

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

**Katedra aplikované geoinformatiky a územního  
plánování**



**Srovnání bodových mračen z laserového skenování  
a fotogrammetrie: terén a struktura vegetace**

**Diplomová práce**

**Autor práce: Bc. Jan Malý**

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

© 2018 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Malý

Krajinné inženýrství

Název práce

**Srovnání bodových mračen z laserového skenování a fotogrammetrie: terén a struktura vegetace**

Název anglicky

**Comparison of LiDAR and SfM point clouds: terrain and vegetation structure**

---

### Cíle práce

Cílem práce je posoudit za jakých okolností a pro jaké aplikace lze nahradit bodová mračna leteckého laserového skenování mračny získanými z fotogrammetrických metod. Formulace dílčích cílů je úkolem autora.

### Metodika

Bodová mračna z leteckého laserového skenování se v posledních dvou desetiletích pomalu stávají nedílnou součástí mnoha environmentálních analýz. Mezi rutinní operace patří klasifikace terénu a vegetace, ze kterých jsou následně odvozovány digitální modely terénu (DTM), modely výšky vegetace a různé vegetační charakteristiky. Nicméně pořizovací cena leteckého laserového skenování je poměrně vysoká. Z tohoto důvodu se v nedávné době začali objevovat studie, které zkoumají, zda a za jakých okolností lze laserové skenování nahradit bodovými mračny získanými fotogrammetrickými metodami. Ty jsou výrazně levnější, zejména pokud lze ke sběru dat využít kombinaci běžných fotoaparátů a bezpilotních leteckých prostředků. Úkolem autora je zpracovat literární rešerši na téma sběru dat leteckým laserovým skenováním a bezpilotními leteckými prostředky a jejich využití pro studium struktury vegetace a terénu. V praktické části se autor zaměří na srovnání bodových mračen z laserového skenování a fotogrammetrie.

**Doporučený rozsah práce**

40 – 60 stran

**Klíčová slova**

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

---

**Doporučené zdroje informací**

- Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259-276.
- Hawryło, P., Tompalski, P., & Wężyk, P. (2017). Area-based estimation of growing stock volume in Scots pine stands using ALS and airborne image-based point clouds. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 90(5), 686-696.
- Jensen, J. L., & Mathews, A. J. (2016). Assessment of image-based point cloud products to generate a bare earth surface and estimate canopy heights in a woodland ecosystem. *Remote Sensing*, 8(1), 50.
- Simpson, J. E., Smith, T. E., & Wooster, M. J. (2017). Assessment of Errors Caused by Forest Vegetation Structure in Airborne LiDAR-Derived DTMs. *Remote Sensing*, 9(11), 1101.
- Tomašík, J., Mokoš, M., Saloň, Š., Chudý, F., & Tunák, D. (2017). Accuracy of photogrammetric UAV-based point clouds under conditions of partially-open forest canopy. *Forests*, 8(5), 151.
- Wilkes, P., Jones, S. D., Suarez, L., Haywood, A., Mellor, A., Woodgate, W., ... & Skidmore, A. K. (2016). Using discrete-return airborne laser scanning to quantify number of canopy strata across diverse forest types. *Methods in ecology and evolution*, 7(6), 700-712.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2018/19 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 17. 3. 2018

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2018

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 12. 10. 2018

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Srovnání bodových mračen z laserového skenování a fotogrammetrie: terén a struktura vegetace" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedené v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 10.12.2018

\_\_\_\_\_

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za vedení práce a za projevenou ochotu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu po celou dobu studia.

# Srovnání bodových mračen z laserového skenování a fotogrammetrie: terén a struktura vegetace

## Abstrakt:

Letecké laserové skenování (LiDAR) se dlouhodobě používá k mapování zemského povrchu a data z něj slouží jako podklad k tvorbě digitálních elevačních modelů. Čím dál častěji se také používá v lesnictví pro odhad objemu dřevní hmoty, detekci korun jednotlivých stromů nebo určování jejich výšek. V posledních letech se jako alternativa používá fotogrammetrie získaná pomocí bezpilotních leteckých systémů (UAS), které mají výhodu nižší pořizovací ceny a vyšší dostupnosti. Problémem fotogrammetrie je ale sběr dat v hustých lesních porostech. Zatím co laser je schopen proniknout skrz koruny stromů a poskytnout tak najednou informace o struktuře nižších pater vegetace a terénu, u UAS není možné během jednoho náletu fotogrammetricky rekonstruovat prostor zastíněný uzavřenou plochou korun stromů. Při použití fotogrammetrie pro lesnické aplikace je tak obvykle nutný dodatečný zdroj modelu terénu (např. LiDAR). V opadavých porostech se nabízí možnost sběru dat pomocí UAS v různých ročních obdobích a jejich následná kombinace. Cílem práce je posoudit nahraditelnost dat leteckého laserového skenování daty získanými kombinací bodových mračen z fotogrammetrie pomocí UAS v době bez olistění (zima) a s olistěním (léto). Pro celé zájmové území byly z obou datových sad vytvořeny modely výšky vegetace v různých rozlišeních (10, 5, 2 a 1 m). Pro tři vybrané oblasti s rozdílnými vlastnostmi vegetace (dva druhy lesu, step) byly popsány vertikální profily bodových mračen a byly modelovány tři různé charakteristiky vertikální struktury vegetace (průměrná výška, maximální výška, směrodatná odchylka). Nejlepších výsledků bylo dosahováno na plochách s menším množstvím vysoké vegetace a s jejím přibýváním se objevovalo více chyb. Lepší shody bylo dosahováno u méně podrobných rozlišení a se zvyšující se podrobností se shoda zhoršovala. Nejlépe modelovanou charakteristikou byla maximální výška. Data získaná kombinací fotogrammetrie pomocí UAS ze dvou ročních období byla zhodnocena jako dostatečně kvalitní alternativou k LiDARu. Ideální použití pro modelování lesních metrik s předpokladem nejlepších výsledků je na území s rozvolněnou vegetací při rozlišení 10 m.

**Klíčová slova:** LiDAR, UAS, fotogrammetrie, model výšky vegetace

# **Comparison of LiDAR and SfM point clouds: terrain and vegetation structure**

## **Abstract:**

Airborne laser scanning (LiDAR) has been used to map the Earth's surface for a long time and data from this are used as a basis for the creation of digital elevation models. Increasingly, it is also used in forestry to estimate the volume of wood mass, to detect crowns of individual trees or to determine their heights. In recent years, photogrammetry obtained using unmanned aerial systems (UAS) has an advantage in terms of lower purchase prices and higher availability. The problem of photogrammetry is the collection of data in dense forest stands. While the laser is able to penetrate through tree crowns to provide information of the structure of lower vegetation and terrain at the same time, UAS can't reconstruct photogrammetrically a space shadowed by a closed area of tree crowns. When using photogrammetry for forestry applications, an additional source of terrain model (eg LiDAR) is usually needed. The deciduous stands offer the possibility to collect data using UAS at different seasons and their subsequent combination. The aim of the thesis is to evaluate the replaceability of airborne laser scanning data with photogrammetry data obtained by unmanned aircraft in leaf off season (winter) and in leaf on season (summer). For the whole area of interest, canopy height models in different resolutions were created and for three selected areas with different vegetation properties (two types of forest, steppe), vertical profiles of point clouds were described and three different characteristics of the vertical vegetation structure were modelled (average height, maximum height, standard deviation). The best results were achieved on areas with a low amount of high vegetation and with the increase there were more mistakes. Better match was achieved with less detailed resolution and worsening details with consistency. The best modeled feature was the maximum height. The data obtained by a combination of photogrammetry using UAS from two seasons was evaluated as a sufficiently good alternative to LiDAR. The ideal use for modeling forest metrics with the assumption of the best results is in the area with vegetation loose at a resolution of 10 m.

**Keywords:** LiDAR, UAS, photogrammetry, canopy height model

# Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce .....	11
3	Literární rešerše.....	11
3.1	Digitální elevační model .....	11
3.2	Model výšky vegetace .....	13
3.3	Letecké laserové skenování.....	13
3.4	Bezpilotní letouny .....	16
3.5	Structure from Motion.....	18
3.6	Nahraditelnost LiDARu fotogrammetrií s využitím UAS .....	19
3.7	Získávání dat pod korunami stromů.....	21
3.7.1	Kombinace s LiDARem.....	21
3.7.2	Opakované nálety bezpilotních letounů.....	21
3.7.3	Pozemní skenování.....	21
3.7.4	Georeference bodového mračna.....	22
3.8	Potenciál UAS pro modelování lesních porostů.....	22
4	Metodika .....	22
4.1	Charakteristika zájmového území .....	22
4.2	Sběr dat.....	23
4.2.1	LiDAR.....	23
4.2.2	UAS.....	24
4.3	Klasifikace bodových mračen .....	25
4.4	Charakteristiky vertikální struktury vegetace.....	26
4.5	Tvorba modelu výšky vegetace .....	26
4.6	Validace výsledků .....	27
5	Výsledky .....	27
5.1	Výškové profily.....	27



5.2	Charakteristiky vegetace .....	28
5.2.1	Průměrná výška .....	28
5.2.2	Maximální výška .....	31
5.2.3	Směrodatná odchylka .....	31
5.3	Model výšky vegetace .....	31
6	Diskuze.....	34
7	Závěr .....	36
8	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	38
9	Přílohy .....	46

# 1 Úvod

Metody dálkového průzkumu Země jsou nedílnou součástí velkého množství úkonů v mnoha odvětvích lidské činnosti. Se zdokonalováním technologií se objevilo laserové skenování LiDAR (Wehr a Lohr 1999), díky kterému je možné nasnímat objekty s jejich trojrozměrnými vlastnostmi a spojením laserového skenování s letectvím vznikl skvělý nástroj k podrobnému modelování zemského povrchu v nejpřesnějších souvislostech a k tvorbě digitálních elevačních modelů (DEM). Letecké laserové skenování se dnes používá už dlouhodobě a data z něj jsou uznávána jako kvalitně reprezentující zemský povrch. Ačkoli jsou taková data stále dostupnější, někdy dokonce zdarma v rámci služeb vládních agentur, v mnoha zemích stále chybí a jejich širší využití také omezují vysoké pořizovací náklady. V posledních letech došlo k výraznému rozšíření leteckých technologií mezi veřejný sektor a začali se objevovat malé bezpilotní letouny, které mají výhodu nízké ceny a snadného ovládání (Colomina et Molina 2014). Letecké výzkumy se tak více přiblížili obyčejným lidem a menším firmám, které brzy začali bezpilotní letouny používat pro fotogrammetrii, později zpracovávanou metodou ‘Structure from Motion‘ (Lowe 1999) do formátu podobnému LiDARovým datům. O bezpilotních letounech s využitím fotogrammetrie se tak začalo brzy uvažovat jako o levné a jednoduché náhradě tradičního leteckého skenování hlavně na menších plochách, kde jsou schopny dosáhnout velmi podrobných výsledků (Johnson et al. 2014). Letecké skenování se také čím dál častěji používá pro mapování zalesněných oblastí a k odvození dendrometrických proměnných, které mohou pomoci při inventarizaci lesů nebo jiných úkonech v lesnictví (Zhen et al. 2016). Pro operace v lesních prostředích je třeba mít kvalitně naskenovaná data popisující terén, který je většinou zastíněn korunami stromů. LiDAR má v takových prostředí značnou výhodu, protože má schopnost proniknout skrz koruny stromů a nasnímat tak strukturu nižších pater vegetace a terénu během jednoho letu. Fotogrammetrie naopak vždy zaznamená pouze svrchní viditelnou plochu, u lesních prostředí tedy plochu korun stromů, a terén zůstane většinou nenasnímán. Na plochách s rozvolněnými porosty, na kterých je relativně hodně viditelného povrchu dosahuje fotogrammetrie s využitím UAS ještě velmi dobrých výsledků (Tomašík et al. 2017). Pokud je ale třeba získat data pod hustými korunami stromů, musí být získána jiným způsobem, například pomocí LiDARu (Ullah et al. 2015) nebo pozemního skenování (Mikita et al. 2016). V případě opadavých lesů je slibnou a zatím

málo prozkoumanou možností alternativního získávání dat kombinace více náletů bezpilotních letounů (Dandois et Ellis 2013). Nálety je možné provést v období s maximálním a minimálním olistěním a získat tak data popisující kompletní vertikální strukturu vegetace. Bepilotní letouny by tak mohly být skvělým nástrojem pro mapování lesních metrik hlavně díky krátkému pořizovacímu času a možnosti nálety opakovat v kratších časových intervalech a zajistit tak velmi aktuální data. Proto je potřeba posoudit, zda data získaná kombinací dvou náletů bezpilotními letouny představují dostatečně kvalitní alternativu k LiDARu i na obtížně snímatelných plochách jako jsou právě lesy a jak kvalitně se s jejich pomocí dají modelovat lesní metriky.

## **2 Cíle práce**

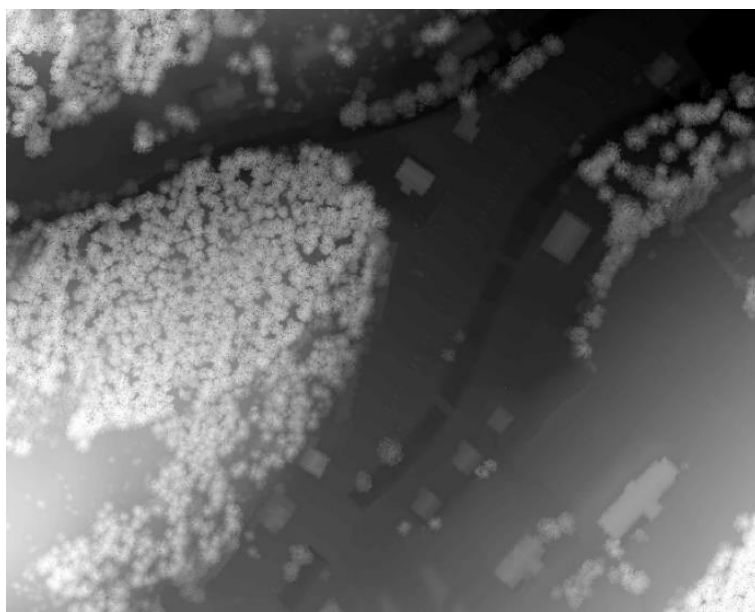
Cílem práce je zjistit nahraditelnost dat leteckého laserového skenování daty získanými kombinací fotogrammetrických náletů pomocí bezpilotních letounů ze dvou ročních období (léto, zima) pro zkoumání charakteristik vegetace. Mezi dílčí cíle patří: (I) nalezení vhodného nastavení pro kombinaci fotogrammetrických bodových mračen; (II) klasifikace bodových mračen; (III) porovnání vertikální profilů bodových mračen; (IV) porovnání vertikálních charakteristik vegetace (maximální výška, průměrná výška, směrodatná odchylka); (V) sestavení skriptu pro tvorbu modelů výšky vegetace a jejich porovnání; (VI) zjištění vlivu rozlišení na výsledky.

## **3 Literární rešerše**

### **3.1 Digitální elevační model**

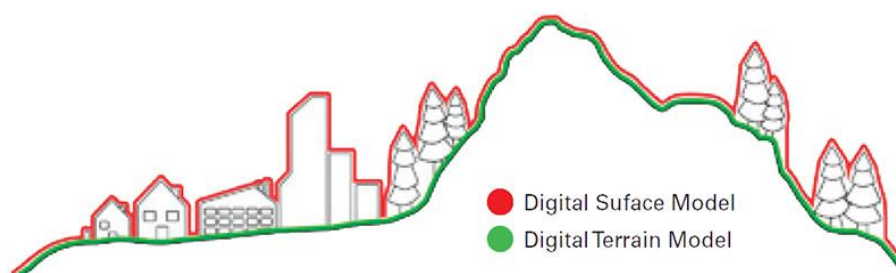
Souvislý zemský povrch je nejnějněji reprezentován digitálním elevačním modelem (DEM), který umožňuje podrobnou vizualizaci topografických prvků pro účely environmentálního modelování. Podkladem pro tvorbu DEM bývají obvykle vektorové bodové datové sady s informacemi o poloze a nadmořské výšce, v současnosti často získávané z leteckého laserového skenování. Model může být zobrazen pomocí vektorových vrstevnic, jako nepravidelná triangulační síť (TIN), ale nejčastěji bývá zobrazován jako rastr. To je dvojrozměrné zobrazení plochy rozdělené na pravidelnou čtvercovou síť buněk s předem definovanou velikostí (*Obr. 1*). Každé buňce je přidělena hodnota nadmořské výšky na základě bodových dat nacházejících

se na ploše jejího půdorysu. Při existenci více dat na ploše buňky dochází k průměrování jejich hodnot, při absenci dat je hodnota interpolována z okolních buněk (Wood 1996). Jde vlastně o umělé zpřesnění prostoru mezi body datového souboru, které nahradí konečný počet pozorovaných bodů na potenciálně nekonečný počet. Přesnost výsledného modelu určuje především rozlišení neboli velikost rastrové buňky (Goodchild 2011).



