

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

**Katedra prostorových věd**



## **Bakalárska práca**

**Validace přesnosti měření výšky terénu a vegetace  
laserovým altimetrem ICESat-2**

**Vedúci práce: doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.**

**Bakalant: Kristína Kolníková**



# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kristína Kolníková

Krajinářství

Územní technická a správní služba

Název práce

**Validace přesnosti měření výšky terénu a vegetace laserovým altimetrem ICESat-2**

Název anglicky

**Validation of accuracy of terrain and vegetation height retrievals using ICESat-2 laser altimeter**

---

### Cíle práce

Cílem práce je validace přesnosti měření výšky terénu a vegetace laserovým altimetrem ICESat-2. Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

### Metodika

Lesy jsou významným globálním úložištěm uhlíku. Současné odhady zásob uhlíku v lesích a rychlost jejich změn jsou však nepřesné, neboť nezbytná data existují jen lokálně a v globálním rozsahu potřebná data chybí. Významný potenciál pro mapování množství biomasy v lesích skýtají dvě nedávno započaté satelitní laserové mise: Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) a Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2). Autorka se v literární rešerši zaměří na problematiku laserové altimetrie a na nově dostupná data ze zmíněných misí. Pro vybrané území vyhodnotí přesnost dat z laserového altimetru ATLAS na palubě satelitu ICESat-2.

## Doporučený rozsah práce

30 stran

## Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autorky.

---

## Doporučené zdroje informací

- Liu, A., Cheng, X., & Chen, Z. (2021). Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112571.
- Malambo, L., & Popescu, S. C. (2021). Assessing the agreement of ICESat-2 terrain and canopy height with airborne lidar over US ecozones. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112711.
- Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., ... & 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.
- Neuenschwander, A. L., & Magruder, L. A. (2019). Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look. *Remote sensing*, 11(14), 1721.
- Neuenschwander, A., & Pitts, K. (2019). The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. *Remote sensing of environment*, 221, 247-259.
- Tian, X., & Shan, J. (2021). Comprehensive evaluation of the ICESat-2 ATL08 terrain product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- 

## Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

## Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2022

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2022

---

### **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma: “ Validace přesnosti měření výšky terénu a vegetace laserovým altimetrem ICESat-2“ vypracovala samostatne a citovala som všetky informačné zdroje, ktoré som v práci použila a ktoré som taktiež uviedla na konci práce v zozname použitých informačných zdrojov.

Som si vedomá, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov, v znení neskorších predpisov, predovšetkým ustanovenie § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto diela.

Som si vedomá, že odovzdaním bakalárskej práce súhlasím s jej zverejnením podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov, v znení neskorších predpisov, a to i bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

Svojím podpisom taktiež prehlasujem, že elektronická verzia práce je totožná s verziou tlačenou a že s údajmi uvedenými v práci bolo zachádzané v súvislosti s GDPR.

V Prahe, dňa 31. 3. 2022

Podpis: .....

## **Pod'akovanie**

Rada by som touto cestou poďakovala vedúcemu bakalárskej práce pánovi doc. Ing. Vítězslavovi Moudrému, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť, podnetné návrhy k práci a predovšetkým za ľudský prístup. Ďakujem za podporu pri písaní tejto práce rodine, kamarátom a hlavne priateľovi Marekovi.

# Validace přesnosti měření výšky terénu a vegetace laserovým altimetrem ICESat-2

## Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá hodnotením dátovej sady ATL08 z vesmírnej družice ICESat-2. Krkonošský národný park bol vybraný ako záujmové územie vďaka dostupnosti dát. Ten sa nachádza na severných hraniciach Českej republiky s Poľskom, preto bol hodnotený na jeho oboch územiach. Cieľom práce bolo zhodnotiť vertikálnu presnosť laserového merania satelitu, jeho nameraných atribútov a ich kombinácie. Pre túto validáciu sa použili metriky strednej chyby (ME), strednej absolútnej chyby (MAE) a strednej kvadratickej chyby (RMSE). Prvotné a druhotné spracovanie prebiehalo v software programe ArcMap a tabuľkovom editore Excel. Výsledkom boli hodnoty strednej chyby (ME) -0,41 m, strednej absolútnej chyby (MAE) 1,22 m a strednej kvadratickej chyby (RMSE) 2,46 m, ktoré sú veľmi podobné predošlým štúdiám v rádoch desiatinných miest. Atribúty, ktoré najviac ovplyvňovali presnosť meraní, boli nasnímané počas dňa na nezasneženom teréne. To pravdepodobne viedlo k neúplnému nasnímanému subsegmentu, a to zasa k skresľovaniu dát. Ďalšie hodnotenie rôznych atribútov v rôznych kombináciách a ich chybovosti je určite vítané.

**Kľúčové slová:** LiDAR, laserové určovanie vzdialenosti, vesmírne laserové skenovanie, Krkonošský národný park, KRNAP

# **Validation of accuracy of terrain and vegetation height retrievals using ICESat-2 laser altimeter**

## **Abstract**

This bachelor thesis evaluates the dataset ATL08 from the space satellite ICESat-2. Krkonoše National Park was chosen as an area of interest due to availability of data. It is located on the northern border of the Czech Republic with Poland, so it was evaluated in its both areas. The aim of the thesis was to evaluate the vertical accuracy of laser scanning from the satellite, its measured attributes and their combination. Mean error (ME), mean absolute error (MAE) and root mean squared error (RMSE) metrics were used for this validation. Primary and secondary processing took place in the ArcMap software program and the Excel spreadsheet editor. The result was for ME -0,41 m, for MAE 1,22 m and for RMSE 2,46 m, which are very similar to previous studies in decimal places. The attributes that affected the precision of measurements the most were taken during the day on snow-free land. This probably led to an incomplete scanned subsegment and to distortion of data. Further evaluation of the various attributes in the various combinations and their error rates is certainly welcome.

**Keywords:** LiDAR, laser ranging, Spaceborne Laser Scanning, Krkonoše Mountains National Park, KRNAP



# Obsah

<b>1 Úvod a ciele práce.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Literárna rešerš .....</b>	<b>11</b>
2.1 LiDAR.....	11
2.2 Laser a elektromagnetické spektrum.....	12
2.3 Základné operácie merania terénu a vegetácie.....	14
2.3.1 Laserové určovanie vzdialenosti (Laser Ranging).....	14
2.3.2 Laserové profilovanie (Laser Profiling) .....	15
2.3.3 Laserové skenovanie (Laser Scanning) .....	16
2.4 Zber dát a ich využitie.....	17
2.5 ICESat-2.....	19
<b>3 Metodika .....</b>	<b>21</b>
3.1 Záujmové územie- Krkonošský národný park .....	21
3.2 Zber a príprava dát .....	23
3.3 Prvotné spracovanie dát .....	24
3.4 Validácia vertikálnej presnosti nameraných dát .....	24
3.4.1 Metriky chybovosti .....	24
3.4.2 Grafické znázornenie .....	25
3.4.3 Druhotné spracovanie v tabuľkovom editore Excel .....	26
<b>4 Výsledky a diskusia .....</b>	<b>27</b>
4.1 Atribút NIGHT .....	30
4.2 Atribút SNOW .....	31
4.3 Atribút SUBSET .....	33
4.4 Atribút BEAM.....	34
4.5 Atribút CANOPY.....	34
4.6 Kombinácia atribútov .....	35
<b>5 Záver.....</b>	<b>37</b>
<b>Referencie .....</b>	<b>38</b>

# 1 Úvod a ciele práce

Diaľkový prieskum Zeme zažíva veľký rozvoj za posledných 30 rokov. Neustále sa zdokonaľujúce technológie nám poskytujú vždy aktuálnejšie a presnejšie dáta. No ako všetko ostatné, ani tie nie sú dokonalé, a preto treba validovať ich povahu, atribúty a chybovosť. Jednou z prvých satelitných laserových misií v roku 2003 bola družica s názvom ICESat patriaca pod Národný úrad pre letectvo a vesmír (NASA). Využívala LiDARovú metódu a altimeter GLAS, teda výškomer založený na výpočte času letu laserových fotónov k terénu a ich spätnému prijatiu. Misia trvala 7 rokov a priniesla značné výsledky v meraní kryosféry, topografie, výšky vegetácie či meraní výšky hladiny oceánov a vnútrozemských vôd na celej zemeguli. Po veľkom úspechu a túžbe získať ďalšie dáta, sa vedci rozhodli vypustiť na obežnú dráhu (do výšky približne 500 km m n. m.) Zeme jeho nasledovníka, družicu ICESat-2. Počiatočným rokom 2018 sa tak začalo snímanie altimetrom, tentokrát s názvom ATLAS. Oproti GLASu, ktorý snímal povrch jediným lúčom, ATLAS dokázal vyslať a prijať naraz 6 laserových lúčov. Pokryl väčšiu plochu s 250-krát väčšou silou laseru.

Práve globálne otepľovanie a topenie celého ľadového a snehového pokryvu na zemskom povrchu vedcov presvedčilo vyvinúť takú technológiu, akou je ICESat-2, spolu s LiDARom a ATLASom. Okrem iných dátových sad, ktoré vznikli vďaka širokému záberu skenovania celej zemegule, ako napr. ATL12, ATL19, či ATL22 (NASA, 2019), sa táto práca venuje dátovej sade ATL08, a teda meraniu výška terénu a vegetácie. V riešenom záujmovom území Krkonošského národného parku prebehlo síce niekoľko meraní a ich interpretácia a evalvácia dát, no nie v takom kontexte, akému sa venuje táto práca. Validáciou a meraním chyb laseru sme schopní určiť presnosť dát. Hodnotenú budú rôzne atribúty, ako napr. NIGHT (noc), SNOW (sneh), SUBSET (počet subsegmentov v nameranom odtlačku), a iné, a taktiež aj ich niektoré kombinácie.

Cieľom tejto bakalárskej práce je hodnotenie chybovosti merania výšky terénu produktu ATL08 (Land, Water and Vegetation Elevation) pomocou metrík ME, MAE a RMSE. V záujmovej oblasti Krkonošský národný park boli vyhotovené segmenty o veľkosti 12 x 100 m zo satelitu ICESat-2. Okrem hodnotení samotných atribútov sa budú validovať aj ich kombinácie.

## 2 Literárna rešerš

### 2.1 LiDAR

LiDAR (Light Detection And Ranging) je metóda diaľkového prieskumu Zeme založená na vyslaní laserového lúča z prístroja, odrazenia od objektu a jeho následného prijatia a spracovania. Výsledkom sú zozbierané dáta typicky vo forme bodového mračna, ktoré sa po následnom interpolovaní môžu spracovať do podoby digitálneho modelu povrchu (/ výškopisného modelu krajiny) alebo 3D modelov objektov (vegetácia, budovy, dno vodnej plochy, a podobné). Pre výsledné spracovania sa používajú softwarové geografické informačné systémy (ďalej už len ako GIS) ako napr. ArcGIS, LAStools, Cloud Compare, štatistické programy (R, tabuľkový editor Exel), alebo programovacie jazyky (Python). Pomocou LiDAR-ového merania vieme zmapovať dopravnú infraštruktúru, celú kryosféru na Zemi (oblasti pokryté snehom a ľadom vrátane ľadovcov), ťažko dostupné zalesnené územia, povodňové pásma, pobrežné oblasti, či mapovanie a hodnotenie škôd po prírodných katastrofách- hurikány, zemetrasenia a zosuvy pôdy (Wehr, 1999)

Z historického hľadiska sa prvé využívanie laserového merania začalo v sedemdesiatych a osemdesiatych rokoch minulého storočia. Rápidne sa začalo používať až od 1990 a okolo roku 1995 sa skompletizoval o GPS (Global Positioning System) a IMU (Inertial Measurement Unit). GPS je globálny polohový družicový systém. Umožňuje pomocou elektronického prijímača určiť veľmi presnú polohu na povrchu Zeme. Funguje na princípe jedného známeho referenčného prijímača na známom geodetickom mieste a jeden stanice na palube lietadla. Taktiež má funkciu synchronizácie času všetkých ostatných meracích systémov na palube. Z pravidla je frekvencia merania 2 Hz. Vlastní ho USA a je prevádzkovaný United States Space Force. Pojem GPS sa ale generalizoval v hovorovej reči pre každý systém na zisťovanie polohy, napriek tomu, že existujú aj iné polohové systémy (Galileo, GLONASS, a iné). IMU- Inertial Measurement Unit je zariadenie pozostávajúce z niekoľkých akcelerometrov, gyroskopov a magnetometrov. Táto jednotka zaznamenáva zrýchlenie, náklon a orientáciu letiaceho objektu, pričom najčastejšie ide o lietadlá, satelity či kozmické lode. (Dolanský, 2004).

