., 2010). Skenovací zařízení se nejčastěji umísťují na letadla nebo vrtulníky. V současné době se čím dál tím více jako nosiče LiDAR využívají UAV (Baltsavias 1999, Lin et al., 2011).

2.3.7 Existující digitální a analogová data

Kromě přímého sběru dat pro tvorbu DTM můžeme využít již existující vektorová, nebo rastrová data. V České republice existuje celá řada databází, z nichž je asi nejvýznamnější základní báze geografických dat (ZABAGED). Jedná se o digitální geografický model území a tvoří ho 120 základních typů geografických objektů. Výškopisná část obsahuje prostorové soubory vrstevnic, výškové body terénu

a povrchu. Interval vrstevnic je udáván 5, 2 nebo 1 m v závislosti na charakteru terénu. Data jsou v souřadnicovém systému S-JTSK (ČÚZK 2016).

Další možností je využití vojenského geografického informačního systému (VGIS), kde je k dispozici digitální model území tzv. DMÚ 25. Jedná se o soubor vektorové databáze vytvořený z topografických map v měřítku 1:25 000 (TM25). Výškopisná data tvoří vrstevnice v 5 m intervalech (Lang, 2001).

2.4 Zdroje digitálních modelů terénu

2.4.1 SRTM

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) je DTM, který vznikl v rámci spolupráce Amerických agentur NASA, NGA a italské a německé kosmické agentury v rámci mise raketoplánu Endeavour v únoru 2000. Hlavním cílem mise bylo získat data pro tvorbu globálního DTM. Sběr dat probíhal metodou radarové interferometrie (InSAR). V současné době je SRTM dostupný pro 80 % světa ve dvou provedeních v prostorovém rozlišení: 1 úhlové sekundy přibližně 30 m (GRID 30 x 30) a v rozlišení 3 úhlové sekundy 90 m (GRID 90 x 90) (Farr at al., 2007). Rodríguez et al. (2006) uvádí, že průměrný výškový rozdíl činí 16 m a střední kvadratická chyba SRTM se pohybuje okolo 8 až 10 m.

2.4.2 ASTER GDEM

Globální digitální model terénu ASTER GDEM vznikl v rámci spolupráce americké agentury NASA a ministerstva financí, průmyslu a obchodu v Japonsku. ASTER je multispektrální skener, který pracuje na družici Terra, která byla vypuštěna v prosinci 1999. ASTER pořizuje data ve čtrnácti spektrálních pásmech, a to od viditelného až po infračervené záření. Metoda sběru dat pro tvorbu DTM spočívá ve stereoskopickém překryvu dvou snímků. ASTER je dostupný v prostorovém rozlišení 1 úhlové sekundy, tedy přibližně 30 m (GRID 30 x 30). Vertikální přesnost se udává 20 metrů (Tachikawa et al., 2011).

2.4.3 DMR 4G

Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G) reprezentuje zemský povrch ve formě výšek disktrétních bodů v pravidelné síti (GRID 5x5 m).

Udávaná odchylka výšky činí 0,3 m v otevřeném terénu a 1 m v zalesněném terénu. Model vznikl pomocí metody LiDAR. Měření probíhalo v letech 2009 až 2013. Od roku 2013 je průběžně aktualizován v návaznosti na aktualizaci ZABAGED. Pro aktualizaci se využívá metoda INSAR a LiDAR. DMR 4G je určen pro analýzy regionálního charakteru a pro projektovou činnost v rámci dopravních staveb, vodohospodářství a modelování přírodních jevů (Brázdil et al., 2012; ČÚZK, 2017).

2.4.4 DMR 5G

Obdobně jako DMR 4G tak i model 5. generace (DMR 5G) vznikl pomocí LiDAR měření v období 2009 až 2013. Na rozdíl od předchozího modelu má DMR 5G umístěné body v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) o rozlišení 2 m. Střední chyba výšky je udávána 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Model je vhodný pro terénní analýzy lokálního charakteru nebo pro projektování pozemkových úprav. DMR 5G je základním zdrojem pro tvorbu vrstevnic určených pro mapy velkých měřítek a počítačové vizualizace výškopisu (ČÚZK, 2017).

2.4.5 DMP 1G

Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G) představuje reprezentaci DSM čili modelu povrchu území včetně staveb a rostlinného pokryvu v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro budovy a 0,7 m pro rostlinný pokryv. Stejně tak jako předchozí modely, vznikly modely DMP 1G metodou LiDAR. Model se využívá především pro výškové analýzy terénu a objektů lokálního a regionálního charakteru (ČÚZK, 2017).

3 Metodika

3.1 Popis dat

Přesnost byla hodnocena pro 3 digitální modely terénu: SRTM, DMR 4G a LiDAR. SRTM je volně dostupný a byl stažen ze serveru srtm.csi.cgiar.org, DMR 4G byl získán z WMS serveru ČÚZK v programu ArcGIS 10.3. Data LiDAR poskytla katedra Geoinformatiky a územního plánování. Výše zmíněné digitální modely terénu jsou popsány v literární rešerši. Všechny analýzy na těchto datech byly provedeny v souřadnicovém systému S-JTSK- Křovák EastNorth.

3.2 Sběr dat

Sběr dat pro porovnání kvality jednotlivých digitálních modelů terénu probíhal v srpnu 2016 v Krkonoších. Místa sběru byla určena až v terénu na základě dostupnosti lokality, a především dostupnosti signálu pro přesné zaměření GPS lokátoru. Celkem byly vybrány čtyři lokality (Příloha č. 1). Jednotlivá měření nadmořských výšek v rámci lokalit pak probíhala na různých terénních typech v rámci koryt potoků, kopců bez vegetace a kopců s vegetací. U koryt potoků se zaměřoval střed koryta, u svahů se zaměřovalo vertikálně proti vrstevnicím a horizontálně po vrstevnicích. Vzdálenost mezi jednotlivým měřeními se pohybovala od 1 do 3 metrů. Lokalita č. 1 (Příloha č.2) se nacházela v oblasti východně od Špindlerova Mlýna (souřadnice S-JTSK: X 983849,6898; Y 646759,7538). Na této lokalitě byly zaměřeny úsek Svatopetrského potoka (Příloha č.3) a jeho pravý přítok (Příloha č.4). Lokalita č.2 (Příloha č.5) se nacházela východně od obce Malá Úpa u silnice II/252 (souřadnice S-JTSK: X 984905,3434; Y 636516,7179). V rámci této lokality byly zaměřeny dva úseky Úpského potoka a pět úseků vrcholu Heida (998 m n.m.). Na Lokalitě č.3 (Příloha č.6) (souřadnice S-JTSK: X 993307,8846; Y 640818,0492), byly zaměřeny dva úseky v rámci Ski areálu Černá hora (1299 m n. m.), který se nachází u obce Jánské Lázně. Lokalita č.4 (Příloha č.7) se nacházela v obci Benecko – Štěpanická Lhota (souřadnice S-JTSK: X 990427,4885; Y 655148,8563). Zde byly zaměřeny dva svahy. Jeden na sjezdové trati Kejnoss Ski areálu Benecko, který se nachází na vrchu Zadní Žalý (1036 m n.m.). Další dva úseky z toho jeden horizontální byly zaměřeny na protější vrcholu Poustka (743 m n.m.).

3.3 Základní analýza dat

Data byla analyzována v programu ArcGIS 10.3. Jednotlivé rastry DMT byly nejprve upraveny tak, aby prezentovaly pouze místa, kde probíhalo terénní měření. Body z měření GPS reprezentující nadmořskou výšku měřenou v terénu se propojily linií pomocí funkce *Extract by Mask*, kde linie měřených bodů představovala masku reprezentující dané úseky. Vrstva LiDAR byla převedena na bodovou vrstvu pomocí funkce *Raster to Point*. Kvůli dodržení posloupnosti rastrových buněk byla vytvořena další liniová vrstva, která procházela jednotlivými body LiDAR. Tato linie pak byla převedena na bodovou vrstvu pomocí funkce *Construct Points*. Definovaná vzdálenost mezi jednotlivými body byla 1 metr. Následně byly jednotlivé rastrové vrstvy propojeny funkcí *Extract Values to Points* s výše zmiňovanou bodovou vrstvou. Výsledná vrstva reprezentuje dráhy terénního měření s nadmořskými výškami třech výše zmiňovaných DMT. K vrstvám se pak ještě připojily vrstvy měření GPS, které posloužily jako referenční vrstvy. Atributy vrstev byly uloženy jako tabulky a graficky vizualizovány v programu R 3.2.2 pomocí extenze *ggplot2*, volně dostupném na www.r-project.org.

Dalším krokem byla reklasifikace prostorového rozlišení dat LiDAR z velikosti buněk 1x1 m na 30x30 m. Tento krok byl proveden pomocí funkce *Resample*. Výsledná vrstva LiDAR 30 byla porovnána s hodnotami SRTM a graficky vizualizována. Pro všechny lokality pak byla spočítán průměr, maximální a minimální nadmořská výška.

3.4 Sklon

Z jednotlivých rastrů DMT byl pomocí funkce *Slope* vytvořen model sklonitosti. Vrstvy byly propojeny funkcí *Extract Values to Points*. Pro jednotlivé měřené úseky byly vypočítané základní popisné statistické ukazatele, maximální a minimální sklon a průměr.

3.5 Statistická analýza

Pro další statistickou analýzu byly použity pouze ty hodnoty, které obsahovaly referenční údaj z terénního měření. Z těchto údajů byl pak spočítán výškový rozdíl

mezi výškou DTM a referenční hodnotou GPS (viz vzorec 1), střední kvadratická chyba (RMSE), kde umocníme sumu výškových rozdílů na druhou a podělíme množstvím měření n a odmocníme (viz vzorec 2) a směrodatná odchylka (viz vzorec 3) v rámci každé lokality. Následně byly ze statistických ukazatelů úseků jednotlivých lokalit vypočítány průměrné hodnoty podle typu typ stanoviště. Všechny výpočty byly provedeny v prostředí Microsoft excel.

Výškový rozdíl
$$\Delta H = H_{DTM} - H_{GPS} \quad (1)$$

Střední kvadratická chyba
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}{n}} \quad (2)$$

Směrodatná odchylka
$$SD(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n H_i - \bar{H}}{n}} \quad (3)$$

4 Výsledky

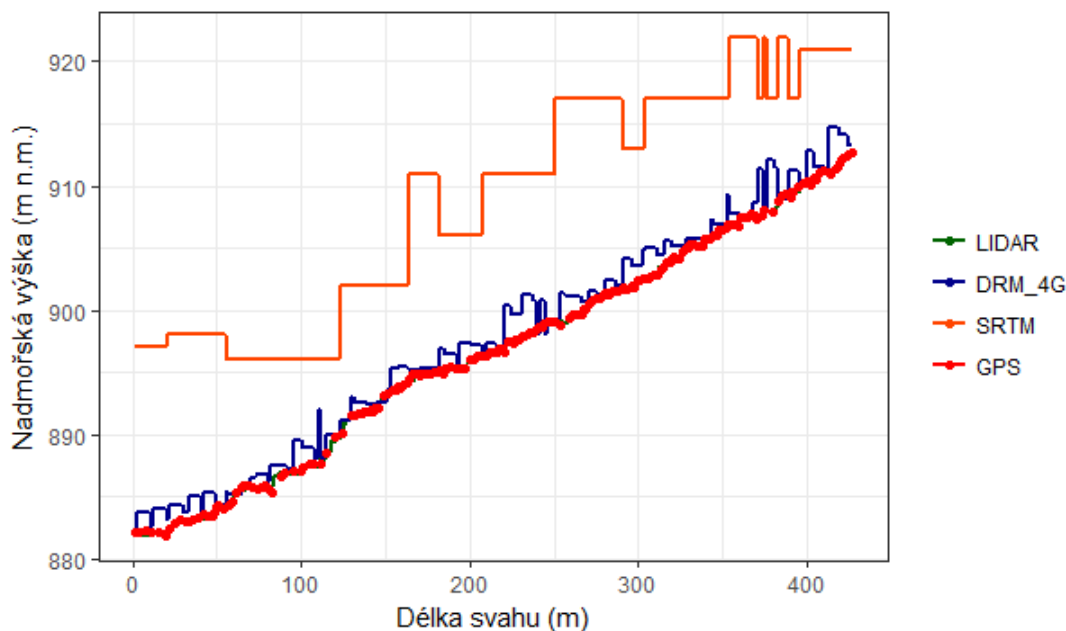
Výsledky jsou rozdělené do kapitol podle typu stanoviště. Celkem byly zaměřeny čtyři úseky vodních toků, pět úseků svahů bez vegetace a větších terénních nerovností a pět měření na svazích s vegetací a terénními nerovnostmi.

4.1 Koryta vodních toků

Měření vodních toků probíhalo na dvou lokalitách. Na lokalitě č.1 byly zaměřeny dva úseky potoků, Svatopetrský potok (P.1) o délce 427 m a jeho pravý přítok (P.2) o délce 269 m. Celkem bylo v rámci těchto dvou úsecích zaměřeno 398 kontrolních bodů. Na druhé lokalitě č.2 byly zaměřeny dva úseky na potoku Malá Úpa, a to o délce P.3 240 m a P.4 215 m. Celkem bylo na těchto dvou úsecích zaměřeno 219 bodů.

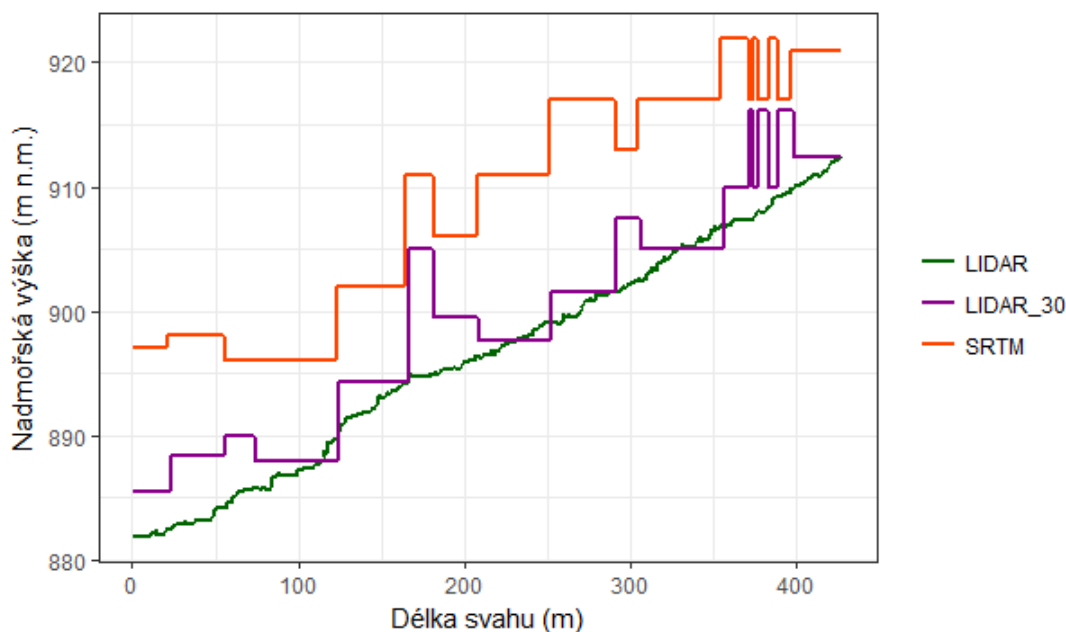
4.1.1 *Výškový profil*

Výškový profil úseku P.1 pro 3 základní modely obr. 3. Na ose Y jsou vyneseny nadmořské výšky a na ose X je délka daného profilu. GPS představuje referenční kontrolní hodnotu. Ostatní výškové profily koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č. 6).



Obr. 3. Výškový profil, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

Výškový profil P.1 obr. 4., kde na ose Y jsou vynesena nadmořská výška pro SRTM a převzorkovaný LiDAR 30. LiDAR představuje referenční hodnotu. Ostatní výškové profily převzorkovaných koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č. 7).



Obr. 4: Výškový profil s převzorkovanými hodnotami LiDAR (1x1) na LiDAR 30 (30x30), Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

4.1.2 Sklonitostní poměry

Hodnoty maximálního, minimálního a průměrného sklonu odvozené z testovaných DTM pro jednotlivá koryta toků. tab. 1 potok P.1, tab. 2 potok P.2, tab. 3 potok P.3, tab. 4 potok P.4.

Tab. 1: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

P.1				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	0,226701	5,106279	1,842803	2,590149
MAX.	33,30116	35,83591	22,40539	23,81964
PRŮMĚR	8,292954	17,54291	10,92252	9,943469

Tab. 2: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.2 – Pravý přítok svatopetrského potoka

P.2				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	2,950093	12,1063	13,46731	14,75665
MAX.	35,96954	28,69124	21,43119	22,6908
PRŮMĚR	17,84529	17,89078	17,69909	17,70096

Tab. 3 Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek P.3 – Úpský potok

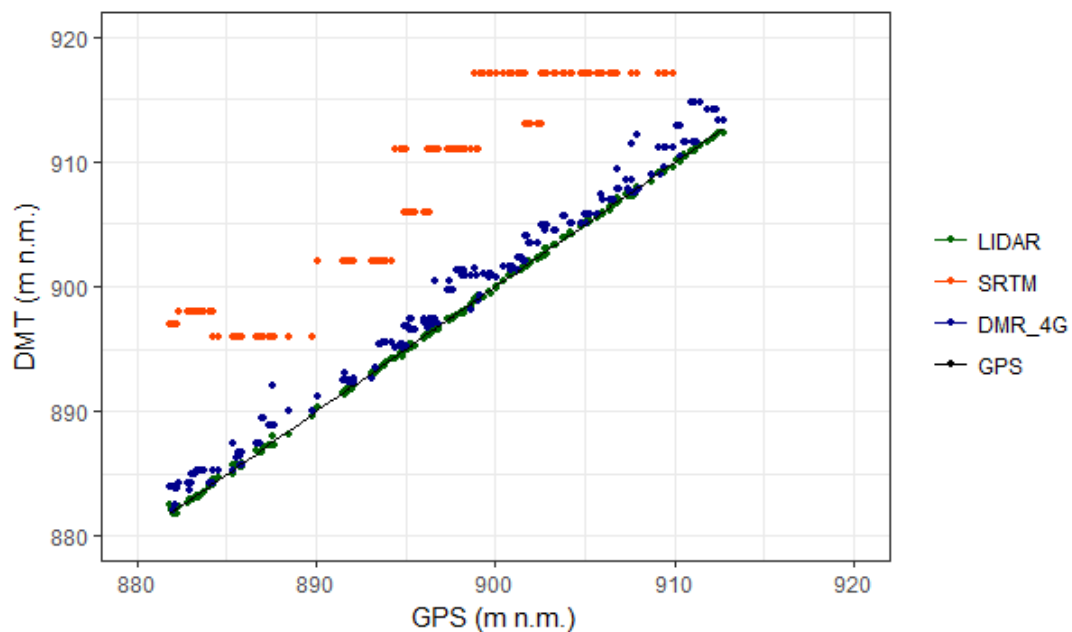
P.3				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	0,142943	0,692914	7,055963	3,97546
MAX.	49,91536	33,33823	21,70114	26,62253
PRŮMĚR	7,926094	15,18778	13,63193	10,09209

Tab. 4: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek P.3 – Úpský potok

P.4				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	0,100766	1,560103	4,196168	2,081151
MAX.	35,6328	15,79815	19,83117	29,99643
PRŮMĚR	7,576607	5,527159	11,10605	10,66648

4.1.3 Statistické ukazatele

Výpočty základní popisné statistiky jsou provedeny pouze z těch hodnot, které obsahovaly referenční hodnotu GPS. obr. 5 je grafické srovnání vybraných nadmořských výšek DTM úseku P.1. Výšky DTM jsou vyneseny na ose Y a referenční hodnoty GPS na ose X lokality. Pro referenční hodnotu GPS pak platí, že $X=Y$. Ostatní porovnání vybraných výšek koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č. 8). tab. 5 jsou vypočítané hodnoty základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$), pro všechny čtyři měřené úseky vodních toků.



