

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY  
A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

**Posouzení kvality dat z ICESat-2  
v horském prostředí**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

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

Bakalant: Eliška Šárovcová

2020

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Eliška Šárovcová

Environmentální vědy  
Aplikovaná ekologie

Název práce

**Posouzení kvality dat z ICESat-2 v horském prostředí**

Název anglicky

**Assessment of ICESat-2 performance in mountain environment**

---

### Cíle práce

Cílem práce je posoudit kvalitu dat získaných z laserového měření satelitu ICESat-2 v horském prostředí. Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

### Metodika

Digitální terenní modely a struktura vegetace jsou zásadním vstupem v mnoha odvětvích environmentálního modelování (např. hydrologie, modelování druhové distribuce, odhad biomasy). V současné době lze tvar terénu a strukturu vegetace získávat různými metodami dálkového průzkumu Země, nicméně v globálním měřítku jsou možnosti získání přesných informací limitované. Existující nedostatky ve znalosti terénu a struktury vegetace má částečně zaplnit nedávná mise NASA ICESat-2. Autorka se v literární rešerši zaměří na problematiku laserového měření a to zejména na možnosti měření ze satelitů jako je ICESat-2. Data získaná lasery umístěnými na palubě ICESat-2 porovná s daty leteckého laserového skenování ve vybrané horské oblasti a vyhodnotí, které parametry mají vliv na přesnost měření.

**Doporučený rozsah práce**

30 stran

**Klíčová slova**

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

---

**Doporučené zdroje informací**

- Abdalati, W., Zwally, H.J., Bindschadler, R., Csatho, B., Farrell, S.L., Fricker, H.A., Harding, D., Kwok, R., Lefsky, M., Markus, T. and Marshak, A., 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), pp.735-751.
- Fricker, H.A., Borsa, A., Minster, B., Carabajal, C., Quinn, K. and Bills, B., 2005. Assessment of ICESat performance at the salar de Uyuni, Bolivia. *Geophysical Research Letters*, 32(21).
- Neuenschwander, A.L. and Magruder, L.A., 2019. Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look. *Remote Sensing*, 11(14), p.1721.
- Popescu, S.C., Zhou, T., Nelson, R., Neuenschwander, A., Sheridan, R., Narine, L. and Walsh, K.M., 2018. Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 208, pp.154-170.
- Wang, C., Zhu, X., Nie, S., Xi, X., Li, D., Zheng, W. and Chen, S., 2019. Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA. *Optics Express*, 27(26), pp.38168-38179.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2019/20 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2020

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2020

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2020

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Posouzení kvality dat z ICESat-2 v horském prostředí vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, 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 vědoma, 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 autorky práce

### **Poděkování**

Tímto děkuji vedoucímu práce Vítězslavu Moudrému za odborné vedení, věcné připomínky, ochotu, trpělivost a čas, které mi při psaní věnoval.

## **Abstrakt**

Tato práce se jako jedna z prvních zabývá evaluací přesnosti nově vzniklé datové sady družice ICESat-2, vypuštěné v září roku 2018 NASA za účelem mapování možnosti ledovců, terénu a jiných atributů Zemského povrchu. Posuzována byla přesnost jejích měření výšky terénu v horském prostředí – na německé straně Krušných hor a na české i polské straně Krkonoš – k tomu byl použit datový produkt ATL08 obsahující výšky terénu a vegetace. Cílem bylo posoudit, je-li tato vertikální přesnost blízká hodnotám očekávaným na základě první studie, která se daty ATL08 zabývala (RMSE 0,85 m) a odvodit, na kterých faktorech je nejvíce závislá. Byly vybrány tři environmentální proměnné (svažitost, orientace ke světovým stranám a zalesnění), jejichž vliv na přesnost měření byl zkoumán – měření byla rozřazena do kategorií jednotlivých charakteristik prostředí a pro každou z nich byly počítány metriky chyb. Jako referenční hodnoty k měření ICESat-2 byly použity digitální modely terénu zájmových území získané leteckým laserovým skenováním. Pro vyhodnocení přesnosti byly použity metriky ME a RMSE. Ve výrazně diverzifikovaném prostředí Krkonoš vyšly hodnoty těchto chyb -0,03 m a 3,95 m. V Krušných horách, které jsou homogennější, byla přesnost měření družice vyšší (ME -0,10 m a RMSE 2,06 m). Nejvlivnější proměnnou prostředí se ukázala být svažitost, po ní mělo největší vliv zalesnění a téměř žádný vliv neměla orientace svahů ke světovým stranám. Významnou roli navíc hrála kombinace těchto aspektů. Přesnost měření ICESat-2 na zájmových územích dle této práce koreponduje s výsledky jiných podobně zaměřených studií. Přesnější popis a kvantifikace vnějších vlivů na přesnost měření je k dalšímu prostudování.

**Klíčová slova:** Letecké laserové skenování, satelitní LiDAR, Krkonoše, Krušné hory

## **Abstract**

This thesis deals with verification of the accuracy of new dataset originated from measurements of satellite ICESat-2 launched in September 2018 by NASA. Mission ICESat-2 is meant to map the thickness of glaciers, the elevation of the terrain and other attributes of Earth's surface. To evaluate the accuracy of measurements of terrain in a mountain environment (on the German side of Ore Mountains and both Czech and Polish sides of Giant Mountains) data product ATL08 consisting of terrain and canopy elevations was used. The objective was to assess if the achieved vertical accuracy is similar to expected values based on the first study following up ATL08 dataset (RMSE 0,85 m) and to deduce on which variables the accuracy most depends. Three environmental factors (slope, aspect and afforestation) were chosen and their influence on the measurements was investigated. All of the measurements were individually sorted out to categories of environmental variables, and out of these categories were calculated error metrics. Digital terrain models obtained by airborne lidar scanning were used as reference values and ME and RMSE metrics were used for evaluation of accuracy. In a substantially diversified environment of Giant Mountains the error values were equal to -0,03 and 3,95 m, respectively. In more homogeneous Ore Mountains the measurements of ICESat-2 were more accurate (ME -0,10 m and RMSE 2,06 m). The most influential variable of the environment turned out to be slope, the next most influential was afforestation, and the least seminal was aspect. This thesis shows that the combination of the three factors mentioned above has a big impact on the accuracy as well. The outcome of this work corresponds with the results of other similarly focused studies. More precise description and quantification of external influence are to be studied further.

**Keywords:** Airborne Laser Scanning, satellite LiDAR, Giant Mountains, Ore Mountains

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce .....	2
3. Literární rešerše .....	3
3.1 Laser.....	3
3.2 Tvorba profilu terénu laserem, laserové měření vzdálenosti a laserové skenování .....	6
3.2.1 Letecké laserové skenování a součásti laserového skeneru .....	7
3.2.2 Pozemní laserové skenování.....	10
3.3 Satelitní LiDAR – mise ICESat .....	11
3.3.1 ICESat .....	11
3.3.2 ICESat-2 .....	11
4. Metodika .....	16
4.1 Zájmová území.....	16
4.1.1 Krkonoše .....	16
4.1.2 Krušné hory .....	18
4.2 Sběr a příprava dat .....	20
4.3 Zpracování dat.....	22
4.4 Evaluace vertikální přesnosti .....	24
4.5 Vliv charakteristik prostředí na přesnost měření ICESat-2.....	24
4.5.1 Orientace .....	24
4.5.2 Svažitost .....	25
4.5.3 Zalesnění .....	26
5. Výsledky .....	28
5.1 RMSE a ME .....	28
5.2 Zalesnění .....	29
5.2.1 Zalesněná plocha .....	30
5.2.2 Bezlesí .....	31
5.3 Orientace .....	32
5.4 Svažitost.....	35
6. Diskuze .....	39
7. Závěr .....	43
Reference.....	44



## 1. Úvod

V poslední době dochází ke značnému rozmachu technologií dálkového průzkumu Země, což přináší velké množství nově vznikajících datových sad. Přestože mise bývají důkladně připravovány a simulovány, je vhodné ověřit přesnost jejich měření i v reálném provozu, aby bylo zaručeno, že data, která z jejich měření vznikají, budou pro naplnění cílů výzkumu dostatečně přesná. Mezi nejnovější z těchto misí se řadí ICESat-2 od Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (NASA).

V souvislosti s klimatickými změnami dochází k výraznému odtávání ledovců. Především z tohoto důvodu vypustila NASA svou první družici ICESat, jejímž cílem bylo mezi lety 2003 a 2010 tyto změny v mocnosti a objemu ledovců sledovat prostřednictvím satelitního laserového snímání terénu. V průběhu mise vyšlo najevo, že data získaná tímto pozorováním zachycují celý svět v dostatečné míře na to, aby bylo možné je rozsáhle využít i v mnoha dalších oborech. Osm let po skončení první mise ICESat vypustila NASA jejího nástupce – družici ICESat-2. Ta je vybavena novým systémem laseru a její měření by měla být schopna poskytnout výrazně přesnější výsledky pozorování. Plánovaná délka celé mise jsou 3 roky a během této doby by z naměřených dat měly vzniknout mnohé datové produkty sestávající z údajů nejen o výškách terénu ale i o výškách vegetace, oceánů nebo například vnitrozemských toků.

Tato práce se zabývá evaluací těchto nově dostupných dat, konkrétně zhodnocením přesnosti výšek terénu, které jsou vedle výšek vegetace součástí datového produktu ATL08. Pro tuto evaluaci byla vybrána dvě vertikálně členitá horská území Střední Evropy, na kterých by měly dobře vyniknout slabé a silné stránky měření družice ICESat-2. V rámci práce budou srovnány metriky ME a RMSE pro českou a polskou stranu Krkonoš a německou stranu Krušných hor. Zároveň bude posuzován možný vliv environmentálních faktorů jako je svažitosť, orientace a zalesnění na chyby měření. Prostředí Krkonoš je velmi diverzifikované, německá strana Krušných hor je oproti nim naopak stejnorodější a hlavní svahy obou těchto zájmových území jsou orientovány na odlišné světové strany. Tyto rozdíly mohou poskytnout podstatný vhled do problematiky přesnosti nově vypuštěné družice.

## **2. Cíle práce**

Bakalářská práce se zabývá evaluací chyb měření laseru družice ICESat-2 a vyhodnocením závislosti přesnosti měření na charakteristikách prostředí. Byl hodnocen datový produkt ATL08 v rozlišení 100 x 14 m – konkrétně jeho část sestávající z výšek terénu.

V rámci této práce byly stanoveny následující dílčí cíle:

1. Analýza vertikální přesnosti datového produktu ATL08 na území Krkonoš a Krušných hor.
2. Vyhodnocení přesnosti datového produktu ATL08 v závislosti na vlastnostech terénu – orientaci ke světovým stranám a svažitosti.
3. Vyhodnocení přesnosti datového produktu ATL08 v závislosti na vlastnostech vegetace – zalesněný a nezalesněný terén.

## 3. Literární rešerše

### 3.1 Laser

Slovo laser je zkratkou slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla stimulovaným optickým zářením). Od jiných světelných zdrojů se odlišuje svými specifickými vlastnostmi, které jeho využití činí zajímavým pro mnohá odvětví. Paprsek má jednu vlnovou délku, stejnou frekvenci vlnění, vysokou intenzitu záření a je málo rozbíhavý (Thomas et Isaacs, 2011).

Prvním krokem ke vzniku laseru bylo zavedení stimulované emise Albertem Einsteinem v roce 1917 (Maňková, 2000). Tu, při snaze zdokonalit tehdejší radiolokátory vysílající elektromagnetické vlny o malé vlnové délce (mikrovlny), v roce 1954 využili N. G. Basov, A. M. Prochorov a Ch. H. Townes při konstrukci prvních kvantových generátorů mikrovlnného záření, které dostaly název maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření). O čtyři roky později byl C. H. Townsem a A. L. Shawlowem publikován návrh konstrukce laseru (oproti maseru rozšíření frekvence do oblasti světla) v časopise Physical Review. V roce 1960 Theodor H. Maiman zkonstruoval první laser, jako aktivní prostředí využil syntetický rubín (Kusala, 2004). V ten samý rok byl navíc A. Javanem, W. Bennettem a D. Herriottem sestaven plynový laser s kontinuálním provozem. V následujících letech byly dále vytvořeny první polovodičové, chemické, neodymové a excimerové lasery, lišící se výkonem, vlnovou délkou, aktivním prostředím a možnostmi využití. V průmyslu se ve větším měřítku začaly kvůli své složitosti využívat až počátkem 90. let (LASCAM, 2015). Dnes se hojně využívají v mnohých odvětvích od průmyslu přes metrologii po medicínu.

#### **Konstrukce**

Základním stavebním prvkem laseru je **aktivní prostředí**. Jedná se o látku, v níž se tvoří paprsek a je podstatné, aby obsahovala prvky s tzv. metastabilní hladinou. Při nárazu fotonu do elektronu atomu prvku s metastabilní hladinou se elektron excituje na vyšší energetickou hladinu a následně klesne na hladinu metastabilní. Na ní vydrží (na rozdíl od excitované energetické hladiny) dost dlouho na to, aby narazil na další foton a reakce tak u něj neskončila. Aktivní prostředí by mělo být opticky homogenní, průzračné pro příchozí i odchozí záření, chemicky a tepelně odolné a stabilní a zároveň technologicky zpracovatelné. Podle aktivního prostředí se lasery dají dělit

na pevnolátkové (tvořeno krystalem, excitace bývá optická), plynové (tvořeno atomy, ionty či molekulami, excitace bývá dosažena elektrickým výbojem), kapalinové (tvořeno roztoky organických barviv) a diodové (aktivní prostředí tvoří laserová dioda) (Vrbová, Jelínková et Gavrilov, 1998; Maňková, 2000).

Energii elektronům v aktivním prostředí dodává **zdroj záření**. Tím umožňuje přechod mezi energetickými hladinami. Využívají se výbojky (světlo), chemické reakce nebo elektrický proud. K zesilování světla se využívá **rezonátor** – dutina s odrazovými plochami. V nejjednodušším provedení se jedná o dvě rovnoběžná rovinná zrcadla (polopropustné a nepropustné) kolmo postavená k laserovému paprsku (Thomas et Isaacs, 2011). V závislosti na konkrétním případě je možné použít i zrcadla konkávní nebo konvexní, to ovlivňuje stabilitu záření rezonátoru. Polopropustné zrcadlo fotonu udržuje v aktivním prostředí a dál je propouští až při vyšší energetické hladině. Jako nepropustné zrcadlo se většinou používá dielektrické zrcadlo, nebo také leštěné zlato. Některé typy laserů, schopné získat dostatek energie jedním průchodem aktivním prostředím, rezonátorem ani nedisponují (například dusíkový nebo měděný laser) (Demtroder, 2014). Mimo tyto hlavní součásti bývá součástí laseru například měřič výkonu, chladič, kalibrační přístroje nebo krystal měnící vlnovou délku (Kachtík, 2011b).

**Laserový paprsek** vychází z aktivního prostředí přes polopropustné zrcadlo. Jeho rychlost je rovna rychlosti světla. Jeho podstatnými vlastnostmi jsou monochromaticnost (záření jen jedné vlnové délky), koherence (neměnnost fázového posunu a frekvence záření), divergence (paprsek je rozbíhavý, jeho průměr se ve vzdálenosti zvětšuje) a vlnová délka. Frekvenční rozsah laserů je od infračerveného po ultrafialové záření (Kachtík, 2011a).

### **Fyzikální princip**

Laserový paprsek vzniká kumulací laserového vlnění. Jako u jiných zdrojů je zde světlo generováno přechodem elektronů mezi energetickými hladinami. V normálních podmínkách mají elektrony atomu nízkou energetickou hladinu, ta se zvýší při jejich excitaci (vnějším působením, například světelným zářením). Na atom tedy dopadají fotony světla a k excitaci dojde, absorbuje-li elektron některé fotony s energií pro něj potřebnou k přechodu na vyšší energetickou úroveň. V excitovaném stavu nevydrží dlouho a následně se navrátí zpět na původní energetickou hladinu. Při přechodu

do stavu nižší energie dochází k emisi. Elektron tak svoji přebytečnou energii uvolní jako světelné záření – foton.

Emise může být buď spontánní (samovolný přechod elektronu), nebo, mj. jako v případě laseru, stimulovaná (Thomas et Isaacs, 2011). Při ní dopadne foton na excitovaný elektron, tím ho přiměje k přechodu do nižšího energetického stavu a tím i k vyžáření dalšího fotonu (přebytečné energie) identického (se stejnými vlastnostmi) s narazivším (Reichl et Všeticka, 2006). Tyto fotony se pak dále synchronizovaně pohybují stejným směrem a vytváří koherentní vlnění. Tím se zvyšuje záření a je zajištěno opakování celého procesu (Kachtík, 2011a).

