

Česká zemědělská univerzita
Fakulta životního prostředí
Katedra prostorových věd

Obor: Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země

**Vyhodnocení filtrace bodových
mračen z UAV laserového
skenování**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Tomáš Zámek

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

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Zámek

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Vyhodnocení filtrace bodových mračen z UAV laserového skenování

Název anglicky

Assessment of ground filtering of point clouds from UAV-LiDAR

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je posoudit přesnost filtrace bodových mračen získaných laserovým skenováním z bezpilotního prostředku.

Formulace dílčích cílů je úkolem autora.

Metodika

Filtrace odrazů reprezentujících zemský povrch od ostatních odrazů (vegetace, budovy) je základním krokem pro všechny environmentální aplikace využívající bodová mračna získaná laserovým skenováním (LiDAR). V současné době je běžné umísťovat specializované laserové skenery na bezpilotní prostředky, které sice nepokryjí rozsáhlé území jako letecké laserové skenování, ale poskytují hustší a detailnější bodová mračna. Nicméně, dostupné filtrační algoritmy byly navrženy pro filtraci bodových mračen z leteckého laserového skenování a jejich vhodnost pro filtraci hustých mračen nebyla doposud příliš testována. Úkolem autora je vyhodnotit dva vybrané filtrační algoritmy pro filtraci bodového mračna získaného laserovým skenováním z bezpilotního prostředku. Náplní literární rešerše budou zejména principy laserového skenování.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Klápště, P., Fogl, M., Barták, V., Gdulová, K., Urban, R., & Moudrý, V. (2020). Sensitivity analysis of parameters and contrasting performance of ground filtering algorithms with UAV photogrammetry-based and LiDAR point clouds. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1672-1694.
- Meng, X., Currit, N., & Zhao, K. (2010). Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2(3), 833-860.
- Mongus, D., & Žalik, B. (2012). Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 1-12.
- Moudrý, V., Klápště, P., Fogl, M., Gdulová, K., Barták, V., & Urban, R. (2020). Assessment of LiDAR ground filtering algorithms for determining ground surface of non-natural terrain overgrown with forest and steppe vegetation. *Measurement*, 150, 107047.
- Sithole, G., & Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 59(1-2), 85-101.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501.
-

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 2. 2021

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 15. 03. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vyhodnocení filtrace bodových mračen z UAV laserového skenování vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 31. března 2021

.....
Jméno a příjmení studenta

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za odborné vedení, podněty k zamyšlení a cenné rady při zpracování této práce.

Zvláště chci poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě během práce podporovali a kontrolovali gramatiku.

Abstrakt

Většina algoritmů je navržena pro filtrování bodových mračen pořízených leteckým laserovým skenováním (LiDAR). Filtrace bodů je nezbytným krokem k vygenerování digitálních výškových modelů. Cílem bakalářské práce bylo porovnat dva programy (LAStools a ArcMap), respektive filtrační algoritmy v nich implementované a posoudit, zda jsou vhodné i pro zpracování bodových mračen z UAV. Algoritmy dosáhly ve studované oblasti dobrých výsledků. Na přesnost mělo největší vliv nastavení přizpůsobující se typu krajinného pokryvu. Oba algoritmy měly větší tendenci způsobovat chyby 1. druhu. Výsledky také ukázaly, že algoritmy dosahují dostatečné přesnosti i u dat pořízených UAV. Progresivní TIN implementovaný v LAStools na rozdíl algoritmu implementovaný v ArcMapu, dosahoval relativně konzistentní přesnosti.

Klíčová slova:

Dálkový průzkum Země, LiDAR, UAV, filtrace bodových mračen, digitální výškové modely

Abstract

Most algorithms are designed for filtering by airborne laser scanning (LiDAR). Filtration of point clouds is a necessary step to generate digital elevation models. The aim of this bachelor thesis was to compare two softwares (LAStools and ArcMap), including filtering algorithms and found out, if they are suitable for processing data by UAV. Algorithms have achieved good results in the study area. Precision was most influenced by the adjustment of land cover category. Both algorithms tended to cause Error type 1. The results also proved that algorithms achieved sufficient accuracy even for UAV data. Progressive TIN implemented in LAStools, unlike ArcMap's algorithm, achieved relatively consistent accuracy.

Keywords:

Remote sensing, LiDAR, UAV, point cloud filtering, digital elevation models

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Literární rešerše.....	2
2.1 Úvod.....	2
2.2 Princip měření LiDAR senzoru.....	3
2.3 Rozdělení a bezpečnost senzorů.....	3
2.4 Způsob pořizování dat.....	4
2.5 Formát a využití dat.....	6
2.6 Filtrace pomocí algoritmů.....	6
3. Metodika.....	8
3.1 Studijní oblast.....	8
3.2 Sběr dat.....	9
3.3 Referenční data.....	10
3.4 Filtrace bodových mračen.....	12
3.5 Kvantitativní validace.....	14
4. Výsledky.....	16
4.1 LAStools.....	16
4.2 ArcMap.....	17
4.3 Kvantitativní porovnání přesnosti algoritmů.....	18
5. Diskuse.....	20
5.1 Porovnání programů.....	20
5.2 Vhodnost algoritmů k datům pořízeným UAV.....	21
5.3 Validace a validační data.....	21
5.4 Chyba 1. druhu versus chyba 2. druhu.....	22
5.5 Kvalitativní porovnání přesnosti algoritmů.....	23
5.6 Metody LiDAR a SfM.....	24
5.7 Závěr diskuse.....	24
6. Závěr.....	25
7. Přehled literatury a použitých zdrojů.....	26

Přehled použitých zkratk

GIS	Geografické informační systémy
LiDAR	Light Detection And Ranging
ALS	Letecké laserové skenování
TLS	Terestrické laserové skenování
ULS	Bezpilotní letecké skenování
UAV	Bezpilotní letadlo
GNSS	Globální navigační satelitní systém
IMU	Inerciální měřicí jednotka
DEM	Digitální výškový model
DTM	Digitální model terénu
DSM	Digitální model povrchu
CHM	Canopy height model
TIN	Nepravidelná trojúhelníková síť
SfM	Structure from motion

1. Úvod

Zachycení zemského povrchu a předmětů na něm, bylo vždy důležitým cílem lidstva. Na světě existují spousty různých metod a nástrojů, které dokážou pořídit a následně reprezentovat věrohodný model povrchu Země. Jednou z technologií, která v poslední době ukázala velký potenciál, je kombinace bezpilotních systémů (UAV) spolu se senzory LiDAR (Light Detection And Ranging). Metoda LiDAR spojená s nosičem UAV nabízí pořízení dat s velkou hustotou a vysokou přesností. Oblast je tedy podrobně pokryta naměřenými body a umožňuje detailněji zaznamenat průběh terénu. Pořízené body jsou poté díky algoritmům filtrovány do příslušných kategorií. Na základě toho mohou být z mračen vygenerovány základní výškové modely.

Pro tvorbu digitálních výškových modelů představuje největší problém manuální klasifikace (filtrování) a kontrola přesnosti (Sithole & Vosselman, 2004). Samotnou filtrací se rozumí rozdělení bodového mračka na body reprezentující zemi a na ostatní body (budovy, vegetace apod.). V dnešní době existují desítky filtračních algoritmů, které pracují na různých principech a tím přináší odlišné výsledky. Avšak jednu věc mají existující algoritmy společnou, byly designovány pro mračka pořízená z leteckého laserového skenování (Zhang, et al., 2003; Meng, et al., 2009; Susaki, 2012). Mračka pořízená UAV mají odlišné charakteristiky (zejména výrazně vyšší hustotu bodového mračka, která může být spojena i s větší koncentrací chybných měření) a není jasné, jaký vliv budou mít tyto vlastnosti na kvalitu filtrace.

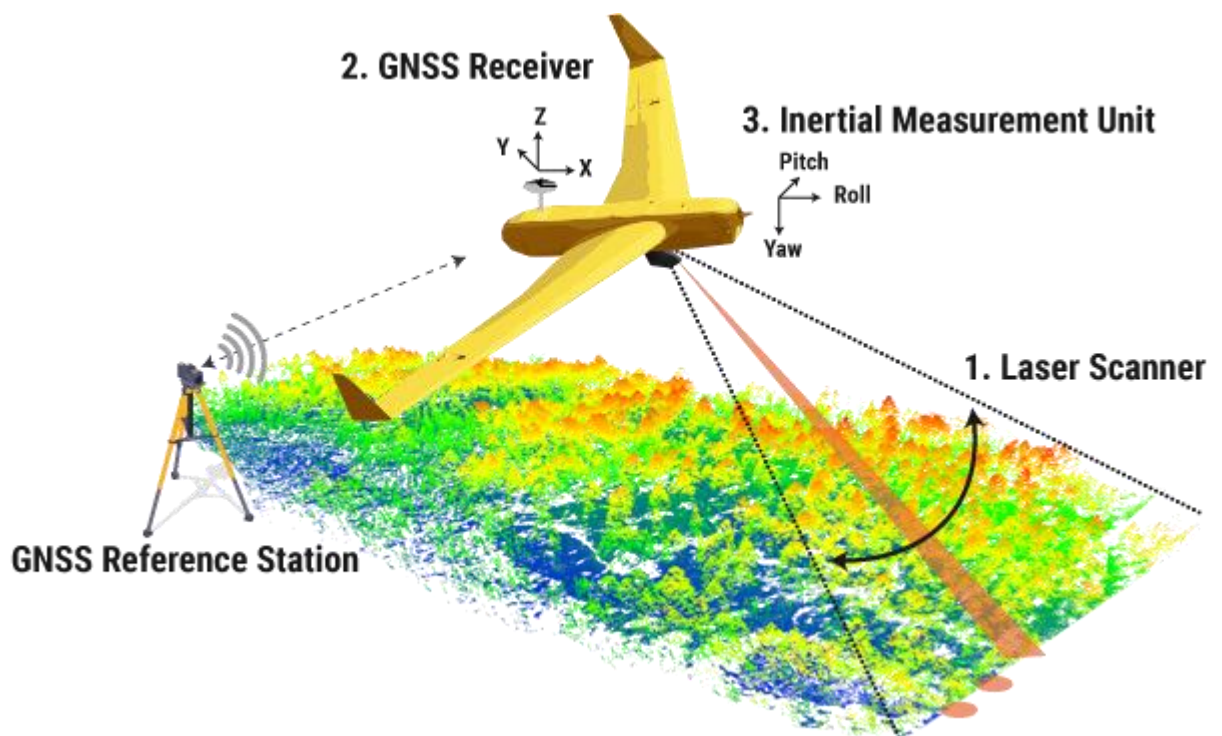
V současnosti jsou dostupné různé programy, které nabízejí nástroje pro filtraci bodových mračen. V této práci jsem se zaměřil na dva odlišné algoritmy implementované ve dvou programech. První z nich je software LAStools, který patří k nejrozšířenějším a nejoblíbenějším programům pro práci s bodovými mračky. Druhý je všeobecně známý a rozšířený GIS software ArcMap od firmy Esri.

