

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra prostorových věd



Fakulta životního
prostředí

**Kvalita a hustota výškových dat družicové
laserové altimetrie na území ČR**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Barták, Ph.D.

Bakalant: Vladislav Baryshev

2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vladislav Baryshev

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Kvalita a hustota výškových dat družicové laserové altimetrie na území ČR

Název anglicky

Quality and density of the elevation data from space-born laser altimetry in the Czech Republic

Cíle práce

Posoudit kvalitu a hustotu dat družicové laserové altimetrie na území ČR pro účely digitálního modelování terénu.

Metodika

Práce se zaměří na posouzení kvality a hustoty dat družicové laserové altimetrie na území ČR pro účely digitálního modelování terénu. Budou použita a porovnána data z misí GEDI a ICESat-2, se zaměřením na posouzení různých přístupů k filtraci chybných měření, a to jak na základě údajů o kvalitě jednotlivých segmentů dat, která jsou publikována společně s daty, tak na základě externích proměnných (např. svažitost). Přesnost filtrovaných modelů bude posouzena pomocí referenčních výškových dat z leteckého laserového skenování.

Doporučený rozsah práce

30 – 50 stran

Klíčová slova

DTM, ICESat-2, GEDI, Space-born laser altimetry

Doporučené zdroje informací

- Adam, M., Urbazaev, M., Dubois, C., & Schmullius, C. (2020). Accuracy assessment of GEDI terrain elevation and canopy height estimates in European temperate forests: Influence of environmental and acquisition parameters. *Remote Sensing*, 12(23), 3948.
- Moudrý, V., Gdulová, K., Gábor, L., Šárovcová, E., Barták, V., Leroy, F., ... & Prošek, J. (2022). Effects of environmental conditions on ICESat-2 terrain and canopy heights retrievals in Central European mountains. *Remote Sensing of Environment*, 279, 113112.
- Urbazaev, M., Hess, L. L., Hancock, S., Sato, L. Y., Ometto, J. P., Thiel, C., ... & Schmullius, C. (2022). Assessment of terrain elevation estimates from ICESat-2 and GEDI spaceborne LiDAR missions across different land cover and forest types. *Science of Remote Sensing*, 6, 100067.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vojtěch Barták, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2024

prof. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 3. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Kvalita a hustota výškových dat družicové laserové altimetrie na území ČR 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

Podpis:

Poděkování

Především bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Vojtěchu Bartáku, Ph.D. za jeho vstřícnost, profesionální a vřelý přístup, cenné rady a připomínky při vedení bakalářské práce a za čas věnovaný konzultacím. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje posouzení kvality a hustoty výškových dat získaných ze satelitních misí ICESat-2 a GEDI na území České republiky pro účely digitálního modelování terénu. V případě ICESat-2 byl hodnocen datový produkt ATL08, který obsahuje informace o výšce terénu a vegetace. Ekvivalentním datovým produktem GEDI je L2A. Posouzení přesnosti probíhalo pomocí porovnání výškových dat ze satelitů s referenčními výškovými daty z leteckého laserového skenování. Na základě těchto rozdílů byly spočítány metriky ME a RMSE. Důraz byl kladen na možnosti filtrace vstupních dat, a to jak na základě parametrů, které jsou součástí datových produktů misí, tak na základě externích dat v podobě Copernicus DEM GLO-30 a z něj spočítané svazitosti. V případě ICESat-2 měly vliv na přesnost měření parametry, jako jsou počet ground fotonů (`n_te_photons`) v segmentu, denní doba (`night_flag`), přítomnost mraků (`cloud_flag_atm`) a vícenásobného rozptylu (`msw_flag`). Po aplikaci filtrace na základě těchto atributů a externích dat klesly hodnoty ME a RMSE z počátečních -0,037 m a 0,89 m na -0,002 m a 0,65 m. Bylo zjištěno, že GEDI je méně přesný a vliv na přesnost měření měly parametry, jako jsou "quality_flag", "num_detected_modes" v kombinaci s "landsat_treecover", "degrade_flag" a "rx_assess_flag". Hodnoty ME a RMSE klesly po filtraci z počátečních 1281,38 m a 2591,66 m na 0,5 m a 2,29 m. Svazitost výrazně ovlivňovala přesnost měření u obou misí. Při zkoumání hustoty bodů se ukázalo, že GEDI poskytuje výrazně rovnoměrnější rozložení bodů. Digitální model terénu (DTM) vytvořený z dat ICESat-2 může dosáhnout rozlišení 1 km, zatímco při přibližně stejném počtu bodů z dat GEDI je možné dosáhnout rozlišení 250 m.

Klíčová slova: DTM, ICESat-2, ATL08, GEDI, L2A, Družicová laserová altimetrie

Abstract

This bachelor thesis deals with the assessment of the quality and density of elevation data obtained from ICESat-2 and GEDI satellite missions in the Czech Republic for the purpose of digital terrain modelling. In the case of ICESat-2, the ATL08 data product, which contains information on terrain height and vegetation, was evaluated. The equivalent GEDI data product is L2A. Accuracy was assessed by comparing height data from satellites with reference height data from airborne laser scanning. ME and RMSE metrics were calculated based on these differences. Emphasis was placed on the possibility of filtering the input data, both based on parameters included in the mission data products and on external data in the form of Copernicus DEM GLO-30 and the slope calculated from it. In the case of ICESat-2, parameters such as the number of ground photons (`n_te_photons`) in a segment, time of day (`night_flag`), presence of clouds (`cloud_flag_atm`) and multiple scattering (`msw_flag`) affected the accuracy of the measurements. After applying filtering based on these attributes and external data, the initial ME and RMSE values decreased from -0.037 m and 0.89 m to -0.002 m and 0.65 m, respectively. GEDI was found to be less accurate and parameters such as `quality_flag`, `num_detectedmodes` combined with `landsat_treecover`, `degrade_flag` and `rx_assess_flag` were found to affect the accuracy of the measurements. After filtering, the initial ME and RMSE values dropped from 1281.38 m and 2591.66 m to 0.5 m and 2.29 m, respectively. The slope significantly affected the accuracy of the measurements for both missions. During the examination of density, GEDI was found to provide a significantly more uniform point distribution. A digital terrain model (DTM) created from ICESat-2 data can achieve a resolution of 1 km, while nearly the same amount of data points from GEDI allows for achieving a resolution of 250 m.

Key words: DTM, ICESat-2, ATL08, GEDI, L2A, Space-born laser altimetry

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíle práce	2
3. Literární rešerše	3
3.1. Laser	3
3.2. Princip měření vzdálenosti laserem	4
3.3. Letecké laserové skenování	4
3.4. Satelitní LiDAR	5
3.4.1. ICESat-2	5
3.4.2. GEDI	7
4. Metodika	9
4.1. Charakteristika zájmového území	9
4.2. Příprava dat	9
4.3. Zpracování dat	10
4.4. Atributy	11
4.4.1. ICESat-2	11
4.4.2. GEDI	12
4.5. Evaluace vertikální přesnosti	13
5. Výsledky	14
5.1. ICESat-2	14
5.1.1. Analýza vlivu parametrů	14
5.1.2. Filtrace na základě Copernicus DEM a svažitosti	17
5.1.3. Kombinace filtrací	18
5.2. GEDI	20
5.2.1. Analýza vlivu parametrů	20
5.2.2. Filtrace na základě Copernicus DEM a svažitosti	22
5.2.3. Kombinace filtrací	23
5.3. Hustota a pokrytí dat	24
6. Diskuse	27
7. Závěr	31
8. Reference	32

Přehled použitých zkratk

ALS – Airborne Laser Scanning

Bpv – Balt po vyrovnání

ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální

DEM – Digital elevation model

DMR – Digitální model reliéfu

DSM – Digitální model povrchu

DTM – Digitální model terénu

LiDAR – Light Detection and Ranging

S-JTSK – Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

1. Úvod

V současné době, kdy technologický pokrok nabízí stále sofistikovanější metody pro mapování naší planety, se stává vytváření digitálních elevačních modelů (DEM) nezbytným nástrojem pro širokou škálu aplikací, od environmentálního monitoringu až po urbanistické plánování. Současné globální digitální elevační modely byly vytvořené pomocí metod jako je interferometrie s využitím radaru C-band a X-band (např. SRTM, TanDEM-X) nebo stereoskopie s využitím pasivního optického snímání (např. ASTER, ALOS). Však ve srovnání s DEM získanými pomocí leteckého LiDARu (ALS) tyto modely mají svá omezení. Jak upozorňují Moudrý et al. (2018), problémy jsou často spojeny s většími vertikálními chybami, nízkým rozlišením a skutečností, že typicky je reprezentován digitální model povrchu (DSM), kde umělé struktury a zejména vegetace zůstávají součástí zaznamenaného terénu. Jedním z hlavních nedostatků těchto modelů je neschopnost metod pronikat skrz vegetaci, což je klíčové pro přesné topografické mapování a aplikace vyžadující detailní znalost terénu.

V této souvislosti představují mise ICESat-2 a GEDI, které provádějí altimetrická měření Země pomocí vesmírného lidaru, revoluci v naší schopnosti získávat přesná topografická data. Tato technologie naopak nabízí schopnost pronikat skrz vegetaci a poskytovat detailnější a přesnější data o terénu. ICESat-2 je mise NASA především zaměřená na měření změn objemu ledu, která byla spuštěna v září 2018. Tento satelit je nástupce původní mise ICESat a je vybaven pokročilým laserovým altimetrem ATLAS, který poskytuje detailní a přesná výšková data různých povrchů. GEDI je další revoluční mise připojená k Mezinárodní vesmírné stanici (ISS). Laserový altimetr byl vypuštěn v prosinci 2018 a má za primární cíl poskytnout podrobná data o struktuře lesů a biomase. Ačkoli primární zaměření těchto misí nebylo přímo na modelování terénu, jejich data mohou být využita pro tento účel, poněvadž obě mise nabízí datové produkty obsahující informace o výšce zemského povrchu. Vzhledem k potenciálu těchto dat pro modelování terénu je klíčové zjistit, jakou přesnost a hustotu měření tyto mise nabízejí.

2. Cíle práce

Tato studie se zaměřuje na posouzení kvality a hustoty dat získaných z misí ICESat-2 a GEDI na území České republiky s cílem vytvořit digitální model terénu. Pro tyto účely byla zvolena část území České republiky, která primárně pokrývá celou Moravu a Slezsko. Posouzení přesnosti bylo provedeno na základě metrik ME a RMSE. V případě ICESat-2 byl k analýze použit datový produkt ATL08 s rozlišením 20 x 12 metrů, který poskytuje informace o výšce terénu. U GEDI je odpovídajícím produktem L2A. Důraz byl kladen na možnosti filtrace dat pomocí dostupných parametrů z datových produktů za účelem identifikovat a eliminovat měření s potenciálně vyššími chybami. Také bylo zkoumáno, jak může filtrace dat s využitím Copernicus DEM GLO-30 a z něj odvozené svažitosti přispět ke zlepšení přesnosti měření. V neposlední řadě bylo třeba vyhodnotit hustotu a pokrytí dat, a to jak po přímé filtraci pomocí referenčního modelu s přesnými prahy, tak po aplikaci vlastní filtrace založené na parametrech z datových produktů a externích dat v podobě Copernicus DEM GLO-30. Zásadní bylo zhodnotit rozložení dat v planimetrickém směru, což představuje analýzu jejich rozprostření v horizontální rovině přes zkoumané území. Výsledek této analýzy poskytuje přibližný odhad možného rozlišení a přesnosti měření, které lze očekávat při vytváření digitálního modelu terénu s využitím dat z ICESat-2 a GEDI.

3. Literární rešerše

3.1. Laser

Slovo "laser" je akronymem pro "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (zesílení světla stimulovanou emisí záření). Lasery se odlišují od ostatních zdrojů světla díky svým unikátním vlastnostem. Laserový paprsek má pouze jednu vlnovou délku světla, což znamená, že je monochromatický. Koherence umožňuje laserovým paprskům udržet svou strukturu a směrovost na velké vzdálenosti. Fotony v laserovém paprsku minimálně divergují od svého původního bodu, tím pádem paprsek zůstává velmi úzký i na dlouhé vzdálenosti (Thomas & Isaacs, 2011).

Historie laseru sahá na začátek 20. století, kdy v roce 1900 Max Planck položil základy kvantové teorie formací vztahu mezi zářivostí, teplotou a frekvencí světla. Tento koncept byl rozšířen Albertem Einsteinem v roce 1917, když představil teorii stimulované emise (Maňková, 2000). To je proces, kdy foton stejné energie interaguje s excitovaným atomem, což vede k vyzaření dalšího fotonu s identickou energií, fází a směrem. Tato teorie položila základy pro vývoj laseru. Vývoj laseru však nabral na rychlosti až v 50. letech 20. století, kdy Charles Townes a jeho kolegové vytvořili první maser (mikrovlnný zesilovač pomocí stimulované emise záření) v roce 1954 (Gross & Herrmann, 2007). Tento koncept byl následně rozšířen na optické frekvence, což vedlo k vývoji prvního funkčního laseru Theodorem Maimanem v roce 1960. Maiman demonstroval laserovou emisi pomocí malého rubínového prutu, a to představovalo průlom v praktickém využití stimulované emise pro generování koherentního světla (Hecht, 2010). V roce 1964 byla přiznána Nobelova cena za fyziku Charlesu Townesovi, Nikolaji Basovovi a Alexandru Prokhorovovi za jejich průkopnický výzkum v oblasti kvantové elektroniky, který umožnil vytvoření oscilátorů a zesilovačů založených na principu laseru a maseru. Od té doby laserová technologie prošla rychlým vývojem a našla široké uplatnění v různých oblastech vědy, medicíny, průmyslu a techniky.

Konstrukce laseru zahrnuje tři hlavní komponenty:

- 1) Aktivní prostředí (lasing medium) je základním stavebním prvkem laseru. Může být pevnolátkové (křišťály nebo polovodiče), kapalinové (organická barviva), plynové nebo diodové (laserová dioda). Úkolem aktivního prostředí je absorbovat energii dodanou stimulačním zdrojem a přeměnit ji na světelné záření prostřednictvím stimulované emise. Výběr specifického média určuje vlnovou délku emitovaného laserového světla, což má zásadní význam pro specifické aplikace laseru (Vrbová M et al., 1998).
- 2) Zdroj záření (pump) poskytuje energii potřebnou k excitaci atomů nebo molekul v aktivním prostředí do vyššího energetického stavu. Existují různé typy zdrojů záření, včetně optických (bleskové lampy, kontinuální obloukové lampy nebo dokonce jiné lasery), elektrických (trubice s plynovým výbojem, elektrický proud v

polovodičích) nebo chemických. Volba zdroje závisí na typu aktivního média a požadovaných vlastnostech laserového světla.

- 3) Rezonátor (optical resonator) je zpravidla tvořen párem zrcadel, která reflektují světlo zpět do aktivního prostředí, čímž dochází k jeho opakované stimulované emisi a následnému zesílení. Jedno z těchto zrcadel je částečně propustné, aby umožnilo výstup části světla jako laserový paprsek (Thomas & Isaacs, 2011).