Je-li systém v termodynamické rovnováze, samovolná emise převažuje nad emisí stimulovanou a elektrony na základní energetické hladině jsou oproti excitovaným elektronům majoritní. Pro vznik stimulované emise ve velkém měřítku (tj. pro účely laseru) je ale třeba mít většinu elektronů v excitovaném stavu. Aby se zpomalil proces ztráty elektronové energie, je navíc třeba systém s metastabilní hladinou, která umožňuje vzájemnou řetězovou reakci a pokračování vzniku paprsku. Na metastabilní hladině elektrony vydrží výrazně delší dobu, tím se jich na ní v jeden okamžik nahromadí více a díky tomu dojde k tzv. inverzi populací. Když tedy elektrony na metastabilní hladině převažují nad elektrony na základní hladině, stačí jeden stimulující foton, který postupně přiměje všechny elektrony sestoupit na nižší energetickou úroveň (a při tom vypustit foton) (Demtroder, 2014). Tak dojde k zesílení světla. Vypuštěné fotony ale poletí různými směry, proto je zapotřebí rezonátoru. V něm se fotony střídavě odráží od zrcadel a ty, které letí mimo osu laseru, vyletí, zatímco fotony letící rovnoběžně s osou budou mezi zrcadly kmitat, stimulovat a nabalovat na sebe další (i ty letící špatným směrem). Tím se mezi fotony dosáhne směrového souladu a když pak zesílí na určitou úroveň, dostanou se ven polopropustným zrcadlem a vznikne laserový paprsek. Tento proces probíhá v řádu milisekund stále dokola.

### **Princip měření vzdálenosti laserem**

Jednotlivá měření vzdálenosti probíhají následovně: k danému objektu je vypuštěn paprsek o určité vlnové délce, odrazí se od něj a vrací se zpět do místa vypuštění. Tam dojde k jeho „zpětnému přijetí“ přes detektor. Během celého procesu je pro každý foton velmi přesnými hodinami měřen čas, z něhož je odvozena vzdálenost objektu.

Light Detection And Ranging (LiDAR) – zařízení měřící vzdálenost na základě času cesty odraženého světla – se skládá z laserové jednotky (tvořena emitorem a detektorem ve stejné optické ose), mechanické soustavy, optické soustavy, počítače řídícího celý průběh a hodin. Jedná se o aktivní metodu dálkového průzkumu Země (zařízení vysílá elektromagnetické záření), díky čemuž nejsou lidarová měření závislá na vnějším světle a je tak možné je realizovat nezávisle na denní době. Podstatnou součástí emitoru je zdroj záření. Pro výkonnější lidary se používají lasery pevnolátkové (pevné aktivní prostředí vzniku paprsku – například krystaly) s rozsahem vlnových délek v oblasti infračerveného a viditelného světla, například dnes již méně rozšířený rubínový laser nebo naopak častější neodymový laser (Nd YAG) vyzařuje světlo infračervené nebo zelené. V menších zařízeních bývají dostačující diodové lasery, jichž je dnes dostupná celá řada. Jednotlivé emitory se také kromě výkonu mohou lišit i ve vlnových délkách záření (Dolanský, 2004).

Emitor a detektor musí být spektrálně synchronizované. To znamená, že detektor (fotosenzitivní dioda) je citlivý jen na vlnovou délku, kterou vysílá emitor. Zároveň musí být detektor schopen rozpoznat i velmi slabý vstupní signál, protože navrátilší se fotony mohou disponovat už jen velmi malým množstvím energie.

Pro vysílání a zpětné přijímání paprsků je dále důležitá optická soustava, která zajišťuje správnou návaznost – souosost emitoru a detektoru. Kvůli snímání objektů v různých směrech skener disponuje hranolem či zrcadlem, které mění úhel skenování a není tak nutné s celým zařízením hýbat, což podstatně zvyšuje rychlost celého procesu.

### **3.2 Tvorba profilu terénu laserem, laserové měření vzdálenosti a laserové skenování**

Vzdálenost se dá měřit jednak způsobem zmíněným výše – měřením času, který vystřelený silný krátký puls světla potřebuje k cestě, odrazu od povrchu a návratu do bodu vyslání. A jednak přístupem alternativním, pro jeho energetickou náročnost využívaným jen u terestrických laserů, při kterém je elektromagnetické záření emitováno nepřetržitě a vzdálenost je vypočítávána na základě fázového rozdílu struktur sinusoidální vlny emitované a přijaté (Petrie et Toth, 2008).

Údaje o výšce lze pomocí laseru získávat více způsoby. Dá se hovořit o laserovém měření vzdálenosti, laserovém mapování profilu a laserovém skenování. Dálkoměr je možné využít k měření série vzdáleností po sobě jdoucích bodů na povrchu,

čímž jsou získána komplexnější data, ze kterých lze vytvořit profil terénu. Pro rozsáhlejší mapování profilu se dálkoměr umístí na libovolnou vzdušnou platformu (letadlo, družici) a laserová jednotka vysílá paprsky vertikálně přímo k povrchu. Nejedná se ale o měření, které by kontinuálně pokrývalo povrch, výška se měří pouze ve vzájemně odlehlých bodech (Petrie et Toth, 2008). Právě na tomto principu vytváří profil Zemského povrchu družice ICESat-2.

Nejdetailnější metodou je laserové skenování. Laserový skener vzniká přidáním skenovacího mechanismu (například rotujícího zrcadla nebo hranolu) k dálkoměru. A navíc je nutné zařízení doplnit i technologií určující přesné umístění skeneru (GPS, inerciální jednotka). Data vznikající leteckým skenováním jsou množství bodů – bodová mračna v pásu přeletu. Jsou tedy trojdimenzionální a umožňují detailně měřit topografické prvky (Petrie et Toth, 2008).

### **3.2.1 Letecké laserové skenování a součásti laserového skeneru**

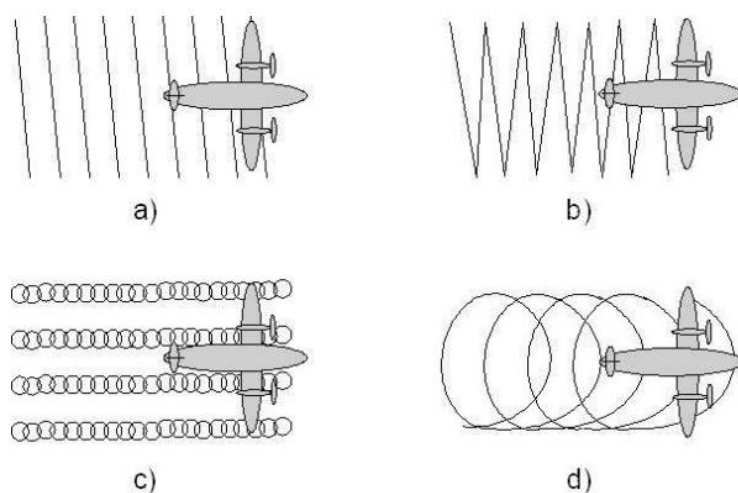
Laserový skener jako komplexní systém se skládá ze skeneru, laserové části, kontrolní části, navigační části a GPS. **Laserová jednotka** (emitor a detektor naladěny na stejnou vlnovou délku) obstarává vyslání a příjem paprsku. Většinou se využívají lasery vysílající záření blízké infračervenému, tato vlnová délka ale není vhodná pro všechny typy měření, například v atmosféře jsou citlivější zelené vlnové délky a pro měření pod vodní hladinou jsou potřebné zelenomodré. Velikost stopy paprsku na zemi (footprint) je přímo ovlivněna jeho divergencí a výškou letu skenujícího letadla. Intenzita záleží na vlastnostech (odrazivosti) snímaného povrchu. Dále mohou trasu paprsku ovlivnit například atmosférické jevy (Dolanský, 2004). Je také možné, že se elektromagnetické záření odrazí několikrát, v různých vrstvách u zemského povrchu. Aby bylo možné odrazy vzájemně odlišit, je potřebný časový odstup mezi jejich lokálními maximy a zároveň je třeba i částečné prostorové izolace. Odrážení jednoho paprsku ve více vrstvách se využívá při mapování porostů, kde se poprvé odrazí od koruny, následně od jednotlivých pater, a nakonec potenciálně i od terénu (Dolanský, 2004).

**Skener** většinou obsahuje zrcadlo pro příčné vychylování paprsku. Přímo tedy ovlivňuje šířku záběru (velikost zorného pole) laseru. Obecně se používá několik skenerových modelů, z nichž má každý svá specifika. *Skener s rotujícím zrcadlem* (a)

vykazuje nízkou chybovost při úhlovém měření, naopak ale mezi periodami skenování vznikají prodlevy, při kterých je světlo odráženo mimo jeho zorné pole.

*Eliptický skener* (d) využívá dvou zrcadel, a tak na povrchu tvoří stopu ve tvaru elipsy, výhodou je, že každé místo oskenuje dvakrát, nevýhodou, že je kvůli složité konstrukci náchylnější k chybám při určování současného úhlu a při souladění zrcadel. Výhodou *skeneru s oscilujícím zrcadlem* (b) je, že umožňuje kontinuální měření a regulaci vzniku chyb vlivem turbulencí (vznik mezer, nerovnoměrná hustota bodů), na druhou stranu u něj ale mohou homogenní distribuci bodů negativně ovlivnit náhlé změny rychlosti.

Jiné skenery například využívají pouze malého zrcadla, pomocí něhož nasměrují laserový paprsek do svazku lineárních *optických vláken* (c), který následně vysílá pulsy. Nevýhodou je malý úhel měření, výhodná je naopak jeho rychlost, díky které dochází k vzájemnému překrývání měření (Dolanský, 2004). Obrázek 1 zobrazuje stopy výše zmíněných skenování na povrchu.



Obrázek 1: Stopy různých skenerů na povrchu (převzato z Dolanský, 2004)

**Kontrolní (řídící) jednotka** zajišťuje kooperaci skeneru a laserové jednotky a naměřená data páruje s časem jejich pořízení. Čas na jejich vnitřních hodinách je průběžně sladován s hodinami GPS. **GPS** je přítomna pro přesné určení polohy (od které se odvíjí výpočet vzdálenosti od objektů). V rámci leteckého skenování může také zajišťovat synchronizaci času ostatních měřících soustav (Dolanský, 2001). A v případě leteckého skenování je také vhodné použití metody DGPS (na palubě letadla je jedna GPS a využívá dostupné referenční stanice se známými souřadnicemi ke korekci odchylek vlastního měření).



Při leteckém laserovém skenování se navíc využívá **inerciální jednotky**, která pomocí několika gyroskopů (kontrola všech náklonů letadla) a akcelerometru (kontrola zrychlení) zaznamenává průběh letu (odklony, výchylky a změny polohy obecně). Zpětně tak lze dohledat efekty vnějších vlivů letu na pozici letadla v prostoru. Zároveň umožňuje přizpůsobení nastavení skenerů na podmínky letu v reálném čase (Dolanský, 2004). Dále je pro snadnější identifikaci snímaných objektů či zachycení reálných barev podkladu možné použití digitálních přístrojů (videokamera pro letecké a fotoaparát pro pozemní skenování).

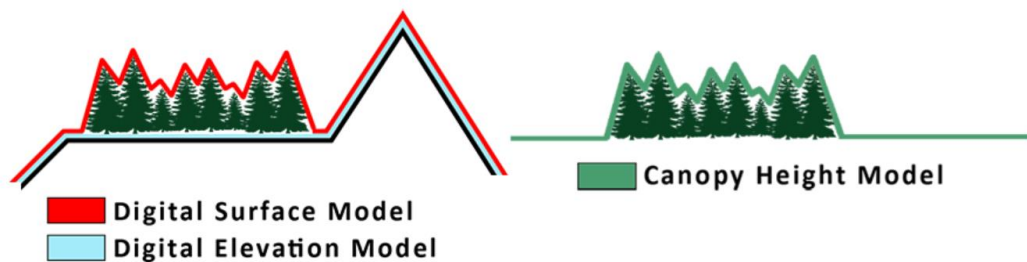
Umístí-li se laserový skener na libovolný létající objekt (například letadlo), dá se hovořit o leteckém laserovém skenování (ALS, airborne lidar scanning). To se nejvíce rozšířilo po roce 2000, kdy také proniklo do ČR. Jeho vývoj byl umožněn rozvojem jiných technologií klíčových pro jeho funkčnost. Protože jsou pro zajištění údajů o přesné poloze letadla potřebné inerciální navigační systémy a GPS (jako technologie byla zavedena po roce 1980), musel jejich vývoj počátku leteckého skenování předcházet. ALS tedy není příliš starým prostředkem získávání dat a stále je prostor pro jeho další vývoj (Dolanský, 2001).

Díky schopnosti zachytit mnoho bodů blízko u sebe (mapování drobných objektů), několikanásobný odraz i zprostředkovat trojrozměrná data prostoru, by se tato metoda dala považovat za výhodnější než klasické a starší postupy fotogrammetrie či tachymetrie (Dolanský, 2001). Fotogrammetrie je oproti leteckému laserovému skenování metodou podstatně více ovlivňovanou atmosférickými jevy a s pasivním snímačem. Vývoj leteckého skenování se tedy dá přímo odvodit ze soudobé potřeby mapovat odlehlejší území a obecně mapovat dokonaleji. S rostoucím tempem pokroku je jen otázkou času, kdy bude možné stejným způsobem (a se stejnou přesností) skenovat povrch z oběžné dráhy a zcela automaticky.

Východiskem leteckého laserového skenování jsou body (bodové mračno), se kterými se dále pracuje. Letecké laserové skenování v relativně krátkém čase umožňuje mapovat velká území a tím, že pracuje s digitálními daty, je celý proces do velké míry zautomatizován (Dolanský, 2001). Z bodového mračna je pak klasifikací a následnou interpolací bodů možné vytvořit různé digitální elevační modely (DEM). Čím je hustota bodového mračna větší, tím může být rozlišení výsledného produktu vyšší. Zpravidla jsou výstupem digitální model terénu (DTM, digital terrain model) a digitální model povrchu (DSM, digital surface model).

DTM obsahuje pouze výšky podkladu – reliéf terénu bez veškerých objektů. Sběr těchto dat je ovlivněn vegetací (elektromagnetické záření přes ni nemusí proniknout až k zemi) a mezerami v ní, odrazivostí povrchu při dané vlnové délce a rozdělením laserového paprsku. Data DSM sestávají z bodů terénu tam, kde ho nic nepokrývá, a z bodů tvořících horní stranu objektů, které na něm leží. Zjednodušeně by se dalo říci, že model povrchu je to, co je vidět z ptáčích perspektivy. Odečtením DTM od DSM jsou hodnoty výšky terénu rovny nule a vzniknuvší normalizovaný model povrchu (nDSM) tak zahrnuje pouze objekty na rovné ploše a jejich výšku nad ní.

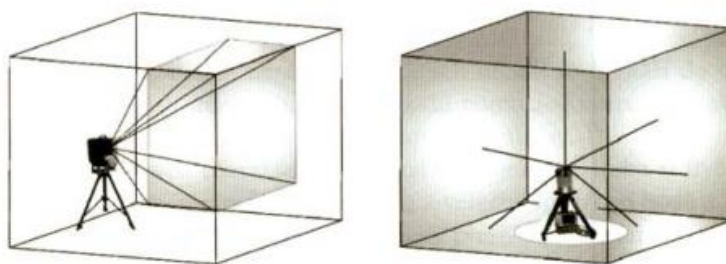
Pro jiné účely je možné vytvořit podobný normalizovaný model – ale obsahující pouze vegetaci (CHM, canopy height model, viz obrázek 2). Záleží na datech, buď zahrnuje celou vertikální strukturu, nebo jen některá její rozlišená patra. Při chybné klasifikaci bodů se v něm mohou objevit „díry“ bez dat o výšce. Využívá se například při dálkovém určování druhů tvořících vegetaci.



Obrázek 2: CHM (převzato z Humboldt State University, 2014)

### 3.2.2 Pozemní laserové skenování

V rámci pozemního skenování se skenerem nehýbe, je tedy fixně umístěn a snímá v rámci svého zorného pole. Pro tyto účely se lidar dá použít dvěma způsoby. Buď jde o skenování dvoudimenzionální (to se ale většinou používá spíše v mapování leteckém), nebo trojdimenzionální. Skener 3D lidarů emituje světlo do celého zorného pole. Na základě toho je možné rozlišit dva typy – kamerový (světlo směřují dvě zrcadla) a panoramatický (soustava se otáčí po okolí), oba jsou vyobrazeny na obrázku 3. Terestrické skenery mají využití v rámci archeologie, architektury, výpočtu kubatury, stavebního inženýrství, obecně vizualizací a plánování. Je to rychlá, spolehlivá a oproti jiným i bezpečná metoda (Kašpar et al., 2003).



Obrázek 3: Kamerový a panoramatický skener (převzato z Kašpar et al., 2003)

### 3.3 Satelitní LiDAR – mise ICESat

#### 3.3.1 ICESat

Satelit ICESat byl vypuštěn z letecké základny Vandenberg v Kalifornii v lednu roku 2003. Jeho nejvýznamnějším prvkem byl laserový výškový systém GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), který byl prvním lidarem kontinuálně pozorujícím Zemi. Jeho součástí byly tři Nd-YAG lasery o vlnové délce 1064 nanometrů a bylo připojeno i optické zařízení, které část záření převádělo z infračervených do zelených vlnových délek (532 nanometrů). GLAS vytvářel řadu tvořenou body laserových měření o průměru 70 metrů s rozestupy 170 metrů. Satelit uskutečnil jeden cyklus (oběh) za 91 dní. Celá mise trvala sedm let a bylo během ní uskutečněno 18 laser operujících akcí.