Hlavním cílem práce je ověřit, zda jsou existující filtrační algoritmy vhodné pro filtraci dat pořízených z UAV. Dále vyhodnotit s jakou přesností algoritmy filtrují bodová mračka a porovnat kvalitu filtrace v softwarech LAStools a ArcMap. Tyto poznatky pomůžou uživatelům, kteří vyžadují přesné výškové modely terénu s výběrem softwaru.

2. Literární rešerše

2.1 Úvod

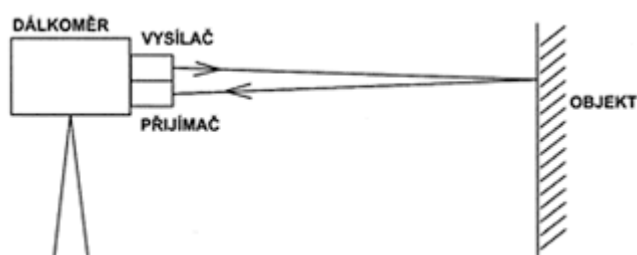
LiDAR (Light Detection And Ranging, také LADAR) je metoda dálkového průzkumu Země, která se v současnosti spolu s fotogrammetrií stala hlavním nástrojem pro pořizování výškových informací z předmětů na zemském povrchu. Pod pojmem LiDAR si můžeme představit skener vysílající laserové pulsy, které ve spojení s technologiemi GNSS (Global Navigation Satellite System – Globální družicový polohový systém) a IMU (Inertial Measurement Unit - Inerciální měřicí jednotka) dokáží pořizovat data s vysokou přesností a velkou hustotou. Celý systém je vyobrazen a popsán na Obr. 1. Výhody metody LiDAR oproti klasické fotogrammetrii je schopnost proniknout skrz mezery ve vegetaci a vodu. Tudiž lze mapovat terén i pod vodní hladinou nebo například hustým lesem. Dále můžeme vyzdvihnout vyšší přesnost, laserového skenování oproti fotogrammetrii ve výšce se pohybujeme přibližně o 15 cm a v planimetrii o 1 m ve prospěch LiDARU (Baltsavias, 1999).



Obr. 1 – Struktura systému LiDAR v kombinaci s UAV

2.2 Princip měření LiDAR senzoru

Senzor LiDAR (skener) pracuje na principu pulzního dálkoměru. Počítá časový interval (dobu), za který se laserový paprsek odrazí a navrátí zpět do laserového skeneru. Pulsy (paprsky) jsou vysílány v obrovském počtu každou vteřinu a senzor detekuje vracející se impulsy a zaznamenává časový interval měřící délku letu laserového pulsu na zem a zpět do skeneru. Obr. 2 znázorňuje princip pulzního dálkoměru. Vzdálenost mezi laserovým skenerem a zemí následně vypočítá na základě rychlosti světla, kterou se impuls šíří (USGS, ©usgs 2021). Kombinace s měřením GNSS a IMU, které dodají aktuální polohu a orientaci tělesa, na kterém je senzor upevněn, je vypočítána poloha jednotlivých bodů. Výsledná naměřená data ve formě jednotlivých bodů jsou známa jako bodová mračna (point cloud).



Obr. 2 – Princip pulzního dálkoměru

2.3 Rozdělení a bezpečnost senzorů

LiDAR skenery lze rozlišovat podle vlnové délky vysílaných paprsků. Většina stávajících senzorů LiDAR používaných pro mapování topografie, pracuje obvykle s blízkým infračerveným (NIR) nebo infračerveným (IR) laserem s vlnovými délkami 1064 nm nebo 1550 nm (Yan, et al., 2019). V praxi můžeme nalézt i další senzory s odlišnou vlnovou délkou. Pro mapování ledovců byla shledána jako ideální varianta vlnová délka 810 nm (Wehr & Lohr, 1999). Autonomní vozidla pracují nejčastěji s délkou vlny 905 nm (Rablau, 2019) a pro batymetrická měření se používají hodnoty kolem 530 nm (Baltsavias, 1999). Lasery s vlnovou délkou do 1400 nm spadají do 1. kategorie bezpečnosti. Obecně proti tomuto typu je lidské oko odolné a LiDAR je naprosto bezpečnou technologií. (Mial, 2019). Kombinace hlavně nízkého výkonu, rychlého šíření, úhlu divergence, směru expozice a době trvání vyslaného pulzu, jej činí bezpečnou pro lidské oko (Pei, 2019).

2.4 Způsob pořizování dat

V praxi rozlišujeme několik způsobů pořizování dat metodou LiDAR a to podle nosiče, na kterém je senzor upevněn. U nejběžnější varianty, zvanou letecké skenování (ALS – Airborne Lidar Scanning), je nosičem senzoru pilotovaný letoun např. letadlo na Obr. 3, vrtulník nebo bezpilotní letecký systém (Unmanned Aerial Vehicle – UAV). V některých studiích se můžeme setkat s označením ULS (UAV-borne laser scanning) a bývá separována jako samostatná varianta (Wieser, et al., 2016). ALS je obecně schopná pořizovat data na rozsáhlém území. Zde můžeme najít několik odlišností, odvíjející se od konkrétního prostředku. Například hustota bodů se u letadel pohybuje mezi 1 až 10 body/m², naopak u UAV se hustota může pohybovat až kolem stovek bodů na m² a více. Vše závisí na letové výšce, úhlu skenování a zvláště pak, na naplánované letové trase (Brede, et al., 2017). Rozdíl můžeme pozorovat i u území, které je prostředek schopno pokrýt v závislosti na čase. Letadlo je schopné pokrýt větší část území za určitý časový úsek než UAV. Bohužel vysoká finanční náročnost přístroje nebo pronajmutí letounu s LiDAR senzorem částečně omezuje jeho využití. Proto tuto službu využívají hlavně národní nebo vojenské organizace. Více dostupnou variantou pro individuálního uživatele vyžadující pokrytí menšího území je využití právě UAV.



Obr. 3 – ALS – LiDAR senzor upevněný na letadle

Poslední možností přístroje bodových mračen je pozemní laserové skenování znázorněné na Obr. 4 (TLS – Terrestrial Laser Scanning). Skener je v tomto případě umístěn na stativu, který dokáže na omezeném území pokrýt plochu hustým mračnem bodů. Dosah skeneru je pouze ve stovkách metrů a zároveň je omezen pouze pokrytím ze země. Pokud bychom, tedy chtěli pokrýt větší území, museli bychom věnovat měření spoustu času. Hustota mračna se zde odvíjí od nastavení přístroje a vzdálenosti od objektu. Uplatnění TLS našlo v geodézii, kde je užíváno k měření skutečného stavu staveb, 3D modelování objektů jako jsou průmyslové

areály, historické stavby a archeologická naleziště (Abmayr, et al., 2005; Aguilera, et al., 2006). Technologie lze mezi sebou efektivně kombinovat. TLS a ALS je cenným zdrojem informací pro posouzení struktury lesů a odhadu objemu dřeva (Brede, et al., 2017).



Obr. 4 – Pozemní laserový skener

V poslední době kombinace zaznamenala výrazný rozvoj kombinace LiDARu s UAV. UAV jsou letouny bez posádky (tzv. drony). Řízeny jsou buď dálkově, nebo je jejich trasa předem naprogramována. Využití si našlo hlavně v armádním průmyslu nebo u záchranných složek. V oblasti vědy se používá pro dálkový průzkum Země. UAV vybaveny různými druhy senzorů se v současnosti staly nepostradatelným zdrojem dat. V případě propojení s metodou LiDAR nabízí alternativní možnost mezi leteckým skenováním (v rámci ALS) a pozemním skenováním (TLS). První, kdo testoval výhody spojení UAV a LiDAR byl Finský geodetický institut¹. Jehož členové testovali technologii na odvozování metrik lesa. Právě v oblasti mapování lesů našlo UAV s LiDAR skenerem uplatnění. Je schopno mapovat jednotlivé stromy, což umožňuje přesný výpočet biomasy lesa (Jaakkola, et al., 2010).

¹ V roce 2015 sloučen v rámci do Národního průzkumu země (National Land Survey) ve Finsku. (maanmittauslaitos.fi)

2.5 Formát a využití dat

Jak už bylo zmíněno, laserovým skenováním vznikají data ve formě bodového mračka. Data mohou být uloženy ve formátech textových jako je CSV, TXT, DBF nebo ASCII. Mezi nejpoužívanější však patří formáty LAS a LAZ ([LAS specification](#)). Tento datový formát poskytuje otevřené rozhraní, které usnadňuje sdílení dat. Bodová mračka jsou nejčastěji využívána, jako vstupní data pro vygenerování digitálních výškových modelů (DEM – Digital Elevation Model). DEM prezentuje topografii povrchu jako 2D nebo 3D model. Rozlišuje tři typy modelů, digitální model terénu (DTM – Digital Terrain Model), digitální model povrchu (DSM – Digital Surface Model) a Canopy Height Model (CHM). DSM reprezentuje povrch Země včetně povrchových prvků, jako je vegetační pokryv a všechny ostatní objekty vytvořené člověkem. Naopak DTM zobrazuje pouze samotný zemský povrch, obvykle nad hladinou moře. Pro CHM není český překlad, ale je definován jako model, který obsahuje pouze prvky vegetace. Jednoduše řečeno, je to rozdíl DSM a DTM. Popsané modely dnes slouží jako vstupní data pro mnoho výzkumů a analýz. Využití našly nejen v environmentální vědě, ale i v oborech geodézie, geologie, geofyziky, civilní nebo vojenské inženýrství, krajinného modelování nebo územního plánování (Balasubramanian, 2017).

2.6 Filtrace pomocí algoritmů

Abychom byly schopni vytvořit výškové modely (DEM), je nutné nejprve klasifikovat jednotlivé body do příslušných tříd. Pro vygenerování výškových modelů plně stačí rozdělit mračko na body reprezentující zem (dále jako *ground*) a body zahrnující ostatní prvky (dále jako *non-ground*). Samotné rozdělení bodů do kategorií zajišťují řízenou klasifikací nástroje, které jsou součástí specializovaných softwarů. Za řízenou klasifikací se skrývá sofistikovaný algoritmus (filtr), který bodové mračko roztřídí do daných tříd. Časově je tento způsob mnohem efektivnější než klasifikace manuální. Ruční třídění dat obsahující statisíce bodů by zabralo příliš mnoho času. Ačkoliv algoritmy pracují na různých principech, obecně je třeba pochopit fyzikální vlastnosti, které odlišují třídu *ground* od ostatních bodů (Meng, et al., 2010). Tyto vlastnosti lze rozdělit do čtyř kategorií.

- 1) *Body s nejnižší výškou.* Samotný zemský povrch se skládá z bodů s nejnižší nadmořskou výškou. Mnoho metod filtrování je založených na této důležité charakteristice. Hledá body s nízkou výškou v měřené oblasti, aby je následně klasifikoval jako *ground* (Meng, et al., 2009; Zhang & Whitman, 2005; Meng, et al., 2010; Masaharua & Ohtsuboa, 2002; Silván-Cárdenas & Wang, 2006).
- 2) *Sklonitost terénu.* Sklon povrchu je obecně nižší mezi dvěma sousedními body třídy *ground* než mezi sousedními body tříd *ground* a *non-ground*. (Zhang & Whitman, 2005). Mnoho algoritmů, proto definuje bod se sklonem větší, než je maximální prahová hodnota, jako bod třídy *non-ground* (Zhang & Whitman, 2005; Elmqvist, et al., 2001; Shan & Aparajithan, 2005).