Zaznamenané dáta laserového lúču, doplnené o informácie z GPS a IMU je LiDAR schopný určiť s odchýlkou 5 až 10 cm pre polohu a 7 až 15 centimetrov pre výšku (Shekhar, 2007).

## 2.2 Laser a elektromagnetické spektrum

**Laser** z anglického akronymu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v preklade zosilňovanie svetla stimulovanou emisiou žiarenia. Ide o svetlo, ktoré je vyžarované v úzkom zväzku z aktívneho prostredia cez polopriepustné zrkadlo. Je koherentné (nemennosť fázového posunu a frekvencie žiarenia) monochromatické (žiarenie jednej vlnovej dĺžky), divergentné (rozbiehavosť- priemer lúča sa vo vzdialenosti zväčšuje). A teda oproti obyčajnému svetlu, ktoré je rozptýlené do priestoru, ide o optický zdroj vyžarujúci fotóny v jeden súvislý lúč. Vzniká umiestnením zosilňovača svetla do optického rezonátora a naladeného na rovnakú vlnovú dĺžku. Frekvenčný rozsah laserov je od infračerveného po ultrafialové žiarenie. (Kachtík, 2011). Ako prvý sa o zavedenie stimulovanej emisie pokúsil Albert Einstein v roku 1917. (Maňková, 2000)

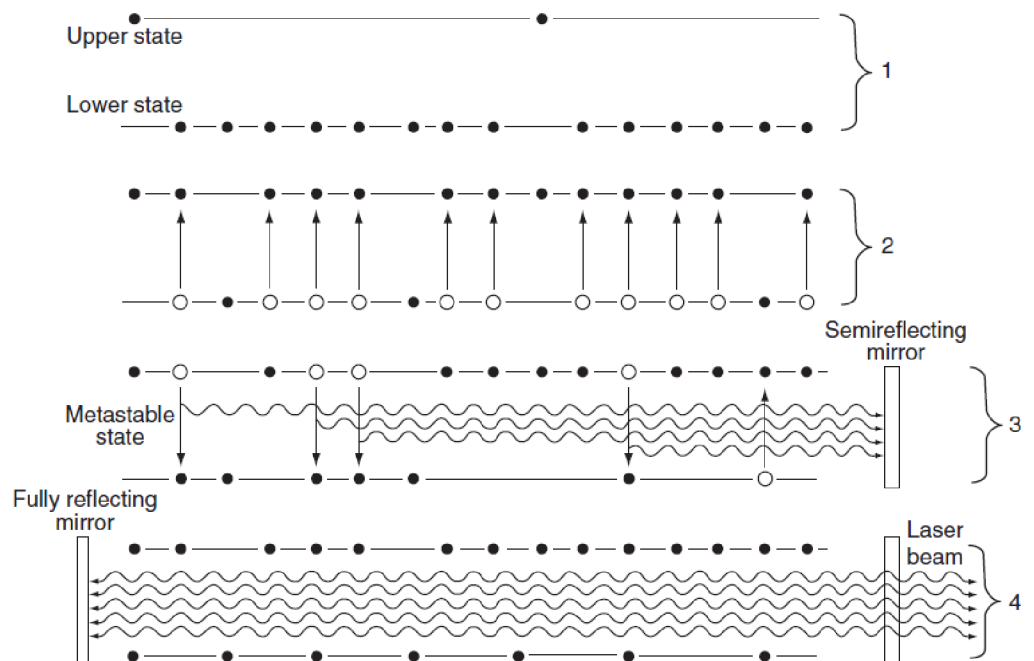
Samotná **konštrukcia** lasera sa skladá z niekoľkých častí:

1) Aktívne prostredie, ktoré je základným prvkom lasera. Môže byť rôznych skupenstiev. Najsilnejšie sú pevnolátkové: kryštály (v podobe rubína) a monokryštály; kvapaliny (roztoky organických farbív), plyny (argón zelenej až modrej farby), polovodiče alebo fotodiódy. Využívajú sa v odlišných priemysloch, preto majú aj inú intenzitu. Altimeter (výškomer) bude mať silnejší laser, ktorý musí prejsť niekoľko 1000 kilometrov na rozdiel od laserov v informatickom odvetví (tlačiarne, napáľovanie a prehrávanie CD, laserová čítačka čiarových kódov). Ďalej sa využívajú pri výskumných a vojenských účeloch, či v medicíne (operácie očí).

2) Zdroj energie (žiarenia) je svetelná výbojka omotaná okolo aktívneho prostredia. Okrem výbojky sa používajú chemické reakcie i elektrický prúd. Ako primárny zdroj fotónov vie vyvolať dve fyzikálne reakcie, ktoré umožnia násobenie energie. Inak povedané, je umožnený prechod medzi energetickými hladinami elektrónov pri ktorých sa uvoľnia fotóny. Akonáhle sa rozžiari výbojka, elektróny v aktívnom prostredí prejdú na vyššiu energetickú hladinu, tzv. excitovaný stav. Nastáva inverzia populácie, kde sa nachádza väčšina elektrónov. Tie tu ale dlho nevydržia kvôli vysokej energii, preto sa vrátia na hladinu

s názvom metastabilná. Popritom tom uvoľnia fotóny (energiu), ktoré nemajú konkrétny smer. To znamená, že ak náhodou fotón mieri z aktívneho prostredia von cez steny, napr. spomínaného rubínu, tak cez ne prejde. Hovoríme o spontánnej emisii. Zvláštnym úkazom je emisia stimulovaná, alebo aj vynútená. Ide o fotóny, ktoré keď prejdú okolo elektrónu, vedú z neho uvoľniť, či skôr vypudíť ďalší fotón. Novo uvoľnený fotón kopíruje fotón, vďaka ktorému sa uvoľnil- to znamená, že majú rovnaký smer. V princípe ide o reťazovú reakciu (čím viac fotónov, tým viac fotónov).

3) Rezonátor je posledná dôležitá konštrukčná jednotka, bez ktorého by fotóny neopustili prostredie. V úplnom základne ide o dve rovnobežné zrkadlá, ktoré sú postavené kolmo k lúču lasera. Jedno z nich je nepriepustné (leštené zlato, dielektrické zrkadlo-izolant) a druhé polopriepustné. Vyžiarené fotóny sa budú odrážať medzi dvomi zrkadlami dovtedy, dokým sa ich dostatočne veľa nebude nachádzať vo vyššej energetickej hladine za účelom preniknutia do vonkajšieho prostredia. Z celkového množstva fotónov, ktoré sa nachádzajú v cylindri, vie opustiť prostredie práve asi len 2 %, ktoré sú konečným produktom- laserom (Thomas et Isaacs, 2011).



Obrázok 1: Zjednodušený akt lasera (prevzaté z Petrie, 2008)

Na obrázku 1 je názorne ukázaný akt laseru v jeho aktívnom prostredí. (1) situácia pred aplikáciu energie; (2) situácia po aplikácii externej energie; (3) „spontánna emisia“ - fotóny sú emitované rovnobežne s hlavnou osou cylindra aktívneho prostredia; (4) po „stimulovanej emisii“ a reťazovej reakcii fotónov laserový lúč emitovaný cez semi-priepustné zrkadlo (Petrie, 2008)

**Elektromagnetické spektrum** obsahuje viditeľné i neviditeľné vlnové dĺžky. Sú to gamma, röntgenové a ultrafialové žiarenie, nasleduje viditeľné spektrum od fialovej (od cca 380-400 nm), cez modrú, azúrovú, zelenú, žltú, oranžovú, až po červenú (do cca 700-750 nm). Spektrum ďalej pokračuje infračerveným žiarením, mikrovlnným a škálu uzatvárajú rádiové vlny.

Laserové emitory využívajú najčastejšie infračervené žiarenie vlnovej dĺžky 1064 nm. V niektorých prípadoch 1540 nm. Sú to vlny v blízkosti červeného svetla a preto sa volajú NIR- v preklade z anglického jazyka Near Infrared. Okrem toho vieme využiť aj zelené žiarenie s dĺžkou 532 nm. Batymetria, ktorá sa zaoberá meraním hĺbky dna vodných plôch, ako napríklad riek a povodí, vodných nádrží, či morí, využíva zelené žiarenie s tým, že laser vie preniknúť až do hĺbky 300 m (má vlastnosť penetrácie vody). Keďže sa jedná o plochy veľkých čísiel, najvýhodnejšie je využitie leteckého či vesmírneho laserové snímania (Baltsavias, 1999).

## 2.3 Základné operácie merania terénu a vegetácie

Všetky tri typy laserového merania- určovanie vzdialenosti, profilovanie a skenovanie, sú založené na používaní určitého typu laserového prístroja, zvyčajne označované ako laser ranger alebo laser rangefinder. Dokážu merať vzdialenosť s vysokou presnosťou, ktoré je vždy postavené na presnom meraní času letu fotónov (Petrie, 2008). Sú hierarchické, od najzákladnejšieho po najviac najkomplexnejší.

### 2.3.1 Laserové určovanie vzdialenosti (Laser Ranging)

Laserové určovanie vzdialenosti je primárna operácia, ktorá sa môže vykonávať dvoma metódami.

#### **A) Pulzné meranie (/Time Pulse Method/ Time Of Flight- **TOF**)**

Pulzné meranie je metódou založenou na sekvenciách výdaju za sebou emitovaných fotónov, odrazením od objektu a ich spätným prijatím. Detektormi sú fotodiódy merajúce čas, za ktorý sa fotóny stihnú vrátiť späť do zariadenia od jeho opustenia. Vyžiarený lúč je časovo krátky, no opticky intenzívny.

#### **B) Kontinuálne meranie (/Phase Comparison Method/ **PCM**)**

Ide o nepretržité vysielanie vln, bez ohľadu na ich kvantitu. Transmitter emituje vlny o určitej vlnovej dĺžke ( $\lambda_{short}$  a  $\lambda_{long}$ ), pričom prijímač vie zmerať iba poslednú vyžiarenú vlnu. Hodnota rozsahu je odvodená porovnaním vysielanej a prijímanej vlny sínusového vzoru a meraním fázového rozdielu medzi nimi. V tomto prípade sa jedná predovšetkým o terestriálne (/pozemné) meranie, pretože kontinuálne emitovanie vln spotrebúva veľa energie a financií. Zväčša ide o menšiu skenovanú oblasť v porovnaní s inými možnosťami zbieraním dát (Petrie, 2008).

### **2.3.2 Laserové profilovanie (Laser Profiling)**

Využíva bezreflektorový laser, ktorý meria sériu tesne za sebou nasledujúcich bodov umiestnených na kolmiciach horizontálnej čiary. Výsledkom je vertikálny model terénu zobrazujúci jeho eleváciu, ako je možné vidieť na obrázku 2.

**A)** Ak ide o stacionárny snímač umiestnený na zemi, prístroj sníma vzdialenosť bodu (slant range- rozsah sklonu) a vertikálny uhol ( $V$ ) každého zaznamenaného bodu. Aplikujeme nasledujúce vzorce:

$$D = R \times \cos \times V$$

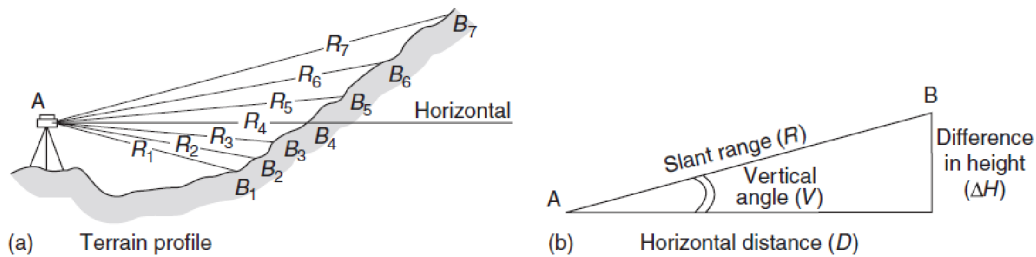
D je horizontálna vzdialenosť

R je nameraný sklon vzdialenosti

V je vertikálny uhol

$$\Delta H = R \times \sin \times V$$

Kde  $\Delta H$  je rozdiel výšky medzi laserovým snímačom a aktuálne nameraným bodom.