Výsledkem byla jedinečná pozorování atmosféry, mraků a topografie ledových příkrovů nezbytná k přesné krátkodobé predikci klimatu a počasí. Primární cíl této mise (pozorování ledových pokryvů a souvislosti mezi jejich táním v důsledku oteplování se zvyšováním hladiny moře) tak byl naplněn. Zájem o tuto problematiku je v dnešní době namístě, protože ledovce, jejichž mocnost se za stovky let měnila jen příbytkem sněhu a ledu, začínají odtávat v dosud nepoznané míře a s rostoucí tendencí. Možnost určité „předpovědi“ úrovně hladiny moře je navíc velmi významná pro obyvatele pobřežních oblastí na celém světě. Zároveň systémem ale lze měřit mocnost mraků, jejich vertikální strukturu v atmosféře, sněhový pokryv, výšku vegetace a topografii zemského povrchu.

#### 3.3.2 ICESat-2

V září roku 2018 byl ze stejného místa vypuštěn satelit ICESat-2. Oproti svému předchůdci by měl sbírat násobně více dat, z čehož vyplývá větší možná přesnost

jednotlivých měření. Satelit obíhá ve výšce necelých 500 kilometrů nad zemí rychlostí 6,9 kilometrů za sekundu a je opatřen čtyřmi solárními panely, které nabíjejí jeho lithium iontovou baterii. Pro přesná měření je důležité mít detailní informace o jeho poloze, proto disponuje GPS, optickým zařízením určujícím polohu hvězd (star tracker) a nástrojem pro velmi přesné měření těžiště, díky kterým dokáže určit svoji polohu s přesností necelých pěti metrů (NASA, 2018).

Primárním cílem je nadále sledovat změny ledovcových příkrovů, mocnost mořských ledovců a biomasu vegetace (ESA, 2020). Mocnost mořských ledovců se vypočítává odečtením výšky vrchu ledovce od výšky úrovně moře a následně lze dopočítat velikost tělesa pod vodou. Satelit by měl být schopen rozlišit změnu mocnosti ledovcového pokryvu až o jeden centimetr a poskytovat tak dostatečné podklady pro velmi přesná pozorování. Velké množství shromážděných měření společně s malou stopou laseru (13 metrů) umožní vyvozovat závěry jak z malých ploch (samostatné ledovce), tak z větších území (Grónsko).

Nejdůležitější součástí ICESat-2 je, na rozdíl od prvního satelitu ICESat, který disponoval systémem GLAS, systém ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System). Právě ten pokračuje v již započatém měření změny mocnosti pevninského i mořského ledu a výšky porostu vegetace (canopy height). Využívá tři páry paprsků, které vyšle vždy po obou stranách své trasy nad zemí (reference ground track), takže jsou následně dostupná a snadno srovnatelná data sklonu i výšky. První ICESat mise vysílala paprsek jen jeden, a tak se po jejích dvou přeletech nad jedním místem nedalo jednoznačně říci, jestli byl paprsek zaměřen trochu jinak a jiným směrem, nebo část ledu například odtála.

Software se směrem natočení laseru, přesnou pozicí satelitu a časem cesty následně určí vzdálenost odcestovanou fotonem a tím i výšku povrchu (data point). K tomu, aby byla dosažena žádoucí přesnost je třeba tisíců datových bodů (čím více dat, tím lépe software rozpozná povrch). Například pro velká území (Antarktida) je uváděná přesnost rozpoznání změny výšky povrchu až 4 milimetry, naopak na malých územích (jednotlivé ledovce) bude přesnost nižší z důvodu menšího množství datových bodů, které se na území nachází (NASA, 2018).

### **Charakteristika laserů**

ATLAS disponuje dvěma lasery – primárním a záložním. Pulsuje deset tisíckrát za sekundu a každým pulsem vysílá k zemi tři sta trilionů fotonů zelené vlnové délky

(532 nanometrů), z nichž se jen velmi malá část dostane k povrchu Země, odrazí a dorazí zpět (NASA, 2018). ATLAS navíc laserový paprsek při jeho vyslání rozdělí na šest, ty jsou spárovány po dvou (levý je vždy silný a pravý slabý, s podílem energie přibližně 4:1), čímž je schopen pokrýt výrazně větší plochu než jeho předchůdce GLAS. To a vysoká rychlost vysílání pulsů umožňuje ATLASu provádět bodová měření (data points) s odstupy jen 70 centimetrů a o průměru 13 metrů. Prostor mezi páry laserů je na Zemském povrchu 90 metrů. Jak je uvedeno výše, GLAS byl oproti tomu schopen provádět měření o průměru 70 metrů každých 170 metrů (NASA, 2018). Například na délce hřiště na americký fotbal by GLAS provedl měření dvě a ATLAS sto třicet (NASA, 2017). Model s více paprsky umožňuje výpočet svažitosti mezi měřeními z jednotlivých paprsků (cross-track slope) v jednom bodě pozemní projekce satelitu (ground track), to poskytuje lepší přehled o okolním terénu (Neuenschwander, 2018). Reálná výška povrchu je vypočtena z času, který fotonu zabere cesta k povrchu, odrazení se od něj a cesta zpět k satelitu. Z toho vyplývají hlavní činnosti ATLASu – zaměří směr, vyšle puls světla a následně sbírá navrátní se fotony. Během toho navíc zaznamenává čas cesty.

Fotony jsou po návratu k satelitu svedeny do šesti optických kabelů, do každého jeden paprsek, a následně jsou od nich odfiltrovány jiné vlnové délky než 532 nanometrů (Neuenschwander et Magruder, 2019). Fotony, které se dostaly až sem, jsou detekovány a je zaznamenáno celkové trvání jejich cesty. Tento čas dokáže ATLAS určit s přesností na 800 pikosekund (NASA, 2018). Přesnost měření ATLASu se odvíjí od přesnosti určení polohy, degradace laserových paprsků při průchodu atmosférou a nejistoty ohledně zpoždění jednotlivých fotonů ve troposféře (Neuenschwander et Pitts, 2019a). Pro rovné povrchy je předpokládána směrodatná odchylka přibližně 25 centimetrů.

## **Produkty ICESat-2**

Přestože je družice určena především k získávání dat o sněhu, srážkách a ledovcích, během své cesty od pólu k pólu sbírá data ze všech povrchů mezi nimi. Datové produkty z přeletů jsou volně dostupné<sup>1</sup>. Buď jsou to tzv. „low-level data products“, základně zpracovaná data obsahující jednotlivé fotony, nebo tzv. „surface-specific data

---

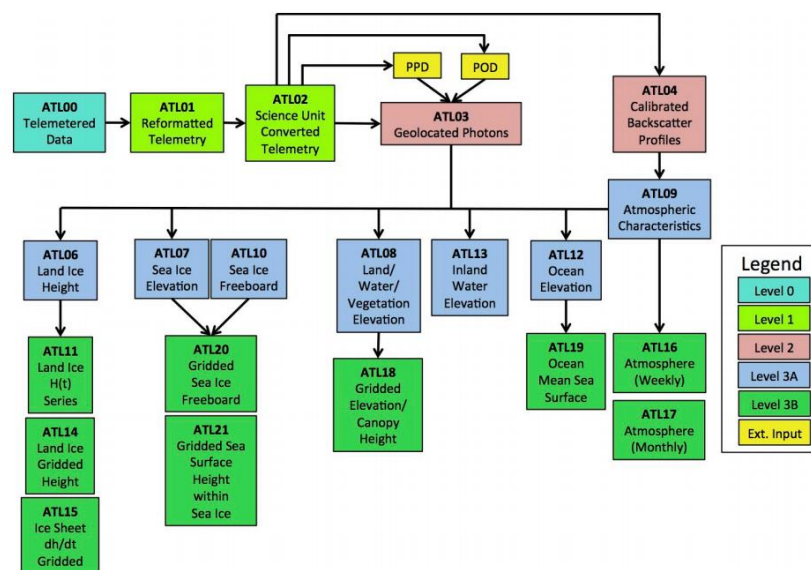
<sup>1</sup> Na stránkách National Snow and Ice Data Center in Boulder v Coloradu (nsidc.org.)

products“, produkty z bodů více zpracované pro expertizu v dalších odvětvích (například atmosféra, vegetace, oceány). Schéma všech produktů znázorňuje obrázek 4.

Do první kategorie („low-level data products“) patří produkty ATL01, ATL02 a ATL03. Obsahují rozložená dálková měření, zeměpisné souřadnice pro jednotlivé fotony seřazené podle paprsků ATLASu, klasifikaci fotonů na hlavní (signal) a vedlejší (background), klasifikaci fotonů podle typu povrchu, geofyzikální korekce a další.

„Surface specific data products“ by celkem mělo tvořit 17 produktů (ATL04 až ATL21, chybí ATL05, který nebyl navržen). Takto jsou již dostupné například výšky povrchu, vrstvy vegetace, výška oceánu, výšky vnitrozemních toků, výšky atmosférických srážek a jiné (Blumenfeld, 2019; NASA, 2019). Postupně budou přibývat další produkty.

Pro kontrolu (validaci) ICESat-2 produktů před jejich zpřístupněním se pro jejich širokou dostupnost užívají data z leteckého laserového skenování. Jsou vhodné, protože zdroje chyb jsou v nich již dobře popsány a kvantifikovány (Neuenschwander et Pitts, 2019a). Díky tomu se dá znalost možných chyb zahrnout i v případě, že jsou tato data použita pro validaci. Data z leteckého skenování by pro potřeby validace měla mít následující vlastnosti: minimální průměrná hustota bodů je 5 bodů na 1 metr čtvereční (Neuenschwander, 2018) a vertikální přesnost na volném terénu je vyšší 0,3 metru.



Obrázek 4: Přehled plánovaných produktů ICESat-2 (převzato z Neumann, Brenner et Hancock, 2019)

V rámci této práce bylo pro validaci přesnosti měření ATLASu využito výšek terénu z datového produktu ATL08 („land and vegetation heights for the non-polar regions of the Earth“) obsahujícího zároveň výšky vegetace a další popisné parametry jako například procenta vegetačního pokrytí, sklon, strukturu a odrazivost povrchu (NASA, 2019). Výška povrchu je v tomto produktu odvozena podle elipsoidu WGS84.

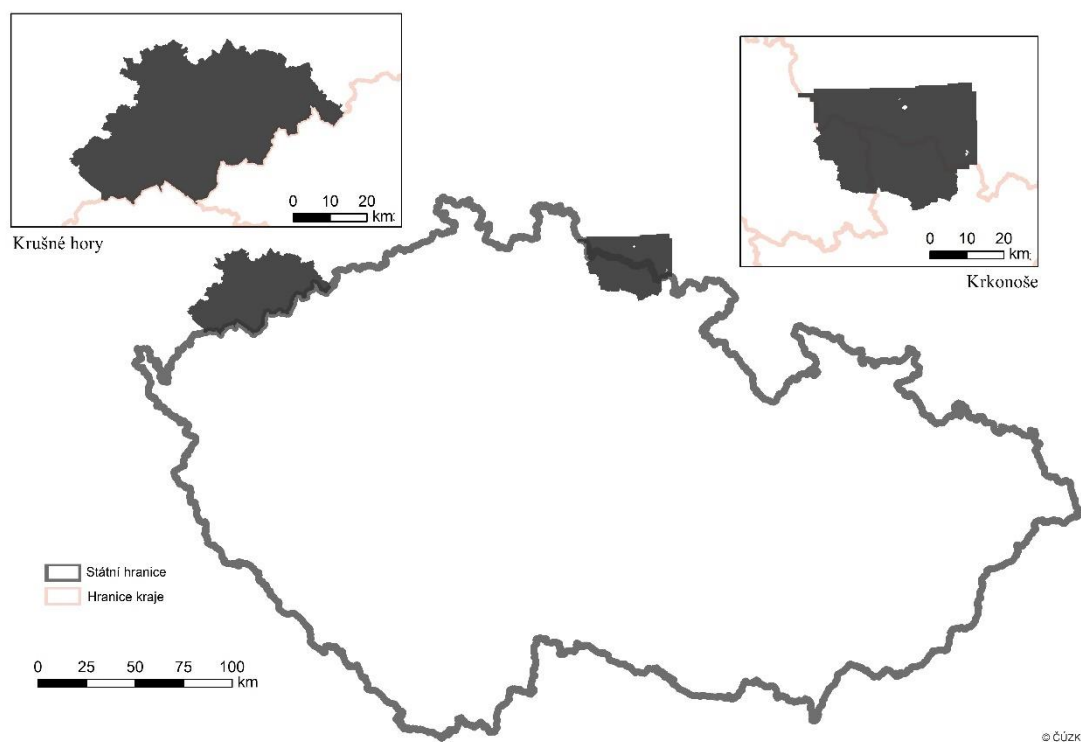
Každý ze šesti paprsků vytváří sérii měření podélnou (along track) k pozemní projekci satelitu (ground track). V závislosti na hustotě vegetace se síla navráťivšího se signálu liší. Autoři datové sady očekávají, že v hustě zalesněných oblastech může být slabší paprsek z páru příliš slabý na to, aby bylo možné určit zároveň výšku vegetace a terénu (Neuenschwander, 2018). Jednotlivé vrstvy jsou zpracovávány ve stometrových úsecích. Přičemž v každém z nich se většinou nalézá minimálně 100 signálních fotonů (OPENALTIMETRY, 2019).

Potenciální chyby v tomto produktu (mimo ty z důvodů uvedených výše) mohou být zapříčiněny příliš hustou vegetací (paprsek se nedostane až k zemi), špatným vyfiltrováním z fotonové vrstvy ATL03 (původce vrstvy ATL08), vertikální chybou ve snímání (ATLAS snímá náhodné části povrchu, fotony se mohou odrazit od čehokoli v dosahu) a komplexní topografií (snímání kolem dráhy satelitu nutně nezachytí všechny komplexní povrchy) (Neuenschwander et Pitts, 2019a).

## 4. Metodika

### 4.1 Zájmová území

Pro validaci dat byly vybrány Krkonoše – jejich česká i polská strana – a německá strana Krušných hor. Přelety družice ICESat-2 jsou vůči pohořím Krkonoš kolmé a vůči svahům Krušných hor naopak podélné, to může při vyhodnocování výsledků poskytnout další podstatný vhled na přesnost měření. Obrázek 5 reprezentuje polohu zájmových území vůči České republice.



Obrázek 5: Zájmová území (vypracováno s daty ČÚZK, 2020)

#### 4.1.1 Krkonoše

Krkonoše se nachází na hranicích České republiky (severovýchod) a Polska (jihozápad) v délce 36 kilometrů (SITOUR, 2009). Patří do provincie Česká vysočina a do Krkonošsko-jesenické subprovincie. Spolu s Kralickým sněžníkem a Hrubým Jeseníkem tvoří horský masiv Vysoké Sudety, který je součástí Sudetského pohoří, jehož nejvyšším prvkem jsou právě Krkonoše (KRNAP, 2015a). Nachází se zde osm z deseti nejvyšších vrcholů v ČR. Jejich rozloha je 639 km<sup>2</sup>, z toho česká, větší, část tvoří 454 km<sup>2</sup>. Jejich střední nadmořská výška činí 901 metrů a průměrný sklon 13° 23' (Pilous, 2007). Krkonoše jsou významné pohoří mimo jiné i proto, že se na jejich relativně malém území nachází mnoho geomorfologicky zajímavých, a ne zcela



běžných elementů (např. ledovcová údolí, kary, morény a jezera, rozsochy, sněžníky, mrazové půdy, kryoplanační terasy, thufury a další). Nejvyšší horou Krkonoš je Sněžka (1603 m. n. m.) ležící přímo na hranici s Polskem. Má tvar trojbokého jehlanu tvarovaného ledovcovou a říční erozí (tzv. karlingu). Byla formována ve čtvrtohorách, kdy po jejích stranách ležely ledovce, které pod ní při svém sestupu zanechaly kary. Na jejím úbočí se nachází kamenná moře a tzv. mury (dráhy kamenito-hlinitých lavin). Dnešní reliéf můžeme označit jako kernou hornatinu se zbytky zarovnaného povrchu na temenech (Česká geologická služba, 1998).

### **Vznik a geologie**

Z geologického hlediska se Krkonoše řadí takto: Český masív – Lužická oblast – Krkonošsko-jizerské krystalinikum a Krkonošsko-jizerský pluton (Brunclík, Beneš et Vlk, 1986). Vznik Krkonoš započal na přelomu starohor a prvohor (variské vrásnění) (KRNAP, 2015a). Největší geomorfologické změny probíhaly v období třetihor a čtvrtohor (alpínské vrásnění). Pohoří tvoří proterozoické krystalinikum, pod nějž později během variského vrásnění pronikl velký paleozoický žulový pluton, který vytvořil tvrdé kontaktní pásmo, a to pak zásadně ovlivnilo tvorbu reliéfu a vývoj hornin (v místech kontaktu, kde se nacházely karbonátové horniny, vznikla ložiska nerostných surovin) (Pilous, 2013). Konkrétně se zde nacházejí převážně krystalické břidlice, přeměněné fylity, ortoruly, svory, dále křemence, krystalické vápence a čediče (SITOUR, 2009). Na nevelké ploše se tu tak setkávají horniny sedimentárního a vulkanického původu (Chaloupský et al., 1989).

### **Přírodní podmínky**

Slezský hřbet Krkonoš tvoří rozvodí mezi Severním a Baltským mořem. Krkonošská říční síť sestává z 31 polských a více než 140 českých vodních toků. Na české straně je největším a nejvýznamnějším tokem Labe a po něm jeho přítoky Úpa a Jizera (SITOUR, 2009). Na straně polské jsou to například Kamienna, Podgórna a Wrzosówka.