*Obr. 1 Ukázka rastrového DEM (vlastní)*

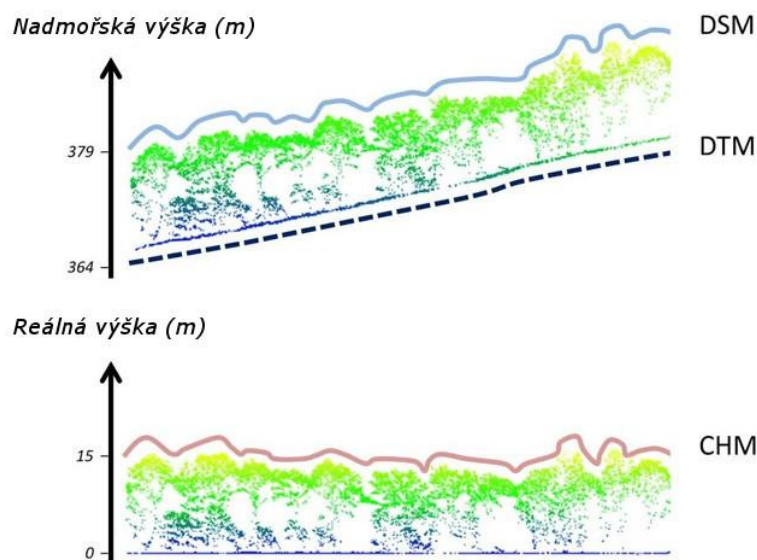
V praxi se používají dva další termíny pro DEM, a to digitální model terénu (digital terrain model - DTM) a digitální model povrchu (digital surface model - DSM). Zatímco DTM je model pouze terénu bez budov a vegetace, DSM zobrazuje vše nacházející se na povrchu (Obr. 2). Přitom oba patří do skupiny DEM a často se místo DTM používá jen DEM (Wood 1996).



*Obr. 2 Rozdíl mezi DSM a DTM (Geoimage 2017)*

### 3.2 Model výšky vegetace

Speciálním druhem digitálního modelu je model výšky vegetace (canopy high model – CHM). Ten nenabývá hodnot nadmořské výšky, ale popisuje reálnou výšku vegetace, jde tedy o výškový rozdíl mezi terénem a vrcholy vegetace v metrech. Model udává informace pouze o výšce vegetace bez zahrnutí výšky terénu, který je tedy zobrazován jako rovná plocha s nulovou výškou. (Obr. 3). CHM je vlastně rozdíl mezi DTM a DSM, ale může být generován přímo z dat leteckého skenování jako ostatní digitální modely (Ullah et al. 2015). Pro jeho tvorbu se používají složitější výpočetní metody, které zajistí kvalitní model bez datových děr v korunách stromů, které by ovlivňovali následné analýzy a koruny stromů zobrazují jako souvislý povrch (Khosravipour et al. 2014). CHM poskytuje užitečné informace pro aplikace v lesnictví a dá se použít jako nástroj pro provádění široké škály mapovacích a prostorových analýz. Příkladem může být detekce korun jednotlivých stromů (Zhen et al. 2016), určení jejich výšek (Panagiotidis et al. 2017) nebo biomasy lesních porostů (Hunter et al. 2013).

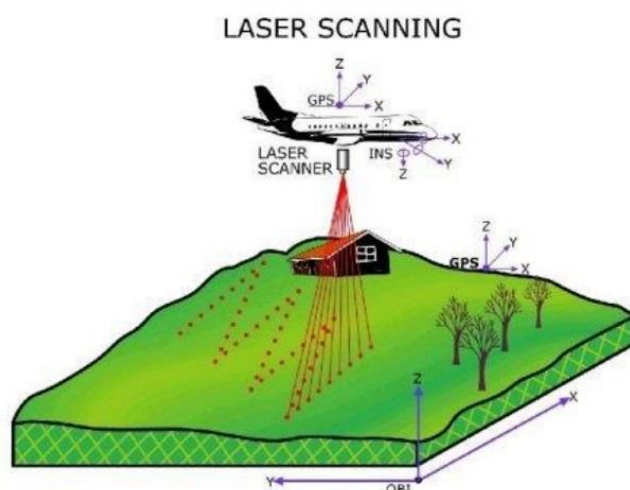


Obr. 3 Rozdíl mezi digitálními modely. Nahoře DSM a DTM v hodnotách nadmořské výšky, dole CHM v hodnotách reálné výšky (Michez 2016)

### 3.3 Letecké laserové skenování

Jednou z možných metod, jak získat data pro digitální elevační modely je letecké laserové skenování LiDAR neboli Light Detection and Ranging. Jak název napovídá, jedná se o techniku určování vzdálenosti pomocí světelného záření. Skenování může

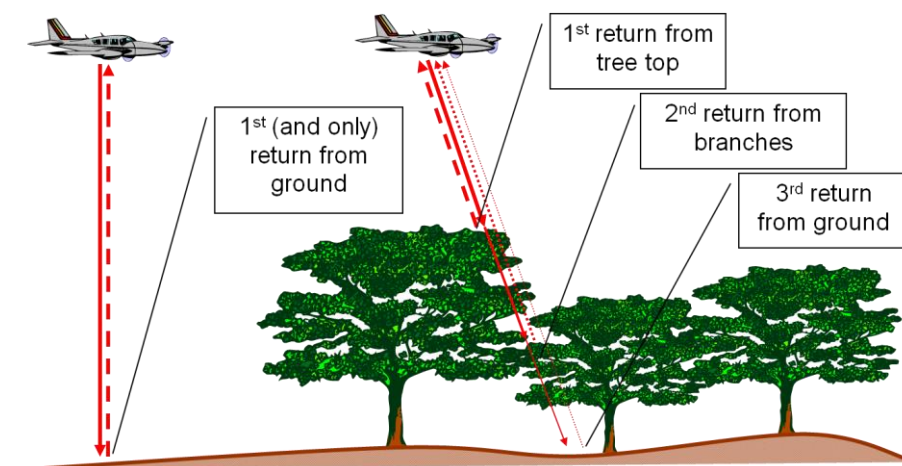
být prováděno z pozemní stanice, ze satelitu, ale nejčastěji se k němu používají právě letadla. Emitor vysílá řadu laserových paprsků, které se odráží od snímaného povrchu a vrací se zpátky stejným směrem, kde jsou přijímány detektorem (Obr. 4). Z času návratu paprsku lze určit vzdálenost letadla od měřeného objektu a ze znalosti směru vyslaného svazku paprsků a odvozené vzdálenosti lze určit polohu každého měřeného bodu. Letadla jsou také vybavena přijímačem GPS, který lokalizuje jejich polohu, a inerciální měřicí jednotkou (IMU), která zaznamenává pohyb letadla během letu. Ta obsahuje záznam o stoupání, otáčení a další informace, které v kombinaci s GPS určí přesnou polohu snímače a tím i jednotlivých bodů v daném okamžiku. Obvykle se využívá spektra v rozmezí 1064 a 1540 nm, pro batymetrická měření (měření hloubky moře) přibližně 530 nm (Wehr et Lohr 1999).



Obr. 4 Letecké skenování (Hippenstiel et Brownson 2012)

Vysílané paprsky se směrem k povrchu postupně rozšiřují a dopadají na povrch jako kruhová plocha. Při výšce letu 500 m nad terénem tak dosahuje průměr laserové stopy na zemském povrchu přibližně 30 cm a z jednoho paprsku je tak možné získat několik odrazů od různých objektů. První odraz představuje vždy první překážku a pokud je dostatečně velká, respektive jedná-li se o spojitý povrch, je zaznamenán celou plochou laserové stopy a je tak jediným odrazem (Obr. 5). Představují ho zpravidla střechy domů, koruny stromů nebo nezastíněný terén. Pokud poměrná plocha laserové stopy pronikne skrz první překážku, například prostorem mezi jednotlivými listy, je následně odražena od dalšího povrchu a stane se druhým odrazem. To se děje zpravidla u vegetace a druhý odraz většinou představuje spodní vrstvy korun stromů, větve nebo kmeny. Celý proces se opakuje do té doby, než se veškerá zbylá plocha laserové stopy

odrazí od poslední plochy. Tou bývá většinou země, ale není to pravidlem a může jím být stejně tak střední vegetace nebo jiná překážka. Každý bod potom obsahuje informaci, kolikrátý odraz ho představuje, která se dá využít při pozdější klasifikaci. (Hippenstiel et Brownson 2012).



Obr. 5 Ukázka různých typů odrazů. Vlevo jediný odraz od terénu, vpravo několik odrazů, vždy od jiného objektu (Universitaat Gent 2018).

U získaných dat jsou následně provedeny ještě atmosférické a radiometrické korekce. Získaná data potom vytvoří vektorové „mračno bodů“, které reprezentuje povrch měřeného území (Obr. 6).



Obr. 6 Příklad LiDARového mračna bodů (vlastní).

Primární data se zpracovávají pomocí automatizovaných funkcí. Metody se rozdělují na filtraci, která vyhledá pouze body ležící na jednom druhu povrchu (zpravidla terénu) a odstraní nežádoucí body a chyby, a na klasifikaci, která postupně všechny

body rozdělí do předdefinovaných tříd (vegetace, střechy budov atd..). K tomu slouží automatizované programy a aplikace, popřípadě je možná i ruční klasifikace. Přesnost měření se liší na základě specifikace metody, letových podmínek, a povrchu měřeného území (Wehr et Lohr 1999).

Výhodou LiDARu je velká plocha pokrytí a schopnost pořídít během jednoho letu data z celého vertikálního profilu včetně DTM. Nevýhodou je pak relativně vysoká pořizovací cena a náročné zpracování dat. Laserové skenování se používá dlouhodobě a stále nachází uplatnění v nových odvětvích. Původně bylo používáno pro detekci znečištění atmosféry (Rairoux et al. 2000), následně si našla cestu k mapování topografie (Mallet et Bretar 2009), archeologii (Fernández-Lozano et al. 2015) nebo lesnictví (Zhen et al. 2016) a v současné době zažívá rozvoj v oblasti bezpilotních automobilů (De Silva et al. 2018).

### **3.4 Bezpilotní letouny**

Alternativou získávání dat pro digitální elevační modely je fotogrammetrie s využitím bezpilotních letounů (UAV - unmanaged aerial vehicles). To jsou malá letadla bez pilota na palubě, které mohou být fyzicky řízena na dálku, létat samostatně pomocí naprogramovaných letových plánů nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů. Za UAV se považují všechna bezpilotní letadla s výjimkou modelů letadel s maximální vzletovou hmotností nepřesahující 20 kg. Jsou většinou součástí bezpilotního leteckého systému (UAS - unmanaged serial system), který se skládá ze samotného letounu, řídicí stanice a jakéhokoliv dalšího prvku nezbytného k umožnění letu, jako je komunikační spojení nebo zařízení pro vypuštění a návrat (Letecký zákon). Letouny se musí pohybovat v dohledu řídicí stanice, kterou může představovat přenosný počítač, tablet nebo dokonce chytrý telefon s příslušným softwarem potřebným k plánování a sledování mise (Canis 2015). První jednoduché bezpilotní letouny se používaly už na začátku minulého století a k jejich zdokonalování docházelo zejména v armádě, kde se používaly k průzkumným i útočným letům. Na přelomu 20. a 21. století se začaly bezpilotní letouny stále více objevovat v soukromém sektoru, a to hlavně díky miniaturizaci technologií a snížení ceny (Colomina et Molina 2014).

Bezpilotní letouny se mohou dělit podle různých kritérií, například podle typu motoru, konstrukce, velikosti nebo cenové kategorie. Nejčastějšími typy jsou kluzáky nebo



malé modely letadel a v poslední době nejrozšířenější multikoptéry, které si rychle zajistili monopol v hobby a sportovním létání (Obr. 7). Hlavní výhodou kluzáků je jednoduché ovládání, výhodou multikoptér je přesné přistání na velmi malé ploše (Fahlstrom et Gleason 2012). V komerčním sektoru se nejčastěji používají malé letouny poháněné elektromotory, které na jedno nabití vydrží letět až 20 minut rychlostí přibližně 20 m/s (Haala et al. 2013). Hlavní výhodou malých bezpilotních letounů je jejich relativně nízká cena a schopnost pořizovat data s vysokým prostorovým a časovým rozlišením. Nevýhodou je krátká doba letu a tím pádem pokrytí relativně malé plochy (Laliberte et al. 2010). Malá, většinou několikakilová hmotnost, také limituje UAS během větrného počasí, které má mnohem větší vliv na stabilitu letounu během letu oproti velkým letadlům a helikoptérám používaných u laserového skenování. (Haala et al. 2013). Lety UAS jsou v ČR omezeny několika předpisy podle Doplnku X leteckého zákona (Letecký zákon). Důraz je kladen na bezpečnost, odpovědnost pilota, evidenci letounu a regulaci prostorů k létání. V neposlední řadě se často řeší otázka ochrany soukromí a pro každý komerční let musí také provozovatel získat povolení od Úřadu civilního letectví.



Obr. 7 Nejpoužívanější druhy UAS, vlevo kluzák, vpravo kvadrokoptéra (Geavis 2016)

Pro účely fotogrammetrie a leteckého skenování jsou nezbytnou součástí UAS záznamová zařízení. Nejčastěji se používají klasické fotoaparáty a kamery a ze získaných fotografií je možné následným zpracováním ve specializovaných programech získat prostorová data. Kvalitní fotoaparáty jsou dodávány jako součást komerčních UAV nebo je možné k jakémukoli letounu přidat posléze vlastní (Canis 2015). Vysoce kvalitní a drahé fotoaparáty nejsou nezbytnou podmínkou, a i s obyčejnějším přístrojem je možné získat dostatečně kvalitní data (Haala et al. 2013). Je možné využít celou řadu digitálních fotoaparátů, včetně digitálních zrcadlovek,

kompaktních digitálních fotoaparátů, dokonce i chytrých telefonů. Obecně však budou kvalitnější data dosaženy s dražšími fotoaparáty, které obsahují čočky s vyšší optickou kvalitou. UAV mohou také nést infračervené nebo hyperspektrální kamery, dokonce i LiDARové senzory (Jozkow et al. 2016), u těch ale výrazně narůstá cena (Honkavaara et al. 2014).

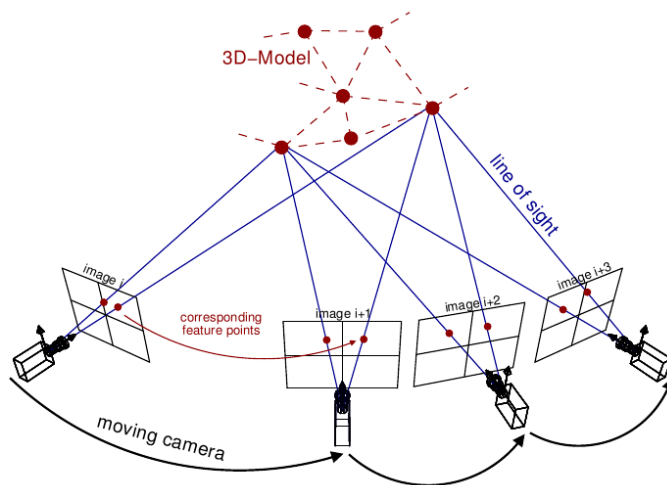
Data získaná fotogrammetrií s využitím UAS se dají používat podobně jako data LiDARová při mapování topografie (Mancini et al. 2013), v lesnictví (Panagiotidis et al. 2017) nebo v archeologii (Hamilton et Stephenson 2017) a s rostoucím zájmem o bezpilotní letouny se s nimi začíná čím dál víc pracovat v mnoha dalších odlišných odvětvích. Například v zemědělství (Pechanec et al. 2014), při detekci poškození budov (Mader et al. 2015) nebo slouží jako pomocný nástroj při požárech (Twidwell et al. 2016).

### 3.5 Structure from Motion

Aby se data získaná fotogrammetrií dala použít pro tvorbu digitálních modelů, je potřeba je transformovat z fotografií do bodového mračna. K tomu slouží metoda SfM (Structure from Motion) neboli „Struktura z pohybu“. To je technika pro odhad trojrozměrných modelů a struktur objektů nebo topografie ze sady dvojrozměrných fotografií pořízených z mnoha úhlů pohledu. Pro maximální přesnost je potřeba co největšího počtu snímků s vysokým procentem překrývání. Takové snímky jsou dále zpracovávány ve speciálních softwarech, jako je například Agisoft PhotoScan (Agisoft 2018) nebo VisualSFM (VisualSFM 2018).