Obr. 5: Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenční hodnotou GPS, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

Tab. 5: Základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$). Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 a P.2, Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P.3 a P. 4

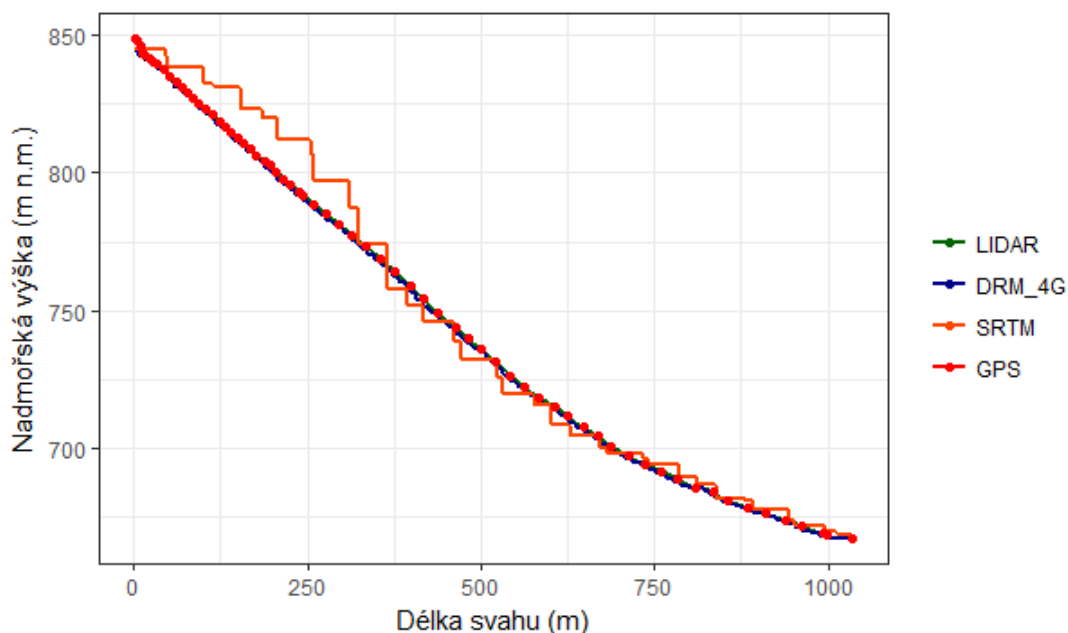
	DTM	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
P.1	LiDAR	-0,09778952	0,164003	0,190604
	DMR 4G	1,204241329	0,968206	1,543727
	SRTM 30	12,41853961	2,701479	12,70759
	LiDAR 30	2,378880179	2,776676	3,651268
P.2	LiDAR	-0,14455523	0,245066	0,283842
	DMR 4G	0,43331029	0,631833	0,764457
	SRTM 30	19,42498903	2,942139	19,64511
	LiDAR 30	1,642480677	2,309903	2,828245
P.3	LiDAR	0,268422978	0,220337	0,346763
	DMR 4G	0,903242533	1,213731	1,509383
	SRTM 30	20,76550219	6,876469	21,86657
	LiDAR 30	1,971764869	1,713891	2,608417
P.4	LiDAR	0,134936132	0,209711	0,248209
	DMR 4G	0,053358618	0,336237	0,338253
	SRTM 30	18,54848947	4,196261	19,01114
	LiDAR 30	2,263877803	1,795705	2,882234

4.2 Svahy bez vegetace

Celkem bylo změřeno pět úseků v rámci dvou lokalit. První dva úseky na lokalitě č. 3 na Černé hoře (S. 1) o délce 467 m a (S. 2) o délce 1144 m. Celkem bylo v rámci těchto dvou úseků zaměřeno 132 kontrolních bodů. Další tři úseky byly zaměřeny na lokalitě č.4 (S.3) o délce 1034 m a (S.4) o délce 344 m. Třetí úsek (S.3) o délce 93 m byl měřen po vrstevnici. V rámci těchto třech úseků bylo zaměřeno 184 bodů.

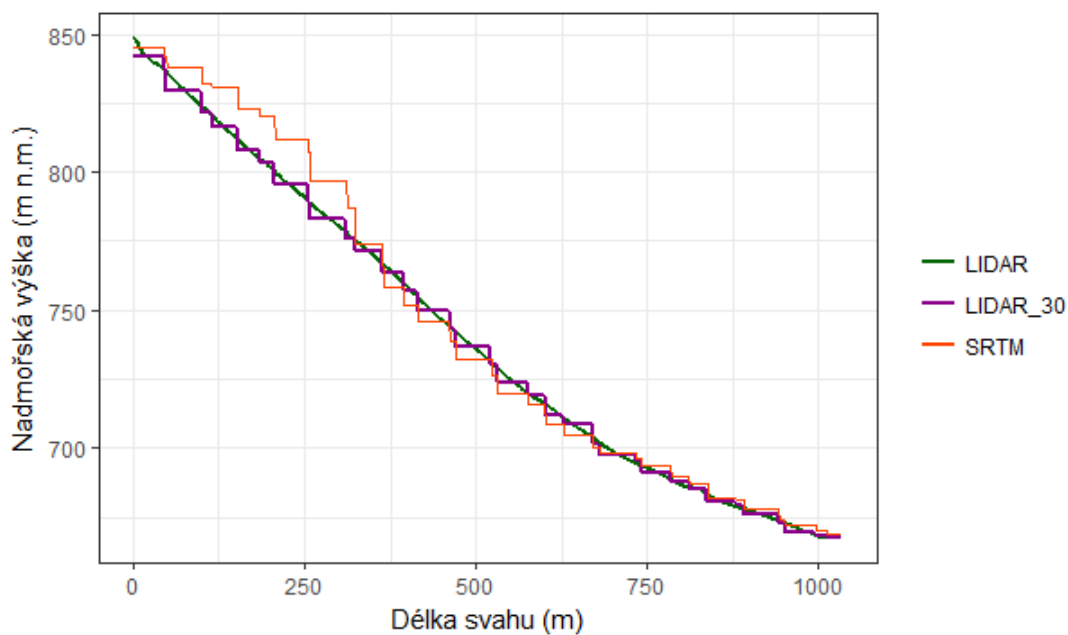
4.2.1 Výškový profil

Výškový profil úseku S.3 pro 3 základní modely obr. 6. Na ose Y jsou vyneseny nadmořské výšky a na ose X je délka daného profilu. GPS představuje referenční kontrolní hodnotu. Ostatní výškové profily svahů bez vegetace jsou v příloze (Příloha č. 9)



Obr. 6: Výškový profil, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.3 – Poustka

Výškový profil S.3 obr. 7., kde na ose Y jsou vynesena nadmořská výška pro SRTM, převzorkovaný LiDAR 30. LiDAR představuje referenční hodnotu. Ostatní výškové profily převzorkovaných koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č.10)



Obr. 7 Výškový profil s převzorkovanými hodnotami LiDAR (1x1) na LiDAR 30 (30x30), Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S. 3 – Poustka

4.2.2 Sklonitostní poměry

Hodnoty maximálního, minimálního a průměrného sklonu odvozené z testovaných DTM pro jednotlivé svahy. tab. 6 svah S.1, tab. 7 svah S.2, tab. 8 svah S.3, tab. 9 svah S.4

Tab. 6: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.3 – Černá hora, úsek S.1

S. 1				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	1,724253	4,207078	5,263945	5,312358
MAX.	16,62284	16,62675	15,04562	14,31051
PRŮMĚR	9,800444	10,07277	10,22358	10,12579

Tab. 7: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.3 – Černá hora, úsek S.2

S. 2				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	4,887455	8,287794	11,90275	14,31051
MAX.	30,39772	23,47586	19,29473	21,46607
PRŮMĚR	15,33392	15,9217	16,29964	17,41288

Tab. 8: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.3 – Poustka

S. 3				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	0,545382	0,191226	5,001949	4,941069
MAX.	38,34896	20,06176	23,10049	18,07954
PRŮMĚR	14,45191	13,8248	13,8136	13,80257

Tab. 9: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.4 – Kejnos

S.4				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	4,750291	3,618569	11,6409	6,59424
MAX.	30,73741	21,87464	20,96325	20,4064
PRŮMĚR	16,21186	16,22483	16,10043	15,59502

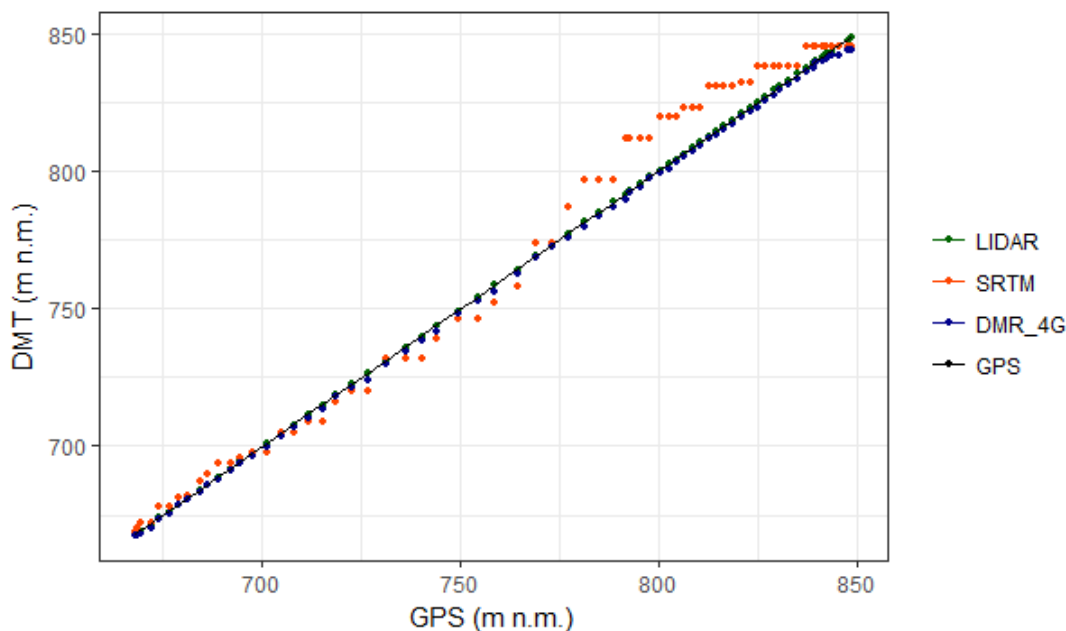
Tab. 10: Základní sklonitostní poměry, měření po vrstevnici, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.5 – Poustka

S. 5				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	13,67183	15,07932	14,10566	16,52085
MAX.	22,29545	20,28968	18,32758	18,59038
PRŮMĚR	17,96838	17,35148	15,59215	17,65983

4.2.3 Statistické ukazatele

Výpočty základní popisné statistiky jsou provedeny pouze z těch hodnot, které obsahovaly referenční hodnotu GPS. obr. 8 je grafické srovnání vybraných nadmořských výšek DTM lokality S.3. Výšky DTM jsou vyneseny na ose Y a referenční hodnoty GPS na ose X lokality. Pro referenční hodnotu GPS pak platí, že

$X=Y$. Ostatní porovnání vybraných výšek koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č. 11). V tab. 11 jsou vypočítané hodnoty základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$), pro všechny čtyři měřené úseky vodních toků.



Obr. 8: Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenční hodnotou GPS, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota S.3 – Poustka

Tab. 11: Základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$). Lokalita č.3 – Černá hora, úsek S.1 a S.2, Lokalita č. 4 – Štěpanická Lhota, úsek S.3, S. 5 – Poustka a úsek S.4 Kejnost

	DTM	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
S.1	LiDAR	-0,45318122	0,068678884	0,7245614
	DMR 4G	-0,58158446	0,305840975	1,036712
	SRTM 30	3,30302	2,815203879	6,833156
	LiDAR 30	-0,27177734	1,785428281	2,827482089
S.2	LiDAR	-0,419226362	0,136428818	0,440603
	DMR 4G	-1,258606225	0,473752406	1,3437728
	SRTM 30	4,82640125	3,326184145	5,8497313
	LiDAR 30	-0,1633541	2,766916964	2,754418

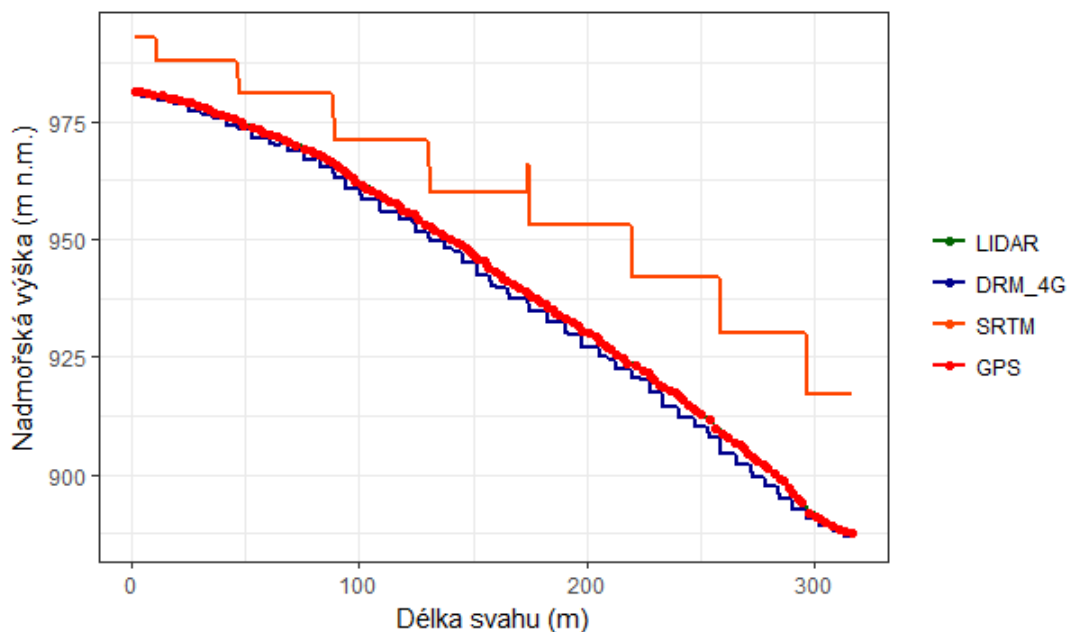
S.3	LiDAR	-0,13919297	0,209231395	0,24999812
	DMR 4G	-1,44262603	0,766154125	1,630767
	SRTM 30	4,885579104	7,8504959	9,196701259
	LiDAR 30	-0,436210985	2,555124228	2,57322699
S.4	LiDAR	-0,301143901	0,16093864	0,341034
	DMR 4G	-0,449933484	0,529710648	0,692784
	SRTM 30	2,069187912	3,594060004	4,129995
	LiDAR 30	0,343365352	2,874237531	2,878951
S.5	LiDAR	-0,34294756	0,123064959	0,356468
	DMR 4G	-0,64534756	0,452975615	0,768023
	SRTM 30	0,916652	2,851486297	2,883305
	LiDAR 30	0,70183996	3,110604251	3,066789192

4.3 Svahy s vegetací

Měření svahů s vegetací probíhalo na lokalitě č. 2, Malá Úpa. V rámci této lokality bylo zaměřeno pět úseků vrchu Heida, (S.6) o délce 316 m, (S.7) o délce 308 m (S.8) 313 m, (S.9) 416 m (S.10) 233 m. Celkem bylo na těchto dvou úsecích zaměřeno 419 bodů.

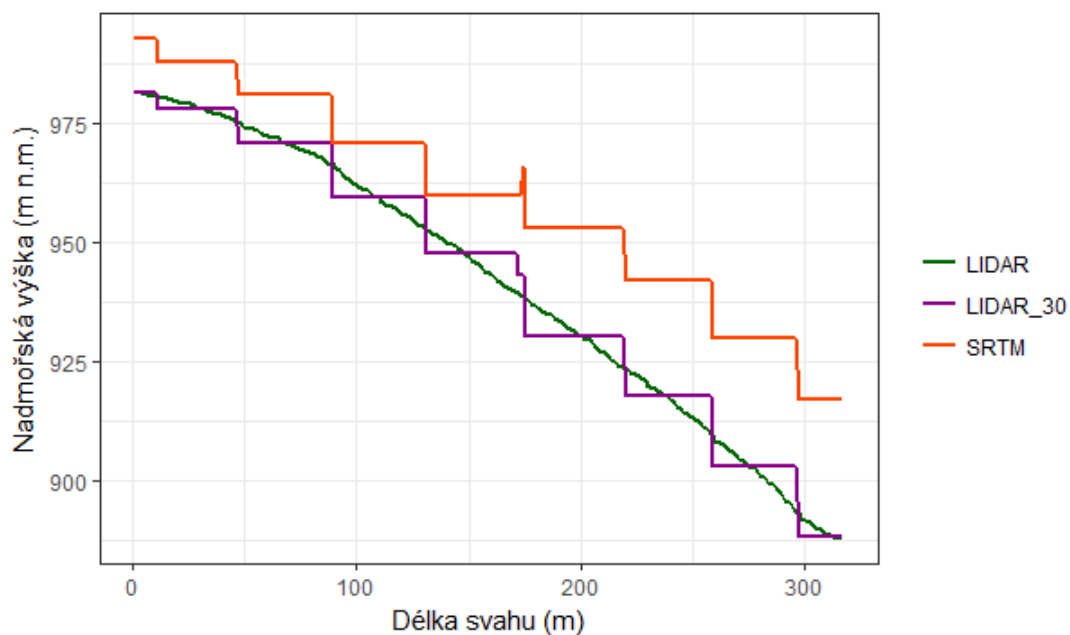
4.3.1 Výškový profil

Výškový profil úseku S.6 pro 3 základní modely obr. 6. Na ose Y jsou vyneseny nadmořské výšky a na ose X je délka daného profilu. GPS představuje referenční kontrolní hodnotu. Ostatní výškové profily svahů bez vegetace jsou v příloze (Příloha č. 12).



Obr. 9: Výškový profil, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6

Výškový profil S.6 obr. 10., kde na ose Y jsou vynesena nadmořská výška pro SRTM a převzorkovaný LiDAR 30. LiDAR představuje referenční hodnotu. Ostatní výškové profily převzorkovaných koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č. 13).