Obrázok 2: Profilovanie terénu (Prevzaté z Petrie, 2008)

**B)** V druhom prípade, kde je laserový snímač už pripevnený na lietajúce zariadenie – lietadlo či satelit, môžeme hovoriť o altimetri, jednoducho o výškomere. Je nasmerovaný zvisle smerom k zemskej povrchu a taktiež zaznamenáva sériu za sebou idúcich bodov. Ak poznáme, alebo vieme určiť danú polohu a nadmorskú výšku lietajúceho telesa pomocou GPS i IMU, tak následne vieme určiť aj zodpovedajúce vzdialenosti namerané v týchto bodoch. To nám umožňuje zostaviť profil terénu pozdĺž línie letu (Petrie, 2008).

### 2.3.3 Laserové skenovanie (Laser Scanning)

Na rozdiel od laserového profilovača, ktorý sníma polohu a nadmorskú výšku, vie laserový skener merať a mapovať rôzne topografické prvky vo veľkom detaile. Pridaný skenovací mechanizmus obsahuje rotujúce zrkadlo a optický hranol (2 transparentné elementy s lešteným povrchom, ktoré sú určené na lámanie svetla). Dôležitou súčasťou je aj teleskop, ktorý prijíma odrazené fotóny (Petrie, 2008).

Pozícia TLS je stála, nepohyblivá. Preto je pri získavaní dát nutný pohyb v dvoch smeroch. Okrem vertikálneho pohybu daného rotujúcimi zrkadlami a optickými hranolmi, musí byť pridaný kontrolovaný a meraný pohyb v smere azimutu, obvykle implementovaný pomocou motorového pohonu. Umožňuje meranie sérií profilov okolo vertikály osi LS. ALS a SLS plošné skenovanie je dosiahnuté sériou profilových meraní kolmo na letovú líniu, zatiaľ čo pohyb vpred skenovacej jednotky poskytuje druhý rozmer. Vďaka uhlovému kódovaču je možné kontinuálne a presne merať hodnoty uhlovej rotácie reflexného zrkadla a optického hranola. Umožňuje mu merať dodatočné profily v bočnom alebo priečnom smere. Pridaním GPS a IMU získavame tretiu dimenziu. Sú vygenerované polohy a nadmorské výšky siete bodov, ktoré sú nazývané aj LiDARové mračno bodov. Pokrývajú riadok alebo oblasť terénu (pás) namiesto merania hodnôt pozdĺžnej lineárnej dráhy letovej línie (Petrie, 2008).



## 2.4 Zber dát a ich využitie

**Pozemné laserové skenovanie** (Terrestrial Laser Scanning, ďalej už len ako TLS) sú stacionárne snímače umiestnené na statíve. Primárne sa využívajú v geodézii, architektúre, archeológii, či pri dopravnom staviteľstve.

**Mobilné laserové skenery** (MLS) sú najčastejšie umiestnené na dopravnom prostriedku, ako napr. automobil. Využíva sa na mapovanie dopravného značenia, rozvodných sietí, budov, alebo dopravných infraštruktúr.

**Letecké laserové skenovanie** (Airborne Laser Scanning, ďalej už len ako ALS) sú snímače pripevnené na lietadlo, vrtuľník, či iný lietajúci nosič (ako napr. bezpilotné lietadlo-dron, vzducholod'). Výška lietajúceho zariadenia sa môže pohybovať od 300 m do 5000 m, a od toho závisí aj veľkosť pokrytej plochy. Nazývame ju footprint (otlačok, stopa) a jej priemer je vo všeobecnosti 0,2 m- 2m. Čím je nosič vyššie, tým viac plochy pokryje. Ak je nosič nižšie, vieme získať kvalitnejšie/ presnejšie dáta. Lúče sa v smere od zdroja k terénu rozširujú a dopadajú k nemu v tvare kužeľa. Vďaka jednoduchému základnému vzorcu vieme vypočítať vzdialenosť medzi nosičom laseru a odrazovou plochou:

$$vzdialenosť = \frac{rýchlosť\ svetla \times čas\ od\ vypustenia\ a\ prijatia\ fotónu}{2 \text{ (cesta k odrazovej ploche a späť k nosiču)}}$$

Je využívaný pri získavaní digitálneho modelu terénu väčších území, mapovanie brehov vodných tokov, záplavových území, ale aj pri dokumentácii líniových stavieb, ako sú cesty, produktovody (ropovody, plynovody, vodovody) a elektrické vedenie vysokého napätia.

Oproti klasickej leteckej fotogrametrii, na ktorej interpretujeme iba to, čo vidíme, je ALS a SLS na vyššom stupni komplexnosti. Lúč postupne prechádza atmosférou a vegetáciou cez jej poschodia: koruna stromov (prvý odraz), vetvy a konáre, spodná vegetácia pri zemi, až nakoniec príde k nepriepustnej ploche (posledný odraz) a od tej sa odrazí naspäť. No už od prvého vyslania laseru však musíme počítať s tým, že fotóny sa budú rozptyľovať pri prechode priestorom. Na zemeguľu dopadne iba časť pôvodnej energie a ich odrazy nazývame „echo“.

**Produktom** (najčastejšie) lidarového prieskumu je výškopisný model **DEM** (z angl. Digital Elevation Model). DEM je všeobecný názov pre rastrový súbor, ktorého hodnota bunky

predstavuje jej nadmorskú výšku. Termíny DSM a DTM potom predstavujú aký typ krajiny daný DEM reprezentuje.

Model **DSM** je tvorený najčastejšie z prvých odrazov laserového lúča. Reprezentuje povrch krajiny so všetkými jej prvkami napr. vegetáciu, budovy, komunikácie atď. **DTM** predstavuje krajinu bez týchto prvkov. Model tzv. holej zeme je výsledkom interpolácie hodnôt získaných z posledných odrazov. DTM sú vhodné na plánovanie a analýzy terénu v lesoch kde je konvenčne zameriavanie pomocou geodetických prístrojov náročné a komplikované. Strata potenciálne dôležitých informácií je možná. Obecne sa odporúča používať DSM pre plochy bez rastlinstva a DTM pre oblasti, kde hustota vegetácie (napr. zalesnenie) neumožňuje vidieť zemský povrch. Avšak práve v lesoch treba každú informáciu podrobiť validácii a kritike. Vyššie spomenuté posledné odrazy často práve v lesoch reprezentujú kmene stromov a nie holú zem (Tencer, 2012).

Namerané dátové produkty z výskumu ICESat-2 sa nazývajú ATL<sub>xx</sub>, kde xx predstavujú rôzne čísla a tie zasa oblasti snímania. Napr. ATL08, ktoré sa validujú v tejto práci snímajú výšku terénu a vegetácie.

### **Vesmírny zber dát** (Spaceborne Laser Scanning- ďalej už len ako **SLS**)- **misia ICESat**

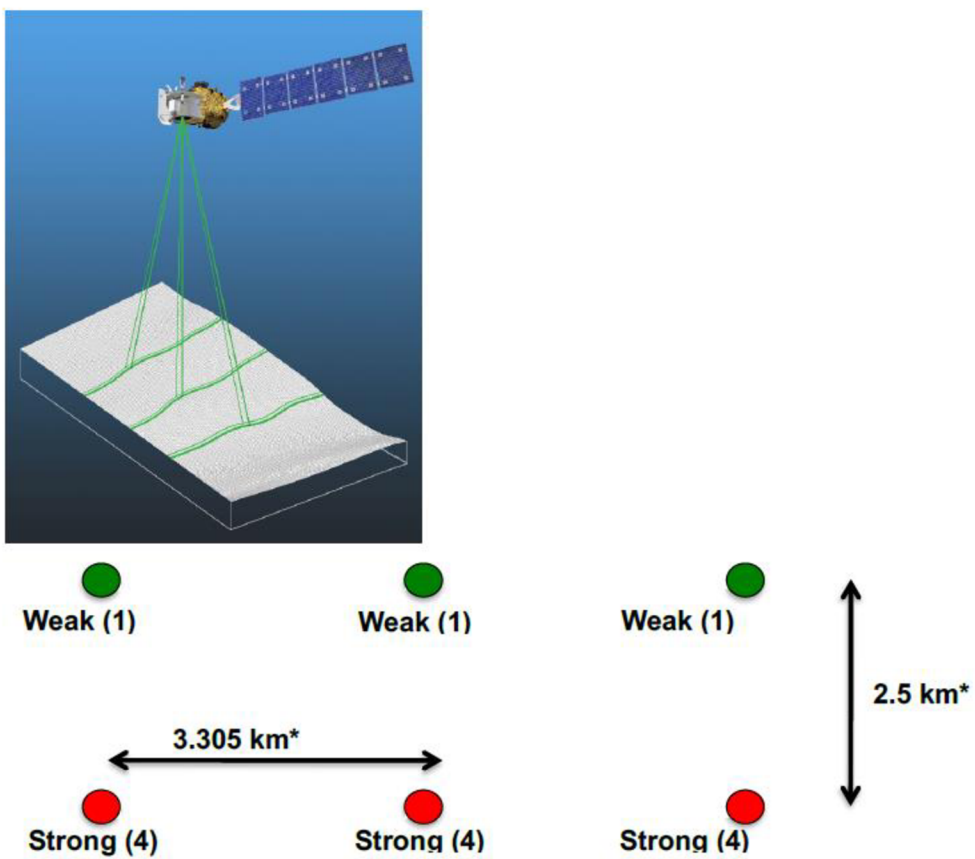
The Ice, Cloud and Elevation Satellite (ICESat) misson je vesmírna misia pre laserové meranie ľadového pokryvu na zemskom povrchu a jeho zmenou v čase (ľadovce v pohoriach a morské ľadovce); oblakov a aerosólov v atmosfére; nadmorskej výšky a vegetačnej vrstvy. Všetky tieto merania vykonával altimeter GLAS- Geoscience Laser Altimeter System. Je súčasťou programu EOS- Earth Observing System, spadajúci pod Národný úrad pre letectvo a vesmír (NASA, 2002). Satelit bol vypustený z leteckej základne Vandenberg (Kalifornia, USA) v januári 2003. Bol aktívny do roku 2009. 2 Altimetre GLAS zbierali dáta v dvoch elektromagnetických rozhraniach pomocou Nd:YAG laseru (neodymový). 532 nm (zelené) sa využívalo na meranie výšky hraničnej vrstvy atmosféry a vertikálnej distribúcie aerosólu a tenších oblakov. Druhé rozhranie, 1064 nm (červené a NIR) skenovalo nadmorskú výšku zeme, výšku a hustotu oblačnosti, tvar echo pulzu. Vyžarovalo 40 pulzov za sekundu. Naskenovaná stopa mala priemer (cca) 70 m, a bola vyhotovená každých 170 m v smere letu. Jeden cyklus satelitu (obeh okolo Zeme) trval 91 dní. Misia trvala 7 rokov, počas ktorých bolo prevedených 18 operačných skenovacích akcií. (Fouladinejad, 2019)

## 2.5 ICESat-2

Druhá vesmírna misia bola zahájená 15. septembra 2018 a trvá dodnes. Nástroj ATLAS bol integrovaný na kozmickú loď Delta II rocket. ATLAS je taktiež akronym, ktorý znamená Advanced Topographic Laser Altimeter System. Prvé verejné výsledky po kalibrovaní a validácií dát boli zverejnené 28. mája 2019. Nesie laser, ktorý je rozdelený do 6 lúčov pomocou difraktívneho optického elementu. Každý pár vie nasnímať stopu o priemere 90 m na šírku a medzi jednotlivými pásmami je „pauza“ 3 km. Každý pár má jeden slabý lúč a jeden silný lúč, kde sa energia rozkladá v pomere 1:4 (Neuenschwander et Pitts, 2021).