3.2. Princip měření vzdálenosti laserem

Měření vzdálenosti laserem, často označované jako LiDAR (Light Detection and Ranging), je metoda využívající vlastnosti laserového záření pro určení vzdálenosti mezi laserovým zařízením a cílem. Tento princip spočívá v emitování laserového paprsku směrem k cíli, detekci odraženého signálu a výpočtu vzdálenosti na základě času, který uplynul mezi vysláním a přijetím signálu. Vzhledem k tomu, že rychlost světla ve vzduchu je konstantní (přibližně 299 792 km/s), je možné velmi přesně určit vzdálenost k objektu. Tento časový údaj vychází z jednoduchého vztahu: vzdálenost je rovna polovině součinu času a rychlosti světla.

Součástí zařízení LiDAR jsou zdroj laserového záření, mechanický prvek, optická soustava, detektor elektromagnetického záření a velmi přesné hodiny. V současnosti je k dispozici široká škála laserových emitorů, které lze využít jako zdroje záření pro lidarové systémy. Pro výkonné lidary se obvykle používají pevnolátkové lasery rubínové nebo dnes častější neodymové (Nd:YAG), které jsou známé svou vysokou efektivitou. Pro aplikace nevyžadující vysoký výkon se často uplatňují diodové lasery. Volba konkrétního typu laseru závisí na potřebném výkonu a požadované vlnové délce záření. Detektor, synchronizovaný na stejnou vlnovou délku jako vysílané záření, je odpovědný za zachycení odraženého signálu. Optické soustavy se starají o směřování záření do úzkého svazku a o synchronizaci emitoru s detektorem, což se obvykle docílí použitím polopropustného hranolu. Směr paprsku se mění mechanickým prvkem, na kterém je umístěn poslední optický prvek systému (zrcadlo nebo hranol). Díky tomu lze efektivně skenovat specifickou oblast bez nutnosti otáčení celého LiDARu, a to výrazně zvyšuje rychlost měření (Dolanský, 2004).

Existuje také druhý způsob měření vzdálenosti laserem (typický pro terestrické lidary), který spočívá ve vysílání elektromagnetického záření kontinuálně a odhad vzdálenosti lze provést na základě fázového posunu mezi vyslanou a přijatou sinusoidální vlnou (Petrie et al., 2008).

3.3. Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování (ALS, airborne lidar scanning) představuje metodu využívající speciálně upravené snímače připevněné k různým létajícím objektům (například letadla, vrtulníky nebo drony). Rozvoj ALS byl umožněn díky pokrokům v jiných

technologiích, zejména v inerciálních navigačních systémech a GPS, jejichž existence je nezbytná pro určení přesné polohy letadla. Technologie se začala široce rozšiřovat po roce 2000. Oproti tradičním metodám, jako jsou fotogrammetrie a tachymetrie, poskytuje ALS řadu výhod, včetně schopnosti zachytit velké množství bodů v těsné blízkosti, zprostředkovat trojrozměrná data a umožnit několikanásobný odraz (Dolanský, 2001). Výška létajícího objektu se typicky pohybuje od 300 do 5000 metrů nad zemí, což umožňuje pokrývat rozsáhlé oblasti s různou mírou detailu. Velikost pokryté plochy (footprint) obvykle činí mezi 0,2 a 2 metry v průměru, přičemž vyšší letová výška umožňuje pokrýt větší plochu, zatímco nižší výška zajišťuje vyšší rozlišení výsledných dat (Tencer, 2012).

Výsledkem leteckého laserového skenování je bodové mračno, kde každý bod obsahuje informace o své poloze ve třech dimenzích (X, Y, Z). Z těchto bodových mračen lze pak pomocí klasifikace a interpolace bodů vytvářet různé typy digitálních výškových modelů (DEM). Vyšší hustota bodů v bodovém mračnu přispívá k lepšímu rozlišení konečných digitálních modelů. Především rozdělujeme digitální model terénu (DTM) a digitální model povrchu (DSM). Klíčovým rozdílem mezi těmito modely je způsob, jakým jsou vybírány odrazy laserových impulsů pro generování konečného modelu. **DSM** je výsledkem interpolace hodnot získaných z prvních odrazů a zahrnuje všechny objekty na zemském povrchu, včetně vegetace, budov a dalších konstrukcí. Tento model se využívá pro městské a regionální plánování, analýzu viditelnosti, modelování šíření rádiových vln a stínění v městských oblastech. **DTM** je naopak výsledkem interpolace hodnot získaných z posledních odrazů a reprezentuje topografii zemského povrchu bez přítomnosti objektů (Gojda et al., 2011). Model nachází uplatnění v hydrologickém modelování, plánování využití půdy, projektování inženýrských staveb a dalších aplikacích, kde jsou důležité přirozené kontury terénu.

3.4. Satelitní LiDAR

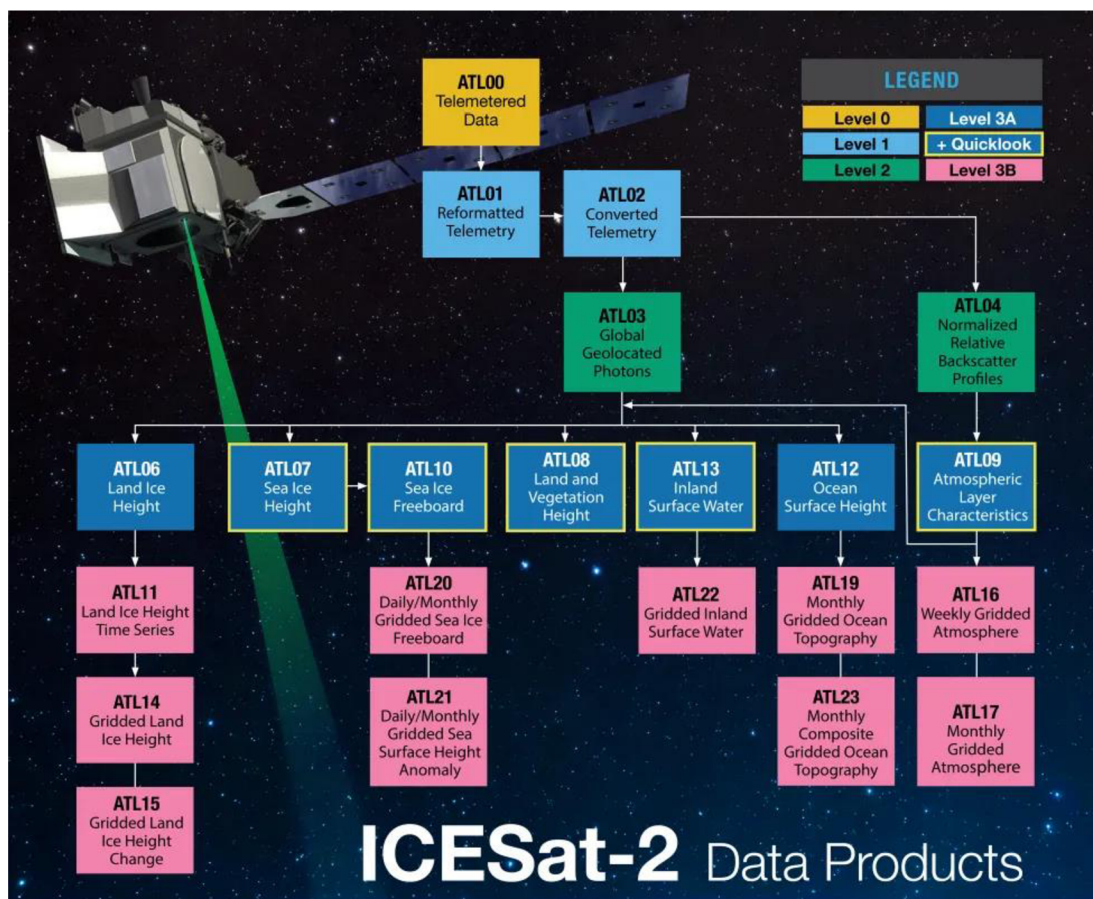
3.4.1. ICESat-2

Satelitní mise ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2), která byla spuštěna v září 2018, je pokračováním průkopnické mise ICESat z let 2003 až 2009. Hlavním cílem těchto misí je monitorování změn v ledovcích, mapování výšky lesních porostů a topografie země s vysokou přesností. První mise ICESat významně přispěla k pochopení dynamiky ledovců na Zemi a vlivu na globální klima, ale její schopnosti byly omezené technologií tehdejší doby. Hlavním nástrojem na palubě ICESat byl lidar GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), který jako první kontinuálně pozoroval Zemi. GLAS byl vybaven třemi lasery Nd-YAG o vlnových délkách 1064 nm a 532 nm. Každý pulz laseru pokrýval oblast přibližně 70 metrů v průměru a byl vysílán ve frekvenci 40 pulzů za sekundu na trajektorii oddělenou každých 170 metrů (Fouldinejad et al., 2019).

Satelit ICESat-2 je vybaven pokročilým laserovým altimetrem ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System), který vysílá 10 000 laserových pulzů za sekundu. Každý pulz vysílá 300 trilionů laserových fotonů v zeleném spektru na zemský povrch. Satelit ICESat-2 obíhá Zemi rychlostí 25 200 km/h ve výšce 500 km a během 91 dnů oběhne 1387 jedinečných orbit. Mise každodenně shromažďuje jeden terabyte dat (NASA, 2018). Přístroj ATLAS využívá zelené laserové paprsky (vlnová délka 532 nm) k měření vzdálenosti k povrchu a rozděljuje výstupní laserový puls do tří párů paprsků, kde pravý je vždy slabý a levý je silný, s podílem energie přibližně 1:4 (Neumann et al., 2019). Stopy jednotlivých párů jsou ve vzdálenosti 3,3 km a stopy v rámci jednoho páru jsou ve vzdálenosti 90 m (Neuenschwander et al., 2022). ICESat-2 využívá polární oběžnou dráhu s inklinací 92°, která umožňuje provádět měření až do zeměpisných šířek 88° severního a jižního pólu. Tato specifická konfigurace dráhy zajišťuje, že satelit může pokrývat velkou část Země, přičemž se zaměřuje zejména na polární regiony. Z toho plyne, že nad rovníkem ICESat-2 přeletuje s menší hustotou než v polárních oblastech. Výšky povrchu zaznamenané satelitem jsou odvozeny vzhledem k elipsoidu WGS84 (Markus et al., 2017).

Mise ICESat-2, ačkoliv je optimalizována pro měření změn v ledovcích, shromažďuje data ze všech povrchů od pólu k pólu. Obrázek 1 znázorňuje všechny datové **produkty** mise. Zpracování dat z ATLAS/ICESat-2 začíná dvěma produkty první úrovně: ATL01 vypočítává časy letu fotonů a ATL02 tyto časy koriguje s ohledem na teplotní a napěťové vlivy. Následně se soubor dat rozděljuje na dva vědecké datové produkty druhé úrovně: ATL03 uvádí zeměpisnou šířku, délku a výšku pro každý foton, zatímco ATL04 poskytuje atmosférické profily normalizovaného relativního zpětného rozptylu. Produkty třetí úrovně poskytují informace o výšce terénu, struktuře vegetace, úrovni oceánů, výškách vnitrozemských vodních toků, atmosférických srážkách a jiných (NSIDC, 2023).

Klíčovou součástí této bakalářské práce jsou data produktu ATL08, která poskytují informace o výšce terénu a vegetace pro každé 100 m x 12 m (základní segment). Součástí produktu jsou také různé parametry pro každý 100 m x 12 m segment popisující podmínky, za kterých byla data získána: stav atmosféry, síla paprsků, počet vrácených fotonů, přítomnost sněhu a jiné. Dál je možnost rozdělit základní segment na pět subsegmentů (5 x 20 m = 100 m) (Neuenschwander et al., 2022; Neuenschwander & Pitts, 2019).



Obrázek 1: Přehled produktů ICESat-2 (NSIDC, 2023)

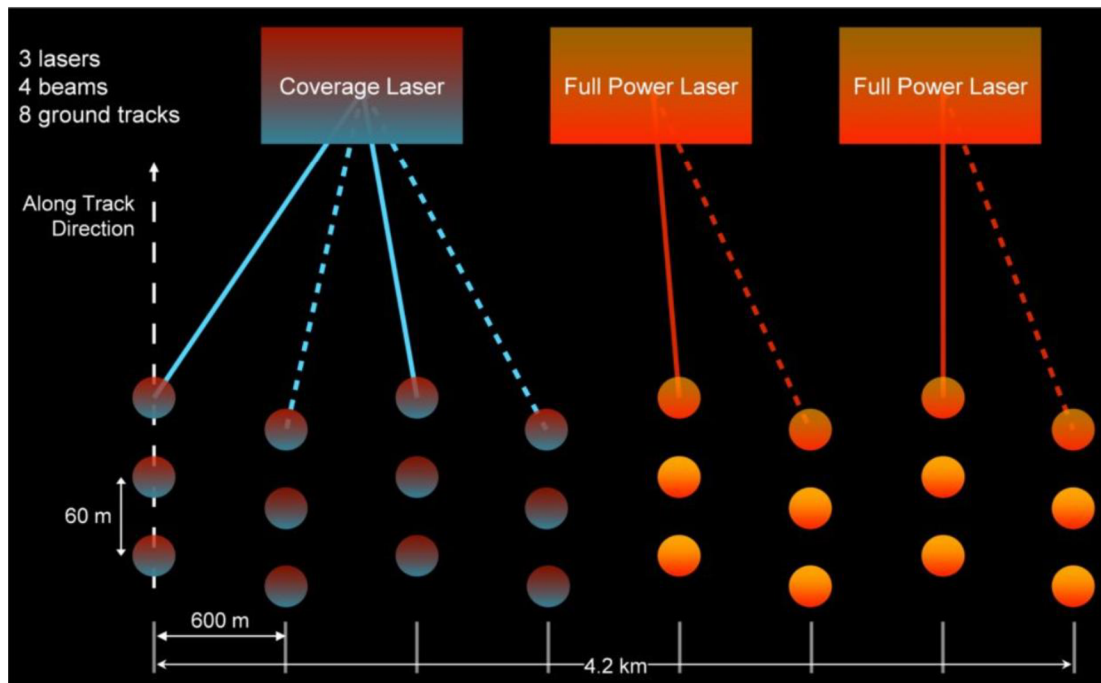
3.4.2. GEDI

GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) je laserový altimetr umístěný na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS). Do počátku roku 2018 probíhalo sestavování a v prosinci 2018 byl tento přístroj instalován na ISS. Po uplynutí přibližně čtyřměsíčního testovacího období, které sloužilo k ověření funkčnosti a optimalizace nastavení pro sběr dat, začal GEDI nepřetržitě shromažďovat data (NASA, 2024a). Původně plánovaná délka mise měla činit dva roky, ale později byla prodloužena do března 2023, kdy byl přístroj uveden do neaktivního stavu. Tento krok byl součástí plánovaných operací ke zlepšení využití prostoru pro různé vědecké projekty. Očekává se, že se GEDI vrátí na svou původní pozici v dubnu 2024 po ukončení činnosti aktuální mise, která nyní dané místo využívá (NASA, 2024b).

