

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra prostorových věd



**Srovnání digitálního modelu terénu TanDEM-X
a výškových měření ICESat-2**

Bakalářská práce

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

Bakalant: Václav Žák

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Václav Žák

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Srovnání digitálního modelu terénu TanDEM-X a výškových měření ICESat-2

Název anglicky

Elevation comparisons of TanDEM-X digital elevation model and ICESat-2 laser altimetry

Cíle práce

Cílem práce je zdokumentovat výškové rozdíly mezi TanDEM-X DEM a ICESat-2. Formulace dílčích cílů je úkolem autora.

Metodika

Digitální elevační modely (DEM) jsou zásadním vstupem v mnoha odvětvích environmentálního modelování a znalost jejich kvality má zásadní význam pro jejich správné používání. V současné době lze nalézt různé zdroje DEM s globálním pokrytím, které jsou obvykle získány odlišnými metodami, a tudíž mají různé rozlišení a vertikální přesnost. Relativně nedávno započaté mise TANDEM-X a ICESat-2 přinášejí unikátní data s dosud nevídanou přesností. Autor se v literární rešerši zaměří na problematiku DEM a na nově dostupná data ze zmíněných misí a pro vybrané území porovná TANDEM-X DEM s daty z laserového altimetru ATLAS na palubě satelitu ICESat-2.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Bhang, K. J., Schwartz, F. W., & Braun, A. (2006). Verification of the vertical error in C-band SRTM DEM using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(1), 36-44.
- 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.
- 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.
- Neuenschwander, A., & Pitts, K. (2019). The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. *Remote sensing of environment*, 221, 247-259.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 2. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 02. 2022

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: Srovnání digitálního modelu terénu TanDEM-X a výškových měření ICESat-2 vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Praze dne

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Vítězslavu Moudrému za poskytnutí veškeré zpětné vazby a vedení při psaní této práce, přátelům z oboru a v neposlední řadě své rodině a přítelkyni za trpělivost a pochopení při studiu i psaní závěrečné práce.

Abstrakt:

Digitální výškové modely reprezentující povrch Země jsou v dnešní době nezbytnou součástí nespočtu činností. Mezi obory, které výškové modely intenzivně využívají, lze zahrnout například geologii, lesnictví, glaciologii, oceánografii či hydrologii. Jedním ze stále častěji využívaných modelů je relativně nedávno vytvořený TanDEM-X DEM, který je volně dostupný a dosahuje velmi vysoké výškové i horizontální přesnosti. Tato práce se zaměřuje na validaci digitálního modelu TanDEM-X výškovými měřeními laserovým altimetrem ICESat-2 v oblasti střední Evropy. TanDEM-X DEM lze považovat za model povrchu. Cílem práce tedy bylo ověřit přesnost s jakou TanDEM-X reprezentuje terén v oblastech bez vegetace a zároveň validovat do jaké míry podhodnocuje výšku vegetace v lesích. TanDEM-X DEM byl porovnáván ve dvou rozlišeních, 12 a 90 metrů (dále jen TDX12/TDX90) s produktem ATL08, ze kterého byla brána metrika reprezentující výšku vegetace – *h_canopy_abs* (dále jen ATL08-Vegetace) a výšku terénu *h_te_best_fit* (dále jen ATL08-Terén). Přesnost TDX12 a TDX90 vycházela ve většině analýz velmi podobně, proto jsou dále uvedeny jen výsledky pro TDX12. V porovnání TDX12 s ATL08-Terén TDX12 mají tendenci terén nadhodnocovat. Pro celou oblast jsou průměrné hodnoty ME 6,97m, pro lesy 14,15m a pro zemědělské plochy 2,4m. (Dále jsou tyto hodnoty v pořadí: zájmová oblast – lesy – zemědělské plochy). Při porovnání s ATL08-Vegetace jsou hodnoty obrácené, v tomto případě ME vyšlo -11,67m, -12,17m a -11,75m, proč tomu tak je se zatím nepodařilo ověřit. RMSE v porovnání s ATL08-Terén vyšla 12,92m, 17,76m a 7,9m. Pro ATL08 Vegetace byla naměřena tato hodnota 15,86m, 16,12m a 15,77m. Dále byla zhodnocena celková přesnost měření s ohledem na sklon terénu. Výsledky ukazují, že přesnost TanDEM-X DEM klesá s narůstajícím sklonem terénu. Přestože má verze TDX12 několikanásobně lepší rozlišení, než TDX90, rozdíl měření v této práci je zanedbatelný. V závislosti na krajinném pokryvu dosáhl model TanDEM-X DEM v obou rozlišeních nejpřesnějších výsledků na zemědělských plochách vůči měření ATL08-Terén.

