

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

Validace digitálního výškového modelu TanDEM-X pomocí
dat GEDI
DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Bc. Jiří Rous

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jiří Rous

Prostorové vědy v životním prostředí

Název práce

Validace digitálního výškového modelu TanDEM-X pomocí dat GEDI

Název anglicky

GEDI validation of TanDEM-X digital elevation model

Cíle práce

Cílem práce je posoudit přesnost digitálního modelu terénu TanDEM-X v prostředích s různě složitým terénem a pokryvem vegetace. Formulace dílčích cílů je úkolem autora.

Metodika

Digitální modely terénu (DTM) jsou zásadním zdrojem informací pro různé prostorové analýzy. Zatímco v některých oblastech jsou pro tento účel dostupná velmi přesná data leteckého laserového skenování, v globálním měřítku je dostupnost o poznání horší. V relativně nedávné době byl vytvořen globální výškový model TanDEM-X, který je v současnosti nejaktuálnějším a nejvyužívanějším modelem. Nicméně jeho přesnost je výrazně ovlivněna charakterem terénu a vegetace. GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) je laserový altimetr na palubě mezinárodní vesmírné stanice, který poskytuje velmi přesná data v globálním rozsahu, jež lze využít pro validaci přesnosti modelu TanDEM-X. Kromě výšky terénu poskytuje GEDI také informace o výšce a struktuře porostu, které je možné využít pro vyhodnocení míry pronikání radaru vegetací například v závislosti na její celkové pokryvnosti.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Carabajal, C. C., & Harding, D. J. (2005). ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models. *Geophysical research letters*, 32(22).
- Carabajal, C. C., & Harding, D. J. (2006). SRTM C-band and ICESat laser altimetry elevation comparisons as a function of tree cover and relief. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 287-298.
- Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., ... & Silva, C. (2020). The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of remote sensing*, 1, 100002.
- Gdulová, K., Marešová, J., & Moudrý, V. (2020). Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sensing of Environment*, 241, 111724.
- Quirós, E., Polo, M. E., & Fragoso-Campón, L. (2021). GEDI elevation accuracy assessment: a case study of southwest Spain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 5285-5299.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 16. 2. 2023

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 2. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2023

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci na téma: Validace digitálního výzkového modelu TanDEM-X pomocí dat GEDI vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové 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

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Vítězslavu Moudrému za rady a tipy, které mi během psaní dával, a také celé své rodině.

Abstrakt: Laserový altimetr GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), který je umístěn na Mezinárodní vesmírné stanici, poskytuje globální výšková data. Velmi dobře se hodí pro evaluaci výškových modelů jako například SRTM nebo TanDEM-X DEM. V této práci byly porovnávány výškové rozdíly mezi SRTM nasnímaném v radarovém pásmu C s prostorovým rozlišením 30 metrů a TanDEM-X DEM nasnímaném v radarovém pásmu X s prostorovým rozlišením 30 metrů s několika referenčními výškovými úrovněmi získanými z altimetru GEDI. Jednalo se o úrovně na nejnižším a nejvyšším odrazu a také ve 25, 50 a 75 % výšky vegetace. Evaluace probíhala v pěti zájmových územích rozmístěných na různých kontinentech. Zájmová území se vyznačovala rozdílnou topografií a vegetačním pokryvem. Zaujímal rozlohu 1x1 km. Tato území jsou Amazonský deštný prales, pohoří Himaláje, poušť Gobi, urbanizovaná oblast v jižním Polsku a ostrov Nová Guinea. Ukázalo se, že model SRTM zpravidla dosahuje nižších nadmořských výšek oproti modelu TanDEM-X DEM ve všech zkoumaných pásmech vegetačního pokryvu i studovaných oblastech. K největší podobnosti mezi TanDEM-X DEM a GEDI docházelo v referenční úrovni RH50 a RH75, kde se průměrný rozdíl pohyboval mezi 0,3 a 2,4 metry. V případě SRTM byla největší podobnost nalezena v úrovni RH50 a částečně v RH75. Rozdíl v RH75 byl v porovnání s TanDEM-X DEM podobný, 0,3 – 2,6 metru. Pravděpodobná absolutní shoda se nachází někde mezi těmito dvěma úrovněmi, pro SRTM níže a TanDEM-X DEM výše. Vliv vegetace na prostupnost radarových vln byl prokázán na základě porovnání průměrných rozdílů mezi digitálními výškovými modely a měřením GEDI. Tento rozdíl stoupal v závislosti na hustotě vegetačního pokryvu.

Klíčová slova: GEDI, TanDEM-X, SRTM, evaluace, DEM

Abstract: The Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) laser altimeter, located on the International Space Station, provides global height data. It is well suited for the evaluation of elevation models such as SRTM or TanDEM-X DEM. In this work, the altitude differences between SRTM acquired in radar band C with a spatial resolution of 30 meters and TanDEM-X DEM acquired in radar band X with a spatial resolution of 30 meters were compared with several reference altitude levels obtained from the GEDI altimeter. These were the levels at the lowest and highest return and at 25, 50 and 75% vegetation height. The evaluation was carried out in five areas of interest spread over different continents. The areas of interest were characterized by different topography and vegetation cover. They covered an area of 1x1 km. These areas are the Amazon rainforest, the Himalayan mountains, the Gobi Desert, an urbanised area in southern Poland and the island of New Guinea. It showed that the SRTM model generally achieved lower elevations than the TanDEM-X DEM model in all vegetation cover bands and study areas. The greatest similarity between TanDEM-X DEM and GEDI was observed at the RH50 and RH75 reference levels, where the difference ranged between 0.3 and 2.4 metres. In the case of the SRTM, the greatest similarity was found at the RH50 level and partially at RH75. The differences at RH75 were similar to the TanDEM-X DEM, 0.3 to 2.6 meters. The likely absolute match is somewhere between these two levels, for SRTM below and TanDEM-X DEM above in this range. The influence of vegetation was demonstrated by comparing the average differences between the digital elevation models and the GEDI measurements. This difference increased as a function of the density of vegetation cover.

Key words: GEDI, TanDEM-X, SRTM, evaluation, DEM

Obsah

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE	1
2	LITERÁRNÍ REŠERŠE	3
2.1	Digitální modely	3
2.2	Metody sběru dat pro DEM	4
3	METODIKA	9
3.1	Zájmové území	9
3.2	Charakteristika zájmových oblastí dle odvozených parametrů	12
3.3	Charakteristika výškových modelů	12
3.4	Tree cover	13
3.5	Validační data	14
3.6	Předzpracování dat	16
3.7	Evaluace výškové přesnosti	18
4	VÝSLEDKY	20
4.1	Amazonský deštný prales	20
4.2	Poušť Gobi	22
4.3	Himaláje	24
4.4	Typicky člověkem ovlivněná krajina střední Evropy v Polsku	26
4.5	Ostrov Nová Guinea	28
5	DISKUSE	30
6	ZÁVĚR	33
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	34
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	39

SEZNAM ZKRATEK

DEM – Digital elevation model

DInSAR – Diferenční radarová interferometrie

DPZ – Dálkový průzkum Země

DSM – Digital surface model

DTM – Digital terrain model

IMU – Inertial Measurement Unit

LiDAR – Light Detection and Ranging

MAE – Mean Absolute Error

MERIT – Multi-Error-Removed Improved-Terrain

RADAR – Radio Detection And Ranging

SAR – Synthetic Aperture RADAR

SLAR – Side-looking airborne radar

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

UAV – Unmanned aerial vehicle

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Digitální výškové modely se staly jedním z primárních produktů dálkového průzkumu Země. Hrají klíčovou roli v mnoha oblastech a aplikacích, protože poskytují podrobné a přesné informace o topografii zemského povrchu, které jsou nezbytné pro rozhodování, plánování a řízení v různých odvětvích. Výškové modely jsou cenným nástrojem pro předvídaní katastrof a hodnocení rizik. Lze je použít k modelování potenciálního zaplavení povodněmi (Pathan, et al., 2021) či náchylnosti k sesuvům půdy (Saleem, et al., 2019). Ve vyspělém světě je běžné, že existují národní výškové modely, které jsou buď k dispozici široké veřejnosti zdarma, nebo je jejich využití zpoplatněno. Tak je tomu v případě České republiky. Rozvojové země většinou nemají vlastní modely, které by mohly využívat jak pro plánování, tak hlavně pro analýzy rizik a přírodních katastrof. Jsou tedy odkázány na dostupné výškové modely, které jsou zpravidla vytvořeny z radarových snímků. Radarové snímání s sebou přináší zkreslení v datech, které jsou dány principem fungování radaru. Radarové vlny nepronikají až na povrch, a proto se ve většině případů jedná spíše o digitální modely povrchu a nikoli terénu (Becek, 2008). Mezi takovéto modely patří například SRTM a TanDEM-X DEM, které jsou zkoumány v této diplomové práci.

V současnosti existuje několik pokusů o odstranění vegetace z výše zmíněných DSM. Jedním z nich je MERIT DEM, který byl vytvořen na univerzitě v Tokiu. Byla použita data z několika modelů (např. SRTM, AW3DEM) a laserového altimetru ICESat, která byla vzájemně zkombinována (Yamazaki, et al., 2017). MERIT DEM vykazuje mezi volně dostupnými modely velmi vysokou přesnost především v zalesněných oblastech (Uemaa, et al., 2020).

Nová řešení a přístupy k tvorbě globálních modelů přinášejí laserové altimetry GEDI a ICESat-2 fungující od roku 2018. Jsou schopny snímat i terén pod vegetací. Dále je z nich možno odvodit výškový profil vegetace a určit relativní výšky. Zatím z nich bylo vytvořeno několik modelů korunového zápoje (Potapov, et al., 2020, Lang, et al., 2022). Globální výškové modely z těchto altimetrů podle dostupných zdrojů zatím vytvořeny nebyly.

Tato práce si klade za cíl ověřit chování dvou digitálních výškových modelů odvozených z radarového snímání, TanDEM-X DEM a SRTM, v různých prostředích. Nadmořské výšky z těchto modelů budou porovnány s odvozenými relativními

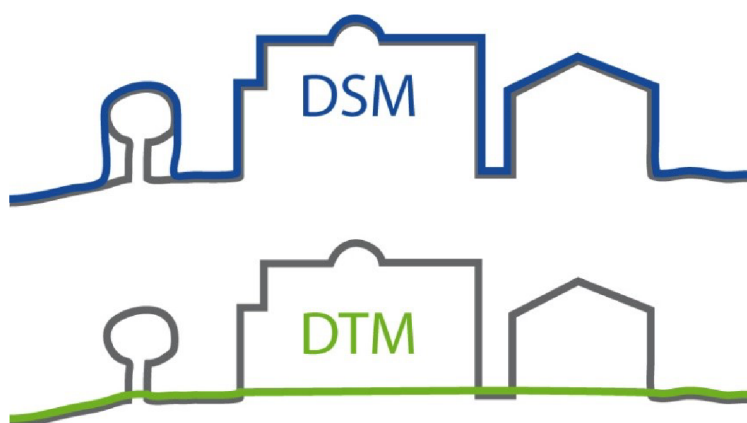
výškami laserového altimetru GEDI a bude (1) odhadnuta prostupnost radarových vln pod povrch vegetace, a (2) zjištěn vliv hustoty vegetačního pokryvu na schopnost penetrace radarových vln.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 Digitální modely

Digitální záznamy o výšce byly jednou z prvních geografických informací, které byly dostupné široké veřejnosti. Takové záznamy jsou nejčastěji distribuovány ve formě digitálních výškových modelů (DEM) nebo jejich derivátů, jako například modely svazitosti či orientace svahu. Nejčastěji se využívají v geomorfologii (Pike, 2000), hydrologickém modelování (Kenward, et al., 2000), v ekologii (Moudrý, et al., 2018), a také pro geografické korekce satelitních snímků (Goyal, et al., 1998). Digitální výškové modely se nejčastěji vyskytují v podobě rastru. Jedná se zpravidla o čtvercový grid, v němž každý pixel nabývá jedné hodnoty – nadmořské výšky. Méně často se pak využívá obdélníkového nebo trojúhelníkového gridu. Fisher, et al., 2006 ve své práci popisují chyby, které jsou velmi často způsobeny prostorovou neurčitostí vycházející z nastavení velikosti či tvaru gridu.

Digitální výškový model je velmi často zaměňován s digitálním modelem terénu (DTM), který by ovšem měl popisovat pouze holý terén bez vegetace (Burrough, 1986). DEM je obecný název pro model, který obsahuje údaje o výšce. Ten se dále rozlišuje na DTM a digitální model povrchu (DSM). Jedná se o dva rozdílné modely, které se nesmí zaměňovat, neboť zobrazují jinou skutečnost. Jak již bylo řečeno výše, tak DTM je očištěn o vegetaci a zástavbu a popisuje opravdu čistý terén. Kdežto DSM popisuje výšku povrchů všech objektů na Zemi (Klimánek, 2006). Tento rozdíl je patrný na obrázku 1.