Mise má za primární cíl poskytnout data o výšce povrchu, výšce vegetace a její vertikální struktuře ve vysokém rozlišení. Využití dat GEDI je klíčové pro zlepšení předpovědi počasí, management lesů, sledování stavu ledovců a sněhových pokrývek a pro tvorbu přesnějších digitálních modelů terénu (NASA, 2024a).

GEDI je vybaven třemi lasery Nd:YAG emitujícími světlo s vlnovou délkou 1064 nm. Dva z laserů pracují na plný výkon a jeden je rozdělen do dvou paprsků, čímž vznikají celkem čtyři paprsky generující osm paralelních drah (čtyři „silné“ a čtyři

„slabé“). Tyto lasery generují pulzy 242krát za sekundu s výkonem 10 mJ (NASA, 2024c). Divergence paprsků je 56 mrad, což vytváří stopy na povrchu s průměrem 25 metrů. Příčná vzdálenost mezi jednotlivými stopami je 600 metrů a vzdálenost mezi nimi ve směru letu je 60 metrů. Tím pádem celková šířka oblastí, kterou dráha pokrývá na povrchu Země, činí 4,2 kilometru (viz obr. 2).



Obrázek 2: Schéma stopy měření GEDI na povrchu Země (NASA, 2024c).

Datové produkty GEDI jsou kategorizovány podle úrovně (celkem 4), které označují míru zpracování. Všechny produkty jsou volně dostupné. Data první úrovně (L1) obsahují geolokalizované surové vlnové formy. Na druhé úrovni (L2) jsou poskytnuty informace o výšce terénu, výšce a struktuře vegetace. Produkty třetí úrovně (L3) jsou vytvořeny prostorovou interpolací z dat druhé úrovně a představují odhady v mřížce. Produkty čtvrté úrovně (L4) představují nejvyšší úroveň produktů GEDI a reprezentují výstupy modelů. Metriky stop odvozené z datových produktů L2 jsou převedeny na odhady hustoty nadzemní biomasy pomocí kalibračních rovnic. Následně jsou tyto stopy použity k určení průměrné hodnoty biomasy a její nejistoty v buňkách 1 km pomocí statistické teorie (NASA, 2024d).

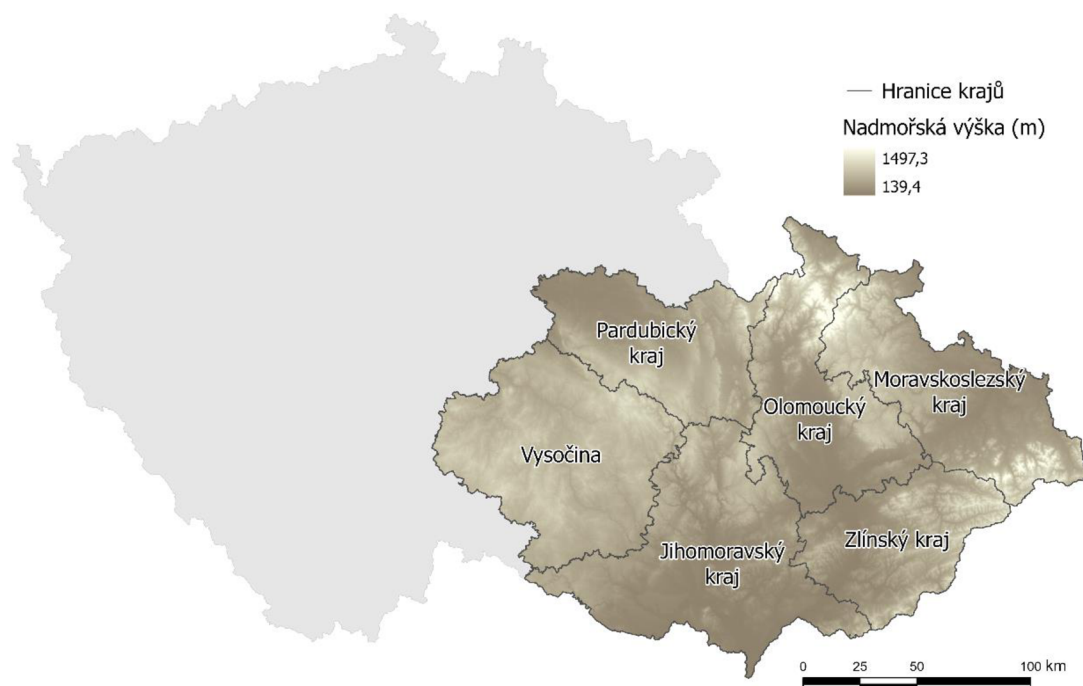
4. Metodika

4.1. Charakteristika zájmového území

Pro analýzu dat byla vybrána část území ČR, která zahrnuje především Moravu a Slezsko. Pardubický kraj a Vysočina byly celé přidány do zájmového území. Rozloha celého území je 33 175 km². Nadmořská výška je mezi 140 – 1500 metrů (viz obr. 3). Tento výběr umožňuje podrobně zkoumat distribuci a rozložení měření a poskytuje reprezentativní přehled o schopnostech ICESat-2 a GEDI zachytit topografické charakteristiky v různých typech krajiny.

Morava a Slezsko se rozkládají na východě České republiky a jsou geologicky rozmanité. Morava zahrnuje části Západních Karpat s pohořími jako jsou Beskydy a Jeseníky. Slezsko zahrnuje část Moravskoslezských Beskyd a Ostravsko-karvinskou pánvi. Střední a západní část Moravy charakterizují pahorkatiny Českomoravské vrchoviny a úrodné nížiny Jihomoravského kraje.

Vegetace se liší podle nadmořské výšky, od širokolistých a smíšených lesů v nížinných a pahorkatinných oblastech po horské smrčiny a alpínskou tundru na vrcholcích Beskyd a Jeseníků.



Obrázek 3: Nadmořská výška (Copernicus DEM GLO-30) v oblasti zájmového území

4.2. Příprava dat

Data **ICESat-2** jsou volně dostupná na webových stránkách nsidc.org (Earthdata). Byl stažen datový produkt ATL08 (ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 6) ve formátu .h5, obsahující data získaná od října 2018 do října 2023.

Data **GEDI** jsou volně dostupná na webových stránkách searchdata.nasa.gov. Byla použita výšková data L2A získaná od dubna 2019 do března 2023.

DMR 5G

Jako referenční model pro srovnání výšek byl použit digitální model reliéfu 5. generace získaný z LiDARu (ALS) v letech 2009 až 2013 pro celou ČR s rozlišením 2 x 2 m. Nadmořská výška je ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu (ČÚZK, 2023). Model byl poskytnut katedrou geoprostorových věd FŽP ČZU.

Kvazigeoid ČR ČÚZK

Pro srovnání elipsoidických výšek naměřených satelitem s ortometrickými výškami z digitálního modelu reliéfu bylo nutné je sjednotit do jednoho výškového systému. Konkrétně byly odečteny hodnoty volně dostupného kvazigeoidu ČÚZK (ČÚZK, 2014) od hodnot elipsoidických výšek naměřených satelitem, čímž byly převedeny do výškového systému Bpv.

Copernicus DEM GLO-30

Copernicus DEM je digitální model povrchu (DSM), který představuje povrch Země včetně budov, infrastruktury a vegetace. Data byla získána prostřednictvím mise TanDEM-X v letech 2011 až 2015 s rozlišením 30 x 30 m. Jsou volně dostupná na webových stránkách opentopography.org. V rámci analýzy byla použita k dodatečné filtraci.

4.3. Zpracování dat

Po získání dat z družic bylo je potřeba převést z formátu .h5 do formátu .csv v prostředí statistického software R. Vybrány byly jen atributy potřebné pro další analýzu, což výrazně zredukovalo objem původních dat.

Pro ICESat-2 byly vybrány: `latitude_20m` (zeměpisná šířka bodu), `longitude_20m` (zeměpisná délka bodu), `h_te_bestfit_20m` (výška terénu v tomto bodě), `n_te_photons`, `subset_te_flag`, `night_flag`, `cloud_flag_atm`, `msw_flag`, `h_te_uncertainty`.

Pro GEDI byly vybrány: `lat_lowestmode` (zeměpisná šířka bodu), `lon_lowestmode` (zeměpisná délka bodu), `elev_lowestmode` (výška terénu v tomto bodě), `quality_flag`, `degrade_flag`, `rx_assess_flag`, `num_detectedmodes`, `landsat_treecover`.

Ve výsledku vznikly .csv soubory s hodnotami potřebných atributů pro jednotlivé naměřené body. Po nahrání .csv souborů v ArcGIS Pro nejdříve do tabulek pomocí funkce *Table To Table* a do shapefile pomocí *XY Table To Point*, byly vstupní body oříznuté na oblast zájmového území. Dalším krokem bylo potřeba zjistit hodnoty pro každý bod z referenčního digitálního modelu reliéfu. Jelikož data ICESat-2 a GEDI jsou ve souřadnicovém systému WGS 84 a DMR 5G je v S-JTSK Krovak EastNorth, byla data ze satelitů transformována do S-JTSK Krovak EastNorth. Pomocí nástroje

Extract Values To Points v ArcGIS Pro byly extrahovány hodnoty výšek z rastru. Stejným způsobem se postupovalo s hodnotami svažitosti.

Svažitost byla vypočítána pomocí funkce *Slope* (Hornův algoritmus s oknem 3 x 3 buňky) v ArcGIS Pro z Copernicus DEM GLO-30. Sklon je vyjádřen buď ve stupních nebo procentech, přičemž vyšší hodnota indikuje strmější sklon terénu.

Výsledné shapefile s hodnotami výšek referenčního DMR a svažitosti byly exportovány do .csv pro následné filtrace, počítání chyb a kreslení grafů v RStudio.

Pro analýzu distribuce a hustoty bodů byla použita funkce *Create Fishnet* k vytvoření sítě čtverců s různou velikostí stran. Pak bylo provedeno několik filtrací na základě přesného porovnání s DMR 5G. Následně byla provedena funkce *Spatial Join* mezi čtverci různé velikosti a výškovými body družic s různou přesností. Tímto krokem byly k jednotlivým čtvercům přiřazeny všechny body, které se nacházely v jejich rozsahu.

4.4. Atributy

4.4.1. ICESat-2

(Neuenschwander et al., 2022)

night_flag

Parametr slouží jako indikátor, který rozlišuje časové období provedení měření. Hodnota "1" označuje, že měření bylo realizováno během nočních hodin, zatímco hodnota "0" indikuje měření provedené v denním čase.

n_te_photons

Parametr ukazuje na počet ground fotonů identifikovaných v segmentu.

cloud_flag_atm

Proměnná určuje míru oblačnosti v atmosféře v době měření. Hodnota "0" signalizuje absenci mraků. Hodnota "1" znamená přítomnost jedné vrstvy mraků, zatímco hodnoty "2", "3" atd. postupně indikují přítomnost dvou, tří a více vrstev mraků.

msw_flag

Parametr udává přítomnost nebo stupeň vícenásobného rozptylu s hodnotami od "0" do "5", kde hodnota "0" indikuje, že nebyl detekován žádný vícenásobný rozptyl, zatímco hodnota "5" znamená největší vícenásobný rozptyl (byla detekována vrstva, která se dotýká země, jako je mlha, navátý sníh nebo prachová bouře).

h_te_uncertainty

Parametr představuje nejistotu odhadu výšky terénu. Zahrnuje všechny známé nejistoty, včetně geolokace, úhlu natočení, časování, radiálních chyb oběžné dráhy atd. V případě nedostatečného počtu fotonů odražených od země bude hlášena neplatná hodnota.

4.4.2. GEDI

(Hofton et al., 2019)

quality_flag

Tento indikátor je určen k posouzení, zda jsou data dostatečně kvalitní pro další analýzu (hodnota "1" znamená ANO, "0" NE). Je určen sadou podmínek, které kontrolují různé možné problémy s vlnovým tvarem signálu: zda nebyl signál oříznut nebo zda není návratový signál zastaralý atd. Pokud jsou všechny tyto podmínky splněny uspokojivě, je vlnový tvar považován za kvalitní a je označen *quality_flag* s hodnotou "1".

num_detectedmodes

Parametr indikuje počet detekovaných odrazů signálu před jeho návratem zpět k satelitu. Každý "mode" nebo odraz může reprezentovat různé prvky v krajině, kde došlo k odrazu signálu, jako je například vršek stromu, budova nebo zemský povrch.

rx_assess_flag

Parametr označuje různé chybové stavy ve vlnovém tvaru signálu. Tabulka 1 znázorňuje hodnoty tohoto parametru, které jsou decimální reprezentace bitových polí, kde každý bit představuje určitý stav vlnové formy. Pokud je hodnota *rx_assess_flag* jiná než nula, může to značit problém s kvalitou dat.

Hodnoty	V binárním tvaru
0	00 0000 0000
512	10 000 00000
640	10 100 00000
896	11 100 00000
...	

Tabulka 1: Hodnoty parametru v desítkovém a binárním tvaru

Například hodnota "512" v binární formě "10 0000 0000" znamená, že desátý bit je nastaven na hodnotu "1", zatímco ostatní bity jsou "0". Toto nastavení bitu může značit specifický typ problému, jako je příliš vysoká nebo nízká amplituda přijatého signálu. Konkrétní význam je definován v technické dokumentaci. Je potřeba zmínit, že tento parametr je součástí *quality flagu*, ale jak ukázala analýza, pomocí *quality flagu* nebyla odstraněna všechna chybná měření, která detekuje *rx_assess_flag* (zbylo 2 %).

degrade_flag

Parametr ukazuje, jestli došlo k měření během degradačního období. Pokud hodnota je "1", znamená to, že buď se nastal technický problém s hardwarem nebo je problém s geolokací kvůli manévřům/nedostupnosti star trackeru.

landsat_treecover

Parametr *landsat_treecover* poskytuje odhady procentního pokrytí stromů, což je ukazatel hustoty pokrytí plochy korunami stromů na ploše 30metrového pixelu. Datový soubor identifikuje jako stromy veškerou vegetaci, která dosahuje výšky minimálně pět metrů, a jeho základem jsou snímky získané pomocí satelitu Landsat.

4.5. Evaluace vertikální přesnosti

Pro posouzení přesnosti byly vypočteny vertikální rozdíly mezi výškou terénu odvozenou z datového produktu družice a výškou terénu odvozenou z DMR 5G. Pak byly výškové rozdíly použity k výpočtu chybových metrik – průměrné chyby (anglicky Mean Error, ME) a střední kvadratické chyby (anglicky Root Mean Square Error, RMSE).