Klíčová slova: TanDEM-X, ICESat-2, LiDAR, GIS, DPZ, Validace výškového měření, ATL08, vegetace, terén

Abstract:

Digital elevation models representing the Earth's surface are an essential part of countless activities today. Some of the disciplines using the elevation models include geology, forestry, glaciology, oceanography and hydrology. One model that is increasingly used is the relatively recently developed TanDEM-X DEM, which is freely available and achieves very high elevation and horizontal accuracy. This paper focuses on the validation of the TanDEM-X digital model by altitude measurements with the ICESat-2 laser altimeter in the Central European region. TanDEM-X DEM can be considered as a surface model. The aim of the work was therefore to verify the accuracy with which TanDEM-X represents the terrain in areas without vegetation and to validate to what extent it underestimates the height of vegetation in forests. The TanDEM-X DEM was compared at two resolutions, 12 and 90 meters (hereafter TDX12/TDX90) with the ATL08 product, from which metrics representing vegetation height, *h_canopy_abs* (hereafter ATL08-Vegetation) and terrain height, *h_te_best_fit* (hereafter ATL08-Terrain) were taken. The accuracy of TDX12 and TDX90 came out very similarly in most analyses, so only results for TDX12 are shown below. When comparing TDX12 to ATL08-Terrain, TDX12 tends to overestimate terrain. The average ME values for the whole area are 6.97m, 14.15m for forests and 2.4m for agricultural areas. (In the following, these values are in the order: area of interest - forests - agricultural areas). When compared with ATL08-Vegetation the values are reversed, in this case the ME came out -11.67m, -12.17m and -11.75m respectively, why this is the case has not yet been verified. RMSE compared to ATL08-Terrain came out 12.92m, 17.76m and 7.9m. For ATL08 Vegetation, the measured values were 15.86m, 16.12m and 15.77m. Furthermore, the overall accuracy of the measurements was evaluated with respect to the slope of the terrain. The results show that the accuracy of the TanDEM-X DEM decreases with increasing terrain slope. Although the TDX12 version has several times better resolution than the TDX90, the measurement difference in this work is negligible. Depending on the landcover, the TanDEM-X DEM achieved the most accurate results in both resolutions in agricultural areas relative to the ATL08-Terrain measurement.

Key words: TanDEM-X, ICESat-2, LiDAR, GIS, Remote sensing, validation of height measurement, ATL08, Vegetation, terrain

Obsah

1.	Úvod a cíle práce	1
2.	Literární rešerše	2
2.1.	DEM.....	2
2.2.	DSM a DTM	2
2.3.	Dnes využívané výškové modely.....	4
2.3.1.	ASTER GDEM.....	4
2.3.2.	SRTM DEM.....	5
2.3.3.	TanDEM-X	5
2.3.4.	ALOS WORLD 3D	7
2.4.	LiDAR.....	7
2.5.	ICESat a ICESat-2.....	8
2.5.1.	Vývoj mise ICESat	8
2.5.2.	Vývoj mise ICESat-2	8
2.5.3.	ATLAS.....	10
3.	Metodika	11
3.1.	Zájmové území.....	11
3.2.	ATL08	12
3.2.1.	ATL08 – specifikace	12
3.3.	Požadavky na přesnost TanDEM-X DEM.....	14
3.4.	Předzpracování dat	15
3.5.	Validace dat, porovnání výsledků měření TDX a ICESat-2	18
3.5.1.	Srovnání výškových měření.....	18
4.	Výsledky	20
4.1.	Srovnání výškového měření pro terén.....	20
4.2.	Srovnání výškového měření pro vegetaci	23
5.	Diskuze	27
6.	Závěr	29
7.	Seznam zdrojů:	30
8.	Přílohy.....	36