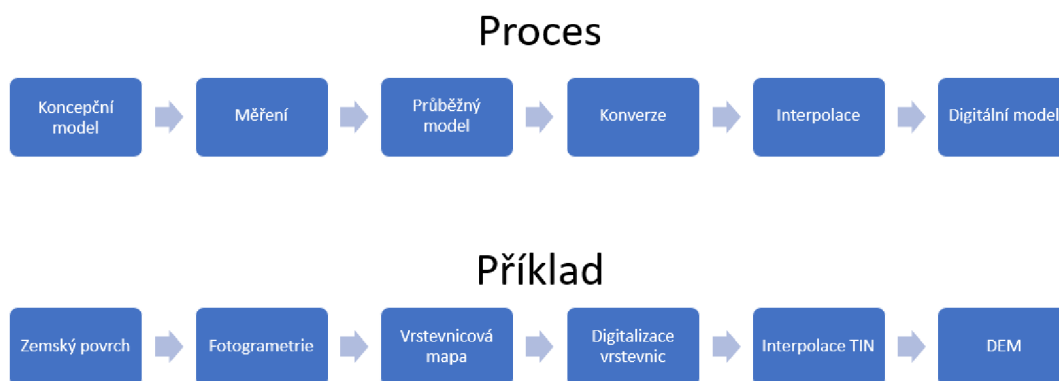


Obrázek 1: Rozdíl mezi DTM a DSM (Hall, 2014)

2.2 Metody sběru dat pro DEM

2.2.1 Technologie pro tvorbu DEM

Je třeba si uvědomit, že tvorba DEM je dlouhý proces (obrázek 2) obsahující velké množství kroků. Nevzniká přímým měřením. Výsledek může být ovlivněn v každém s těchto kroků, proto je důležité volit jak správné metody sběru vycházející z požadované přesnosti, tak i správné nastavení procesních úkonů (Fisher, et al., 2006).



Obrázek 2: Proces tvorby DEM (Fisher, et al., 2006)

V současnosti se můžeme nejčastěji setkat se dvěma metodami sběru dat pro tvorbu výškových modelů. Tou první je pozemní sběr dat. Data jsou získávána buď geodetickým měřením s následnou interpolací nebo terestriálním laserovým skenováním (TLS). Takto získaná data jsou využívána pro lokální potřeby nebo pro zpřesnění modelů velkých měřítek (Baltensweiler, et al., 2017). Druhou, častěji využívanou, metodou je sběr pomocí satelitů, letadel a bezpilotních prostředků (UAV). Tyto prostředky mohou na své palubě nést aktivní nebo pasivní sensory. Mezi aktivní sensory patří radar a LiDAR.

Vypuštěním družic nesoucí radary bylo dosaženo nasnímání rozsáhlých území v relativně krátkém čase. LiDARy se nejčastěji umísťují na UAV či letadla. Jsou využitelná převážně pro menší území. Největším limitujícím faktorem jsou pořizovací náklady a následné náklady spojené s provozem letounů. Dále se LiDARy umísťují do vrtulníků. McLaughlin, 2006 říká, že jejich nižší rychlost zajišťuje přesnější výsledky snímání. Optických sensorů je převážně využíváno v malých zájmových území na úrovni hektarů. Oblast může být nasnímána i levným dronem. Pomocí technologie structure from motion je následně vytvořen DEM. Ten není natolik přesný jako předchozí dva typy – radarový a lidarový DEM, nicméně pořizovací náklady jsou řádově nižší (Andersen, et al., 2006). Mauri, et al., 2021 testovali využitelnost těchto

lokálních modelů pořízených za pomoci UAV pro detekci sesuvů půdy. Existují i globální modely vytvořené stejným způsobem. Jedná se například o AW3D30 DEM, na něž byly použity snímky z družice ALOS (Tadono, et al., 2014).

2.2.2 Radarové snímání

Historie radarové snímání sahá až do šedesátých let devatenáctého století, kdy James Clerk Maxwell objevil elektromagnetické vlny. Až na začátku dvacátého století vědci zjistili, že tyto vlny mají potenciál detekovat objekty. Vynález samotného radaru je připisován německému vynálezci Christianovi Hülsmeyerovi. V roce 1904 sestrojil Telemobiloscope. Zařízení, které bylo schopno pomocí krátkých pulsů radiových vln detekovat loď v mlze. Jeho přesnost byla ovšem omezena (Ender, 2002).

Během 1. světové války zkoumali Marconi a Rutherford možnosti využití radiových vln pro detekci lodí a ponorek. Nicméně první radarový systém byl vyvinut až v roce 1935 týmem kolem Roberta Watson-Watta. Tento systém je znám jako Chain Home. Jednalo se o síť radarů rozmístěných podél pobřeží Anglie, jejichž cílem bylo včasné varování před náletem letadel (Sim, 2014). Během 2. světové války došlo k rychlému rozšíření, kdy několik zemí provádělo vlastní vývoj.

Po válkách pokračoval vývoj a zdokonalování radarových technologií. Přesnost a rozsah využití se zlepšovaly a v současnosti stále zlepšují. Nyní se radar používá nejen k obraným účelům, ale také pro řízení letového provozu (Jiang, et al., 2019), předpověď počasí (Rauber, et al., 2018) a detekci přírodních katastrof (Akkartal, et al., 2008).

Dobrovolný, 1998 popisuje radar jako zařízení, které se skládá z několika komponent, mezi něž patří vysílač, přijímač, anténa a procesor. Vysílač vyšle krátký dávkový signál radiových vln, které se pak šíří vzduchem, dokud nenarazí na objekt. Když rádiové vlny narazí na objekt, část vln se odrazí zpět k radarovému systému. Přijímač pak tyto odražené vlny zachytí a odešle je do procesoru, který data analyzuje a vypočítá vzdálenost, rychlost a směr objektu. Měřením doby, za kterou rádiové vlny doletí k objektu a zpět, může radar určit vzdálenost k objektu. Měřením frekvenčního posunu odražených vln může radar určit rychlost objektu. A porovnáním směru odražených vln z různých míst může radar určit směr objektu.

Radary použity pro dálkový průzkum se ve většině případů umísťují na satelity či do letadel. Jedná se o aktivní systém, který je nezávislý na denní době a minimálně závislý

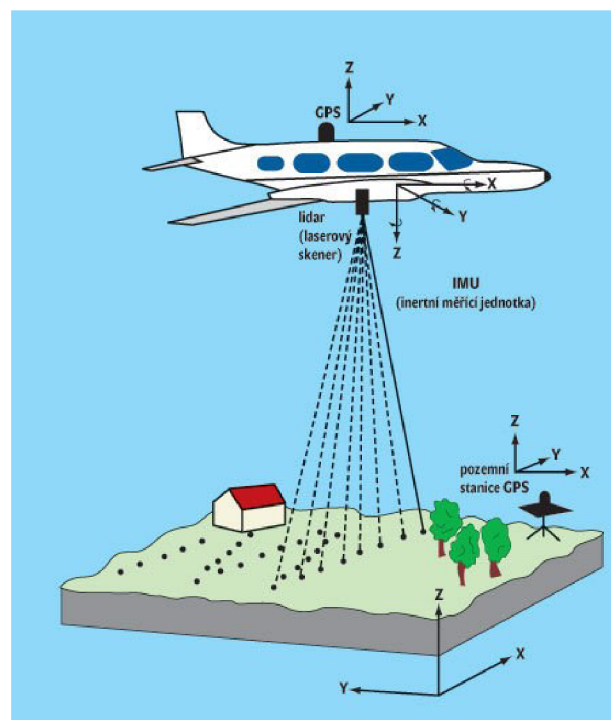
na meteorologických podmínkách. Další vlastností je schopnost pronikat pod některé povrchy. Toto závisí na typu povrchu, vlastnostech prostředí a vlnové délce (Rapant, 2006). Tato schopnost je dále zkoumána v této práci. Existují dvě metody využívané pro dálkový průzkum. Jsou jimi radarová altimetrie a interferometrie. Stammer, et al., 2017 ve své knize hovoří o výhodách altimetrie jako metody využívané pro měření výšky hladiny oceánů, či zaledněných oblastí, která dosahuje přesnosti až několika centimetrů. Radarová interferometrie (InSAR) je technika používaná k vytváření snímků zemského povrchu s vysokým rozlišením a k měření změn výšky a pohybu země. Využívá dva nebo více radarových snímků se syntetickou aperturou (SAR) stejné oblasti pořízených v různých časech a jejich kombinací vytváří interferogram. Může být využito jedné družice nebo konstelace dvou, například TerraSAR-X a TanDEM-X. Interferogramy se vytvářejí porovnáním fáze radarových vln, které se odrážejí od zemského povrchu na dvou nebo více snímcích SAR. Rozdíly ve fázi lze použít k vytvoření mapy změn nadmořské výšky nebo pohybu země v čase. Radarová interferometrie má mnoho aplikací, včetně mapování terénu, monitorování zemětřesení a sopečné činnosti, sledování poklesu půdy a měření pohybu ledu a rychlosti tání ledovců. Používá se v různých oborech, například v geologii, geodézii a ekologii (Kampes, 2006).

2.2.3 LiDARové snímání

Stejně jako radar je i LiDAR aktivním systémem. Je tudíž nezávislý na denní době a počasí. Druhé tvrzení není platné za jakýchkoli podmínek. V případě hustých srážek či sněžení se laserové paprsky odráží o velké částice ve vzduchu a vytváří tak noise, který musí být odfiltrován (Andersen, et al., 2006). Slovo LiDAR je zkratka pro light detection and ranging. Wandinger, 2005 v úvodní kapitole knihy LiDAR popisuje fungování LiDARu tak, že zařízení zvané LiDAR, které je obvykle namontováno na letadle, dronu nebo pozemním vozidle, vysílá laserový paprsek. Nejdůležitější komponenty tohoto zařízení (obrázek 3) jsou zdroj laserového paprsku, velmi přesné GPS, počítače a inertial measurement unit (IMU), tedy jednotky, která se skládá z gyroskopů a akcelerometru, které měří náklony a zrychlení. Vyslaný laserový paprsek se pak odráží od snímaného objektu nebo povrchu a vrací se zpět do lidarového senzoru. Měřením doby, za kterou se laserový puls vrátí, může lidarový senzor vypočítat vzdálenost mezi senzorem a objektem nebo povrchem. LiDAR může vytvářet velmi podrobné 3D modely krajiny, budov a dalších objektů s vysokou

přesností a precizností. Pro zpřesňování bodových mračen se využívá pozemních referenčních stanic. V závislosti na kvalitě sensoru a letové výšce dosahuje přesnost až 5 cm (Baltsavias, 1999).

LiDAR je široce využíván v různých aplikacích, jako je mapování a průzkum, plánování měst, plánování dopravní infrastruktury, lesnictví a monitorování životního prostředí. V posledních letech se LiDAR stále častěji používá také v autonomních vozidlech, kde poskytuje 3D mapování okolního prostředí v reálném čase, což vozidlu umožňuje bezpečnou navigaci a vyhýbání se překážkám. Se stejným využitím se můžeme již setkat i u robotických vysavačů (Fernández, et al., 2012).



Obrázek 3: Princip fungování LiDARu (Gojda, 2006)

LiDARové sensory se neumisťují jen na stroje s nižší letovou výškou. V současnosti existuje již několik sensorů, které byly nainstalovány na satelity ve vesmíru. Dva nejznámější laserové altimetry jsou ICESat-2 a GEDI. Ty mají za cíl globální skenování ledovců, moří či vegetace. Druhotný cíl je vytvoření globálních výškových modelů a jejich derivátů (Lang, et al., 2022).

2.2.4 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je technika používaná k měření a vytváření 3D modelů objektů a prostředí pomocí fotografií. Funguje tak, že se pořídí několik fotografií objektu nebo scény z různých úhlů a poté se pomocí softwaru fotografie analyzují a vytvoří se 3D model. Přesnost a kvalita fotogrammetrie závisí na několika faktorech, jako je rozlišení a kvalita fotografií, počet pořízených fotografií a kvalita softwaru použitého ke zpracování fotografií. S technologickým pokrokem se fotogrammetrie stala přesnější a jednodušší na používání, takže je stále oblíbenějším nástrojem v různých odvětvích.

Fotogrammetrie nejčastěji využívá optických sensorů UAV. Možnost nízké letové výšky zajišťuje vyšší přesnost. Využití UAV podporuje i jednodušší legislativa a nižší cena. Využitelné jsou také letadla a ultralighty. Jednou z výhod použití fotogrammetrie pro tvorbu DEM je, že může pokrýt velké plochy (v případě letadel) rychle a s relativně nízkými náklady ve srovnání s jinými metodami, jako je LiDAR (Light Detection and Ranging), který používá laserové senzory. Kromě toho lze fotogrammetrii použít i pro tvorbu DEM v oblastech, které jsou obtížně přístupné nebo nebezpečné pro práci v terénu, jako jsou odlehlá pohoří nebo oblasti postižené přírodními katastrofami (Uysal, et al., 2015).