Nejprve jsou na jednotlivých snímcích identifikovány specifické body a následně jsou pro ně na základě jejich charakteristik vyhledány identické body na ostatních snímcích (*Obr. 8*). Aby byl jakýkoli bod dále zpracováván, musí být v sadě snímků nalezen nejméně třikrát. Nejčastěji se v softwarech objevuje algoritmus SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe 1999), který dokáže porovnat body i přes změnu měřítka, osvětlení nebo polohy kamery u jednotlivých snímků. Identické body z různých snímků se následně přemísťují do jednotné polohy, což způsobuje „ohýbání“ snímků, respektive porušování dvojrozměrných prostorových vazeb mezi body, a tvorbu trojrozměrné struktury tvořené právě identickými body, neboli bodové mračno (Micheletti et al. 2015). Výhodou mračna získaného fotogrammetrií je, že body jsou tvořeny s atributy RGB, získanými z fotografií, což může pomoci v orientaci v mračnu

a k jeho snadnějšímu vizuálnímu hodnocení. Navíc samotné fotografie mohou být také doplňujícím zdrojem informací.



Obr. 8 Zobrazení pohyblivé kamery a identifikace identických bodů (Theia 2016)

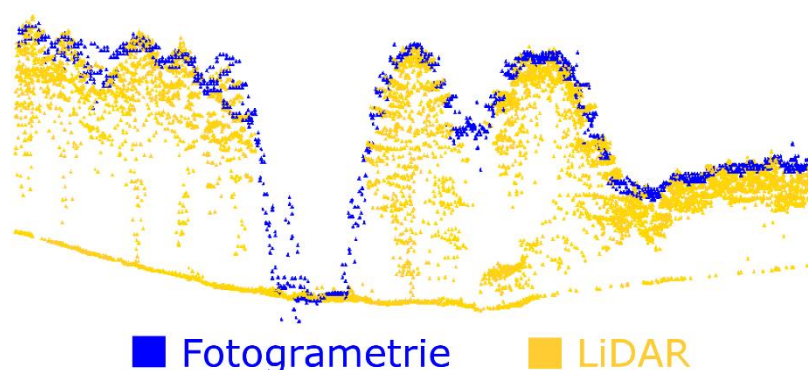
Pro následnou práci je třeba všem bodům mračna přiřadit polohu v souřadnicovém systému. K tomu slouží pozemní kontrolní body, které se rozmisťují po celé ploše před náletem a jejich poloha se zaměřuje například pomocí GPS. Mohou je představovat výrazné přírodní objekty, automaticky rozpoznatelné značky používané výrobci softwarů nebo se dají nahradit nějakými snadno rozpoznatelnými objekty. Podle kontrolních bodů je následně mračno georeferencováno, neboli jsou podle nich všem bodům v mračnu přiřazeny geografické souřadnice. Pokud jsou k dispozici LiDARová data daného území je možné mračno georeferencovat s jejich pomocí, ale tento způsob je méně přesný. Geografické souřadnice lze také získat pomocí interního GPS vysílače v kameře, a urychlit tak celý proces (Shervais 2016). Výhodou SfM jsou nízké požadavky na odbornost, které se snižují díky vysoké míře automatizace postupu. Nevýhodou je naopak doba potřebná pro modelování. U několika snímků trvá výpočet desítky minut, ale u stovky až tisíc snímků doba narůstá do řádu dnů (Westoby et al. 2012).

### 3.6 Nahraditelnost LiDARu fotogrammetrií s využitím UAS

LiDARová data se používají dlouhodobě a jsou uznávána jako kvalitně reprezentující zemský povrch (Mallet et Bretar 2009). S rostoucím zájmem o bezpilotní letouny, ale přibývá pokusů používat data získaná fotogrammetrií z UAS jako alternativu k LiDARu. V takovém případě je třeba posoudit, zda data z UAS dosahují dostatečné přesnosti a jak velké budou rozdíly ve výsledcích jednotlivých metod. Johnson et al.

(2014) srovnávali LiDAR s fotogrammetrií z cenově dostupného bezpilotního letounu na členitém a zvrásněném povrchu. Výsledky porovnávali s několika přesně změřenými kontrolními body a zhodnotili data z UAS jako dostatečně přesnou alternativu. Chyby bodových mračen byly v přijatelném rozsahu, a navíc byla získaná data v mnohem větším rozlišení, s větším detailem a byly k dispozici již po několika hodinách. Hugenholtz et al. (2013) zase porovnávali DEM získané oběma metodami na písčinych dunách s občasným nízkým porostem a modely vyhodnotili jako téměř totožné. Mírné nadhodnocení modelu z UAS bylo podle nich způsobeno plochami s vegetací. Ke stejnému závěru došli i Dayamit et al. (2015), kteří srovnávali hrubší DEM na větším území. Modely si byly velmi podobné i když LiDARový model vykazoval mírně větší přesnost.

Pomocí UAS lze tedy získat srovnatelně kvalitní data jako s použitím LiDARu a UAS jsou tak ideální pro nízkonákladové výzkumy na menších plochách. Všechny zmíněné výzkumy byly ale prováděny na územích bez vyšší vegetace nebo lesních porostů, u kterých se nejvíce projeví rozdílnost obou metod. V takových prostředích má LiDAR značnou výhodu. Laser je schopen proniknout skrz koruny stromů a poskytnout tak najednou informace o struktuře nižších pater vegetace a terénu, zatím co u UAS není možné během jednoho náletu fotogrammetricky rekonstruovat prostor zastíněný uzavřenou plochou korun stromů (Obr. 9).



Obr. 9 Rozdíl mezi fotogrammetrickým a LiDARovým bodovým mračnem na území s vysokou vegetací (Lisein et al. 2013)

Ve většině případů je ale žádoucí mít k dispozici i tato data, bez kterých by výsledný model nedosahoval potřebných informačních kvalit. Podle Mlambo et al. (2017) je možné bez problémů používat fotogrammetrii z UAS jako alternativu k laserovému skenování na plochách s méně než 50 % stromů, které tvoří větší souvislé plochy a

je tak možné nasnímat i plochy pod korunami. Na více zalesněných územích nálet UAS zaznamená pouze vrchní plochu korun stromů (Jensen et Mathews 2016) a data pod nimi musí být pořízena jiným způsobem a s daty z náletu spojena. Tak se zajistí dostatečně kvalitní data pro modelování DTM, CHM nebo různých vlastností lesních porostů.

### **3.7 Získávání dat pod korunami stromů**

Získávání dat pomocí fotogrammetrie z UAS pod plochami hustých korun stromů je značně komplikované, v některých případech přímo nemožné. Pokud chceme ale modelovat lesní metriky nebo DTM, jsou taková data ve vysoké kvalitě nezbytnou součástí. Možností, jak je získat je více a jejich použití limitují zejména vlastnosti snímaného prostředí.

#### **3.7.1 Kombinace s LiDARem**

Nejjednodušším způsobem je pořídit doplňující LiDARová data nebo přímo LiDARový DTM a ten zkombinovat s daty z UAS (Ullah et al. 2015; Jayathunga et al. 2018) Pokud se jedná o nízkonákladový výzkum, tak se dá nad touto variantou uvažovat v případě, že jsou taková data k dispozici z nějakého předešlého výzkumu nebo jsou volně přístupná. Data takové kombinaci tak mohou například sloužit pro pravidelnou aktualizaci CHM. Pokud musí být data zakoupena, celková cena výzkumu výrazně stoupne, a je na zvážení získání dat jiným způsobem.

#### **3.7.2 Opakované nálety bezpilotních letounů**

Další, časově náročnější variantou je provést nálet UAS ještě jednou, většinou v zimě bez sněhové pokrývky, kdy je vegetace neolistěná (Dandois et Ellis 2013; DeWitt et al. 2017). Terén je na takových snímcích snadno rozpoznatelný a přesnost DTM je srovnatelná jako na územích bez vegetace. Nicméně jeho odhad mohou zhoršovat stíny stromů, složité tvary a hustota větví i celková hustota porostu. Tento způsob se dá uplatnit i ve smíšených lesích s menším poměrem neopadavých stromů. Skenování v období neolistěné vegetace bývá často prováděno i LiDARem (Hodgson et al. 2005).

#### **3.7.3 Pozemní skenování**

V jehličnatých lesích nebo v oblastech s hodně hustou vegetací je často terén tak zastíněný, že je obtížné i použití LiDARu a fotogrammetrie se stává úplně neefektivní. Skenování je tak omezeno na větší otvory ve vegetačním krytu (Tomašík et al. 2017) nebo na pozemní skenování (Mikita et al. 2016). K tomu opět stačí klasický fotoaparát

a následné skenování ve formě pochůzky podobným systémem jako při náletu. Limitující je zde lidský faktor, který oproti leteckému skenování prodlužuje dobu získávání dat. Podobným způsobem se může provádět i doplňující LiDARové pozemní skenování (Dassot et al. 2011).

#### **3.7.4 Georeference bodového mračna**

Problém s viditelností se projevuje i při georeferenci bodového mračna, kdy je na měřené ploše většinou velmi málo míst, na kterých mohou být umístěny kontrolní body. Nicméně podle Tomašík et al. 2017 stačí ke kvalitní georeferenci mračna relativně málo kontrolních bodů. Vždy je ale třeba usilovat o co nejvíce možných bodů, protože s menším než dostatečným počtem bodů, se zhoršují následující odhady.

### **3.8 Potenciál UAS pro modelování lesních porostů**

Pokud jsou tedy k dispozici kvalitní doplňující data, je možné pomocí fotogrammetrie z UAS modelovat i lesní metriky velmi přesně a s podobnými výsledky jako s použitím LiDARu (Hawryło et al. 2017). Nálety je možné provádět častěji a získat tak data v menších časových intervalech a mnoho výzkumů tak nemusí být nuceno přizpůsobovat se prostorovému a časovému rozlišení dostupných dat dálkového průzkumů (Ullah et al. 2015). Při inventarizaci v lesním hospodářství hraje přesný odhad vegetačních parametrů klíčovou roli pro tržní účely a se zvyšujícími se nároky na udržitelné lesnictví jsou přesné a aktuální informace o lesech nezbytné.

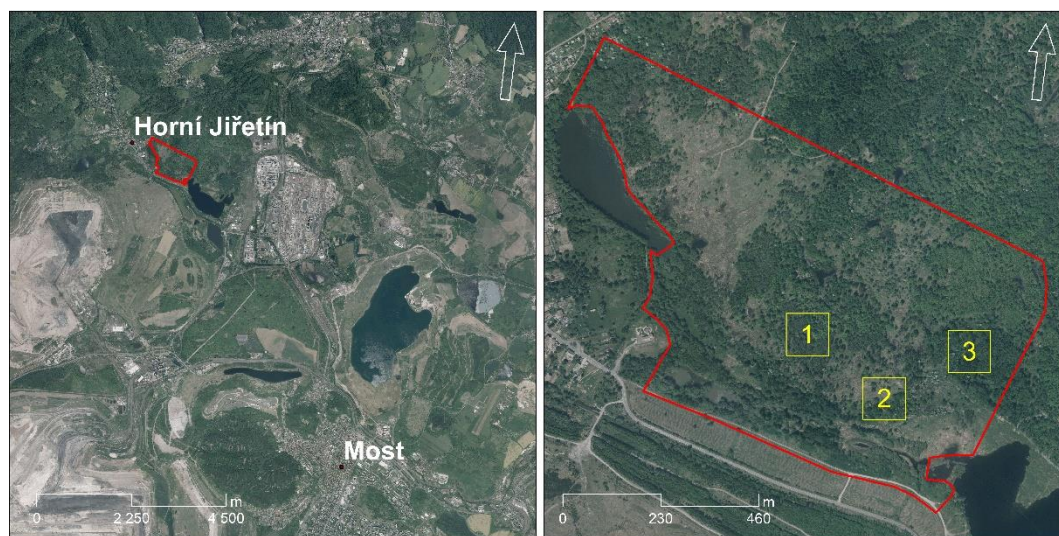
## **4 Metodika**

### **4.1 Charakteristika zájmového území**

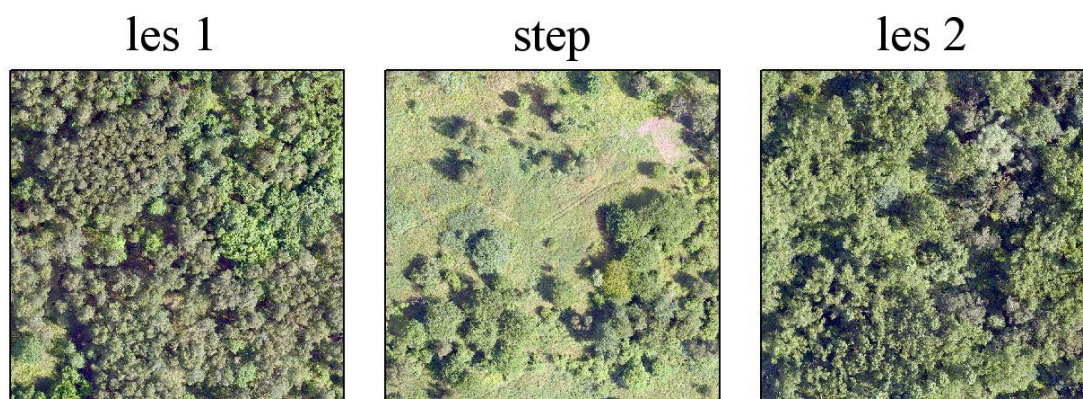
Zájmová oblast se nachází v jižní části Hornojirětínské výsypky, která leží nedaleko severozápadně od města Most v Ústeckém kraji (*Obr. 10*). Na celém území výsypky je v budoucnu v plánu další těžba, proto dosud nebyla technicky rekultivována a probíhala zde pouze sukcese. Postupným hromaděním zeminy tak vznikl typický zvlněný terén pokrytý heterogenní vegetací v pozdně sukcesním stádiu 35–50 let (Doležalová et al. 2012). Zájmová oblast má velikost přibližně 68 ha. Nejčastějšími zástupci vysoké vegetace jsou Bříza bělokorá (*Betula pendula*) a Jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*).



Modelování výšky vegetace bylo provedeno pro celé území, zatímco pro výpočet charakteristik vertikální struktury vegetace byly vybrány tři čtvercová území, každé o velikosti 1 ha (Obr. 10). Každé území má jiné vlastnosti. První území (Les 1) je plocha pokrytá souvislým porostem středně vysoké vegetace s přibližně stejnou výškou. Druhé území (Step) je plocha s nižší rozvolněnější vegetací a vysokým procentem volného terénu. Třetí území (Les 2) je opět plocha se souvislým pokryvem, ale oproti prvnímu území je zde výrazně vyšší vegetace (Obr. 11).



Obr. 10 Umístění území v krajině (vlevo), vybraná území pro výpočet charakteristik vertikální struktury vegetace (vpravo), podkladová mapa ortofoto ČUZK



Obr. 11 Detaily ploch jednotlivých území pro výpočet charakteristik vertikální struktury vegetace

## 4.2 Sběr dat

### 4.2.1 LiDAR

LiDARová data byla nasnímána 18. května 2017 pomocí letecké laboratoře zobrazující spektroskopie FLIS (Flying Laboratory of Imaging Spectroscopy)

skládající se z fotogrammetrického letadla Cessna 208B Grand Caravan, zobrazujících spektorradiometrů (CASI-1500, SASI-600, TASI-600) a z laserového skeneru Riegl LMS-Q780 (Obr. 12). Skener má rotační polygonové zrcadlo a skenuje v rovnoběžných liniích s vzájemným překryvem 55 %. Zobrazovací zorný úhel je 60° a skener pracuje ve vlnové délce 1064 nm (Hanuš et al. 2016). Jednotlivé lety byly prováděny ve výšce 1030 m nad terénem rychlostí 60 m/s. Bodové mračno obsahuje 4 667 778 bodů a jejich průměrná hustota je 7,7 bodů na m<sup>2</sup>.



*Obr. 12 Letadlo Cessna 208B Grand Caravan (vlevo), hyperspektrální sensory CASI-1500, SASI-600, TASI-600 včetně laserového skeneru Riegl LMS-Q780 instalované v kabině letadla (vpravo) (Hanuš et al. 2017)*

#### **4.2.2 UAS**

Fotogrammetrická data z UAS byla nasnímana pomocí letounu skládajícího se z letadla Easy Star II značky Multiplex (Obr. 13), vysílacího zařízení 3DR Pixhawk a fotoaparátu Nikon Coolpix A. Byly provedeny dva nálety, letní zaznamenávající území s olistěnou vegetací a zimní bez olistění pro kvalitní reprezentaci povrchu. Letní nálet byl proveden 1. července 2016 a mračno obsahuje 72 098 227 bodů. Zimní nálet byl proveden v 11. března 2017 a mračno obsahuje 196 103 451 bodů. UAS létal v rovnoběžných liniích a byl nastaven 80 % překryv předních a zadních okrajů snímků a 65 % překryv bočních okrajů snímků ve směru letu. Při každém letu bylo pořízeno přibližně 1000 snímků z průměrné výšky 100 m nad povrchem, a tak bylo dosaženo interpolační vzdálenosti 3 cm mezi jednotlivými body. Data byla poskytnuta jako bodové mračno v souřadnicovém systému S-JTSK (Ferro) / Krovak East North.