Voda odtékající z této stromovitě uspořádané říční sítě prostřednictvím Labe je především srážkového původu (KRNAP, 2015b). Typicky mají Krkonošské toky nerovnoměrný podélný profil, kde se hojně střídají úseky s prudkým a pozvolným spádem. Mimo samotné vodní toky jsou na tomto území významná i ledovcová jezera (např. Wielki a Mały Staw na polské straně), vodopády (např. Labský a Pančavský),

rašelinná jezírka (mezinárodně chráněné mokřady), obří hrnce a kotle (např. koryta řek Jizery a Mumlavy) a Labská vodní nádrž (KRNAP, 2015b). Řeky se prohlubováním ledovcových údolí významně podílely na tvorbě reliéfu Krkonoš.

Půdní typy jsou ovlivňovány především geologickým podložím, distribucí vody a klimatem. Vzhledem ke Krkonošskému chudému podloží, chladnému podnebí a členitému reliéfu jsou tamější půdy výrazně diverzifikované nadmořskou výškou a většinou kyselé.

*„V nejnižších polohách převládají hnědé lesní půdy, výše mají převahu humusové a rašelinné podzoly a podzolové rankery, na výchozech vápenců jsou vzácně vyvinuté rendziny a na nejvyšších vrcholech převládají mrazem tříděné kamenité a velmi mělké alpské půdy. Podél vodních toků bývají různě mocné nivní a glejové půdy. Na lesních rašeliništích a subarktických rašeliništích obou náhorních plošin se vyskytují rašelinné půdy, jejichž mocnost nepřesahuje 2–3 metry.“* (KRNAP, 2015c)

Podnebí je zde chladné, vlhké, větrné a s velkým množstvím srážek. Toto výrazně oceánické klima je důsledkem toho, že Krkonoše tvoří překážku, na kterou naráží studený vlhký vítr proudící od Atlantického oceánu (KRNAP, 2015d). S tím souvisí i prudká proměnlivost počasí. Jedná se o jednu z nejchladnějších oblastí v České republice (obzvláště ve vrcholových partiích). Bývají zde krátká vlhká léta následovaná chladným přechodem a pak dlouhou velmi chladnou zimou. Průměrná teplota vzduchu na vrcholu Sněžky je 0,2 °C (SITOUR, 2009). Průměrná roční doba slunečního svitu je zde přibližně 1500 hodin. Například v nejvyšších částech Krkonoš tak vegetační doba trvá pouze tři měsíce.

## **Vegetace**

Do Krkonoš spadají čtyři svrchní vegetační stupně vyskytující se na našem území (tj. submontánní, montánní, subalpínský a alpínský vegetační stupeň), jejich rozsah je od 800 do 1500 m. n. m. Od podhoří po alpínský stupeň se tu tak vyskytují smrky, borovice kleč a v nejvyšším stupni jen byliny např. jestřábníky (Štursa, Jeník et Váňa, 2010).

### **4.1.2 Krušné hory**

Krušné hory se nachází na hranicích České republiky (severozápad) a Německa (západ) v délce 140 kilometrů. Jejich celková rozloha je přibližně 6 000 km<sup>2</sup>, z nichž 1 607 km<sup>2</sup> tvoří česká menší část, která je zároveň vyšší a hornatější.

„Krušné hory tvoří orografickou jednotku, která spolu se Smrčínami, Slavkovským lesem, Tepelskou plošinou, pánevními podkrušnohorskými oblastmi, Doupovskými horami, Českým středohořím a Děčínskými stěnami tvoří širší krušnohorskou soustavu.“ (Stradiotová, 2006)

Nejvyšší vrchol Krušných hor je Klínovec (1 243,7 m. n. m.), další významné hory jsou Fichtelberg (1 214,7 m. n. m.), který je nejvyšším vrcholem na německé straně, Božídarský Špičák (1 115 m. n. m.) a Plešivec (1 028 m. n. m.). Celkový rozsah výšky pohoří se pohybuje v rozmezí 272 a 1 244 m. n. m. Vyskytují se zde významné prvky jako např. tory, skalní hradby, mrazové sruby, rašeliniště či vzácněji kamenná moře (Melichar et Krása, 2009).

### **Vznik a geologie**

Z geologického hlediska lze Krušné hory zařadit takto: Český masív – Krušnohorská oblast – Krušnohorské krystalinikum (Brunclík, Beneš et Vlk, 1986). Vznikly během kadomského vrásnění (konkrétně na přelomu starohor a prvohor) přeměnou sedimentů v krystalické břidlice. Během variského vrásnění se k tomuto základu přidal krušnohorský pluton, při jehož vzniku se navíc vytvořily mnohé nerostové žíly. V průběhu posledního, alpínského, vrásnění se na celém pohoří tvořily zlomy a závěrem probíhala vulkanická činnost, jejímž výsledkem byly např. Doupovské hory (Stradiotová, 2006).

Tvar pohoří je v zásadě šikmá kra tvořená vrchovinami a náhorními plošinami ukončená kerným zlomovým svahem (Melichar et Krása, 2009). Dnes se tu vyskytují především metamorfované horniny (např. migmatity, břidlice, svory, fylity, ruly, granulity) a v menší míře i horniny vyvřelé (granitoidní tělesa) nebo sedimentární (pískovce) (GeoWeb, 2004).

### **Přírodní podmínky**

Krušné hory tvoří rozvodí Dunaje a Labe. Výskyt kerných zlomů ovlivnil retenci a odtok vody z oblasti. Celá náhorní plošina je pokryta rašeliništi či podmáčenými lesy, které vodu zadržují. Rašeliniště se zde nachází na ploše 5 767 ha a jsou nejvýznamnějšími biotopy této oblasti (Melichar et Krása, 2009). Voda v nich zachycená následně pozvolna odchází mělkými údolními, která se směrem z hor více zařezávají a vedou vodu do níže položených oblastí.

Z České strany Krušných hor voda stéká do Podkrušnohorské oblasti, kde ji následně odvádí Ohře (Balatka et Kalvoda, 2018). Dále v Krušných horách pramení

Bílina, další významné toky jsou např. Svatava a Bystřice. Z německé strany hor voda odtéká do Muldy. Mimo řek a rašelinišť jsou v Krušných horách z pohledu hydrologie významné i vodní nádrže (např. Přísečnice a Fláje).

Krušné hory tvoří bariéru, do které naráží vzdušné proudy od Atlantiku. Toto západní proudění přináší vlhkost a frontální vlny. Stejně jako v Krkonoších je i v Krušných horách spíše oceánické klima. Také se zde často vyskytují námrazy a mlhy, a jako v jiných horách jsou časté i náhlé změny počasí. Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 4 a 6 °C a roční úhrn srážek dosahuje 1 000 mm (Melichar et Krása, 2009).

## **Vegetace**

Okrajově se na území Krušných hor vyskytují kolinní a suprakolinní vegetační stupně, převážně jsou zde reprezentovány habry a duby. Ve směru vzhůru následují stupně submontánní, montánní a supramontánní. V polohách nad 500 m. n. m. se zde vyskytují suťové lesy, buky, jedle, kleny a méně často smrky. Naopak v nejvyšších polohách smrky dominují (Melichar et Krása, 2009).

## **4.2 Sběr a příprava dat**

### **ICESat-2**

Data ICESat-2 jsou volně dostupná na internetových stránkách OpenAltimetry, společnosti poskytující API pro přístup k těmto datům a jejich základní vizualizaci a navigaci v nich. Pro celé regiony uvažované v této práci byla data kompaktně stažena ve větších celcích<sup>2</sup>. Data, obsahující údaje jednotlivých přeletů v h5 formátu uložená ve složkách, byla následně zprocesována v prostředí statistického software R. Vybrány byly pouze atributy (sloupce) potřebné pro další práci s daty, a to zeměpisná výška (LON) a šířka (LAT) každého změřeného bodu, výška terénu (TERRAIN), označení snímajícího paprsku (BEAM, jeho číslo a údaj o straně – pravá nebo levá), identifikátor segmentu (SEGMENT\_ID) a datum přeletu (FLY). Z nich byl vytvořen csv soubor s tabulkou zvolených hodnot pro jednotlivé naměřené body, který již bylo možné nahrát a zpracovávat v programu ArcGIS.

---

<sup>2</sup> Dostupná po registraci (<https://nsidc.org/data/atl08>)

Po nahrání vytvořené tabulky ve formátu csv do datového rámce v ArcGISu jí byly přiřazeny X a Y souřadnice. Uložením vznikla výchozí bodová vrstva přeletů, ze které byly vypočítávány další metriky. Data jsou distribuována a byla i zpracovávána v koordinačním systému WGS84.

## **Geoid ČR ČÚZK**

Výsledkem měření vzdálenosti satelitem byly výšky elipsoidické, vztažené k referenčnímu elipsoidu WGS84. Aby bylo možné tyto hodnoty porovnat s nadmořskými výškami reprezentovanými digitálním modelem terénu, které oproti tomu byly ortometrické (měřené od geoidu), bylo třeba originální data převést na výškový systém Bpv. Toho bylo dosaženo pomocí kvazigeoidu ČÚZK, který je volně dostupný<sup>3</sup>. Jeho rozlišení je 0,0116 m a aby odpovídal datům ICESat-2, byl z Evropského terestrického referenčního systému 1989 (ETRS89) převeden do koordinačního systému WGS84.

## **DTM Krkonoš**

Pro srovnání výšek naměřených satelitem s reálnými výškami terénu byly jako referenční použity dva digitální modely terénu Krkonoš. Jeden pro českou stranu, pořízen v létě roku 2012 společností GEODIS BRNO, jeho maximální úplná střední chyba výšky v zalesněném terénu je 0,25 m, a druhý pro stranu polskou, který byl pořízen v rámci projektu ISOK a jako celek zachycuje téměř celou rozlohu Polska, s deklarovanou přesností 0,15 m (Oberski, 2016). Následně byly spojeny v jeden DTM s rozlišením 1 x 1 m. S ním bylo dále pracováno v souřadnicovém systému WGS84 a projekci UTM 33N. Dohromady oba spojené modely terénu zachycují území o přibližné rozloze 1 218 km<sup>2</sup>.

## **DTM Krušných hor**

Digitální model terénu Krušných hor byl využit stejným způsobem jako DTM Krkonoš. Jeho deklarovaná výšková přesnost je 0,15 m (GEOPORTAL, 2019). Poprvé byl LiDARový snímek tohoto území pořízen v roce 2010, od té doby byla přidána další rozlišení a data jsou průběžně doplňována o aktualizace.

---

<sup>3</sup> Ze stránek Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (<https://www.cuzk.cz>)

Původní stažený digitální model terénu, který obsahoval celé Sasko, je volně dostupný<sup>4</sup>. Jeho rozlišení bylo také 1 x 1 m a byl stažen v souřadnicovém systému ETRS89 a projekci UTM 33N, ve které na něm bylo i dále pracováno. Po stažení byl ořezán jen na německou stranu Krušných hor. Toto území, ze kterého byly dále počítány metriky mělo rozlohu přibližně 1 847 km<sup>2</sup>.

## **Rastr lesů**

Jako referenční vrstva pro určení výskytu lesních porostů byl použit globální rastr vytvořený misí TanDEM-X mezi lety 2011 a 2016 (Martone et al., 2018). Jedná se o první souhrnný model zalesnění celé Země. Všechny plochy byly mapovány minimálně dvakrát – členitější plochy jako lesy, hory a pouště pak vícekrát. Globální rastr použitý v této práci je v rozlišení 50 x 50 m a volně dostupný<sup>5</sup>, nicméně pro určité regiony je k dispozici i rastr s vyšším rozlišením 12 x 12 m.

## **4.3 Zpracování dat**

Vstupní data byla po obdržení zpracovávána v programu ArcGIS. Cílem bylo vytvořit tabulku hodnot obsahující všechny atributy potřebné k porovnání přesnosti měření satelitu v závislosti na svazích, expozici k různým světovým stranám nebo zalesnění. Proces tvorby nových sloupců – atributů této tabulky – vždy spočíval v porovnání dvou vrstev – vrstvy s daty a vrstvy s oblastmi, pro které bylo třeba data z první vrstvy zaznamenat. Zmíněnými oblastmi byly buď vytvořené obdélníkové plochy, kterými se zpravidla zaznamenával průměr z celého jejich pole za pomoci funkce ZONAL STATISTICS, nebo se hodnoty zaznamenávaly jen pro samotné body z měření laseru družice pomocí funkce EXTRACT VALUES TO POINTS.

Protože byla data ICESat-2 stažena jako pásy bodů reprezentující jednotlivé přelety, celý datový soubor byl obrovský a velikostí v prostoru několikanásobně přesahoval ČR. Jako první bylo tedy třeba ho v ArcGISu ořezat nástrojem CLIP na přibližnou velikost zájmových území – Krkonoš a Krušných hor. Tím se výrazně zkrátil čas potřebný k proběhnutí dalších operací. K bodům v těchto menších vrstvách byly následně funkcí EXTRACT VALUES TO POINTS přiřazeny hodnoty undulace geoidu. Odečtením hodnot zvlnění geoidu od hodnot naměřených družicí ICESat-2 byly

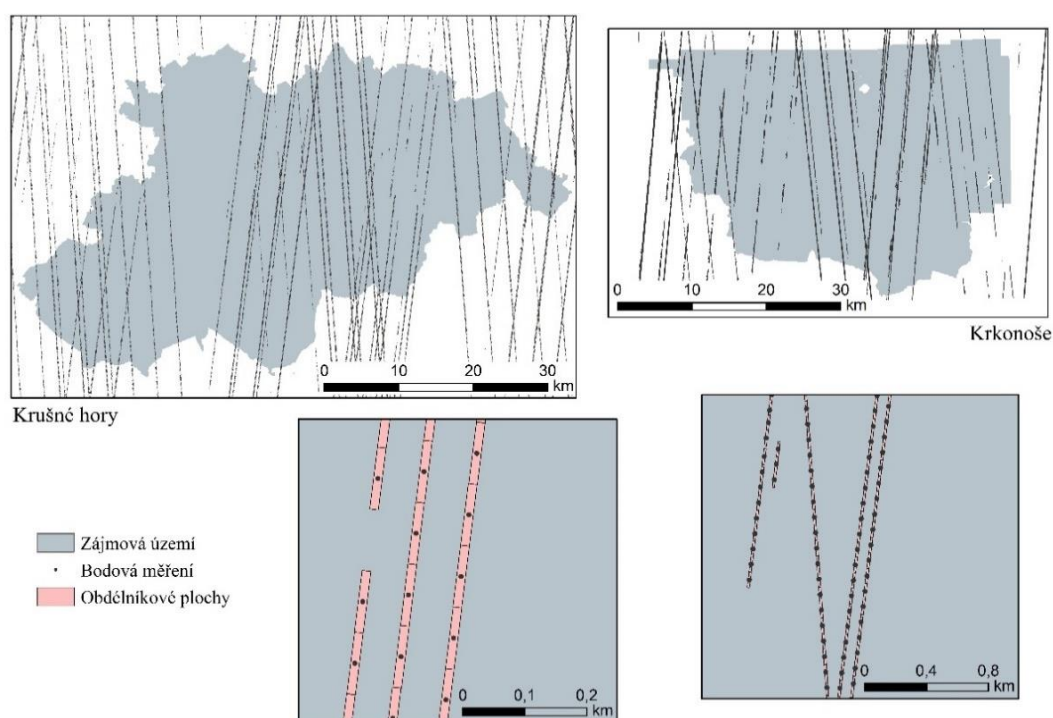
---

<sup>4</sup> Na informačních stránkách spolkové země Sasko (<https://www.geodaten.sachsen.de/>)

<sup>5</sup> Na stránkách TanDEM-X (<https://tandemx-science.dlr.de/>)

získány reálně naměřené nadmořské výšky (ve vztahu vůči geoidu). Pro získání lokálních průměrných hodnot (např. svažitosti) v linii přeletů byly použity obdélníky o rozměrech 14 x 100 m, s delší stranou ve směru přeletu družice. Okolo bodových měření tak vytvořily téměř souvislou „dráhu“. Byly vytvořeny nástrojem<sup>6</sup> přidaným do ArcGISu. Pro takto vzniklé polygony byly následně počítány metriky jejich plochy, reprezentující hodnoty v místech bodových měření satelitu. Obdélníkové plochy spolu s dráhami přeletů nad jednotlivými územími zachycuje obrázek 6. Nástrojem ZONAL STATISTICS byly pro tyto obdélníkové plochy dále vypočítány průměrné výšky z digitálního elevačního modelu terénu Krkonoš a Krušných hor.

Pro každé bodové měření satelitu byly vypočítány všechny výše zmíněné hodnoty – přítomnost lesa, expozice na světovou stranu a svažitost. Vzniklá atributová tabulka byla vyexportována z ArcGISu. Následně byly vypočítány odchylky hodnot ze satelitního měření vůči odpovídajícímu referenčnímu modelu terénu. Pro jednotlivá měření satelitu byla zachována informace o jeho zařazení do jednotlivých skupin na základě přítomnosti lesa apod. pro možnosti další analýzy. Výsledné metriky byly vypočítány v prostředí statistického software R



Obrázek 6: Bodová měření vůči zájmovým územím

<sup>6</sup> Python script k tomuto nástroji byl poskytnut Katedrou aplikované geoinformatiky a územního plánování

## 4.4 Evaluace vertikální přesnosti

Z celkového počtu bodů naměřených družicí ICESat-2 jich do Krkonoš spadalo 7 406 a do Krušných hor 14 973. S těmito bylo dále nakládáno a byly z nich vypočítány výsledné metriky. Přesnost měření ICESat-2 byla posuzována podle hodnot průměrné chyby, anglicky Mean Error (ME) a odmocněné střední kvadratické odchylky, anglicky Root Mean Squared Error (RMSE).