- 3) *Výškový rozdíl mezi dvěma body.* Jelikož většina rovinných povrchů nemůže obsahovat místa s náhlou změnou výšky. Výškový rozdíl, mezi dvěma body třídy *ground* bývá obvykle nižší než rozdíl výšky od sousedních bodů třídy *non-ground*. Body, které mají výškový rozdíl vyšší než daná prahová hodnota, jsou proto pravděpodobně body reprezentující ostatní prvky *non-ground*. (Meng, et al., 2010; Meng, et al., 2009; Vosselmann, 2000).
- 4) *Homogenita zemského povrchu.* Zemský povrch, bývá relativně spojitý a hladký. Naopak stromy mají obvykle méně hladkou strukturu než holá půda a budovy (Zhang & Whitman, 2005) a proto mohou být klasifikovány jako *non-ground* na základě morfologických charakteristik (Meng, et al., 2009; Meng, et al., 2010).

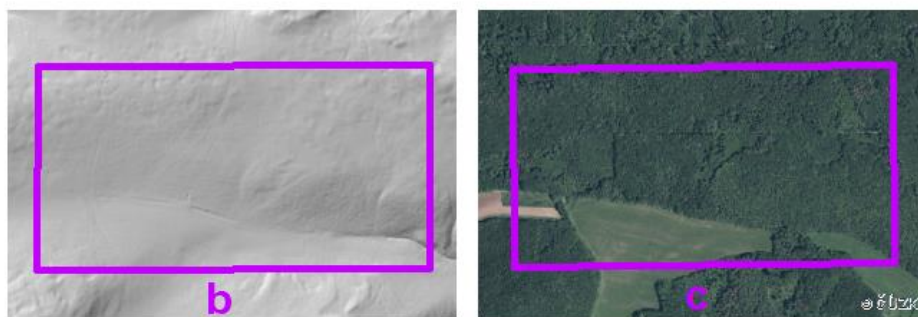
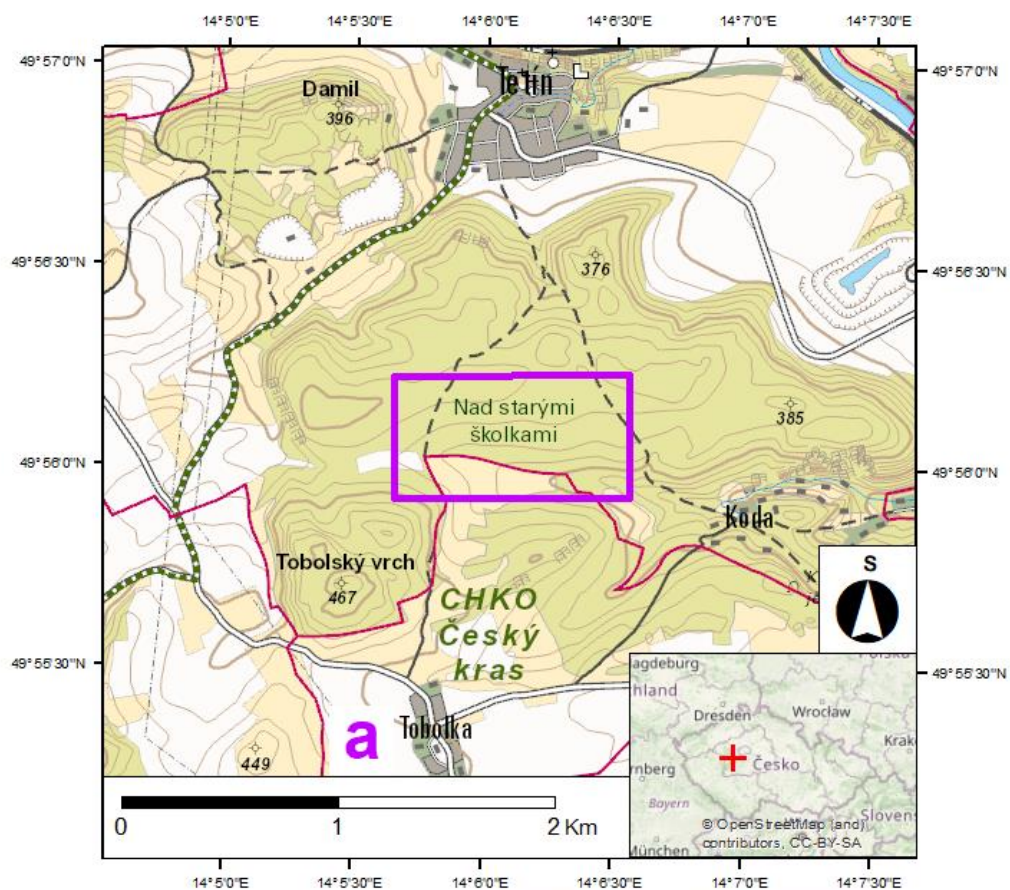
Na základě těchto vlastností pracuje většina algoritmů (Meng, et al., 2010). Prahové hodnoty výškového rozdílu a sklonu mohou být v rámci některých algoritmů nastavitelné, aby se co nejlépe přizpůsobily měřenému terénu. Problém představují hlavně náhlé a prudké změny terénu, např. skalní stěny, prudké svahy, oblast pozemních dolů, vrcholky hor atd. Algoritmy správně nevyhodnotí tyto prudké změny a mají tendenci je zplošťovat a uhlazovat. Dalším aspektem, který ovlivňuje výkonnost algoritmů je hustota vegetace. Hustota vegetace má vliv na signál, který pronikne skrz a odrazí se od země zpět do senzoru (Moudrý, et al., 2020). Problémem není samotná vegetace, ale kmeny, větve a drobné větvičky. To může způsobit nedostatek bodů, které budou potencionálně představovat třídu *ground* a tím pádem vznikne nedostatečně přesný digitální model terénu (DTM). Teoreticky by to mělo platit pouze pro data z leteckého skenování. UAV je schopno morfologicky složitější oblasti pokrýt větším počtem bodů a dokáže částečně eliminovat problémy s generováním výškových modelů, samozřejmě v kombinaci s dobře nastaveným algoritmem.

Jak již bylo zmíněno, algoritmy byly vyvíjeny pro filtraci bodových mračen pořízené leteckým skenováním. Můžeme se tedy ptát, jak se vypořádají s hustým bodovým mračnem pořízené UAV. Teoreticky lze předpokládat podobnou úspěšnost filtrace jako při použití bodových mračen získaných fotogrammetricky. Filtraci fotogrammetricky získaných bodových mračen se věnovali (Zeybek & Şanlıoğlu, 2019) nebo (Yilmaz & Gungor, 2018) a jejich výsledky ukázaly, že všechny zkoumané filtrační algoritmy jsou schopné dosáhnout vysoké přesnosti a spolehlivé filtrace pozemních bodů (Zeybek & Şanlıoğlu, 2019).

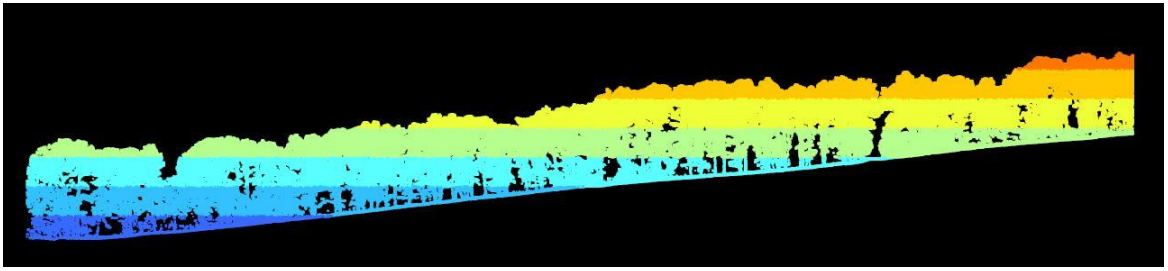
3. Metodika

3.1 Studijní oblast

Data byla pořízena na území Chráněné krajinné oblasti Český kras, konkrétně v Národní přírodní rezervaci Koda (Středočeský kraj, Česká republika, 49° 56' N, 14° 6' – WGS 1984). Toto členité zalesněné území na jihozápadě od Berounky mezi Tetínem, Tobolkou a Srbskem zabírá rozlohu 496 ha. Jedná o výzkumnou oblast pro monitorování lesů a data nebyla primárně sbírána pro účely této bakalářské práce, ale pro studium mikroklimatu. Nadmořská výška se pohybuje mezi 220 až 467 m. n. m. Oblast vybraná pro testování znázorněna na Obr. 5, zahrnuje husté lesy ve strmém stinném svahu tzv. suťový les (Tilio-Acerion) (AOPK ČR, © 2021), který můžeme vidět na Obr. 6 a má rozlohu 75 ha (1000 x 750 m).



Obr. 5 – Studijní oblast – a) oblast s podkladovou mapou ZM 50 b) Hillshade c) Ortofoto



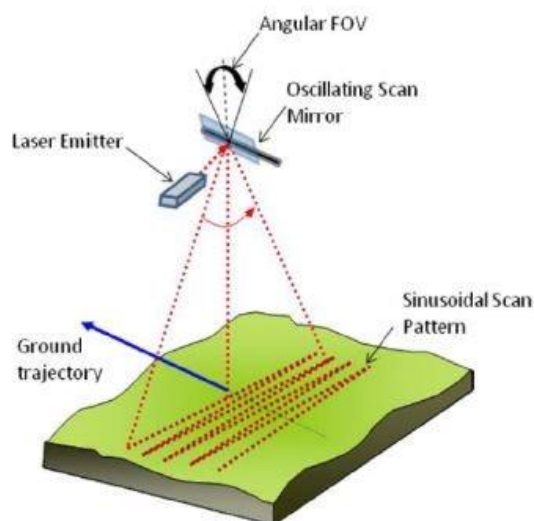
Obr. 6 – Profil terénu studované oblasti

3.2 Sběr dat

Pro pořízení vstupních dat byla použita bezpilotní kvadrokoptéra RIEGL RiCOPTER se senzorem VUX-1UAV na Obr. 7. Senzor pracuje na principu extrémně rychle otáčejícího se hranolu (zrcátko), jak můžeme vidět na Obr. 8. Osa rotace hranolu je rovnoběžná s podélnou osou letounu. Zorné pole skeneru je 330°, to znamená, že boční překryv letových linií je omezen dosahem laseru nebo maximální letovou hladinou UAV. Senzor je spolehlivý do výšky 1000 metrů nad terénem a pracuje na vlnové délce 1550 nm (Brede, et al., 2017). Let byl uskutečněn 11. září 2018 a celkově bylo pořízeno 300 miliónů bodů s průměrnou hustotou 250 bodů/m². Pro představu, vzdálenost mezi jednotlivými body se pohybuje od 1 cm do 20 cm.