Obr. 13 letadlo Easy Star II (Aerobetrics 2017)

### 4.3 Klasifikace bodových mračen

Pro potřeby této práce byla využita sada aplikací LAStools (Rapislasso 2018). Při klasifikaci LiDARového mračka byly v aplikaci *lasground* nastaveny parametry podle charakteristik a vlastností území (*nature* – příroda, *no bulge* – bez výrazných převýšení) a následně došlo ke klasifikaci bodů do dvou tříd. První třída obsahovala body reprezentující terén (2 - ground), druhá všechny ostatní body (1 – unassigned). Dále bylo třeba klasifikovat vegetaci. Nejprve byl v aplikaci *lasheight* proveden příkaz *compute\_height\_above\_ground\_points*, který vypočítal každému bodu reálnou výšku nad povrchem země. Hodnoty původní nadmořské výšky byly nahrazeny příkazem *replace\_z*. Aplikací *lasnoise*, byl klasifikován šum, tzn. body v nepřirozené vzdálenosti od povrchů, vzniklé například nasnímáním letících ptáků, které by negativně ovlivňovaly budoucí analýzy. Samotná vegetace byla pak klasifikována aplikací *lasclassify*, která podle výšky a tvarů klasifikovala vegetaci. Klasifikace do dalších tříd nebyly pro potřeby této práce prováděny.

Aby bylo možné obě metody srovnávat, musela být mračna z UAS spojena do jednoho. Mračno zimního náletu popisuje přesněji terén, proto bylo nejprve klasifikováno do dvou tříd obdobným postupem jako mračno LiDARové. Obě mračna byla potom spojena (*lasmerge*) a jako terén byly použity pouze body takto klasifikované v zimním mračnu. Na výsledné mračno byly opět použity aplikace *lasheight* a *lasnoise*. Mračno obsahovalo velké množství bodů, a některé funkce aplikací LAStools ho nebyly schopné v celku zpracovat, a proto byly body zredukovány (*lasthin*). Příkaz *grid\_size\_0.2* vytvořil čtvercovou síť s velikostí buněk 20 cm, příkaz *keep\_central* zachoval střední bod v buňce a příkaz *remove\_points*

odstranil ostatní body. Výsledné mračno obsahovalo 15 088 519 bodů a bylo již zpracovatelné.

#### 4.4 Charakteristiky vertikální struktury vegetace

Pro vertikální analýzy byla použita aplikace *lascanopy*. V sekci *height metrics* byla postupně nastavována průměrná výška (avg), maximální výška (max) a směrodatná odchylka (std). Každá charakteristika byla vypočítána ve čtyřech rozlišeních a to 10, 5, 2 a 1 metr. Výsledkem byly rastry jednotlivých charakteristik v každém rozlišení pro LiDAR i fotogrammetrii z UAS. Hodnoty každých dvou související rastrů byly vyneseny proti sobě na bodový graf a proloženy spojnicí trendu. Graf byl doplněn hodnotou spolehlivosti  $R^2$ . Výškové profily byly získány nastavením intervalů po dvou metrech od 0 do 30 metrů a generováním počtu bodů v jednotlivých intervalech. Výsledné hodnoty byly vyneseny do sloupcových grafů.

#### 4.5 Tvorba modelu výšky vegetace

Pro rychlejší tvorbu modelu byl vytvořen skript (*Příloha 1*) podle návodu na webu *rapidlasso.com* (Rapidlasso 2014), spadající pod správu autorů LAStools. Skript byl spuštěn v příkazovém řádku systému počítače a skládá ze série průběhů několika aplikací LAStools, následně popsané v několika krocích.

Nejprve je vytvořen DTM s nulovou výškou. V první řádce je specifikován vstupní adresář a soubor. Příkazem *drop\_z\_above 0.1* dojde k zahazení všech bodů s výškou větší než 0.1 metru. Příkaz *step 10* nastaví velikost buňky na 10 m. V řádce s *odir* se nastaví výstupní adresář a v poslední řádce název výsledného souboru.

V druhém kroku je vytvořen soubor, ze kterého vychází všechny další funkce. Příkazem *subcircle* jsou body zvětšeny na kruhy o poloměru 10 cm, jako simulace plochy dopadajícího paprsku. Velikost buňky je podle návodu zmenšena na polovinu, pro přesnější výsledek. Příkaz *highest* zachová vždy nejvyšší hodnotu.

Ve třetím kroku dojde k vytvoření úplného DSM. Pro nejpřesnější model je použit příkaz *kill*, který určuje vzdálenost, do které dochází k interpolaci. Při příliš krátké vzdálenosti se začnou tvořit díry, respektive prázdné pixely, při příliš dlouhé dochází k nepřesné interpolaci. Kombinací návodu a postupných pokusů byla jako nejlepší vyhodnocena a vždy použita vzdálenost dvojnásobná velikosti buňky.

Čtvrtým krokem začíná série aplikací *las2dem*, při kterých jsou vytvářeny digitální modely s různými vlastnostmi. Příkazem *drop\_z\_below* jsou vždy zahozeny body pod určitou výškou, která se postupně zvyšuje a vzniká vždy DSM pro menší interval ve větší výšce. Tím je eliminováno množství děr na minimum.

Posledním krokem je spojit všechny vytvořené soubory do jednoho. K tomu je použit příkaz *merged* v aplikaci *lasgrid* a opět je zachována vždy nejvyšší hodnota překrývajících se buněk (*highest*). Výpočet je proveden dvakrát. Poprvé je generován model ve falešných barvách příkazem *false set\_min\_max 0 25* ve formátu *png*, který je použit pro lepší grafické znázornění. Podruhé s normálními hodnotami ve formátu *bil*, aby bylo možné provádět rastrové analýzy.

Výsledkem byly dvě sady rastrů, opět ve čtyřech rozlišeních pro obě metody. Pro hodnoty buněk byl vytvořen krabicový graf srovnávající všechny rastry obou metod v jednotlivých rozlišeních.

## 4.6 Validace výsledků

Pro každé dva rastry obou metod, stejného rozlišení a stejné vertikální charakteristiky, byly v statistickém programu R (R-project 2018) vypočítány střední odchylky MAE a střední kvadratické odchylky RMSE podle následujících vzorců. Obdobným způsobem byly odchylky vypočteny i pro rastry modelu výšky vegetace.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x| \quad \text{RMSE}_{fo} = \left[ \sum_{i=1}^N (z_{fi} - z_{oi})^2 / N \right]^{1/2}$$

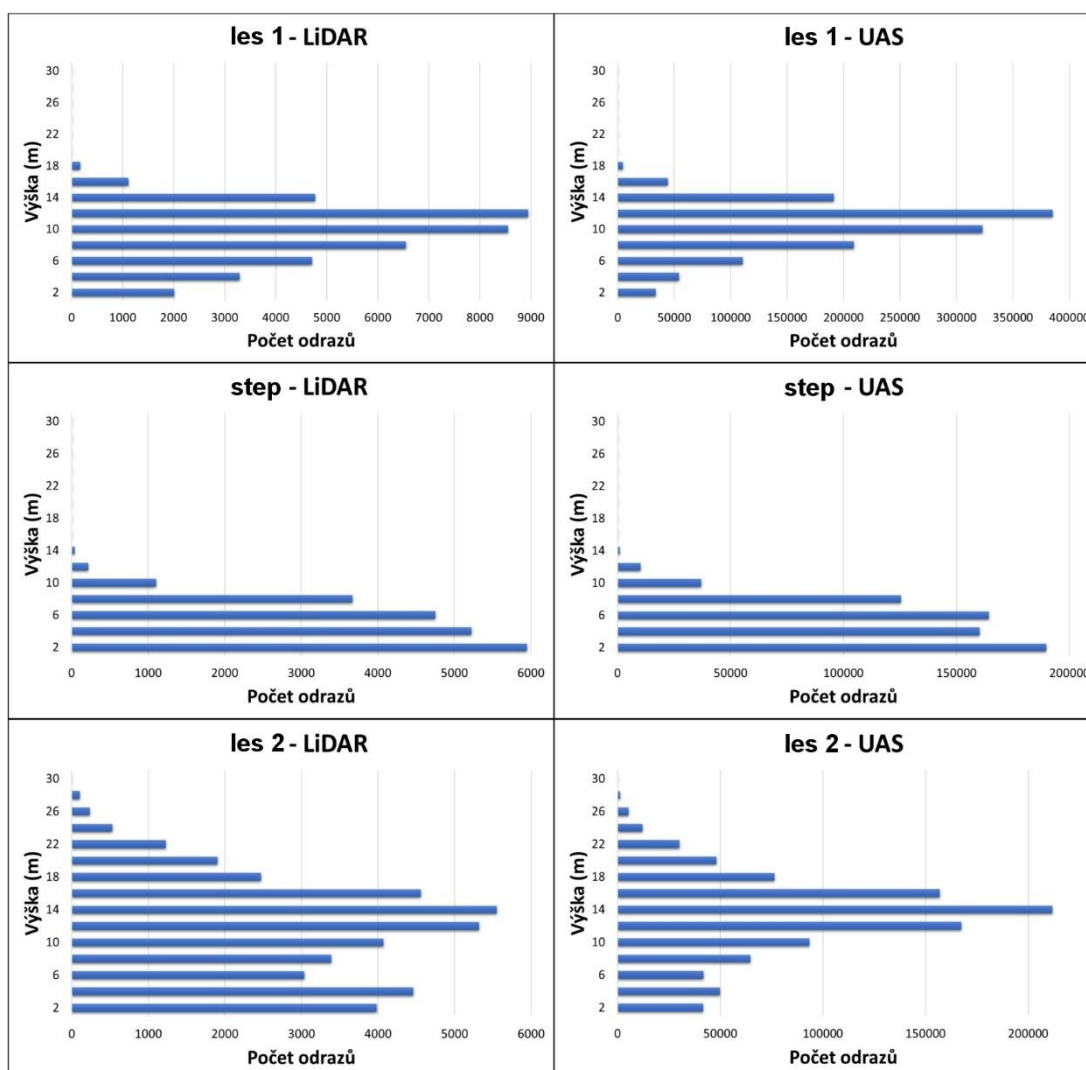
V normálním případě se odchylky počítají z rozdílu referenčních a měřených dat a popisují jejich nepřesnost. V této práci nebyla referenční data k dispozici, nicméně LiDAR se ke skenování povrchu používá dlouhodobě s relativně velkou přesností, a proto byla tato data za referenční považována. Odchytkami byla tedy zjištěna míra vzájemné podobnosti dat a nakolik je LiDAR nahraditelný dvěma nálety s UAS.

## 5 Výsledky

### 5.1 Výškové profily

V případě vertikální struktury vegetace na jednotlivých územích, vykazují bodová mračna pro obě metody podobnou strukturu, a to i v případě vertikálně nejčlenitějšího území (*Obr. 14*). Profily odpovídají očekávané struktuře podle jednotlivých

vegetačních typů. Dat z UAS je řádově několikanásobně víc, ale procentuálně se v jednotlivých intervalech s LiDARovými relativně shodují. Nicméně poměrný úbytek bodů ve spodní vrstvě porostu je v případě dat z UAS oproti LiDARu patrný.



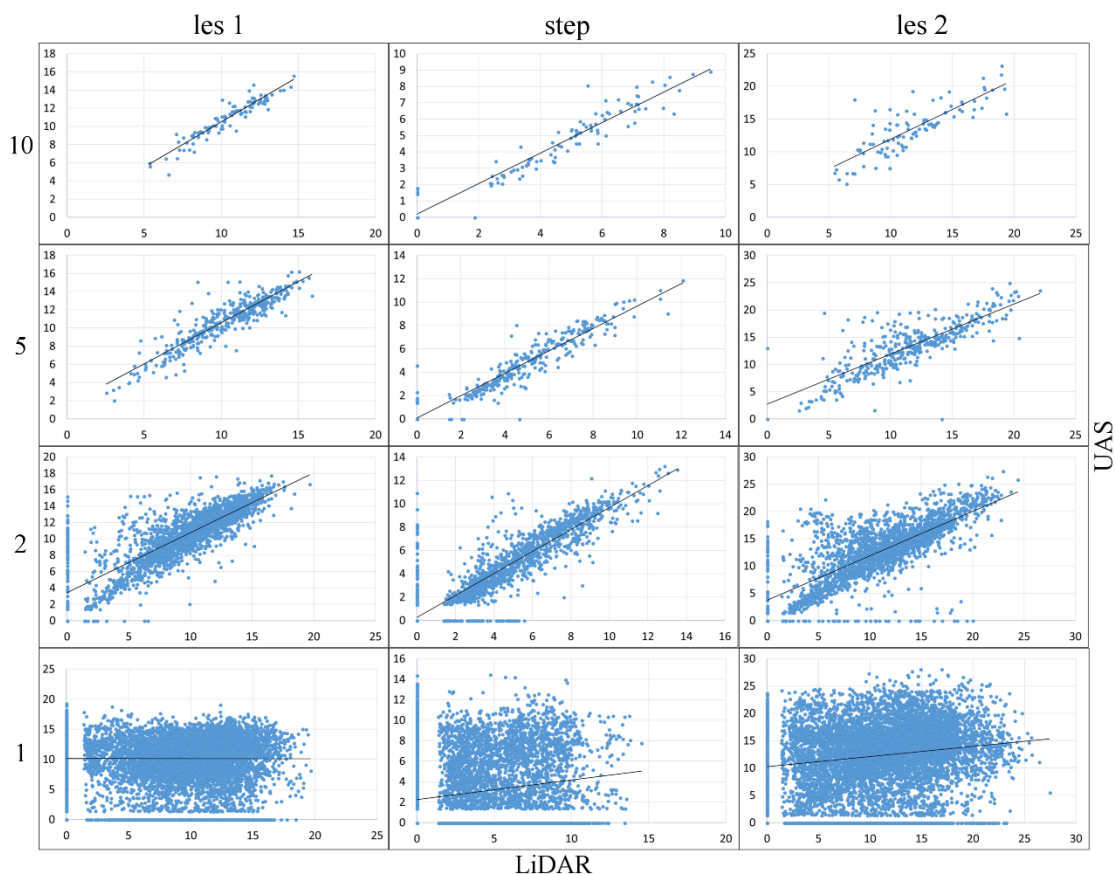
Obr. 14 - výškové profily jednotlivých území

## 5.2 Charakteristiky vegetace

### 5.2.1 Průměrná výška

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při nejméně podrobném rozlišení a se zvyšující se podrobností se mračna jednotlivých metod stále více rozcházejí (Obr. 15). U rozlišení 5 m byly rozdíly ještě relativně nízké (RMSE: 0,8070 – 3,2050), u podrobnějších rozlišení byly už hodně výrazné (Tab. 1). Navzdory různým vegetačním a výškovým vlastnostem docházelo k velmi podobnému průběhu zhoršení u všech třech území.