ME byla určena jako součet všech rozdílů mezi výškami zaznamenanými pomocí družice a výškami změřenými leteckým laserovým skenováním, podělený celkovým počtem hodnot. V případě kladné hodnoty ME satelitní měření mají tendenci nadhodnocovat skutečnou výšku terénu. Záporná hodnota ME naopak signalizuje tendenci satelitních měření k nižším odhadům (podhodnocují).

$$ME = \frac{\sum(x - y)}{n}$$

Kde: x – naměřené hodnoty ze satelitu

y – hodnoty z referenčního DMR 5G

n – celkový počet hodnot

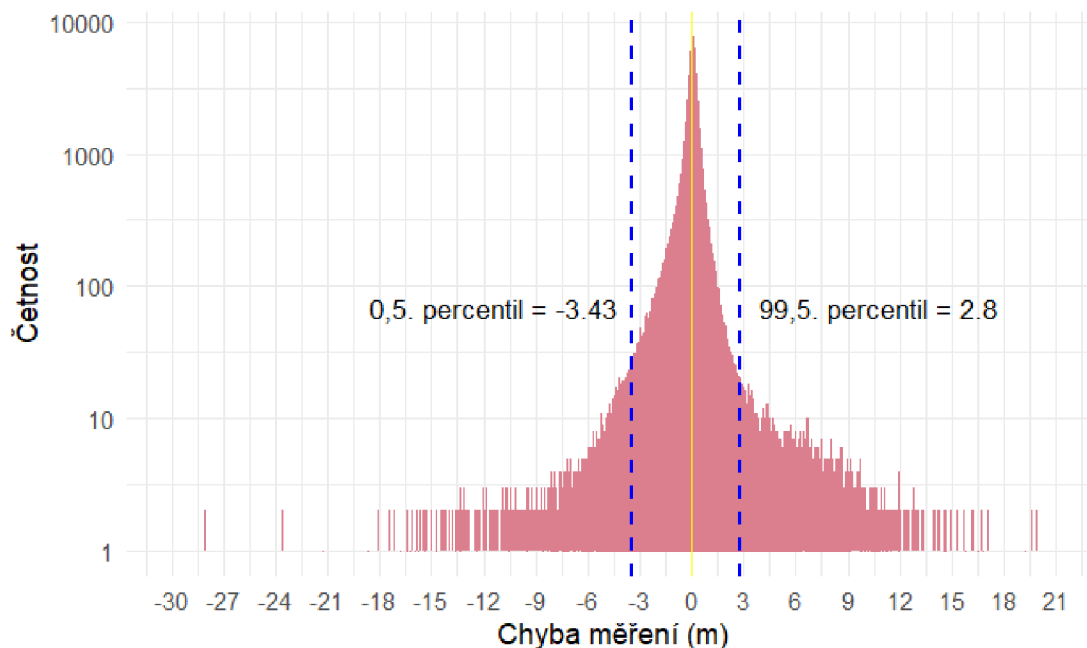
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x - y)^2}{n}}$$

RMSE byla určena jako odmocnina z průměru kvadratických rozdílů mezi výškami změřenými pomocí družice a výškami změřenými pomocí LiDARu. Tento parametr ukazuje průměrnou vzdálenost mezi predikovanými hodnotami a skutečnými daty. RMSE může nabývat jen kladných hodnot a vyšší hodnoty poukazují na větší chybu. Je široce používán jako ukazatel přesnosti měření a je klíčovým metrickým ukazatelem ve vědeckých a technických aplikacích.

5. Výsledky

5.1. ICESat-2

Pracovalo se s celkovým počtem vstupních hodnot 4 409 000. Pro vyloučení neplatných segmentů (celkově 15 %) z analýzy byl aplikován parametr nejistoty odhadu výšky terénu ($h_{te_uncertainty}$). Při nízkém počtu fotonů v segmentu tento parametr ukazuje neplatnou hodnotu (3,4028E+38).



Obrázek 4: Histogram chyb měření

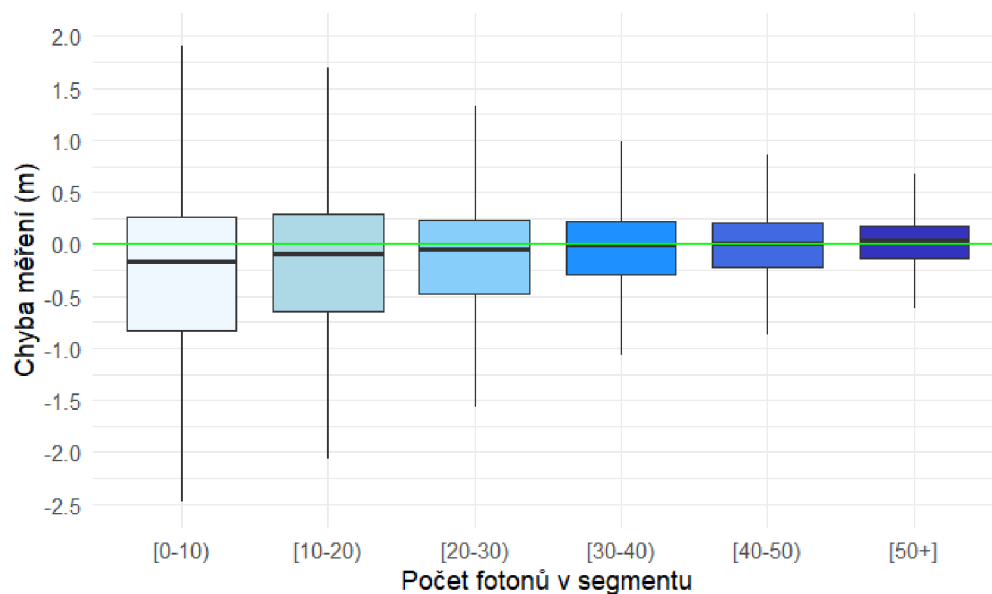
Graf na obrázku 4 zobrazuje histogram chyb měření. V histogramu byla použita logaritmická stupnice na ose y, která pomáhá vizualizovat rozptyl hodnot a efektivně zobrazit rozložení dat, zejména když existuje široký rozsah početností. Z grafu je zřejmé, že většina bodů se nachází blízko ideální hodnoty. Mimo rozsah osy x grafu se nachází 286 odlehlých hodnot, které byly odebrány pro potřeby zobrazení chyby, z nichž je nejnižší -110,97 m a nejvyšší 65,2 m. Celková hodnota RMSE vstupních dat vyšla 0,89 m, ME činí -0,037 m.

5.1.1. Analýza vlivu parametrů

Počet vrácených fotonů v segmentu ($n_{te_photons}$)

Přesnost je pozitivně ovlivněna počtem získaných pozemních fotonů, protože vyšší hustota fotonů odražených od povrchu usnadňuje správnou identifikaci signálních fotonů od šumu.

Z grafu na obrázku 5 je patrné, že s rostoucím počtem fotonů se rozptyl chyb zmenšuje. Tento trend naznačuje, že body s větším množstvím fotonů v segmentu poskytují stabilnější a potenciálně přesnější měření výšky terénu.



Obrázek 5: Krabicové grafy chyb měření rozdělené na základě počtu fotonů v segmentu

Tabulka 2 shrnuje vliv počtu fotonů v segmentu na přesnost výškových měření. Segmenty s nižším počtem fotonů (< 30) mají vyšší chybové hodnoty a byly proto z analýzy odstraněny. S rostoucím počtem fotonů se zlepšují metriky ME a RMSE, což naznačuje vyšší přesnost měření.

Počet fotonů v segmentu	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)
[0-10)	19 727	-0,55	2,50
[10-20)	176 971	-0,12	1,88
[20-30)	235 573	-0,15	1,28
[30-40)	354 046	-0,09	0,95
[40-50)	366 070	-0,06	0,78
[50+]	3 256 613	-0,01	0,75

Tabulka 2: Výsledky RMSE a ME v závislosti na počtu fotonů v segmentu

Přítomnost mraků (parametr *cloud flag atm*)

Tabulka 3 ukazuje výsledky přesnosti měření za různých podmínek oblačnosti během dne a noci. Ve dne průměrná chyba měření (ME) se zhoršuje od -0,02 m pro hodnotu parametru "0" k -0,14 m pro hodnotu parametru "4". Výsledky metrik pro hodnoty parametru "5" a "6" nejsou signifikantní kvůli nízkému počtu měření v těchto kategoriích. Hodnoty chyby naznačují větší podhodnocení skutečné výšky terénu s větším počtem vrstev mraků pravděpodobně kvůli zvýšené délce fotonové dráhy způsobené vícenásobným rozptylem v mracích. RMSE stoupá s větším počtem vrstev mraků.

Výsledky ukazují, že přesnost měření ICESat-2 je ovlivněna úrovní oblačnosti, s lepší přesností za jasných podmínek a nižší přesností při vyšší oblačnosti. Noční měření obecně ukazuje nižší RMSE a ME ve srovnání s denním měřením při všech úrovních cloud flagu. V rámci filtrace byla odstraněna měření provedená během dne s počtem vrstev mraků větším než 1.

Cloud confidence flag	Den			Noc		
	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)
0	1 270 625	-0,02	0,75	778 226	0,05	0,74
1	725 601	-0,04	0,78	1 024 798	0,01	0,67
2	175 764	-0,06	0,90	335 926	0,01	0,69
3	23 846	-0,10	1,12	62 655	0,00	0,65
4	3 010	-0,14	1,86	7 165	-0,03	0,64
5	482	-0,04	0,90	774	-0,03	0,49
6	12	-1,51	3,90	116	0,10	1,14

Tabulka 3: Výsledky RMSE a ME v závislosti na počtu vrstev mraků

Přítomnost vícenásobného rozptylu (*m_{sw}_flag*)

Tabulka 4 ukazuje výsledky přesnosti měření v závislosti na stupni vícenásobného rozptylu, který je kategorizován pomocí *m_{sw}_flag*. V tabulce jsou zaznamenány vyšší chyby pro hodnoty "4" a "5" během dne a pro hodnotu "5" i v noci. Hodnoty "4" a "5" parametru se týkají měření, která byla provedena za podmínek sněhové bouře s optickou hloubkou < 0.5 a >= 0.5. Optická hloubka je míra toho, jak moc atmosférické částice (v tomto případě částice sněhu) zabraňují průchodu světla atmosférou. Nižší hodnota optické hloubky (< 0,5) znamená méně částic v atmosféře, zatímco hodnota >= 0,5 naznačuje hustší sněhovou vánici, která více brání průchodu světla. Ve větší optické hloubce je světlo více rozptýleno a absorbováno, což ztěžuje přesné měření vzdálenosti. Během dne může být tento efekt zesílen přítomností slunečního záření, které se odráží od částic sněhu, zatímco v noci, kdy sluneční záření chybí, může být rozptyl méně problematický. To by mohlo vysvětlovat, proč hodnota "4" má nižší chybu v noci ve srovnání s denním měřením. Je také důležité brát v úvahu, že pozorování s hodnotou "5" mají velmi nízký počet bodů ve srovnání s ostatními hodnotami, což může významně ovlivnit reprezentativnost a výslednou statistickou spolehlivost těchto údajů. Nicméně v rámci filtrace byla odstraněna měření provedená během dne s hodnotou *m_{sw}_flag* "4" a "5" a během noci s hodnotou "5".

MSW flag	Den			Noc		
	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)
0	1 255 614	-0,02	0,74	774 199	0,05	0,74
1	425 322	-0,06	0,82	475 451	0,02	0,67
2	334 409	-0,03	0,80	338 743	0,02	0,69
3	154 913	-0,02	0,77	536 754	0,01	0,67
4	28 467	-0,08	1,09	34 431	-0,03	0,70
5	615	-2,34	2,86	68	-1,13	1,74

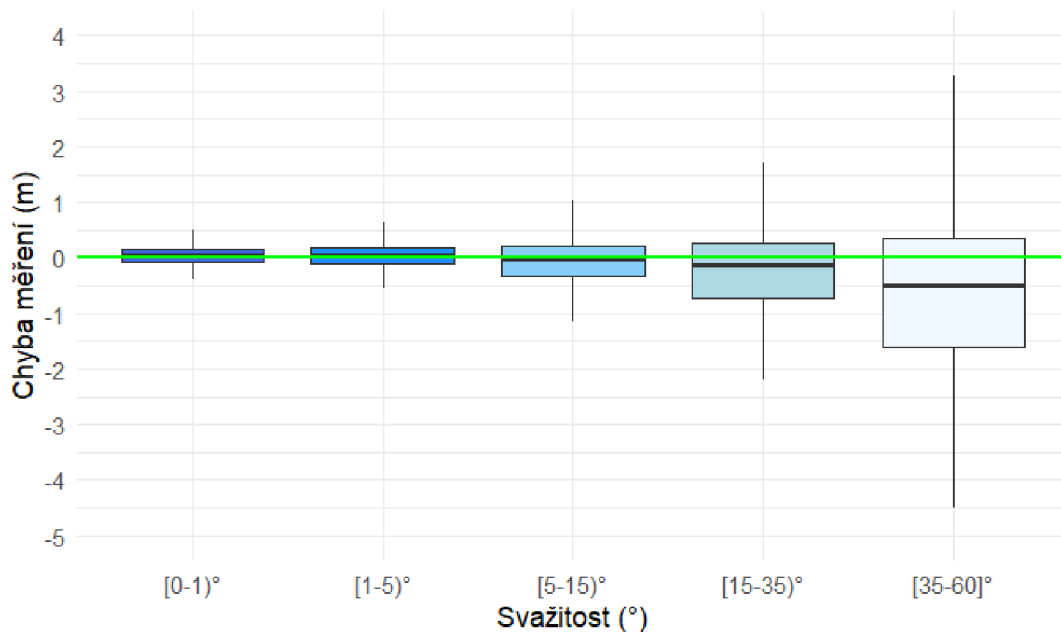
Tabulka 4: Výsledky ME a RMSE v závislosti na stupni vícenásobného rozptylu

5.1.2. Filtrace na základě Copernicus DEM a svažitosti

Následně byla provedena filtrace pomocí digitálního modelu povrchu Copernicus GLO-30. S ohledem na oficiálně uváděnou vertikální přesnost modelu do 4 m a na rozlišení 30 m (pravděpodobný prostorový posun mezi bodem naměřeným satelitem a středem 30 m pixelu), bylo zvoleno nastavení prahové hodnoty pro kladné rozdíly na 12 m (odpovídající trojnásobku uváděné přesnosti) a pro záporné rozdíly 30 m. Volba prahové hodnoty 30 m pro záporné rozdíly se opírá o rozlišení, v důsledku kterého model inklinuje k vyhlazování terénu, když převádí skutečný, často nerovný terén do digitální formy. Toto vyhlazování je zvláště výrazné v horských oblastech, kde mohou být přirozené prohlubně a jiné drobné terénní rysy vynechány nebo nedostatečně reprezentovány, čímž dochází k odstranění velkého počtu přesných měření. Druhý problém spočívá v tom, že Copernicus DEM reprezentuje také vegetaci. V důsledku toho může docházet k odstranění velkého množství kvalitních měření, která přesně reprezentují topografii pod vegetací. Akorát většina záporných rozdílů (-12 m až -30 m) odpovídají místům, kde satelit dokázal správně změřit výšku povrchu pod vegetací.