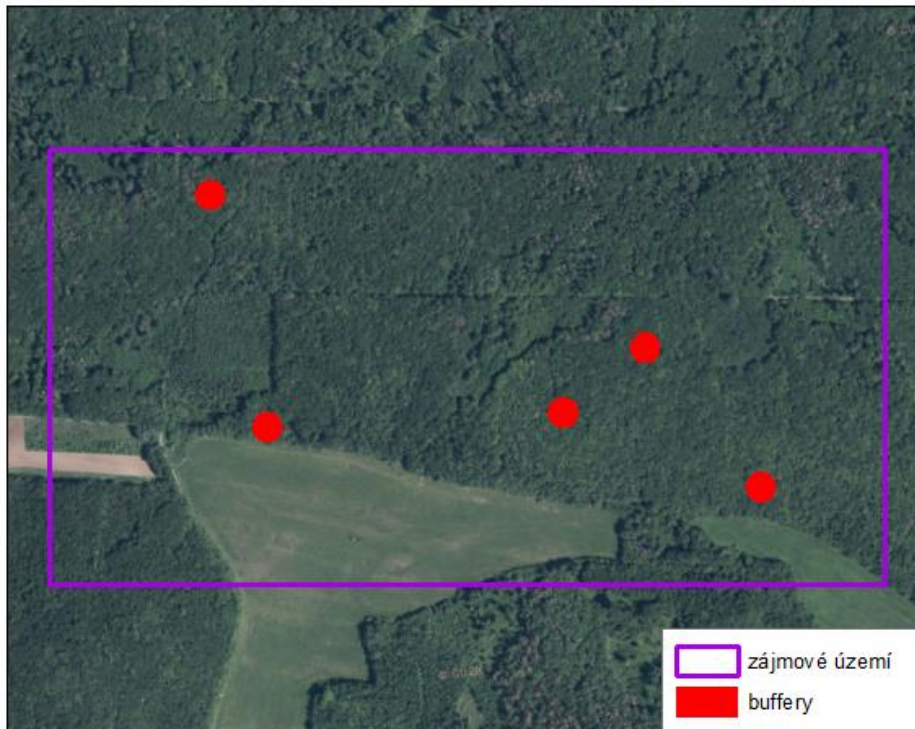
Obr. 7 – RIEGL RiCOPTER se senzorem VUX – 1UAV



Obr. 8 – Princip měření senzoru VUX - 1UAV

3.3 Referenční data

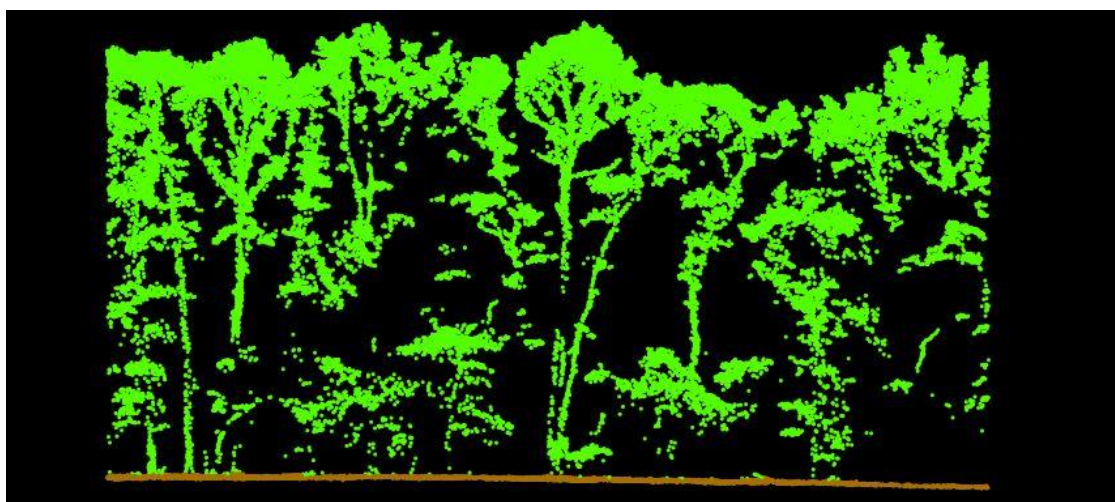
Pro získání kvalitních výsledků, musí být filtrovaná mračna ověřena se sadou dobře definovaných platných hodnot neboli s referenčními daty. V tomto případě referenční data reprezentují mračno, které nejlépe odpovídá realitě. Data tohoto typu nelze nikde obdržet, tudíž je nutné data vytvořit. To znamená, ručně klasifikovat body v bodovém mračnu. V dokonalém případě by se porovnával každý bod v mračnu, ale vzhledem k vysokému počtu pořízených bodů je nepředstavitelné ručně přiřazovat příslušnou kategorii každému bodu. Proto byl aplikován často používaný postup využívající náhodně vzorkované body (Montealegre, et al., 2015). V praxi to znamená, že v programu ArcMap 10.7.1 bylo do zájmové oblasti vygenerováno 20 náhodných bodů kolem, kterých byl vytvořen buffer s určitým poloměrem. Buffer je nástroj v GIS, vytvoří vyrovnávací vrstvu (polygon) kolem vstupních prvků do dané vzdálenosti od okraje či středu. Po zhodnocení časové a praktické náročnosti, byla zvolena cesta menšího počtu bufferů s větším poloměrem. To znamená, že bylo vybráno pět bodů s poloměrem bufferů 20 metrů. Na výběr mělo vliv vzájemné umístění náhodných bodů a podle koncentrace naměřených bodů v konkrétním místě. Vybrané buffery můžeme vidět na Obr. 9. Průnikem (nástroj Intersect) pořízeného bodového mračna a pěti bufferů vznikl základ pro referenční data. Výsledek reprezentovalo bodové mračno tvarované do pěti kružnic.

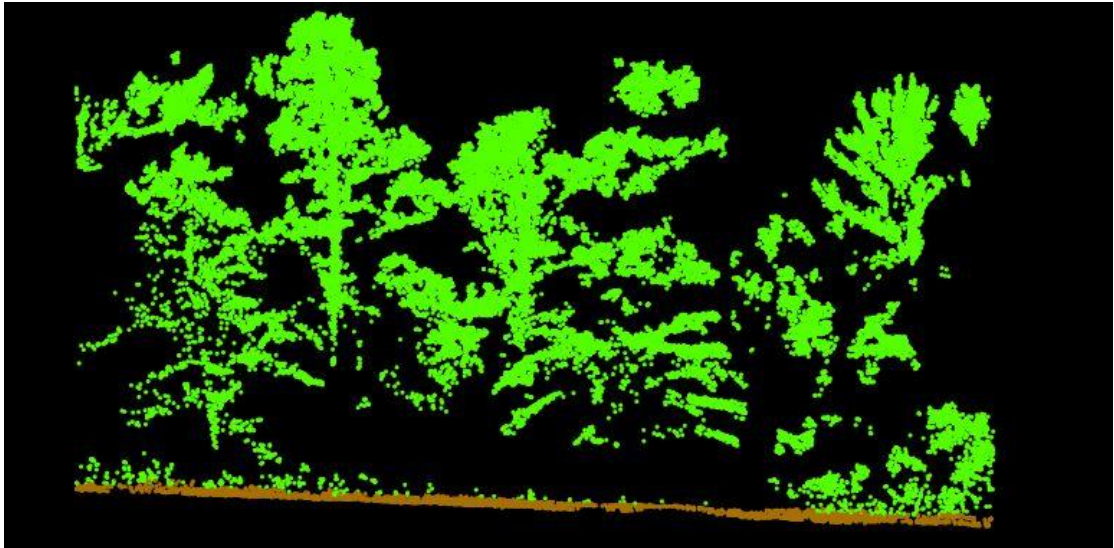


Obr. 9 – Vybrané buffery použité pro vznik referenčních dat

Následovala manuální klasifikace bodů. Postupně byly v bodovém mračnu voleny profily široké 1 až 2 metry, ve kterých se bodům přiřadila příslušná třída. Výsledek obsahoval již hotová referenční data, z celkových 4 682 427 bodů bylo 404 821 klasifikováno jako *ground* a 4 277 606 na *non-ground*. Příklady profilů s klasifikovanými body můžeme vidět na [Obr.10](#).

Obr. 10 – Profily vedený referenčními daty (ručně klasifikované bodové mračno)

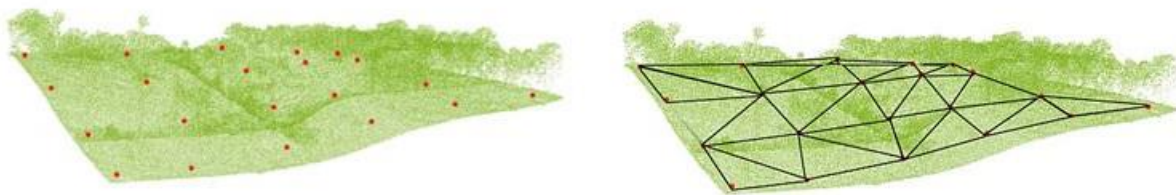




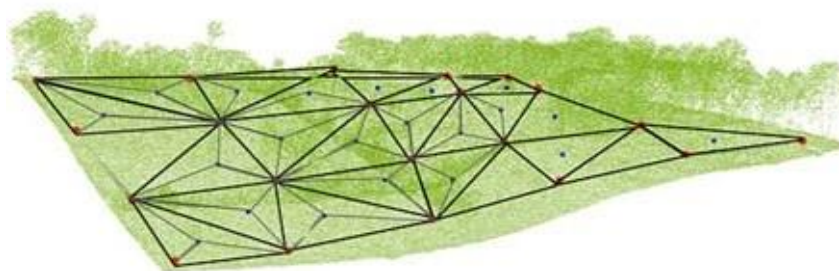
3.4 Filtrace bodových mračen

V této práci byly testovány dva komerční programy, které obsahují algoritmy umožňující filtraci bodů bodových mračen. Důležité je zdůraznit, že v této práci byly testovány předdefinované hodnoty nastavení, které programy nabízejí. Jedním z nejpoužívanějších softwarů pro zpracování bodových mračen je Rapidlasso LAStools (<https://rapidlasso.com/>), které má mezi programy jedinečné postavení – jedná se o komerční software, ale omezení jeho bezplatné verze, je minimální (Moudrý, et al., 2020). Pro účel této práce byla použita zakoupená akademická verze. Konkrétní nástroj pro filtrování bodů se nazývá *lasground_new* ([lasground README](#)). Využívá principu progresivního zhušťování nepravidelné trojúhelníkové sítě (PTIN), který vyvinul P. Axelsson (2000). V prvním kroku jsou pseudonáhodně vybrány nejnižší body z bodového mračna, u kterých je zohledňována vzájemná poloha. V dalším kroku je vygenerován základní povrch, tvořený nepravidelnou trojúhelníkovou sítí. Oba kroky můžeme vidět na [Obr. 11](#). Následuje iterativní² zhuštění povrchu dalšími trojúhelníky, a to na základě definovaných metrik (např. vzdálenosti k fasetám TINu), které jsou počítány pro jednotlivé body nad povrchem (Axelsson, 2000). Výsledný TIN je reprezentován [Obr. 12](#).

² Iterace je proces, který používá určitý model, který se postupným opakováním přibližuje výsledku.