So silou 10 000 pulzov za sekundu (250-krát silnejší oproti GLAS) ATLAS sníma každého 0,7 m- vieme detailnejšie určiť svažitosť terénu (Markus, 2017). Údaje budú dostatočné na odhadnutie ročnej zmeny výšky ľadovca v Grónsku a Antarktíde s presnosťou na 4 mm. Časová dĺžka jedného obehu okolo Zeme je tiež 91 dní, ako aj pri jeho predchodcovi. Tým, že dáta sú zozbierané raz za celé ročné obdobie (štyrikrát za rok), vieme získať komplexný prehľad o zmene a vývine záujmového územia (Garner, 2019).

**Produktom**, ktorý je hlavným záujmom tejto bakalárskej práce, sú dáta ATL08. Poskytnú primárne informácie o výške terénu a výške vegetácii a jej vrchnej časti. S HDF5 riadenou štruktúrou od ICESat-2, produkt ATL08 charakterizuje každú zo šiestich pozemných dráh (GT- Ground Track) spojených s referenčnou pozemnou dráhou (RTG- Reference Ground Track) pre každý cyklus a obežnú dráhu. Každá GT skupina má odlišné číslo laserového lúča, vzdialenosť od referenčnej dráhy a silu vysielanej energie. Spracovávajú sa nezávisle použitím rovnakej postupnosti krokov. Nasnímaná stopa sa ďalej delí na menšie časti, tzv. subsegmenty ( $5 \times 20 \text{ m} = 100 \text{ m}$ ) (Neuenschwander et Pitts, 2021).



Obrázok 3: Schéma laserovej konfigurácie pre misiu ICESat-2. Energia je rozdelená do 3 párov laserových lúčov- vždy je jeden slabý a jeden silný. (Prevzaté z Neuenschwander et Pitts, 2021)

## 3 Metodika

### 3.1 Záujmové územie- Krkonošský národný park

Krkonošský národný park (ďalej už len ako KRNAP) bol vybraný ako záujmová oblasť pre jeho unikátne geografické umiestnenie a dostupnosť kvalitných satelitných dát, ktoré boli použité ako produkt na spracovanie v tejto práci.

Nachádza sa na hraniciach Českej republiky (severovýchod) s Poľskom (juhozápad) a jeho dĺžka je cca 36 km (SITOUR, 2009). Vonkajší Krkonošský hrebeň je vyšší a kopíruje štátne hranice. Je súčasťou provincie Česká vysočina a Krkonoško-jesenická subprovincia. Spolu s Hrubým Jeseníkom a Kralickým Snežníkom tvorí horský masív Vysoké Sudety, ktorý je súčasťou Sudetského pohoria (KRNAP, 2010a). Ich rozloha je 693 km<sup>2</sup>, pričom väčšia časť sa nachádza práve v Česku (454 km<sup>2</sup>) a menšia v Poľsku (239 km<sup>2</sup>). Stredová nadmorská výška je 901 m a sklon 13° 23' (Pilous, 2007a). Nachádza sa tu osem z desiatich najvyšších vrcholov Českej republiky, vrátane najvyššieho vrchu Sněžka s nadmorskou výškou 1603 m. Je tvarovaná do ihlanu kvôli ľadovcovej a riečnej erózii (tzv. karling), ktorá pôsobila z troch strán. Na jej úbočí sa nachádzajú kamenné moria a mury (dráhy kamenito-hlinitých lavín). Leží priamo na hranici s Poľskom (České geologická služba, 1998).

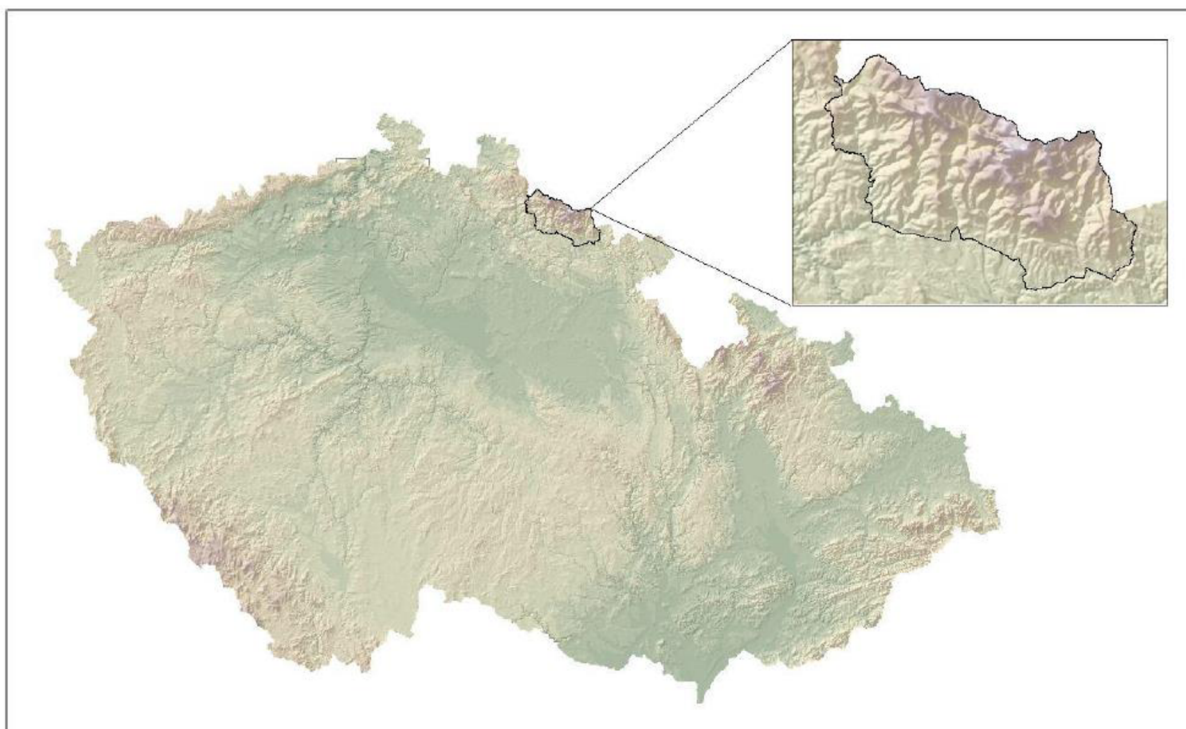
Geológia: Krkonoško-jizerské kryštalinikum je tvorený starohornými a prvohornými kryštalickými bridlicami (svor, ortorula, fylit), ktoré sú staré 600 miliónov až miliardu rokov. Ďalej tu vieme nájsť kremenec, kryštalické vápence a v menšej miere aj tret'ohorný čadič, ktorý má význam pre utváranie reliéfu a vegetácie. Na južnom okraji je fundament prekrytý rôznymi sedimentami mladšieho geologického veku- podkrkonošský permokrabon (KRNAP, 2010b).

Pedológia: Kvalitu krkonošských pôd ovplyvňuje hlavne kyslé, minerálne nedostačujúce geologické podložie a chladné, vlhké klíma. Väčšina pôd je kyslá. V najnižších polohách nájdeme hnedé lesné pôdy, vyššie prevažujú humusové a rašelinné podzoly. Na odkryvoch vápencov sú vzácne vyvinuté rendziny a na najvyšších vrcholoch prevládajú kamenité a plytké alpínske pôdy. Pozdĺž vodných tokov nájdeme fluvizeme- nívne a glejové pôdy. Na lesných a subarktických náhorných plošinách sa vyskytujú rašelinné pôdy (mocnosť 2-3m) (KRNAP, 2010c)

Vodopis: Pramenia tu dve stredoeurópsky významné rieky. Prvou je Labe, ktorá sa vlieva do Severného mora. Pramení vo výške 1386 m n. m. a jej celková trasa je 1062 km. Druhá dôležitá rieka je Odra vlievajúca sa do Baltského mora. Na dve povodia ich rozdeľuje

Slezský chrbát. Riečna sieť ma stromovité usporiadanie a pôvodom siaha do treťohôr. Pre krkonošské toky je charakteristický ich prudký a nevyrovnaný pozdĺžny profil, kde nájdeme úseky s vyšším aj nižším sklonom. Na českej strane tvorí riečnu sieť cez 140 vodných tokov, z ktorých sú najväčšie Jizera, Jizerka, Mumlava, Labe, Bílé Labe, Malé Labe a Úpa. Na poľskej strane nájdeme iba 31 vodných tokov a medzi hlavné patria Kamienna, Podgórna, Jedlica, či iné (KRNAP, 2010d).

Vegetačný pokryv: Striedajú sa pásma zalesnené, územia trvale poľnohospodársky obhospodarované, sídla a osady, a vo vyšších nadmorských výškach sa vyskytuje pomerne špecifická krajina nad hranicou lesa (hranica cca v 1300 m n. m.). Tu nájdeme už len kosodreviny (napr. borovicové), kry a bylinné poschodie, teda drobné kríčky, ako napr. brusnice, čučoriedky a vresy. Vo vyšších pásmach vegetačný pokryv už nemusí byť súvislý a často sa strieda s balvanmi či sutinou. Takým príkladom môže byť samotná Sněžka (Pilous, 2007b).



Obr. 4: Krkonošský národní park v České republice (Prevzaté z Kujovská, 2018)

## 3.2 Zber a príprava dát

### ICESat-2

Nasnímané dáta sety vesmírnou družicou ICESat-2 sú voľne dostupné na stránkach Earthdata.nasa (2020). V tejto práci bol použitý produkt ATL08, stiahnutý vo formáte h5 a následne v programe ArcMap spracované do tabuľky. Atribúty, s ktorými sa ďalej pracovalo boli:

NIGHT- hodnota 0 =deň a hodnota 1= noc

SNOW- je rovnaký ako pre produkt ATL09, 0= vodná plocha bez ľadu, 1= krajina bez ľadu a snehu , 2= sneh, 3= ľad

CANOPY- výška vegetačného pokryvu

TER\_BEST- najvhodnejšia výška každého 100x12 m segmentu v jeho strede

SUBSET- 5 subsegmentov každého nameraného pásu (5x 20m)

BEAM- rozdelenie 6 laserových lúčov do troch párov, snímajú GT (Ground Track), označujú sa ako GT1l, GT2l a GT3l (ľavé sú silné lúče) a GT1r, GT2r a GT3r (pravé sú slabé lúče)

Vybrané atribúty v tabuľke dbf. boli konvertované do textového súboru csv. a prenesené do tabuľkového editora Excel pre následné spracovanie. Dáta sú distribuované a spracované v koordinačnom systéme WGS84 (elipsoidická výška) (Neuenschwander et Pitts, 2021).

### DTM KRNAP

Digitálny model terénu Krkonošského národného parku bol poskytnutý katedrou geoprostorových vied ČZU (FŽP). Tento model bol použitý ako referenčne správny pre zisťovanie odchýliek meraní satelitu ICESat-2. Namerané nadmorské výšky sú ortometrické, a teda namerané od geoidu. Rozlíšenie dát je 1 x 1 m.

### GEOID ČR ČÚZK

Keďže dáta rastru DTM KRNAP sú ortometrické a dáta ICESat-2 (prelety satelitu nad KRNAPom) sú elipsoidické, bolo treba ich zjednotiť na jednu referenčnú výšku. Pre tento úkon bol použitý kvazigeoid ČÚZK, ktorého hodnoty boli pričítane k rastru DTM KRNAP. Následne bolo možné takto upravené dáta ďalej spracovávať. Kvazigeoid ČÚZK je voľne dostupný (ČÚZK, 2014).

### 3.3 Prvotné spracovanie dát

Počiatkové dáta zo satelitu ICESat-2 boli už obdržané pre vybrané záujmové územie Krkonošského národného parku, takže nebolo potrebné ich nijako predbežne spracovať. K týmto bodom bolo potrebné zistiť referenčne správne hodnoty z rastru územia (DTM KRNAP). V programe ArcMap bol použitý nástroj EXTRACT VALUES TO POINTS, ktorý podľa súradníc bodov získaných satelitom extrahoval výšku z rastru územia pre každý bod. Touto operáciu vznikol v atribútovej tabuľke nový stĺpec RASTERVALUE, ktorý obsahoval nadmorskú výšku bodu v danom riadku tabuľky. Tieto body mali ortometrickú výšku, preto museli byť upravené, aby mohli byť porovnané s bodmi s elipsoidickou výškou. Z toho dôvodu boli rovnakým postupom extrahované body z kvazigeoidu ČÚZK. Novovzniknutý stĺpec RASTERVALUE obsahoval výšky, ktoré museli byť pripočítané k výškam z rastru DTM, čím boli získané odpovedajúce referenčné výšky bodov nasnímaných satelitom. Vzniknuté dve atribútové tabuľky v formáte dbf. sa exportovali a následne konvertovali do textového súboru csv. Textový súbor so všetkými potrebnými údajmi pre analýzu odchýliek bolo možné importovať do tabuľkového editora Excel.