Svažitost

Krabicové grafy na obrázku 6 ukazují rozptyl chyb měření v závislosti na svažitosti. Je z toho patrné, že s narůstajícím sklonem se zvyšuje rozptyl hodnot chyb měření.



Obrázek 6: Krabicové grafy chyb měření rozdělené na základě svažitosti

Z tabulky 5 lze odvodit, že nejmenší chyby jsou u bodů s nejnižším sklonem [0-1)° a [1-5)°, kde RMSE dosahuje hodnot 0,66 m a 0,57 m. V rozsahu [5-15)° se ME mírně zhoršuje na -0,1 m a RMSE na 0,84 m. Významný pokles přesnosti byl zaznamenán u bodů s větším sklonem [15-35)° a [35-80)°, kde ME dosáhlo -0,3 m a -1,75 m s odpovídajícími hodnotami RMSE 1,44 m a 2,74 m.

Svažitost (°)	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)
[0-1)	544 835	0,05	0,66
[1-5)	1 923 875	0,03	0,57
[5-15)	1 098 581	-0,10	0,84
[15-35)	204 204	-0,30	1,44
[35-60]	1 988	-0,75	2,74

Tabulka 5: Výsledky RMSE a ME v závislosti na svažitosti

Výsledky naznačují, že přesnost měření je výrazně ovlivněna svažitostí terénu, a proto byly pro dosažení větší přesnosti zvoleny k analýze body s nižším stupněm svažitosti.

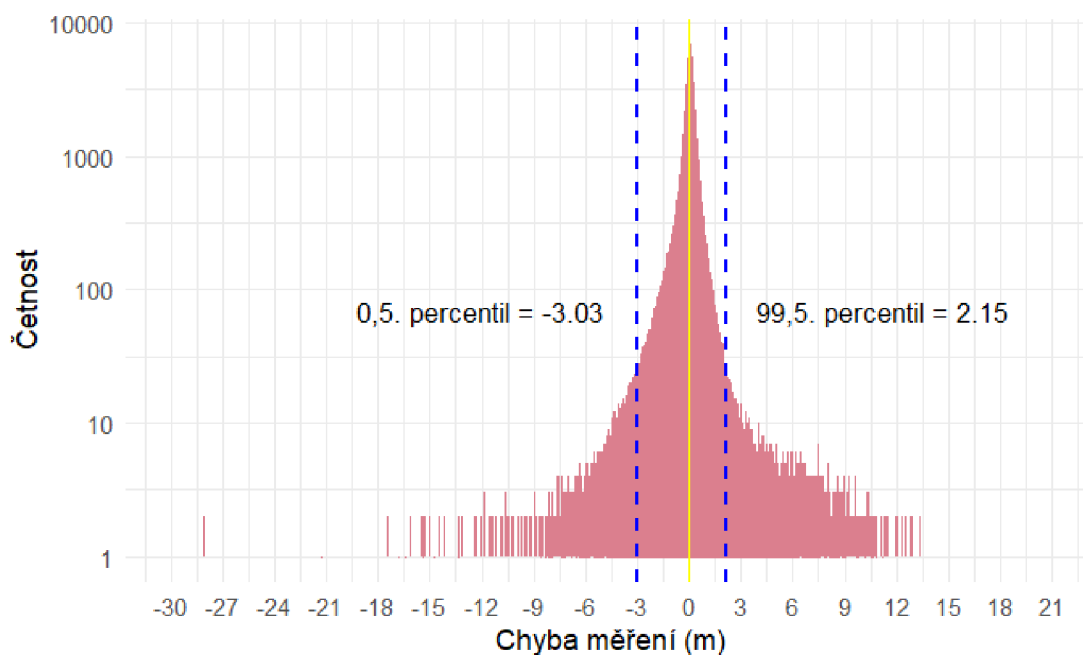
5.1.3. Kombinace filtrací

Nejdříve byly provedeny tři kroky filtrace na základě parametrů, které jsou součástí datového produktu ATL08. Tabulka 6 ukazuje, jak se statistické ukazatele zlepšily po každé fázi filtrace. Procentuální údaje o tom, kolik bodů bylo odstraněno, jsou počítány vždy vzhledem k počtu zbylých bodů po předchozím kroku filtrace. První filtr, který nechal měření s vyšším počtem detekovaných ground fotonů v segmentu, snížil ME z -0,37 m na -0,24 m a zlepšil RMSE z 0,89 m na 0,77 m, přičemž došlo k odstranění 11 % bodů. Následná filtrace založená na přítomnosti mraků zmenšila ME na -0,21 m a RMSE na 0,75 m, s dalším odstraněním 4 % bodů. Poslední krok, filtr na základě stupně vícenásobného rozptylu, vedl k minimálnímu snížení ME na 0,20 m a zároveň k zlepšení RMSE na 0,74 m, při dalším snížení počtu bodů o jen 0,5 %. Po všech filtracích na základě parametrů zůstalo pro další analýzu 85 % původních dat.

	ME (m)	RMSE (m)	Celkový počet	
Vstupní data	-0,037	0,89	4,4 mil.	
Filtrace na základě parametrů			Odstraněno	Zbylo
1. Fotony	-0,024	0,77	11%	3,97 mil
2. Mraky	-0,021	0,75	4%	3,8 mil
3. Rozptyl	-0,020	0,74	0,5%	3,77 mil
Filtrace na základě Copernicus DEM				
Prahová hodnota	-0,017	0,70	0,5%	3,75 mil
Svažitost	-0,002	0,65	5%	3,55 mil
Data po filtraci	-0,002	0,65		80%

Tabulka 6: Výsledky ME a RMSE v závislosti na jednotlivém kroku filtrace

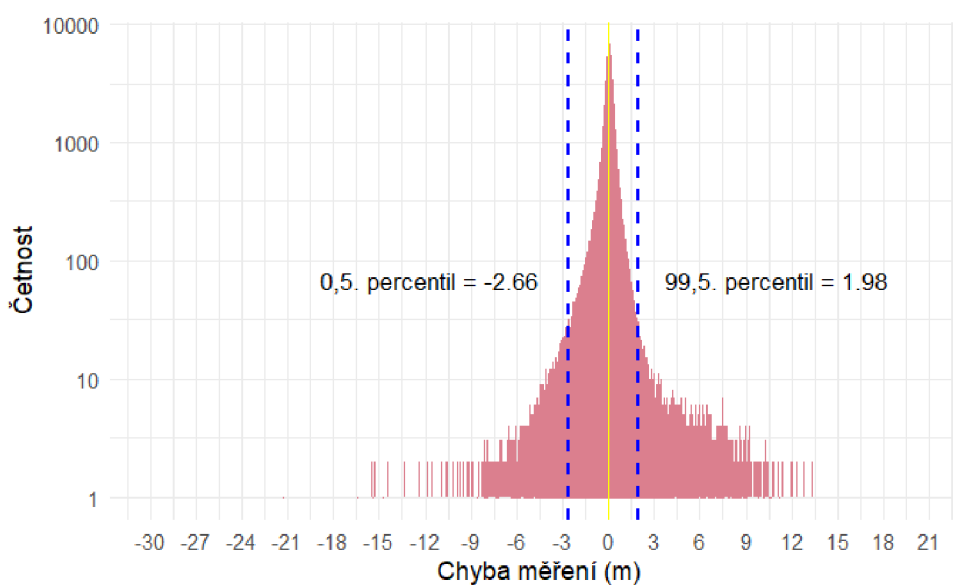
Histogram na obrázku 7 zachycuje chyby měření po aplikaci filtrace na základě parametrů. Mimo rozsah osy x grafu se nachází 78 odlehlých hodnot, z nichž je nejnížší -51,8 m a nejvyšší 37,5 m. Z grafu je patrné, že filtrace zredukovala počet extrémních hodnot v datech, ale nevedla k výrazné změně celkového rozdělení chyb.



Obrázek 7: Histogram chyb měření po aplikaci filtrace na základě parametrů

Tabulka 6 mimo jiné zobrazuje hodnoty RMSE a ME po přidání filtrace na základě Copernicus DEM. Nastavením prahové hodnoty se odstranilo dalších 0,5 % dat, čímž se ME zlepšila na -0,017 m a RMSE na 0,70 m. Při zohlednění svážitosti se odstranilo 5 % dat, což vedlo k nejlepšímu výsledku s ME -0,002 m a RMSE 0,65 m. Z výsledků je patrné, že filtrace na základě Copernicus DEM mírně zlepšila přesnost dat. Po všech filtračních krocích zůstalo v analýze 80 % původních dat.

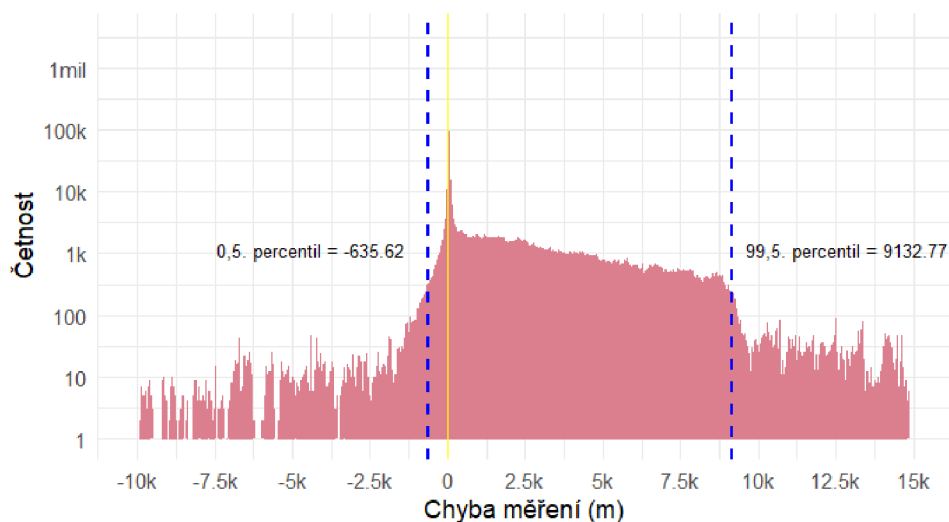
Histogram na obrázku 8 zachycuje chyby měření po přidání filtrace na základě Copernicus DEM. Po filtraci nejnižší a nejvyšší extrémní body činí -35,4 m a 25,1 m, avšak 99 % všech hodnot spadá do intervalu [-2,66; 1,98].



Obrázek 8: Histogram chyb měření s přidáním filtrace na základě Copernicus DEM

5.2. GEDI

Celkový počet vstupních bodů byl 21 700 939. Ve srovnání s daty ICESat-2, je situace s nefiltrovanými daty GEDI mnohem horší. Histogram na obrázku 9 ukazuje, že data obsahují značný počet odlehlých měření. Extrémní rozdíly dosahují hodnoty až 15 km. Celková hodnota RMSE vstupních dat vyšla 2591,66 m, ME činí - 1281,38 m.

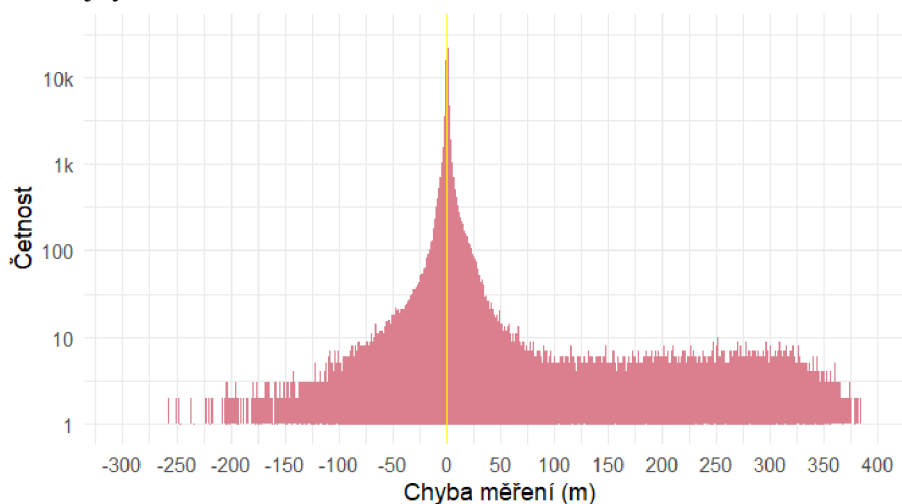


Obrázek 9: Histogram chyb měření vstupních dat

5.2.1. Analýza vlivu parametrů

Quality flag

Histogram na obrázku 10 ukazuje rozložení chyb po aplikaci parametru "quality flag". Lze poznamenat, že extrémní hodnoty byly výrazně omezeny, z nichž je nejnižší -305,3 m a nejvyšší 414,5 m.



Obrázek 10: Histogram chyb měření po aplikaci parametru quality flag

Tabulka 7 ukazuje, že měření s hodnotou "0" mají značně větší chyby.

Quality flag	Počet segmentů	ME (m)	RMSE (m)
0	14 144 291	1965	3210
1	7 550 344	2	21

Tabulka 7: Výsledky RMSE a ME v závislosti na hodnotě parametru quality flag

Number of detected modes (*num_detectedmodes*)

K filtraci pomocí parametru "num_detectedmodes" byl využit parametr "landsat_tree-cover". Oblastmi s tree canopy cover < 70 % jsou myšlena místa bez husté vegetace, kde je pravděpodobnější, že jeden odraz bude přímo od zemského povrchu. Naopak oblasti s tree canopy cover >= 70 % odpovídají hustě zalesněným místům, kde by byl jeden odraz nejspíš od vršku vegetace.

Z tabulky 8 je patrné, že pro otevřenější místa dává smysl nechat měření jen s jedním módem, jelikož tato měření mají nejnížší chybu. Ve snaze zachovat měření v lese, bylo rozhodnuto ponechat body s hodnotou 2, 3, 4, 5. Měření s více než šesti odrazy byla vyřazena kvůli vyšší nepřesnosti spojené s přílišnou složitostí signálu.

Number of detected modes	Tree canopy cover < 70 %			Tree canopy cover >= 70 %		
	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)
0	7 216 318	2521	3721	2 750 131	2462	3732
1	6 351 227	61	407	884 165	252	959
2	793 654	341	917	762 325	142	638
3	332 634	550	1162	463 805	151	666
4	160 268	693	1344	296 050	175	733
5	91 366	846	1538	228 240	186	764
6	65 587	993	1690	196 302	235	903
> 6	326 618	1407	1894	1 107 589	992	1588

Tabulka 8: Výsledky RMSE a ME v závislosti na hodnotě parametru num_detectedmodes spolu s parametrem landsat_treecover

Rx assess flag

Tabulka 9 reprezentuje výsledky RMSE a ME v závislosti na hodnotě parametru "rx_assess_flag". Hodnota "0" znamená, že nebyly detekovány žádné problémy ve vlnovém tvaru signálu. Tabulka ukazuje, že tato měření mají nejnížší hodnoty ME a RMSE. Lze usoudit, že jakmile jsou aktivovány určité bity v "rx_assess_flag", kvalita měření klesá, což je indikováno zvýšením hodnot chyb. V rámci filtrace byla zachována jen měření s hodnotou parametru "0".