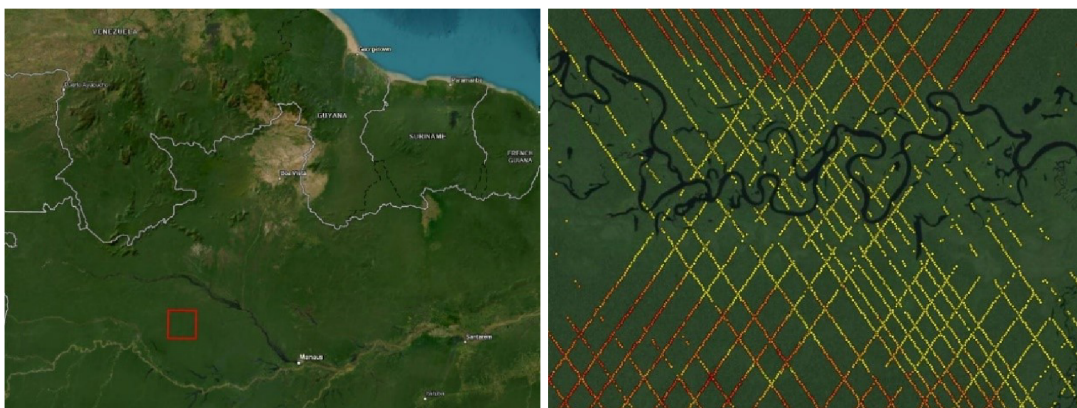
3 METODIKA

3.1 Zájmové území

Pro tuto diplomovou práci bylo vybráno pět zájmových území z různých světadílů. Území byla vybírána tak, aby splňovala různé charakteristiky, co se topografie a zalesnění týče. V každém území je do prostoru náhodně umístěný polygon tvaru čtverce o délce strany 100 km. Tyto polygony byly vytvořeny v software ArcGIS Pro. Jedná se o oblasti v Amazonském deštném pralesě, poušti Gobi, Himalájích, typicky člověkem ovlivněné krajině střední Evropy v Polsku a ostrova Nová Guinea.

3.1.1 Amazonský deštný prales

Polygon v Amazonském deštném pralesě se nachází asi 400 km na severozápad od brazilského města Manaus, jak je možno vidět na obrázku 4. V tomto území se nachází celkem 318 323 pixelů, které obsahují data sebraná senzorem GEDI. Průměrná nadmořská výška této oblasti je dle TanDEM-X 59 m n. m., zalesněnost dle modelu z Landsatu téměř 100 %. Podrobné srovnání jednotlivých území je možno vidět v tabulce 1. Na obrázku 5 jsou poté jednotlivé footprinty klasifikované dle nadmořské výšky.

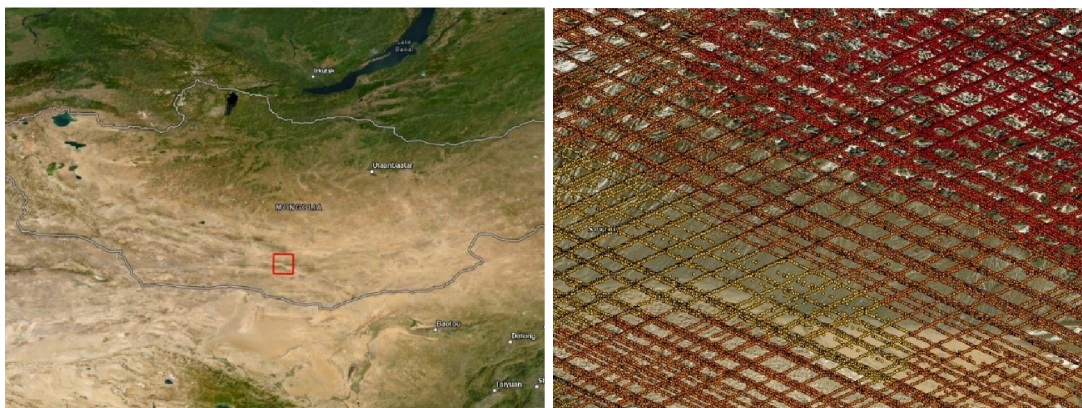


Obrázek 4: Zájmové území Amazonie (vlevo)

Obrázek 5: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo)

3.1.2 Poušť Gobi

Poušť Gobi je jednou z největších pouští na planetě. Zabírá rozlohu více než 4 miliony km². Klima je velmi suché a vegetace řídká (Lu, et al., 2019). Zájmový polygon leží v Mongolsku 100 km severně od hranice s Čínou. Nadmořská výška se pohybuje mezi 1160 a 2530 m n. m. Ve střední části polygonu prochází údolí. Jako v celé poušti Gobi je zalesněnost takřka 0 %.

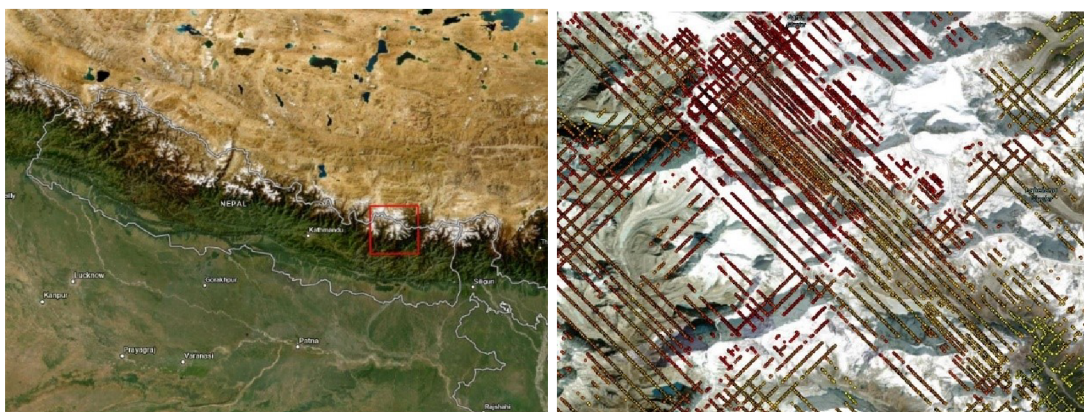


Obrázek 6: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo)

Obrázek 7: Zájmové území poušť Gobi (vlevo)

3.1.3 Himaláje

Zájmové území v Himalájích se nachází v Nepálu. Jedná se o horský terén, ve kterém se vyskytují jak hluboká a příkrá údolí, tak strmé svahy dosahující téměř 90°. Uvnitř polygonu se nachází i jedna z osmitisícovek – Makalu (8463 m n. m.). Nadmořská výška dosahuje v průměru přes 4000 m n. m. Zalesnění se pohybuje kolem 15 %.

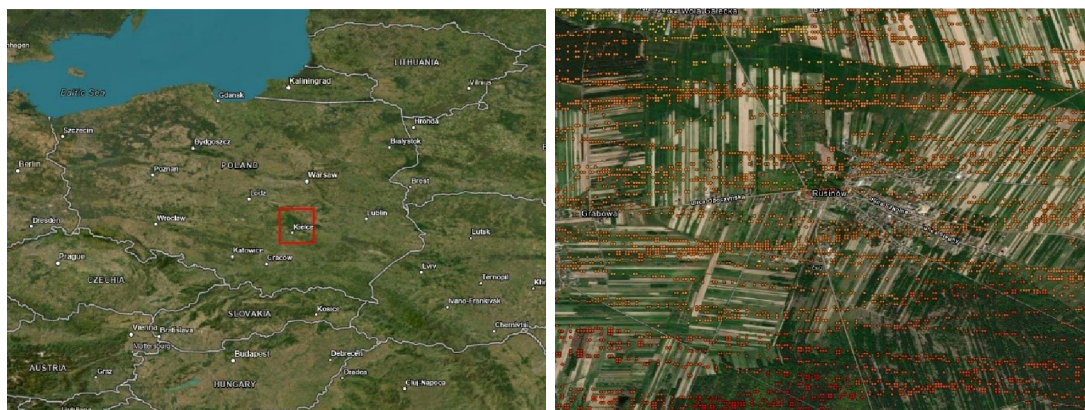


Obrázek 8: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo)

Obrázek 9: Zájmové území Himaláj (vlevo)

3.1.4 Polsko

Polygon nacházející se v Polsku obsahuje několik přírodních rezervací a jeden národní park. V těchto rezervacích převažují lesy nad poli a zástavbou. Mezi těmito rezervacemi se nachází několik větších měst. Průměrná zalesněnost je kolem 30 %. Jedná se o rovinatou oblast. Nadmořská výška je mezi 160 a 650 m n. m.

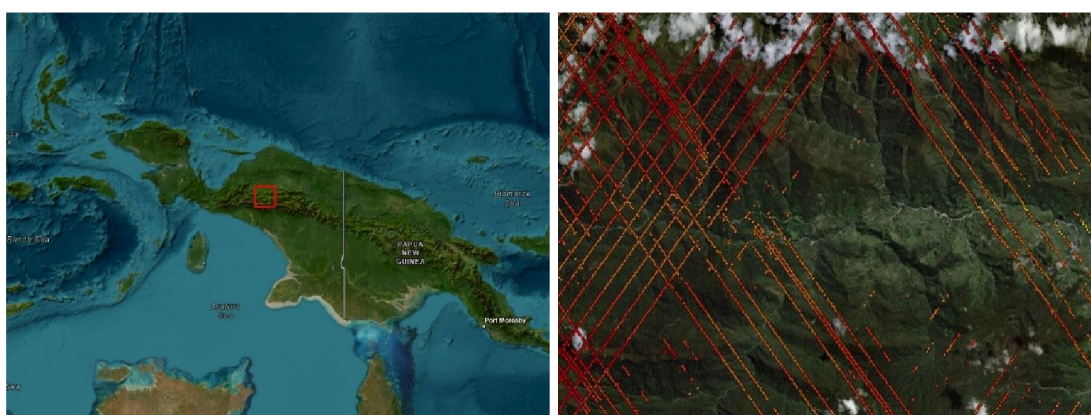


Obrázek 10: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo)

Obrázek 11: Zájmové území Polsko (vlevo)

3.1.5 Nová Guinea

Na Nové Guinee se polygon nachází v její Indonéské části v pohoří Sudirman Range. Do zájmové oblasti spadá i nejvyšší vrchol Oceánie Puncak Jaya (4884 m n. m.). Jedná se o horské prostředí, ale na rozdíl od Himaláje je zalesněné. Bez vegetace zůstávají jen úplné vrcholy hor. Podle indexu tree cover odvozené ze satelitu Landsat je zalesněnost přes 80 %.



Obrázek 12: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo)

Obrázek 13: Zájmové území Nová Guinea (vlevo)

3.2 Charakteristika zájmových oblastí dle odvozených parametrů

Tabulka číslo 1 popisuje průměrné hodnoty jednotlivých atributů. Hodnoty v jednotlivých oblastech se výrazně liší a je zřejmé, že odpovídají očekávaným hodnotám podle charakteru terénu a vegetace v zájmových oblastech. Jedná se o průměry, které byly vypočítány z původních datasetů před úpravou záporných hodnot relativních výšek (patrné u RH25 v poušti Gobi) a před odstraněním velmi vzdálených hodnot.

Highest return [m]	Lowest return [m]	RH25 [m]	RH50 [m]	RH75 [m]	TDX [m]	SRTM [m]	Tree cover Modis [%]	Tree Cover Landsat [%]
Amazonský deštý prales								
69.3	47.5	7.2	11.7	15.2	59.0	56.1	79.2	99.9
Poušť Gobi								
1597.0	1592.2	-1.3	0.0	1.2	1592.2	1591.9	0.5	0.0
Pohoří Himaláje								
4277.7	4261.2	0.9	4.6	8.4	4260.4	4269.3	16.9	13.2
Polsko								
297.8	284.8	0.3	3.7	7.0	288.0	286.6	27.9	32.5
Ostrov Nová Guinea								
2255.6	2229.9	5.4	11.3	16.7	2243.6	2243.7	82.7	55.9

Tabulka 1: Průměrné hodnoty odvozených atributů

3.3 Charakteristika výškových modelů

Hlavním výškovým modelem, který je v této práci řešen je TanDEM-X DEM, který je produktem Německé vesmírné agentury. Druhým, v této práci uvažovaným, modelem je SRTM. Ten slouží pouze k porovnání výsledků se dřívější dobou sběru dat. Jako validační data jsou použity výsledky mise GEDI. V tomto případě se nejedná přímo o výškový model, ale o jednotlivé pixely s hodnotou nadmořské výšky.