Obr. 10: Výškový profil s převzorkovanými hodnotami LiDAR (1x1) na LiDAR 30 (30x30), Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S. 6

4.3.2 Sklonitostní poměry

Hodnoty maximálního, minimálního a průměrného sklonu odvozené z testovaných DTM pro jednotlivé svahy. tab. 12 svah S.6, tab. 13 svah S.7, tab. 14 svah S.8, tab. 15 svah S.9, tab. 16 svah S.10

Tab. 12: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6

S.6				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	2,275183	7,03967	9,52546	7,191314
MAX.	40,3029	29,87855	22,76519	28,04676
PRŮMĚR	22,43498	21,32478	19,27025	21,20207

Tab. 13: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.7

S.7				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	2,173557	7,513592	5,302104	8,260183
MAX.	44,03962	41,79189	28,32764	30,54298
PRŮMĚR	22,99079	22,68911	19,33475	21,68627

Tab. 14: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.8

S.8				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	3,942814	7,513592	5,302104	8,260183
MAX.	56,18673	43,38154	26,92426	31,89813
PRŮMĚR	22,76607	22,5581	19,67175	21,30144

Tab. 15: Základní sklonitostní poměry, měření po vrstevnici, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.9

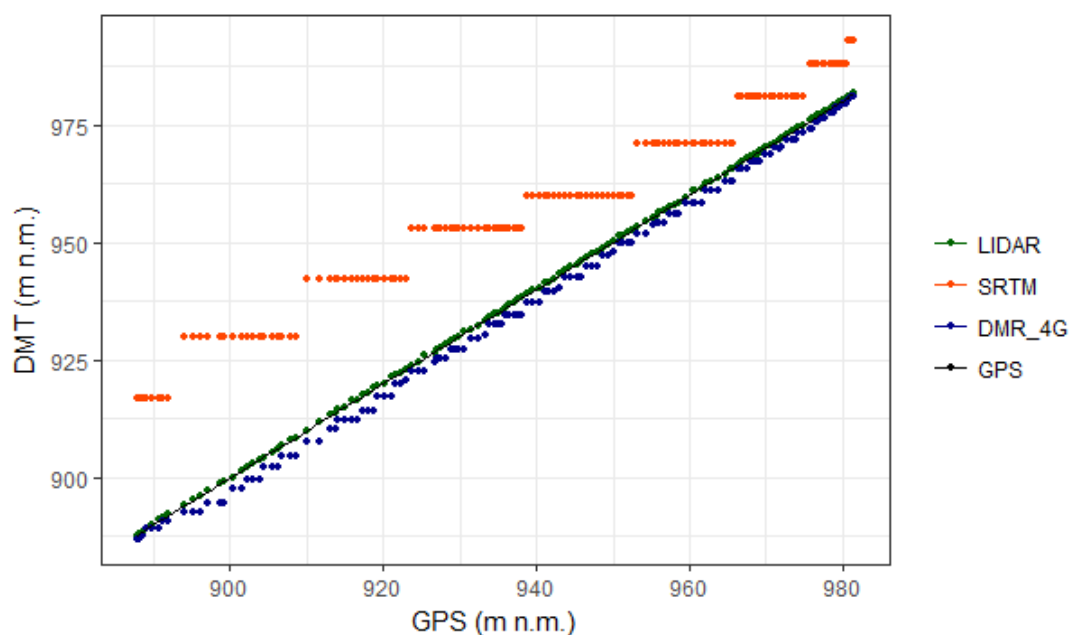
S.9				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	4,716465	15,41489	20,01342	19,92044
MAX.	36,81387	28,87814	26,92426	25,81192
PRŮMĚR	21,33271	21,31519	23,0394	22,88254

Tab. 16: Základní sklonitostní poměry, měření po vrstevnici, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.10

S.10				
Sklon (°)	LiDAR	DMR 4G	SRTM 30	LiDAR 30
MIN.	3,463012	17,41801	20,24452	17,75649
MAX.	37,9884	26,30838	25,83409	23,39088
PRŮMĚR	21,74393	21,26452	22,96209	21,0925

4.3.3 Statistické ukazatele

Výpočty základní popisné statistiky jsou provedeny pouze z těch hodnot, které obsahovaly referenční hodnotu GPS. obr. 5 je grafické srovnání vybraných nadmořských výšek DTM úseku S.6. Výšky DTM jsou vyneseny na ose Y a referenční hodnoty GPS na ose X lokality. Pro referenční hodnotu GPS pak platí, že $X=Y$. Ostatní porovnání vybraných výšek koryt vodních toků jsou v příloze (Příloha č. 14). tab. 17 jsou vypočítané hodnoty základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$), pro všechny čtyři měřené úseky vodních toků.



Obr. 11 Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenční hodnotou GPS, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S. 6

Tab. 17: Základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$). Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6, S.7, S. 8, S. 9, S. 10

	DTM	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
S.6	LiDAR	0,090617309	0,180521259	0,2013962
	DMR 4G	-2,152188403	0,987231771	2,367985
	SRTM 30	17,85737914	7,858525873	19,49481
	LiDAR 30	0,329457921	3,722303043	3,710131445
S.7	LiDAR	-0,055513901	0,18581879	0,1933017
	DMR 4G	-1,316646078	0,89609898	1,590866
	SRTM 30	19,2318617	5,195919779	19,91659
	LiDAR 30	0,301158177	3,585967372	3,585897169
S.8	LiDAR	0,302870871	0,2058953	0,36579
	DMR 4G	-0,909098705	0,97361305	1,329361348
	SRTM 30	18,6553697	5,239251971	19,37174817
	LiDAR 30	0,869388545	3,97756562	4,05672385
S.9	LiDAR	0,083089854	0,166063444	0,185198
	DMR 4G	-1,374723079	0,848425619	1,613977
	SRTM 30	19,16236159	4,887075715	19,77173
	LiDAR 30	-0,174856523	3,893744628	3,884767
S.10	LiDAR	0,292507452	0,155950832	0,3306088
	DMR 4G	-0,850340929	0,61803061	1,046875
	SRTM 30	17,22465238	4,473998603	17,78282
	LiDAR 30	0,868704	2,688344521	2,794596

4.4 Celkové srovnání

Celkové srovnání tab. 19. reprezentuje všechny typy DTM a jejich průměrné statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratickou chybu (RMSE) a směrodatnou odchylku ($SD(\sigma)$) pro tři výše zmiňované typy stanovišť.

Tab. 18: Průměrné statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$) jednotlivých DTM v rámci koryt vodních ploch, svahů bez vegetace a svahů s vegetací

LiDAR			
Typ stanoviště	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
Koryta vodních toků	0,04025359	0,20977925	0,2673545
Svahy bez vegetace	-0,331138403	0,139668539	0,422532904
Svahy s vegetací	0,142714317	0,178849925	0,25525894

DMR 4G			
Typ stanoviště	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
Koryta vodních toků	0,648538193	0,78750175	1,038955
Svahy bez vegetace	-0,875619552	0,505686754	1,09441176
Svahy s vegetací	-1,320599439	0,864680006	1,58981287
SRTM 30			
Typ stanoviště	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
Koryta vodních toků	17,78938008	4,179087	18,3076025
Svahy bez vegetace	3,200168053	4,087486045	5,778577712
Svahy s vegetací	18,4263249	5,530954388	19,26753963
LiDAR 30			
Typ stanoviště	ΔH (m)	SD (m)	RMSE (m)
Koryta vodních toků	2,064250882	2,14904375	2,992541
Svahy bez vegetace	0,034772577	2,618462251	2,820173454
Svahy s vegetací	0,438770424	3,573585037	3,606423093

5 Diskuze

Pro detekci rozlišení byly použity tři statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$) a střední kvadratická chyba (RMSE). Tyto ukazatele byly vybrány na základě dostupné literatury zabývající se problematikou přesnosti DTM (např. Deng et al., 2007; Vaze et al., 2010; Wong et al. 2014). Avšak ne všichni autoři používají všechny tyto ukazatele. Navíc někteří autoři v rámci svých metodik nedorozumí přesnou terminologii jednotlivých vyrazů pro statistické ukazatele, což pak může mít za následek dezinformaci a špatnou interpretaci výsledků. To se týká především českých autorů např. Brázdil et al., (2012).

Z výsledků je patrné, že k největšímu zkreslení a ztrátě informací dochází u SRTM, to je dobře vidět z obr. 3 a obr. 9 výškových profilů. Hodnoty SRTM jsou nadhodnocené a data vůbec nekopírují výškový profil, což má za následek ztrátu morfologických úkazů v terénu. U koryt vodních toků činil ΔH 17,8 m, ($SD(\sigma)$) 4,2 m a RMSE 18,3 m. U svahů s vegetací vycházejí hodnoty ještě více nepřesné, výškový rozdíl ΔH 18,4 m, $SD(\sigma)$ 5,5 m a RMSE 19,3 m. Výškový rozdíl těchto dvou terénních stanovišť přesahuje globální průměr 16 m, který udává Rodríguez (2006). Nadhodnocení SRTM a to v rámci koryt vodních toků a svahů s vegetací bylo způsobeno tím, že terén byl velmi členitý a SRTM nedokáže zachytit a přesně vystihnout danou morfologii. Navíc struktura koryt horských vodních toků se často mění vlivem jarního tání a velkým množstvím protékající vody (Wondzell et Swanson, 1999). Velký vliv na přesnost SRTM má vegetace. Gesch et al., (2012) ve své studii uvádí, že radarový signál neprotrpne až k terénu a dojde k zaměření vegetace, to pak způsobuje vychylující se hodnoty. Tento problém popisuje ve své studii také Höhle et Höhle, (2009), který se zabýval využitím DTM pro lesní hospodářství. Odstraněním zkreslení SRTM způsobeného vegetací se zabývají mnozí autoři (např. Baugh et al., 2013; O'Loughlin et al., 2016). Většina autorů pro zpřesnění výšek využívá globální výšku vegetace, od které je odečteno SRTM, a je tak dosaženo vyšší přesnosti. O'Loughlin et al., (2016) uvádí, že touto metodou dosahuje SRTM zlepšení o 10 m. Ve srovnání s údaji v této práci, kde RMSE pro SRTM na svazích s vegetací dosahovalo 19,3 m výškový rozdíl zůstává stále znatelných 9,3 m. Lepších výsledků by se například dosáhlo, kdyby se vycházelo z lokálně známé výšky dřevin například v rámci lesního hospodářství ČR, kde se, jak uvádí Simanov, (2013) dřeviny pěstují v segmentech podle věků a dosahují tak stejných výšek. Navíc jsou tyto segmenty vyznačené v mapách lesních hospodářských plánů a daly by se tak snadno použít jako podklad. Přesnější hodnoty vykazuje SRTM na stanovištích bez vegetace, ΔH 3,2 m,

SD(σ) 4,1 m a RMSE 5,8 m. Z výškového profilu obr. 6 vidíme, že SRTM už mnohem lépe kopíruje daný terén a data už nejsou tolik nadhodnocena, jelikož měření probíhalo v rámci sjezdových tratí, které byly bez větších teréních nerovností. Přesto však detailnější terén není zachycen. SRTM je asi nejrozšířenější DTM, je vytvořený téměř pro celý svět a existuje mnoho studií, které porovnávají jeho přesnost například Santillan et Makinano – Santillan (2016), se ve své práci zaměřil na přenos SRTM v lesních porostech a uvádí průměrný ΔH 8,47 m a RMSE 9,62 m zároveň pro srovnání uvádí hodnoty naměřené na místech bez vegetace, ΔH 8,13 m a RMSE 8,64 m a snaží se tak vyvrátit tvrzení Gesch et al., (2012), že vegetace nemá vliv na ztrátu přesnosti. Výsledky této práce však ukazují, že vegetace na ztrátu signálu vliv má. Na hodnocení přesnosti SRTM v členitém horském terénu se zaměřil Mispan et al., (2015), který uvádí RMSE 20,21 m. Další studie hodnocení SRTM jsou zaměřené spíše na SRTM 90 např. Nuth et Käab, 2011; Rexer et Hirt, 2014; Wong et al., 2014.

Dalším hodnoceným DTM byl LiDAR 30, který byl vytvořen pro srovnání se SRTM a taky jako ukázka toho, jak se změní vertikální přesnost při převzorkování na nižší rozlišení. Výsledky jsou následující, u koryt vodních toků ΔH 2,06 m, SD(σ) 2,10 m a RMSE 2,99 m u svahů bez vegetace, ΔH 0,03 m, SD(σ) 2,61 m a RMSE 2,82 m a u svahů s vegetací, ΔH 0,44 m, SD(σ) 3,57 m a RMSE 3,60 m. Na základě výsledků bychom mohli říct, že hodnoty jsou mnohem přesnější než u SRTM, ale k analýzám členitějšího terénu se nehodí. To můžeme vidět z výškového profilu koryt vodních toků obr. 4, kdy model není schopen zachytit větší rozdíly. U svahů s vegetací obr. 10, LiDAR 30 už poměrně dobře kopíruje terén. U svahů bez vegetace obr. 7 jsou statistické ukazatele srovnatelné s hodnotami DMR 4G, ale velikost buněk 30 x 30 stejně snižuje zachycení hodnot jako u SRTM. Na základě toho můžeme říci, že při převzorkování vyššího rozlišení na nižší, například pro potřeby analýzy rozsáhlejšího území, dostaneme přesnější hodnoty. To ve své práci potvrzuje Vaze et al., (2010), který ze stejných důvodů převzorkoval LiDAR data a srovnával je s původními DTM o rozlišení 5 x 5 m a 25 x 25 m. K podobným výsledkům dospěl i Mudron et al., (2013), který se také v rámci své práce zabýval vlivem převzorkování hodnot LiDAR na nižší rozlišení.

DMR 4G patří k nejpoužívanějším DTM v rámci ČR. V porovnání se SRTM je z výsledků patrné, že dosahuje mnohem vyšší přesnosti. Z výškových profilů obr. 6, obr. 9 je dobře vidět, že DMR 4G kopíruje daný terén, ale u velikosti buněk 5 x 5 m stále dochází ke ztrátě drobných změn reliéfu. Z obr. 3 je také vidět, že DMR 4G není schopné zachytit velké terénní změny v rámci koryt vodních toků, kde hodnoty

vycházely, ΔH 0,65 m, $SD(\sigma)$ 0,79 m a RMSE 1,03 m, tyto chyby byly již zmiňovány výše. Přesnost DMR 4G udávaná ČÚZK vychází z metodiky Brázdil et al., (2012). Ten udává, že střední kvadratická chyba v otevřeném terénu činí 0,3 m a v zalesněném terénu 1 m. Tyto hodnoty ve své práci potvrzuje i Hubáček et al., (2014), dále ale také uvádí, že k větším nepřesnostem dochází na větších terénních nerovnostech. Hodnoty změřené pro DMR 4G na svazích bez vegetace čili dle označení ČÚZK, (2017) v odkrytém terénu činily, ΔH - 0,88 m, $SD(\sigma)$ 0,51 m a RMSE 1,09 m a u svahů s vegetací tedy v zalesněném terénu, ΔH - 1,32 m, $SD(\sigma)$ 0,84 m a RMSE 1,59 m. Není tedy potvrzena ani jedna hodnota udávaná ČÚZK. Rozdíl je způsoben především jinou metodikou sběru referenčních dat. V rámci této práce byla data sbírána v horském terénu. Brázdil et al., (2012) uvádí, že místa zaměřování kontrolních bodů byly rovné plochy, jako fotbalová hřiště, tenisové kurty apod.

Nejvyšší přesnosti v rámci testovaných DTM dosahuje LiDAR. Na základě dosažených výsledků, ΔH 0,04 m, $SD(\sigma)$ 0,21 m a RMSE 0,27 m u svahů bez vegetace, ΔH - 0,333 m, $SD(\sigma)$ 0,13 m a RMSE 0,42 m a u svahů s vegetací, ΔH 0,14 m, $SD(\sigma)$ 0,19 m a RMSE 0,26 m, můžeme říci, že Lidarová data nejlépe vystihují daný terén s minimální odchylkou oproti ostatním testovaným DTM a hodí se pro detailnější terénní analýzy. Casas et al., (2006) ve své práci uvádí, $SD(\sigma)$ 0,37 m a RMSE 0,30 m v rámci pozemního měření, tyto hodnoty jsou srovnatelné s výsledky této práce. Dále se také zabýval zaměřováním dna vodních toků, kde hodnoty vycházely, $SD(\sigma)$ 0,98 m a RMSE 1,60 m. Toto odchýlení dokládá tím, že u velkých toků s větším průtokem nepronikne signál LiDAR až na dno, a proto je u větších toků lepší využívat jinou metodu např. batymetrii.

6 Závěr

Hodnocení přesnosti DTM na území Krkonošského národního parku ukazuje, jaký vliv má rozlišení DTM na ztrátu informací o zemském povrchu. Dále práce ukazuje, k jakému zkreslení výšek dochází na rozdílných stanovištích, kde je ztráta přesnosti způsobená vegetací nebo členitým terénem. Z výsledků je patrné, že SRTM se nehodí pro analýzy v lesních porostech, kde vlivem vegetace dochází k velké ztrátě přesnosti. SRTM také není vhodné pro analýzy ve členitém terénu, kde je potřeba zachytit i detailní morfologické znaky. Model je spíše vhodný pro analýzy rovinnatých území a mírných svahů bez přítomnosti vegetace. SRTM bylo také porovnáno s LiDAR (30 x 30 m), který byl vygenerován z dat vyššího rozlišení. Výsledky ukazují, že model odvozený z dat vyššího rozlišení dosahuje vyšší přesnosti. DMR 4G byl srovnán s údaji na portálu ČÚZK. Výsledky ukazují, že hodnoty přesahují udávané hodnoty. Přesto můžeme říci, že DMR 4G je poměrně vhodný model pro terénní analýzy ve členitém terénu bez větších terénních nerovností. Nejpřesnějším DMT je model vytvořený z dat LiDAR. Velké rozlišení tohoto modelu se hodí pro přesné analýzy v členitém horském terénu. Tato práce by měla posloužit jako ukázka toho, čeho se vyvarovat při výběru DTM pro požadovanou analýzu, a toho, k jakým chybám může docházet při použití DTM nižšího rozlišení v členitém terénu, nebo v lesních porostech.

7 Reference

Altmaier A., Kany C., (2002): Digital surface model generation from CORONA satellite images. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote* 56:221–235.

Anderson R.P., Gómez-Laverde M., Peterson A.T., (2002): Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: Insights from predictive models. *Global Ecology and Biogeography* 11:131–141.

Athmania D., Achour H., (2014): External validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI- SRTM v4.1 free access digital elevation models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sensing* 6:4600–4620.

Baltsavias E.P., (1999): A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54:83–94.

Baugh C. A., Bates P. D., Schumann G., Trigg M. A., (2013): SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. *Water Resources Research* 49:5276–5289.

Bhatta B., (2010): Global Navigation Satellite Systems: Insights into GPS, GLONASS, Galileo. CRC Press, New York: 438 s.

Blažek R., Skořepa Z., (2004): Geodézie III. České vysoké učení technické, Praha: 161 s.

Böhm J., (2002): Fotogrammetrie. Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská - technická univerzita, Ostrava: 16 s.

Brázdil K., Bělka L., Dušánek P., Fiala R., Gamrát J., Kafka O., Peichl J., Šíma J., (2012): Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace DMR 4G. Zeměměřický úřad, Pardubice: 11 s.

Carrara A., Bitelli G., Carla R., (1997): Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science* 11:451–473.

Casas A., Benito G., Thorndycraft V.R., Rico M., (2006): The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms* 31:444–456.

Claessens L, Heuvelink G. B. M., Schoorl J. M., Veldkamp A., (2005): DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms* 30:461–477.

Crosetto M., Pérez F., (2000): Radargrammetry and SAR interferometry for DEM generation : validation and data fusion. *SAR Workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites* 450:367–372.