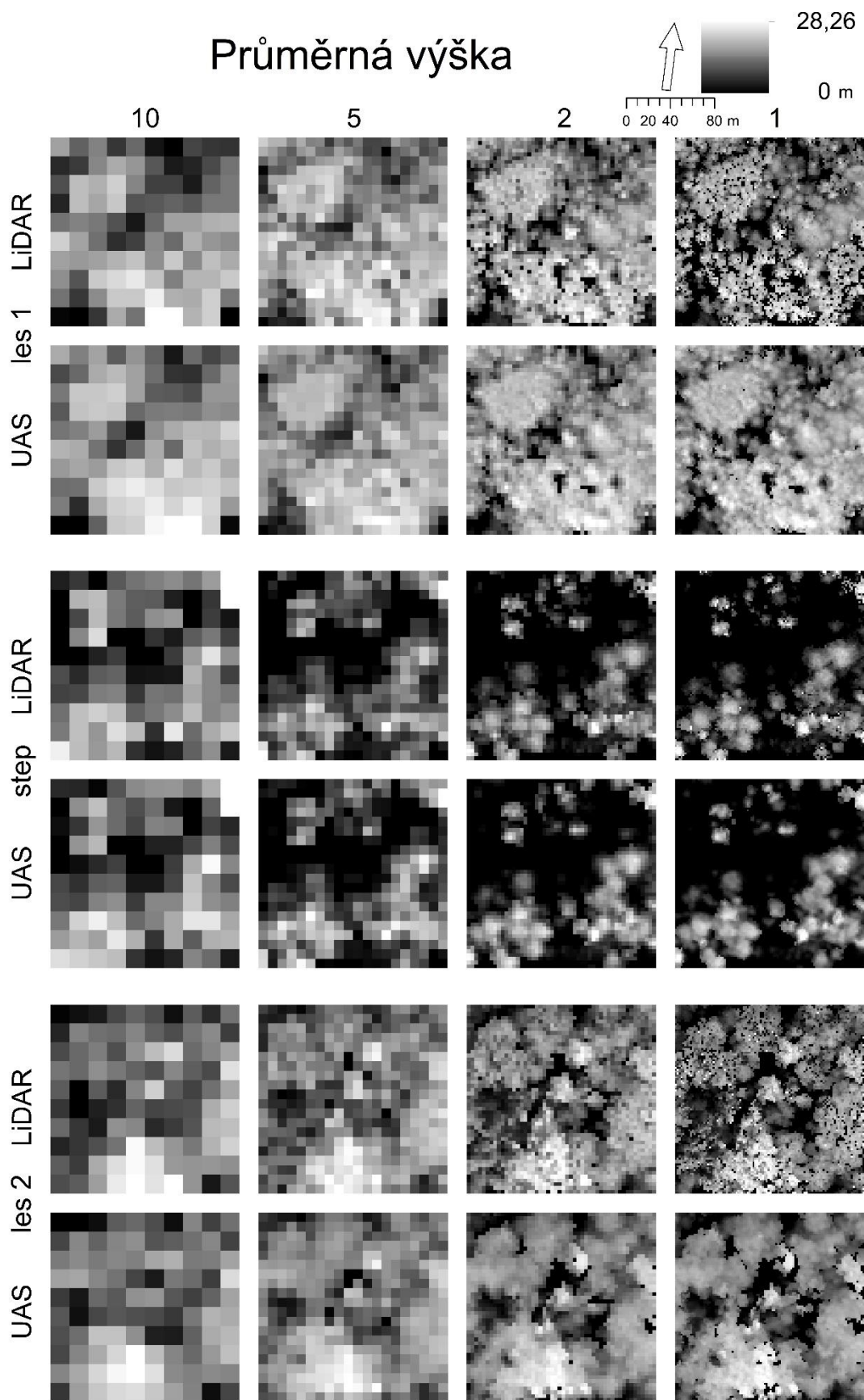
Při srovnání jednotlivých území bylo nejlepší shody dosaženo u území Step s vysokým poměrem volného terénu a nejnižší průměrnou výškou (RMSE: 0,7166 – 4,2017). Se zvyšující se výškou vegetace se shoda snižovala a výrazně nejvyšších rozdílů bylo dosaženo u Lesu 2 s nerovnoměrně rozmístěnou a nejvyšší vegetací, což je viditelné i na výsledných rastroch (Obr. 16).



Obr. 15 Grafy znázorňující bodová mračna průměrné výšky jednotlivých území a jejich rozmístění při rostoucím rozlišení.

AVG	Rozlišení	Les 1			Step			Les 2		
		MEA	RMSE	R <sup>2</sup>	MEA	RMSE	R <sup>2</sup>	MEA	RMSE	R <sup>2</sup>
	10	0,6925	0,8876	0,8823	0,5071	0,7166	0,9068	2,0342	2,7761	0,6743
	5	0,8629	1,2233	0,8281	0,5063	0,8070	0,9237	2,2398	3,2050	0,6587
	2	1,4477	2,3922	0,6856	0,6055	1,1849	0,8694	2,6490	4,1289	0,5636
	1	5,1611	6,7685	3E-05	2,9406	4,2017	0,0347	6,2841	8,1612	0,0355

Tab. 1 Tabulka středních a směrodatných odchylek a koeficientů spolehlivosti pro jednotlivá území a rozlišení pro průměrnou výšku



Obr. 16 Rastry průměrných výšek vegetace v metrech. Sloupce znázorňují jednotlivá rozlišení, dvojice řad vždy obě použité metody pro jednotlivé území.

### 5.2.2 Maximální výška

V případě maximální výšky mají výsledky velmi podobný průběh jako u výšky průměrné, ale vypadají mírně podobněji (*Příloha 3*). To je vidět i na rastrech, které vypadají na první pohled skoro totožně (*Příloha 5*). Hodnoty odchylek také nabývají podobných hodnot a s podrobnějším rozlišením se zvětšují v podobných intervalech. Nejlepších výsledků je dosaženo na Stepí, i když chyby nabývají vyšších hodnot než u průměrné výšky (*Příloha 2*). Obecně je odhad v méně podrobných měřítkách lepší než u průměrné výšky, i když u podrobnějších rozlišení se zhoršuje.

### 5.2.3 Směrodatná odchylka

Výsledky pro směrodatnou odchylku mají na první pohled odlišný průběh. Na grafech je vidět, že k nízké korelaci dochází už při méně podrobných rozlišeních. Už při rozlišení 10 m jsou body na Lesu 1 a Lesu 2 hodně rozprostřené kolem spojnice trendu a pouze u Stepí leží většina bodů v těsné blízkosti přímky (*Příloha 4*). Celkově mají odchylky malé rozpětí (RMSE: 0,2801 – 2,7295), ale rozdíly mezi jednotlivými územími jsou výrazné (*Příloha 2*). Nejlepších výsledků bylo dosaženo opět u Stepí a nejhorších u Lesu 2.

## 5.3 Model výšky vegetace

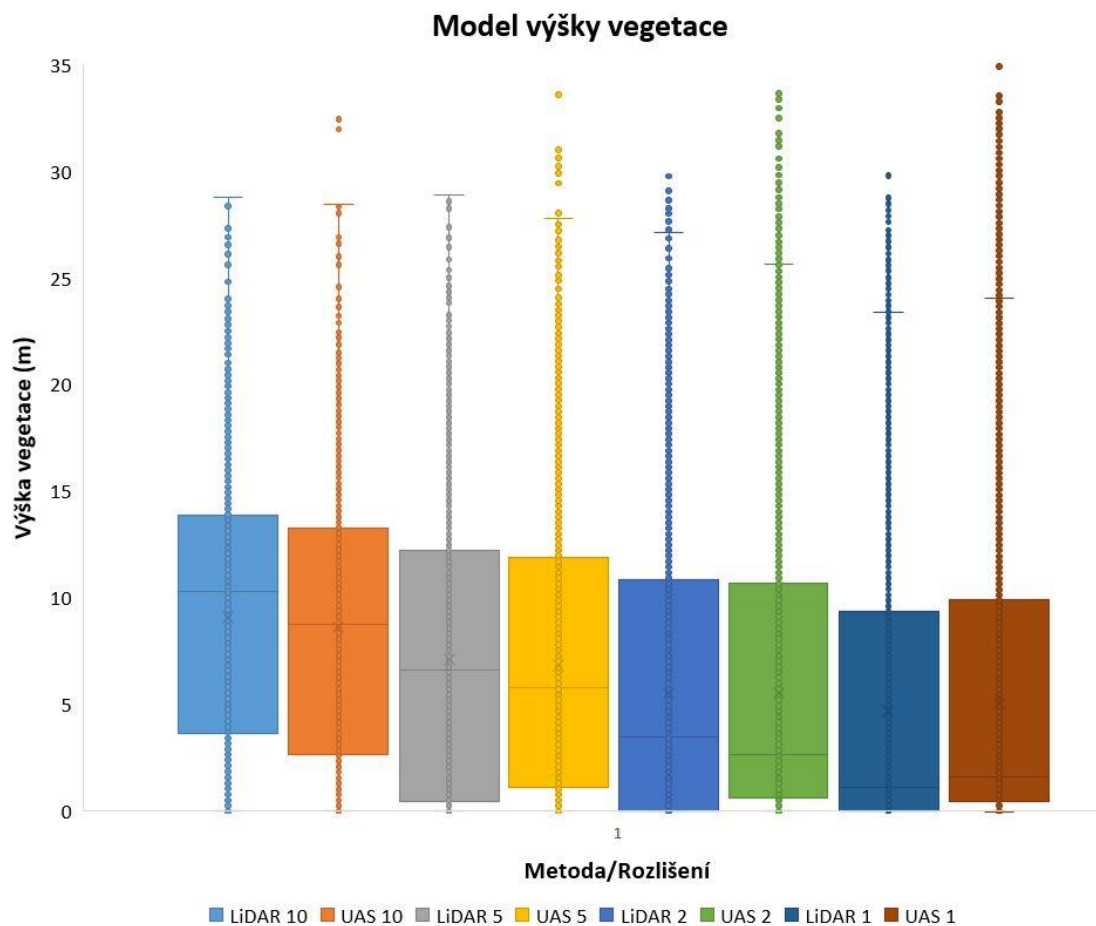
Nejlepší shody dosahují rastry obou metod opět při rozlišení 10 m a s podrobnějším rozlišením se postupně rozcházejí. Obecně se rastry výrazně podobají, i když na určitých místech jsou vidět výrazné rozdíly, které se změnou rozlišení nemizí. Na severní straně území má rastr z UAS výrazně vyšší hodnoty, které se na LiDARovém rastru nevyskytují. Dále je v jihovýchodním rohu na LiDARovém rastru souvislá plocha vyšší vegetace, zatímco na rastru z UAS je ostrý zub s minimální výškou. To je způsobeno absencí dat v letním mračen UAS (*Obr. 18*). Odchylky MAE a RMSE narůstají s podrobnějším rozlišením mnohem méně než u charakteristik vegetace (*Tab. 2*).

	MEA	RMSE
10	3,3189	5,0467
5	4,3311	6,2821
2	4,9255	6,8815
1	5,2878	7,3303

*Tab. 2 Tabulka odchylek MEA a RMSE mezi metodami pro všechny rozlišení modelu výšky vegetace*



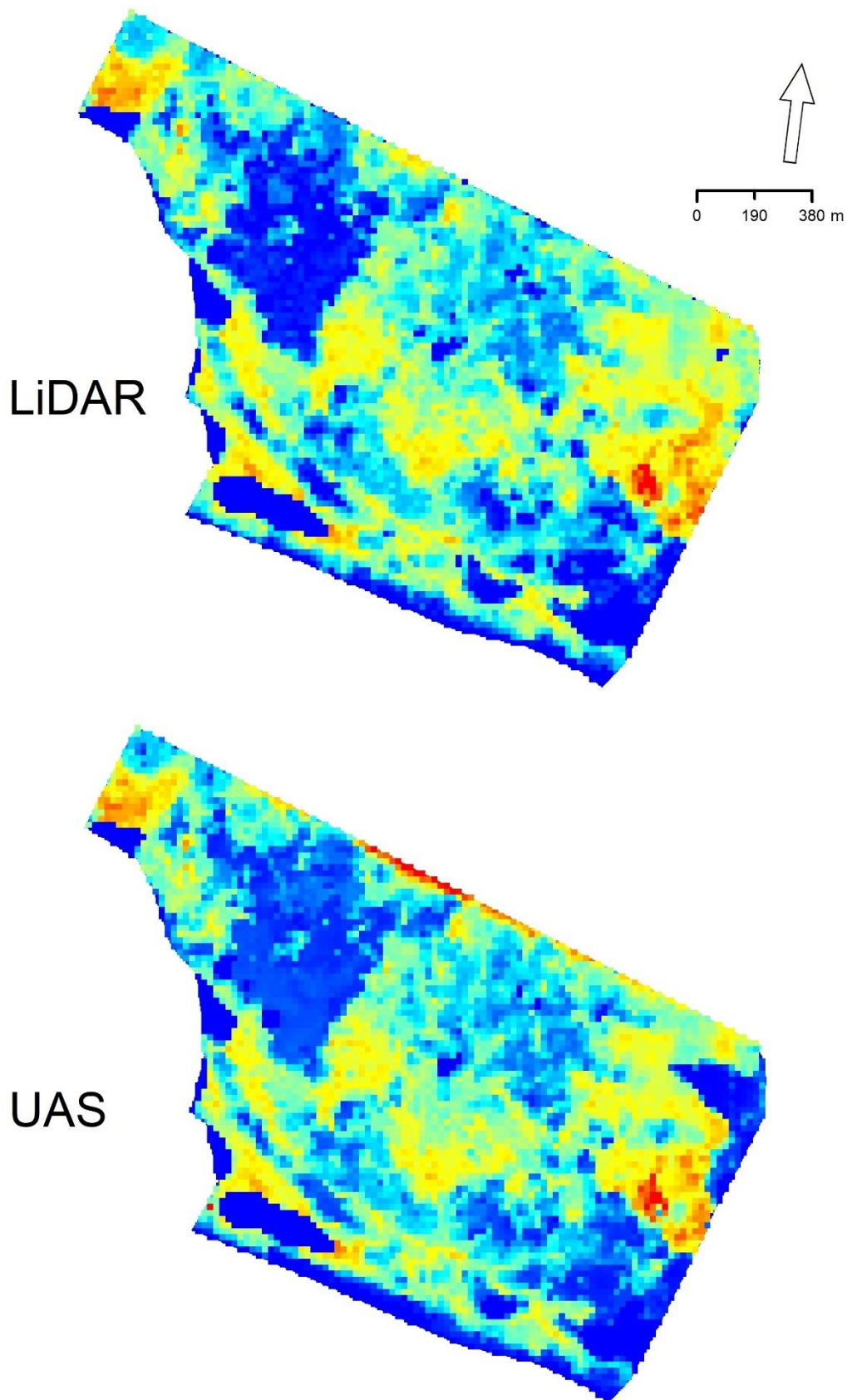
Výškové rozložení hodnot pro obě metody je podobné, jak je vidět na následujícím grafu. (Obr. 17). Se zvětšujícím se rozlišením dochází k posunu spodního i horního kvartilu směrem k nule a ke zmenšování jejich vzájemné vzdálenosti. Zároveň se s každým rozlišením snižuje hodnota mediánu. To koresponduje s vizuálním popisem, kdy se zvětšujícím se rozlišením přibývá podíl terénu bez vegetace a zpřesňují a zmenšují se plochy porostu. Model z UAS má vždy vyšší průměrnou výšku a jeho spodní kvartil nikdy nedosáhne nuly na rozdíl od modelu z LiDARu, kdy se tak stane u rozlišení 2 a 1 metr. Model z UAS má také celkově více odlehlých bodů, které ovlivňují maximální výšku a velikost odchylek.



Obr. 17 Krabicový graf pro srovnání výsledků CHM pro LiDAR a UAS ve všech rozlišeních



# Model výšky vegetace pro 10 m



*Obr. 18 Model výšky vegetace pro 10 m*

## 6 Diskuze

Všechny výškové profily jednotlivých území pro obě metody si i přes velmi rozdílný počet odrazů více méně odpovídají. Profily mračen z UAS mají vždy celkově mnohem více bodů a zároveň mají více bodů v nejméně výraznějších intervalech. Jsou to výšky, ve kterých jsou rovnější a souvislejší plochy. SfM pravděpodobně vytvoří u takovýchto ploch více bodů než u členitějšího povrchu, protože je jednodušší detekovat společné body. Skenování obou metod také neprobíhalo ve stejnou chvíli, a tak je možné, že při letním náletu UAS mohla být vegetace o něco více olistěná než při LiDARovém náletu. Příčinou by mohlo být také obecné nadhodnocování výšek ploch s nízkou vegetací oproti LiDARu, se kterou se setkali Hugenholtz et al. (2013) Mračna z UAS mají také výrazně méně bodů ve výšce do 4 metrů. To může být způsobeno spojením dat z dvou ročních období. V zimě není nízký porost vzrostlý a nemůže být naskenován, v létě ho zase zakrývá olistěná plocha vyšší vegetace.

U všech analýz charakteristik vegetace je viditelný sestupný vývoj v podobnosti hodnot jednotlivých buněk se zvětšujícím se rozlišením. Zavedením rozlišení obecně vznikají informační ztráty, které je obtížné kvantifikovat. Pokud použijeme menší než ideální rozlišení, nemůžeme si být potom jisti tím, jestli případné chyby vznikly kvůli účinkům použitého rozlišení, v důsledku nedokonalostí nástroje, nebo obojím (Goodchild 2011). Při rozlišení 10 metrů jsou odchylky MAE a RMSE vždy nejnižší a postupně se zvyšují. Koeficient spolehlivosti  $R^2$  je naopak největší a postupně se zmenšuje. Největší odchylky jsou vždy při rozlišení 1 metr a grafy jsou velmi neuspořádané. Zajímavé je, že nejmenší rozdíl mezi maximální průměrnou výškou je také při rozlišení 1 metr, i když by se podle odchylek dalo předpokládat, že u tohoto rozlišení bude naopak největší rozdíl. To je pravděpodobně dáno průměrováním hodnot v buňkách při různých rozlišeních. Při větší ploše buňky je průměrováno více bodů. Vysoká hodnota průměr zvyšuje, nikdy však buňka nebude mít hodnotu nejvyššího bodu, pokud se v ní nebude vyskytovat sám. Bodů s vysokou hodnotou je také mnohem méně než s hodnotou nižší. Při největším rozlišení se průměrná výška zvyšuje, protože menší buňka obsahuje méně bodů a tím pádem může nejvyšší bod průměr nadhodnocovat. Proto jsou maximální hodnoty průměrné výšky nejpresnější a nejvíce shodné při největším rozlišení. U maximální výšky jsou si maximální hodnoty vždy už od nejmenšího rozlišení velmi podobné nebo jsou dokonce shodné. Hodnoty nejsou průměrovány, ale ze všech bodů, které buňka obsahuje, je vybrán ten s nejvyšší

hodnotou. Dá se tedy říct, že ve všech rozlišeních obou metod se dá relativně přesně zjistit maximální výška.