3.3.1 TanDEM-X DEM

TanDEM-X DEM byl vyprodukovaný Německou vesmírnou agenturou. Podklady pro tento model byly sbírány čtyři roky mezi prosincem 2010 a lednem 2015 družicemi TanDEM-X a TerraSAR-X. Družice TanDEM-X byla vynesena na oběžnou dráhu v roce 2010, tři roky po družici TerraSAR-X. Jedná se o dvě identické družice obíhající po orbitě ve výšce 514 km v těsné konstelaci 100 až 500 metrů (Bartusch, 2010). Obě družice nesou radar se syntetickou aperturou a snímají v pásmu X. Pro získání co nejlepších výsledků bylo každé místo snímáno minimálně dvakrát ze stejného

postavení družic. V členitějších terénech, jako jsou horská území, bylo snímkování provedeno i vícekrát z různých míst pro eliminaci radarového stínu. (Wessel, et al., 2018). TanDEM-X DEM je globální výškový model dostupný ve třech rozlišeních – 12metrové (0,4 arcsec) a 30metrové (1 arcsec) je k dispozici pouze k vědeckým účelům. Model s 90metrovým (3 arcsec) rozlišením je dostupný k volnému stažení. Výškový model pokrývá celou planetu Zemi od pólu k pólu. Absolutní horizontální přesnost DEM v nejvyšším 12metrovém rozlišení by na 90 % úrovni spolehlivosti neměla přesáhnout 10 metrů. Absolutní vertikální přesnost na stejné úrovni spolehlivosti by také neměla přesáhnout 10 metrů. Relativní vertikální přesnost pro svahy s menším než 20 % sklonem musí být nižší než 2 metry a na svazích s vyšším sklonem 4 metry. 90 % úroveň spolehlivosti znamená, že 90 % buněk na snímku tuto podmínku splní (Wessel, 2018).

Pro účely práce nebyl stahován celý model. Byly pouze vyextrahované jeho hodnoty v pixelech footprintu dat GEDI v prostorovém rozlišení 25 metrů.

3.3.2 Shuttle Radar Topography Mission DEM

Výškový model SRTM byl vytvořen z dat získaných během speciální mise raketoplánu Endeavour. Tato mise probíhala v únoru roku 2000 a snímání trvalo 11 dní. Během této doby byl nasnímán povrch Země mezi 60°severní šířky a 56°jižní šířky (van Zyl, 2001). Každý bod Země byl snímán minimálně dvakrát pomocí 60 metrů dlouhé antény, což byla největší sktruktura, která kdy létala ve vesmíru (Werner, 2001). SRTM DEM byl dostupný ve dvou úrovních. SRTM1 pouze pro USA s prostorovým rozlišením 30 metrů a SRTM3, které pokrývá 80 % pevninského území celého světa s prostorovým rozlišením 90 metrů. V roce 2014 začala USGS poskytovat DEM s prostorovým rozlišením 30 metrů pro celý svět. Souřadnicový systém je WGS84, výškový systém EGM96. Teoretická výšková přesnost je 16 metrů (Farr, et al., 2007).

3.4 Tree cover

Tree cover se v případě využití dat GEDI ukázal jako jeden z klíčových parametrů. V případě nízké či dokonce žádné vegetace vychází relativní výška záporná. V reálném světě je to logický nesmysl. RH100 se vypočítá jako rozdíl nejvyššího a nejnižšího odrazu.

Nižší metriky relativní výšky (např. RH10) budou často vykazovat záporné hodnoty, zejména v podmínkách nízkého vegetačního pokryvu. Je to proto, že poměrně velká část energie vlnoplochy pochází ze země a je pod úrovní nejnižšího odrazu. Například pokud odraz od země obsahuje 30 % energie, pak RH1 až 15 budou pravděpodobně nižší než 0, protože polovina energie z odrazu od země je nižší než průměr odražené energie, který se používá k určení střední nadmořské výšky země ve footprintu. Metriky RH byly vytvořeny pro povrchy s vegetací. Na holých površích nebo nad vodou mohou vykazovat chyby, byť jsou výsledky stále validní (Dubayah, et al., 2021).

3.4.1 Tree Canopy Cover (TCC)

TCC je model odvozený ze snímků pořízených ze satelitu Landsat 7. Ze snímků byly vytvořeny roční bezoblačné kompozity, na které byl následně spuštěn regresní strom, který pixel po pixelu odhadoval procentuální zastoupení vegetace vyšší než 5 metrů (Hansen, et al., 2013). Model byl aktuální k roku 2010. Jeho prostorové rozlišení činí 30 metrů. Byl stažen z Google Earth Engine.

3.5 Validáční data

3.5.1 GEDI

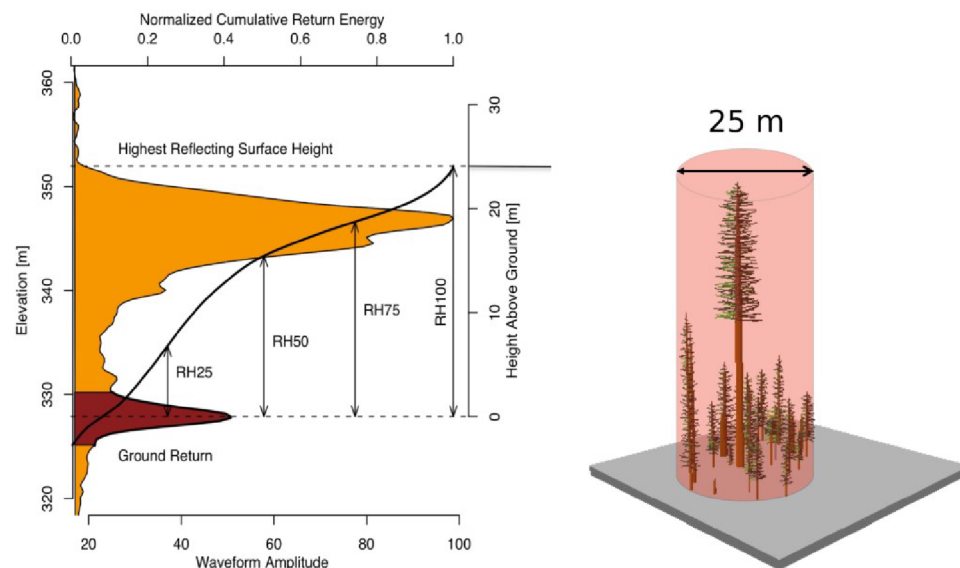
GEDI je zkratka pro Global Ecosystem Dynamics Investigation, do češtiny volně přeložitelné jako výzkum dynamiky globálních ekosystémů. Jedná se o laserový altimetr s velmi vysokým rozlišením, jehož cílem je skenovat nejen topografii Země, ale hlavně lesy. Je umístěn na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS).

GEDI byl na ISS umístěn v roce 2018 s tím, že plánovaná délka mise byla stanovena na dva roky. Později byla délka prodloužena až do ledna 2023. Využívá veškerých výhod, které nám LiDAR nabízí. Z měření jsou odvozeny parametry jako výška lesa (canopy height), vertikální struktura porostu a samotné výškové modely DTM a DSM. To vše zlepšuje naši schopnost charakterizovat koloběh uhlíku, koloběh vody či biodiverzitu. Dále se využívá pro monitoring úbytku a přírůstku ledovců, výšky sněhové pokrývky a management lesa.

Samotné zařízení se skládá ze třech laserů. Dva jsou nastaveny na plný výkon, kdežto třetí je rozdělen na dva paprsky. Celkem tak GEDI pracuje se čtyřmi paprsky, které produkují 8 paralelních drah. Každý z laserů vystřelí 242krát za vteřinu. Na Zemi ozáří plochu o průměru 25 metrů (footprint). Jednotlivé footprinty jsou odděleny podélně

60 metry a příčně cca 600 metry. Celková šířka jednoho záběru je tedy 4,2 km. Během dvouleté mise bylo očekáváno, že vznikne kolem 10 miliard bezoblačných pozorování (Dubayah, et al., 2020). Toto číslo je v současnosti ještě vyšší.

Samotný dataset obsahuje na 156 parametrů, které jsou uloženy jako hodnoty pixelu. Pro účely této práce je podstatná vertikální struktura lesa, konkrétně první a poslední odraz a poté relativní výška. Ta je v datasetu popsána jako relative height (RH), pro každé procento mezi prvním a posledním odrazem. Tedy RH48 je relativní výška vegetace ve 48 %. Toto je znázorněno na obrázku 14.



Obrázek 14: Schéma měření pomocí GEDI

Výhodou datasetu GEDI je jeho komplexnost. Mezi 140 parametry najdeme digitální výškové modely TanDEM-X a SRTM, treecover odvozen z Landsatu nebo MODISu anebo také zastavěnost území na daném footprintu.

3.6 Předzpracování dat

Data GEDI jsou volně dostupná ke stažení v několika produktových řadách. Pro naše účely byl zvolen level zpracování 2 ve variantě A – GEDI02_A, tedy geolokalizované výšky a jejich metriky. Dataset je stažitelný ve formátu HDF5 z portálu USGS. Další přístup k datům je možný přes Google Earth Engine. Tato varianta byla vyhodnocena jako snazší.

V Google Earth Engine byla vybrána území, ve kterých probíhaly analýzy. Data pro každé území byla exportována zvlášť kvůli omezení ze strany platformy. Výhodou tohoto postupu bylo, že byly vybrány jen ty parametry, které byly pro tuto práci relevantní. Došlo tak ke snížení následně výpočetní náročnosti. Konkrétně se jednalo o nejvyšší a nejnižší odraz, relativní výšku v 25, 50 a 75 %, TanDEM-X, SRTM a Tree Cover.

```
var qualityMask = function(im) {
  return im.updateMask(im.select('quality_flag').eq(1))
    .updateMask(im.select('degrade_flag').eq(0));
};

//load layers (one as an example)
var datasetHIGH =
ee.ImageCollection('LARSE/GEDI/GEDI02_A_002_MONTHLY')
  .map(qualityMask)
  .select('elev_highestreturn');

//calculate mean of all images in selected layer
var meanHIGH = datasetHIGH.mean();

// make one multiband
var multi =
ee.Image.cat([meanHIGH, meanTDX, meanLOW, meanRH25, meanRH50, meanRH75, meanSRTM, meanTC_landsat, meanTC_modis]);

// rename bands
var renamed = multi.select(
['elev_highestreturn', 'digital_elevation_model', "elev_lowestmode", "rh25", "rh50", "rh75",
"digital_elevation_model_srtm", "landsat_treecover", "modis_tree
```

```

cover"], // old names
  ['First',
'TDX', "Last", "rh25", "rh50", "rh75", "SRTM", "TC_landsat", "TC_modi
s"]      // new names

//change region and name, region imported as shp.
Export.image.toDrive({
  image: renamed,
  scale:25,
  description: 'Multiband_polsko',
  folder: "GEDI",
  region: polsko
});

```

Z Google Earth Engine bylo staženo několik multiband rastrů, kdy každý představuje jedno zájmové území. Tyto rastry byly pomocí R skriptu převedeny na Dataframe, tedy tabulku s čísly. Jelikož byly z rastru odečteny hodnoty i v místech, kde nejsou dostupná GEDI měření, obsahoval Dataframe velké množství řádku s NA hodnotami, ty bylo nutné odstranit.

```

#import multiband
polsko_stack<-stack("data/Multiband_polsko.tif")
#convert to dataframe nad remove NA values
polsko_point_stack<- as.data.frame(polsko_stack, xy=TRUE)
polsko_point_NA<-na.omit(polsko_point_stack)
#make geometry nad save shp
polsko_geo<-polsko_point_NA %>%
  as.data.frame %>%
  sf::st_as_sf(coords = c(1,2))
st_write(polsko_geo, "polsko_geo.shp")

```

3.7 Evaluace výškové přesnosti

3.7.1 Podobnost nadmořských výšek

Zhodnocení podobnosti naměřených nadmořských výšek probíhalo ve dvou fázích. V té první nebyly uvažovány žádné dodatečné parametry. Ve druhé byl uvažován vliv vegetačního pokryvu. Datasets TanDEM-X, SRTM a GEDI jsou poskytovány v extentu a referenčním systému WGS_1984 (EPSG: 4326) a stejném výškovém systému D_WGS_1984. Bylo porovnáváno celkem pět odečtených výšek – highest, lowest, RH25, RH50 a RH75. Nadmořská výška v relativních výškách byla odvozena jako lowest+RH(x).

Pro každý jednotlivý footprint byl vypočítán rozdíl mezi parametry GEDI a radarovými výškovými modely. Tyto rozdíly byly následně vyneseny do density plotů. V případě velkého rozdílu nad 100 metrů byly hodnoty smazány jako outliers. K takovýmto chybám může docházet při vysoké oblačnosti se saturovanými mraky (Carabajal, et al., 2005).