Čada V., © (2017): Přednáškové texty z geodézie (online), [cit. 2017-5-4]. URL: <http://gis.zcu.cz/studium/gen1/html/index.html>

ČÚZK., © (2017): Geoportál (online), [cit. 2017-3-4]. URL: <http://geoportal.cuzk.cz>

Deng Y., Wilson J.P., Bauer B.O., (2007): DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science* 21:187–213.

Fabris M., Pesci A., (2005): Automated DEM extraction in digital aerial photogrammetry: Precisions and validation for mass movement monitoring. *Annals of Geophysics* 48:973–988.

Farr T., Rosen P., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., (2007): The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* 45:1–33.

Florinsky I., Eilers R., Manning G., Fuller L., (2002): Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling, Software* 17:295–311.

Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Meyer D., Danielson J., (2012): Validation of the Aster Global Digital Elevation Model Version 2 Over the Conterminous United States. *39:281–286.*

Grieve S. W. D., Mudd S. M., Milodowski D. T., Clubb F. J., Furbish D. J., (2016): How does grid-resolution modulate the topographic expression of geomorphic processes? *Earth Surface Dynamics* 4:627–653.

Guisan A., Thuiller W., (2005): Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8:993–1009.

Guo-an T., Strobl J., Jian-ya G., Mu-dan Z., Zhen-jiang C., (2001): Evaluation on the accuracy of digital elevation models. *Journal of Geographical Sciences* 11:209–216.

Hengl T., (2006): Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences* 32:1283–1298.

Hengl T., Evan I. S., (2009): Mathematical and digital models of the land surface. *Developments in Soil Science* 33:31–63.

Herbei M. V., Ciolac V., Herbei O., Popescu C., Ciolac L., (2010): Modelling of surfaces in order to protect them. 42:607–614.

Hernandez P. A., Franke I., Herzog S. K., Pacheco V., Paniagua L., Quintana H. L., Soto A., Swenson J. J., Tovar C., Valqui T. H., Vargas J., Young B. E., (2008): Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodiversity and Conservation* 17:1353–1366.

Hubáček M., Brenová M., Ceplová L., Zerzan P., (2014): Verification of Accuracy of the New Generation Elevation Models. *Advances in Military Technology (AiMT)* 9:21–32

Höhle J., Höhle M., (2009): Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64:398–406.

Chamout L., Skála P., 2008: *Geodezie, Česká zemědělská univerzita, Praha: 179 s*

Imperatore P., Pepe A., Berardino P., Lanari R., (2015): A Segmented block processing approach to focus synthetic aperture radar data on multicore processors. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2015:2421–2424.*

Klimánek M., (2006): Optimization of digital terrain model for its application in forestry. *Journal of Forest Science* 5:233–241.

Klimánek M., (2008): *Digitální modely terénu, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova zemědělská univerzita, Brno: 80 s.*

Kusák M., Kropáček J., Vilímek V., Schillaci C., (2016): Analysis of the influence of tectonics on the evolution of valley networks based on SRTM DEM Jemma River Basin, Ethiopia. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 39:37–50.

Lacroix M. P., Martz L. W., Kite G. W., Garbrecht J., (2002): Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model. *Environmental Modelling & Software* 17:125–134.

Lang M., McCarty G., Wilen B., Awn J., (2010): Light Detecton and Ranging: New Inforamationfor Improed Wetland Mapping and Monitoring. *Nacional Wetlands Newsletter* 32: 13–36

Lassueur T., Joost S., Randin C. F., (2006): Very high resolution digital elevation models: Do they improve models of plant species distribution? *Ecological Modelling* 198:139–153.

Lazecký M., Bláha P., (2014): Družicová radarová interferometrie pro sledování deformací. *Geotest, Brno*: 6 s.

Lee J., (1991): Comparison of existing methods for building triangular irregular network, models of terrain from grid digital elevation models. *International journal of geographical information systems* 5:267–285.

Li Z., Zhu Q., Gold C., (2005): *Digital Terrain Modeling: principles and methodology*. CRC Press, New York: 323 s.

Lin Y., Hyyppä J., Jaakkola A., (2011): Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 8:426–430.

Matějka K., (2013): Klimatické gradienty a modelování lesních vegetačních stupňů v ČR. *Information and data systems (Infodatasys)* , Praha, 20 s.

Maune D. F., (2010): *Digital Elevation Model (DEM)*: Whitepaper NRCS High Resolution Elevation Data. United Stated Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Texas: 120 s.

Mispan M. R., Zamir M., Rasid A., Faiza N., Rahman A., Haron S. H., Ahmad N., (2015): Assessment of ASTER and SRTM Derived Digital Elevation Model for Highland Areas of Peninsular Malaysia Region. *International Research Journal of Engineering and tecnology* 2:316–320.

Moore I. D., Grayson R. B., (1991): Terrain-based catchment partitionning and runoff prediction usingvector elevation data. *Water resources research* 27:1177–1191.

Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R., (1991): Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes* 5:3–30.

Mudron I., Podhoranyi M., Cirbus J., Devecka B., Bakay L., (2013): Modelling the Uncertainty of Slope Estimation From a Lidar-Derived Dem: a Case Study From a Large-Scale Area in the Czech Republic. *GeoScience Engineering* 59:25–39.

Mukherjee S., Joshi P. K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R. D., Mukhopadhyay A., (2013): Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21:205–217.

Murphy P. N. C., Ogilvie J., Connor K., Arp P. A., (2007): Mapping wetlands: A comparison of two different approaches for New Brunswick, Canada. *Wetlands* 27:846–854.

Nuth C., Kääb A., (2011): Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere* 5:271–290.

O’Loughlin F. E., Paiva R. C. D., Durand M., Alsdorf D. E., Bates P. D., (2016): A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment* 182:49–59.

Oršulák T., Pacina J., (2012): 3D modelování a virtuální ralita. Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny (CEVRAMOK), Ústí nad Labem: 64 s.

Pacina J., Brejcha M., (2014): Digitální modely terénu. Fakulta životního prostředí, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Ústí nad Labem: 73 s.

Paul F., Haeberli W., (2008): Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models. *Geophysical Research Letters* 35:1–5.

Petrie G., Kennie T. J. M., (1987): Terrain modelling in surveying and civil engineering. *Computer-Aided Design* 19:171–187.

Pike R. J., Evans I. S., Hengl T., (2009): Geomorphometry:a brief guide. *Developments in soil science* 33:3–30.

Purinton B., Bookhagen B., (2017): Validation of digital elevation models (DEMs): and comparison of geomorphic metrics on the southern Central Andean Plateau. *Earth Surface Dynamics Discussions* 5:1–47.

Qi H, Altinakar M. S., (2011): A GIS-based decision support system for integrated flood management under uncertainty with two dimensional numerical simulations. *Environmental Modelling and Software* 26:817–821.

Rock G., Ries J. B., Udelhoven T., (2011): Sensitivity Analysis of Uav-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (Dem). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38:69–73.

Rodriguez E., Morris C., Belz J., (2006): An assessment of the SRTM topographic products. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72:249–260.

Santillan J. R., Makinano-Santillan M., (2016): Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMS over Northeastern Mindanao, Philippines. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 41:149–156.

Schenk T., (2005): Introduction to Photogrammetry. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Ohio State University, Columbus: 100 s.

Simanov V., (2013): Věková struktura lesů. *Lesnická práce* 92:12–16

Sládek J., Rusnák M., (2013): Nízkonákladové mikro-UAV technológie v geografii (nová metóda zberu priestorových dát). *Geographical journal* 65:269–285.

Smith B., Sandwell D., (2003): Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. *Geophysical Research Letters* 30:20–24

Smuleac A., Herbei M., Popescu C., (2012): Creating the digital terrain model of the USAMVB area using modern technology. *Research Journal of Agricultural Science* 44:282–287.

Šebesta J., (2012): Globální navigační systémy. *Vysoké učení technické, Brno*: 132 s.

- Tachikawa T., Hato M., Kaku M., Iwasaki A., (2011):** Characteristics of ASTER GDEM version 2. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2011:3657–3660.
- Teng J., Vaze J., Tuteja N. K., Gallant J. C., (2008):** A GIS-based tool for spatial and distributed hydrological modelling: CLASS spatial analyst. Transactions in GIS 12:209–225.
- Tsach S., Tatievsky A., London L., (2010):** Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Encyclopedia of Aerospace Engineering 2010:1–16.
- Van Niel K. P., Laffan S. W., Lees B. G., (2004):** Effect of Error in the DEM on Environmental Variables for Predictive Vegetation Modelling. Journal of Vegetation Science 15:747–756.
- Vaze J., Teng J., Spencer G., (2010):** Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. Environmental Modelling and Software 25:1086–1098.
- Vondrák J., (2004):** Geodézie II. Vysoké učení technické, Brno:38 s.
- Wehr A., Lohr U., (1999):** Airborne laser scanning--an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54:68–82.
- Wilson J. P., (2012):** Digital terrain modeling. Geomorphology 137:107–121.
- Wise S., (2000):** Elevation models derived from contours. Hydrological Processes 14:1909–1929.
- Wolock D. M., McCabe G. J., (2000):** Differences in topographic characteristics computed from 100- and 1000-m resolution digital elevation model data. Hydrological Processes 14:987–1002.
- Wondzell S. M., Swanson F. J., (1999):** Floods, channel storage and the hyporheic zone. Water Resources Research 35:555–567.
- Yu J. H., Li X., Ge L., Chang H., (2010):** Radargrammetry and Interferometry SAR for DEM generation. 15th. Australasian Remote Sensing & Photogrammetry conference 2010:1212–1223.

Seznam obrázků

Obr. 1. Různé typy DTM: TIN reprezentace (a), Rastrová reprezentace (b). Převzato z Hengl et Evans 2009.

Obr. 2: Schéma ukazující vliv velikosti buňky na ztrátu informací profilu, profil (a) (2,5x2,5 m), profil b (0,5x0,5 m). Převzato z Hengl et Evans 2009.

Obr. 3. Výškový profil, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

Obr. 4: Výškový profil s převzorkovanými hodnotami LiDAR (1x1) na LiDAR 30 (30x30), Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

Obr. 5: Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenční hodnotou GPS, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

Obr. 6: Výškový profil, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.3 – Poustka

Obr. 7 Výškový profil s převzorkovanými hodnotami LiDAR (1x1) na LiDAR 30 (30x30), Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S. 3 – Poustka

Obr. 8: Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenční hodnotou GPS, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota S.3 – Poustka

Obr. 9: Výškový profil, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6

Obr. 10: Výškový profil s převzorkovanými hodnotami LiDAR (1x1) na LiDAR 30 (30x30), Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S. 6

Obr. 11 Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenční hodnotou GPS, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6

Seznam tabulek

Tab. 1: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 – Svatopetrský potok

Tab. 2: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.2 – Pravý přítok svatopetrského potoka

Tab. 3 Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek P.3 – Úpský potok

Tab. 4: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek P.3 – Úpský potok

Tab. 5: Základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$). Lokalita č.1 – Špindlerův Mlýn, úsek P.1 a P.2, Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P.3 a P. 4

Tab. 6: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.3 – Černá hora, úsek S.1

Tab. 7: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.3 – Černá hora, úsek S.2

Tab. 8: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.3 – Poustka

Tab. 9: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.4 – Kejnosa

Tab. 10: Základní sklonitostní poměry, měření po vrstevnici, Lokalita č.4 – Štěpanická Lhota, úsek S.5 – Poustka

Tab. 11: Základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$). Lokalita č.3 – Černá hora, úsek S.1 a S.2, Lokalita č. 4 – Štěpanická Lhota, úsek S.3, S. 5 – Poustka a úsek S.4 Kejnosa

Tab. 12: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6

Tab. 13: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.7

Tab. 14: Základní sklonitostní poměry, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.8

Tab. 15: Základní sklonitostní poměry, měření po vrstevnici, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.9

Tab. 16: Základní sklonitostní poměry, měření po vrstevnici, Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.10

Tab. 17: Základní statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$). Lokalita č.2 – Malá Úpa, úsek S.6, S.7, S. 8, S. 9, S. 10

Tab. 18: Průměrné statistické ukazatele, výškový rozdíl (ΔH), střední kvadratická chyba (RMSE) a směrodatná odchylka ($SD(\sigma)$), jednotlivých DTM v rámci koryt vodních ploch, svahů bez vegetace a svahů s vegetací

Přílohy

Příloha č. 1: Mapa lokalit sběru terénních dat v Krkonošském národním parku

Příloha č. 2: Mapa lokalita č. 1. Špindlerův mlýn

Příloha č. 3: Mapa lokalita č. 2. Malá Úpa

Příloha č. 4: Mapa lokalita č. 3. Černá hora

Příloha č. 5: Mapa lokalita č. 3. Benecko – Štěpanická Lhota

Příloha č. 6, Koryta vodních toků – Výškové profily

Příloha č. 7, Koryta vodních toků – Výškové profily, Převzorkovaný LiDAR (1x1) na LiDAR (30x30)

Příloha č. 8, Koryta vodních toků – Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenčními hodnotami GPS

Příloha č. 9 Svahy bez vegetace – Výškové profily

Příloha č. 10, Svahy bez vegetace – Výškové profily, Převzorkovaný LiDAR (1x1) na LiDAR (30x30)

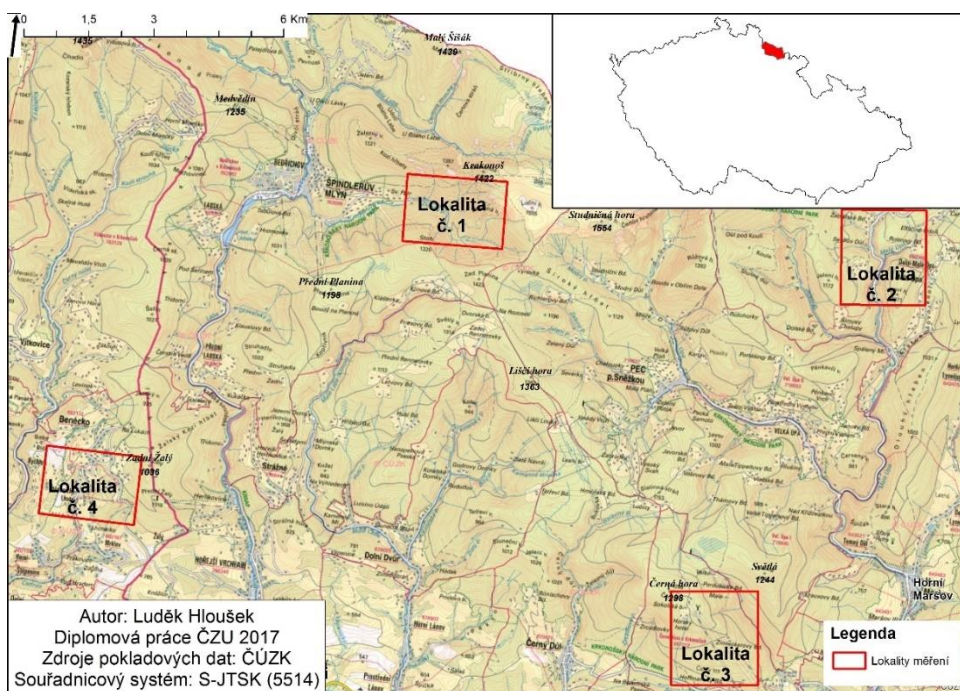
Příloha č. 11 Svahy bez vegetace – srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenčními hodnotami GPS

Příloha č. 12, Svahy s vegetací – Výškové profily

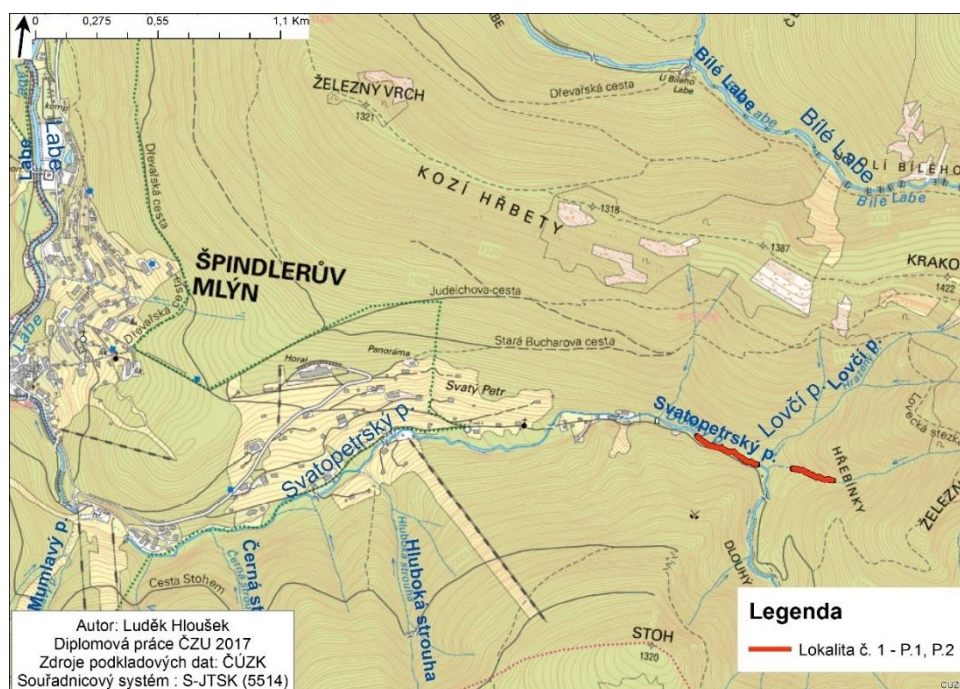
Příloha č. 13, Svahy s vegetací – Výškové profily, Převzorkovaný LiDAR (1x1) na LiDAR (30x30)

Příloha č. 14 Svahy s vegetací – srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenčními hodnotami GPS

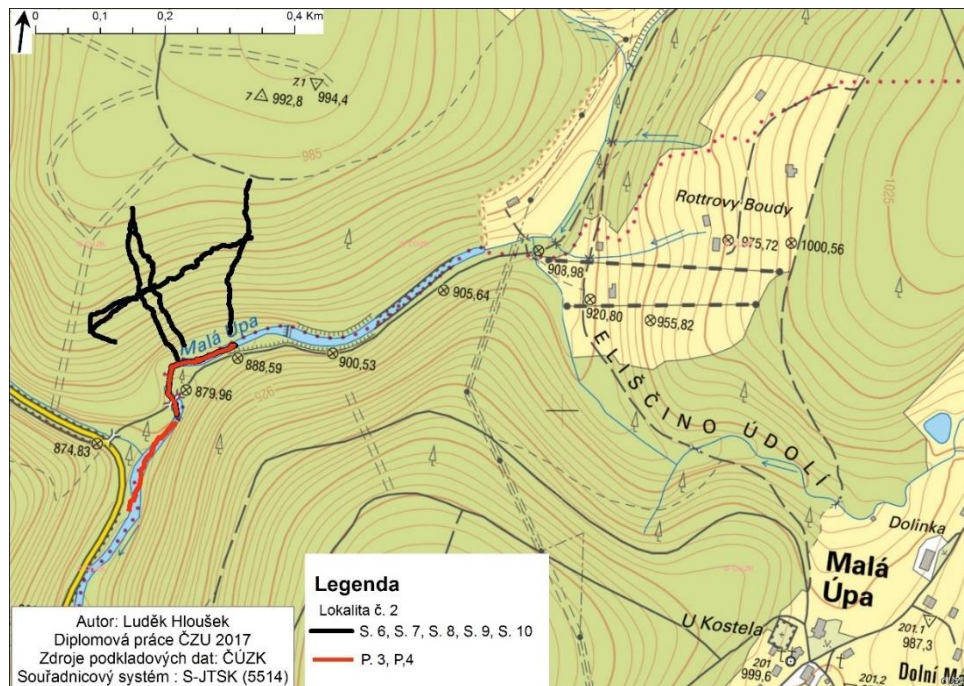
Příloha č. 1: Mapa lokalit sběru terénních dat v Krkonošském národním parku