U rastrů směrodatné odchytky vycházejí MAE a RMSE u nejmenšího rozlišení docela vysoké oproti maximální a průměrné výšce. U těch ale odchytky, se zvětšujícím se rozlišením výrazně rostou, zatím co u směrodatné odchytky se zvyšují minimálně a u největšího rozlišení jsou několikanásobně menší než u ostatních charakteristik. To je způsobeno průměrnou velikostí odchytky. Maximální a průměrná výška dosahují průměrných hodnot většinou nad deset metrů, u směrodatné odchytky to je maximum. Odchytky MAE a RMSE mají mnohem menší celkové hodnoty, ale hodnoty jednotlivých buněk se méně shodují a na grafech je vidět větší neuspořádanost bodů.

Podle provedených analýz se dá usoudit, že k nejlepší shodě a nejpřesnějšímu odhadu dochází u území Step. Odchytky jsou ze všech charakteristik nejmenší a vizuálně jsou si rastry nejvíce podobné. O něco hůře je na tom Les 1 s nižší souvislou vegetací a nejhorší výsledky vykazuje Les 2 s vysokou rozvolněnější vegetací. Step má pravděpodobně nejpřesnější shodu kvůli vysokému poměru terénu bez vegetace. Na rovnějších plochách bez výrazných výškových změn je menší prostor k chybám. U Lesu 1 sice vegetace tvoří docela rovnou plochu s přibližně stejnou výškou, ta je ale stále dost členitá. Větší rozdíl výšky mezi vegetací a terénem také zvyšuje chybu. Ta je nejvýraznější u Lesu 2, který má zároveň nejvíce členitý prostorový profil. To koresponduje s Mlambo et al. (2017), kteří tvrdí, že lepších výsledků je dosahováno na plochách s maximálně 50% rozvolněné vysoké vegetace a s více procenty se bude odhad zhoršovat.

Vysoké hodnoty CHM z UAS na severním okraji oblasti mohou být způsobeny vzrostlejší porostem, který při LiDARovém náletu nedosahoval takové výšky nebo se může jednat o interpolační chybu. To může společně s místem v severovýchodním rohu oblasti, kde chybí data letního náletu, negativně ovlivňovat model. Na krabicovém grafu má UAS je několik odlehlých hodnot, které se zdají jako chyby. Se zvětšujícím se rozlišením ale body přibývají, takže by se mohlo jednat také o osamocené vyšší vrcholy stromů. Při rozlišení 1 metr jsou plochy vegetace výrazně spojitější u UAS, zatímco u LiDARu jsou koruny stromů více roztrhané a mají ostřejší hrany. To může být dáno menším počtem bodů na metr u LiDARu. Nárůst ploch s minimálními hodnotami během zvětšování rozlišení, je způsoben velikostí buněk, kdy

jsou při méně podrobném rozlišení průměrovány větší vzdálenosti a vysoké hodnoty zasahující do buňky zvyšují její výslednou hodnotu. Odchylky jsou nejmenší právě při nejméně podrobném rozlišení, modely se nejvíce shodují, ale je vidět že s podrobnějším rozlišením dochází k mírnému nadhodnocování modelu z UAS a zvyšování průměrné výšky. Na grafu nedosahují hranice spodních kvartilů v žádném rozlišení hodnoty nula, jako je tomu u LiDARu. Zároveň je na většině nejnižších ploch na rastru UAS vidět světlejší barva, a proto vyšší hodnota než na modelu z LiDARu. To může být způsobeno opět spojením letního a zimního mračna, kdy je za terén považován pouze terén klasifikovaný v zimním mračnu. Původní terén v letním mračnu, tak může představovat vzrostlou travu a nižší rostliny, které mohou mírně zvyšovat výšku. Podobné vlastnosti v případě UAS na plochách s nízkou vegetací popisují i Jensen et Mathews (2016) a Hugenholtz et al. (2013), kterým docházelo k nadhodnocování výšky terénu ve výsledném modelu při srovnání s LiDAREm. Ti předpokládají, že vegetace má obecně vliv na nadhodnocování výšek modelu z UAS. I když odchylky byly minimální, většina bodů v mračnu z UAS byla oproti kontrolním bodům nadhodnocena. Na plochách s nízkou vegetací tak docházelo interpolací k zvýšení celé plochy.

## **7 Závěr**

V práci byla zhodnocena nahraditelnost dat leteckého laserového skenování daty získanými kombinací fotogrammetrie pomocí bezpilotních letounů z dvou ročních období (léto, zima). Pro zájmovou oblast, která se nachází jihovýchodně od obce Horní Jiřetín, nedaleko od města Most, byly vytvořeny modely výšky vegetace z obou datových sad ve čtyřech rozlišeních a to 10, 5, 2 a 1 metr. Na třech vybraných menších čtvercových územích se stejnou velikostí, ale s rozdílnými vlastnostmi byly modelovány vertikální charakteristiky vegetace (průměrná výška, maximální výška, směrodatná odchylka) opět pro obě metody ve stejných rozlišeních a byly vytvořeny vertikální profily mračen. Výstupy byly následně navzájem srovnávány. Obecně bylo nejlepší shody dosaženo u rozlišení 10 m a s podrobnějším rozlišením se rozdíly mezi metodami zvětšovaly. Nejlepší shody v případě charakteristik vegetace bylo dosaženo při odhadu maximální výšky v méně podrobných měřítkách, naopak nejhorší celkově při odhadu směrodatné odchylky. Vertikální profily obou mračen si byly velmi podobné a procentuálně se v jednotlivých intervalech relativně shodovaly i přes

výrazný rozdíl v počtu bodů. Modely výšky vegetace vykazovali podobný trend zvyšování rozdílů s podrobnějším rozlišením, ale celkové chyby narůstali v menších intervalech. Model z bezpilotních letounů měl většinu hodnot mírně nadhodnocenou oproti laserovému skenování ve všech rozlišeních, ale v přijatelné míře. Data získaná fotogrammetrií pomocí bezpilotních letounů jsou tedy dostatečně kvalitní alternativou k leteckému laserovému skenování. Ideálním se ukázalo rozlišení 10 metrů, relativně dobrá shoda byla i u rozlišení 5 metrů. U podrobnějších rozlišení jsou rozdíly už hodně výrazné. Nejlepších shody bylo dosaženo na druhém území (Step) a dá se proto předpokládat, že lepších výsledků bude dosahováno na plochách s menším množstvím vysoké vegetace a s jejím přibýváním se budou chyby v odhadech zvětšovat. Podobných výsledků dosahovali i všechny srovnávané studie. Přesnost bodových mračen na bázi UAV byla vysoká a lze je tak považovat za spolehlivé pro různé úkoly týkající se horizontálních a vertikálních měření lesních podmínek. Při volbě metody skenování je ale vždy potřeba správně posoudit danou situaci a k jakému účelu budou data použity, aby bylo dosaženo potřebné kvality a aby ani náklady na pořízení dat nebyly zbytečně vysoké.

## 8 Přehled literatury a použitých zdrojů

AEROBETRICS, 2017: Easystar II kit, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <[https://aerobertics.be/nl\\_be/easystar-ii-kit-mpx214260](https://aerobertics.be/nl_be/easystar-ii-kit-mpx214260)>

AGISOFT, 2018: PhotoScan — photogrammetric processing of digital images and 3D spatial data generation, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<http://www.agisoft.com/>>

CANIS, Bill, 2015. Unmanned Aircraft Systems (UAS): Commercial Outlook for a New Industry. Congressional Research Service, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<https://fas.org/sgp/crs/misc/R44192.pdf>>

COLOMINA, I. et P. MOLINA, 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 92, 79–97.

DANDOIS, Jonathan P. et Erle C. ELLIS, 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*. 136, 259–276.

DASSOT, Mathieu, Thiéry CONSTANT et Meriem FOURNIER, 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*. 68(5), 959–974.

DAYAMIT, O. M., M. F. PEDRO, R. R. ERNESTO et B. L. FERNANDO, 2015. Digital elevation model from non-metric camera in UAS compared with LIDAR technology. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 40, 411–414.

DE SILVA, Varuna, Jamie ROCHE et Ahmet KONDOZ, 2018. Fusion of LiDAR and camera data for environmental sensing in driveless vehicles, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1710/1710.06230.pdf>

DEWITT, Jessica D., Timothy A. WARNER, Peter G. CHIRICO et Sarah E. BERGSTRESSER, 2017. Creating high-resolution bare-earth digital elevation models (DEMs) from stereo imagery in an area of densely vegetated deciduous forest using combinations of procedures designed for lidar point cloud filtering. *GIScience and Remote Sensing*. 54(4), 552–572.

DOLEŽALOVÁ, Jana, Jiří VOJAR et Milič SOLSKÝ, 2012. Využití sukcesních ploch při rekultivaci území ovlivněných těžbou. *Ochrana přírody*. 5, 10–13.

FAHLSTROM, Paul. Gerin. et Thomas. James. GLEASON, 2012. Introduction to UAV systems. New Delhi, India: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 9781119978664.

FERNÁNDEZ-LOZANO, Javier, Gabriel GUTIÉRREZ-ALONSO et Miguel Ángel FERNÁNDEZ-MORÁN, 2015: Using airborne LiDAR sensing technology and aerial orthoimages to unravel roman water supply systems and gold works in NW Spain (Eria valley, León). *Journal of Archaeological Science*. 53, 356–373.

GEAVIS, 2016: What UAV to choose? Fixed wing or rotary drone?, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<https://www.geavis.si/en/2016/01/what-uav-to-choose-fixed-wing-or-rotary-drone/>>

GEOIMAGE, 2017: Dems Overview, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <[https://www.geoimage.com.au/\\_blog/News/post/high-demand-for-digital-elevation-models-from-satellite/](https://www.geoimage.com.au/_blog/News/post/high-demand-for-digital-elevation-models-from-satellite/)>

GOODCHILD, Michael F., 2011: Scale in GIS: An overview. *Geomorphology*. 130(1–2), 5–9.

HAALA, N., M. CRAMER et M. ROTHERMEL, 2013: Quality of 3D Point Clouds From Highly Overlapping Uav Imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XL-1/W2, 183-188.

HAMILTON, Scott et Jason STEPHENSON, 2017: Archaeological case studies of drone photography and photogrammetry, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <[https://www.researchgate.net/publication/315736037\\_Archaeological\\_case\\_studies\\_of\\_drone\\_photography\\_and\\_photogrammetry](https://www.researchgate.net/publication/315736037_Archaeological_case_studies_of_drone_photography_and_photogrammetry)>

HANUŠ, J., T. FABIÁNEK et L. FAJMON, 2016: Potential of airborne imaging spectroscopy at CzechGlobe. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. XLI-B1, 15–17.

HANUŠ, J., T. FABIÁNEK et L. FAJMON, 2016: Souhrnná výzkumná zpráva, Horní Jiřetín. 24 s. „nepublikováno“, Dep. FŽP ČZU

HAWRYŁO, Paweł, Piotr TOMPALSKI et Piotr WĘZYK, 2017: Area-based estimation of growing stock volume in Scots pine stands using ALS and airborne image-based point clouds. Forestry. 90, 686–696.

HIPPENSTIEL, R et J R S BROWNSON, 2012: Computing solar energy potential of urban areas using airborne lidar and orthoimagery. World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen. 3 1-5.

HODGSON, Michael E, John JENSEN, George RABER, Jason TULLIS, Bruce A DAVIS, Gary THOMPSON et Karen SCHUCKMAN, 2005: An Evaluation of Lidar-derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 71, 817–823.

HONKAVAARA, E., T. HAKALA, L. MARKELIN, A. JAAKKOLA, H. SAARI, H. OJANEN, I. POLONEN, S. TUOMINEN, R. NASI, T. ROSNELL et N. VILJANEN, 2014: Autonomous hyperspectral UAS photogrammetry for environmental monitoring applications. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. 40, 155–159.



HUGENHOLTZ, Chris H., Ken WHITEHEAD, Owen W. BROWN, Thomas E. BARCHYN, Brian J. MOORMAN, Adam LECLAIR, Kevin RIDDELL et Taylor HAMILTON, 2013: Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*. 194, 16–24.

HUNTER, M. O., M. KELLER, D. VICTORIA a D. C. MORTON, 2013: Tree height and tropical forest biomass estimation. *Biogeosciences*. 10(12), 8385–8399.

JAYATHUNGA, Sadeepa, Toshiaki OWARI et Satoshi TSUYUKI, 2018: The use of fixed-wing UAV photogrammetry with LiDAR DTM to estimate merchantable volume and carbon stock in living biomass over a mixed conifer-broadleaf forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 73, 767–777.

JENSEN, Jennifer L R et Adam J. MATHEWS, 2016: Assessment of image-based point cloud products to generate a bare earth surface and estimate canopy heights in a woodland ecosystem. *Remote Sensing*. 8(1), 50-63.

JOHNSON, Kendra, Edwin NISSEN, Srikanth SARIPALLI, J. Ramón ARROWSMITH, Patrick MCGAREY, Katherine SCHARER, Patrick WILLIAMS et Kimberly BLISNIUK, 2014: Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere*. 10(5), 969–986.

JOZKOW, G., C. TOTH et D. GREJNER-BRZEZINSKA, 2016: UAS TOPOGRAPHIC MAPPING with VELODYNE LiDAR SENSOR. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 3(1), 201–208.

KHOSRAVIPOUR, Anahita, Andrew K. SKIDMORE, Martin ISENBURG, Tiejun WANG et Yousif A. HUSSIN, 2014: Generating Pit-free Canopy Height Models from Airborne Lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 80(9), 863–872.

LALIBERTE, Andrea S., Jeffrey E. HERRICK, Albert RANGO et Craig WINTERS, 2010: Acquisition, Orthorectification, and Object-based Classification of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Rangeland Monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 76(6), 661–672.

LISEIN, Jonathan, Marc PIERROT-DESEILLIGNY, Stéphanie BONNET et Philippe LEJEUNE, 2013: A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*. 4(4), 922–944.

LOWE, David. G., 1999: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In: *Proc. of the international Conference on Computer Vision, Corfu*. ISBN 0-7695-0164-8.

MADER, D., R. BLASKOW, P. WESTFELD et H. G. MAAS, 2015: UAV-Based acquisition of 3D point cloud - A comparison of a low-cost laser scanner and SFM-tools. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 40, 335–341.

MALLET, Clément et Frédéric BRETAR, 2009: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 64(1), 1–16.

MANCINI, Francesco, Marco DUBBINI, Mario GATTELLI, Francesco STECCHI, Stefano FABBRI et Giovanni GABBIANELLI, 2013: Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*. 5(12), 6880–6898.

MICHELETTI, Natan, J. H. CHANDLER et S. N. LANE, 2015: Structure from motion (SFM) photogrammetry. In: *Geomorphological Techniques (Online Edition)*. London: British Society for Geomorphology, 303–334.

MICHEZ, Adrien, 2016: Caractérisation Multi-Échelle Des Bandes Riveraines Des Cours D ' Eau Wallons Par Té Lédétection Active Et Passive. *Université de liège - Gembloux agro-bio tech*, s. 159.

MIKITA, Tomáš, Přemysl JANATA et Peter SUROVÝ, 2016: Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*. 7(8), 1–14.

MLAMBO, Reason, Iain H. WOODHOUSE, France GERARD et Karen ANDERSON, 2017: Structure from motion (SfM) photogrammetry with drone data: A low cost method for monitoring greenhouse gas emissions from forests in developing countries. *Forests*. 8(3), 1–20.

PANAGIOTIDIS, Dimitrios, Azadeh ABDOLLAHNEJAD, Peter SUROVÝ et Vasco CHITECULO, 2017: Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 38(8–10), 2392–2410.

PECHANEC, Vilém, Aleš VÁVRA et Ivo MACHAR, 2014: Využití UAV technologie pro získávání dat v precizním zemědělství na příkladu ploch s cukrovou řepou. *Listy Cukrovarnické a Řepářské*. 130(5–6), 162–165.

RAIROUX, P., H. SCHILLINGER, S. NIEDERMEIER, M. RODRIGUEZ, F. RONNEBERGER, R. SAUERBREY, B. STEIN, D. WAITE, C. WEDEKIND, H. WILLE, L. WÖSTE et C. ZIENER, 2000: Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 71(4), 573–580.