V případě nízkého či žádného vegetačního pokryvu dochází ke kreslení výsledků relativních výšek. Všem záporným hodnotám byla přiřazena nová hodnota 0.

3.7.2 Validační metriky

Pro vyhodnocení přesnosti byly zvoleny dvě metriky – aritmetický průměr a směrodatná odchylka (SD). Přístup vycházel z dřívější studie Carabajal, et al., 2005, která validovala SRTM pomocí altimetru ICESat. Před samotným vyhodnocením dat bylo ověřeno, že nenabývají normálního rozdělení.

Aritmetický průměr je míra centrální tendence, která se vypočítá sečtením souboru číselných hodnot a následným vydělením součtu celkovým počtem hodnot v souboru. V této práci se jedná o hodnoty pixelů a jejich počet. Matematicky lze vyjádřit jako:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

kde: x_i je hodnota pixelu (výška)

n je počet pixelů

Směrodatná odchylka je statistická míra velikosti variability nebo rozptylu v souboru číselných údajů. Ukazuje, jak moc se hodnoty v souboru dat odchylojí od střední nebo průměrné hodnoty. Matematicky lze vyjádřit jako:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

kde: x_i je hodnota pixelu (výška)

n je počet pixelů

4 VÝSLEDKY

4.1 Amazonský deštný prales

V Amazonském deštném pralesě se nachází měření GEDI ve všech intervalech vegetačního pokryvu (tabulka 2). Dle očekávání se většina měření (99,9 %; celkem 317406 z 317786 měření) nachází v intervalu pokrývnosti vegetací nad 80 %. Nadmořská výška TanDEM – X DEM je v tomto případě výrazně ovlivněna vegetací a model nejlépe odpovídá nadmořské výšce vegetace kolem RH50 (obrázek 15). Průměrný rozdíl výšek mezi TanDEM-X DEM a GEDI pro RH50 nikde nepřekročil hodnotu jednoho metru (tabulka 2).

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
215		19		76		70		317406		317786	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
TDX - GEDI Lowest											
3.2	8.8	3.6	6.3	4.6	7.7	6.9	7.8	12.0	6.6	12.0	6.6
TDX - GEDI Lowest - RH25											
1.5	9.6	1.6	5.6	1.8	6.8	3.1	6.3	4.7	4.3	4.7	4.3
TDX - GEDI Lowest - RH50											
-0.2	10.3	-0.5	5.4	-0.7	6.8	0.1	6.0	0.3	3.6	0.3	3.6
TDX - GEDI Lowest - RH75											
-2.4	10.8	-2.9	5.7	-3.3	7.0	-2.7	5.9	-3.2	3.6	-3.2	3.6
TDX- GEDI Highest											
-7.7	12.3	-8.1	6.1	-8.7	7.2	-8.4	6.0	-9.8	5.0	-9.8	5.0

Tabulka 2: Rozdíly ve výšce v Amazonském deštném pralesě (TDX)

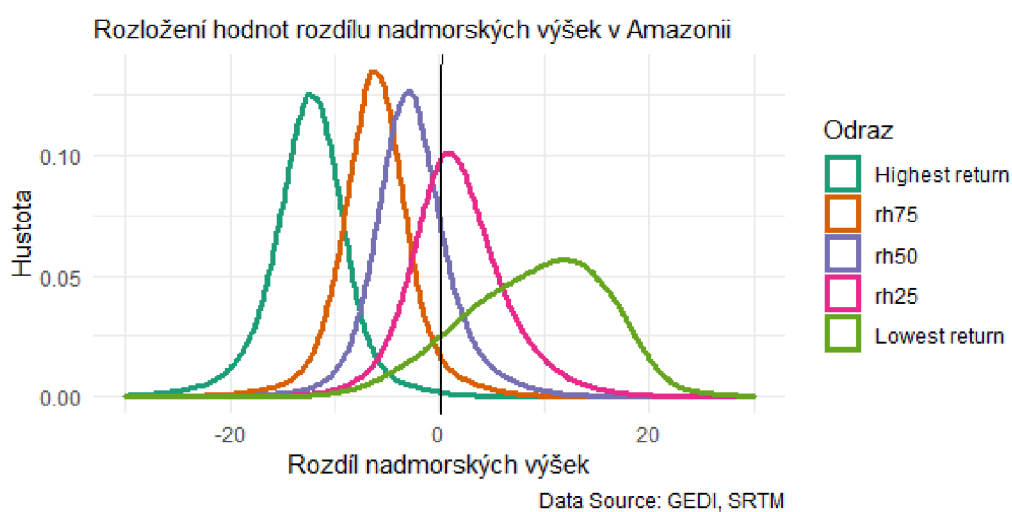


Obrázek 15: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Amazonii (GEDI, TDX)

V případě výškového modelu SRTM dochází k rozdílným výsledkům oproti TanDEM-X DEM. Při nízkém procentu vegetačního pokryvu do 40 % penetruje radar téměř až na zemský povrch (tabulka 3). V případě pokryvu do 20 % dosahuje radarové pásmo C dokonce hlouběji než laserové paprsky GEDI. Při vyšším vegetačním pokryvu proniká radar do nadmořské výšky v RH25 (obrázek 16). Směrodatné odchylky jsou víceméně shodné v obou porovnávaných modelech. Nejmenší směrodatné odchylky je dosahováno ve vegetačním pokryvu nad 80 %. To může být dáno jak vyšším množstvím měření, tak větší homogenitou prostředí.

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
215		19		76		70		317406		317786	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
SRTM - GEDI Lowest											
-0.8	8.9	1.0	5.8	1.5	7.5	3.5	7.6	9.1	6.9	9.1	6.9
SRTM - GEDI Lowest-RH25											
-2.5	9.6	-1.0	5.2	-1.2	6.3	-0.3	6.2	1.8	4.7	1.8	4.7
SRTM - GEDI Lowest-RH50											
-4.2	10.2	-3.1	5.1	-3.8	6.5	-3.3	6.1	-2.6	4.0	-2.6	4.0
SRTM - GEDI Lowest-RH75											
-6.4	10.7	-5.5	5.2	-6.4	6.7	-6.2	6.1	-6.1	3.9	-6.1	3.9
SRTM- GEDI Highest											
-11.7	12.4	-10.7	5.4	-11.8	7.0	-11.8	6.2	-12.7	5.2	-12.7	5.2

Tabulka 3: Rozdíly ve výšce v Amazonském deštném pralese (SRTM)



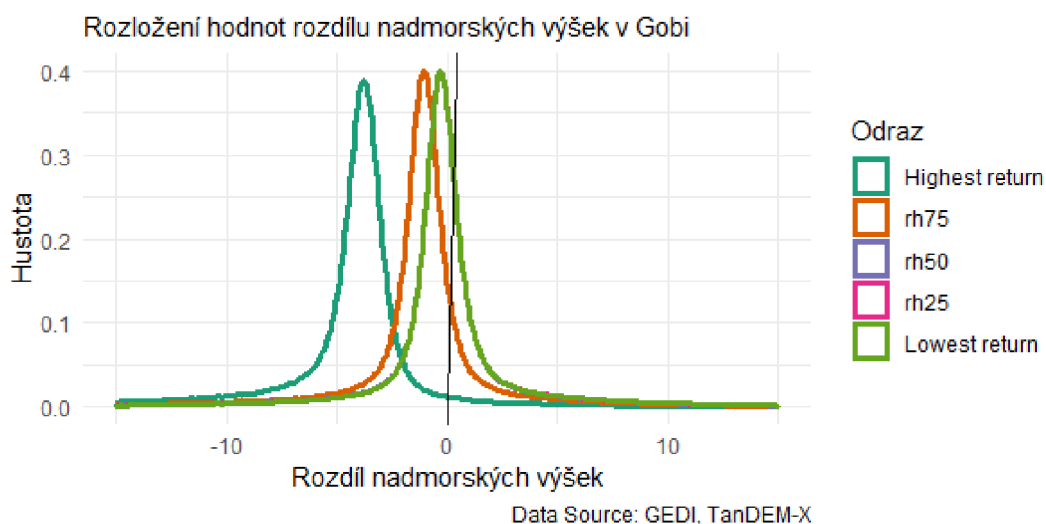
Obrázek 16: Density plot rozdílu nadmořských výšek v Amazonii (GEDI, SRTM)

4.2 Poušť Gobi

Všechna měření GEDI se v poušti Gobi nacházejí ve spodním intervalu vegetačního pokryvu (tabulka 4). Tato skutečnost způsobila problémy při vyhodnocení. Pouze 1 % ze všech pixelů mělo kladnou relativní výšku v RH25. Po korekci této chyby vyšlo, že TanDEM – X a GEDI se shodují na jeho nejnižším odrazu, který je považovaný za ground. Všechny posuzované referenční úrovně mají nízkou směrodatnou odchylku. To ukazuje na nízkou variabilitu v datech (obrázek 17)

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
1116239		X		X		X		X		1116239	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
TDX - GEDI Lowest											
0.0	4.3	X	X	X	X	X	X	X	X	0.0	4.3
TDX - GEDI Lowest - RH25											
-0.1	4.2	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.1	4.2
TDX - GEDI Lowest - RH50											
-0.2	4.2	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.2	4.2
TDX - GEDI Lowest - RH75											
-1.3	4.3	X	X	X	X	X	X	X	X	-1.3	4.3
TDX- GEDI Highest											
-4.8	4.8	X	X	X	X	X	X	X	X	-4.8	4.8

Tabulka 4: Rozdíly ve výšce v poušti Gobi (TDX)

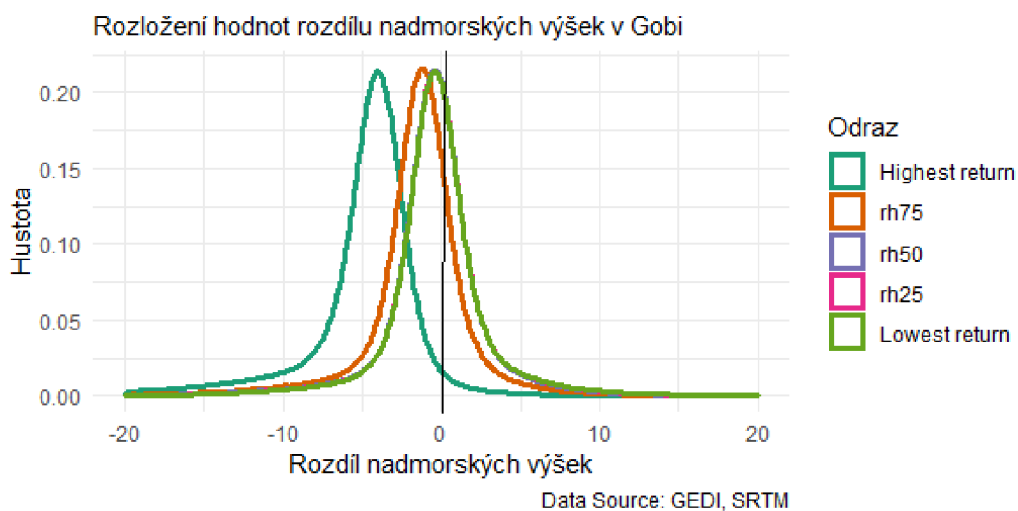


Obrázek 17: Density plot rozdílů nadmorských výšek v poušti Gobi (GEDI, TDX)

Výškový model SRTM ve všech měřeních nadmořskou výšku podhodnocuje – je nižší než v případě referenčních úrovní. Radar je za určitých podmínek schopen pronikat i pod povrch. Stalo se tomu v tomto případě. Na obrázku 18 je možno vidět pouze tři průběhy rozložení hodnot. RH25 a RH50 nejsou přítomny, protože jejich hodnoty byly v původních datech negativní. Po korekci byly všechny hodnoty převedeny na 0.