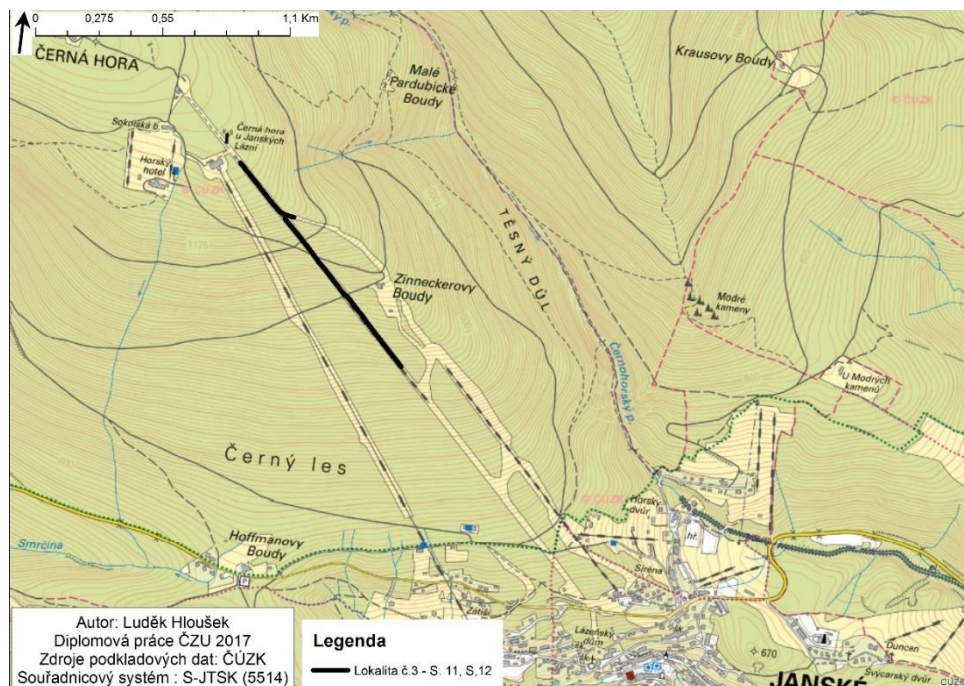
Příloha č. 2: Mapa lokalita č. 1. Špindlerův mlýn



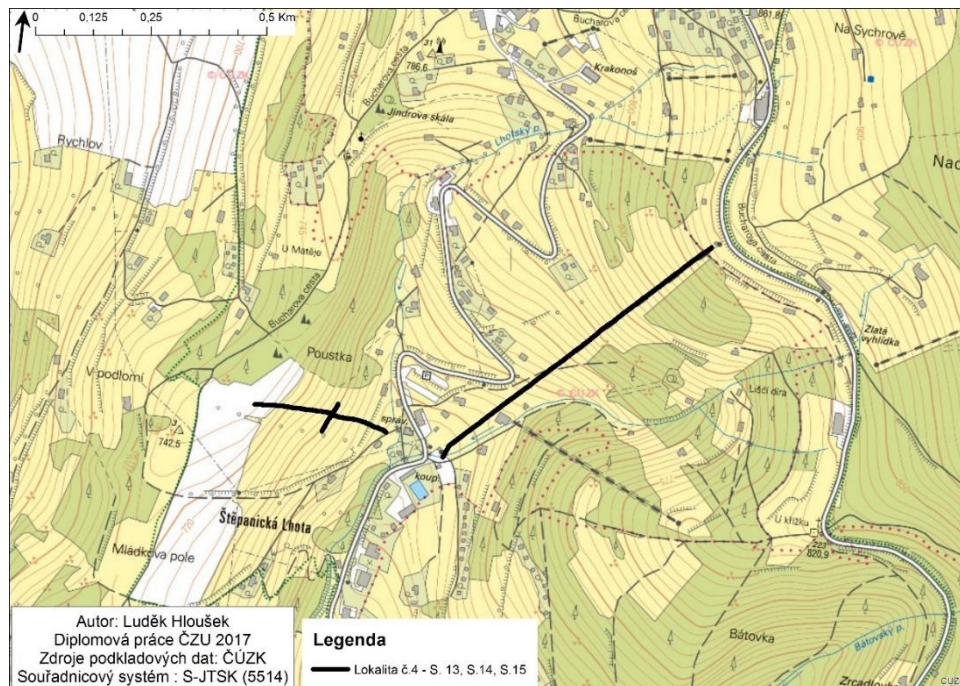
Příloha č. 3: Mapa lokalita č. 2. Malá Úpa



Příloha č. 4: Mapa lokalita č. 3. Černá hora

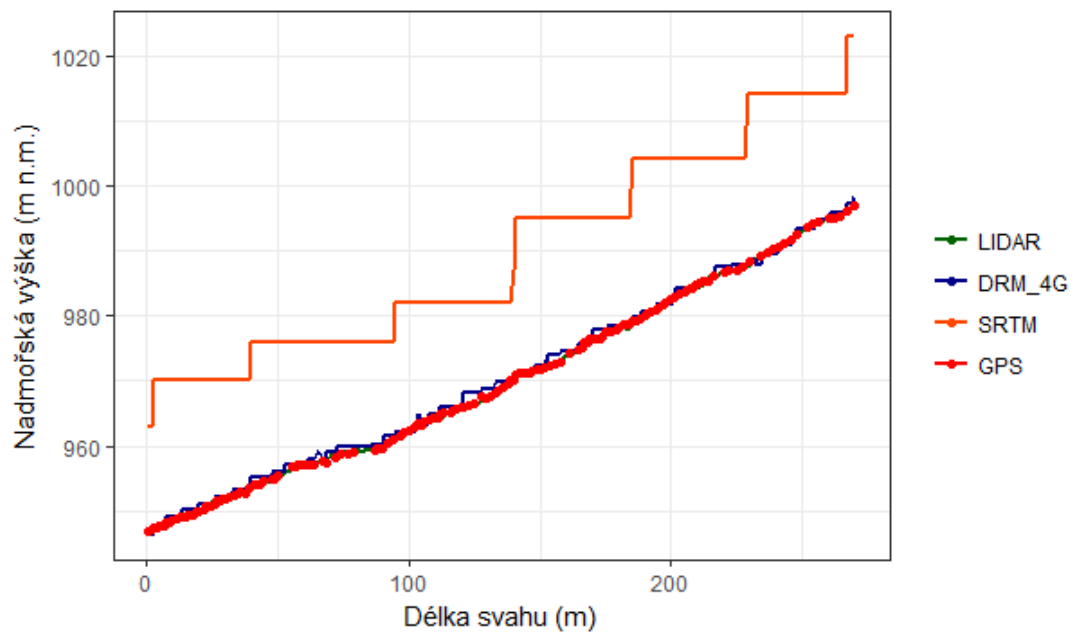


Příloha č. 5: Mapa lokalita č. 3. Benecko – Štěpanická Lhota

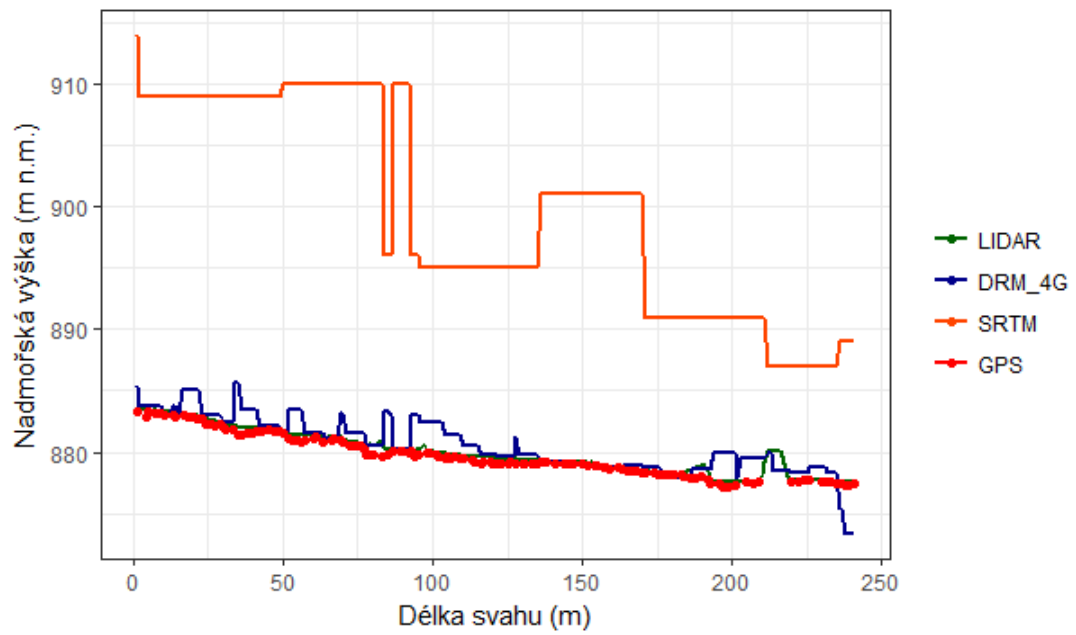


Příloha č. 6, Koryta vodních toků – Výškové profily

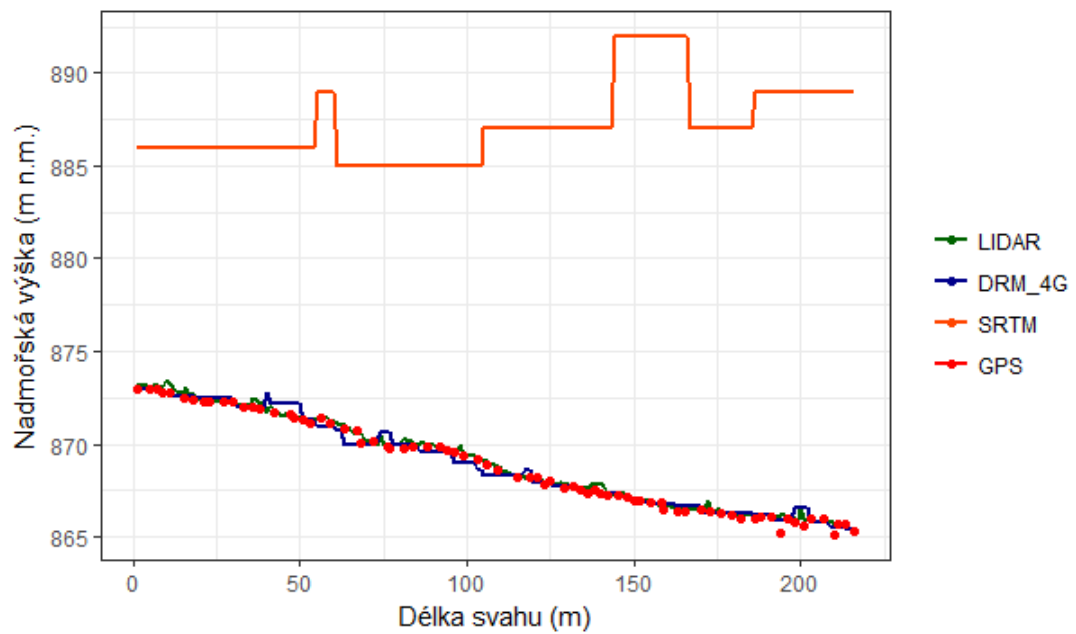
Lokalita č. 1 – Špindlerův mlýn, úsek P. 2



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P. 3

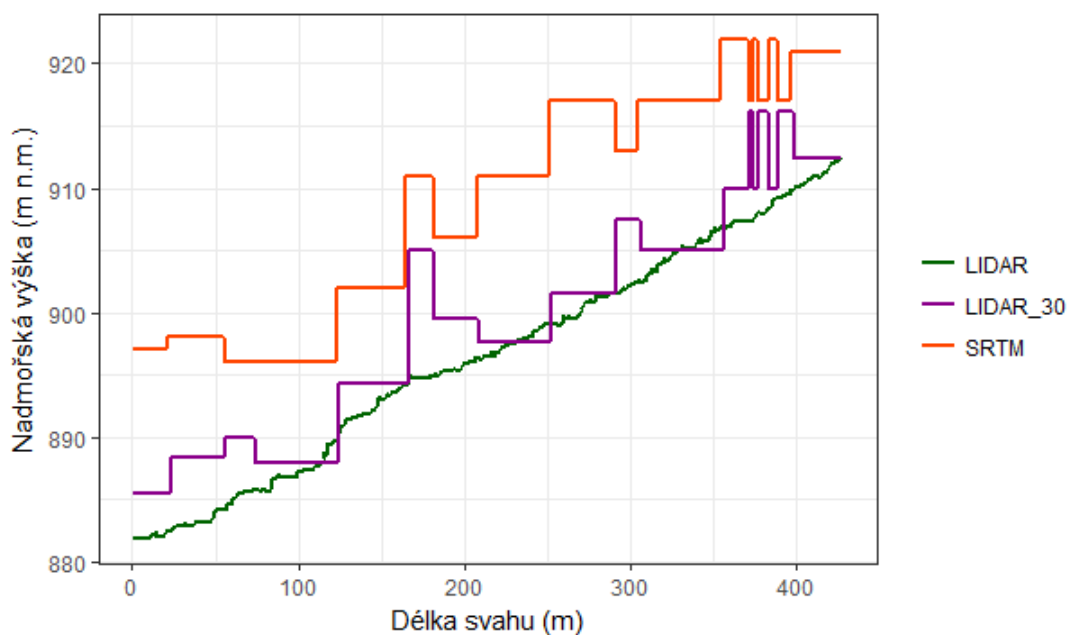


Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P. 3

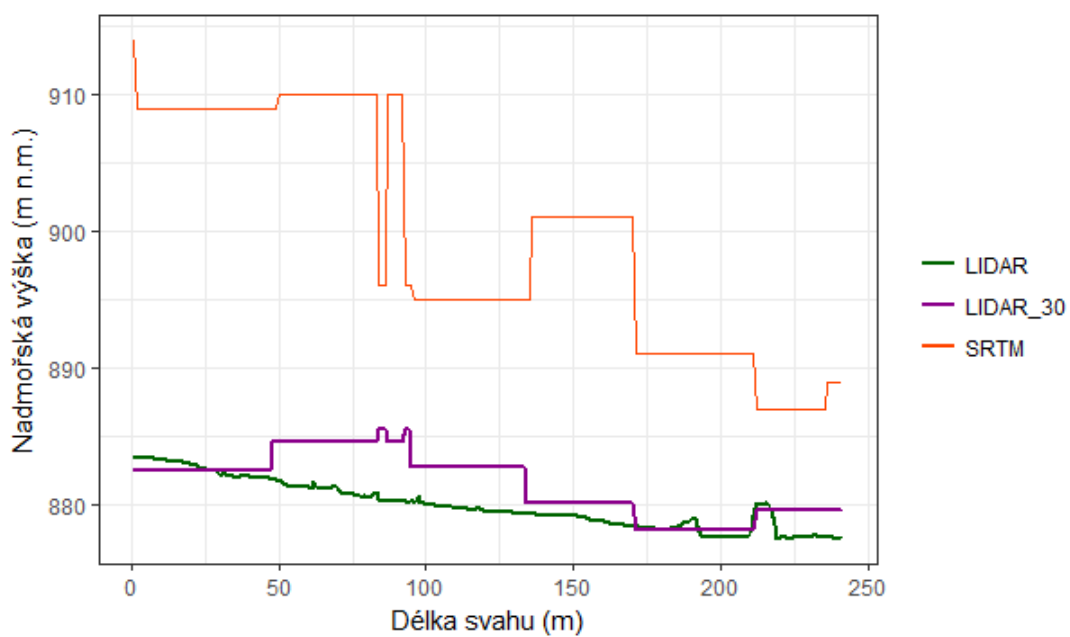


Příloha č. 7, Koryta vodních toků – Výškové profily, Převzorkovaný LiDAR (1x1) na LiDAR (30x30)

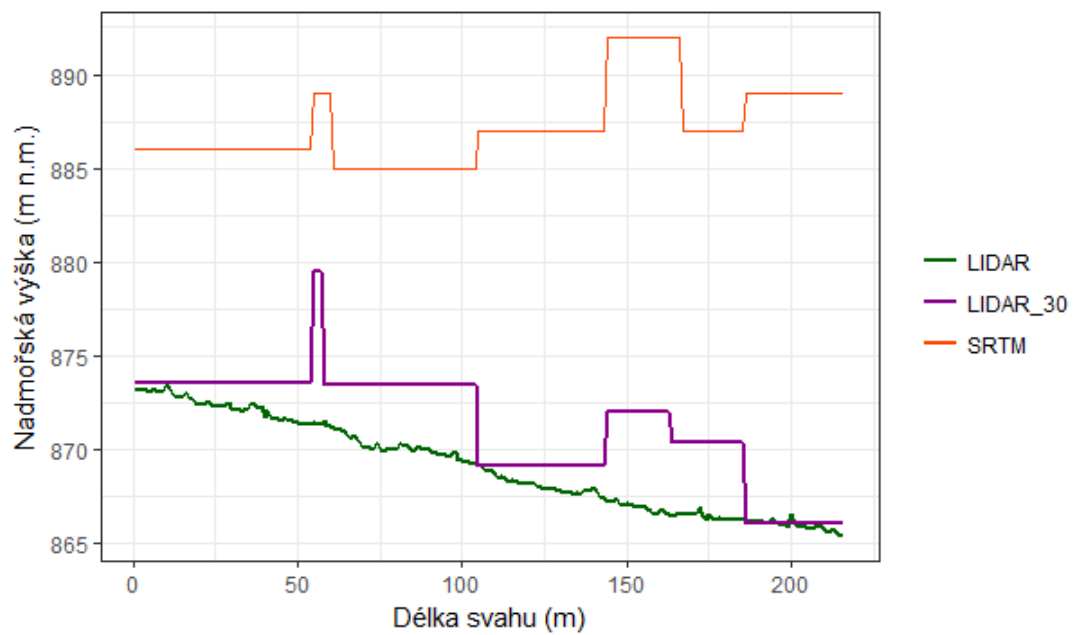
Lokalita č. 1 – Špindlerův mlýn, úsek P. 2