Obr. 11 – Pseudonáhodné nejnižší body (vlevo), základní povrch nepravidelné trojúhelníkové sítě (vpravo).



Obr. 12 – Výsledný povrch reprezentovaný TINem.

Zdroj obrázků: Ludwig Boltzmann Institute for Archaeological Prospection and Virtual Archeology, <http://lbi-archpro.org/als-filtering/lbi-project/results/lastools/filtering-algorithm-2>

V praxi existují čtyři hodnoty, kterými lze proces progresivního zhušťování ovlivnit:

- a) *step* – Například *step* 5 (metr) definuje mřížku, která překrývá bodové mračno, ve které se generují počáteční body
- b) *bulge* – např. *bulge* 0,5 (metr) odstraní špičky nad 50 centimetrů a špičky pod 5 metrů v nejhrubší fázi generování TIN)
- c) *offset* – maximální *offset* v metrech popisuje, do jaké úrovně budou zahrnuti body nad aktuálním odhadem země.
- d) *spike* – je vertikální práh, ve kterém jsou ostré vrcholy odstraněny.

Volitelnost popsaných hodnot je uživateli volně přístupná a umožňují mu algoritmus naladit dle potřeb. Nástroj *lasground_new*, ale také poskytuje předefinované parametry. Jednotlivá nastavení zohledňují jak morfologii (drsnost) terénu, tak území, ve kterém se bodové mračno nachází. Pro nastavení druhu území, kde je bodové mračno pořízeno (např. město, louka, les atd.) *lasground_new* nabízí na výběr z pěti hodnot: 1) *wilderness* 2) *nature* 3) *town or flats* 4) *city or warehouse* 5) *metropolis*. Vzhledem k charakteru oblasti byly brány v potaz pouze parametry týkající se extravilánu. Tudíž možnosti *wilderness* a *nature*, které byly kombinovány s pěti nabízenými parametry ovlivňující morfologii – 1) *default* 2) *fine* 3) *extra* 4) *ultra* 5) *hyper*. Pro velmi ploché území jsou, zde „skryté“ možnosti nastavení *coarse* a *extra_coarse*.

Další posuzované algoritmy jsou implementovány v rámci softwaru ArcMap od firmy Esri. Zde nám nástroj nabízí pouze tři varianty nastavení a neumožňuje individuální

ladění konkrétních parametrů. Přesný princip, na kterém algoritmus pracuje, nebyl zveřejněn. Je otázkou, proč firma Esri tuto informaci nechce zveřejnit. Jediné dostupné informace můžeme nalézt přímo na stránkách Esri (desktop.arcgis.com). *Conservative* využívá přísnější omezení změny sklonu terénu. Nejlépe se hodí pro topografii s minimálním zakřivením. *Agressive* detekuje pozemní oblasti s ostřejšími reliéfy, jako jsou hřebeny a vrcholky kopců. Není však vhodná v městských nebo plochých oblastech. *Standard* má toleranci vůči variaci sklonu, která umožňuje zachytit postupné zvlnění v topografii terénu. Nabízí kompromis mezi metodami *conservative* a *agressive*.

3.5 Kvantitativní validace

Filtrovaná bodová mračna byla porovnána s referenčními daty, použity byly následující metriky (Sithole & Vosselman, 2004):

- a) *Error Type 1 (T1 – Chyba 1. druhu)* – počet bodů třídy *ground* chybně klasifikovaných jako *non-ground*, normalizovaný celkovým počtem bodů jako *ground*
- b) *Error Type 2 (T2 – Chyba 2. druhu)* – počet bodů *non-ground* chybně klasifikovaných jako *ground*, normalizovaný celkovým počtem bodů jako *non-ground*
- c) *Total Error (TE – Celková chyba)* – celkový počet chybně klasifikovaných bodů normalizovaný, celkovým počtem bodů.

$$Type\ 1_{error} = \frac{A}{GP}$$

$$Type\ 2_{error} = \frac{B}{NGP}$$

$$Total_{error} = \frac{A + B}{GP + NGP}$$

A – počet chybně klasifikovaných bodů *ground* jako *non-ground*

B – počet chybně klasifikovaných bodů *non-ground* jako *ground*

GP – počet bodů klasifikovaných jako *ground*

NGP – počet bodů klasifikovaných jako *non-ground*

Na základě předchozích studií byly přidány další dvě metriky (Montealegre, et al., 2015; Moudrý, et al., 2020).

- a) *Success Rate (SR – Míra úspěšnosti)* – celkový počet správně filtrovaných bodů normalizovaný celkovým počtem bodů

$$Success_{rate} = \frac{C + D}{GP + NGP}$$

C – počet správně klasifikovaných bodů jako *ground*

D – počet správně klasifikovaných bodů jako *non-ground*

- b) Kappa koeficient (Cohen, 1960) – Tento statistický koeficient měří shodu mezi dvěma hodnotiteli (referenční data, filtrovaná data), kteří hodnotí jednotlivé body. Shodu by bylo možné vyčíslit jednoduše v procentech. Koeficient kappa je univerzálnější v tom smyslu, že bere v úvahu také pravděpodobnost náhodné shody. Výsledek je vyjádřen v intervalu 0 až 1. Jak popsali ve studii (Landis & Koch, 1977), hodnoty výsledku pod 0,40 dokazují špatnou shodu. Od 0,40 do 0,75 představují dobrou shodu a od 0,75 vykazují vynikající shodu.

$$\kappa = \frac{\Pr(a) - \Pr(e)}{1 - \Pr(e)}$$

$\Pr(a)$ - je relativní shoda mezi hodnotiteli

$\Pr(e)$ - je odhad pravděpodobnosti náhodné shody

$$\Pr(a) = \left[\frac{(C + D) + (A + B)}{GP + NGP} \right]$$

$$\Pr(e) = \left[\left(\frac{GP_A}{GP + NGP} * 100 \right) \times \left(\frac{GP_R}{GP + NGP} * 100 \right) \right] + \left[\left(\frac{NGP_A}{GP + NGP} * 100 \right) \times \left(\frac{NGP_R}{GP + NGP} * 100 \right) \right]$$

A – počet chybně klasifikovaných bodů *ground* jako *non-ground*

B – počet chybně klasifikovaných bodů *non-ground* jako *ground*

C – počet správně klasifikovaných bodů jako *ground*

D – počet správně klasifikovaných bodů jako *non-ground*

GP_A – počet bodů klasifikovaných jako *ground* pomocí algoritmů

NGP_A – počet bodů klasifikovaných jako *non-ground* pomocí algoritmů

GP_R – počet bodů klasifikovaných jako *ground* v referenčních datech

NGP_R – počet bodů klasifikovaných jako *non-ground* v referenčních datech

Na základě popsaných metrik byly v softwaru R vypočítány výsledné hodnoty, reprezentující přesnost algoritmů.

4. Výsledky

4.1 LAStools

V softwaru LAStools bylo celkem provedeno 10 klasifikací. Všechny výsledky jsou zobrazeny v grafu Obr. 13 a Tab. 1. Největší vliv na výsledky mělo nastavení zohledňující typ krajinného pokryvu (sloupec Nastavení (a) - Tab. 1), kde obecně parametr *wilderness* vykazoval lepší hodnoty. Dosáhl menších hodnot *chyby 1. druhu* oproti *nature*. Nepatrný vliv na přesnost mělo nastavení ovlivňující morfologii terénu (sloupec Nastavení (b) - Tab. 1). Hodnoty vykazují zvyšující se trend spolu s nastavením, které je více přizpůsobené na větší sklon terénu. Výjimkou je parametr *extra* u kterého můžeme v obou variantách pozorovat výkyv hodnot. V případě nastavení *nature* jde o vliv pozitivní tzn. dosahuje vyšší přesnosti než ostatní, u kombinace s *wilderness* je tomu naopak. Rozdíly jsou, ale minimální a tedy zanedbatelné.

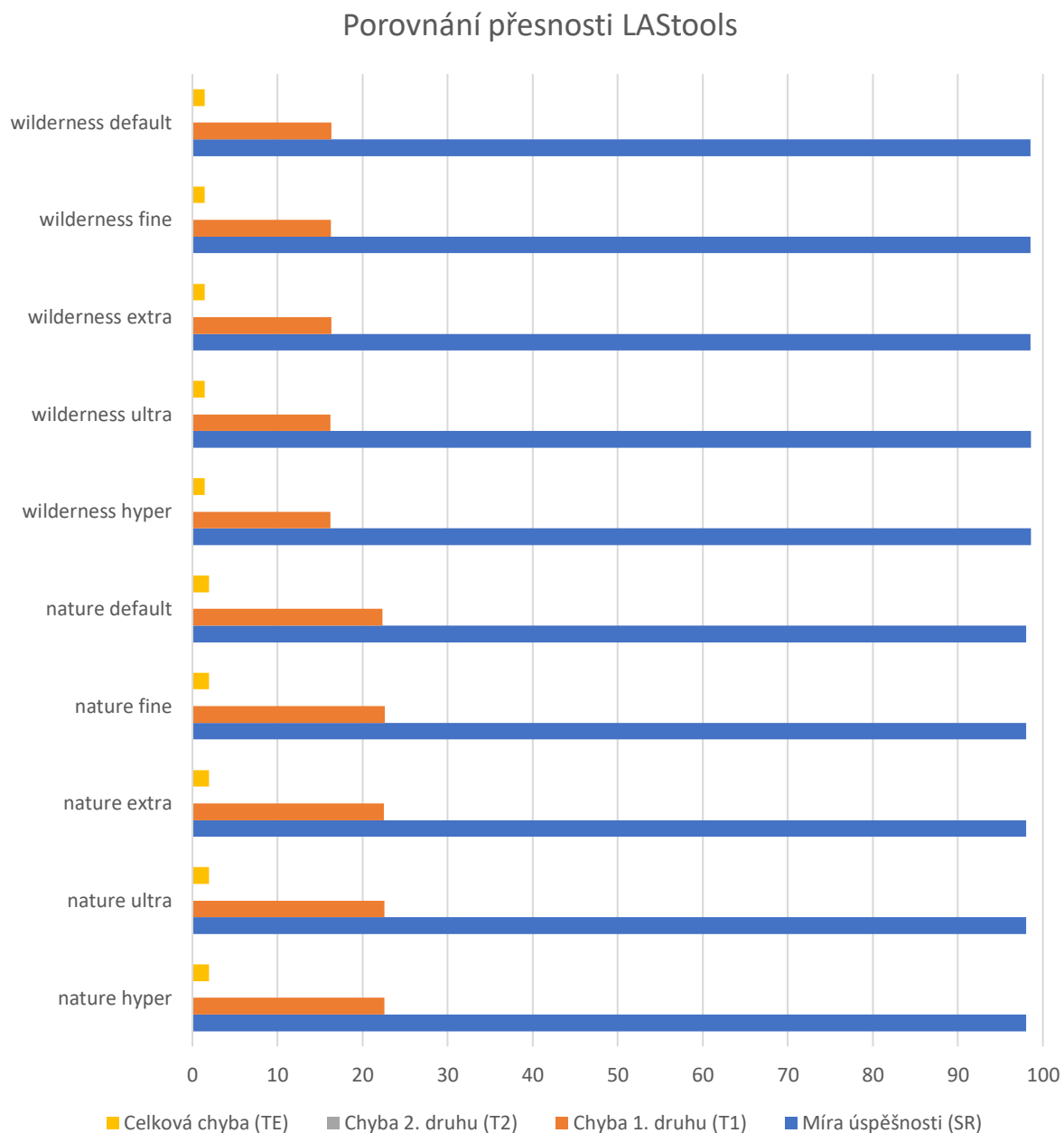
Odlišných výsledků si můžeme všimnout i nastavení *default*. Přesto, že se jedná o výchozí parametr, vykazuje dobré výsledky. Obecně parametr *default* docílil v obou kombinacích nejmenších hodnot *chyby 2. druhu*. Vezmeme-li pouze kombinaci s nastavením *nature*, tak zde dosahuje nejlepších výsledků v obou typech chyb.