ME byla vypočtena jako suma rozdílů hodnot výšek terénu naměřených družicí a výšek terénu naměřených leteckým skenováním, podělená celkovým počtem hodnot. Tato metrika implikuje průměrnou chybu měření. Může nabývat jak kladných, tak záporných hodnot. Je-li výsledek ME záporný, měření ICESat-2 mají tendenci být podhodnocená, je-li naopak kladný, měření ICESat-2 jsou spíše vyšší než referenční data LiDARu (měření ATLASu bývají nadhodnocená).

RMSE byla vypočítána jako suma kvadratických rozdílů výšek naměřených ATLASem a výšek naměřených LiDAREm, která byla podělena počtem hodnot a následně odmocněna. Jak lze z jejího názvu odvodit, odmocněná střední kvadratická odchylka reprezentuje velikost odchylek od průměru. Výsledek RMSE vychází vždy kladný a model je tím přesnější, čím je hodnota bližší nule. RMSE je jedním z nejvyužívanějších ukazatelů chyby měření.

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

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

## 4.5 Vliv charakteristik prostředí na přesnost měření ICESat-2

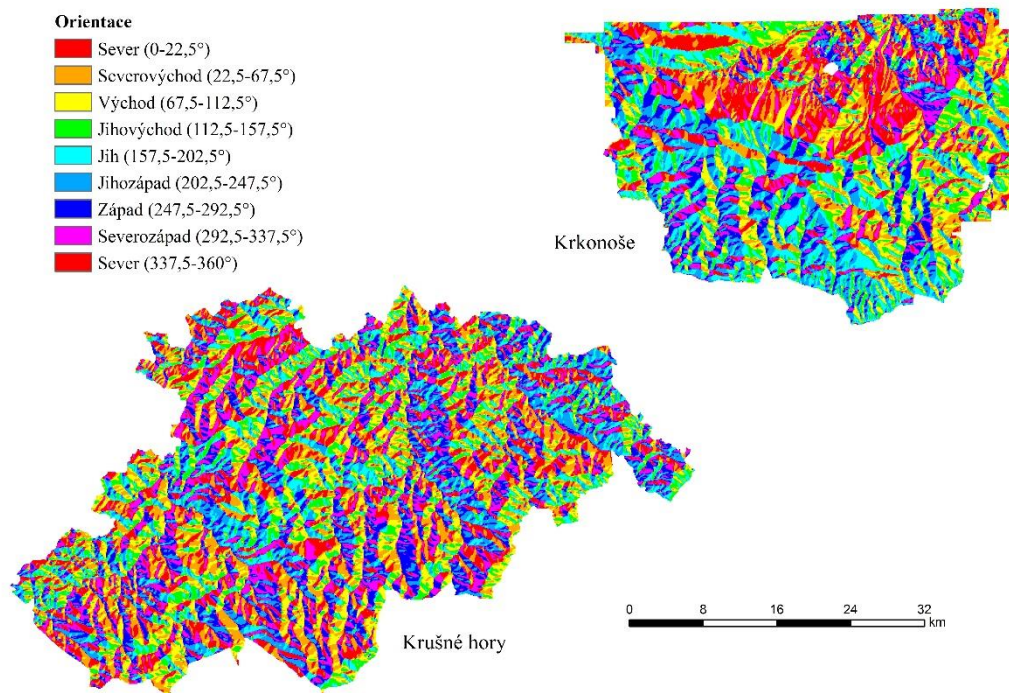
### 4.5.1 Orientace

Pro porovnání přesnosti měření na jednotlivých světových stranách byla rozlišení původních rastrů zájmových území nejprve změněna na velikost buňky 100 x 100 m. Z nich byly použitím funkce ASPECT vytvořeny rastry zobrazující náležitost svahů ke světovým stranám. Z nich byly následně vypočítány hodnoty ve stupních pro



jednotlivé obdélníky (funkce EXTRACT VALUES TO POINTS). Tyto hodnoty byly rozděleny do skupin 1-8 podle světových stran, které jsou na obou zájmových územích znázorněny na obrázku 7.

- |                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1. sever: 337,5-22,5°       | 5. jih: 157,5-202,5°         |
| 2. severovýchod: 22,5-67,5° | 6. jihozápad: 202,5-247,5°   |
| 3. východ: 67,5-112,5°      | 7. západ: 247,5-292,5°       |
| 4. jihovýchod: 112,5-157,5° | 8. severozápad: 292,5-337,5° |



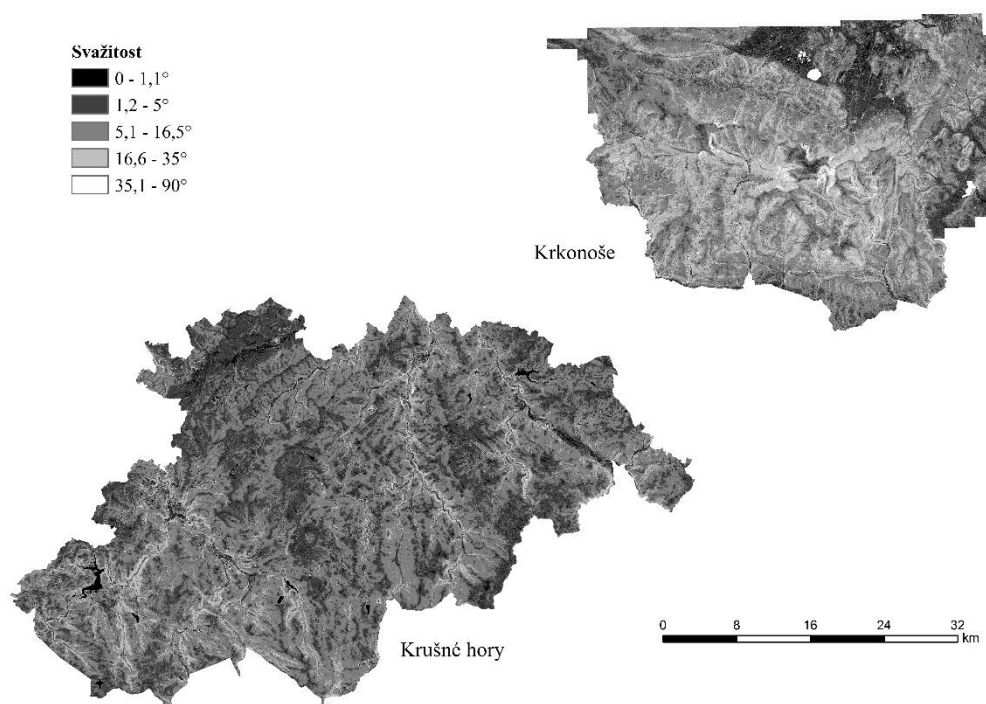
Obrázek 7: Orientace svahů Krušných hor a Krkonoš

## 4.5.2 Svažitost

V programu ArcGIS je ve funkci pro výpočet svažitosti implementován Hornův algoritmus. Ten ke kalkulaci hodnoty svažitosti využívá hodnot mřížky osmi sousedních čtverců a na základě rozdílů výšek okolních buněk s průměrnou je vypočítána svažitost. Ta se uvádí ve stupních nebo v procentech. Čím vyšší číslo vyjde, tím je terén příkřejší a naopak (ESRI, 2016).

Pomocí funkce SLOPE byly nejprve vytvořeny rastry svažitosti území, z nichž byly funkcí ZONAL STATISTICS vypočítány průměrné svažitosti jednotlivých obdélníkových ploch. Nakonec byly hodnoty rozřazeny do kategorií 11-15 (viz obrázek 8) na základě standardního rozdělení svažitosti (Barcelona Field Studies Centre S.L., 2020).

- |   |  |
|---|--|
| 11. rovina: 0-1,1° (0-2 %)              | 14. extrémní svažitost: 16,5-35° (30-70 %) |
| 12. mírná svažitost: 1,1-5° (2-9 %)     | 15. sráz: 35-45°+ (70-100 % +)             |
| 13. výrazná svažitost: 5-16,5° (9-30 %) |  |

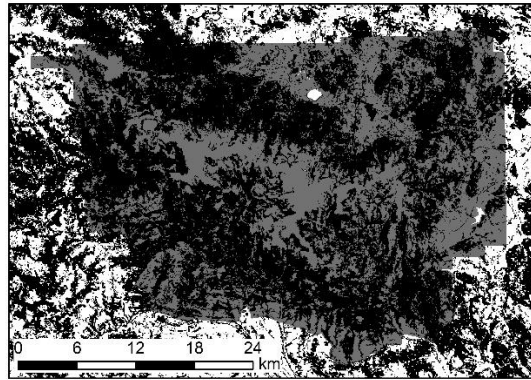


Obrázek 8: Svažitost Krušných hor a Krkonoš

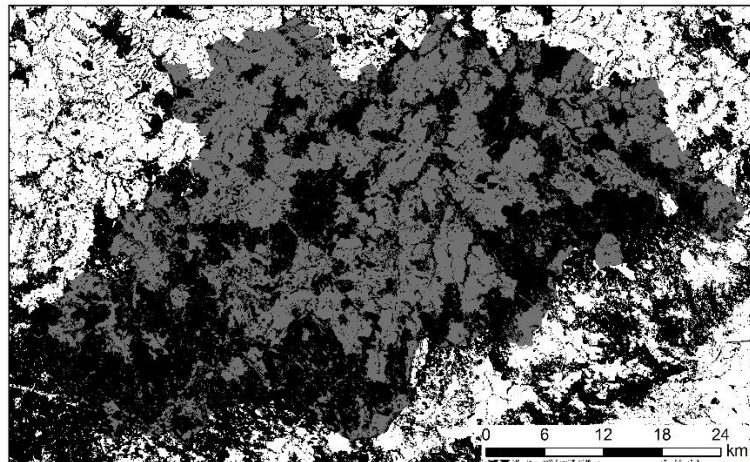
### 4.5.3 Zalesnění

Oblasti s přítomností lesního porostu byly zjištěny funkcí EXTRACT VALUES TO POINTS, která pro každý bod zaznamenala hodnotu v rastru lesů. Byl-li v bodě měření les, výchozí hodnota byla 1 a naopak když les chyběl, hodnota byla 0. Obrázek 9 zachycuje zájmová území v popředí a na pozadí rastr lesů, černá barva znázorňuje přítomnost lesa, bílá jeho absenci.

Zalesnění  
■ Les  
■ Zájmová území



Krkonoš



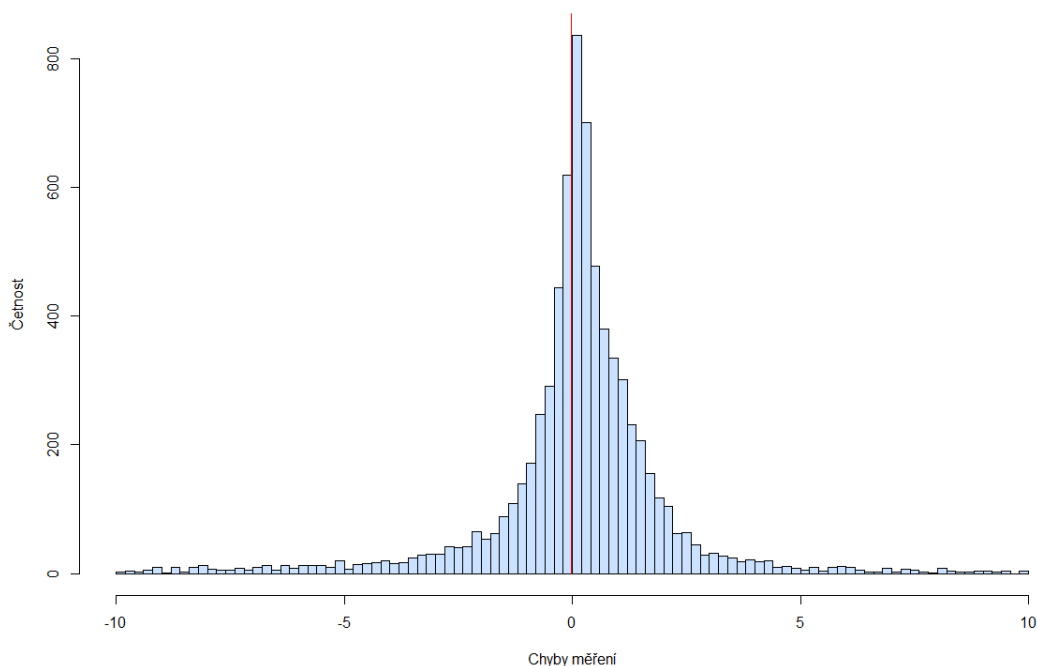
Krušné hory

Obrázek 9: Zalesnění na území Krkonoš a Krušných hor

## 5. Výsledky

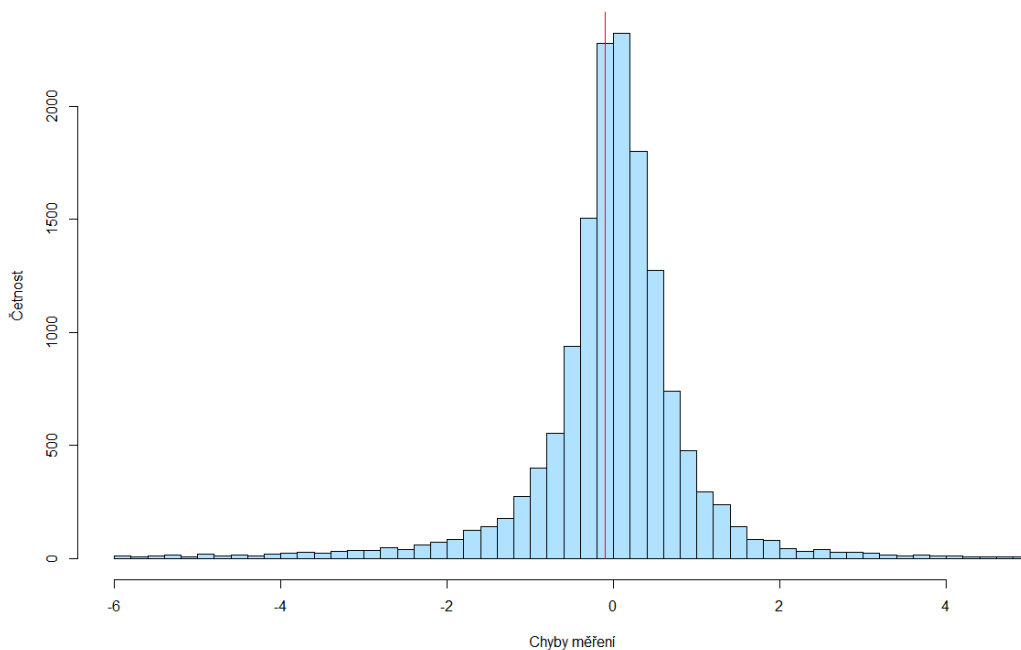
### 5.1 RMSE a ME

Graf na obrázku 10 zobrazuje histogram chyb měření v Krkonoších. Lze z něj vyčíst, že většina chyb měření se pohybovala v rozmezí od -1 do 2 metrů. Chybou měření je zde myšlen rozdíl výšek naměřených LiDAREm a výšek naměřených družicí ICESat-2. Celkový rozsah těchto hodnot byl od -62,32 m do 87,06 m. Pro potřeby zobrazení chyb měření v grafu bylo z celého souboru odebráno 218 extrémních hodnot, které se nacházely daleko od středu a jejich četnost byla tak nízká, že nebyly viditelné. Červeně je v grafu vyznačena průměrná hodnota chyb, která je na území Krkonoš rovna -0,03 m, celková hodnota RMSE na tomto území vyšla 3,95 m.



Obrázek 10: Histogram chyb měření v Krkonoších

V Krušných horách je výsledná průměrná chyba -0,10 m. Graf na obrázku 11 zobrazuje četnosti všech chyb a lze z něj vyčíst, že nejčastější byly chyby v rozpětí hodnot -1 a 1. Rozsah hodnot chyb se na tomto území pohyboval od -43,24 m do 20,77 m. V grafu opět nejsou zobrazeny všechny odlehlé hodnoty (zde jich bylo odebráno 272), protože nebyly viditelné. Na tomto území vyšla hodnota RMSE 2,06 m.



Obrázek 11: Histogram chyb měření v Krušných horách

## 5.2 Zalesnění

Tabulka 1 zobrazuje závislost hodnoty RMSE a ME měření satelitu na zalesnění prostředí v obou oblastech. Kategorie 0 značí bezlesí a kategorie 1 přítomnost lesa. V Krkonoších se RMSE v souvislosti s přítomností nebo absencí lesa téměř nemění. Podle znaménka průměrných chyb laser družice v bezlesí nadhodnocuje a v zalesněné oblasti spíše podhodnocuje – obojí ale pouze v řádech centimetrů.

V Krušných horách je v RMSE při měření zalesněných a holých ploch zřetelný rozdíl jednoho metru. Stejně tak u hodnot průměrné chyby, kde je její hodnota na holé ploše -2 centimetry a na zalesněném území téměř -20 centimetrů.