Rx assess flag	Počet segmentů	ME (m)	RMSE (m)
0	9 567 162	15	174
512	992 513	886	1427
517	514	1220	1844
640	2 737 251	1884	2601
641	172 735	2815	3721
672	23 662	9148	9223
896	8 120 298	2572	3851

Tabulka 9: Výsledky RMSE a ME v závislosti na hodnotě parametru rx_assess_flag

Degrade flag

Výsledky výpočtů metrik ME a RMSE v závislosti na hodnotě parametru degrade flag reprezentuje tabulka 10. Hodnota "1" indikuje, že došlo k měření během degradačního období. I když rozdíl v chybách není tak výrazný jako u předchozích parametrů, byla zachována data s hodnotou "0", jelikož jsou stále přesnější než data s hodnotou "1".

Degrade flag	Počet segmentů	ME (m)	RMSE (m)
0	16 667 170	942	1809
1	5 033 491	1345	2849

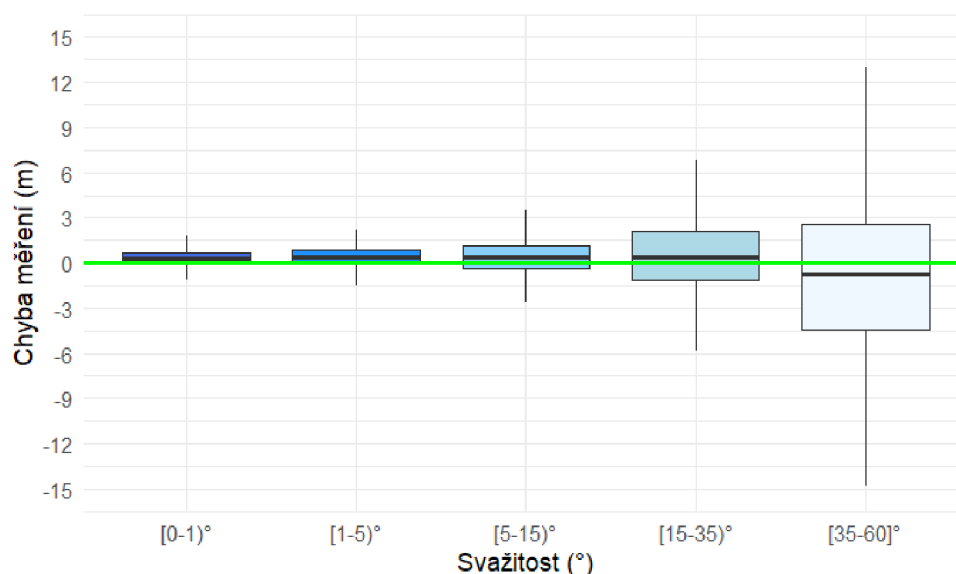
Tabulka 10: Výsledky RMSE a ME v závislosti na hodnotě parametru degrade_flag

5.2.2. Filtrace na základě Copernicus DEM a svažitosti

Pro filtraci pomocí digitálního modelu povrchu Copernicus GLO-30 bylo zvoleno nastavení stejných prahových hodnot 12 m a -30 m jako u ICESat-2.

Svažitost

Z boxplotu na obrázku 11 je patrné, že s narůstajícím sklonem se zvyšuje rozptyl hodnot chyb měření.



Obrázek 11: Krabicové grafy chyb měření rozdělené na základě svažitosti

Z tabulky 11 lze odvodit, že u měření GEDI je průběh RMSE v závislosti na větší svažitosti obdobný jako u měření ICESat-2, RMSE stoupá se zvyšujícím se sklonem. K další analýze byly zvoleny body se stupněm svažitosti menším než 15.

Svažitost (°)	Počet bodů	ME (m)	RMSE (m)
[0-1)	484 870	0,43	3,20
[1-5)	1 931 035	0,50	4,21
[5-15)	1 368 806	0,76	6,13
[15-35)	302 242	1,07	8,11
[35-60]	2 983	-0,52	11,41

Tabulka 11: Výsledky RMSE a ME v závislosti na svažitosti

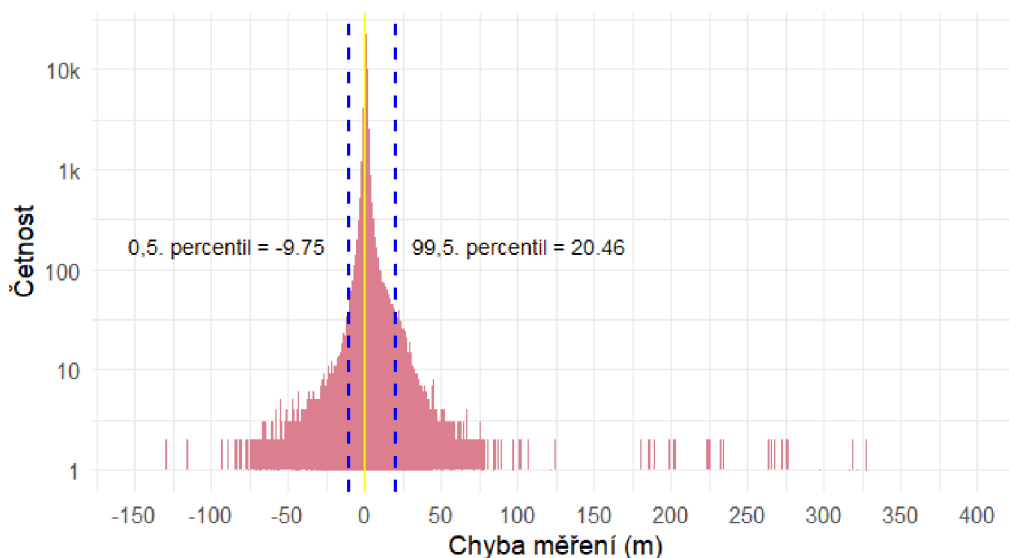
5.2.3. Kombinace filtrací

Byla provedena série filtrací na základě všech zmíněných parametrů s cílem zlepšit kvalitu vstupních dat pro další analýzu. Z tabulky 12 lze odvodit, že výsledná data po aplikaci filtrů ukazují výrazné zlepšení ve srovnání s původními daty, jak je patrné z hodnot ME a RMSE.

	ME (m)	RMSE (m)	Celkový počet	
Vstupní data	1281,38	2591,66	21,7 mil.	
Filtrace na základě parametrů			Odstraněno	Zbylo
1. Quality flag	1,84	20,55	65%	7,55 mil
2. Number of detected modes	0,96	11,97	27%	5,52 mil
3. Rx assess flag	0,63	7,98	1%	5,47 mil
4. Degrade flag	0,62	5,22	25%	4,11 mil
Filtrace na základě Copernicus DEM				
Prahová hodnota	0,55	2,65	1,5%	4,05 mil
Svažítost	0,50	2,29	7,5%	3,75 mil
Data po filtraci	0,50	2,29		17%

Tabulka 12: Výsledky ME a RMSE v závislosti na jednotlivém kroku filtrace

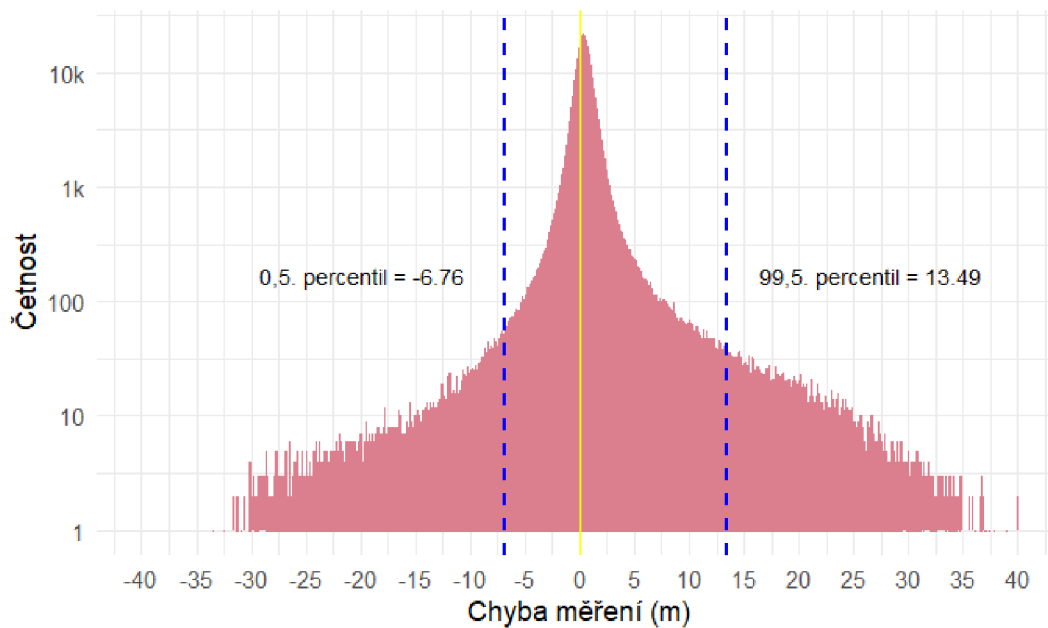
Filtrace pomocí "quality_flag" vedla k největšímu snížení data o 65 %, přičemž hodnoty ME a RMSE klesly z počátečních obrovských hodnot na 1,84 m a 20,55 m. Následná filtrace založená na počtu odrazů v signálu (num_detectedmodes) zmenšila ME na 0,96 m a RMSE na 11,97 m, s dalším odstraněním 27 % bodů. Parametr "rx_assess_flag" má minimální vliv na velikost dat s pouze 1 % odstraněných bodů, ale přispěl k dalšímu zlepšení přesnosti měření na ME 0,63 m a RMSE 7,98 m. Filtrace pomocí parametru "degrade_flag" vedla k minimálnímu snížení ME na 0,62 m a zároveň k zlepšení RMSE na 5,22 m, při dalším snížení počtu bodů o 25 %. Po všech filtracích na základě parametrů zůstalo pro další analýzu 19 % původních dat.



Obrázek 12: Histogram chyb měření po aplikaci filtrací na základě parametrů

Histogram na obrázku 12 zachycuje chyby měření po všech filtracích. Je patrné, že byl odstraněn značný počet nepřesných měření, ale řada extrémních hodnot zbyla, z nichž je nejnižší -149,4 m a nejvyšší 399,5 m.

Tabulka 12 také zobrazuje hodnoty RMSE a ME po přidání filtraci na základě Copenicus DEM. Po odstranění 1,5 % dat s chybami přesahujícími nastavenou prahovou hodnotu klesly hodnoty ME na 0,55 m a RMSE na 2,65 m. Filtr na základě svažitosti vedl ke snížení ME na 0,50 m a zároveň k zlepšení RMSE na 2,29 m, při dalším snížení počtu bodů o 7,5 %. Po všech filtračních krocích zůstalo v analýze 17 % původních dat.



Obrázek 13: Histogram chyb měření s přidáním filtrace na základě Copenicus DEM

Histogram na obrázku 13 zachycuje chyby měření po všech filtracích. Použitím Copernicus DEM k filtraci bylo odstraněno velké množství především velkých kladných rozdílů, které měly výrazný vliv na hodnoty ME a RMSE. Ve výsledku nejnižší extrémní hodnota činí -40,8 m a nejvyšší 50,2 m, avšak 99 % všech hodnot spadá do intervalu [-6,76; 13,49].

5.3. Hustota a pokrytí dat

Tabulka 13 ukazuje vztah mezi kvalitou měření a hustotou bodů ve čtvercích s různým rozlišením. Jak je už zřejmé z předchozí analýzy, data ICESat-2 jsou mnohem přesnější. Oficiálně udávaná vertikální přesnost u dat ICESat-2 je 0,25 m, přitom 60 % měření se dostala na tuto přesnost. Pro GEDI uvádí vertikální přesnost 0,5 m, zatímco jen 17 % dat dosahují této přesnosti. Nicméně, jak ukázala analýza, GEDI poskytuje data s větší rovnoměrností pokrytí ve srovnání s ICESat-2, jelikož má ve většině kombinací přesnosti a rozlišení vyšší procento pokrytí. Navíc lze poznamenat, že při přesnosti 0,25 m GEDI má méně bodů, ale i přesto stále vykazuje mnohem vyšší procento pokrytí.

ICESat-2		Počet bodů		Průměr bodů				Procent čtverců, které mají											
Vstup	4 409 000	100%					aspoň 1 bod				aspoň 3 body				aspoň 10 bodů				
Přesnost	Počet bodů		250m	500m	1km	1,5km	250m	500m	1km	1,5km	250m	500m	1km	1,5km	250m	500m	1km	1,5km	
<0,25m	2 634 961	60%	5	19	78	173	44%	69%	91%	97,5%	36%	64%	89%	96,8%	19%	51%	84%	95%	
<0,5m	3 508 926	80%	7	26	103	230	46%	70%	92%	100%	40%	67%	90%	98,2%	26%	58%	87%	97%	
<1m	4 032 714	91,5%	7	30	119	265	47%	71%	92%	100%	43%	69%	91%	98,5%	30%	61%	88%	97,2%	
<5m	4 391 978	99,5%	8	33	129	290	48%	71%	92%	100%	44%	70%	92%	98,6%	33%	63%	89%	97,3%	
Vlastní filtrace	3 552 407	80%	7	26	104	233	42%	66%	90%	97%	38%	64%	89%	96%	27%	55%	85%	95%	