### 3.4 Validácia vertikálnej presnosti nameraných dát

#### 3.4.1 Metriky chybovosti

Spracovanie a hodnotenie všetkých dát z ICESatu-2 na území Krkonošského národného parku prebiehalo v prostredí tabuľkového editora Excel. Vďaka jeho obsiahlym funkciám a komplexnosti sa vedelo spracovať celkovo 18 746 nasnímaných bodov. Boli vypočítané metriky ako napr. stredná chyba (z angličtiny Mean Error, ďalej už len ako ME), stredná kvadratická chyba (z angličtiny Root Mean Squared Error, ďalej už len ako RMSE) a stredná absolútna chyba (z angličtiny Mean Absolut Error, ďalej už len ako MAE) .

ME- Stredná chyba sa vypočíta ako suma všetkých hodnôt vydelená počtom hodnôt. Moc často sa ale stredná chyba nepoužíva, pretože výsledok môže byť skreslený a v prípade rovnomerných odchýliek do záporných a kladných hodnôt môže vyjsť falošne dobrý výsledok.

Je použitý vzorec:

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



RMSE- Stredná kvadratická chyba sa vypočíta ako suma kvadratických rozdielov hodnôt, vydelená počtom hodnôt a nakoniec sa odmocní. Je jedna z presnejších metód merania chýb, pretože vo výsledku zvýrazní okrem vysokých odchýliek, aj tie menšie.

Je použitý vzorec:

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

MAE- Stredná absolútna chyba je vypočítaná ako suma absolútnych hodnôt rozdielu meranej hodnoty od referenčnej, vydelená celkovým počtom hodnôt. Je spoľahlivejšia ako ME, pretože vďaka absolútnym hodnotám sa nemôžu chyby navzájom negovať. Oproti RMSE ale neukazuje menšie odchýlky tak dobre.

Je použitý vzorec:

$$MAE = \frac{\sum |x - y|}{n}$$

Pri všetkých troch vzorcoch platí, že  $x$  = namerané hodnoty zo satelitu ICESat-2 a  $y$  = raster DTM KRNAP s pripočítanou hodnotou kvazigeoidu ČÚZK.

### 3.4.2 Grafické znázornenie

Histogram- Je stĺpcový diagram, ktorý znázorňuje na ose  $x$  dĺžku intervalu a na ose  $y$  množstvo hodnôt spadajúcich do daného intervalu. Je ľahko interpretovateľný vďaka zoskupeným hodnotám v definovaných intervaloch. Podľa situovania stĺpcov histogramu voči 0 sa dá jednoducho odvodiť, či majú odchýlky kladnú alebo zápornú povahu. Taktiež sa dá určiť približný interval chýb meraní podľa šírky histogramu.

Korelačný diagram- Inak nazývaný ako identity line alebo 1:1 (one to one) line plot. Graficky znázorňuje odchýlky kladných aj záporných hodnôt. Pri ideálnych hodnotách by výsledný graf mal tvar  $x=y$ . Zvykom je funkciu  $x=y$  v grafe zaznačiť čiarou, pričom sú od nej odchýlky vizuálne čitateľné (zaznačené bodmi). Ak sa tieto body nachádzajú pod čiarou v pravej časti grafu, hodnoty sú podhodnotené, a ak sa body nachádzajú v ľavej časti grafu nad čiarou, hodnoty sú nadhodnotené.

### 3.4.3 Druhotné spracovanie v tabuľkovom editore Excel

Po importovaní dát z csv. textových súborov sa vypočítali pre celý set hodnôt všetky tri metriky (ME, RMSE a MAE) a vykreslil histogram a korelačný diagram. Následne sa pomocou funkcie Filter vybrali validné riadky pre konkrétne hodnoty atribútov. Pre tieto atribúty sa vytvorili nové listy, kde sa ďalej spracovávali podobným spôsobom ako pôvodný celý set. Všetky atribúty nadobúdali diskkrétne hodnoty, čo znamená, že mohli obsahovať hodnoty iba z definovanej množiny.

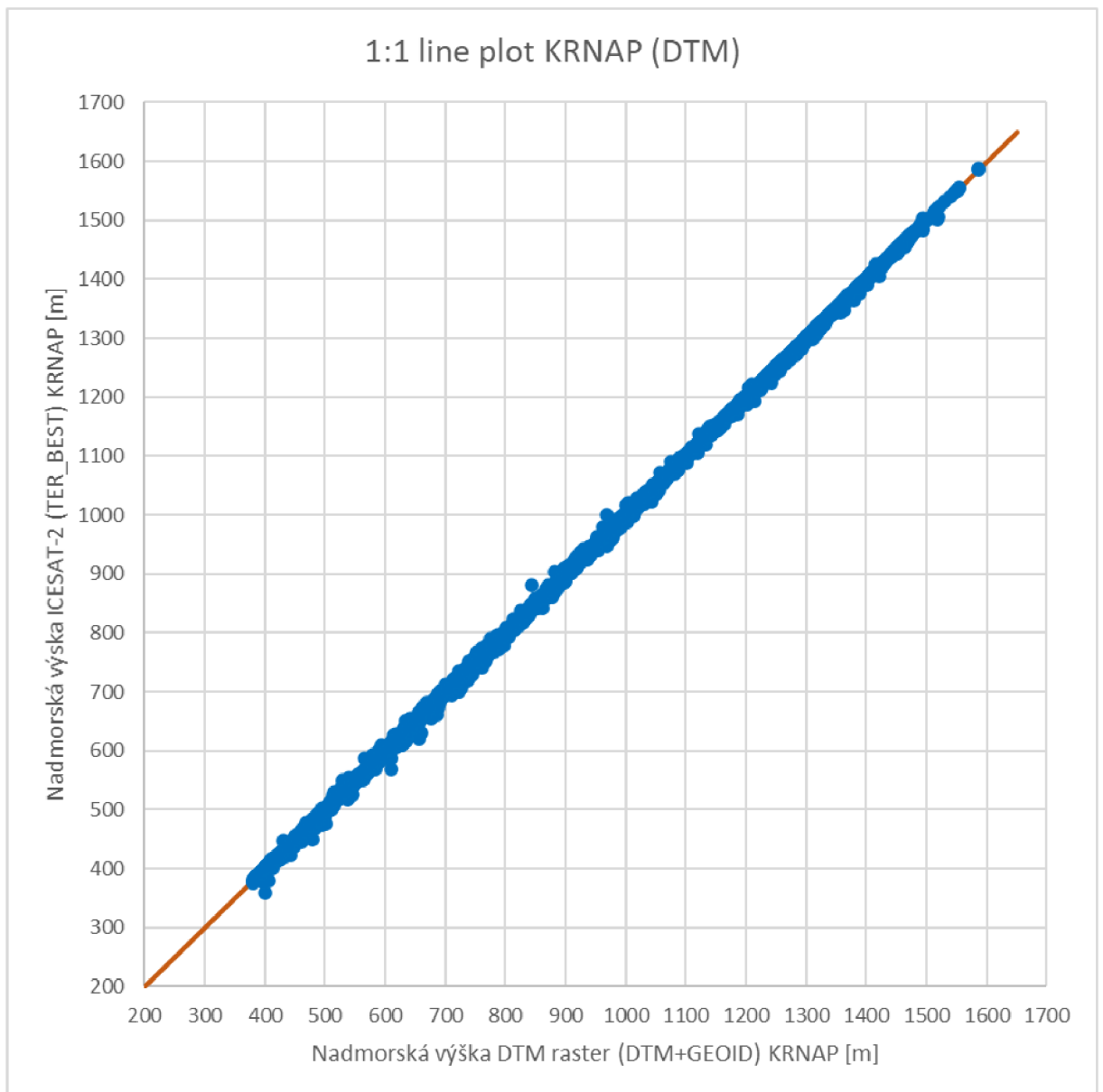
Výnimkou bol atribút CANOPY, ktorý obsahoval hodnoty spojité, preto bol pre jeho znázornenie použitý graf závislosti veľkosti chyby na výške vegetácie. Tento graf bol preložený trendovou funkciou.

Atribúty, ktorých odchýlky boli výraznejšie, boli navzájom kombinované, aby sa zistilo, či je chyba spôsobená konkrétnym atribútom, alebo kombináciou viacerých. Pre tieto kombinácie boli znovu vytvorené nové listy s filtrovanými dátami podľa daných atribútov. Následne boli spracované danými metrikami ME, RMSE, MAE a vykreslené do grafov.

Opísaným postupom vzniklo množstvo číselných a grafických výstupov, ktoré sú interpretované v nasledujúcej kapitole

## 4 Výsledky a diskusia

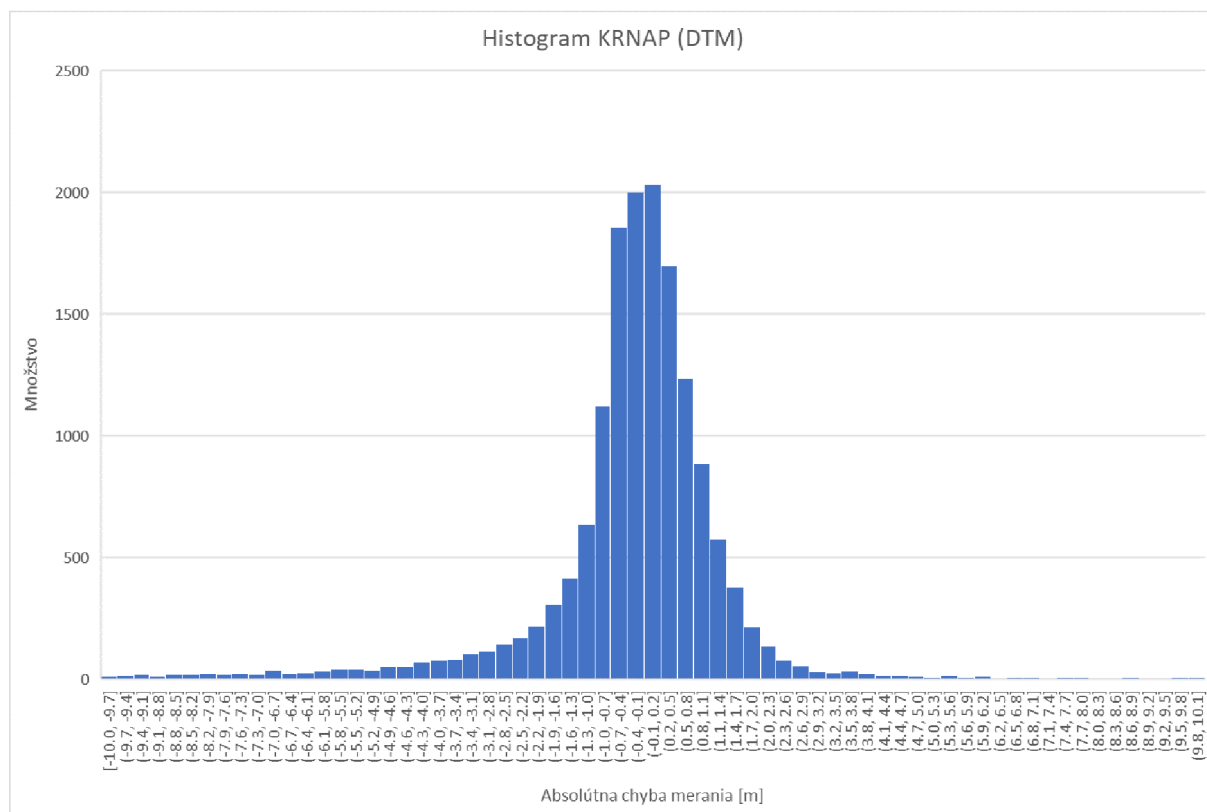
V tejto práci sa pracovalo s celkovým počtom hodnôt 18 746. V každom výpočte bol ale celkový počet hodnôt upravený, pretože niektoré dáta boli invalidné, či extrémne a následne odstránené. Väčšina operácií bola uskutočnená so základným počtom hodnôt 15 492.