RAPIDLASSO, 2014): Rasterizing Perfect Canopy Height Models from LiDAR, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<https://rapidlasso.com/2014/11/04/rasterizing-perfect-canopy-height-models-from-lidar/>>

RAPIDLASSO, 2018: LAStools, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<https://rapidlasso.com/lastools/>>

R-PROJECT, 2018: The R Project for Statistical Computing, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<https://www.r-project.org/>>

SHERVAIS, K., 2016. Structure from Motion guide for instructors and investigators. (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <[https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/gets/teaching\\_materials/high-rez-topo/sfm\\_guide\\_instructors\\_investigators.pdf](https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/gets/teaching_materials/high-rez-topo/sfm_guide_instructors_investigators.pdf)>

THEIA, 2016: Structure from Motion (SfM), (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<http://theia-sfm.org/sfm.html>>

TOMAŠTÍK, Julián, Martin MOKROŠ, Simon SALOŠ, František CHUDÝ et Daniel TUNÁK, 2017: Accuracy of photogrammetric UAV-based point clouds under conditions of partially-open forest canopy. *Forests*. 8(5), 1–16.

TWIDWELL, Dirac, Craig R. ALLEN, Carrick DETWEILER, James HIGGINS, Christian LANEY et Sebastian ELBAUM, 2016: Smokey comes of age: unmanned aerial systems for fire management. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 14(6), 333–339.

ULLAH, Sami, Petra ADLER, Matthias DEES et Barbara KOCH, 2015. Evaluating the Potential of Stereo Aerial Photographs for Canopy Height Model Generation. *Forstliche Forschungsberichte München*: (214), 83–90.

UNIVERSITAAT GENT, 2018: Sporen van de oorlog en laser scanning, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<http://www.wol.ugent.be/nl/voorbeelden/sporen-van-de-oorlog-vandaag-en-laser-scanning/>>

VISUALSFM, 2018: A Visual Structure from Motion System, (online) [cit. 2018.12.10], dostupné z: <<http://ccwu.me/vsfm/>>

WEHR, Aloysius a Uwe LOHR, 1999: Airbornelaser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 54, 68–82.

WESTOBY, M. J., J. BRASINGTON, N. F. GLASSER, M. J. HAMBREY et J. M. REYNOLDS, 2012: „Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 179, 300–314.

WOOD, J.D. Joseph, 1996: The geomorphological characterisation of digital elevation models. Department of Geography, University of Leicester. s. 456.

Zákon č. 49/1997 Sb., zákon o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

ZHEN, Zhen, Lindi J. QUACKENBUSH et Lianjun ZHANG, 2016: Trends in automatic individual tree crown detection and delineation-evolution of LiDAR data. Remote Sensing. 8(4), 1–26.

## **9 Přílohy**

1. Skript pro tvorbu modelu výšky vegetace
2. Tabulka odchylek MEA a RMSE pro vertikální charakteristiky vegetace
3. Grafy vertikálního rozmístění bodů pro maximální výšku
4. Grafy vertikálního rozmístění bodů pro směrodatnou odchylku
5. Rastry horizontálního rozmístění bodů pro maximální výšku
6. Rastry horizontálního rozmístění bodů pro směrodatnou odchylku
7. Model výšky vegetace pro 5 metrů
8. Model výšky vegetace pro 2 metrů
9. Model výšky vegetace pro 1 metry

## Příloha 1. Skript pro tvorbu modelu výšky vegetace (jako příklad pro LiDAR 10 m)

### 1. Vytvoření DTM s nulovou výškou

```
las2dem -i %IN_DIR%\LiDAR_OK.las ^
-drop_z_above 0.1 ^
-step 10 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_ground.bil
```

### 2. Vytvoření zpřesněného souboru s body převedenými na plochu s $r = 10$ cm

```
lasthin -i %IN_DIR%\LiDAR_OK.las ^
-subcircle 0.1 ^
-step 5 ^
-highest ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o temp.laz
```

### 3. Vytvoření úplného DSM

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_00.bil
```

### 4. Vytvoření několika DSM s postupně menším výškovým intervalem a postupně se zvyšující spodní hranicí

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-drop_z_below 2 ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_02.bil
```

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-drop_z_below 10 ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_10.bil
```

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-drop_z_below 15 ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_20.bil
```

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-drop_z_below 5 ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_05.bil
```

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-drop_z_below 15 ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_15.bil
```

```
las2dem -i %OUT_DIR%\temp.laz ^
-drop_z_below 25 ^
-step 10 -kill 20 ^
-odir %OUT_DIR% ^
-o chm_25.bil
```

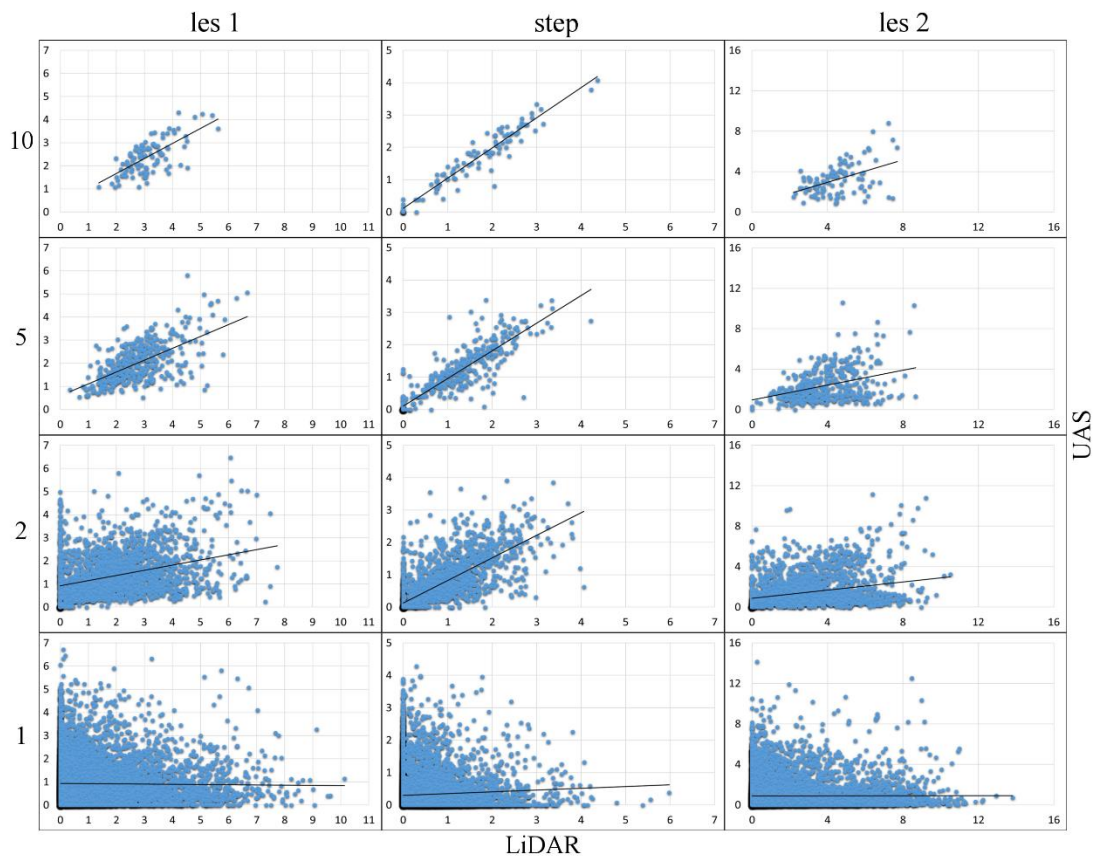
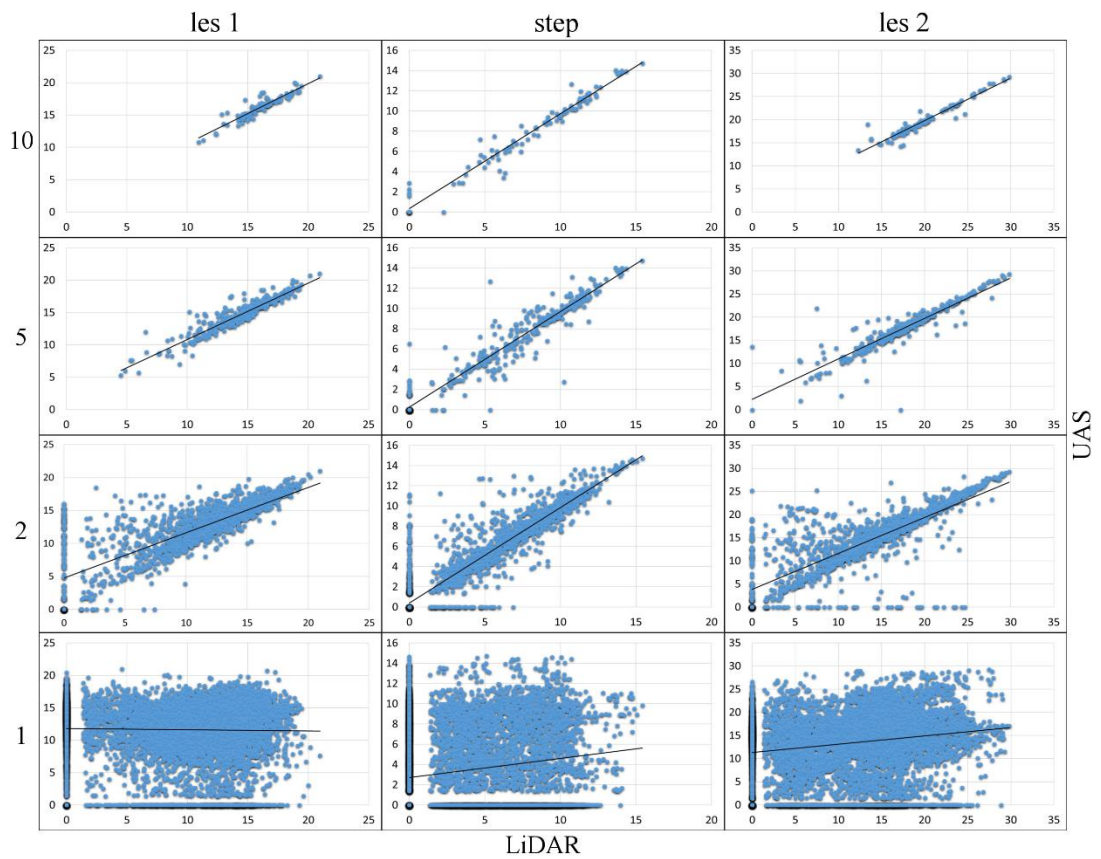
5. Spojení jednotlivých modelů a finální model (A – ve formátu .png, B – ve formátu .bil)

A	B
lasgrid -i %OUT_DIR%\chm*.bil -merged ^	lasgrid -i %OUT_DIR%\chm*.bil -merged ^
-step 10 ^	-step 10 ^
-highest ^	-highest ^
-false -set_min_max 0 25 ^	-odir %OUT_DIR% ^
-odir %OUT_DIR% ^	-o chm_lidar_10.bil
-o chm_lidar_10.png	

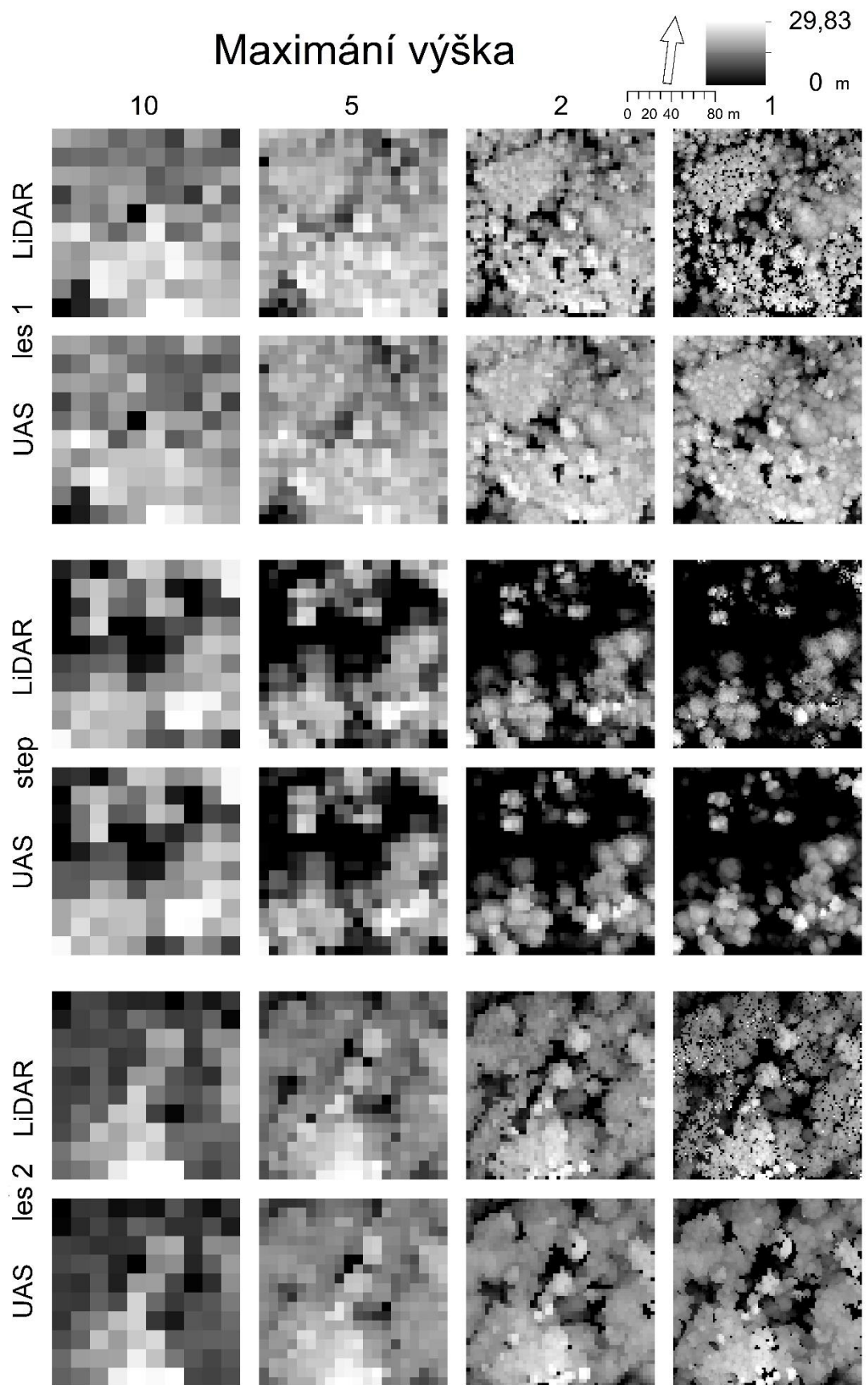
		Les 1		Step		Les 2	
		MEA	RMSE	MEA	RMSE	MEA	RMSE
AVG	10	0,6925	0,8876	0,5071	0,7166	2,0342	2,7761
	5	0,8629	1,2233	0,5063	0,8070	2,2398	3,2050
	2	1,4477	2,3922	0,6055	1,1849	2,6490	4,1289
	1	5,1611	6,7685	2,9406	4,2017	6,2841	8,1612
MAX	10	0,4704	0,7106	0,5870	0,8823	0,5966	1,0401
	5	0,5938	0,9470	0,6513	1,1509	0,8427	1,8764
	2	1,4259	2,7841	0,6697	1,4292	1,6366	3,6222
	1	5,5668	7,4792	3,4282	4,8497	6,5952	8,7548
STD	10	0,7515	0,9440	0,1994	0,2801	1,4798	1,9828
	5	0,8635	1,1270	0,2439	0,4089	1,7875	2,3320
	2	1,0451	1,4641	0,2695	0,4884	1,8146	2,5310
	1	1,1532	1,6646	0,4682	0,7862	1,7894	2,7295

*Příloha 2: Tabulka středních a směrodatných odchylek pro jednotlivá území a rozlišení pro průměrnou výšku, maximální výšku a směrodatnou odchylku*