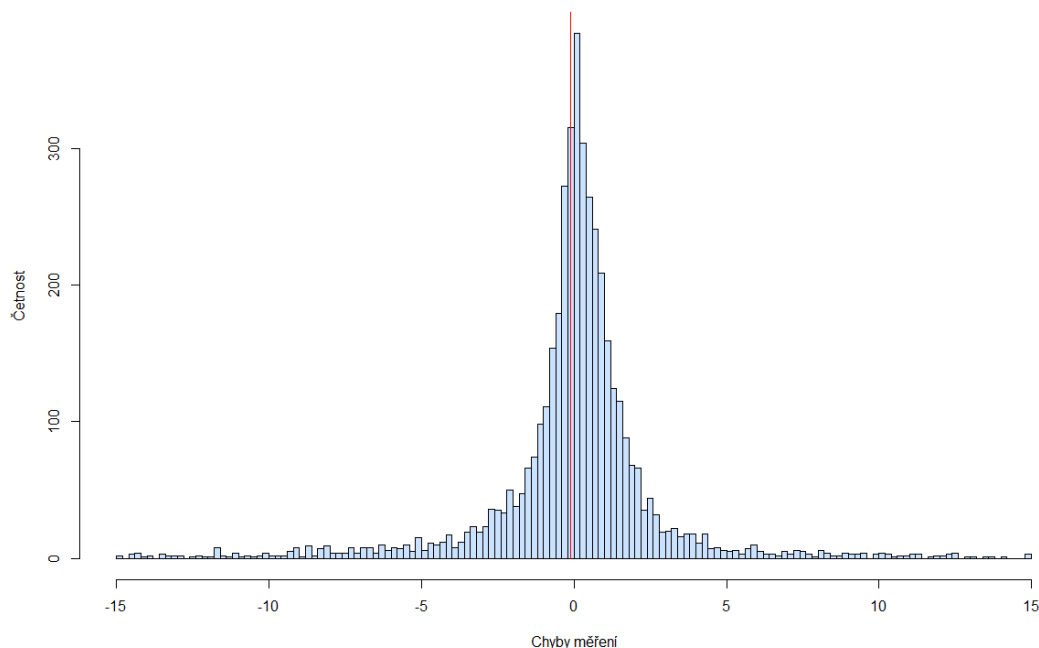
V Krkonoších bylo v nezalesněných oblastech přibližně o tisíc měření méně než v částech zalesněných. Naopak počet měření z Krušných hor je mezi tyto dvě kategorie rovnoměrně rozděluován. V Krkonoších vyšla chyba RMSE pro obě kategorie vyšší než v Krušných horách (pro bezlesí je rozdíl v chybách téměř dva a půl metru). ME měření satelitu v Krušných horách jsou v obou případech záporné, to znamená, že ICESat-2 má spíše tendenci podhodnocovat. V Krkonoších tomu tak je jen v případě měření v zalesněném terénu, na holých místech bývají výsledky měření naopak nadhodnocené.

Zalesnění	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
0	3,97	0,08	3043	1,54	-0,03	7586
1	3,95	-0,11	4363	2,49	-0,19	7387

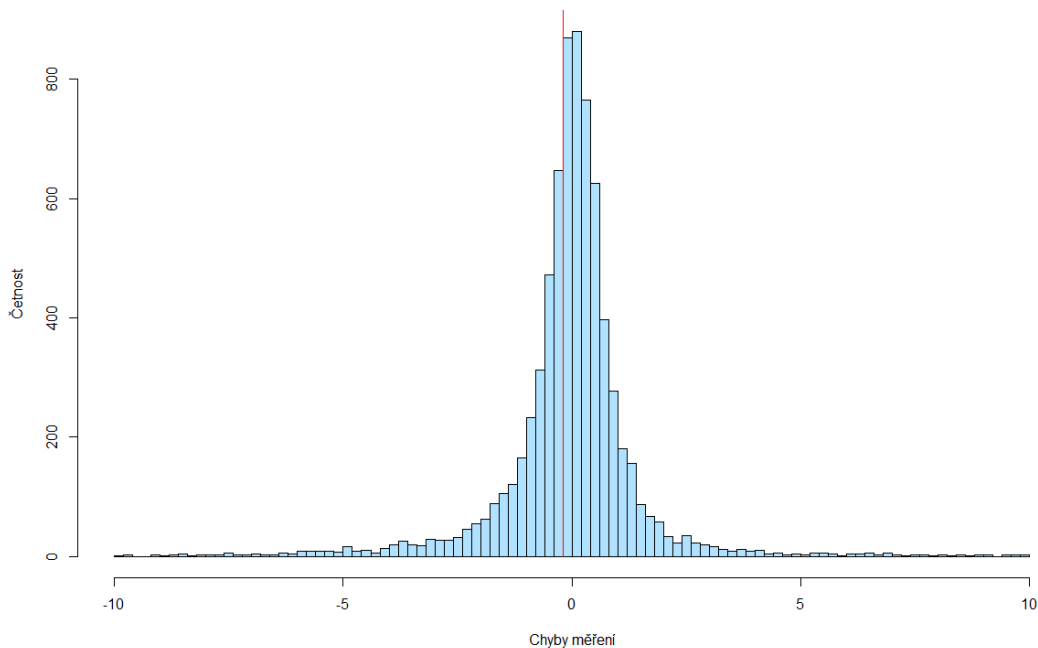
Tabulka 1: Výsledky RMSE a ME v závislosti na přítomnosti lesa

## 5.2.1 Zalesněná plocha

Histogramy na obrázcích 12 a 13 zachycují chyby měření v zalesněných oblastech na území Krkonoš a Krušných hor. V Krkonoších mimo rozsah osy x leží 60 chyb (minimální -41,63 m, maximální 56,92 m) a v Krušných horách jich stejným způsobem není zobrazeno 96 (minimální -41,08 m a maximální 20,77 m). Z těchto počtů je zřejmé, že zalesněné plochy jsou pro přesné měření problematictější a vzniká na nich více odlehlých bodů, které následně ovlivňují (zvyšují) výslednou hodnotu RMSE. V obou případech se většina chyb měření pohybuje mezi -2 m a 2 m.



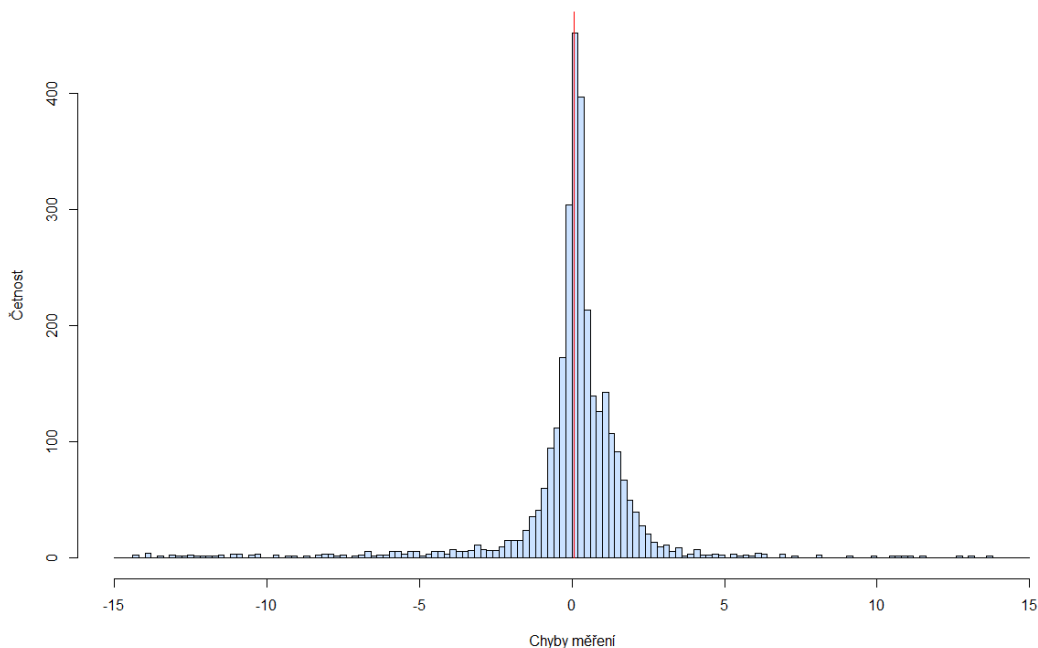
Obrázek 12: Histogram chyb měření na zalesněných plochách v Krkonoších



Obrázek 13: Histogram chyb měření na zalesněných plochách v Krušných horách

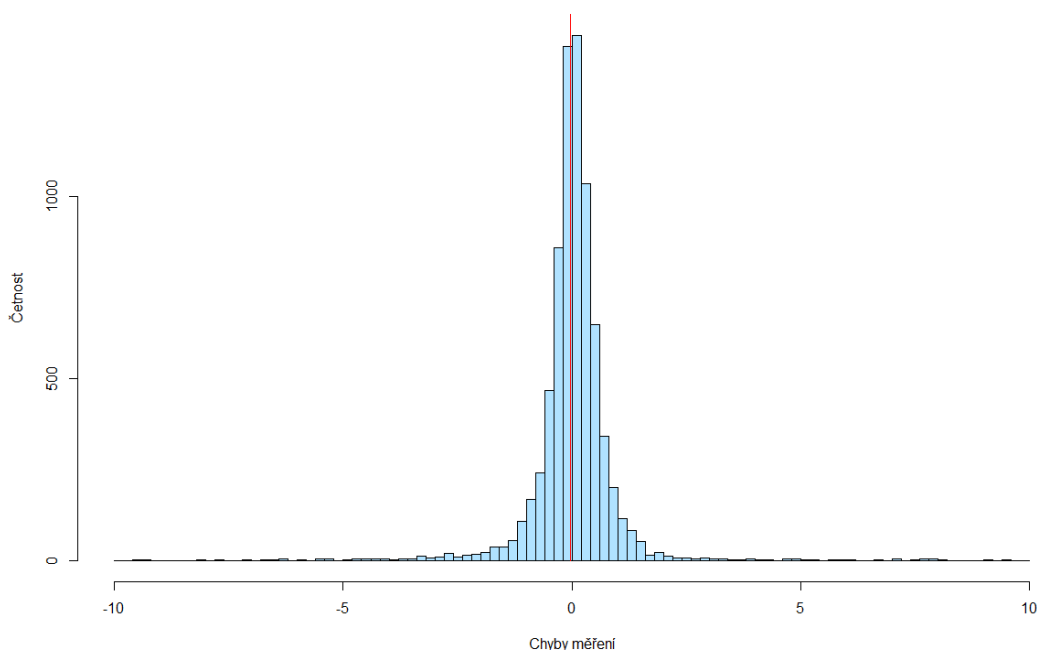
## 5.2.2 Bezlesí

Histogram na obrázku 14 zobrazuje četnost chyb měření na nezalesněných plochách v Krkonoších. Červená přímka opět reprezentuje průměrnou chybu ME o hodnotě 0,07 m. V grafu není zahrnuto 31 extrémních hodnot ze všech 3043 měření, minimum celého souboru chyb je -62,32 m a maximum 87,06 m. Většina chyb měření spadá do intervalu od -1 do 2.



Obrázek 14: Histogram chyb měření na nezalesněných plochách v Krkonoších

Obrázek 15 zachycuje histogram chyb měření v nezalesněném terénu v Krušných horách, celkem zde bylo měřeno 7 586 bodů. Mimo rozsah osy x grafu se nachází 23 odlehlých hodnot, z nichž je nejnižší -43,24 m a nejvyšší 12,76 m. Nejčastější jsou chyby měření od -1 m do 2 m.



Obrázek 15: Histogram chyb měření na nezalesněných plochách v Krušných horách

### 5.3 Orientace

Výsledky výpočtů metrik ME a RMSE v závislosti na světové straně pro obě zájmová území reprezentuje tabulka 2. Vyplývá z ní, že ve většině kategorií měření ATLASu spíše podhodnocují.

V Krkonoších hodnota RMSE v případě pěti světových stran přesahuje 4 metry. Na třech zbývajících stranách – severu, severovýchodě a východě – se hodnota této chyby pohybuje okolo 3 metrů. Tato metrika v Krkonoších celkově dosahuje vysokých hodnot. Průměrná chyba měření je na tomto území záporná na polovině zjišťovaných světových stran, její absolutní nejvyšší hodnota je půl metru, nejnižší 8 centimetrů.

Nejvyšších hodnot RMSE v Krušných horách dosahují měření z jihovýchodních a severozápadních svahů, kde chyba činí 2,5 metru. Až na měření na severovýchodních a východních svazích jsou všechny hodnoty průměrných chyb záporné, jak je již zmíněno výše, to značí, že satelit má tendence podhodnocovat. Největší absolutní



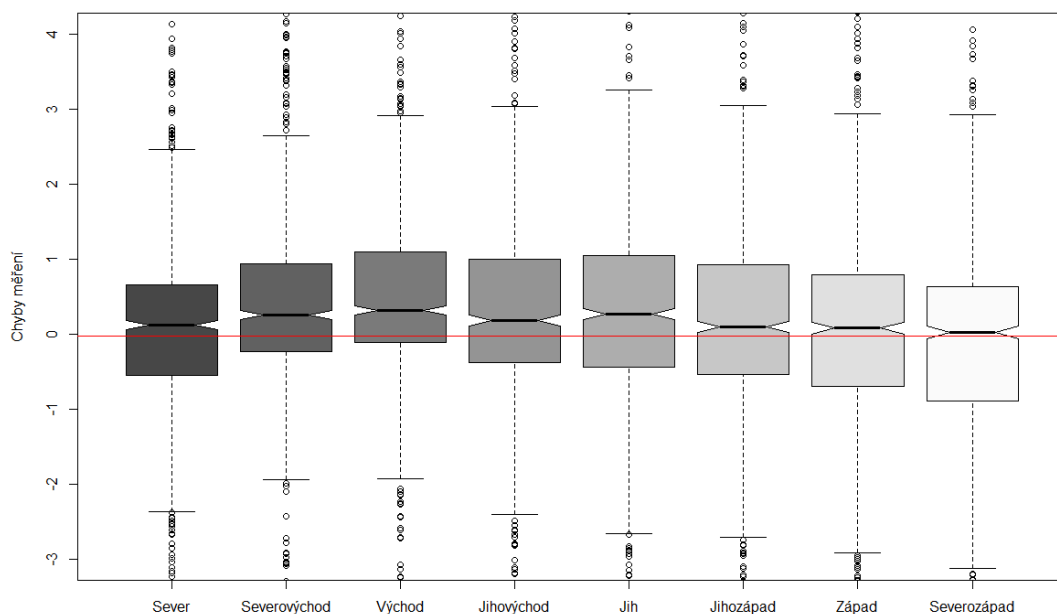
hodnota ME v Krušných horách dosahuje necelých 25 centimetrů (severozápad), nejmenší pak 5,6 centimetru (sever). Měření se v Krkonoších a Krušných horách shodují v tom, že na svazích se severovýchodní a východní orientací jsou jejich výsledky nadhodnocené. Hodnoty chyb měření v Krkonoších jsou obecně vyšší, zato mají zjevnou tendenci být kladné, oproti tomu průměrné chyby v Krušných horách doposud byly převážně záporné a menší.

Orientace	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
S	2,93	-0,23	1104	2,04	-0,06	2056
SV	2,87	0,09	1012	1,45	0,07	2282
V	3,33	0,26	925	1,54	0,01	2111
JV	4,71	0,27	887	2,67	-0,19	1782
J	4,11	-0,21	949	2,05	-0,16	1334
JZ	4,85	0,19	884	1,99	-0,17	1509
Z	4,62	-0,14	890	2,54	-0,24	1930
SZ	4,07	-0,51	755	2,11	-0,17	1969

Tabulka 2: Výsledky RMSE a ME v závislosti na orientaci

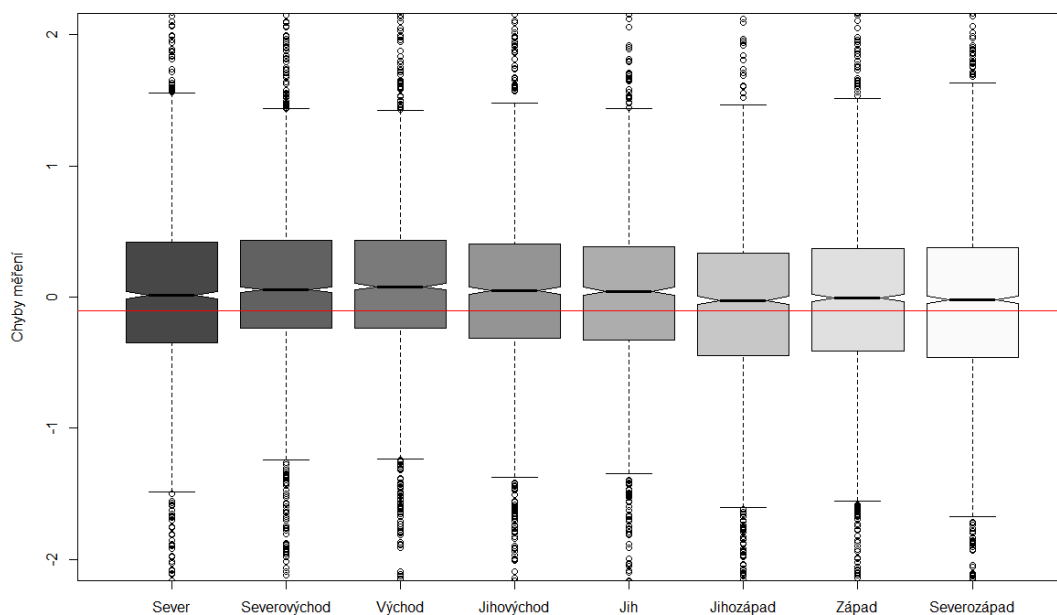
Krabicové grafy na obrázku 16 zobrazují závislost chyby měření na orientaci svahů. Z těchto měření vzniklo 998 outlierů, pro potřeby znázornění grafů jich byla část vynechána, jejich celkový rozsah byl od -62,32 m (na jihu) do 87,06 m (na jihovýchodě).