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
1116239		X		X		X		X		1116239	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
SRTM - GEDI Lowest											
-0.3	3.5	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.3	3.5
SRTM - GEDI Lowest-RH25											
-0.3	3.5	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.3	3.5
SRTM - GEDI Lowest-RH50											
-0.5	3.5	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.5	3.5
SRTM - GEDI Lowest-RH75											
-1.5	3.6	X	X	X	X	X	X	X	X	-1.5	3.6
SRTM- GEDI Highest											
-5.1	4.3	X	X	X	X	X	X	X	X	-5.1	4.3

Tabulka 5: Rozdíly ve výšce v poušti Gobi (SRTM)



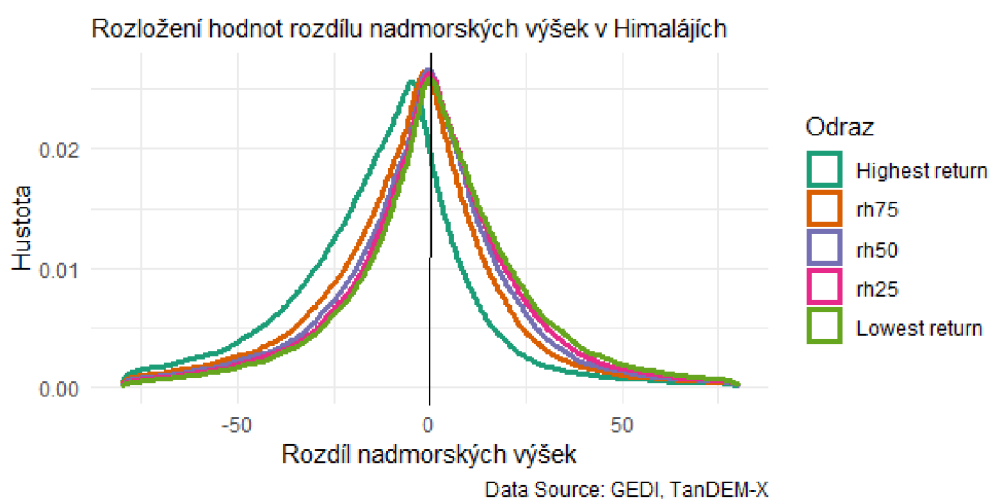
Obrázek 18: Density plot rozdílů nadmořských výšek v poušti Gobi (GEDI, SRTM)

4.3 Himaláje

Výsledky z oblast Himaláji jsou ovlivněny specifickým reliéfem. Vysoké a ostré stěny způsobují velké odchylky při radarovém snímání, což je evidentní z velmi vysokých hodnot směrodatné odchylky mezi 34 a 45 metry. TanDEM-X DEM nejlépe odpovídá nadmořské výšce vegetace kolem RH75 ve všech třídách vegetačního pokryvu s výjimkou třídy do 20 % (tabulka 6). Pozvolný nárůst a pokles křivek grafu potvrzuje velkou směrodatnou odchylku.

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
166571		6594		19177		14533		7545		214420	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
TDX - GEDI Lowest											
4.5	35.5	11.9	44.0	13.4	44.6	19.1	44.7	19.3	41.9	7.0	37.9
TDX - GEDI Lowest - RH25											
3.3	35.1	7.8	43.4	8.7	43.9	13.6	44.2	13.3	41.6	4.9	37.3
TDX - GEDI Lowest - RH50											
1.5	34.8	3.4	43.0	3.8	43.6	8.0	43.9	7.2	41.4	2.4	36.9
TDX - GEDI Lowest - RH75											
-1.6	34.7	-1.4	42.8	-1.6	43.3	2.2	43.6	1.0	41.3	-1.2	36.8
TDX- GEDI Highest											
-9.1	34.8	-10.9	42.8	-11.3	43.2	-8.0	43.5	-9.2	41.2	-9.3	36.8

Tabulka 6: Rozdíly ve výšce v pohoří Himaláje (TDX)

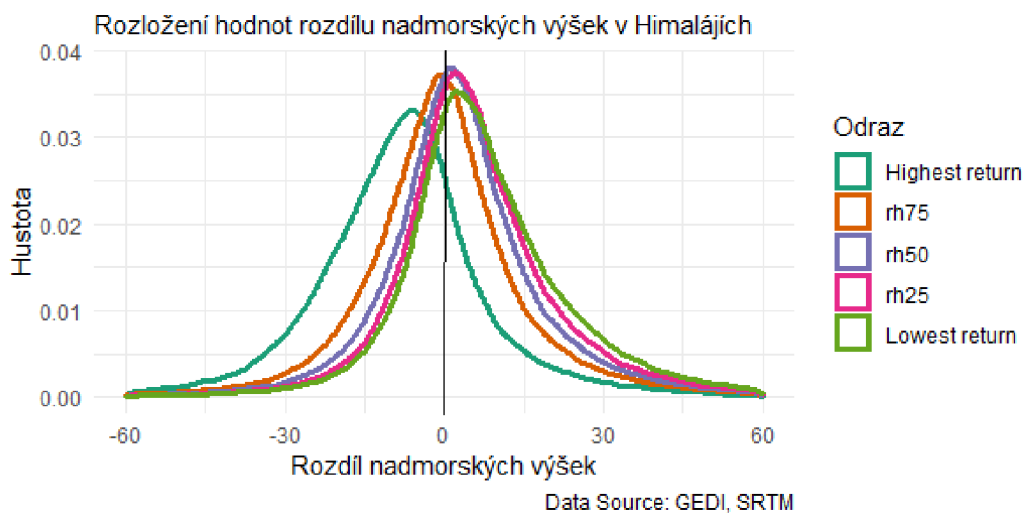


Obrázek 19: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Himalájích (GEDI, TDX)

Výškový model SRTM, stejně jako TanDEM-X DEM, dosahuje nejvyšší shody v relativní výšce RH75. Stejně tak jsou výsledky ovlivněny složitým reliéfem vysokých hor. Rozdíly nadmořských výšek se posunuly více do kladných hodnot (obrázek 20), ale zároveň se snížila jejich směrodatná odchylka (tabulka 7).

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
166571		6594		19177		14533		7545		214420	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
SRTM - GEDI Lowest											
8.0	23.3	11.3	18.1	12.5	18.0	14.0	17.2	15.8	17.1	9.1	22.3
SRTM - GEDI Lowest-RH25											
6.7	23.0	7.2	17.2	7.8	17.2	8.5	16.4	9.9	16.6	7.0	21.8
SRTM - GEDI Lowest-RH50											
4.9	22.9	2.8	16.9	2.9	16.8	2.9	16.0	3.7	16.2	4.5	21.7
SRTM - GEDI Lowest-RH75											
1.7	23.0	-2.0	16.7	-2.4	16.5	-3.0	15.7	-2.4	15.9	0.8	21.7
SRTM- GEDI Highest											
-5.9	23.4	-11.5	16.8	-12.2	16.6	-13.1	15.8	-12.7	15.9	-7.4	22.2

Tabulka 7: Rozdíly ve výšce v pohoří Himaláje (SRTM)



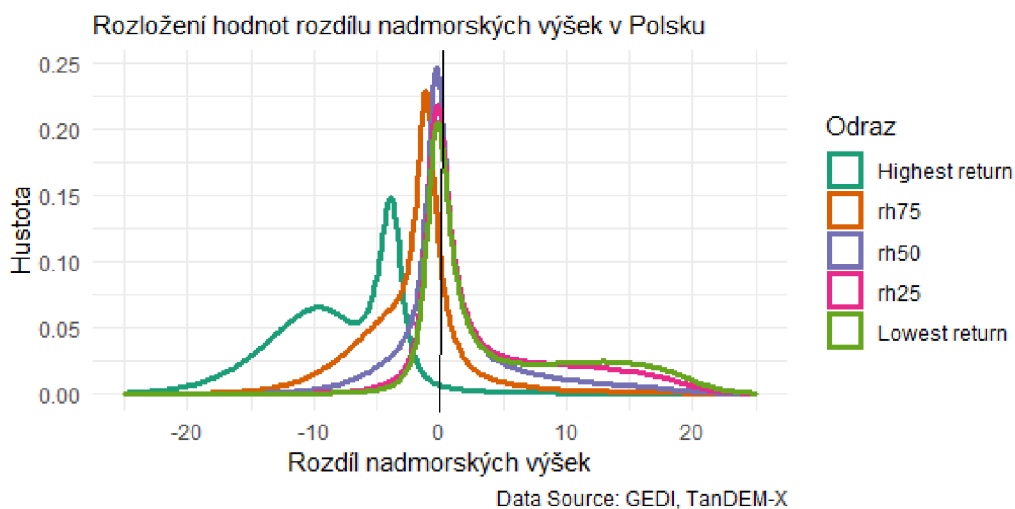
Obrázek 20: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Himalájích (GEDI, SRTM)

4.4 Typicky člověkem ovlivněná krajina střední Evropy v Polsku

V urbanizované krajině v Polsku je přesnost modelu TanDEM-X více ovlivněna hustotou vegetačního pokryvu. K největší podobnosti TanDEM-X DEM a GEDI dochází v méně zalesněných územích do 40 %. Konkrétně se jedná o průměrné rozdíly -0.2 a 0.8 metru RH50. V oblastech s vyšším procentem vegetačního pokryvu průměrné rozdíly oscilují mezi -3 a +3 metry v nadmořské výšce vegetace RH50 a RH75 (tabulka 8). Schopnost prostupovat hlouběji do vegetace je snížena. Nejvyšší podobnost můžeme očekávat někde kolem RH65. Směrodatná odchylka se pohybuje na nízkých hodnotách kolem 6 metrů.

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
1251152		67029		257686		493326		124689		2193882	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
TDX - GEDI Lowest											
0.4	3.2	4.6	5.6	8.5	6.4	11.7	6.5	12.8	6.4	4.7	7.1
TDX - GEDI Lowest - RH25											
0.3	3.1	3.8	5.6	7.2	6.6	9.2	7.0	9.1	7.2	3.7	6.5
TDX - GEDI Lowest - RH50											
-0.2	3.6	0.8	5.7	2.3	6.9	3.1	7.5	3.2	7.7	1.1	5.7
TDX - GEDI Lowest - RH75											
-1.7	4.6	-2.9	6.4	-3.0	6.9	-3.0	6.8	-2.5	6.9	-2.2	5.7
TDX- GEDI Highest											
-6.4	6.2	-10.1	7.2	-10.6	7.0	-10.7	6.4	-10.5	6.3	-8.2	6.7

Tabulka 8: Rozdíly ve výšce v člověkem ovlivněné krajině v Polsku (TDX)

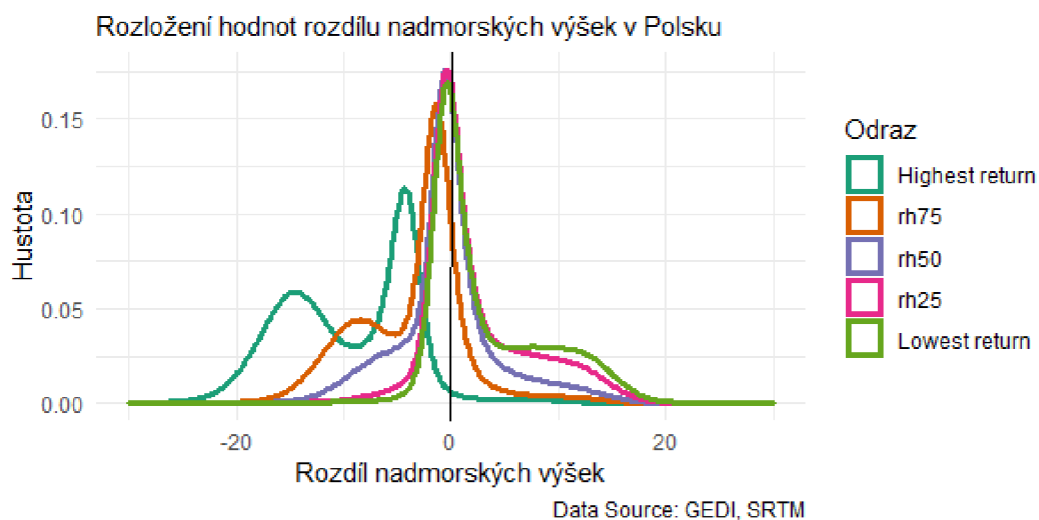


Obrázek 21: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Polsku (GEDI, TDX)

Digitální model SRTM nasnímaný v pásnu C se na rozdíl od modelu TanDEM-X DEM nasnímaným v pásnu X mnohem více blíží hodnotám RH50 a to na méně než 1 metr. V místech s nízkým zalesněním do 20 % odpovídá RH25 (tabulka 9). Velký výkyv počtu pixelů na prvním odrazu se u SRTM posouvá více k rozdílu -15. Nicméně je stále velmi patrný (obrázek 22)

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
1251152		67029		257686		493326		124689		2193882	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
SRTM - GEDI Lowest											
0.1	3.2	3.4	5.1	6.4	5.5	8.4	5.7	8.6	5.8	3.3	5.8
SRTM - GEDI Lowest-RH25											
0.0	3.2	2.6	5.3	5.1	5.9	5.8	6.5	4.9	6.9	2.3	5.5
SRTM - GEDI Lowest-RH50											
-0.5	3.7	-0.4	6.0	0.2	7.0	-0.3	7.4	-1.0	7.5	-0.4	5.5
SRTM - GEDI Lowest-RH75											
-2.0	4.8	-4.1	6.9	-5.1	7.2	-6.3	6.8	-6.7	6.8	-3.7	6.2
SRTM- GEDI Highest											
-6.7	6.4	-11.3	7.7	-12.6	7.2	-14.1	6.3	-14.6	6.2	-9.6	7.4

Tabulka 9: Rozdíly ve výšce v člověkem ovlivněné krajině v Polsku (SRTM)