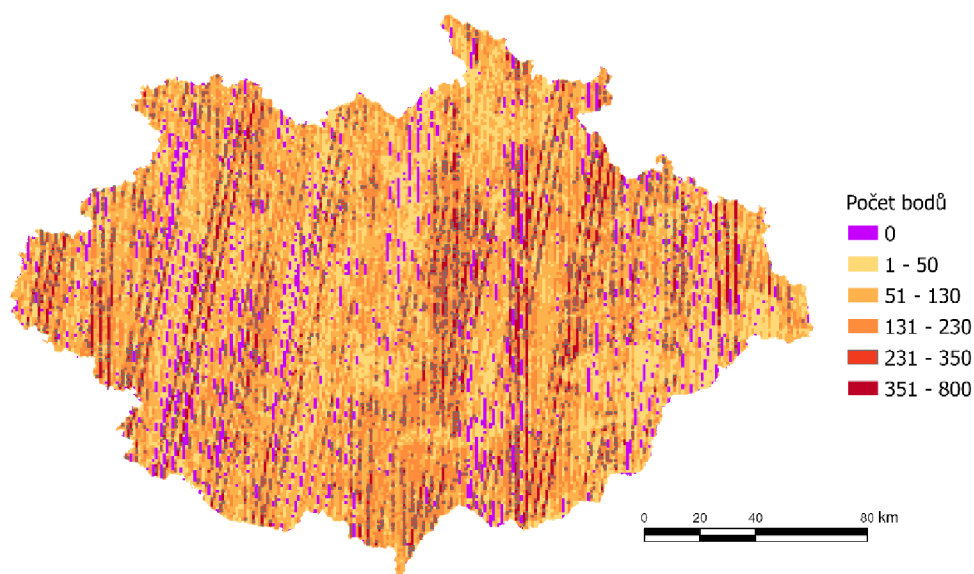
GEDI		Počet bodů		Průměr bodů				Procent čtverců, které mají											
Vstup	21 700 459	100%					aspoň 1 bod				aspoň 3 body				aspoň 10 bodů				
Přesnost	Počet bodů		250m	500m	1km	1,5km	250m	500m	1km	1,5km	250m	500m	1km	1,5km	250m	500m	1km	1,5km	
<0,25m	1 917 192	9%	3,6	14	57	127	82%	99%	100%	100%	53%	95%	99,4%	100%	7%	64%	97%	98,5%	
<0,5m	3 595 287	17%	7	27	107	238	92%	100%	100%	100%	75%	98,5%	100%	100%	26%	88%	99%	100%	
<1m	5 869 457	27%	11	44	175	388	96%	100%	100%	100%	88%	99,4%	100%	100%	51%	96%	99,4%	100%	
<5m	9 049 633	42%	17	68	270	598	98%	100%	100%	100%	96%	100%	100%	100%	76%	99,4%	100%	100%	
Vlastní filtrace	3 745 934	17%	7	28	112	248	90%	99,2%	100%	100%	75%	97,5%	100%	100%	28%	88%	98,5%	100%	

Tabulka 13: Souvislost kvality dat a hustoty bodů ve čtvercích s různým rozlišením

Lze tedy usoudit, že ICESat-2 může dosáhnout rozlišení 1 km při nevyšší přesnosti 0,25 m (pokrytí 91 %), avšak pokrýt 100 % čtverců aspoň jedním bodem dokáže jen při přesnosti 0,5 m a s rozlišením 1,5 km. GEDI má šanci dosáhnout rozlišení 250 m při přesnosti 0,5 m (pokrytí 92 %), avšak pokrýt 100 % čtverců aspoň jedním bodem dokáže při přesnosti 0,5 m a s rozlišením 500 m.

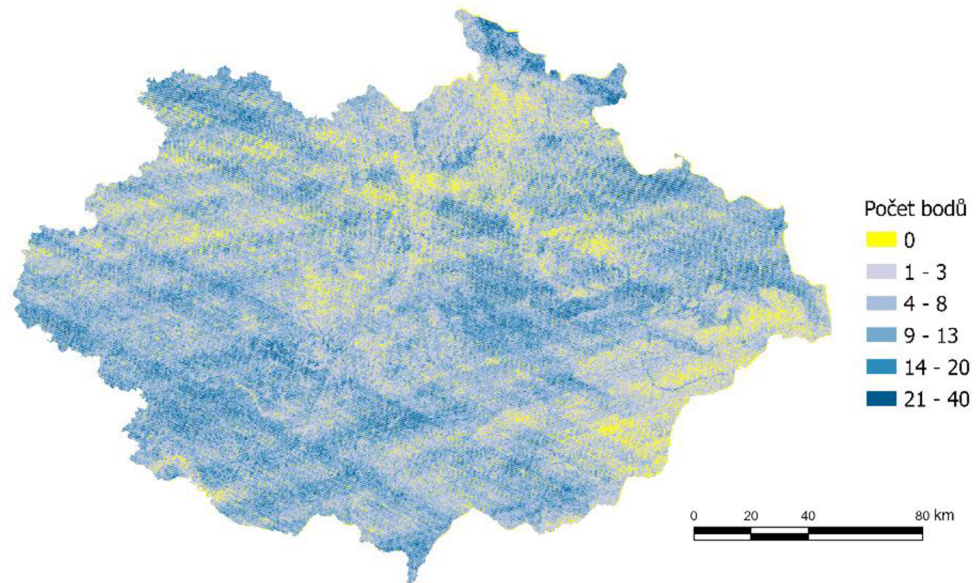
Po aplikaci vlastní filtrace zůstává přibližně stejný počet bodů jak při filtraci na základě DMR 5G s přesností 0,5 m, a to jak u ICESat-2, tak u GEDI. S využitím filtrovaných dat z ICESat-2 je možné dosáhnout rozlišení 1 km s průměrnou hustotou 104 bodů na čtverec, přičemž 90 % čtverců bude vyplněno alespoň jedním bodem a 85 % čtverců bude mít aspoň 10 bodů. S daty z GEDI je možné dosáhnout rozlišení 250 m s nižší průměrnou hustotou 28 bodů na čtverec a také s vyplněním 90 % čtverců aspoň jedním bodem, ale jenom 28 % čtverců bude mít aspoň 10 bodů.

Na obrázku 14 je znázorněno rozložení výškových bodů ICESat-2 po aplikaci vlastní filtrace v čtvercích o velikosti 1 km x 1 km (pokrytí 90 %).



Obrázek 14: Rozložení měření z ICESat-2 v čtvercích 1 km x 1 km

Obrázek 15 zachycuje rozložení výškových bodů GEDI po aplikaci vlastní filtrace v čtvercích o velikosti 250 m x 250 m (pokrytí 90 %).



Obrázek 15: Rozložení měření z GEDI v čtvercích 250 m x 250 m

6. Diskuse

Výsledky této práce pro ICESat-2 a GEDI jsou srovnatelné se zjištěními z předchozích studií, a to i přesto, že se studované oblasti liší. Neuenschwander a Magruder (2019) zkoumaly přesnost měření ATLASu (ICESat-2) na území Finska, aniž by data nějak filtrovaly, a dosáhly hodnoty RMSE 0,85 m. Tento výsledek koresponduje s RMSE 0,89 m pro nefiltrovaná data v této práci. Xing et al. (2020) hodnotili přesnost měření terénu v lesnaté oblasti a pracovali s datovým produktem ATL03 – ICESat-2 (obsahujícím samotné fotony), přitom se jim podařilo dostat na RMSE 0,75 m.

V rámci této analýzy bylo identifikováno několik klíčových atributů, které mohou mít vliv na přesnost měření satelitu. Konkrétně u ICESat-2 bylo zjištěno, že počet ground fotonů (`n_te_photons`) v segmentu, přítomnost mraků (`cloud_flag_atm`) a vícenásobného rozptylu (`msw_flag`) hrají určitou roli v přesnosti získaných dat. Moudrý et al. (2022) ve svém článku upozorňují na nutnost hodnotit přesnost měření získaných za nepříznivých atmosférických podmínek. Analýza dat ukázala, že přesnost měření je nižší v přítomnosti dvou a více vrstev mraků během dne. Výsledky naznačují, že není vždy nezbytné odstraňovat měření s jakýmkoliv počtem vrstev mraků a stupněm rozptylu za účelem zachování co největšího množství přesných měření.

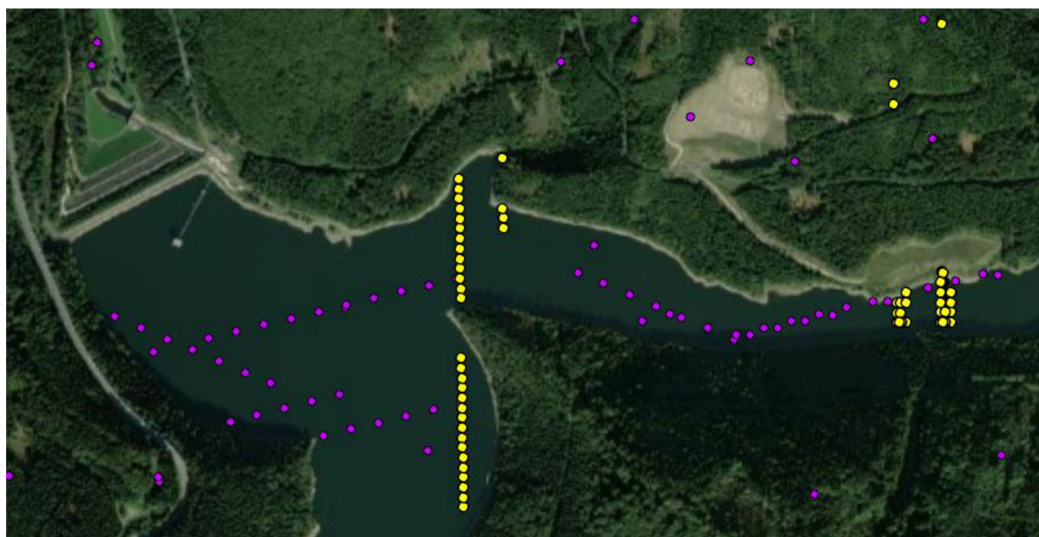
Pro GEDI jsou klíčové parametry ovlivňující přesnost měření "quality flag", "number of detected modes", "degrade flag" a "rx assess flag". Pronk et al. (2023) zkoumali přesnost měření terénu pomocí satelitů ICESat-2 a GEDI v porovnání s leteckým laserovým skenováním v oblastech Nizozemska, Švýcarska a Nového Zélandu. ICESat-2 dosáhl ME -0,06 m a RMSE 1,39 m, zatímco GEDI byl méně přesný a spolehlivý s ME 0,45 m a RMSE 5,66 m. Pro filtraci dat GEDI byly použity dva klíčové parametry: quality flag a degrade flag. Quiros et al. (2021) ve své studii hodnotily přesnost měření pomocí GEDI v porovnání s referenčními daty z leteckého laserového skenování (ALS LiDAR) a daty z TanDEM-X na území Španělska. Podobně byla provedena filtrace na základě parametrů quality flag a degrade flag, přičemž výsledná hodnota RMSE v porovnání s leteckým laserovým skenováním činí 6,13 m. Hodnoty chyb měření GEDI z výše zmíněných studií jsou těsně v souladu s výsledky této bakalářské práce, kde po filtraci dat jen na základě atributů byly zaznamenány hodnoty ME 0,62 m a RMSE 5,22 m.

Kromě těchto faktorů bylo zjištěno, že použití digitálního modelu povrchu Copernicus DEM a z něj spočítané svažitosti může významně snížit počet extrémních hodnot. Výsledky této práce ukazují, že svažitost významně ovlivňuje přesnost měření terénu. Kvůli horizontálním chybám (nepřesný odhad polohy pomocí navigačního systému družice) dochází i k chybám vertikálním. Na rovném povrchu jsou tyto chyby minimální, avšak se s rostoucí svažitostí mohou rychle zvyšovat. I malé horizontální odchylky v určení polohy měření tak ve svažitých oblastech způsobují výraznější vertikální chyby. Urbazaev et al. (2022) se zaměřují ve své studii na posouzení přesnosti

měření terénu pomocí satelitů ICESat-2 a GEDI na různých typech krajinných pokryvů. V rámci analýzy bylo také zjištěno, že svah má silný vliv na přesnost měření, přičemž je tento vliv významnější u GEDI kvůli větší horizontální chybě (10 m). Zhu et al. (2022) prováděli hodnocení přesnosti měření terénu pomocí ATLASu (ICESat-2) ve Španělsku. V tomto článku byl posuzován vliv přítomnosti vegetace, svažitosti a rozdílu mezi denními a nočními měřeními. Svažitost terénu byla také identifikována jako klíčový faktor ovlivňující přesnost měření, kde větší hodnoty svažitosti vedly k větším chybám. Je důležité brát v úvahu, že odstraněním měření na svažitých územích se sice přesnost měření výrazně zlepšuje, avšak dochází ke ztrátě určitého počtu bodů v horských oblastech. Rozhodování o tom, při jakém stupni sklonu terénu odstraňovat měření, by mělo být důkladně zváženo.

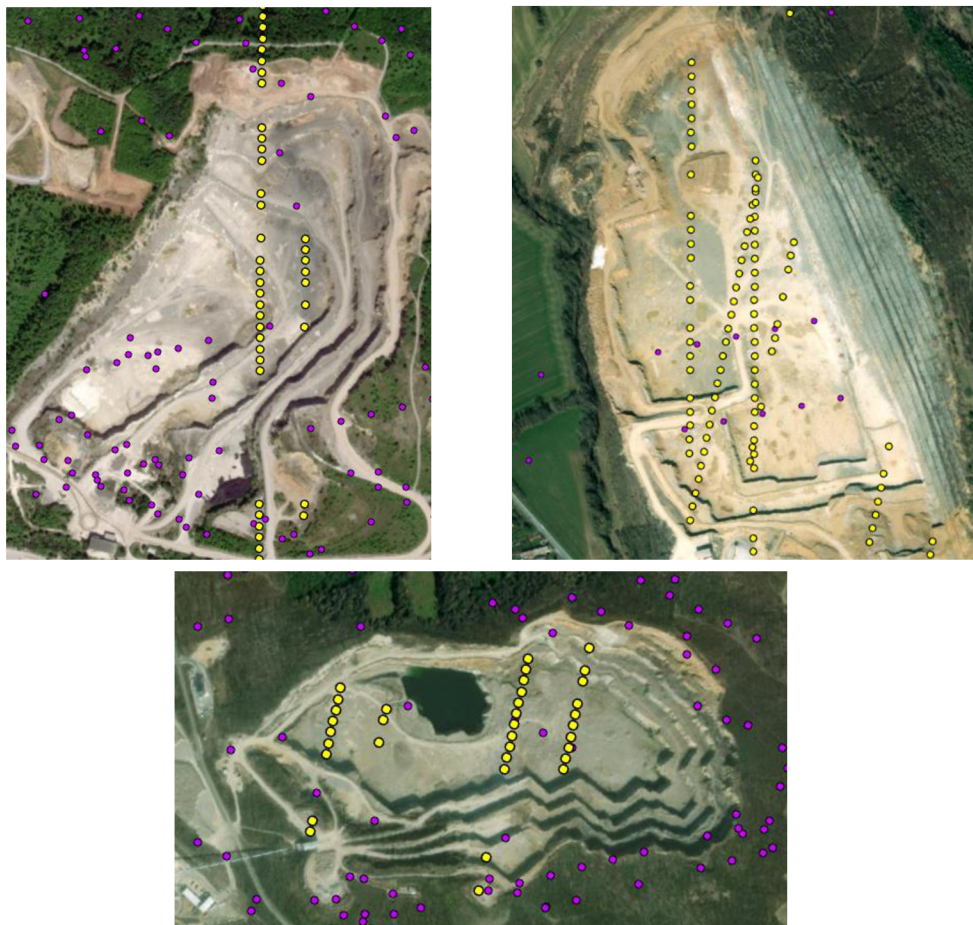
Je třeba upozornit, že i po aplikaci všech filtračních kroků výsledný soubor dat obsahuje extrémní hodnoty, které činí -35,4 m a 25,1 m pro ICESat-2 a -40,8 m a 50,2 m pro GEDI. Je také důležité poznamenat, že referenční model DMR 5G vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování v letech 2009 až 2013. V důsledku může dojít k tomu, že určitá část odlehlých hodnot identifikovaných na konci filtrace nemusí nezbytně odpovídat chybám měření satelitu, ale mohou spíše odrážet skutečné změny na zemském povrchu, jako je výstavba velkých budov, změny v charakteru lomu nebo vodní hladiny v nádrži.