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P. 3

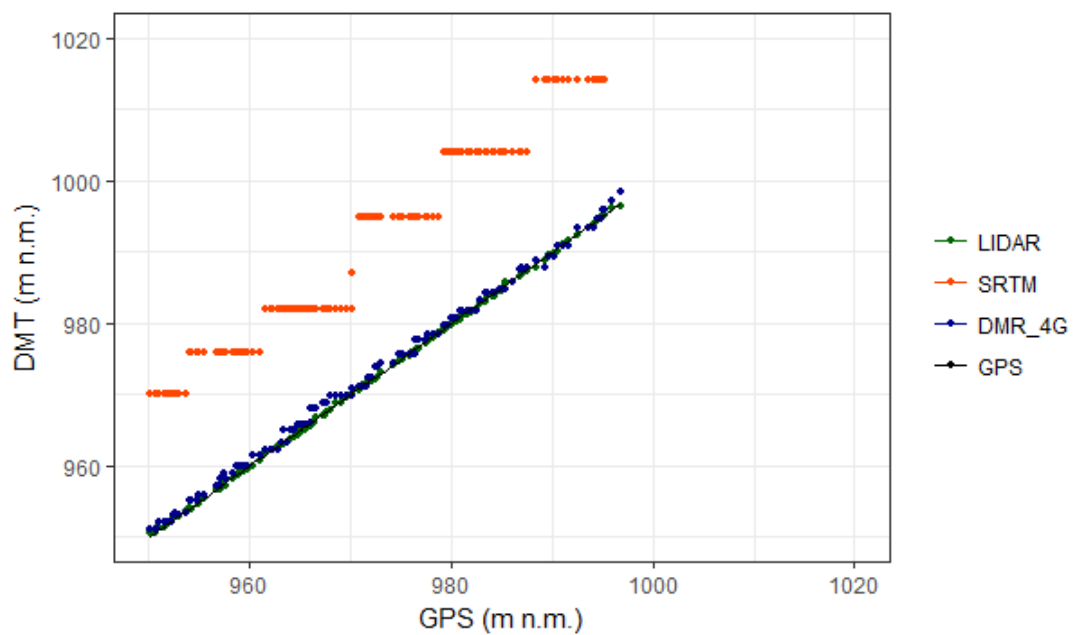


Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P. 4

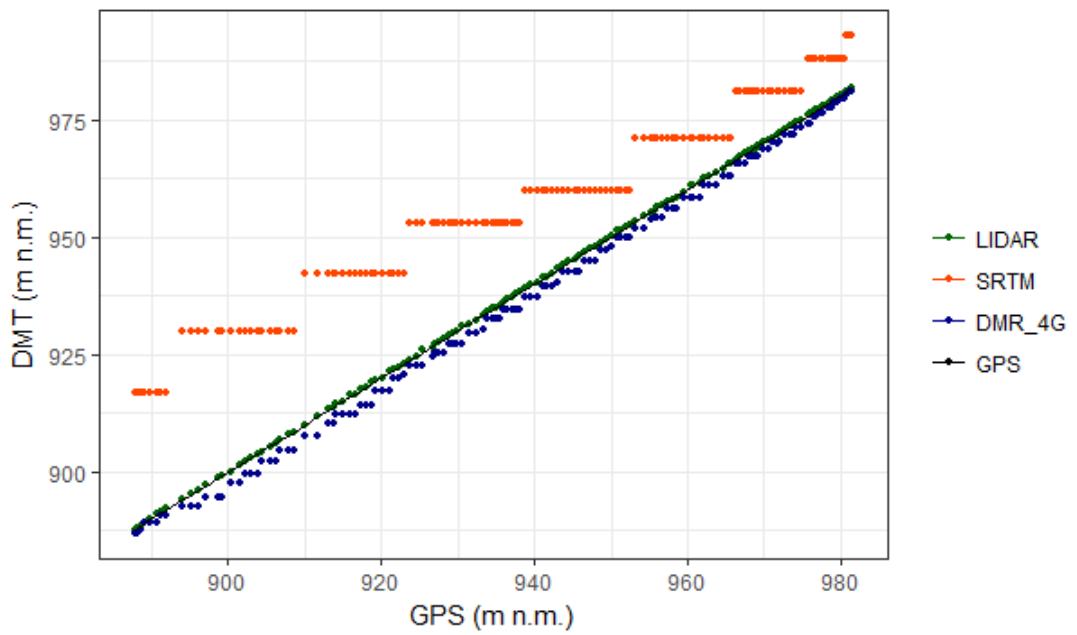


Příloha č. 8, Koryta vodních toků – Srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenčními hodnotami GPS

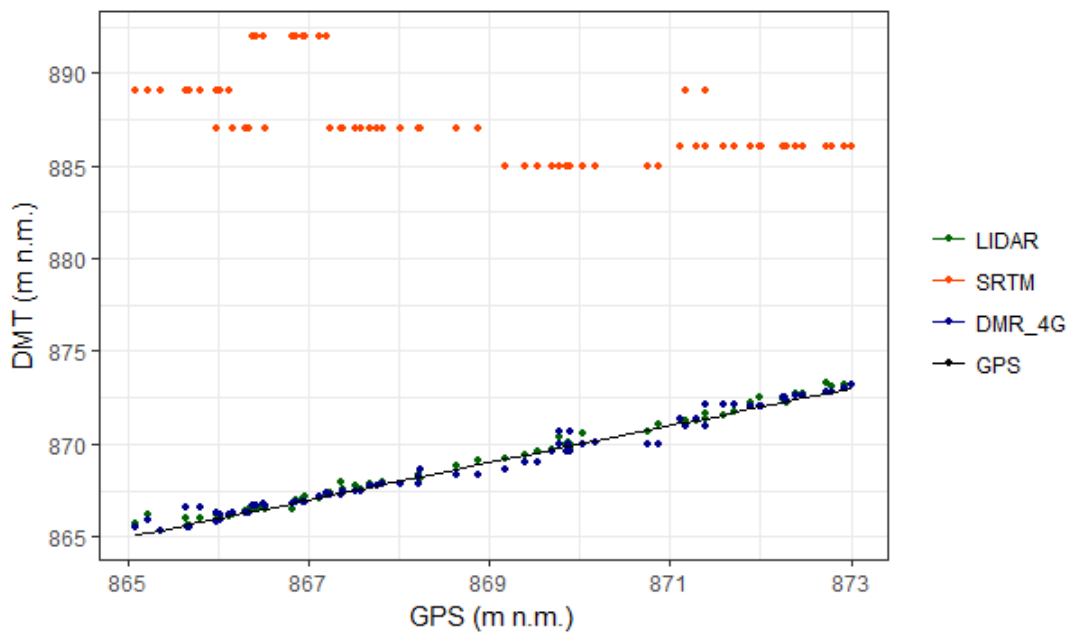
Lokalita č. 1 – Špindlerův mlýn, úsek P. 2



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P. 3

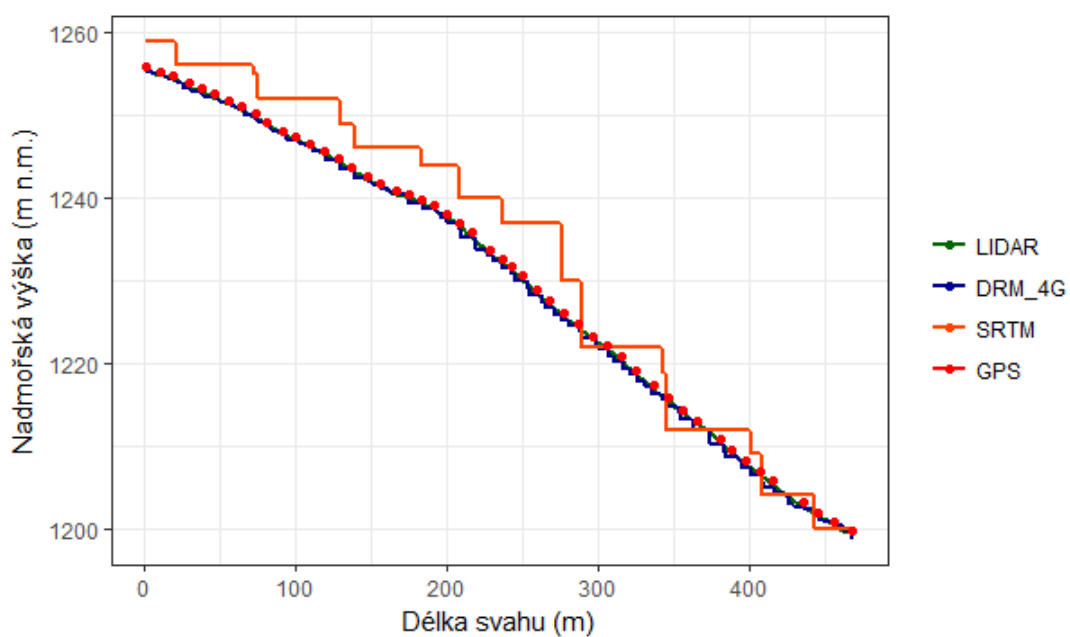


Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek P. 4

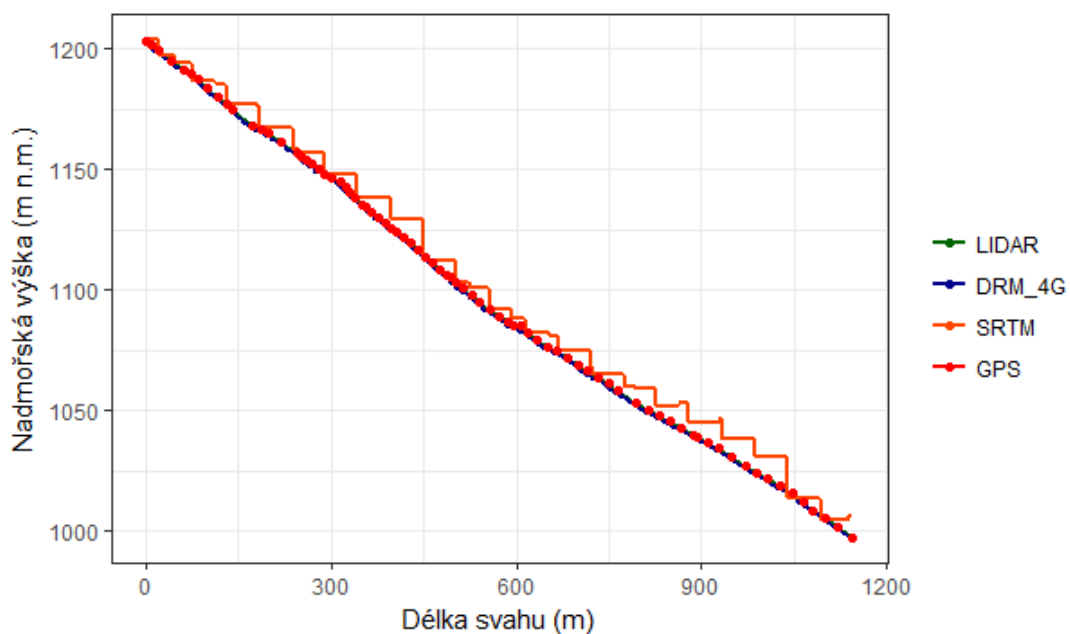


Příloha č. 9 Svahy bez vegetace – Výškové profily

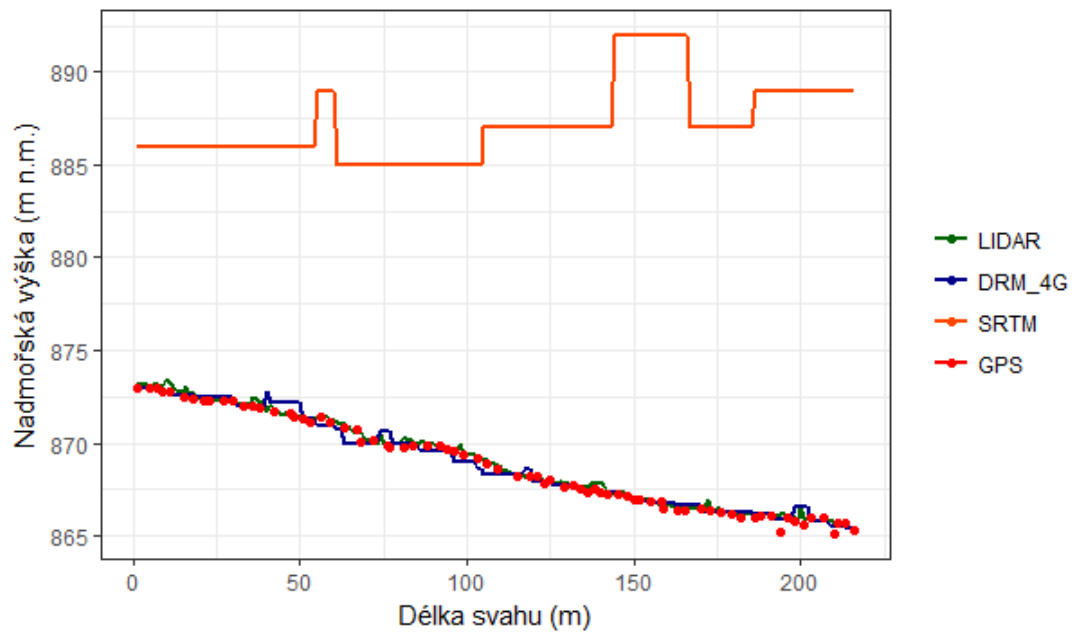
Lokalita č. 3 – Černá hora, úsek S. 1



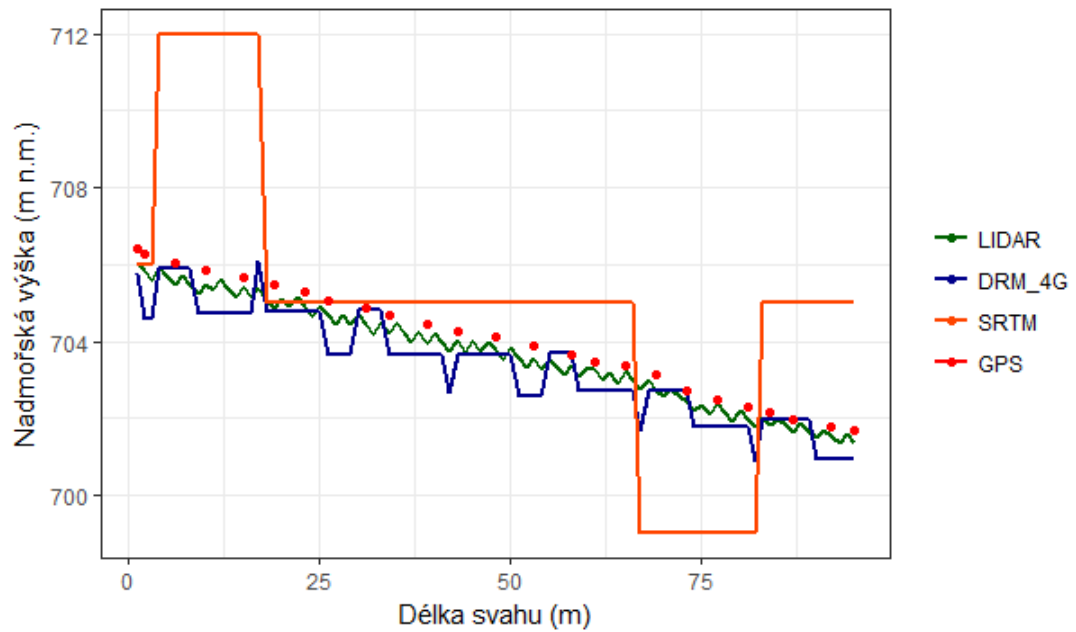
Lokalita č. 3 – Černá hora, úsek S. 2



Lokalita č. 4 – Benecko – Štěpanická Lhota, úsek S. 4

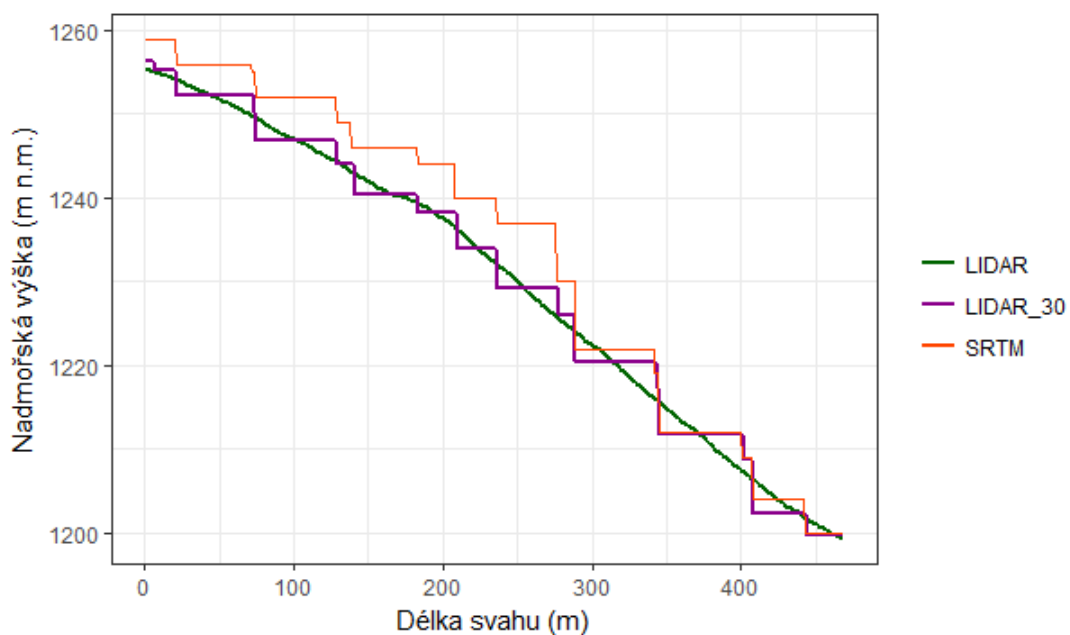


Lokalita č. 4 – Benecko – Štěpanická Lhota, úsek S. 5

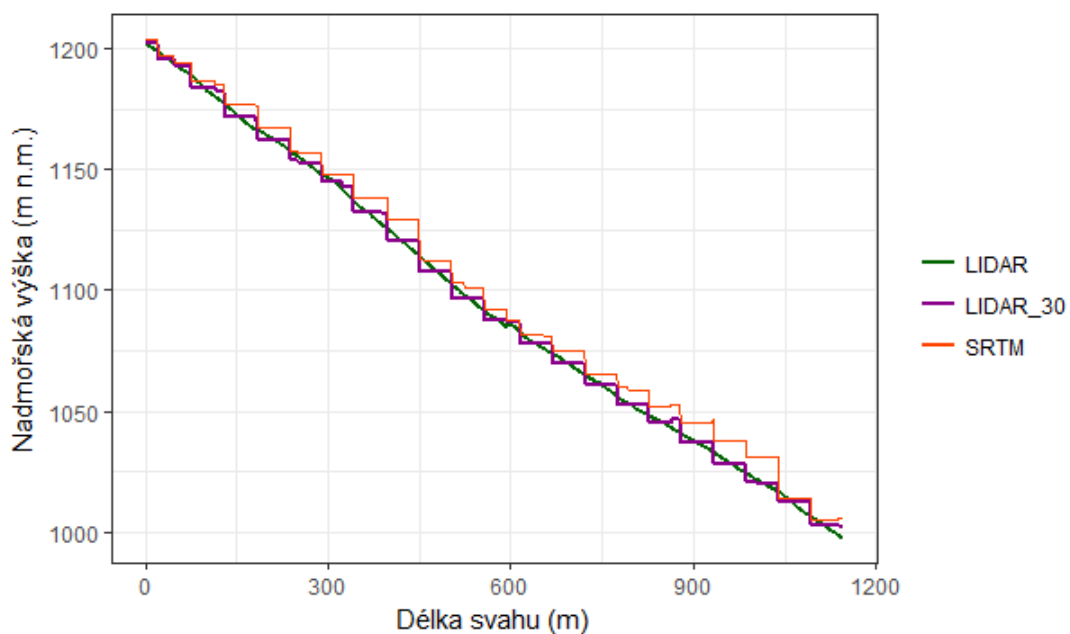


Příloha č. 10, Svahy bez vegetace – Výškové profily, Převzorkovaný LiDAR (1x1) na LiDAR (30x30)