Na základě výsledků je nejlepší variantou pro studovanou oblast kombinace parametrů *wilderness* a *hyper*. Kombinace nastavení přináší různé hodnoty *chyby 1. druhu* a *chyby 2. druhu*, avšak obecně výsledky jsou stejnoměrné a rozdíly mezi volbou nastavení nejsou velké. LAStools dokázal výborně držet rovnováhu mezi odlišným nastavením a přesností.

Tab. 1 – Výsledné hodnoty přesnosti nastavení algoritmu (LAStools)

Nastavení (a)	Nastavení (b)	Míra úspěšnosti (SR)	Chyba 1. druhu (T1)	Chyba 2. druhu (T2)	Celková chyba (TE)	Kappa koeficient
wilderness	default	98,5633	16,3208	0,0277	1,4367	0,90
wilderness	fine	98,5641	16,3020	0,0287	1,4359	0,90
wilderness	extra	98,5616	16,3390	0,0279	1,4384	0,90
wilderness	ultra	98,5693	16,2451	0,0284	1,4307	0,90
wilderness	hyper	98,5716	16,2236	0,0279	1,4284	0,90
nature	default	98,0534	22,3496	0,0152	1,9466	0,86
nature	fine	98,0275	22,6471	0,0155	1,9725	0,86
nature	extra	98,0370	22,5275	0,0164	1,9630	0,86
nature	ultra	98,0344	22,5622	0,0159	1,9656	0,86
nature	hyper	98,0357	22,5533	0,0153	1,9643	0,86

Obr. 13 – Přesnosti jednotlivých nastavení algoritmu PTIN (LAStools)



4.2 ArcMap

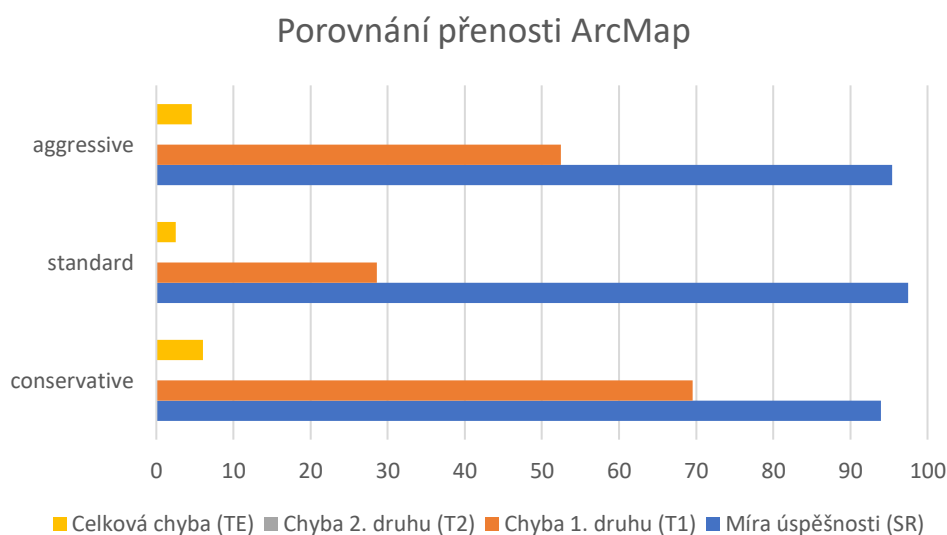
V ArcMapu byly testovány všechny 3 nabízené možnosti nastavení. Na [Obr. 14](#) a [Tab. 2](#) je patrné, že nejlepších výsledků dosáhlo nastavení *standard*. Kromě chyby 2. druhu docílil výrazně lepších výsledků než ostatní nastavení. Rozhodujícím faktorem jsou hodnoty ve sloupci chyby 1. druhu [Tab. 2](#), zde vidíme velký rozdíl oproti variantám *conservative* a *aggressive*.

Z hodnot *chyb 1. a 2. druhu* nastavení *conservative* je patrné, že parametr nepočítá s velkým sklonem a dopouští se vynechání bodů klasifikovaných jako *ground* (*chyba 1. druhu*), proto je hodnota *chyby 2. druhu* nízká. Zkrátka není pro tuto chybu prostor. Lépe reaguje na oblast nastavení *aggressive*. To však mělo největší tendenci chybně označovat body *non-ground* jako *ground*. Zde výrazně ovlivnila výsledky volba nastavení.

Tab. 2 - Výsledné hodnoty přesnosti nastavení algoritmu (ArcMap)

Nastavení	Míra úspěšnosti (SR)	Chyba 1. druhu (T1)	Chyba 2. druhu (T2)	Celková chyba (TE)	Kappa koeficient
conservative	93,9833	69,5149	0,0059	6,0167	0,44
standard	97,5141	28,5792	0,0159	2,4859	0,82
aggressive	95,4387	52,4626	0,0269	4,5613	0,62

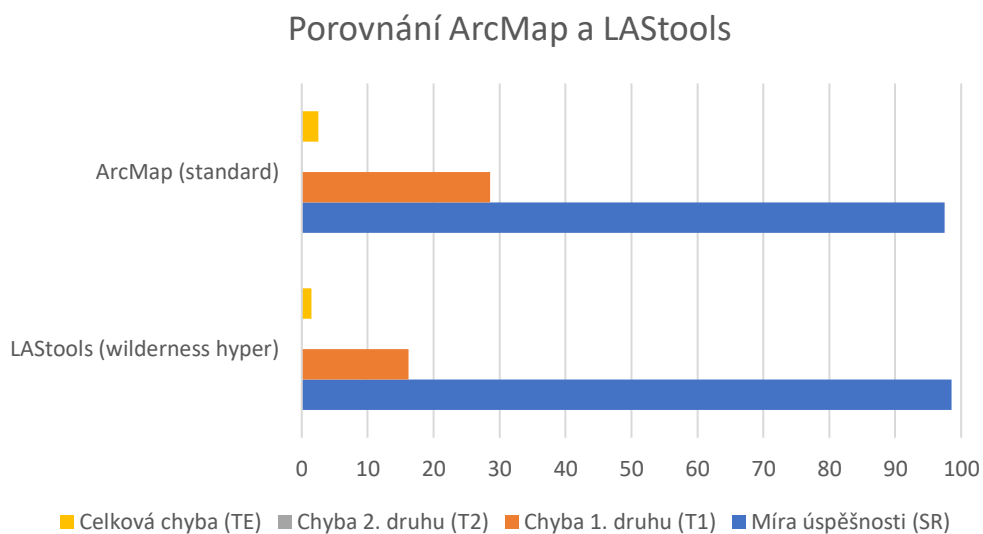
Obr. 14 - Přesnosti jednotlivých nastavení algoritmu (ArcMap)



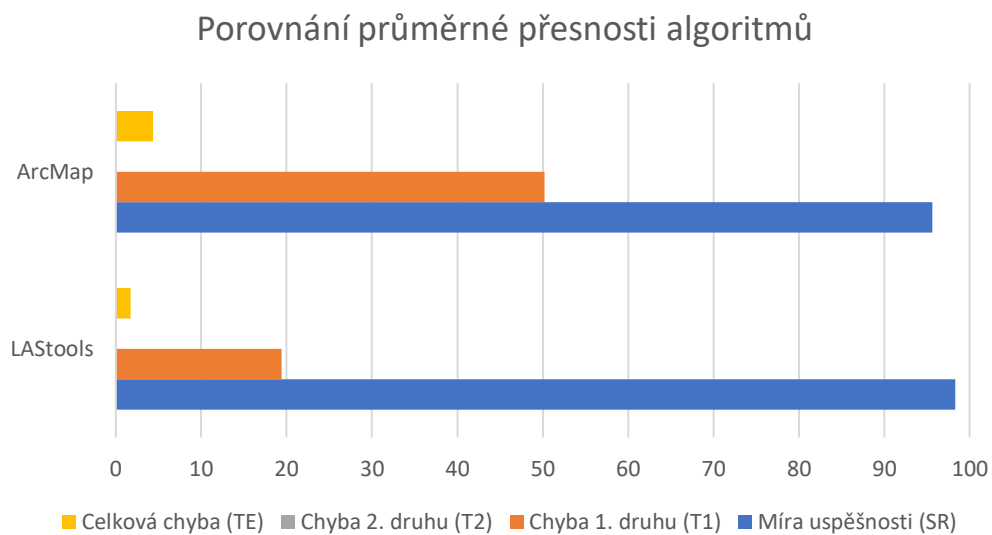
4.3 Kvantitativní porovnání přesnosti algoritmů

Pokud porovnáme všechny výsledky, můžeme si všimnout, že oba softwary jsou laděny tak, aby se více dopouštěli *chyby 1. druhu*. Pokud bychom je hodnotily podle (Landis & Koch, 1977) kappa koeficientu, všechny výsledky vygenerované programem LAsTools mají vynikající shodu. U softwaru ArcMap to můžeme říci pouze o nastavení *standard*. Oba programy prokázali relativně stejné hodnoty *chyby 2. druhu*, onen rozdíl nastává při pohledu na hodnoty *chyby 1. druhu*. To platí, i když vedle sebe postavíme nejlepší nastavení z obou programů, které můžeme vidět na [Obr. 15](#). LAsTools dokáže zachytit větší počet bodů třídy *ground*. Zde ani nejlepší nastavení z Arcmapu nedosahuje takové přesnosti, jako kterýkoli výsledek u LAsTools. Průměrná přesnost obou algoritmů je reprezentována na [Obr. 16](#).