Obrázek 16 zachycuje výškové body ICESat-2 a GEDI v oblasti vodní nádrže Šance, které mají kladné rozdíly (kolem 15 m) v porovnání s leteckým laserovým skenováním. Tyto pozitivní rozdíly lze vysvětlit stoupáním hladiny vodní nádrže v posledních letech.



Obrázek 16: Výškové body ICESat-2 (žlutá barva) a GEDI (fialová barva) v oblasti vodní nádrže Šance

Na obrázku 17 jsou znázorněny výškové body ICESat-2 a GEDI v oblastech lomů, které mají naopak záporné rozdíly (kolem -25 m) v porovnání s leteckým laserovým skenováním. Tyto rozdíly naznačují, že od doby leteckého skenování (2009-2013) došlo ke snížení terénu, což může souviset s těžební činností v lomech. Tento jev není izolovaným případem a týká se desítek lomů po celé České republice. Pro další výzkum lze doporučit tyto jevy podrobněji prozkoumat, neboť takové změny v krajině mohou negativně ovlivnit výsledné hodnoty chyb, aniž by se jednalo o nepřesná měření satelitů.



Obrázek 17: Výškové body ICESat-2 (žlutá barva) a GEDI (fialová barva) v oblasti lomů: vápencový lom Mokrý (nahore vlevo) a lom Vitošov (nahore vpravo), kamenolom Olbramovice (dole)

I při zohlednění těchto nesrovnalostí kvůli staršímu referenčnímu modelu jsou nejproblémovějšími extrémními kladnými rozdíly u dat GEDI. Tyto rozdíly představují relativně vysoký počet případů a jsou téměř všechny spojeny s měřeními provedenými nad oblastmi s hustou a vysokou vegetací. Filtrace na základě nastavení prahové hodnoty 12 m vůči Copernicus DEM nedokáže odstranit tato měření, jelikož Copernicus DEM představuje digitální model povrchu a zahrnuje vegetaci. Je potřeba prozkoumat důkladněji vliv jiných parametrů (např. sensitivity a silného/slabého paprsku) na měření v oblasti husté vegetace.

Při zkoumání hustoty a rozložení bodů z obou misí je zřejmé, že s daty z GEDI lze dosáhnout mnohem podrobnějšího rozlišení, které činí až 250 m. GEDI je umístěn na Mezinárodní vesmírné stanici, která má nízkou oběžnou dráhu a pravidelně přeletuje různé části Země. Díky tomu může GEDI poskytovat data s větší rovnoměrností pokrytí ve srovnání s ICESat-2, který má specifickou polární orbitu. Ale je potřeba zmínit, že jeho schopnost snímat přesně ve svažitéch oblastech může být víc omezena. ICESat-2 má tendenci ke shlukování měřených bodů v určitých oblastech a má mezery ve svém pokrytí, což je způsobeno jeho specifickou orbitální dráhou. To by mohlo vysvětlovat, proč procento pokrytí nevykazuje velké změny i při různé přesnosti, ačkoliv rozdíl v počtu bodů mezi nejhorší a nejlepší přesností je skoro dvojnásobný.

Pronk et al., (2023) kromě vyhodnocení přesnosti měření terénu pomocí satelitů ICESat-2 a GEDI zkoumali také možné rozlišení digitálních modelů terénu založených na datech z těchto misí. Autoři umístili čtverce o velikosti 5 x 10 km podél 103. východního poledníku, aby získali přehled o pokrytí dat na různých zeměpisných šířkách. Čtverce 5 x 10 km představovaly rastry, kde velikost pixelu definovala potřebné rozlišení (např. 200 m, 500 m) a hodnota pixelu odpovídala počtu spadajících bodů. Pokrytí 80 % čtverců alespoň jedním bodem bylo považováno za přijatelné. Studie ukazuje, že v zeměpisných šířkách České republiky (okolo 50° s. š.) ICESat-2 dosahuje rozlišení 1 km, zatímco GEDI dosahuje téměř 200 m respektive 500 m skoro se 100 % pokrytím. Tato bakalářská práce přichází s podobnými závěry.

Jaké procento pokrytí lze považovat za přijatelné, je otázkou diskutabilní. Je možnost chybějící hodnoty doplnit interpolací, avšak ideálním scénářem je mít alespoň jedno měření v každém čtverci. Ale na druhou stranu, v případě nízkého rozlišení výsledného rastru, jediný bod v buňce může být umístěn na její okraji, tím pádem by se měl její střed stejně interpolovat. V rámci této analýzy bylo stanoveno pokrytí 90 % čtverců aspoň jedním bodem jako postačující. Dalším krokem by bylo vhodné provést interpolaci a porovnat přesnost výsledného DTM s existujícími produkty.

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá posouzením kvality a hustoty dat dvou satelitních misí ICESat-2 a GEDI na území České republiky. Ukázalo se, že kvalita vstupních dat ze dvou misí je velmi odlišná. Pro ICESat-2 byly hodnoty ME $-0,037$ m a RMSE $0,89$ m, zatímco pro GEDI vyšly $1281,4$ m a $2591,6$ m. Na přesnost měření u ICESat-2 měly vliv parametry, jako jsou počet ground fotonů (`n_te_photons`) v segmentu, denní doba (`night_flag`), přítomnost mraků (`cloud_flag_atm`) a vícenásobného rozptylu (`msw_flag`). Po aplikaci filtrace založené na těchto parametrech klesly hodnoty ME a RMSE na $-0,02$ m a $0,74$ m. Přidáním filtrace na základě Copernicus DEM GLO-30 lze docílit hodnot ME $-0,002$ m a RMSE $0,65$ m. U GEDI ovlivňují přesnost měření parametry, jako jsou `quality_flag`, `num_detectedmodes` v kombinaci s `land-sat_treecover`, `degrade_flag` a `rx_assess_flag`. Výsledné hodnoty ME a RMSE po filtraci na základě těchto parametrů činí $0,62$ m a $5,22$ m. Filtrace na základě Copernicus DEM GLO-30 je zde velmi užitečná z hlediska odstranění zbylých extrémních hodnot, čímž byly dosaženy hodnoty ME $0,5$ m a RMSE $2,29$ m. Bylo zjištěno, že přesnost měření je výrazně ovlivněna svažitostí terénu u obou misí.

Při zkoumání hustoty bodů po aplikaci různých filtrací se ukázalo, že GEDI poskytuje výrazně rovnoměrnější rozložení bodů. Nehledě na přibližně stejný počet bodů pro obě mise, který zbyl po aplikaci vlastní filtrace, s daty z ICESat-2 lze dosáhnout rozlišení 1 km při průměrné hustotě 104 bodů na čtverec a s pokrytím 90% čtverců aspoň jedním bodem, zatímco s daty z GEDI je možné dosáhnout rozlišení 250 m při průměrné hustotě 28 bodů na čtverec a s pokrytím 90% čtverců aspoň jedním bodem. Tyto rozdíly v distribuci měření mezi ICESat-2 a GEDI jsou přímo ovlivněny jejich oběžnými drahami.

Pro budoucí výzkum je doporučeno zkombinovat data z těchto dvou misí pro poskytnutí komplexnějšího přehledu o hustotě dostupných dat a výsledného rozlišení DTM. S ohledem na relativně velký počet zbylých odlehlých hodnot měření z GEDI v oblastech s hustou vegetací, by bylo se třeba víc zaměřit na zkoumání parametrů ovlivňujících přesnost za těchto podmínek. Například by se mohlo jednat o posouzení vlivu sensitivity nebo silného/slabého paprsku na přesnost měření.

8. Reference

- ČÚZK, 2014. Geoportál: Podrobný kvazigeoid QGZÚ-2013 [online]. [cit. 2024.03.10]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(4djjenqmamogv0unptpwukah\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=bodpole&metadataID=CZ-CUZK-QGZU&menu=275](https://geoportal.cuzk.cz/(S(4djjenqmamogv0unptpwukah))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=bodpole&metadataID=CZ-CUZK-QGZU&menu=275)
- ČÚZK, 2023. Geoportál: ZABAGED® – Výškopis – DMR 5G. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace v S-JTSK, Bpv [online]. [cit. 2024.03.04]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(um5y0qy03qe3cfzq3vpenqbi\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(um5y0qy03qe3cfzq3vpenqbi))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)
- Dolanský, T. (2004). Lidary a letecké laserové skenování. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem. Acta Universitatis Purkynianae. ISBN 80-704-4575-0
- Dolanský, T. (2001). Laserové skenování – DMT za letu. In: GIS... Ostrava 2001. Ostrava. ISSN 1213-239X.
- Fouladinejad, F., Matkan, A., Hajeb, M., & Brakhasi, F. (2019). History and applications of space-borne lidars. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 42(4/W18), 407–414. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-407-2019>
- Gojda, M., John, J., & Starková, L. (2011). Archeologický průzkum krajiny pomocí leteckého laserového skenování. Dosavadní průběh a výsledky prvního českého projektu. *Archeologické Rozhledy* 63, 680 – 698.
- Gross, A. J., & Herrmann, T. R. W. (2007). History of lasers. *World Journal of Urology*, 25(3), 217–220. <https://doi.org/10.1007/s00345-007-0173-8>
- Hecht, J. (2010). Short history of laser development. *Optical Engineering*, 49(9), 091002. <https://doi.org/10.1117/1.3483597>
- Hofton, M., Blair, B., Story, S., & Yi, D. (2019). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for GEDI Transmit and Receive Waveform Processing for L1 and L2 Products, *Version 1.0*.
- Maňková, I. (2000). *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.
- Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., Farrell, S., Fricker, H., Gardner, A., Harding, D., Jasinski, M., Kwok, R., Magruder, L., Lubin, D., Luthcke, S., Morison, J., Nelson, R., Neuenschwander, A., Palm, S., ... Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.12.029>
- Moudrý, V., Gdulová, K., Gábor, L., Šárovcová, E., Barták, V., Leroy, F., Špatenková, O., Rocchini, D., & Prošek, J. (2022). Effects of environmental conditions on

- ICESat-2 terrain and canopy heights retrievals in Central European mountains. *Remote Sensing of Environment*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113112>
- Moudrý, V., Lecours, V., Gdulová, K., Gábor, L., Moudrá, L., Kropáček, J., & Wild, J. (2018). On the use of global DEMs in ecological modelling and the accuracy of new bare-earth DEMs. *Ecological Modelling*, 383, 3–9. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2018.05.006>
- NASA. (2018). ICESat-2: MEASURING THE HEIGHT OF EARTH'S ICE FROM SPACE [online]. [cit. 2024.03.10]. Dostupné z: https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2missionBrochureFINAL1.pdf
- NASA, 2024a. Mission overview. In: GEDI: Ecosystem Lidar [online]. [cit. 2024.03.12]. Dostupné z: <https://gedi.umd.edu/mission/mission-overview>.
- NASA, 2024b. Mission status. In: GEDI: Ecosystem Lidar [online]. [cit. 2024.03.12]. Dostupné z: <https://gedi.umd.edu/>.
- NASA, 2024c. Specifications. In: GEDI: Ecosystem Lidar [online]. [cit. 2024.03.12]. Dostupné z: <https://gedi.umd.edu/instrument/specifications/>.
- NASA, 2024d. Data products. In: GEDI: Ecosystem Lidar [online]. [cit. 2024.03.12]. Dostupné z: <https://gedi.umd.edu/data/products/>.
- Neuenschwander, A. L., & Magruder, L. A. (2019). Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look. *Remote Sensing*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/rs11141721>
- Neuenschwander, A., & Pitts, K. (2019). The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. *Remote Sensing of Environment*, 221, 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.005>
- Neuenschwander, A., Pitts, K., Jolley, B., Robbins, J., Markel, J., Popescu, S., Nelson, R., Harding, D., Pederson, D., Klotz, B., & Sheridan, R. (2022). Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2) Project Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land –Vegetation Along –Track Products (ATL08), Version 6. *ICESat-2 Project*. <https://doi.org/10.5067/8ANPSL1NN7YS>
- Neumann, T. A., Martino, A. J., Markus, T., Bae, S., Bock, M. R., Brenner, A. C., Brunt, K. M., Cavanaugh, J., Fernandes, S. T., Hancock, D. W., Harbeck, K., Lee, J., Kurtz, N. T., Luers, P. J., Luthcke, S. B., Magruder, L., Pennington, T. A., Ramos-Izquierdo, L., Rebold, T., ... Thomas, T. C. (2019). The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite – 2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111325. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111325>
- NSIDS, 2024. ICESat-2 Product Overviews [online]. [cit. 2024.03.11]. Dostupné z: <https://nsidc.org/data/icesat-2/products>.

- Petrie, G. et al (2008). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing: Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning*. CRC Press. ISBN 10.1201/9781420051438.
- Pronk, M., Ledoux, H., & Eleveld, M. (2023). Assessing vertical accuracy and spatial coverage of ICESat-2 and GEDI spaceborne lidar for creating global terrain models.
- Quiros, E., Polo, M. E., & Fragoso-Campon, L. (2021). GEDI Elevation Accuracy Assessment: A Case Study of Southwest Spain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 5285–5299. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3080711>
- Tencer, T. (2012). *LiDAR – Pořizování 3D dat*. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1421/podzim2012/AEA_73/Tencer_-_LiDAR_-_Porizovani_3D_dat.pdf
- Thomas, G., & Isaacs, R. (2011). Basic principles of lasers. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147202991100227X>
- Urbazaev, M., Hess, L. L., Hancock, S., Sato, L. Y., Ometto, J. P., Thiel, C., Dubois, C., Heckel, K., Urban, M., Adam, M., & Schullius, C. (2022). Assessment of terrain elevation estimates from ICESat-2 and GEDI spaceborne LiDAR missions across different land cover and forest types. *Science of Remote Sensing*, 6, 100067. <https://doi.org/10.1016/J.SRS.2022.100067>
- Vrbová M, Jelínková H, & Gavrilov P. (1998). *Úvod do laserové techniky*. Vydavatelství ČVUT.
- Xing, Y., Huang, J., Gruen, A., & Qin, L. (2020). Assessing the performance of ICESat-2/ATLAS multi-channel photon data for estimating ground topography in forested terrain. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132084>
- Zhu, J., Yang, P. feng, Li, Y., Xie, Y. zhou, & Fu, H. qiang. (2022). Accuracy assessment of ICESat-2 ATL08 terrain estimates: A case study in Spain. *Journal of Central South University*, 29(1), 226–238. <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4896-x>