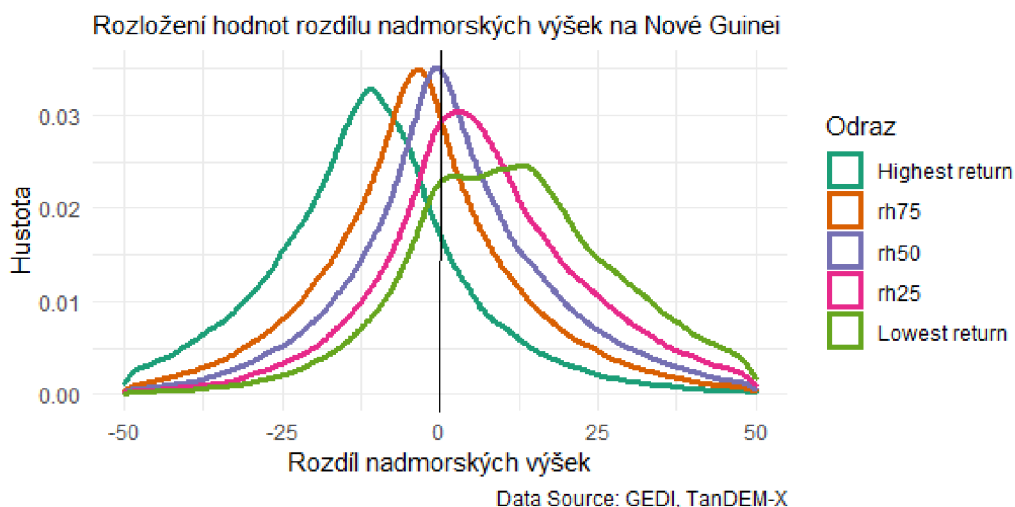
Obrázek 22: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Polsku (GEDI, SRTM)

4.5 Ostrov Nová Guinea

Zájmové území na ostrově Nová Guinea je velmi hornaté. Je zde výsledková podobnost oblastí Himaláji. I zde dochází k velkým směrodatným odchylkám, které ukazují na velký rozptyl rozdílů výšek. Směrodatné odchylky se pohybují mezi 20 a 29 metry (tabulka 10). Nadmořská výška TanDEM – X DEM je v tomto případě výrazně ovlivněna vegetací a hornatým reliéfem. Model nejlépe odpovídá nadmořské výšce vegetace kolem RH75 (tabulka 10). Největší rozdíl 15,5 metru mezi GEDI a TanDEM-X DEM je na nejnižším odrazu v oblastech s vegetačním pokryvem nad 80 %. Toto vychýlení je vidět i z obrázku 23

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
6114		1621		5192		6718		112209		131854	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
TDX - GEDI Lowest											
4.5	28.5	4.4	21.9	5.7	24.0	10.1	27.9	15.6	22.3	14.3	23.2
TDX - GEDI Lowest - RH25											
3.2	27.9	3.2	21.2	3.8	23.3	6.9	27.0	9.2	21.5	8.5	22.3
TDX - GEDI Lowest - RH50											
1.5	27.7	1.6	20.8	1.8	23.0	3.4	26.5	3.1	21.1	3.0	21.8
TDX - GEDI Lowest - RH75											
-1.2	27.6	-0.8	20.8	-1.2	22.9	-0.7	26.3	-2.7	20.8	-2.4	21.6
TDX- GEDI Highest											
-7.3	27.8	-6.6	21.0	-7.7	23.2	-8.7	26.3	-12.0	20.8	-11.4	21.7

Tabulka 10: Rozdíly ve výšce v horském prostředí ostrova Nová Guinea (TDX)

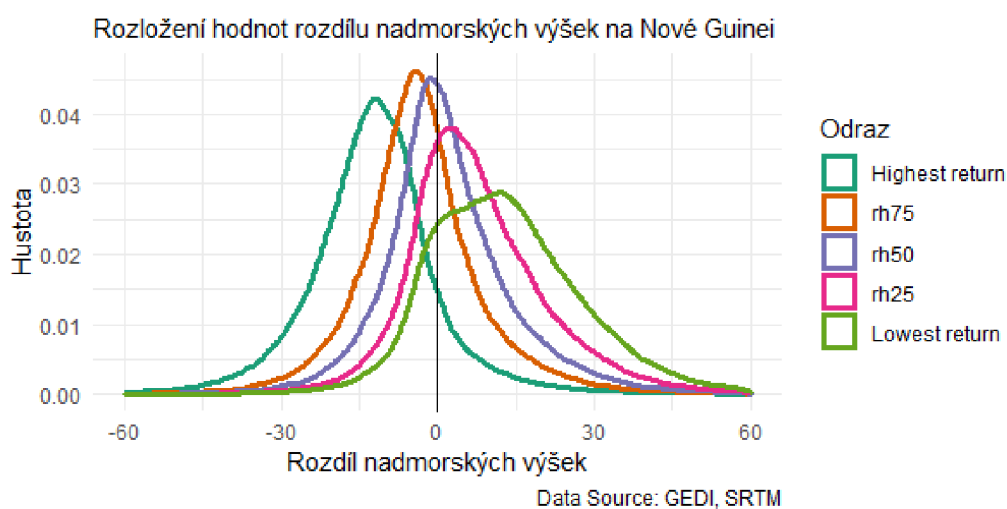


Obrázek 23: Density plot rozdílů nadmořských výšek na ostrově Nová Guinea (GEDI, TDX)

Na ostrově Nová Guinea dochází k rozdílným výsledkům u modelu SRTM. V oblastech s vegetačním pokryvem do 60 % pronikají radarové vlny do úrovně RH50. S rostoucím procentem vegetačního pokryvu se snižuje schopnost prostupovat (tabulka 11). Vychýlení grafu na nejnižším odraze je patrný i u tohoto modelu, nicméně není tolik výrazné.

Vegetační pokryv [%]											
<20 %		20 % - 40 %		40 %- 60 %		60 % - 80 %		>80 %		Celkem	
Počet pixelů											
6114		1621		5192		6718		112209		131854	
Rozdíl výšek [m]											
Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
SRTM - GEDI Lowest											
3.6	22.1	2.6	14.3	5.1	18.3	10.1	25.5	15.5	19.5	14.1	20.2
SRTM - GEDI Lowest-RH25											
2.3	21.4	1.3	13.7	3.2	17.4	6.8	24.5	9.2	18.7	8.4	19.1
SRTM - GEDI Lowest-RH50											
0.5	20.9	-0.2	13.5	1.2	16.9	3.2	23.9	3.0	18.2	2.8	18.6
SRTM - GEDI Lowest-RH75											
-2.1	20.7	-2.6	13.7	-1.8	16.8	-0.9	23.6	-2.7	17.9	-2.6	18.3
SRTM- GEDI Highest											
-8.2	21.0	-8.4	14.4	-8.3	17.3	-8.9	23.6	-12.1	17.9	-11.6	18.3

Tabulka 11: Rozdíly ve výšce v horském prostředí ostrova Nová Guinea (SRTM)



Obrázek 24: Density plot rozdílů nadmořských výšek na ostrově Nová Guinea (GEDI, SRTM)

5 DISKUSE

Globální digitální výškové modely hrají klíčovou roli v rozvojových zemích světa. Tyto země nemají jak finance, tak ani potřebnou infrastrukturu, aby si pořídily vlastní a přesnější model. Výškové modely jsou ovšem nezbytné pro plánování rozvoje dopravní infrastruktury, navrhování vodních nádrží na pitnou vodu či jako zdroj elektrické energie a také pro předvídaní přírodních katastrof. S touto znalostí lze úspěšně minimalizovat případné škody jak na majetku, tak i životech. Při absenci lokálních výškových modelů hraje znalost přesnosti těchto globálních důležitý faktor.

Tato diplomová práce porovnávala výšky odvozené z modelů TanDEM-X DEM a SRTM s laserovým altimetrem GEDI. Z GEDI bylo odvozeno pět referenčních úrovní – v nejvyšším a nejnižším odrazu a v relativních výškách v 25, 50 75 procentech. Dále hodnotila průměrné rozdíly mezi zkoumanými modely a referenčními úrovněmi v závislosti na procentuálním pokrytí pixelu vegetací.

Předpokládalo se, že model SRTM bude prostupovat hlouběji pod nejvyšší odraz GEDI než TanDEM-X DEM. Toho bylo ve většině případů dosaženo. Pouze jednou byl model SRTM vyšší, a to v oblasti Himalájích v území s vegetačním pokryvem nižším než 20 %. Průměrný rozdíl 3,5 metru může být dán zkresleními typickými pro radarové snímání. Jedná se o layover, radar shadow a foreshortening. K těmto druhům zkreslení dochází velmi často v hodně členitém terénu. Snímaný povrch se pak může zdát blíže, než ve skutečnosti je nebo nemusí být vůbec vidět, jelikož je v zákrytu. Tato zkreslení vysvětlují i vyšší směrodatné odchylky v zájmových oblastech Himaláje a Ostrov Nová Guinea. Nižší naměřená nadmořská výška v případě SRTM může být vysvětlena také starším datem pořízení dat. Nejpravděpodobněji se ale jedná o kombinaci obou faktorů – jiné vlnové délky radaru a stáří dat.

Mezi limity této práce patří rozdílné množství naměřených bodů v jednotlivých zájmových oblastech. Altimetr GEDI je umístěn na Mezinárodní vesmírné stanici. Data sbírá mezi 51,6 stupněm severní šířky a 51,6 stupněm jižní šířky. Největší množství měření probíhá v oblastech kolem rovníku. Byly vybrány pouze body, které splňují tu nejvyšší kvalitu (Dubayah, et al., 2021). Tím byl zmenšen vzorek převážně v hornatých oblastech a oblastech s velmi často zataženou oblohou – tedy Himaláje, Nová Guinea a Amazonie. I přesto byl počet měření v každé z oblastí dostatečný. Rozdělení měření do kategorií podle vegetačního pokryvu není rovnoměrné. V poušti Gobi jsou veškerá měření v jedné kategorii. V Amazonském pralese je pak zastoupení

do 80 % vegetačního pokryvu velmi nízké. Při interpretaci výsledků z těchto oblastí to musí být bráno v potaz.

V Himalájích a na Nové Guineě byly naměřeny velké směrodatné odchylky v porovnání se zbylými oblastmi. Na nové Guineě 23,4 m pro TanDEM-X DEM, resp. 25,5 m pro SRTM. V Himalájích byla změřena směrodatná odchylka dokonce 44,7 m pro TanDEM-X DEM a 28,5 m pro SRTM. Jejich příčina je pravděpodobně způsobena radarovým zkreslením. V takovýchto oblastech je třeba brát výsledky s rezervou a provést validační měření, pokud to podmínky umožňují.

Carabajal, et al., 2006 publikovali podobnou studii s altimetrem ICESat. Jejich zájmová území se nacházela v Amazonii, v oblasti Karakorámu, Austrálii, západních Spojených státech amerických a ve střední Africe. Porovnávali pouze nejnižší a nejvyšší odraz a také centroid. S touto diplomovou prací jsou nejvíce podobné oblasti v Amazonii a Karakorámu. Dokazují, že v Amazonii je největší podobnost mezi SRTM a ICESat v RH50. Průměrný rozdíl udávají 1,9 metru. Tato práce nachází nejvyšší podobnost v RH25 a to 1,8 metru, tedy přesnější výsledek. V oblasti Karakorámu mají jejich výsledky také vysokou směrodatnou odchylku danou velmi složitým reliéfem. V RH50 pak dosahují rozdílu -1,1 metru. Tato práce má v Himalájích rozdíl 4,5 metru v RH50, respektive 0,8 metru v RH75.

Quirós, et al., 2021 porovnávali GEDI s TanDEM-X DEM a lokálním modelem pořízeným leteckým laserovým skenováním ve Španělsku. TanDEM-X DEM byl zařazen jako doplňkový a byl porovnáván pouze s nejnižším odrazem. Dokázali, že sklon svahu má velmi výrazný vliv na přesnost výškového modelu. Dále se zabývali vlivem vegetačního pokryvu na přesnost shody mezi GEDI a TanDEM-X DEM. Z jejich výsledků je patrné, že s rostoucím procentem vegetačního pokryvu klesá schopnost radaru pronikat do vegetace. Tato diplomová práce přichází se stejnými závěry.

Evaluační výškových modelů pomocí dat GEDI se ukázala jako nevhodná pro oblasti s velmi malým vegetačním pokryvem. Relativní výška není měřená, ale je dopočítávaná jako procenta z vrácené energie. V případě řídké či dokonce žádné vegetace se paprsky odrážejí od povrchu Země. To vede k tomu, že v případě nízkých relativních výšek dochází k určení hodnoty jako negativní. Jedná se samozřejmě

o chybu, která musí být při zpracování dat odstraněna. Do výsledků to vnáší určitou míru nejistoty a nepřesnosti.