Medián je u svahů všech orientací téměř stejný (průměrně nejmenší chyby byly z měření na jihozápadě a severozápadě), interkvartilová rozpětí prvních a třetích kvartilů jednotlivých krabicových grafů nejsou výrazně odlišná, ale nejmenší jsou v chybách na severních, severovýchodních a východních svazích. Největší rozpětí od minima k maximu mají chyby měření jižních a severozápadních svahů.



Obrázek 16: Krabicové grafy chyb měření v Krkonoších rozdělených na základě orientace ke světovým stranám

Krabicové grafy na obrázku 17, znázorňující chyby měření v Krušných horách v závislosti na orientaci svahů, jsou viditelně homogennější než krabicové grafy s analogickými výpočty z Krkonoš. Hodnoty mediánů jsou si vzájemně velice podobné, minima a maxima chyb měření na jednotlivých světových stranách mezi jednotlivými grafy mají menší rozptyl než v grafech pro Krkonoše. Nejdlehlější kladný bod se nachází mezi měřeními ze severní strany a jeho hodnota je 20,77 m, nejdlehlějším záporným bodem je měření s chybou -43,24 m z jihovýchodní strany. Z těchto měření vzniklo 1 582 odlehých hodnot.



Obrázek 17: Krabicové grafy chyb měření v Krušných horách rozdělených na základě orientace ke světovým stranám

Z tabulek 3 a 4 lze částečně odvodit, jak moc jsou měření družice ovlivněna přítomností vegetace. Zatímco v Krušných horách je většina hodnot ME záporná, v Krkonoších je přesně polovina výsledků záporná a polovina kladná. V zalesněném terénu Krušných hor jsou hodnoty RMSE oproti jejich plochám s bezlesím zpravidla vyšší minimálně o půl metru. Jinak je tomu v Krkonoších, kde je nejvyšší hodnota RMSE dosažena na nezalesněných jihozápadních svazích.

Nezalesněno						
Orientace	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
S	2,46	-0,27	464	1,80	-0,01	984
SV	2,73	0,07	493	1,13	0,04	1192
V	3,28	0,32	436	1,09	0,03	1067
JV	4,88	0,38	410	2,47	-0,08	1067
J	4,44	-0,12	389	1,10	-0,05	713
JZ	6,52	0,51	312	0,92	-0,04	760
Z	4,00	-0,08	279	1,86	-0,13	870
SZ	2,49	-0,21	260	1,06	0,01	933

Tabulka 3: Výsledky RMSE a ME v závislosti na orientaci a bezlesí

Zalesněno						
Orientace	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
S	3,22	-0,20	640	2,24	-0,10	1072
SV	3,00	0,10	519	1,74	0,10	1090
V	3,38	0,21	489	1,90	-0,02	1044
JV	4,55	0,18	477	2,94	-0,36	715
J	3,87	-0,27	560	2,76	-0,29	621
JZ	3,64	0,01	572	2,67	-0,31	749
Z	4,87	-0,17	611	2,99	-0,33	1060
SZ	4,69	-0,67	495	2,72	-0,33	1036

Tabulka 4: Výsledky RMSE a ME v závislosti na orientaci a zalesnění

## 5.4 Svažitost

Z tabulky 5 je patrné, že v závislosti na svažitosti dosahuje RMSE měření v Krkonoších nejvyšších hodnot v nestrmějších partiích. Hodnoty ME jsou v nižších oblastech kladné a při svažitosti nad 16,5° se mění v záporné, měření ve dvou nejvyšších kategoriích svažitosti na území Krkonoš jsou v průměru podhodnocena. Na rozdíl od kategorií Krušných hor obsahuje každá z kategorií Krkonoš alespoň tisíc měření, jednotlivé výškové stupně jsou na tomto území tedy stejnoměrněji distribuovány. Krušné

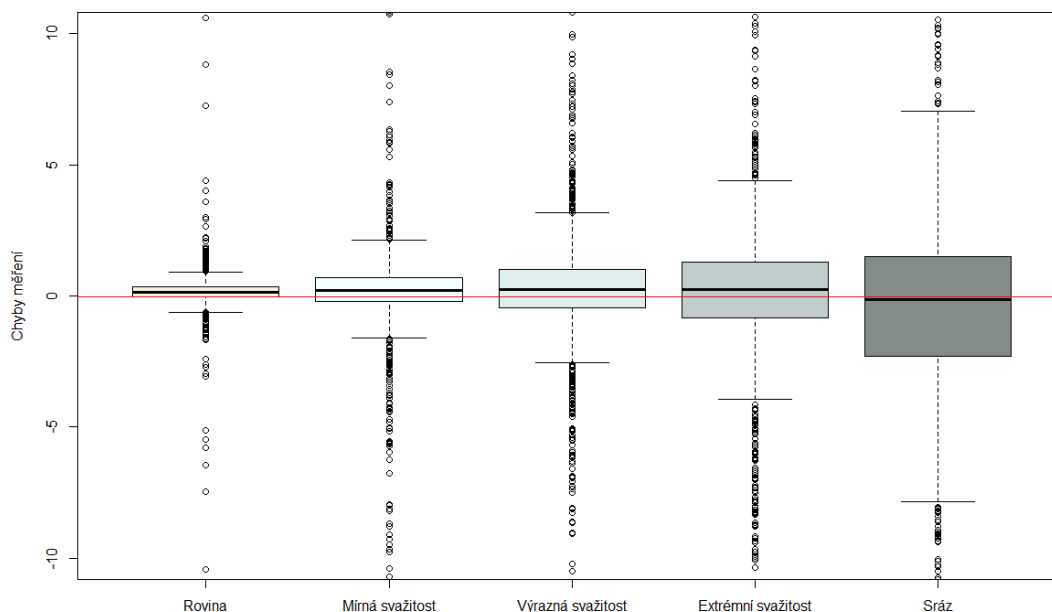
hory mají naopak většinu rozlohy výrazně svažitou (5-16,5°) a jejich plocha nezahrnuje mnoho srázů (35-45°+) či rovin (0-1,1°), jako území jsou tedy homogennější.

Svažitost	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
0-1,1°	1,52	0,11	1161	0,33	-0,39	125
1,1-5°	3,33	0,17	1770	1,20	0,11	4643
5-16,5°	4,23	0,21	1855	1,98	-0,13	9094
16,5-35°	4,10	-0,14	1593	3,96	-0,76	1098
35-45°+	5,73	-0,82	1027	6,64	-4,86	13

Tabulka 5: Výsledky RMSE a ME v závislosti na svažitosti

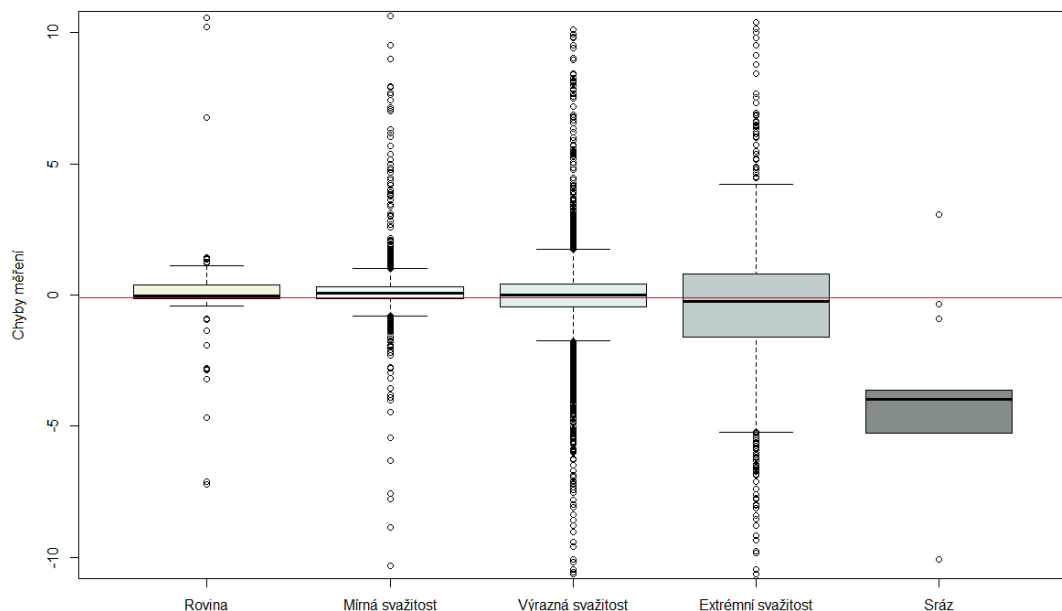
V Krušných horách je průběh RMSE v závislosti na větší svažitosti obdobný jako v Krkonoších, RMSE u obou stoupá se zvyšující se svažitostí. Hodnoty ME jsou až na kategorii vyjadřující mírnou svažitost (1,1-5°) záporné. Nejvyšší RMSE je z oblastí se svažitostí vyšší 35° a činí 6,64 metrů. Tato hodnota ale není signifikantní, protože jí dosahuje kategorie s velmi malým počtem měření, obdobně na tom je i hodnota chyby kategorie rovina (0-1,1°).

Z krabicových grafů na obrázku 18 je patrné, že rozptyl hodnot chyb měření se v Krkonoších zvětšuje s rostoucí svažitostí. Čím větší svažitost, tím je pro ICESat-2 náročnější změřit reálnou hodnotu výšky terénu. Mediány chyb se mezi kategoriemi výrazně neliší. Platí zde, že u strmějších ploch měření vznikalo spíše větší množství odlehklých hodnot než u ploch méně strmých. Červená příčka reprezentuje průměrnou chybu.



Obrázek 18: Krabicové grafy chyb měření v Krkonoších rozdělené na základě svažitosti

Grafy chyb měření v Krušných horách na obrázku 19 nejsou tak jednoznačné jako jejich analogie z Krkonoš. To je dáno i malým vzorkem ve dvou jejich kategoriích. Až na měření ploch se srázy (35-45°+) se od sebe mediány jednotlivých kategorií také příliš neliší. Poloze ostatních krabicových grafů se výrazně vymyká grafické znázornění chyb měření ve srázovitém terénu, to je dáno tím, že z těchto celkem 13 měření je chyba 12 z nich záporná. 11 z těchto celkových 13 měření má navíc absolutní hodnotu chyby větší než 3 metry a chyba měření dalších 3 z nich je větší než 10 metrů. Na rozdíl od Krkonoš se v Krušných horách množství odlehlých hodnot nestupňuje spolu se svažítostí. Nejvyšší hodnoty odlehlých bodů se vyskytovaly v kategorii výrazná svažítost (5-16,5°).



Obrázek 19: Krabicové grafy chyb měření v Krušných horách rozdělené na základě svažítosti

Tabulky 6 a 7 zobrazují hodnoty RMSE a ME nezalesněných a zalesněných území v závislosti na svažítosti. Většina měření průměrných chyb v Krušných horách opět vychází záporně, v Krkonoších jsou obě znaménka zastoupena rovnoměrně.

Krušné hory zabírají větší plochu než Krkonoše, ale svažítost většiny jejich území je oproti Krkonošům méně různorodá a spíše nenabývá vysokých hodnot, a tak do okrajových kategorií rovina a sráz mnoho měření nespadá.

Nezalesněno						
Svažítost	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
0-1,1°	1,02	0,15	859	5,40	-0,55	117
1,1-5°	3,82	0,24	845	1,07	0,11	2963
5-16,5°	5,18	0,45	599	1,39	-0,08	4361
16,5-35°	3,59	-0,19	431	4,31	-0,81	140
35-45°+	6,50	-0,93	309	6,64	-5,23	5

Tabulka 6: Výsledky RMSE a ME v závislosti na svažítosti a bezlesí

Zalesněno						
Svažítost	Krkonoše			Krušné hory		
	RMSE	ME	Počet měření	RMSE	ME	Počet měření
0-1,1°	2,43	-0,02	302	6,56	1,88	8
1,1-5°	2,81	0,11	925	1,41	0,11	1680
5-16,5°	3,69	0,10	1256	2,40	-0,17	4733
16,5-35°	4,28	-0,11	1162	3,90	-0,76	958
35-45°+	5,37	-0,77	718	6,65	-4,63	8

Tabulka 7: Výsledky RMSE a ME v závislosti na svažítosti a zalesnění

## 6. Diskuze

Vyšší hodnoty chyb obecně mohou úzce souviset s odlehlými body (outliery), malým počtem měření, nebo s proměnnými prostředí (zalesněním, orientací, svažitostí) a jejich kombinací, což je nejspíše případ většiny chyb porovnávaných v této práci. V Krušných horách bylo z celkových 14 973 bodů 1 582 odlehlých hodnot, v Krkonoších jich bylo 1 035 ze všech 7 406 měření, celkový poměr mezi extrémními hodnotami a zbytkem dat byl tedy na obou územích jiný, a i jeho velikost pravděpodobně ovlivnila výsledné hodnoty RMSE.

Neuenschwander (2019) se ve studii vydané několik měsíců po začátku mise ICESat-2 věnovala testování algoritmu extrahujícího z bodového mračka výšky terénu a vegetace, jehož výsledkem je datový produkt ATL08. Testován byl na datech získaných z leteckého laserového skenování na dvou různých lokalitách – severní Aljašce (kopcovitý terén, řídká nebo žádná vegetace) a oblasti v Sonoma County (vertikálně variabilnější prostředí, husté zalesnění). Z těchto dat byly nasimulovány přelety družice a test tak byl proveden na souboru měření technicky odpovídajících budoucím měřením ATLASu. Výsledky chyb měření se výrazně neliší od hodnoty RMSE v Krušných horách (2,06 m). Přestože byl dataset ve studii simulovaný (dala by se očekávat vyšší přesnost) a nebyl získán měřením laseru družice, hodnota RMSE na Aljašce dosáhla necelého jednoho metru a v Sonoma County necelých dvou metrů (Neuenschwander, 2019). Do pozdějšího měření ICESat-2 se navíc mohly dostat další chyby, které ještě nejsou pro satelitní LiDAR dokonale popsány, v tomto kontextu nejsou výsledky přesnosti měření z horského prostředí zkoumaného v této práci špatné. Avšak v následujícím článku, který se mezi prvními zabýval reálnými daty získanými družicí ICESat-2, Neuenschwander a Magruder (2019) zkoumaly přesnost měření ATLASu porovnáním vrstvy získané leteckým laserovým skenováním v kopcovitém území ve Finsku (segment dlouhý 200 km) a produktu ATL08 v odpovídající oblasti. Jednalo se o první vydání dat získaných družicí ICESat-2 a po jejich prozkoumání byly implementovány změny v algoritmech klasifikujících bodová mračka, nicméně i tak byla přesnost měření řádově vyšší než na obou zájmových územích této práce. Pro měření výšky terénu vyšla ve studii hodnota RMSE 0,85 m a pro výšku vegetace 3,2 m (Neuenschwander et Magruder, 2019).

V Krušných horách jsou oproti Krkonošům chyby měření obecně menší. V jejich homogennějším prostředí měl laser družice tendence výšku terénu spíše

podhodnocovat, ve většině kategorií vycházela ME záporně, její hodnota pro celé území vyšla -10 cm. V Krkonoších byla hodnota ME celého území téměř nulová (-3 cm), nicméně při pohledu na histogram hodnot chyb v Krkonoších (viz obrázek 10) je vidět, že to je způsobeno pouze rovnoměrným rozložením chyb kolem nuly. V jednotlivých kategoriích už se tento efekt vytrácí, což poukazuje na silnou vazbu chyby na podmínky prostředí. Naopak v Krušných horách se průměrné chyby hodnotě ME celého území ve většině kategorií blíží více.

Po rozdělení souborů bodů ze zájmových území do jednotlivých kategorií dle vybraných vlastností prostředí (orientace, svažítost a zalesnění) lze pozorovat, že hodnoty ME mohou být silně závislé na daném atributu, např. ME pro zalesněná prostranství může být výrazně odlišná od její hodnoty na nezalesněném území.

Vysoké hodnoty RMSE mohou mimo jiné souviset s výrazně svažitém terénem (především při svažítosti větší 30 %). Při vzniku horizontální chyby (např. špatným odhadem inerciální jednotky), kdy je měření provedeno na terénu, ale navigační systém družice ho zaznamená v místě, které je nad terénem, vzniká v návaznosti chyba vertikální. Ta bude na rovině téměř nulová, ale bude se zvyšovat s rostoucí svažítostí a může dosáhnout přes půl metru (Tinkham et al., 2012). Malá horizontální chyba v určení místa měření tedy ve svažitém terénu způsobí výrazně větší chybu vertikální.