Obr. 15 – Přesnost nejlepších variant nastavení algoritmů



Obrázek 16 – Průměrná přesnost algoritmů PTIN (LAStools) a ArcMap



5. Diskuse

5.1 Porovnání programů

Hlavním cílem této práce bylo porovnat výsledky přesnosti, které algoritmy v rámci svých programů dosahovaly. Důležité také je porovnat jejich praktickou stránku využití a finanční náročnost. U programu ArcMap musíme vyzdvihnout jeho funkčnost. I přesto, že nabízí pouze tři možnosti nastavení, dokáže vyprodukovat, v našem případě alespoň jedno nastavení, slušné výsledky. Bylo předvídatelné, že všechna tři nastavení nebudou dosahovat uspokojivých výsledků. Můžeme tedy odhadnout, že ostatní nastavení budou pravděpodobně funkční v jiných typech terénního pokryvu. Jelikož neznáme faktory ovlivňující nastavení algoritmů, vycházíme pouze z krátkého popisu v samotném programu. Dá se předpokládat, že nastavení se spíše přizpůsobuje terénní morfologii než druhu krajinného pokryvu (příroda, město). Uživatel tedy musí pečlivě zvážit kterou variantu nastavení na svoje data aplikuje. To, že jsou algoritmy součástí jednoho z nejrozšířenějších softwarů pro GIS, má svá pozitiva i negativa. ArcMap není primárně zaměřený na práci s bodovými mračky a jeho pořizovací náklady jsou obrovské. Dále nepodporuje otevřený formát LAZ a upřednostňuje svůj vyvinutý formát z LAS. Pokud uživatel pracuje v oblasti GIS a k zpracování bodových mračen se dostane zřídka v rámci svých mnoha analýz, je ArcMap tou lepší volbou. Uživatel nemusí detailně studovat všechny parametry nastavení a je pravděpodobné, že pokud vybere správnou ze tří variant nastavení, dosáhne uspokojivých výsledků. Pokud uživatel pracuje s bodovými mračky ve větší míře, vyžaduje velkou variabilitu nastavení a kvalitní výškové modely, je LAStools ideální varianta. Nabízí široké možnosti předdefinovaných nastavení a umožňuje uživateli plně nastavovat jednotlivé parametry algoritmu. Z výsledků je také zřejmé, že ve studijní oblasti algoritmus funguje dobře i v nastavení výchozích hodnot (*default*), takže není nutné detailně ladit nastavení. Velká výhoda LAStools je práce s otevřenými formáty LAS a LAZ. Nejdůležitější jsou rozdíly v přístupu způsobu nastavení. ArcMap dle dostupného popisu pracuje pouze s morfologií terénu. Nastavení v LAStools rozlišuje jak morfologii terénu, tak typ prostředí (město, příroda atd.). Z předchozích studií je zřejmé, že pro dosažení optimální přesnosti filtrování by mělo být nastavení parametrů vedeno specifickým typem prostředí (Moudrý, et al., 2020). V budoucnu bychom mohli očekávat vývoj softwarů v přístupu identifikace více druhů prostředí ve zkoumané oblasti a automatického nastavení nejvhodnějších parametrů k jednotlivým typům.

5.2 Vhodnost algoritmů k datům pořízeným UAV

Dalším cílem této práce bylo posoudit, jestli jsou algoritmy vhodné pro data pořízená UAV. Z hlediska fyzikálních vlastností popsané v kapitole [2.6 Filtrace pomocí algoritmů](#), by hustá bodová mračna neměla ovlivňovat práci algoritmů. Z výsledků je patrné, že algoritmy jsou vhodné pro použití na datech z UAV. Pokud se zaměříme na přístup dostupného individuálního nastavení v LAStools, dávalo by smysl přizpůsobit některé parametry (například *step*) na nižší hodnoty. Tím bychom zmenšili mřížku, ve které jsou vybírány počáteční *ground body*, což by mohlo teoreticky přispět k lepším výsledkům. V rámci této práce byly testovány pouze předdefinované hodnoty.

5.3 Validace a validační data

Otázkou je, jak výsledky ovlivní počet a velikost náhodně vzorkovaných bodů (bufferů). V mém případě byla studijní oblast v celku homogenní, tedy pokrytá hustým lesem a nacházela se v konstantním sklonu. Bylo tudíž usouzeno, že by více bufferů nijak odlišné výsledky nepřineslo a z praktických důvodů byla zvolena cesta menšího počtu bufferů. Dávalo by smysl vygenerovat větší počet bufferů s menším průměrem tam, kde zkoumaná oblast zahrnuje větší heterogenitu terénu a vegetačního pokryvu. To abychom dokázali pokrýt co nejvíce druhů prostředí a mohli objektivně vyhodnotit vliv prostředí na nastavení algoritmů.

Do jisté míry může kvalita referenčních dat ovlivnit výsledky. Jelikož byla data ručně klasifikována, podléhají faktoru lidské chyby a není možné určit jaké přesnost jsme dosáhli. Nabízí se možnost testovat algoritmy v uměle vytvořeném území, kde bude předem jasně dané, která kategorie bodu přísluší. Otázkou je, do jaké míry by umělé prostředí odpovídalo realitě. Tedy jestli dokážeme věrohodně zachytit skutečný průběh terénu a objektů na něm. Algoritmy přece jenom budou pracovat ve skutečném prostředí, které je různorodé. Další možnost, jak zvýšit pravděpodobnost správné klasifikace, je například doplnění bodového mračna o hodnoty RGB. V takovém případě nám hodnota může napovědět, o který objekt se jedná. Přínosem může být i samotný průzkum terénu. Spolu s tím můžeme vytipovat oblasti zájmu pro vzorkované body. Na druhou stranu jsou všechna filtrovaná mračna objektivně porovnávána se stejnými referenčními daty.

5.4 Chyba 1. druhu versus chyba 2. druhu

Algoritmy nikdy nebudou dosahovat stoprocentní přesnosti. Musíme tedy přijmout chyby, které se nástroje dopouštějí. Pro různé druhy aplikací je obvykle jedna chyba považována za vážnější než druhá. Proto má smysl pro některé případy algoritmy ladit tak, aby upřednostňovaly určitou chybu. Pro většinu případů je *chyba 1. druhu* považována za méně vážnou než *chyba 2. druhu* (Moudrý, et al., 2020). V případě této práce měly oba algoritmy tendenci dopouštět se *chyby 1. druhu*. To znamená, že vynechávaly body třídy *ground* a klasifikovaly je jako *non-ground*. To potvrzuje zjištění studie Sithole a Vosselman (2004), že algoritmy produkují spíše *chybu 1. druhu*. Tento typ chyby nemá v menší míře na výsledky výrazný vliv. Výpočet může i přesto v pořádku proběhnout a výsledkem bude dostatečně kvalitní digitální model terénu. Naopak *chyba 2. druhu* může označit body *non-ground* jako *ground*. V takovém případě bude digitální model terénu obsahovat ustřelené hodnoty. Sithole a Vosselman (2004) navrhli, aby byly algoritmy laděny tak, aby se dopouštěly větších hodnot *chyby 2. druhu*, protože jsou považované za nápadné a lze je ručně odstranit. To však platí pouze pro malé oblasti. Pro rozsáhlé oblasti na úrovni států nebo krajů by byla ruční úprava časově náročná (Moudrý, et al., 2020). Osobně se přikláním pro *chyby 1. druhu*. Jak už bylo řečeno, kombinace UAV a LiDAR produkuje hustá bodová mračka. Když je jeden z bodů z výpočtu vynechán, je velká pravděpodobnost, že body v blízkém okolí dostatečně dotvoří model terénu. V extrémním případě bychom mohli naopak čelit velkému počtu bodů mylně označených jako *non-ground* a jejich manuální odstranění by bylo příliš časově náročné. Obecně je pro uživatele pohodlnější akceptovat ne úplně dokonalý digitální model než manuálně hledat chyby a opravovat je. Vše však záleží na konkrétní aplikaci dat pro další využití. Ve filtraci bodových mračen je uživatel nucen akceptovat určitý kompromis mezi *chybami 1. a 2. druhu* (Moudrý, et al., 2020). Ve výsledcích přesnosti filtrace v LAStools si můžeme všimnout, že nastavení *wilderness* produkuje větší počet *chyb 2. druhu*, naopak nastavení *nature* *chyby 1. druhu*. Bylo by zajímavé zjistit, jestli by zkombinování parametrů nastavení přineslo příznivější výsledky nebo bychom dále měnili poměr mezi chybami. To bychom však už měnili parametry, které nejsou v rámci předdefinovaných variant.

5.5 Kvalitativní porovnání přesnosti algoritmů

Přesnost filtrování algoritmů lze také posoudit na základě vertikálního porovnání vygenerovaných DTM a bodů zaměřené GNSS. Jinak řečeno kvalitativní přesnost, ve které by se porovnávaly nadmořské výšky z DTM s terénním měřením. Body naměřené GNSS by se daly využít i pro ruční klasifikaci náhodných bodů. K této práci proběhlo terénní měření ve studijní oblasti a bylo zaměřeno 45 bodů pomocí přijímače GNSS vyobrazeného na Obr. 17. Nebyla však zajištěna dostatečná přesnost, aby data byla validní pro další aplikaci. Navíc by mohly body také přispět jako podklad pro manuální klasifikaci referenčních dat. V navazující studii se tomuto zhodnocení hodlám více věnovat.



Obr. 17 – GNSS přijímač Leica TS12

Až na výjimky lze z výsledků usoudit, že algoritmy si dokázaly poradit s obtížnou oblastí tzn. zalesněná oblast ve svažitém terénu. Již bylo dokázáno, že algoritmy podléhají vlivu sklonu terénu a hustoty vegetace (Klápště, et al., 2020). Bohužel z této práce nelze stanovit, jaké následky na algoritmech mají tyto vlivy. Při pořizování dat by bylo nutné zahrnout více druhů krajinného pokryvu v kombinaci s různým sklonem terénu. V takovém případě bychom byli schopni určit, zda má sklon terénu a hustota vegetace vliv na práci algoritmů ve studijní oblasti.

5.6 Metody LiDAR a SfM

Bodová mračna lze vygenerovat i z dat pořízených fotogrammetrickou metodou Structure from Motion (dále jako SfM). Jak ukázala studie Wallace et al., (2016) SfM společně s metodou LiDAR mají podobné provozní požadavky a obě jsou schopné poskytnout přesnou reprezentaci horní vrstvy lesního porostu. LiDAR však dokázal lépe proniknout skrz vegetaci a následně poskytnout úplnější odhad terénu a vertikální rozložení vegetace. Ve studii Klápště et al. (2020) se věnovali porovnání filtrací bodových mračen z dat LiDAR a SfM. Zjistili, že zatímco chování všech algoritmů bylo konzistentní pro bodová mračna bodů LiDAR, v případě fotogrammetrických mračen bodů byly výsledky nesourodé. Výsledky byly obecně lepší pro mračna bodů LiDAR než pro fotogrammetrické, což odpovídalo skutečnosti, že algoritmy byly původně vyvinuty pro data LiDAR a předpokládají schopnost laserových pulzů pronikat mezerami ve vegetaci a jsou schopny pracovat s počtem odrazů. Podobné porovnání je v budoucnu možné provést i pro oblast figurující v této práci. Přineslo by to další poznatky a výsledky, kterých je v současnosti omezený počet.

5.7 Závěr diskuse

Obecně můžeme v budoucnu očekávat větší výzkum v oblasti filtrování bodových mračen. Jak porovnání metod LiDAR s fotogrammetrií, tak testování algoritmů v dalších oblastech za různých podmínek. Je možné, že vývojáři softwarů zahrnující algoritmy přidají rozhraní pro zpracování bodových mračen pořízených UAV. Tuto práci osobně vnímám jako prvotní orientaci v problematice filtrování bodových mračen. Můj cíl je se do budoucna zaměřit na použití více algoritmů od jiných výrobců a porovnat filtraci na různých typech terénního pokryvu. Vyhodnotit kvalitativní přesnost porovnání vygenerovaných DTM s body měřenými metodou GNSS a v neposlední řadě porovnat mračna z LiDARu a SfM.