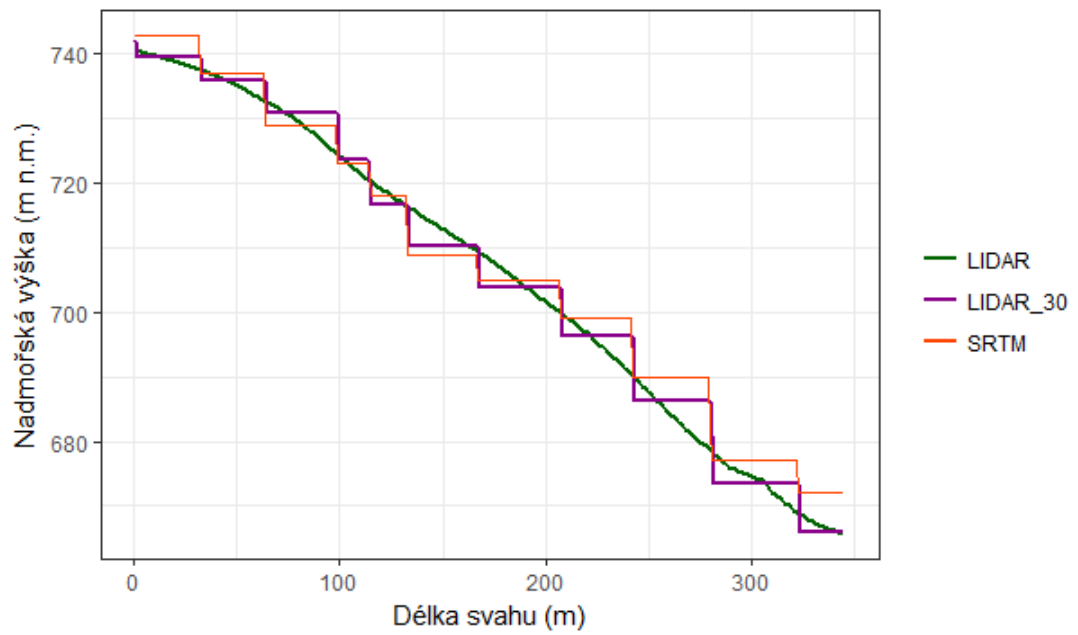
Lokalita č. 3 – Černá hora, úsek S. 1



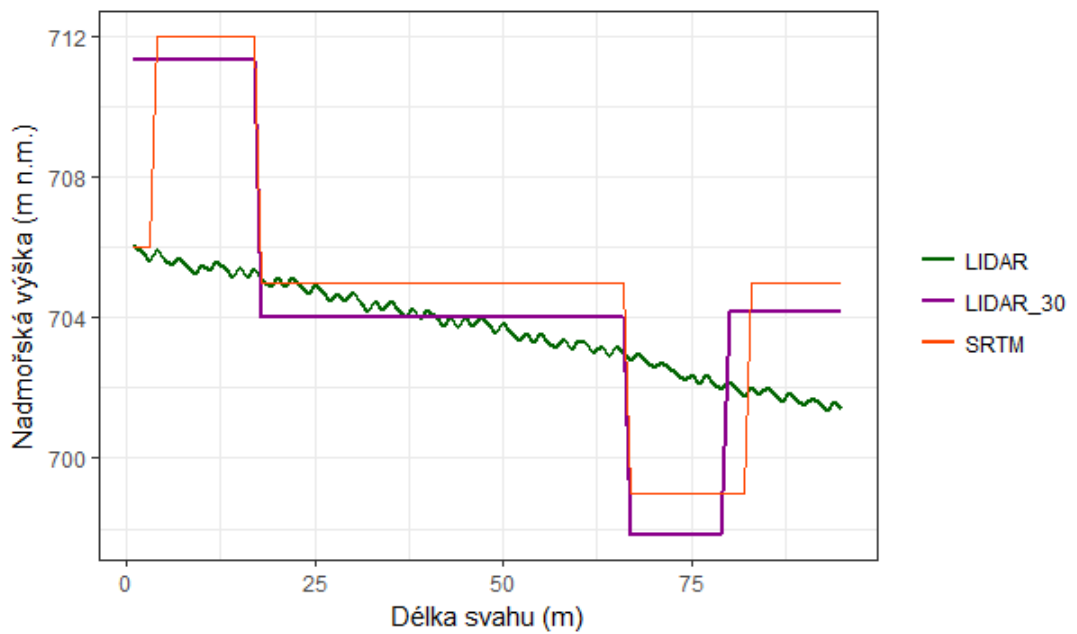
Lokalita č. 3 – Černá hora, úsek S. 2



Lokalita č. 4 – Benecko – Štěpanická Lhota, úsek S. 4

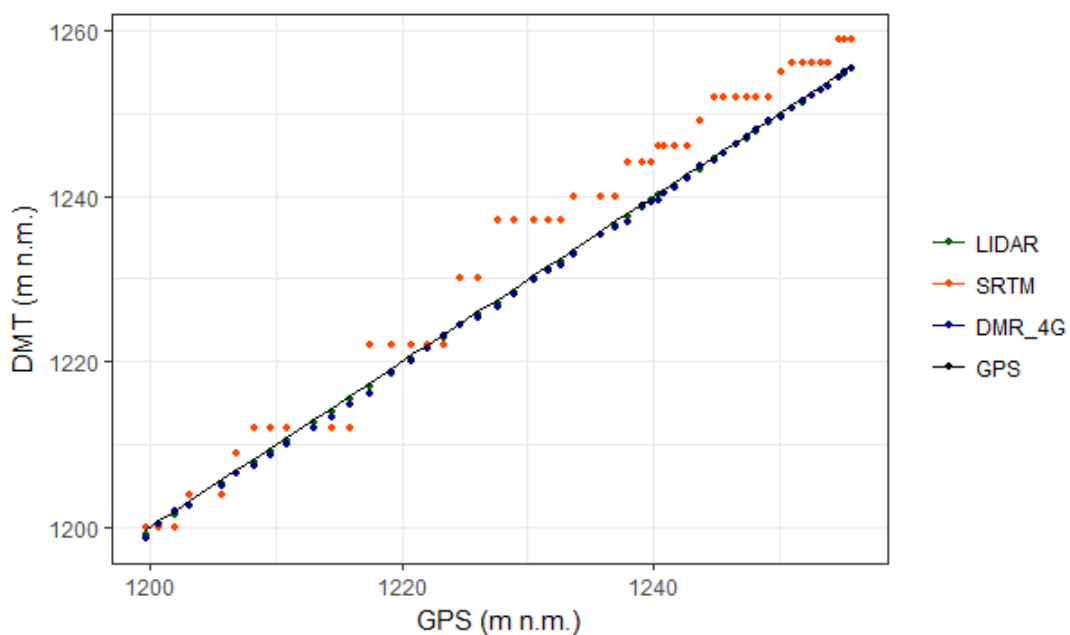


Lokalita č. 4 – Benecko – Štěpanická Lhota, úsek S. 5

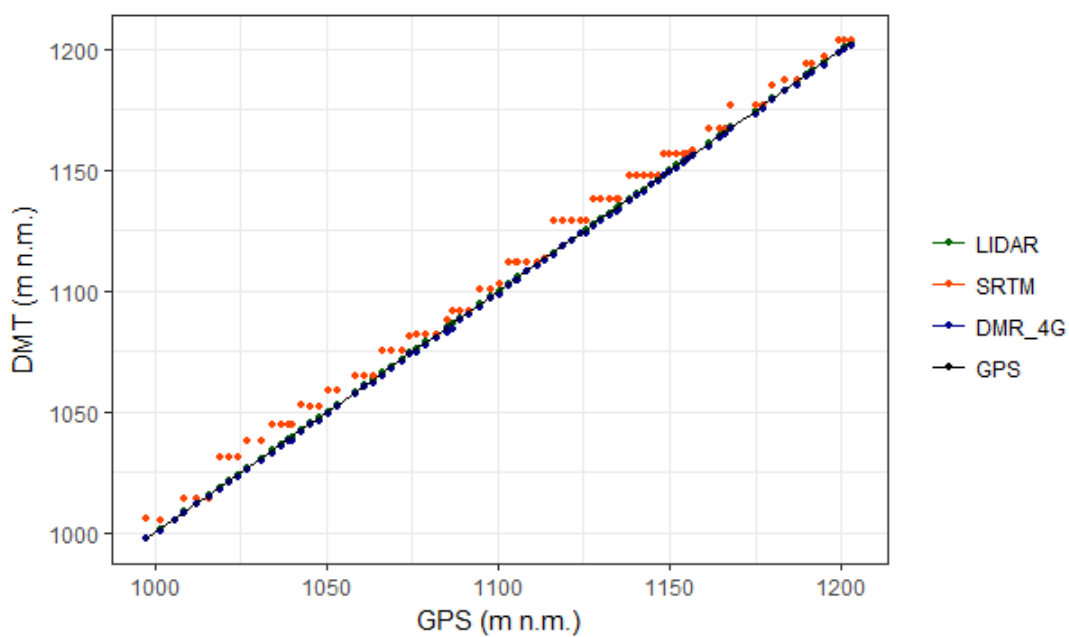


Příloha č. 11 Svahy bez vegetace – srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenčními hodnotami GPS

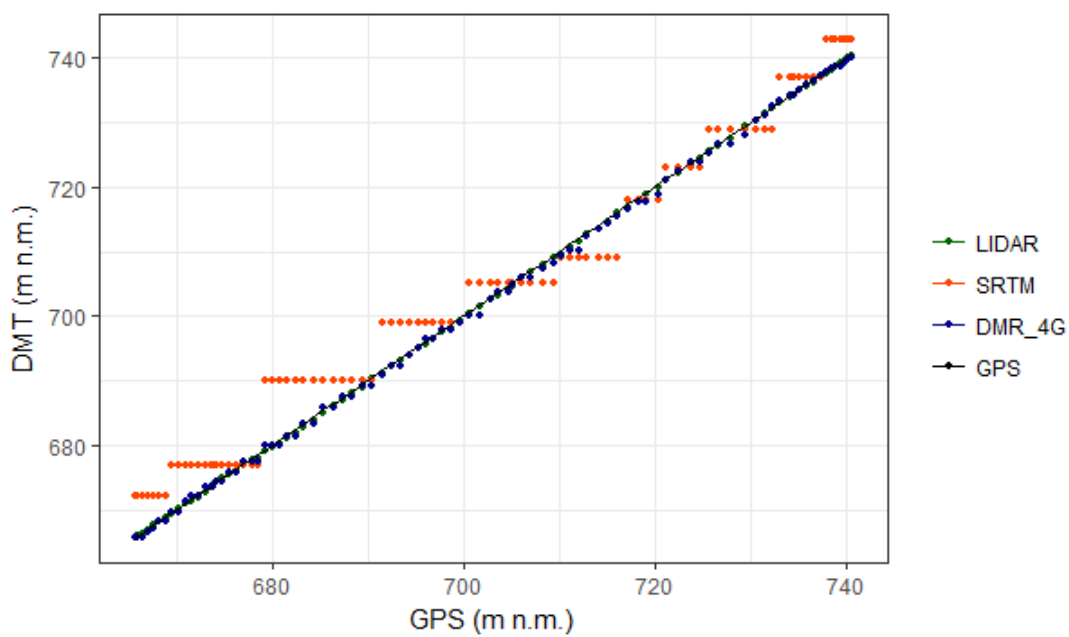
Lokalita č. 3 – Černá hora, úsek S. 1



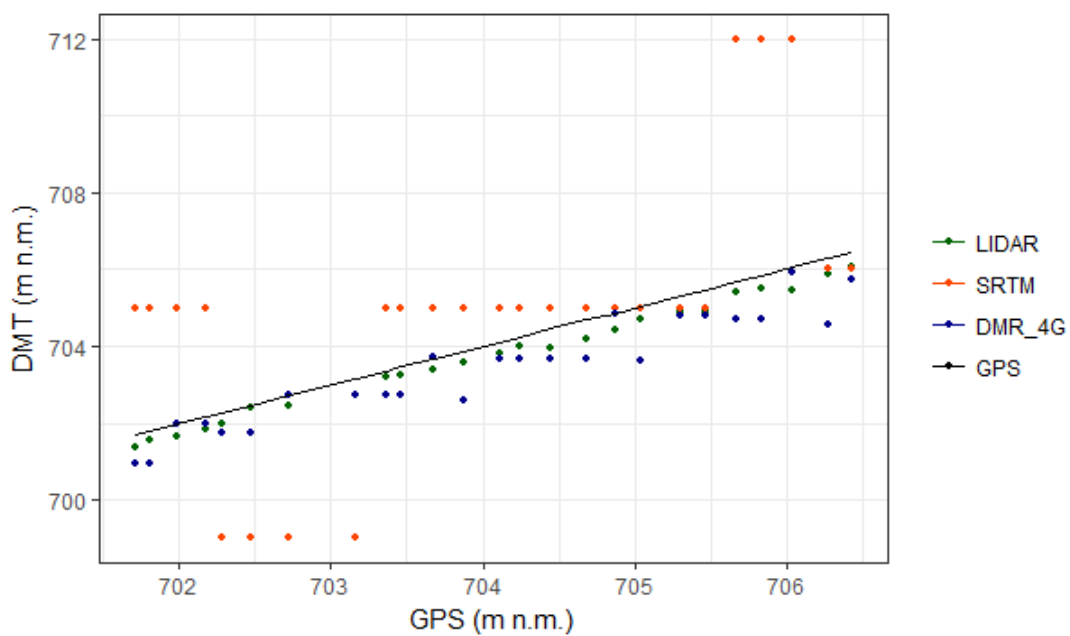
Lokalita č. 3 – Černá hora, úsek S. 2



Lokalita č. 4 – Benecko – Štěpanická Lhota, úsek S. 4

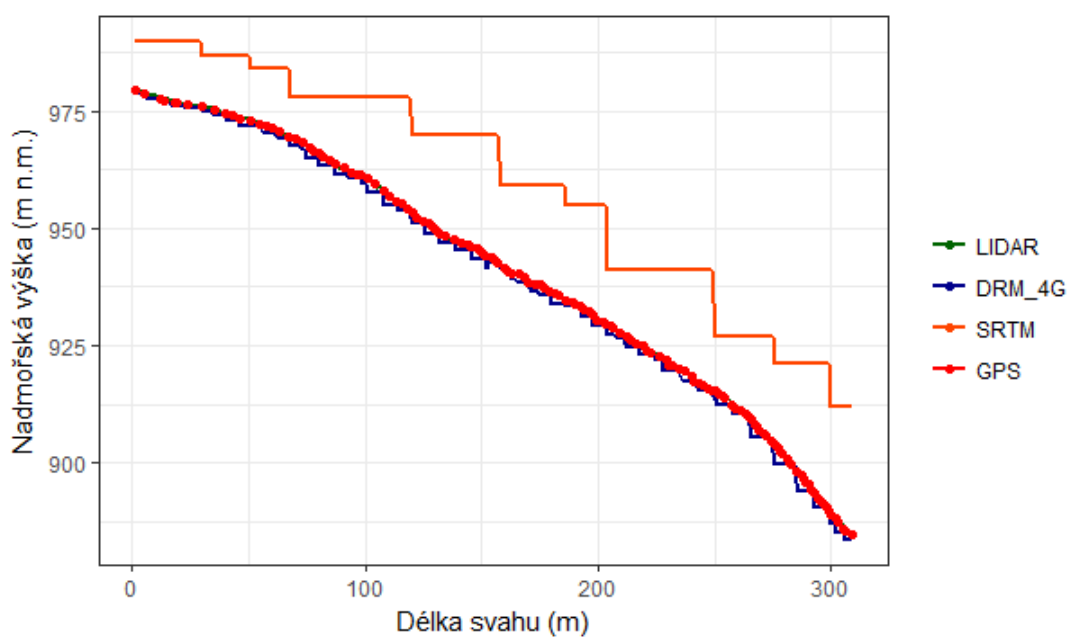


Lokalita č. 4 – Benecko – Štěpanická Lhota, úsek S. 5

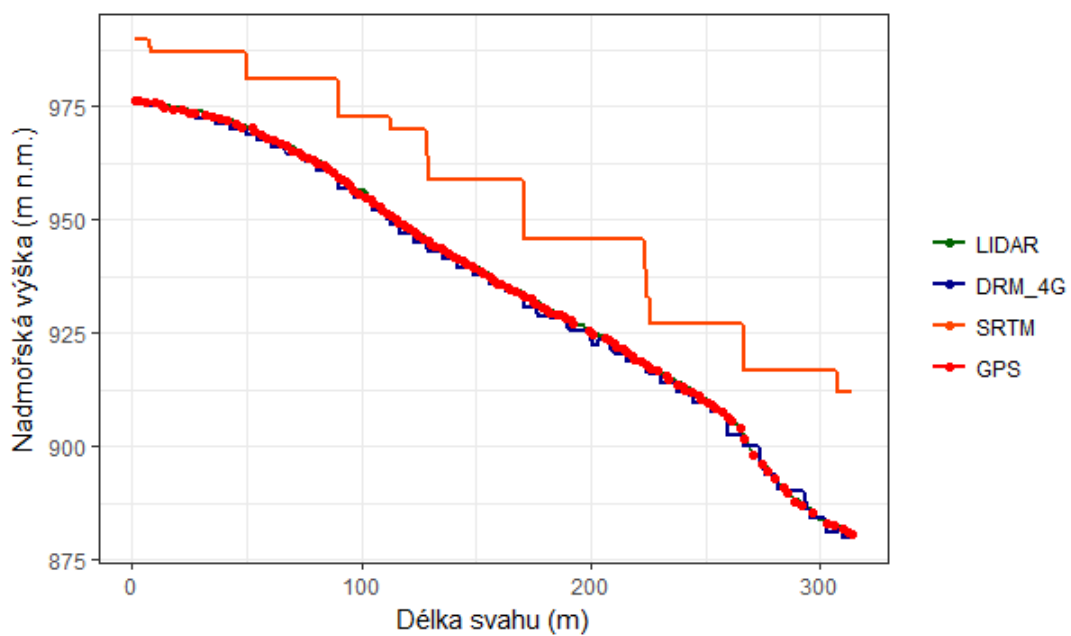


Příloha č. 12, Svahy s vegetací – Výškové profily

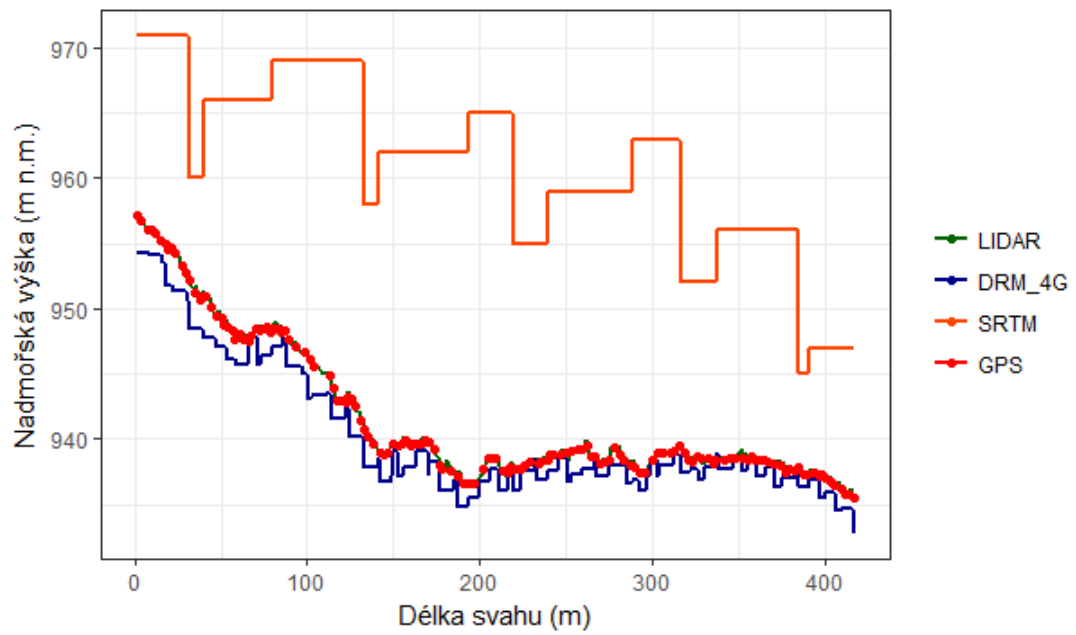
Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 7