V Krkonoších byly hodnoty chyby RMSE v zalesněném a nezalesněném prostoru téměř totožné. V jejich lesnatých oblastech bylo provedeno přibližně o tisíc měření více než v bezlesí. Vzhledem k tomu, že větší chyby měření obvykle vznikají spíše v zalesněném terénu, je možné (ale nepravděpodobné), že podobný výsledek RMSE na zalesněné i nezalesněné ploše je ovlivněn touto nerovností v počtu měření mezi oběma typy ploch. Spíše ale takto podobné hodnoty mohly vzniknout kvůli kombinaci vlivů atributů svažítosti a zalesnění – nebylo by výjimkou, že nejvyšší příkré horské partie by byly nezalesněné. Protože se svažítostí roste chyba měření (je tomu tak na obou zájmových lokalitách), absenci lesa (tzn. očekávanou nižší chybovost) by tak doplnily komplikace při měření v podobě výrazně svažitého terénu (např. přímo srázů). Tím by bylo možné vysvětlit vysoké hodnoty RMSE v bezlesí Krkonoš.

Wang et al. (2019) se zabývali validací přesnosti družice ICESat-2 na Aljašce na rozloze 550 000 km<sup>2</sup>, pracovali s datovým produktem ATL03 (obsahujícím samotné fotony). V této studii byl posuzován vliv SNR („poměru signálu a šumu“), svažítosti, výšky a přítomnosti vegetace a pro srovnání byl taktéž použit referenční LiDAR oblasti. Výsledky studie víceméně odpovídají poznatkům této práce.



Nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím přesnost měření byla také svažitost a nezábatelně měření ovlivňovala i vegetace (chyby se zvětšují s jejím množstvím i výškou). Celková hodnota metriky RMSE (1,96 m) vypovídá o přesnějším měření než na zájmových územích této práce, naopak hodnota ME (-0,61 m) vyšla lépe v Krkonoších i v Krušných horách (Wang et al., 2019).

Hayashi et al. (2013) ve své studii o měření výšky vegetace pomocí systému GLAS, kterým disponovala první družice ICESat také zmiňují, že klíčovým faktorem ovlivňujícím přesnost měření byla svažitost terénu. Studie porovnávala přesnost datových produktů GLA01 (vlnové délky) a GLA14 (výšky terénu) s měřeními vybraných stromů pořízenými v terénu ve dvou zalesněných oblastech v Japonsku. Byly použity a porovnány tři metody odhadu výšek vegetace a z nich byla nejnižší dosažená hodnota RMSE 3,2 m (Hayashi et al., 2013). Podle této studie se chyby měření znatelně zvýšily při větší svažitosti (od 10°). Návrat fotonů k družici byl komplikován jednak svahem a jednak zalesněním. Kvůli velkému diametru měření GLASu se fotony odražené od terénu a od vegetace mohly snadněji smíchat a znemožnit tak rozlišení jednotlivých výšek, čímž rostla chyba měření. Přestože ATLAS provádí měření častěji a o menším průměru a k tomuto jevu by tak nemělo docházet, je z výsledků této práce patrné, že svažitost má na přesnost měření velký vliv, který by měl být znatelnější v zalesněných oblastech, kde je zpětná detekce fotonů ještě náročnější.

V Krušných horách se trend menších chyb měření při absenci lesa v kategoriích s dostatečným množstvím záznamů potvrdil a na základě výsledků z tohoto území by bylo možno soudit, že ATLAS provádí přesnější měření spíše na plochách bezlesí. Jak je zmíněno výše, v Krkonoších naopak měření v některých kategoriích vykazují větší chyby v nezalesněném terénu než v zalesněném.

Oproti Krušným horám byly v Krkonoších ve vztahu k orientaci svahů naměřeny výrazně vyšší RMSE. Důvodem by mohlo být, že hlavní Krkonošské svahy jsou severovýchodní a jihozápadní a leží tedy příčně k přeletům družice. Krušné hory mají hlavní svahy jihovýchodní a severozápadní, jsou tak k linii přeletu družice spíše podélné a v závislosti na orientaci je jejich nejvyšší chyba RMSE 2,6 m – v Krkonoších to je 4,8 m.

Všechny výsledky odpovídají faktu, že Krkonoše jsou různorodější, což je nejspíše také důvod, proč jsou v nich chyby měření větší než v Krušných horách. Zároveň tyto chyby většinou nejsou vysvětlitelné jen jedním faktorem a záleží u nich

právě na vysoké rozmanitosti environmentálních faktorů (např. výrazně svažité úseky střídají rovinatější, u obou se znatelně liší míra zalesnění), se kterou souvisí i zmíněná kombinace více proměnných. Je otázkou, zda jsou jednotlivé atributy prostředí zohledněné v této práci dostatečné k posouzení komplexní problematiky přesnosti měření družice a nebylo by vhodné důkladněji prozkoumat jejich korelaci.

## 7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala hodnocením přesnosti měření laseru družice ICESat-2 na dvou horských územích. Konkrétně byla laserem družice získaná data porovnána s daty pořízenými leteckým laserovým skenováním v podobě digitálního modelu terénu. Z rozdílů hodnot těchto měření byly pro obě zájmová území – Krkonoše a Krušné hory – vypočítány chyby jako metriky ME (v Krkonoších -0,03 m a v Krušných horách -0,10 m) a RMSE (v Krkonoších 3,95 m, v Krušných horách 2,06 m). Očekávaná přesnost měření ATLASu pro datový produkt ATL08 je RMSE do jednoho metru. Krkonoše a jejich vysoká diverzita se pro měření ICESat-2 ukázaly jako problematictější než Krušné hory, avšak celková RMSE na obou územích vyšla vyšší než hodnota jedné z prvních studií, kde byla hodnota RMSE 0,85 m (Neuenschwander et Magruder, 2019). Další práce zabývající se validací produktů ICESat-2 (Neuenschwander et Pitts, 2019b; Wang et al., 2019) měly výsledné hodnoty RMSE přibližně odpovídající hodnotám, které vyšly v této práci.

Původní bodová měření byla rozdělena do kategorií podle vybraných vlastností terénu a vegetace (orientace svahů ke světovým stranám, svažitost a přítomnost zalesnění). Z nich byly vypočítány stejné metriky jako původně z celého souboru dat a na jejich základě byl posuzován vliv jednotlivých environmentálních charakteristik na vlastní měření laseru družice ICESat-2. Celkově byla přesnost měření nejvíce ovlivněna svažitostí, jak v Krkonoších, tak v Krušných horách se RMSE zvyšovala s rostoucí příkrostití terénu. Druhým faktorem nejvíce ovlivňujícím přesnost bylo zalesnění. Tento závěr přímo koresponduje se studií na území Aljašky, zaměřenou podobným směrem (validace dat ICESat-2, analýza proměnných ovlivňujících přesnost měření). Třetí a nejméně vlivnou zkoumanou charakteristikou této práce byla orientace svahů ke světovým stranám. Zároveň je třeba upozornit, že přesnost měření nejspíše také výrazně ovlivnila kombinace těchto environmentálních proměnných. Jejich vliv a korelaci jednotlivých faktorů by bylo vhodné dále prozkoumat a kvantifikovat. Čím diverzifikovanější prostředí, tím je větší výzvou pro družici ICESat-2.

## Reference

- BALATKA, Břetislav et Jan KALVODA, 2018. Terasový systém řeky Ohře mezi Smrčínami a západní částí Sokolovské pánve. *Informace ČGS* [online]. Praha, 2018(372), 1-15 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: [http://prfdec.natur.cuni.cz/~kfggsekr/rggg/pdf/balatka\\_ea\\_18.pdf](http://prfdec.natur.cuni.cz/~kfggsekr/rggg/pdf/balatka_ea_18.pdf)
- BARCELONA FIELD STUDIES CENTRE S.L., 2020. Measuring Slope Steepness. Barcelona Field Studies Centre [online]. Barcelona, 2020 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://geographyfieldwork.com/SlopeSteepnessIndex.htm>
- BLUMENFELD, Josh, 2019. ICESat-2 Data Usher in a New Age of Exploration. *Earthdata* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/tools-and-technology-articles/icesat-2-data>
- BRUNCLÍK, Oldřich, Stanislav BENEŠ et Květoslav VLK, 1986. *Geologie a půdoznalství IIIa: Geologie*. 1st. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA, 1998. Databáze významných geologických lokalit: 2705. *Geologické lokality* [online]. Praha [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <http://lokality.geology.cz/2705>
- DEMTRODER, Wolfgang, 2014. *Laser Spectroscopy I: Basic Principles*. 5th. Berlin: Springer. ISBN 9783642538582.
- DOLANSKÝ, Tomáš, 2001. Laserové skenování – DMT za letu. In: *GIS... Ostrava 2001*. Ostrava. ISSN 1213-239X.
- 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.
- ESA, 2020. ICESat-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2). *Earth Observation Portal* [online]. Paris [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/icesat-2>
- GEOPORTAL, SASCHENATLAS, 2019. Geoportal Sachsenatlas: Metadaten Portal. *Saschen* [online]. Dresden [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: [https://geoportal.sachsen.de/cps/metadaten\\_portal.html?id=a3dba5b2-0118-4d76-ab78-ba656a1b489e](https://geoportal.sachsen.de/cps/metadaten_portal.html?id=a3dba5b2-0118-4d76-ab78-ba656a1b489e)
- GEOWEB, 2004. Krušné hory. In: *GeoWeb: geologický informační server* [online]. Praha [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.gweb.cz/dotazy/d-101/>
- HAYASHI, Masato, Nobuko SAIGUSA, Hiroyuki OGUMA et Yoshiki YAMAGATA, 2013. Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. **81**, 12-18 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.004. ISSN 09242716. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271613001044>

- HUMBOLDT STATE UNIVERSITY, 2014. Canopy Height Model. In: Humboldt State University: Humboldt State Geospatial Online [online]. California, 2014 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: [http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson7-1/applications.html](http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson7-1/applications.html)
- CHALOUPSKÝ, Josef, Jiří ČERVENKA, Ján JETEL et al., 1989. *Geologie Krkonoš a Jizerských hor*. 1st. Praha: Academia.
- KACHTÍK, Lukáš, 2011a. Princip laseru. *Lasery.wz.cz* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
- KACHTÍK, Lukáš, 2011b. Součásti laseru. *Lasery.wz.cz* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/soucasti.html>
- KAŠPAR, Milan, Jiří POSPÍŠIL, Štroner MARTIN, Tomáš KŘEMEN et Miloš TEJKAL, 2003. *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Hradec Králové: Vega. ISBN 80-900-8603-9.
- KRNAP, 2015a. Geohistorický vývoj Krkonoš. *Správa Krkonošského národního parku* [online]. Vrchlabí [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/geohistoricky-vyvoj/>
- KRNAP, 2015b. Vodopis. *Správa Krkonošského národního parku* [online]. Vrchlabí [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/vodopis/>
- KRNAP, 2015c. Půdy Krkonoš. *Správa Krkonošského národního parku* [online]. Vrchlabí [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/pudy-krkonos/>
- KRNAP, 2015d. Podnebí. *Správa Krkonošského národního parku* [online]. Vrchlabí [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.krnep.cz/podnebi/>
- KUSALA, Jaroslav, 2004. OBJEV A OBJEVITELÉ: Cesta k objevu. *Cez.cz* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
- LASCAM, 2015. Historie laserů. *LASCAM* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/historie/>
- MAŇKOVÁ, Ildikó, 2000. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.
- MARTONE, Michele, Paola RIZZOLI, Christopher WECKLICH et al., 2018. The global forest/non-forest map from TanDEM-X interferometric SAR data. *Remote Sensing of Environment* [online]. **205**, 352-373 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.002. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717305795>
- MELICHAR, Vladimír et Petr KRÁSA, 2009. Krušné hory - smutné pohoří. *Ochrana přírody* [online]. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, **2009**(6), 2-7 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/z-nasi-prirody/krusne-hory-smutne-pohori/>

- NASA, 2017. NASA'S ADVANCED LASER TO MEASURE EARTH'S CHANGING ICE. *ICESat-2* [online]. Washington, D.C. [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/articles/nasas-advanced-laser-measure-earth%E2%80%99s-changing-ice>
- NASA, 2018. *ICESat-2: MEASURING THE HEIGHT OF EARTH'S ICE FROM SPACE* [online]. 9 September 2018. Washington, D.C. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page\\_files/ICESat2missionBrochureFINAL1.pdf](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2missionBrochureFINAL1.pdf)
- NASA, 2019. DATA PRODUCTS. *Icesat-2.gsfc.nasa.gov* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>
- NEUENSCHWANDER, Amy, 2018. *ICE, CLOUD, and Land Elevation Satellite (ICESat-2): Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land - Vegetation Along-track products (ATL08)* [online]. Washington, D.C. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/files/ATL08\\_15June2018.pdf](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/files/ATL08_15June2018.pdf)
- NEUENSCHWANDER, Amy et Lori MAGRUDER, 2019. Canopy and Terrain Height Retrievals with ICESat-2: A First Look. *Remote Sensing* [online]. **11**(14) [cit. 2020-02-20]. DOI: 10.3390/rs11141721. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/14/1721>
- NEUENSCHWANDER, Amy et Katherine PITTS, 2019a. ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document for Land-Vegetation: Along-Track Products (ATL08) Release 002. In: *Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite 2 (ICESat-2)* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page\\_files/ICESat2\\_ATL08\\_ATBD\\_r002\\_v2.pdf](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2_ATL08_ATBD_r002_v2.pdf)
- NEUENSCHWANDER, Amy et Katherine PITTS, 2019b. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. *Remote Sensing of Environment* [online]. **221**, 247-259 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.005. ISSN 00344257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425718305066>
- NEUMANN, Tom, Anita BRENNER et David HANCOCK, 2019. *ICESat-2 Data Processing Flow* [online]. Washington, D.C. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: [https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page\\_files/ICESat2\\_ATL03\\_ATBD\\_r002.pdf](https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/page_files/ICESat2_ATL03_ATBD_r002.pdf)
- OBERSKI, Tomasz, 2016. METHODS OF IDENTIFICATION AND DELIMITATION OF CONCAVE TERRAIN FEATURES BASED ON ISOK-NMT DATA. *Technical Sciences* [online]. **19**(1), 59-70 [cit. 2020-03-18]. ISSN 2083-4527. Dostupné z: [http://uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech\\_19\\_1/oberski.pdf](http://uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech_19_1/oberski.pdf)
- OPENALTIMETRY, 2019. OPENALTIMETRY DATA INFORMATION: ATL08. *Openaltimetry.org* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://www.openaltimetry.org/datainfo.html>

- PETRIE, Gordon et Charles TOTH, 2008. Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. SHAN, Jie et Charles TOTH, ed. Topographic Laser Ranging and Scanning [online]. CRC Press, 2008-11-18, s. 1-28 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1201/9781420051438.ch1. ISBN 978-1-4200-5142-1. Dostupné z: <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9781420051438.ch1>
- PILOUS, Vlastimil, 2007. Geografické vymezení. FLOUSEK, Jiří, ed., Jiří FLOUSEK. *Krkonoše - příroda, historie, život*. Praha: Baset, s. 13-17. ISBN 978-80-7340-104-7.
- PILOUS, Vlastimil, 2013. Neživá příroda Krkonoš. *Živa* [online]. Praha: Academia, 2013(4), 160-163 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://ziva.avcr.cz/2013-4/neziva-priroda-krkonos.html>
- REICHL, Jaroslav et Martin VŠETIČKA, 2006. Emise a absorpce světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
- SITOUR, 2009. GEOLOGIE. *Krkonoše: Oficiální turistické stránky Krkonoš* [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <http://www.krkonoze.eu/cs/geologie>
- STRADIOTOVÁ, Anna, 2006. Vznik a vývoj Krušných hor. *Geologie Karlovarska* [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: [http://www.geologiekv.webzdarma.cz/vznik\\_kh.html](http://www.geologiekv.webzdarma.cz/vznik_kh.html)
- ŠTURSA, Jan, Jan JENÍK et Jiří VÁŇA, 2010. Alpínská hranice lesa v Krkonoších a v pohoří Abisko. *Opera Corcontica* [online]. **2010**(47), 129-164 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: [http://opera.krnapp.cz/apex/f?p=103:8:::NO:8:P8\\_ROCNIK\\_ID,P8\\_CLANEK\\_ID,P8\\_CP:47,6,12](http://opera.krnapp.cz/apex/f?p=103:8:::NO:8:P8_ROCNIK_ID,P8_CLANEK_ID,P8_CP:47,6,12)
- THOMAS, Gary et Richard ISAACS, 2011. Basic principles of lasers. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. **12**(12), 574-577 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1016/j.mpaic.2011.09.013. ISSN 14720299. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147202991100227X>
- TINKHAM, Wade, Alistair SMITH, Chad HOFFMAN, Andrew HUDAK, Michael FALKOWSKI, Mark SWANSON et Paul GESSLER, 2012. Investigating the influence of LiDAR ground surface errors on the utility of derived forest inventories. *Canadian Journal of Forest Research* [online]. **42**(3), 413-422 [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.1139/x11-193. ISSN 0045-5067. Dostupné z: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/x11-193>
- VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ et Petr GAVRILOV, 1998. *Úvod do laserové techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT.
- WANG, Cheng, Xiaoxiao ZHU, Sheng NIE, Xiaohuan XI, Dong LI, Wenwu ZHENG et Shichao CHEN, 2019. Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA. *Optics Express* [online]. **27**(26) [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.1364/OE.27.038168. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-27-26-38168>