6. Závěr

V této práci byly porovnány dva softwary obsahující algoritmy schopné filtrovat bodová mračna. Testování algoritmů bylo prováděno na datech pořízených senzorem LiDAR v kombinaci s UAV. Celkem bylo aplikováno 13 variant v rámci předdefinovaných nastavení. Poté se klasifikovaná mračna porovnávala s referenčními daty, které byly manuálně vytvořeny metodou náhodně vzorkovaných bodů. Výsledná přesnost filtrace byla následně vypočítána dle jednotných metrik. Cílem bylo porovnat přesnost filtrace jednotlivých algoritmů.

Oba testované algoritmy dosáhly uspokojivých výsledků. Na základě metrik byl program LAStools hodnocen jako lepší, dosahoval konzistentní přesnosti, ve všech variantách nastavení. Největší vliv na přesnost mělo nastavení, které určovalo druh území - *wilderness* a *nature*. Nastavení morfologie terénu mělo na algoritmus PTIN nepatrný vliv. U softwaru ArcMap se algoritmus choval nesourodě. Ze tří nastavení pouze jedno vykazovalo přesnost, která se dala srovnávat s LAStools.

Z výsledků lze dále usoudit, že algoritmy jsou spolehlivé i pro použití na datech z UAV. Tudíž na výkonu algoritmů nemají hustá mračna negativní vliv a lze je bezpečně aplikovat. Celý výpočet je pouze časově náročnější, na druhou stranu mohou být vygenerovány mnohem detailnější výškové modely.

Zásadním přínosem práce jsou informace o výsledcích algoritmů ve studijní oblasti. Výzkumů, které se zaměřují na stejné téma, není v současnosti mnoho a dá se tedy předpokládat, že v budoucnu bude výzkumů přibývat. Tato práce může přispět jako základ pro testování v dalších typech krajinného pokryvu. Stejně tak, může práce sloužit jako soubor základních informací o algoritmech nebo jako manuál o vyhodnocování přesnosti filtrace pro studenty.

7. Přehled literatury a použitých zdrojů

Abmayr, T., Härtl, F., Reinköster, M., Fröhlich, C. 2005. Terrestrial laser scanning: Applications in cultural heritage conservation and civil engineering. *Proceedings of the ISPRS working group V4*. [Online] 2005. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1290160/file.pdf>.

Aguilera, D., Lahoz, J., Finat, J., Martinez, J., Fernandez, J., San Josem, J. 2006. Terrestrial laser Canning and low-cost aerial photogrammetry in the archeological modeling of a Jewish tanneries. *International Archives of Photogram., Remote Sensing*, 38, 5. [Online] 2006. https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/AGUI_618.pdf.

AOPK ČR, Agentura ochrany přírody a krajiny České, © 2021. Správa CHKO Český kras,. *Národní přírodní rezervace Koda*.,. [Online] © 2021. <https://ceskykras.ochranaprirody.cz/ochrana-prirody/chranena-uzemi/npr-koda/>.

Axelsson, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens.* [Online] 2000. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85051050603&origin=inward&txGid=77f47ba6547ac1b81bfaa201a6387c64>. pp. 111-118.

Balasubramanian, A. 2017. DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM) IN GIS. [Online] 2017. https://www.researchgate.net/publication/319454004_DIGITAL_ELEVATION_MODEL_DEM_IN_GIS.

Baltsavias, Emmanuel P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning,. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, Issues 2–3*.,. [Online] 1999. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3). Pages 83-94, 0924-2716.

Brede, B., Lau, A.; Bartholomeus, H. M., Kooistra, L., 2017. Comparing RIEGL RiCOPTER UAV LiDAR Derived Canopy Height and DBH with Terrestrial LiDAR. [Online] *Sensors* 2017, 17(10), 2371, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17102371>.

Cohen, Jacob. 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales, *Educational and Psychological Measurement*, 20(1):37-46. [Online] 1960. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

Elmqvist, M., Jungert, E., Lantz, F., Persson, Å., Söderman, U. 2001. TERRAIN MODELLING AND ANALYSIS USING LASER SCANNER DATA. *FOI (Swedish Defence Research Institute)*. [Online] The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct., 2001. <https://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/3-w4/pdf/elmqvist.pdf>.

Jaakkola, A., Hyyppä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Lin, Y. 2010. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. [Online] Volume 65, Issue 6, Pages 514-522,, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.08.002>. 0924-2716.

Klápště, P., Fogl, M., Barták, V., Gdulová, K., Urban, Rudolf; Moudrý, V. 2020. Sensitivity analysis of parameters and contrasting performance of ground. *International Journal*. [Online] 2020. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1791267>. 1672-1694.

Landis, J. Richard a Koch, Gary G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data,. *International Biometric Society, Wiley, Biometrics, no. 1, pages 159 -174, volume 33.* [Online] 1977. <http://www.jstor.org/stable/2529310>. 0006341X, 15410420.

Masaharu, Hiroshi a Ohtsubo, Kazuyuki. 2002. A FILTERING METHOD OF AIRBORNE LASER SCANNER DATA FOR COMPLEX. *Geographical Survey Institute, Kitasato-1, Tsukuba-shi, 305-0811 Japan*. [Online] *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2002. https://www.researchgate.net/profile/Hiroshi-Masaharu/publication/241633666_A_filtering_method_of_airborne_laser_scanner_data_for_complex_terrain/links/0f31753b346f85bc3d000000/A-filtering-method-of-airborne-laser-scanner-data-for-complex-terrain.pdf. 165–169.

Meng, Xuelian, Currit, Nate a Zhao, Kaiguang. 2010. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *A Review of Critical Issues" Remote Sens. 2, no. 3: 833-860*. [Online] 2010. <https://doi.org/10.3390/rs2030833>.

Meng, Xuelian, Wang, Le a Currit, Nate. 2009. Morphology-based Building Detection from Airborne Lidar Data. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. [Online] *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Number 4 / April 2009, pp. 437-442(6), 2009. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.4.437>.

Mial, E Warren. 2019. Automotive LIDAR Technology. *TriLumina Corporation, Albuquerque, New Mexico, USA*. [Online] *Symposium on VLSI Circuits, Kyoto, Japan, 2019*, pp. C254-C255,, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8777993>.

Montealegre, A. L., Lamelas, M. T. a de la Riva, J. 2015. A Comparison of Open-Source LiDAR Filtering Algorithms in a Mediterranean Forest Environment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. [Online] vol. 8, no. 8,, Srpen 2015. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2436974>. 4072-4085.

Moudrý, V., Klápště, P., Fogl, M., Gdulová, K., Barták, V., Urban, R. 2020. Assessment of LiDAR ground filtering algorithms for determining ground surface of non-natural terrain overgrown with forest and steppe vegetation. *Measurement*,. [Online] Volume 150,, 107047, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107047>. 0263-2241.

Pei, Jun. 2019. 11 Myths About LiDAR Technology. *Electronic Design*. [Online] Cepton, 2019. <https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21807556/11-myths-about-lidar-technology>.

Petrie, G. a Kennie, T.J.M. 1987. Terrain modelling in surveying and civil engineering. *Computer-Aided Design*,. [Online] Volume 19, Issue 4, , 1987. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(87\)90066-2](https://doi.org/10.1016/0010-4485(87)90066-2). Pages 171-187, 0010-4485.

Polat, Nizar a Murat, Uysal. 2018. An experimental analysis of digital elevation models generated with Lidar Data and UAV photogrammetry. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 46.7. [Online] 2018. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0760-8>. 1135-1142.

Rablau, Corneliu. 2019. LIDAR – A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences. *Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics*:. [Online] ETOP, 2019. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ETOP-2019-11143_138. Papers (Optical Society of America, 2019), paper 11143_138.

Shan, Jie a Aparajithan, Sampath. 2005. Urban DEM Generation from Raw Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. [Online] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Number 2 / February 2005, pp. 217-226(10), 2005. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.2.217>.

Silván-Cárdenas, J.L. a Wang, L. 2006. A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. [Online] Volume 61, Issue 1,, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.06.002>. Pages 11-22, 0924-2716.

Sithole, George a Vosselman, George. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds,. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*,. [Online] Volume 59, Issues 1–2, Pages 85-101.,, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004>. 0924-2716.

Susaki, Junichi. 2012. Adaptive Slope Filtering of Airborne LiDAR Data in Urban Areas for Digital Terrain Model (DTM) Generation. [Online] 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4061804>. *Remote Sens.* 4, no. 6: 1804-1819.

USGS. ©usgs 2020. U.S. Geological Survey. *Mapping, Remote Sensing, and Geospatial Data*. [Online] ©usgs 2020. https://www.usgs.gov/faqs/what-are-digital-elevation-models-dems?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.

USGS ©usgs 2021. U.S. Geological Survey. *Mapping, Remote Sensing, and Geospatial Data*. [Online] USGS, ©usgs 2021. https://www.usgs.gov/faqs/what-lidar-data-and-where-can-i-download-it?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.

Vosselmann, George. 2000. SLOPE BASED FILTERING OF LASER ALTIMETRY DATA. *Department of Geodesy, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands*. [Online] Working Group III/2, 2000. https://www.researchgate.net/profile/George-Vosselman/publication/228719860_Slope_based_filtering_of_laser_altimetry_data/links/00463524c7061a1220000000/Slope-based-filtering-of-laser-altimetry-data.pdf.

Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., Vopěnka, P. 2016. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests* 2016, 7(3), 62. [Online] 2016. <https://doi.org/10.3390/f7030062>.

Wehr, Aloysius a Lohr, Uwe. 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. [Online] Volume 54, Issues 2–3, Pages 68-82.,, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8). 0924-2716.

Wieser, M., Hollaus, M., Mandlbürger, G., Glira, P., Pfeifer, N. 2016. ULS LiDAR supported analyses of laser beam penetration from different ALS systems into. *ISPRS Annals of the Photogrammetry*. [Online] Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume III-3, 2016, XXIII ISPRS Congress12–19 July, Prague, Czech Republic, 2016. <https://d-nb.info/1143836367/34>.

Yan, Wai Y., Shaker, Ahmed a LaRocque, Paul E. 2019. Scan Line Intensity-Elevation Ratio (SLIER): An Airborne LiDAR Ratio Index for Automatic Water Surface Mapping. *Remote Sens.* 11, no. 7: 814. [Online] 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11070814>.

Yilmaz, Cigdem Serifoglu a Gungor, Oguz. 2018. Comparison of the performances of ground filtering algorithms and DTM generation from a UAV-based point cloud. [Online] *Geocarto international*, 2018, 33.5: 522-537, 2018. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1265599>.

Zeybek, Mustafa a Şanlıoğlu, İsmail. 2019. Point cloud filtering on UAV based point cloud. *Measurement*,. [Online] Volume 133, Pages 99-111,, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.013>. 0263-2241.

Zhang, Keqi a Whitman, Dean. 2005. Comparison of Three Algorithms for Filtering Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. [Online] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Number 3 / March 2005, pp. 313-324(12), 2005. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.3.313>.

Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Zhang, Jianhua Y. 2003. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. [Online] vol. 41, no. 4, pp. 872-882, 2003. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1202973>.