Seznam obrázků a příloh

Obrázek 1 - Vizualizace TIN oproti Rastru (Julzarika, 2019).....	2
Obrázek 2 - Rozdíl mezi DTM a DSM (Asharyanto et al., 2015).....	3
Obrázek 3 - TanDEM - X DEM (Marwaha et al., 2021).....	6
Obrázek 4 - Ilustrace jednoho dne oběhu sondy ICESat-2 (Markus et al., 2017)	9
Obrázek 5 - Vizualizace rozložení paprsků ICESat-2(nsidc.org).....	10
Obrázek 6 – Vizualizace zájmového území.....	11
Obrázek 7 - Svažitost terénu v zájmovém území	12
Obrázek 8 - Regiony pro ATL08 (Neuenschwander, 2018).....	13
Obrázek 10 - Hillshade dat TDX v rozlišení 12m - vizualizace	15
Obrázek 11 - Vizualizace ATL08 pro všechna data, ale i s ohledem na krajinný pokryv	16
Obrázek 12 - Vizualizace krajinného pokryvu CLC2018	17
Obrázek 13 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Terén pro lesy	21
Obrázek 14 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Terén pro zemědělské plochy.....	21
Obrázek 15 - Histogram rozdílů měření TDX12/90 a ATL08-Terén pro lesy/zemědělské plochy.....	22
Obrázek 16 - Rozdělení hustoty TDX12/90 v porovnání s ATL08-Terén pro lesy	22
Obrázek 17 - Rozdělení hustoty TDX12/90 v porovnání s ATL08-Terén pro zemědělské plochy.....	23
Obrázek 18 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Vegetace pro lesy	24
Obrázek 19 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Vegetace pro zemědělské plochy.....	25
Obrázek 20- Histogram rozdílů měření TDX12/90 a ATL08-Vegetace pro lesy/zemědělské plochy	25
Obrázek 21 - Rozdělení hustoty bodů TDX12/90 v porovnání s ATL08 Vegetace pro lesy	26
Obrázek 22 - Rozdělení hustoty bodů TDX12/90 v porovnání s ATL08 Vegetace pro zemědělské plochy	26
Obrázek 23 - Histogram rozdílů měření TDX12/90 - ATL08-Terén pro celé území.....	36
Obrázek 24 - Histogram rozdílů měření TDX12/90 - ATL08-Vegetace pro celé území	36
Obrázek 25 - Graf hustoty měření TDX12/90 s ATL08-Terén pro celé území	37
Obrázek 26 - Graf hustoty měření TDX12/90 s ATL08-Vegetace pro celé území	37

Seznam Tabulek

Tabulka 1 - Specifikace parametrů přesnosti pro TanDEM-X	14
Tabulka 2 - Vstupní hodnoty pro rozdělení krajinného pokryvu na lesy/zem. plochy...	17
Tabulka 3 – Výpočet metrik pro TDX v porovnání s ATL08-Terén.....	20
Tabulka 4 - Výpočet metrik MAE, RMSE a LE90 s ohledem na sklon terénu, porovnání s měřením ATL08-Terén	23
Tabulka 5 - Výpočet metrik pro TDX v porovnání s ATL08-Vegetace.....	24
Tabulka 6 - Výpočet metrik MAE, RMSE a LE90 s ohledem na sklon terénu, porovnání s měřením ATL08 Vegetace	26

Seznam zkratk

ALOS – Advanced Land Observing Satellite

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

ATLAS - Advanced Topographic Laser Altimeter System

DEM – Digital elevation model - Digitální výškový model

DSM – Digital Surface model - Digitální model povrchu

DTM – Digital Terrain Model - Digitální model terénu

GDEM – Global digital elevation model - Globální výškový model

GLAS - Geoscience Laser Altimeter System

ICESat - Ice, Cloud, and land Elevation SATellite

LiDAR – Light Detection And Ranging

MAE – Mean Absolute Error - Střední absolutní chyba

NSIDC – National Snow and Ice Data Center - Národní datové centrum pro sníh a led

RMSE – Root mean square error - Střední kvadratická chyba

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

TDX – TanDEM-X

1. Úvod a cíle práce

Digitální modely vyobrazují zemský povrch a právě díky těmto modelům lze uskutečnit stále více analýz a vizualizací. Při tvorbě digitálních modelů se dbá zejména na jejich přesnost, ta se odvíjí od rozvoje moderní techniky. Díky geografickým informačním systémům je možné získávat a analyzovat data těchto modelů ve snaze zachytit co nejpřesnější obraz reálného světa. Ať už se jedná například o model povrchu, či terénu, kvalita těchto modelů se odvíjí od kvality i počtu vstupních informací (Martin et al., 2005). Příklad nejběžnějšího využití digitálních modelů lze najít v oborech jako je geologie, lesnictví, glaciologie, oceánografie či hydrologie (Rizzoli et al., 2017). Existuje několik způsobů pořízení dat pro tvorbu digitálních modelů. Mezi ně patří například radar, což je zařízení, které využívá radiové vlny pro zkoumání povrchu Země. Během posledních let vzniklo několik výškových modelů, které jsou volně dostupné a které se liší v kvalitě (Santillana et al., 2016). Například ASTER G-DEM poskytuje hladší a realističtější zobrazení nížin, údolí či strmých svahů oproti SRTM DEM, který má tendenci výšky údolí podhodnocovat (Hayakawa S., 2008). Odlišnosti v kvalitě mohou být způsobeny rozdílným rozlišením jednotlivých DEM, či metodou sběru vstupních dat pro jejich tvorbu. Nově vzniklé DEM je proto třeba validovat a kvantifikovat jejich přesnost.