Obrázok 5: Korelačný diagram všetkých vstupných dát

Prvý korelačný diagram na obrázku 5 ukazuje odchýlky meraných hodnôt od referenčnej. Osa x reprezentuje referenčne správne hodnoty extrahované z rastru a následne upravené na elipsoidickú výšku pomocou kvazigeoidu. Osa y reprezentuje merané hodnoty nadmorskej výšky vo vzťahu k elipsoidu. Oranžová čiara ukazuje, ako by vyzeral graf, keby boli odchýlky nulové. Modré body reprezentujú chyby jednotlivých meraní. Pokiaľ je bod

napravo pod čiarou, jedná sa o zápornú odchýlku, čo znamená, že nameraná hodnota bola menšia ako skutočná hodnota nadmorskej výšky. Pokiaľ je bod naľavo nad čiarou, znamená to, že nameraná hodnota bola väčšia ako skutočná hodnota nadmorskej výšky. Z grafu je zrejmé, že chyby meraných hodnôt neboli obzvlášť veľké a väčšina bodov sa nachádza v bezprostrednej blízkosti ideálnej hodnoty.



Obrázok 6: Histogram absolútnej chyby merania všetkých dát

V histogramovom vykreslení na obrázku 6 bolo odstránených 181 extrémnych hodnôt nachádzajúcich sa ďaleko od 0, vo všetkých ďalších výpočtoch sa pracovalo aj s týmito extrémnymi hodnotami. Celkové odchýlky meraní sú: ME -0,41 m, MAE 1,22 m a RMSE 2,46 m, ktoré sú viditeľné v tabuľke 1.

Pri odstránení rovnakého počtu najväčších kladných a záporných odchýlok je zrejmé, že sa interval, do ktorého vypočítané chyby meraní spadajú, rýchlo znižuje. To napovedá, že v meraných dátach sa vyskytujú výrazné extrémny, a to ako v kladných, tak aj v záporných hodnotách. Ako je viditeľné nižšie z tabuľky 1, najväčší záporný extrém je -42,64 m a najväčší kladný extrém je 37,32 m. Už pri rovnomernom odstránení jedného percenta najväčších odchýlok sa tento interval hodnôt zmenší na -12,62 m až 7,93 m. Pri rovnomernom odstránení piatich percent najväčších odchýlok je interval od -6,11 m do 2,35

m. Rovnako však približne 95% všetkých hodnôt spadá do intervalu [-5;-5]. Tabuľka 2 ukazuje pri rovnomernom odstránení dvadsiatich percent najväčších a najmenších odchýliek sa dokonca interval zmenší na -2,01 m až 1,13 m, a až skoro 68% všetkých hodnôt bez približne jednej stotiny percenta) spadá do intervalu [-1;1]. Stredná chyba ME vychádza aj pri odstránení 50 percent najväčších kladných a záporných odchýliek stále záporná. To znamená, že aj pri odstránení extrémov je povaha dát skôr záporná a teda satelit ICESat-2 má tendenciu merania podhodnocovať.

	100%	99%	95%	90%	80%	50%
Počet	15492,00	15337,08	14717,40	13942,80	12393,60	7746,00
Min. od. [m]	-42,64	-12,62	-6,11	-3,75	-2,01	-0,79
Max. od. [m]	37,32	7,92	2,35	1,64	1,13	0,45
ME [m]	-0,41	-0,39	-0,31	-0,25	-0,19	-0,17
MAE [m]	1,22	1,08	0,87	0,73	0,57	0,32
RMSE [m]	2,46	1,84	1,28	0,99	0,71	0,38

Tabuľka 1: Metriky všetkých dát

Interval	[-5:5]	[-4:4]	[-3:3]	[-2:2]	[-1:1]
Počet	14826	14599	14214	13410	10533
%	95,70	94,24	91,75	86,56	67,99
ME [m]	-0,20	-0,16	-0,12	-0,07	-0,06
MAE [m]	0,87	0,81	0,74	0,64	0,43
RMSE [m]	1,23	1,11	0,97	0,80	0,51

Tabuľka 2: Intervalové rozloženie hodnôt všetkých dát

Chybovosť atribútov sa počítala pomocou metrick ME, MAE a RMSE. Celková chyba merania dát vyšla pre ME -0,41 m, pre MAE 1,22 m a pre RMSE 2,46 m. Práca Amy Neuenschwander (2020) sa tak isto zaoberala rovnakou problematikou, teda s vyhodnocovaním presnosti laserového merania družice ICESat-2. Zber dát prebiehal vo Fínsku, a preto ich odchýlka by mohla byť menšia. Výsledok strednej kvadratickej chyby pre dáta zozbierané v Krkonošskom národnom parku je výrazne väčší. RMSE v spomínanej práci z Fínska vyšla 0,73 m, čo je približne trikrát menej ako v tejto bakalárske práci (2,46 m). Mohlo by to byť vplyvom dlhej noci a zasneženého terénu, kedy satelit sníma s väčšou presnosťou. ME sa približne zhoduje v oboch prácach, kde v predošlej štúdií bola -0,07 m a v tejto práci -0,41 m. To potvrdzuje, že vesmírny satelit ICESat-2 namerané dáta skutočne podhodnocuje. Taktiež v jednej z prvých štúdií, ktorá sa vôbec venovala hodnoteniu dát zo satelitného snímača ICESat-2 voči lidarovým dátam z lietadla, bola uvedená metrika RMSE 0,85 m (Neuenschwander et Magruder, 2019). Dôležitosťou týchto meraní a ich odchýliek

sa zaoberal aj Liu (2021) vo svojej práci, kde zistil RMSE 2,24 m v 40 rôznych oblastiach naprieč vnútrozemím Ameriky, Aljašky a Havaju.

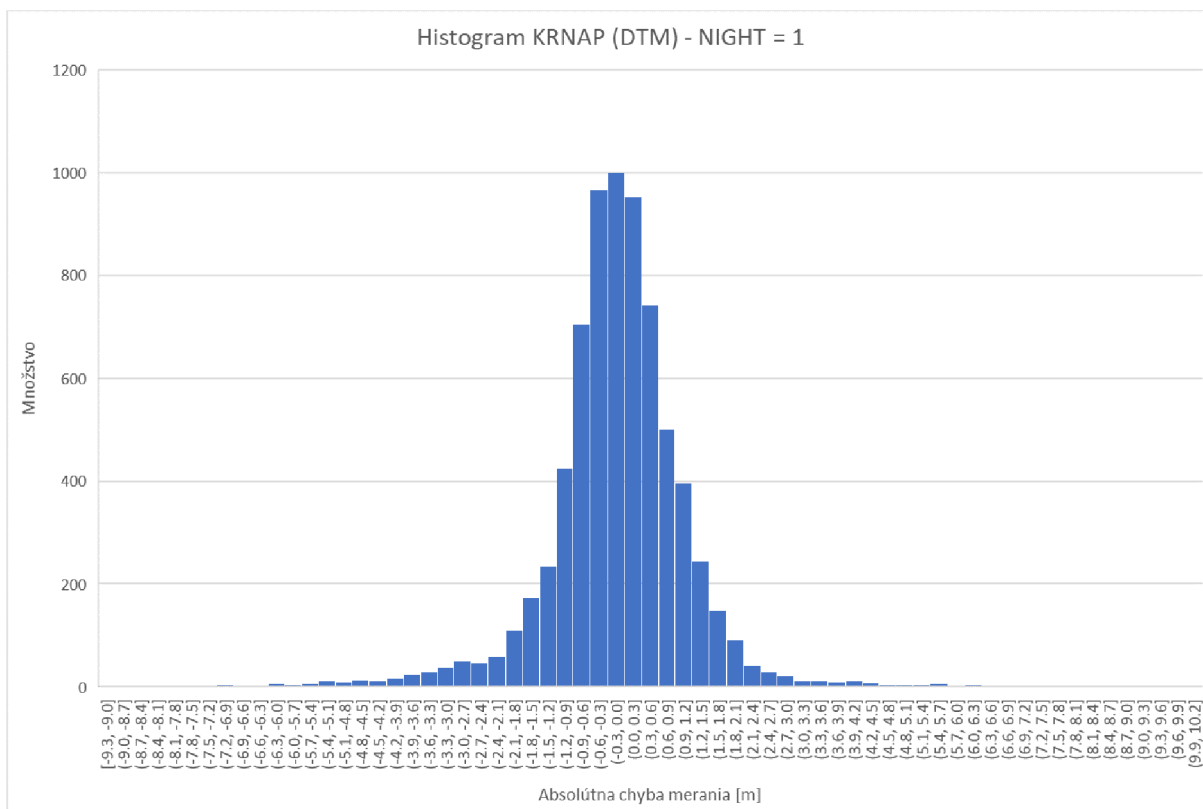
Vo všeobecnosti by sa dalo zhodnotiť, že pre všetky počítané atribúty boli vypočítané metriky v rozsahoch:

- pre ME -0,85 m až -0,10 m
- pre MAE 0,93 m až 1,70 m
- pre RMSE 1,76 m až 3,20 m

Malambo (2021) deklaroval vo svojej štúdií taktiež ME 0,18 m a MEA 1,20 m, čo sú veľmi podobné výsledky.

#### 4.1 **Atribút NIGHT**

Pri výpočtoch s atribútom NIGHT sa počítalo celkovo so 7243 hodnotami. Na histogramovom zobrazení na obrázku 7 bolo odobraných dokopy 28 extrémnych hodnôt (kladné aj záporné). Najväčší záporný extrém pri laserovom meraní v noci je -42,64 m a najväčší kladný extrém je 32,58 m. V tabuľke 3 je možné pozorovať, že pri postupnom percentuálnom odstraňovaní extrémnych kladných aj záporných hodnôt, sa metriky postupne približujú 0. Satelit pri meraní v noci má tendenciu hodnoty skôr nadhodnocovať. Celkové odchýlky meraní sú: ME -0,10 m, MAE 0,93 m, RMSE 1,76 m.



Obrázok 7: MAE pre laserové meranie v noci

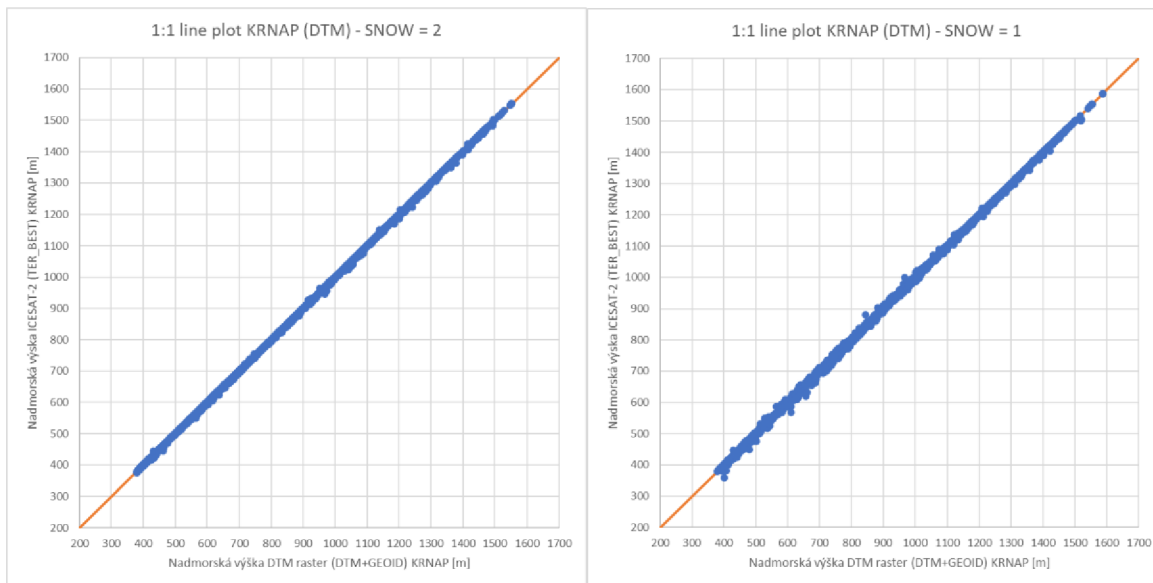
NIGHT = 1	100%	99%	95%	90%	80%	50%
Počet	7243	7170,57	6880,85	6518,7	5794,4	3621,5
Min. odchýlka [m]	-42,64	-6,00	-3,08	-2,06	-1,35	-0,64
Max. odchýlka [m]	32,58	6,06	2,29	1,67	1,19	0,51
ME [m]	-0,10	-0,09	-0,09	-0,07	-0,07	-0,08
MAE [m]	0,93	0,83	0,70	0,62	0,50	0,28
RMSE [m]	1,76	1,19	0,91	0,77	0,61	0,33

Tabuľka 3: Metriky atr. NIGHT=1

Atribút NIGHT=0, čo znamená, že laserové meranie prebiehalo cez deň má chybovosť o niečo väčšiu, ako to, ktoré prebehlo v noci. Počet hodnôt s ktorými sa pracovalo je 8249. ME síce vyšlo iba -0,69 m, no MAE vyšlo 1,48 m, a RMSE 2,94 m ako je parné z tabuľky 4. Snímanie počas dňa bolo teda nadhodnotené.