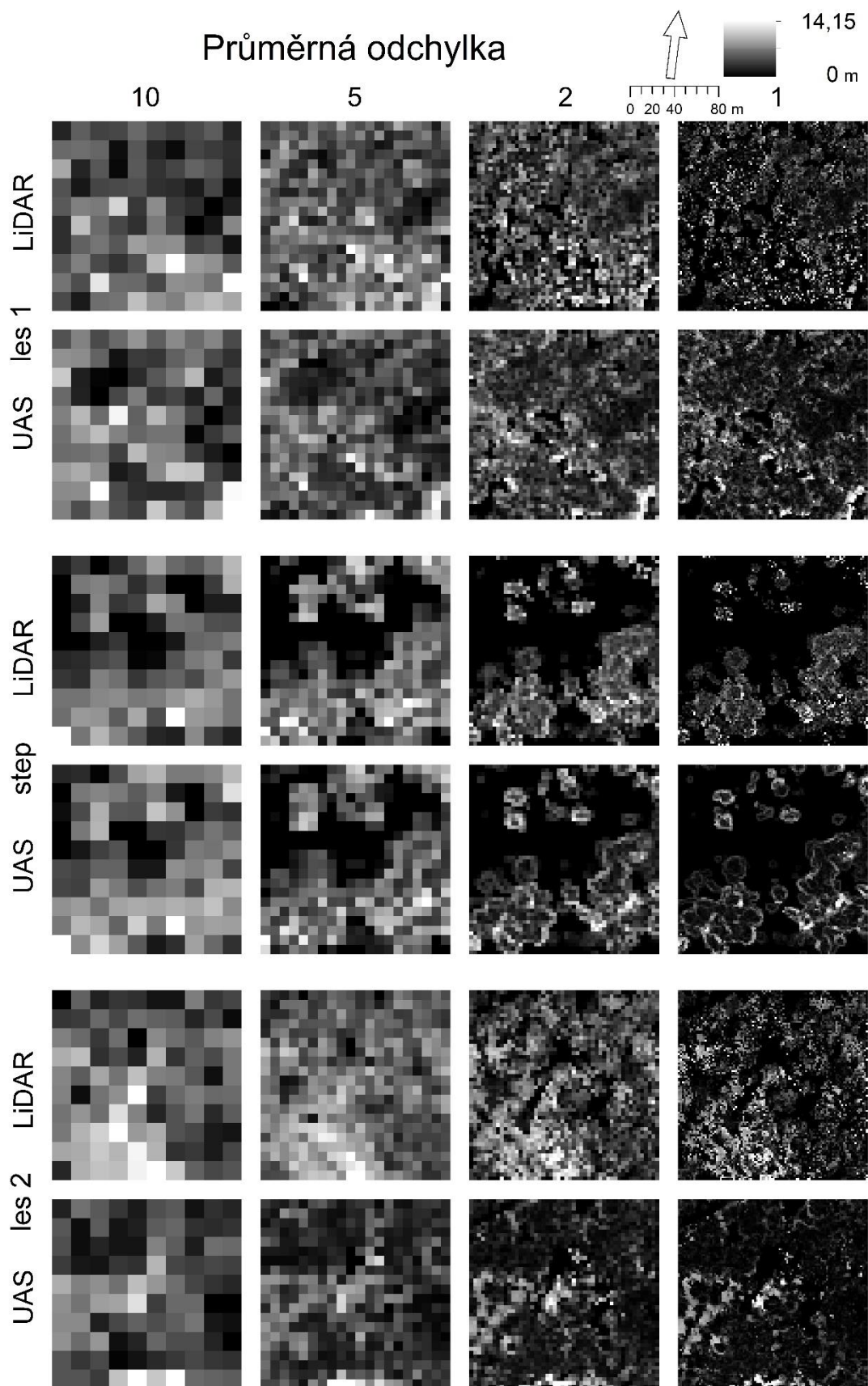




*Příloha 3 (nahore) Graf znázorňující bodové mračno maximální výšky jednotlivých území a jejich rozmístění při rostoucím rozlišení, příloha 4 (dole): Stejný graf pro směrodatnou odchylku (v metrech)*



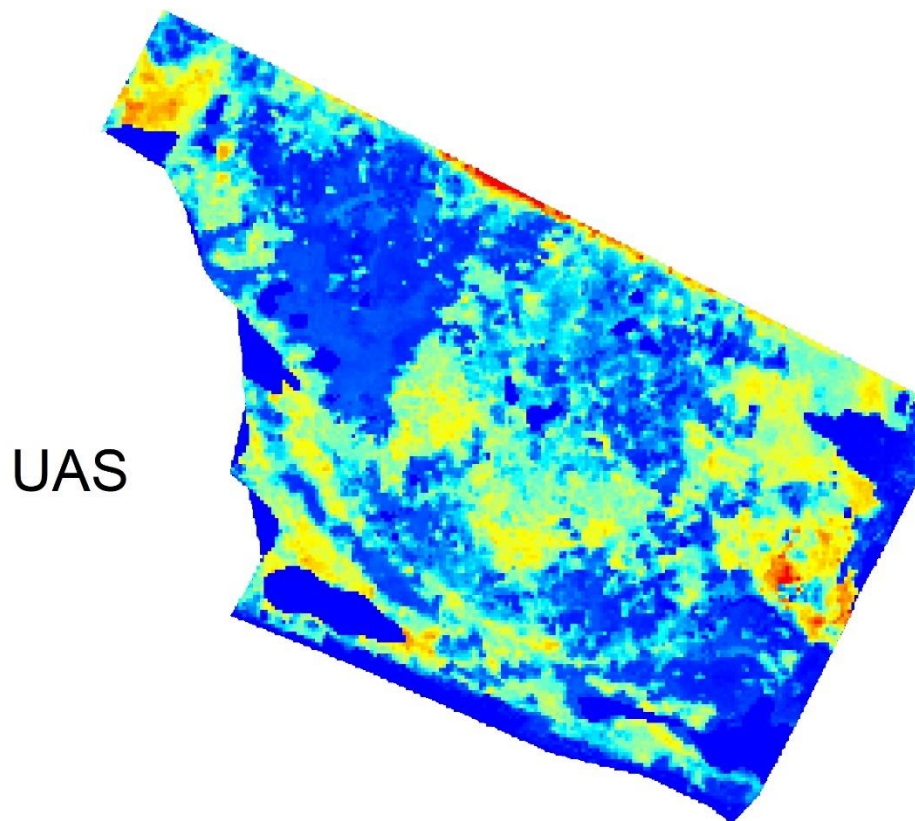
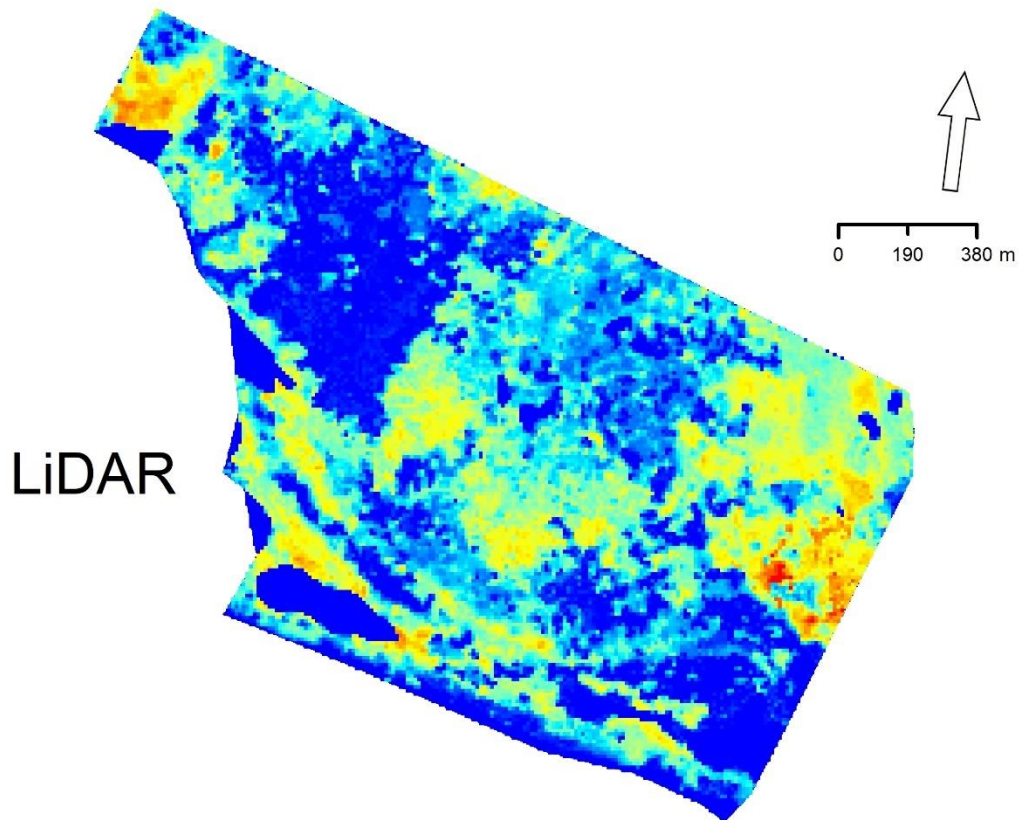
*Příloha 5: Rastry maximálních výšek vegetace v metrech. Sloupce znázorňují jednotlivá rozlišení, dvojice řad vždy obě použité metody pro jednotlivé území.*



*Příloha 6: Rastry průměrných odchylek vegetace v metrech. Sloupce znázorňují jednotlivá rozlišení, dvojice řad vždy obě použité metody pro jednotlivé území.*

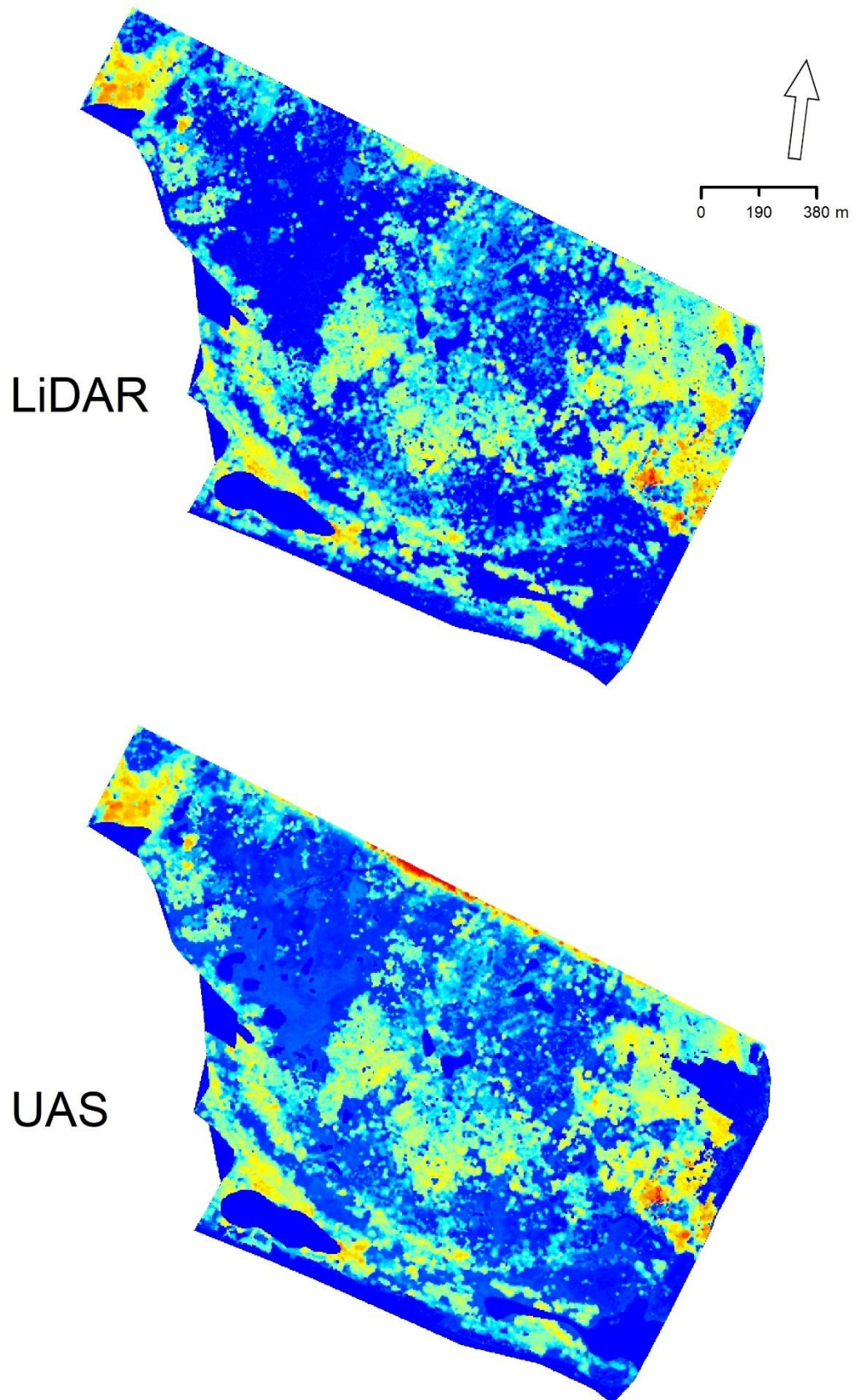


# Model výšky vegetace pro 5 m



*Příloha 7: Modely výšky vegetace pro 5 m*

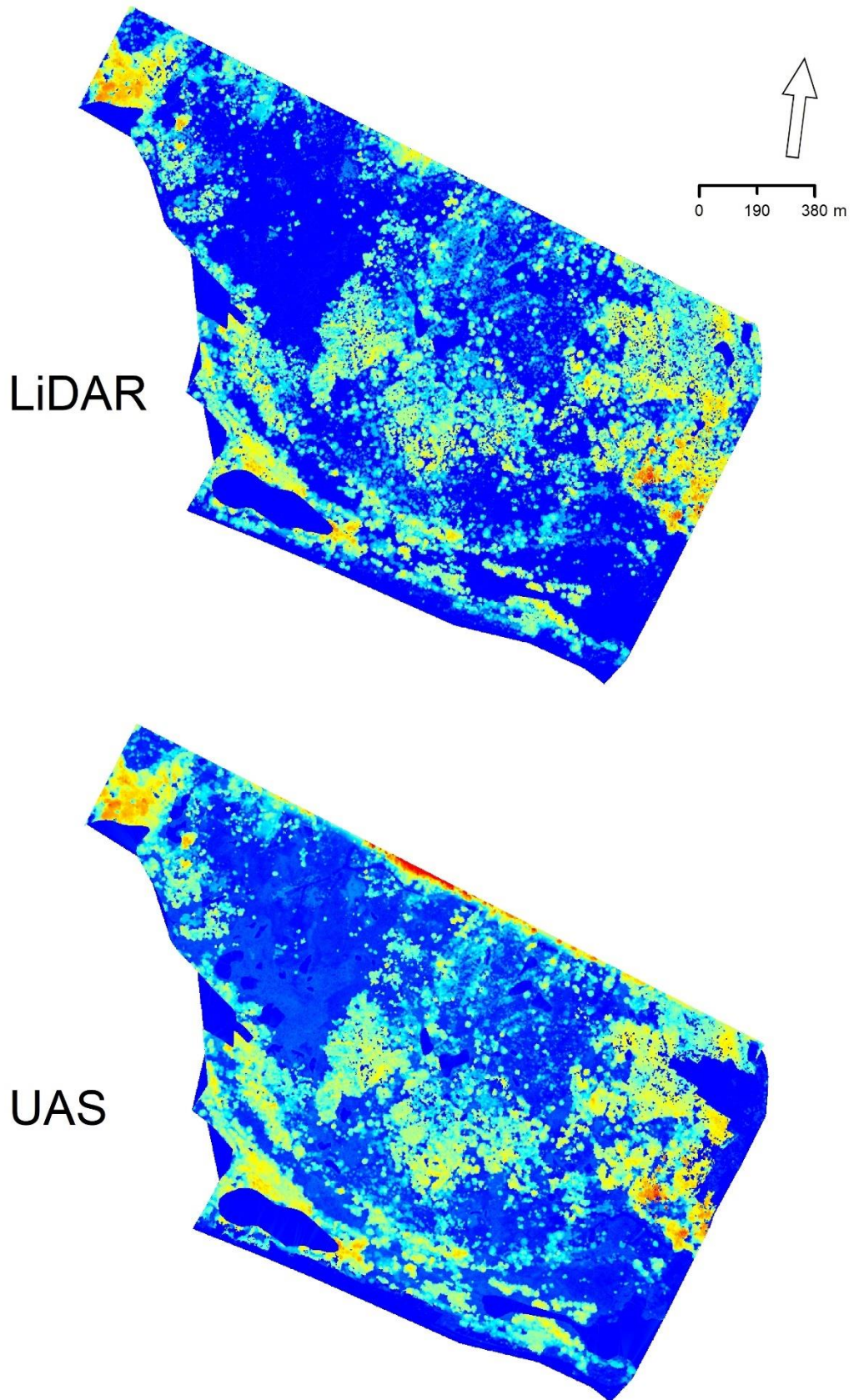
# Model výšky vegetace pro 2 m



*Příloha 8: Modely výšky vegetace pro 2 m*



# Model výšky vegetace pro 1 m



*Příloha 9: Modely výšky vegetace pro 1 m*