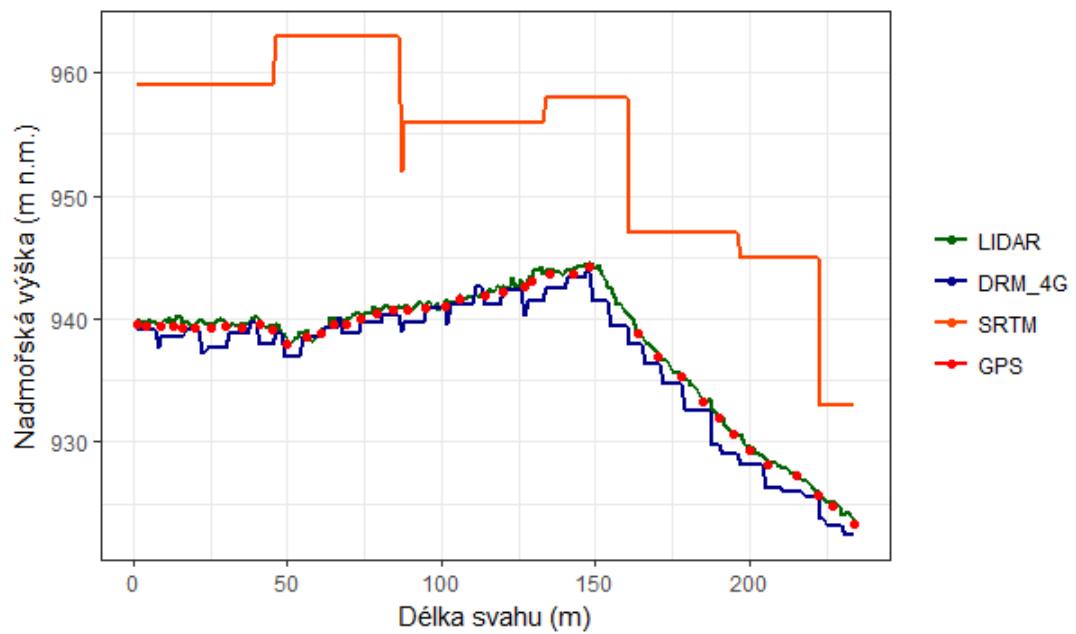
Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 8



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 9

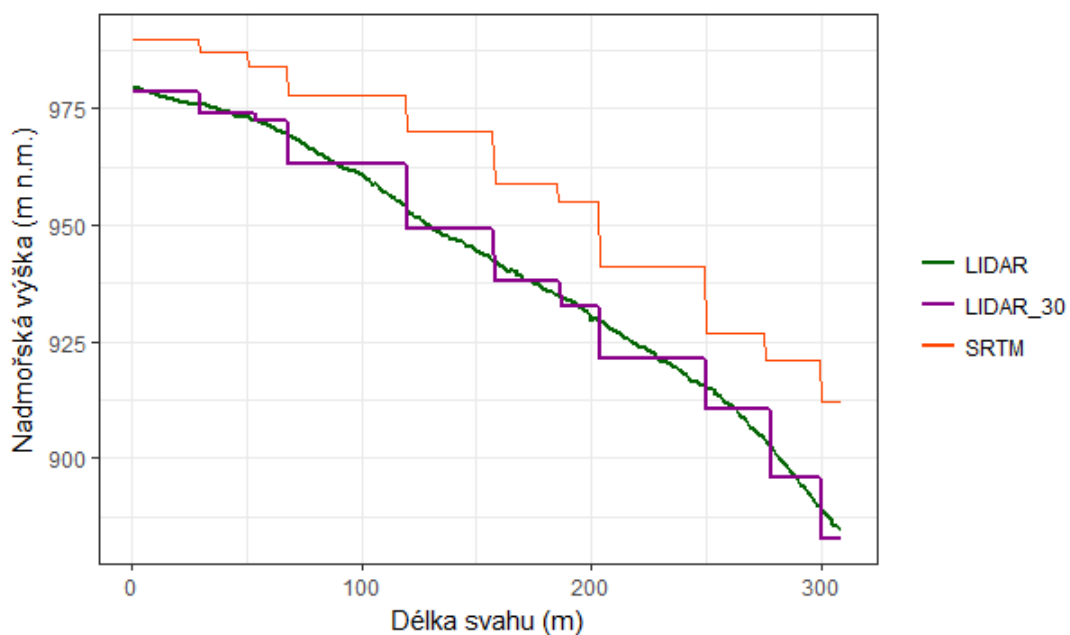


Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 10

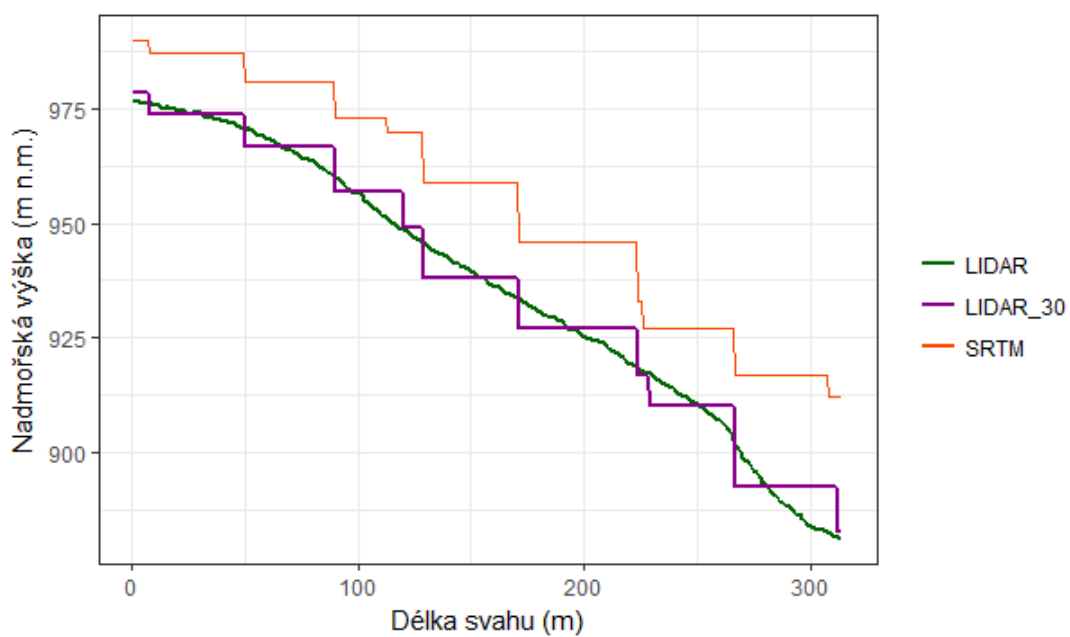


Příloha č. 13, Svahy s vegetací – Výškové profily, Převzorkovaný LiDAR (1x1) na LiDAR (30x30)

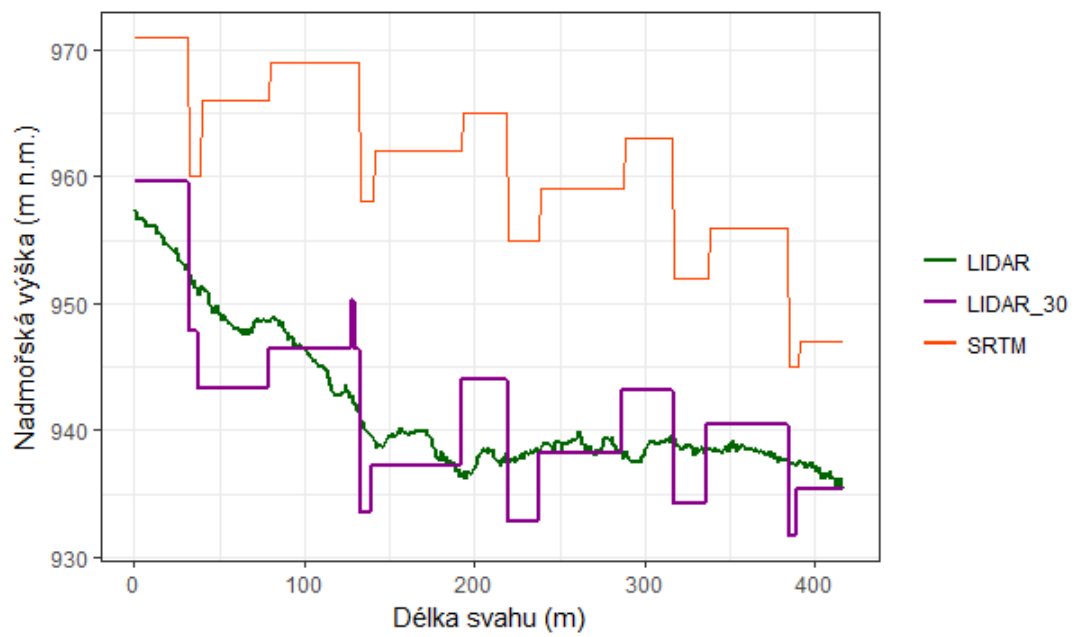
Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 7



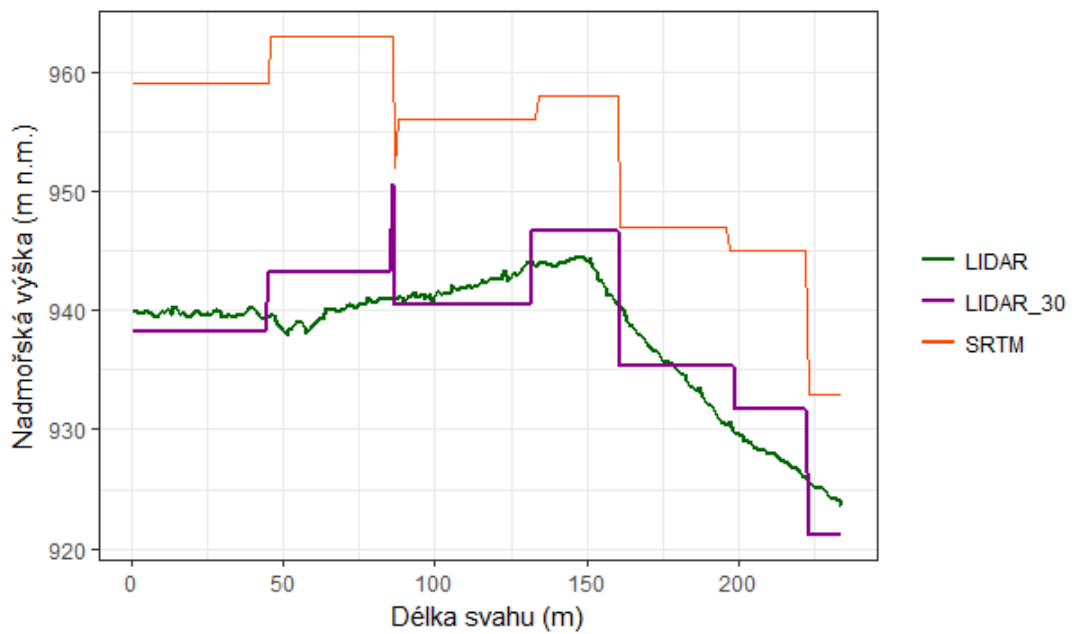
Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 8



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 9

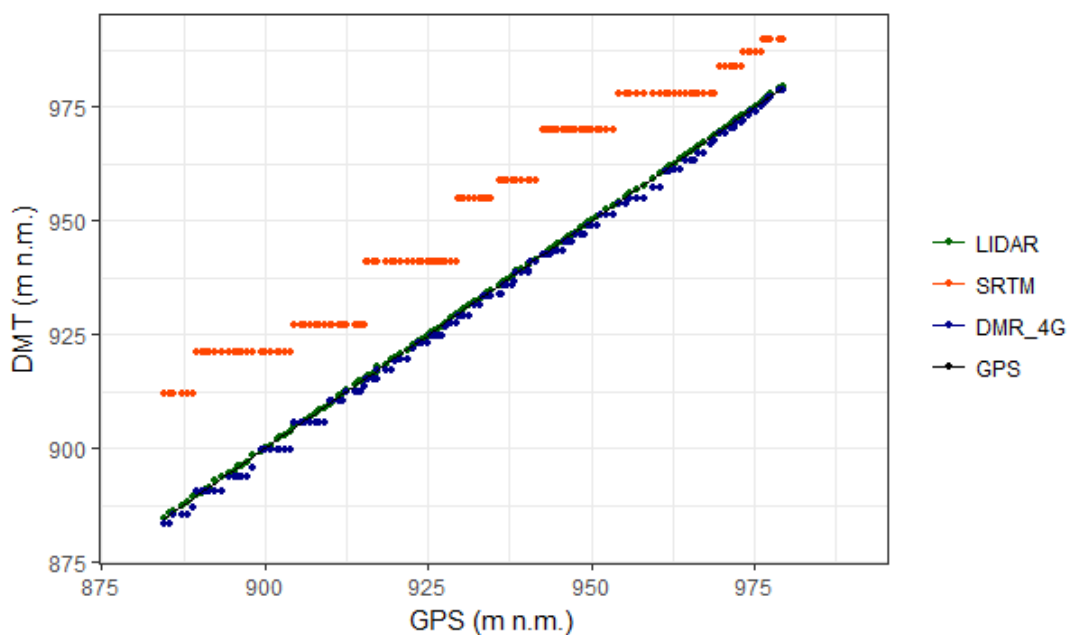


Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 10

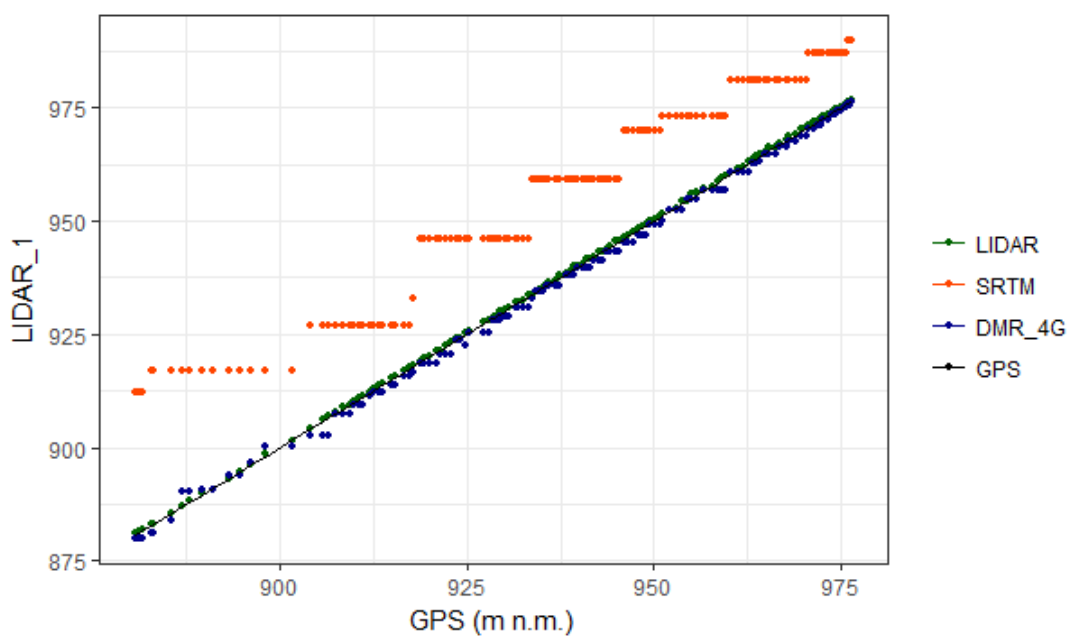


Příloha č. 14 Svahy s vegetací – srovnání vybraných nadmořských výšek DTM s referenčními hodnotami GPS

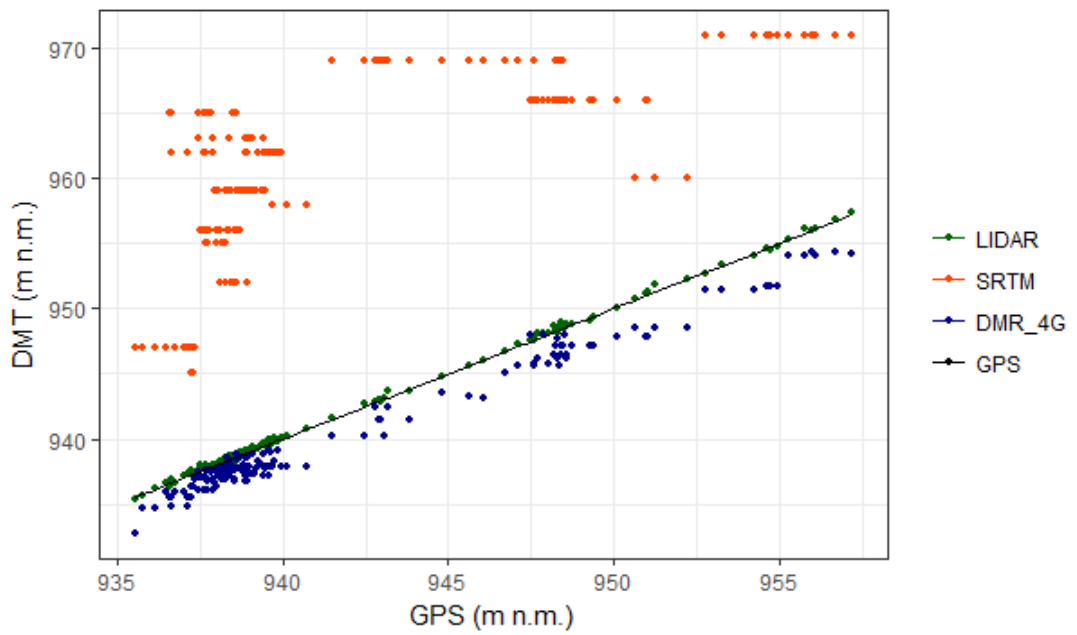
Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 7



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 8



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 9



Lokalita č. 2 – Malá Úpa, úsek S. 10