## 4.2 Atribút SNOW

V atribúte SNOW sa celkovo pracovalo s 3883 hodnotami. Najväčší záporný extrém bol -20,99 m a najväčší kladný extrém 13,39 m. V tabuľke 4 je možné sledovať metriky a ich približovanie sa k 0 postupným odoberaním (percentuálnym) extrémnych hodnôt. Odchýlky vyšli: ME -0,34 m, MAE 1,14 a RMSE 2,09 m. Na obrázku 8 a 9 korelačného diagramu je porovnanie meraní terénu so snehom a bez neho.



Obrázok 8 a 9: Korelačný diagram merania terénu so snehom a bez snehu.

<b>SNOW = 2</b>	<b>100%</b>	<b>99%</b>	<b>95%</b>	<b>90%</b>	<b>80%</b>	<b>50%</b>
Počet	3883	3844,17	3688,85	3494,7	3106,4	1941,5
Min. odchýlka [m]	-20,99	-10,93	-6,12	-3,76	-1,88	-0,69
Max. odchýlka [m]	13,39	3,42	1,99	1,63	1,27	0,59
ME [m]	-0,34	-0,31	-0,21	-0,13	-0,08	-0,06
MAE [m]	1,14	1,04	0,86	0,73	0,57	0,31
RMSE [m]	2,09	1,72	1,26	0,97	0,70	0,36

Tabuľka 4: Metriky atr. SNOW=2 (terén so snehom)

<b>SNOW = 1</b>	<b>100%</b>	<b>99%</b>	<b>95%</b>	<b>90%</b>	<b>80%</b>	<b>50%</b>
Počet	11609	11492,91	11028,55	10448,1	9287,2	5804,5
Min. odchýlka [m]	-42,64	-13,41	-6,11	-3,75	-2,06	-0,82
Max. odchýlka [m]	37,32	8,77	2,61	1,65	1,07	0,40
ME [m]	-0,44	-0,41	-0,34	-0,29	-0,23	-0,20
MAE [m]	1,25	1,10	0,87	0,73	0,57	0,33
RMSE [m]	2,57	1,90	1,28	0,99	0,72	0,39

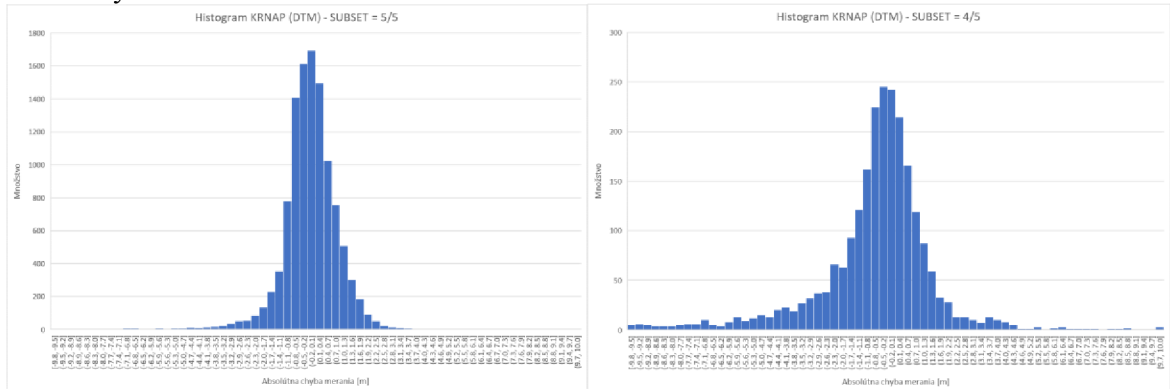
Tabuľka 5: Metriky atr. SNOW= 1 (terén bez snehu)

Pre laserové meranie v teréne, kde nebol sneh, vyšli výsledky o niečo horšie v porovnaní s terénom zasneženým. Najväčší záporný extrém bol -42,64 m a najväčší kladný extrém 37,32 m, viditeľné v tabuľke 5. Z nej taktiež možno vyčítať, že ME vyšiel -0,44 m, MAE 1,25 a RMSE 2,57 m.

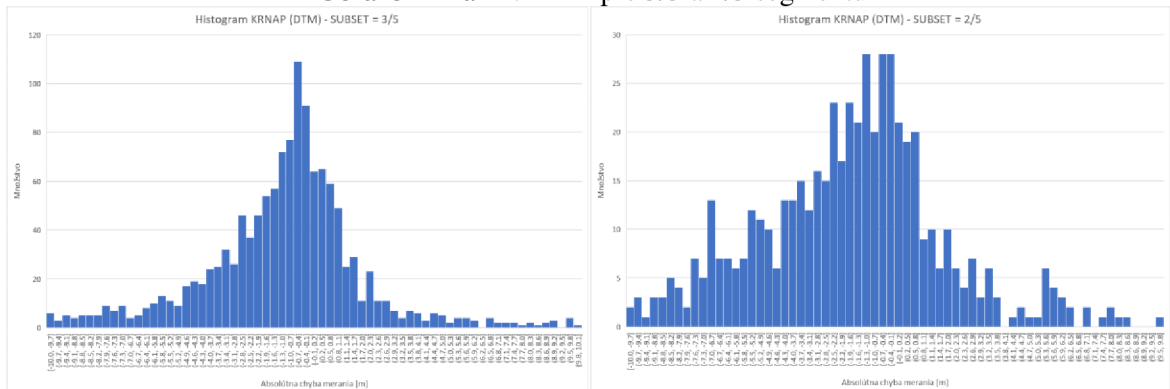


### 4.3 Atribút SUBSET

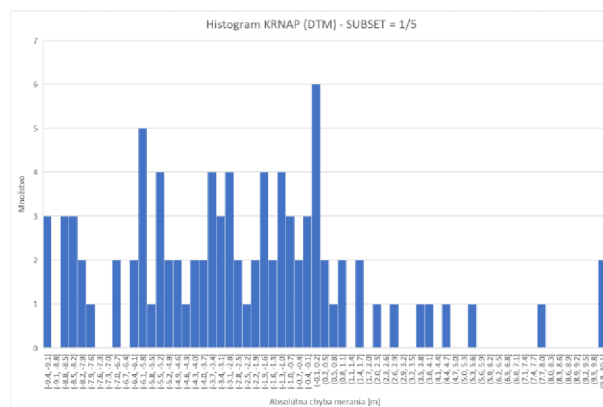
Na histogramoch na obrázkoch 10, 11, 12, 13 a 14 je možné pozorovať postupné ubúdanie relevantnosti meraní satelitu. Už len pri jednom chýbajúcom subsete z celkovo piatich odchýlky začínajú pozorovateľne pribúdať. V tabuľke 6 sú pozorovateľné metriky týchto čiastkových subsetov.



Obrázok 10 a 11: MAE pre 5/5 a 4/5 segmentu



Obrázok 12 a 13: MAE pre 3/5 a 2/5 segmentu



Obrázok 14: MAE pre 1/5 segmentu

SUBSET	5/5 (100 m)	4/5 (80 m)	3/5 (60 m)	2/5 (40 m)	1/5 (20 m)
ME [m]	-0,10	-0,77	-1,45	-2,00	-3,18
MAE [m]	0,75	1,68	2,87	3,82	5,09
RMSE [m]	1,34	2,96	4,66	5,62	7,09

Tabuľka 6: Metriky pre atr. SUBSET a jeho časti

Faktorom ovplyvňujúcim presnosť a zároveň výsledky boli hodnoty atribútu SUBSET. Pre celý vypočítaný 100 m segment, kde sú všetky subsegmenty platné (hodnota 1), boli vypočítané nasledovné metriky: ME -0,10 m, MAE 0,75 m a RMSE 1,34 m. Už len pri neplatnosti jedného subsegmentu z piatich (hodnoty napr. 1 1 1 1 0) sa presnosť merania terénu znížila. Boli vypočítané tieto metriky: ME -0,77 m, MAE 1,68 m a RMSE 2,96 m. Pri postupnom odoberaní subsetov sa presnosť nerovnomerne zhoršovala. Pre 1/5 platných údajov v tomto atribúte bola vypočítaná výrazne horšia presnosť: ME -3,18 m, MAE 5,09 m a RMSE 7,09 m.

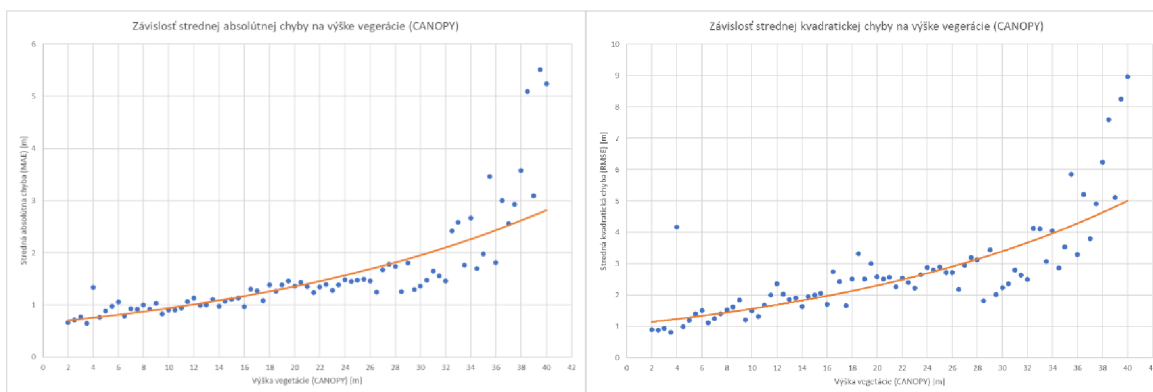
#### 4.4 Atribút BEAM

Odchýlky atribútu BEAM sa približne zhodujú, pokiaľ sa porovnajú z troch párov ľavé (silné) lúče navzájom, a pravé (slabé) lúče navzájom. V tabuľke 7 je vidno absolútnu strednú chybu, ktorá sa pohybuje v rozmedzí od 1,14 m do 1,34 m. Ako uvádza vo svojej práci Jianan Yu (2022), celkový výkon silných lúčov bol lepší ako výkon slabých lúčov, čo sa dá vyvodiť aj z tejto práce (gtxl majú menšiu odchýlku ako gtxr).