Na základě získaných výsledků bych v případě opakování evaluace pro jiná území doporučil, aby byla vybírána s vědomím toho, že nízké procento vegetačního pokryvu a složitý horský terén výrazně ovlivňují přesnost evaluace. Evaluace přesnosti výškových modelů pomocí měření GEDI se ukázala jako vhodná pro území s vegetací. Ať už se jedná o lesní porosty, či pole.

6 ZÁVĚR

V pěti oblastech světa byly provedeny analýzy, které měly za cíl posoudit vertikální přesnost dvou digitálních výškových modelů – TanDEM-X DEM a SRTM. Cílem bylo ověřit vliv vegetačního pokryvu na schopnost radarových vln pronikat pod vrch korunového zápoje. Výšková data pořízena z měření laserového altimetru GEDI vytváří rozsáhlý referenční rámec. Ten lze použít jako referenční síť pro oblasti téměř po celém světě. Toho se dá využít primárně v oblastech, kde jiné techniky zaměření přesné prostorové a výškové polohy nejsou možné. Jedná se především o území mimo civilizaci, území s velmi hustou a vysokou vegetací, se složitým reliéfem, či s těžko přístupným terénem.

Bylo prokázáno, že model SRTM dosahuje v průměru nižších nadmořských výšek v porovnání s TanDEM-X DEM. Může to být způsobeno rozdílnou vlnovou délkou, či datem pořízení. Nejpravděpodobnější je však kombinace obojího. Radar TanDEM-X ve všech oblastech nejčastěji penetruje do úrovně relativní výšky RH50 až RH75 s výjimkou pouště Gobi, kde žádná vegetace není a radarové vlny se odráží od povrchu Země. V těchto dvou úrovních dochází k průměrnému rozdílu výšek v absolutní hodnotě 0,3 až 2,4 m oproti měření GEDI. Přesnější měření lze očekávat někde mezi těmito dvěma referenčními úrovněmi. Z výsledků vyplývá, že hustota vegetačního pokryvu má vliv na schopnost penetrace radarových vln. Při porovnání jednotlivých průměrných rozdílů mezi TanDEM-X DEM a nejnižšího odrazu GEDI je patrný nárůst v rozdílu vzhledem k vyššímu vegetačnímu pokryvu. Digitální model SRTM, jak již bylo řečeno, proniká hlouběji, respektive má změřenou nižší nadmořskou výšku. Nejčastěji se nejvíce shoduje s referenční úrovní ve výšce RH50 a to převážně v částech s nižším vegetačním pokrytím. Pokud má nejvyšší shodu, v RH75, tak je rozdíl v porovnání vyšší než u TanDEM-X DEM. Naměřené rozdíly se v úrovních RH50 a RH75 pohybují v rozmezí 0,3 a 2,6 m.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Akkartal, A. a Sunar, F. 2008.** The usage of radar images in oil spill detection. *The International Archives of the Photogrammetry*. 2008. Sv. 37.
- Andersen, Hans-Erik, McGaughey, Robert J. a Reutebuch, Stephen E. 2006.** Assessing the influence of flight parameters and interferometric processing on the accuracy of x-band ifsar-derived forest canopy height models. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*. 2006. stránky 110-116.
- Baltensweiler, Andri, a další. 2017.** Terrestrial laser scanning improves digital elevation models and topsoil pH modelling in regions with complex topography and dense vegetation. *Environmental Modelling & Software*. 2017. Sv. 95, stránky 13-21.
- Baltsavias, E.P. 1999.** Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999. Sv. 54, stránky 164-198. 0924-2716.
- Bartusch, Michael. 2010.** DLR. *Space Administration*. [Online] 2010. https://www.dlr.de/rd/en/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-16692/3586-read-16692/.
- Becek, K. 2008.** Investigation of elevation bias of the SRTM C-and X-band digital elevation models. *Bulletin des sciences géographiques de l'INCT*. 2008. Sv. 12, stránky 38-44.
- Burrough, P.A. 1986.** Geographical Information Systems for land resources assessment. Oxford : Oxford University Press, 1986.
- Carabajal, Claudia C. a Harding, David J. 2005.** ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models. 2005. Sv. 32.
- Carabajal, Claudia C. a Harding, David. 2006.** SRTM C-Band and ICESat Laser Altimetry Elevation Comparisons as a Function of Tree Cover and Relief. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2006. Sv. 72.
- Dobrovolný, Petr. 1998.** *Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu*. Brno : Masarykova univerzita, 1998. 8021018127.
- Dubayah, Ralph a Blair, J. Bryan. 2021.** GLOBAL Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) Level 2 User Guide. 2 2021.

- Dubayah, Ralph, a další. 2020.** The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*. 2020.
- Ender, Joachim. 2002.** Das Funkmessprinzip ist 98 Jahre alt: Ein Portrait des Erfinders Christian Hülsmeje. *EUSAR 2002*. Köln : autor neznámý, 2002.
- Farr, Tom G., a další. 2007.** The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. 2007. Sv. 45, str. 33. 8755-1209.
- Fernández, C., a další. 2012.** Free space and speed humps detection using lidar and vision for urban autonomous navigation. 2012.
- Fisher, Peter F. a Tate, Nicholas J. 2006.** Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*. 2006. Sv. 30, stránky 467-489.
- Gojda, Martin. 2006.** Zaniklá krajina – pohled z výšky. místo neznámé : Vesmír, 2006. Sv. 85.
- Goyal, S. K., Seyfried, M. S. a O'Neill, P. E. 1998.** Effect of Digital Elevation Model resolution on topographic correction of airborne SAR. 1998. Sv. 19, stránky 3075-3096 .
- Hall, Michael. 2014.** Global Elevation Data Enhance Exploration and Development. *Earth Imaging Journal*. [Online] 2014. [Citace: 10.. 2. 2021.] <https://eijournal.com/print/articles/global-elevation-data-enhance-exploration-and-development>.
- Hansen, M.C., a další. 2013.** High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. 6160 2013. Sv. 342, stránky 850-853.
- Jiang, Guofeng, Fan, Yangyu a Yuan, Hongbo. 2019.** Assessing the Capacity of Air Traffic Control Secondary Surveillance Radar System. *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*. 2019. stránky 1-3.
- Kampes, Bert M. 2006.** Radar Interferometry. Berlin : Springer, 2006. Sv. 12. 978-1-4020-4576-9.
- Kenward, T., a další. 2000.** Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment*. 2000. Sv. 74, stránky 432-444.

Klimánek, Martin. 2006. *Digitální modely terénu*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2006. 80-7157-982-3.

Lang, Nico, a další. 2022. A high-resolution canopy height model of the Earth. 2022.

Lu, Huayu, a další. 2019. Formation and evolution of Gobi Desert in central and eastern Asia. 2019. Sv. 194, stránky 251-263.

Mauri, L., a další. 2021. UAV-SfM 4D mapping of landslides activated in a steep terraced agricultural area. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021. Sv. 52.

McLaughlin, R.A. 2006. Extracting transmission lines from airborne LIDAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2006. Sv. 3(2), stránky 222-226.

Moudrý, V., a další. 2018. On the use of global DEMs in ecological modelling and the accuracy of new bare-earth DEMs. *Ecological Modelling*. 2018. Sv. 383, stránky 3-9.

Pathan, Azazkhan I., a další. 2021. Comparative analysis of 1D hydrodynamic flood model using globally available DEMs – a case of the coastal region. *International Journal of Hydrology Science and Technology*. 2021. Sv. 13, stránky 92-123.

Pike, R.J. 2000. Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*. 2000. Sv. 24, stránky 1-20.

Potapov, P., a další. 2020. Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Sv. 112165.

Quirós, Elia, Polo, María-Eugenia a Fragoso-Campón, Laura. 2021. GEDI Elevation Accuracy Assessment: A Case Study of Southwest Spain. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*. 2021. Sv. 14.

Rapant, Petr. 2006. *Geoinformatika a geoinformační technologie*. místo neznámé : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 80-248-1264-9.

Rauber, Robert M. a Nesbitt, Stephen W. 2018. Radar Meteorology: A First Course. místo neznámé : Wiley-Blackwell, 2018. 978-1-118-43262-4.

- Saleem, Nayyer, a další. 2019.** Parameters Derived from and/or Used with Digital Elevation Models (DEMs) for Landslide Susceptibility Mapping and Landslide Risk Assessment: A Review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. Sv. 8, str. 545.
- Sim, Philip. 2014.** Making waves: Robert Watson-Watt, the pioneer of radar. [Online] BBC, 2014. [Citace: 12.. 1. 2021.] <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-tayside-central-27393558>.
- Stammer, Detlef a Cazenave, Anny. 2017.** *Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces*. Boca Raton : CRC Press, 2017. 9781315151779.
- Tadono, T., a další. 2014.** Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry*. 2014. Sv. II-4, stránky 71-76.
- Uemaa, E., a další. 2020.** Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sens.* 2020. Sv. 12, str. 23.
- Uysal, M., Toprak, A.S. a Polat, N. 2015.** DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*. 2015. Sv. 73, stránky 539-543.
- van Zyl, Jakob J. 2001.** The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*. Pasadena : autor neznámý, 2001. Sv. 48, stránky 559-565.
- Wandinger, U. 2005.** Introduction to Lidar. [editor] C Weitkamp. *Lidar*. místo neznámé : Springer, 2005. Sv. 1, stránky 1-18. 978-0-387-40075-4.
- Werner, Marian. 2001.** Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Mission Overview. *Frequenz -Berlin*. 2001. Sv. 55, stránky 75-79.
- Wessel, Birgit. 2018.** TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document. [Online] EOC, DLR, 2018. [Citace: 10.. 1. 2021.] <https://tandemx-science.dlr.de>. TD-GS-PS-0021.
- Wessel, Birgit, a další. 2018.** Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Sv. Volume 139, stránky 171-182. 0924-2716.

Yamazaki, Dai, a další. 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations.
Geophysical Research Letters. 2017. Sv. 44, stránky 5844-5853.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Rozdíl mezi DTM a DSM (Hall, 2014).....	3
Obrázek 2: Proces tvorby DEM (Fisher, et al., 2006).....	4
Obrázek 3: Princip fungování LiDARu (Gojda, 2006).....	7
Obrázek 4: Zájmové území Amazonie (vlevo)	9
Obrázek 5: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo).....	9
Obrázek 6: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo).....	10
Obrázek 7: Zájmové území poušť Gobi (vlevo)	10
Obrázek 8: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo).....	10
Obrázek 9: Zájmové území Himaláj (vlevo).....	10
Obrázek 10: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo).....	11
Obrázek 11: Zájmové území Polsko (vlevo).....	11
Obrázek 12: Footprinty jednotlivých transectů klasifikované podle nadmořské výšky (vpravo).....	11
Obrázek 13: Zájmové území Nová Guinea (vlevo)	11
Obrázek 14: Schéma měření pomocí GEDI.....	15
Obrázek 15: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Amazonii (GEDÍ, TDX)...	20
Obrázek 16: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Amazonii (GEDÍ, SRTM)	21
Obrázek 17: Density plot rozdílů nadmořských výšek v poušti Gobi (GEDÍ, TDX)	22
Obrázek 18: Density plot rozdílů nadmořských výšek v poušti Gobi (GEDÍ, SRTM)	23
Obrázek 19: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Himalájích (GEDÍ, TDX).	24
Obrázek 20: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Himalájích (GEDÍ, SRTM)	25
Obrázek 21: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Polsku (GEDÍ, TDX).....	26
Obrázek 22: Density plot rozdílů nadmořských výšek v Polsku (GEDÍ, SRTM)	27
Obrázek 23: Density plot rozdílů nadmořských výšek na ostrově Nová Guinea (GEDÍ, TDX).....	28

Obrázek 24: Density plot rozdílů nadmořských výšek na ostrově Nová Guinea (GED1, SRTM)	29
Tabulka 1: Průměrné hodnoty odvozených atributů	12
Tabulka 2: Rozdíly ve výšce v Amazonském deštném pralese (TDX)	20
Tabulka 3: Rozdíly ve výšce v Amazonském deštném pralese (SRTM).....	21
Tabulka 4: Rozdíly ve výšce v poušti Gobi (TDX)	22
Tabulka 5: Rozdíly ve výšce v poušti Gobi (SRTM).....	23
Tabulka 6: Rozdíly ve výšce v pohoří Himaláje (TDX)	24
Tabulka 7: Rozdíly ve výšce v pohoří Himaláje (SRTM)	25
Tabulka 8: Rozdíly ve výšce v člověkem ovlivněné krajině v Polsku (TDX).....	26
Tabulka 9: Rozdíly ve výšce v člověkem ovlivněné krajině v Polsku (SRTM)	27
Tabulka 10: Rozdíly ve výšce v horském prostředí ostrova Nová Guinea (TDX)	28
Tabulka 11: Rozdíly ve výšce v horském prostředí ostrova Nová Guinea (SRTM) .	29