BEAM	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]
gt1l	-0,23	1,21	2,35
gt1r	-0,65	1,27	2,58
gt2l	-0,29	1,14	2,37
gt2r	-0,67	1,34	2,80
gt3l	-0,37	1,18	2,25
gt3r	-0,48	1,28	2,58

Tabuľka 7: Metriky 6 laserových lúčov satelitu ICESat-2

#### 4.5 Atribút CANOPY



Obrázok 15 a 16: MAE (naľavo) a RMSE (napravo) pre atr. CANOPY

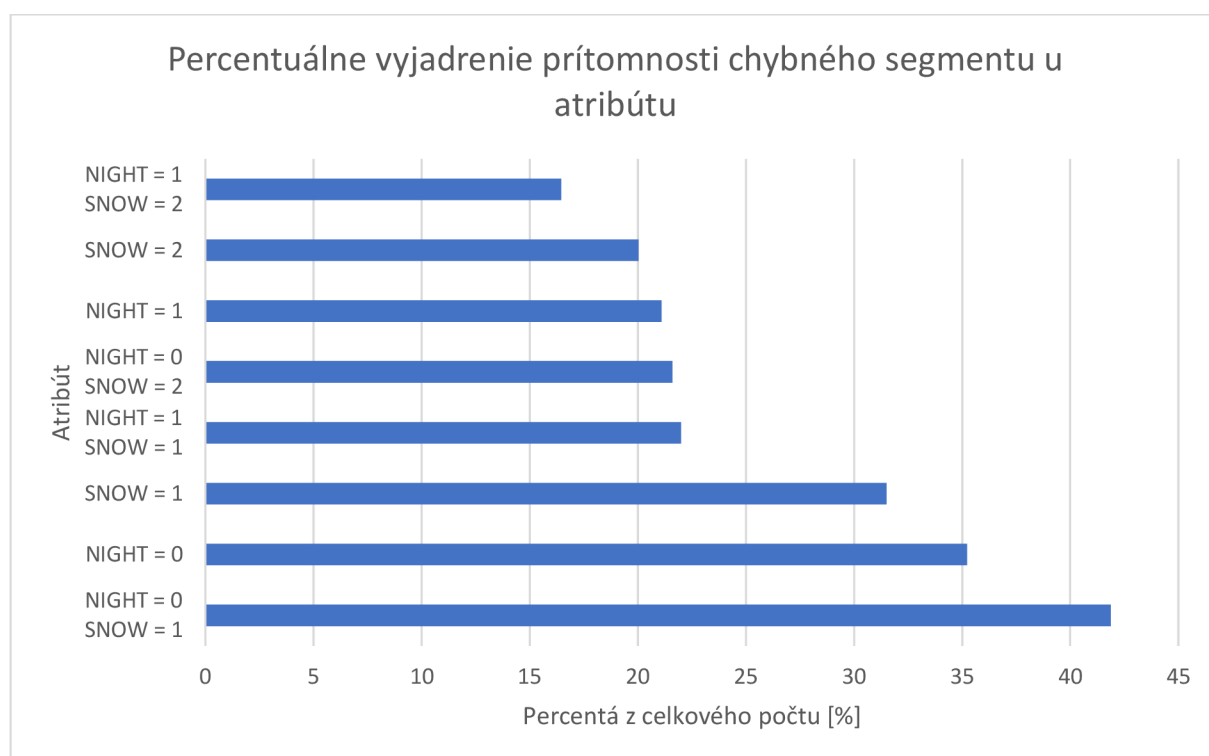
Na obrázkoch 15 a 16 je zobrazená stredná absolútna chyba a stredná kvadratická chyba, pričom RMSE vďaka jej povahe viditeľnejšie interpretuje chyby meraní (body rozložené ďalej od trendovej funkcie). Z oboch korelačných grafov je však zrejmé, že čím vyššia výška vegetácie, tým sú satelitné dáta menej presné.

Z tejto závislosti plynie zistený výsledok, ktorým je, že presnosť merania výšky terénu s narastajúcou výškou vegetácie exponenciálne klesá.

#### 4.6 Kombinácia atribútov

V prípade prvého stĺpca v tabuľke 8 je celkový počet meraných hodnôt (v kombinácií atribútov NIGHT a SNOW) 5545. Z nich až 2322 bolo priemerovaných z nekompletného subsetu. Ako už je známe, neúplné segmenty spôsobujú veľkú odchýlku. Vyplýva z toho že kombinácia týchto atribútov celkovú RMSE pre všetkých 15 492 hodnôt zväčšuje a vnáša do meraní veľkú odchýlku.

Na obrázku 17 je vidno atribúty SNOW a NIGHT, ktoré boli vybrané pre ich najväčšiu chybovosť. Cieľom bolo zistiť a porovnať, aké podmienky meraní najviac ovplyvňovali chybovosť satelitu ICESat-2 v kombinácií s aspoň 1 chybným subsetom.



Obrázok 17: Percentuálne rozloženie kombinácií atribútov s aspoň 1 chýbajúcim subsetom

	NIGHT = 0 SNOW = 1	NIGHT = 0	SNOW = 1	NIGHT = 1 SNOW = 1	NIGHT = 0 SNOW = 2	NIGHT = 1	SNOW = 2	NIGHT = 1 SNOW = 2
Celkový počet meraní	5545	8249	11609	6064	2704	7243	3883	1179
Počet hodnôt s aspoň 1 chýbajúcim segmentom	2322	2906	3656	1334	584	1528	778	194
Hodnoty s aspoň 1 chýbajúcim segmentom (%)	41,88	35,23	31,49	22,00	21,60	21,10	20,04	16,45

Tabuľka 8: Počet meraní a vyjadrenie v % kombinácií atribútov s aspoň 1 chýbajúcim subsetom

Ďalší výsledok bola kombinácia atribútov NIGHT a SNOW, ktoré mali pravdepodobne za následok chybný aspoň 1 segment. Tieto atribúty boli porovnané medzi sebou v niekoľkých kombináciách. Tá, ktorá mala najväčší vplyv na meranie bola NIGHT= 0 (deň) a SNOW= 1 (terén bez snehu a ľadu). Skoro 42% meraní terénu, ktoré boli uskutočnené počas dňa na nezasneženej ploche mali aspoň 1 chybný segment. Satelit ICESat-2 bol primárne vytvorený na diaľkový prieskum zaľadnených a zasnežených plôch, v čom je stále preborníkom, no na nezasnežených vnútrozemských plochách laserové meranie nie je zďaleka také presné, ako by mohlo byť. V práci, kde taktiež porovnávajú kombináciu atribútov NIGHT a SNOW vyšla odchýlka väčšia, keď bolo meranie uskutočnené cez deň a území bez snehu (Neuenschwander, 2020).

## 5 Záver

Táto bakalárska práca sa zaoberala validáciou a hodnotením dátového produktu ATL08 (Land, Water and Vegetation Elevation) satelitu ICESat-2 v oblasti Krkonošského národného parku. Tento set obsahoval informácie o výške terénu a vegetácie, pričom v tejto práci bolo skúmané predovšetkým horské prostredie, kde je konvenčné meranie takmer nemožné. Bolo hodnotených niekoľko atribútov merania a ich kombinácie. Hlavným cieľom bolo zistiť presnosť laserového vesmírneho skenovania pomocou stredných chýb s výsledkom strednej chyby (ME) -0,41 m, strednej absolútnej chyby (MAE) 1,22 m a strednej kvadratickej chyby (RMSE) 2,46 m. Tieto výsledky v porovnaní s predošlými štúdiami potvrdili, že celková povaha dát ATL08 z vesmírneho satelitu má tendenciu hodnoty skôr podhodnocovať. Bolo doručených mnoho grafických zobrazení a tabuliek pre lepšiu interpretáciu výsledných informácií. Pre ďalšie práce so zameraním na snímanie terénu a vegetácie a následné počítanie metrík chybovosti zo satelitu ICESat-2 by táto práca mohla byť prínosná. Vypočítané metriky chybovosti v oblasti Krkonošského národného parku môžu poslúžiť ako dobrý základ pre budúce hodnotenie a validáciu dát dátového produktu ATL08. Zaujímavou prácou by mohlo byť ďalšie skúmanie atribútov tohto produktu, ale predovšetkým ich kombinácie a hodnotenie ich korelácie medzi sebou, a aký vplyv majú tieto kombinácie na presnosť nazbieraných dát z vesmírnej družice ICESat-2.

## Referencie

BALTSAVIAS, Emmanuel, 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing. Zürich, 199-214.

ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA, 1998. Databáze významných geologických lokalit: 2705. Geologické lokality [online]. Praha [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <http://lokality.geology.cz/2705>

ČÚZK, 2014. Geoportál: Podrobný kvazigeoid QGZÚ-2013 [online]. Praha [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(gvpawjf4dlbtgug1ye2mr3o4\)\)/default.aspx?mode=TextMeta&side=bodpole&metadataID=CZ-CUZK-QGZU&menu=275](https://geoportal.cuzk.cz/(S(gvpawjf4dlbtgug1ye2mr3o4))/default.aspx?mode=TextMeta&side=bodpole&metadataID=CZ-CUZK-QGZU&menu=275)

DOLANSKÝ, Tomáš, 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

EARTHDATA, 2020. Open Access For Open Science [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://earthdata.nasa.gov/>

FOULADINEJAD, Fatemeh, 2019. HISTORY AND APPLICATIONS OF SPACE-BORNE LIDARS. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Tehran, (42), 407–414.

GARNER, Rob, ed., 2019. About ICESat-2 [online]. [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/goddard/about-icesat-2>

KACHTÍK, Lukáš, 2011. Princip laseru. Lasery.wz.cz [online]. [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>

KRNAP, 2010a. Geohistorický vývoj Krkonoš. Správa Krkonošského národního parku [online]. Vrchlabí [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/geohistoricky-vyvoj/>

KRNAP, 2010b. Geologie. Správa Krkonošského národního parku [online]. Vrchlabí [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/geologie/>

KRNAP, 2010c. Půdy Krkonoš. Správa Krkonošského národního parku [online]. Vrchlabí [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/pudy-krkonos/>

KRNAP, 2010d. Vodopis. Správa Krkonošského národního parku [online]. Vrchlabí [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/vodopis/>

KUJOVSKÁ, Denisa, 2018. Analýza přesnosti digitálního elevačního modelu TanDEM-X v Krkonoších. Praha. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

LIU, Aobo et al., 2021. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112571.

MALAMBO, Lonesome et Sorin C. POPESCU, 2021. Assessing the agreement of ICESat-2 terrain and canopy height with airborne lidar over US ecozones. *Remote Sensing of Environment*, 266, 112711.

MAŇKOVÁ, Ildikó, 2000. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.

MARKUS, Thorsten, 2017. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*. (190), 260–273.

NASA, 2002. Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite [online]. Greenbelt [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/pdf/162309main\\_ICESat\\_Brochure.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/162309main_ICESat_Brochure.pdf)

NASA, 2019. DATA PRODUCTS. [icesat-2.gsfc.nasa.gov](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov) [online]. [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>

NEUENSCHWANDER, Amy et Lori MAGRUDER, 2019. Canopy and Terrain Height Retrievals with ICESat-2: A First Look. *Remote Sensing* [online]. **11**(14) [cit. 2022-03-20]. DOI: 10.3390/rs11141721. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/14/1721>

NEUENSCHWANDER, Amy et al., 2020. Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests. Elsevier.

NEUENSCHWANDER, Amy et Katherine PITTS, 2021. Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite 2 (ICESat-2): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Land - Vegetation Along-Track Products (ATL08).

PETRIE, Gordon et al, 2008. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing: Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. CRC Press. ISBN 10.1201/9781420051438

PILOUS, Vlastimil, 2007a. Geografické vymezení. FLOUSEK, Jiří, ed., Jiří FLOUSEK. *Krkonoše - příroda, historie, život*. Praha: Baset, s. 13-17. ISBN 978-80-7340-104-7.

PILOUS, Vlastimil, 2007b. Horopis. FLOUSEK, Jiří, ed., *Krkonoše- příroda, historie, život*. Praha: Baset, s. 13-17. ISBN 978-80-7340-104-7.

SHEKHAR, Shashi, 2007. *Encyclopedia of GIS*. Springer Science & Business Media. ISBN 9783319178844.

SITOUR, 2009. GEOLOGIE. *Krkonoše: Oficiální turistické stránky Krkonoš* [online]. [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <http://www.krkonose.eu/cs/geologie>

TENCER, Tomáš, 2012. LiDAR – Pořizování 3D dat [online]. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1421/podzim2012/AEA\\_73/Tencer\\_-\\_LiDAR\\_-\\_Porizovani\\_3D\\_dat.pdf](https://is.muni.cz/el/1421/podzim2012/AEA_73/Tencer_-_LiDAR_-_Porizovani_3D_dat.pdf)



THOMAS, Gary et Richard ISAACS, 2011. Basic principles of lasers. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. (12), 574-577 [cit. 2021-10-09]. DOI: 10.1016/j.mpaic.2011.09.013. ISSN 14720299. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147202991100227X>

WEHR, Aloysius et Uwe LOHR, 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. (54), 68–82. ISSN 0924-2716.

YU, Jianan et al, 2022. Accuracy Assessment of ICESat-2 Ground Elevation and Canopy Height Estimates in Mangroves. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*. (19). ISSN 1558-0571.