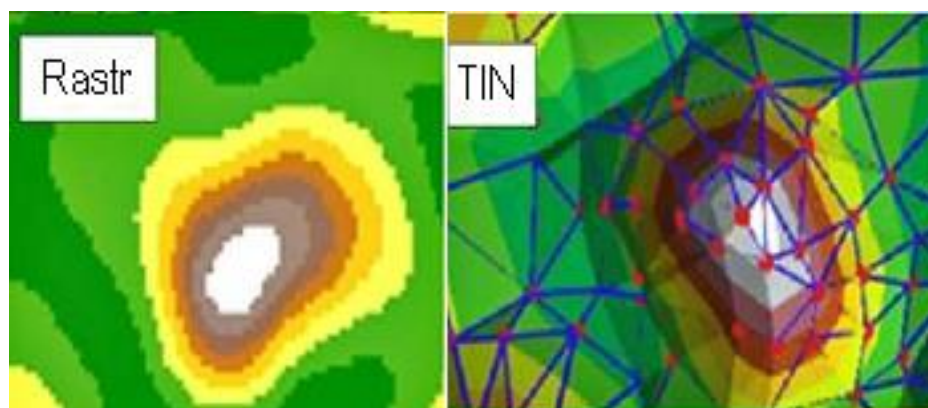
Bakalářská práce se zabývá ověřením přesnosti digitálního modelu TanDEM-X DEM. Pro validaci byla vybrána oblast střední Evropy, pro kterou byl TanDEM-X dostupný ve dvou rozlišeních – 12 a 90 metrů (dále v práci uváděno jako TDX12 a TDX90). Pro validaci byla použita referenční data z družice ICESat-2, konkrétně produkt ATL08, ze kterého byly brány metriky *h_canopy_abs* (v práci jako ATL08-Vegetace) pro výšku vegetace a *h_te_best_fit* (dále jako ATL08-Terén) pro výšku terénu. Cílem této práce bylo 1) Ověřit přesnost modelů TDX12/90 a 2) zhodnotit vliv krajinného pokryvu a sklonu terénu na přesnost TanDEM-X.

2. Literární řešerše

2.1. DEM

Digitální výškový model (DEM – digital elevation model) je číselná reprezentace zemského povrchu, která obsahuje skutečné výškové body reprezentující topografii a také metodu výpočtu výšek mezi výškovými body (Guth, 2006). Obvykle je DEM uložen v datovém systému jako pravidelná síť nebo triangulovaná nepravidelná síť (TIN – vizualizace na obrázku č. 1), (Rahman, 1994). V diskusi týkající se DEM se běžně používají termíny digitální model terénu (DTM – digital terrain model) a digitální model povrchu (DSM – digital surface model). DEM lze tedy brát jako nadřazený pojem pro tyto dva typy a vždy je potřeba zmínit, jaký typ povrchu popisuje (Köthe et Bock, 2009).

DEM se vytváří různými technikami, například fotogrammetrickou metodou s využitím stereodat (San a Suzen, 2005), leteckou stereofotografií (Schenk, 1996), interferometrií (Kervyn, 2001), leteckým laserovým skenováním (Favey et al., 2003) či topografickým průzkumem (Wilson a Gallant, 2000). Stejně jako u všech prostorových dat, dochází i u DEM k různým typům chyb. Tyto chyby mohou být systematické, nebo náhodné, kterým se nelze vyhnout. Tyto chyby se liší v závislosti na terénních podmínkách (Holmes et al., 2000). Některé DEM, jako například TanDEM-X DEM 90m, ASTER či SRTM, jsou volně dostupné, nicméně produkty s nejvyšším rozlišením jsou většinou dostupné pouze pro vědecké účely (například TanDEM-X DEM v rozlišení 12 a 30 metrů).



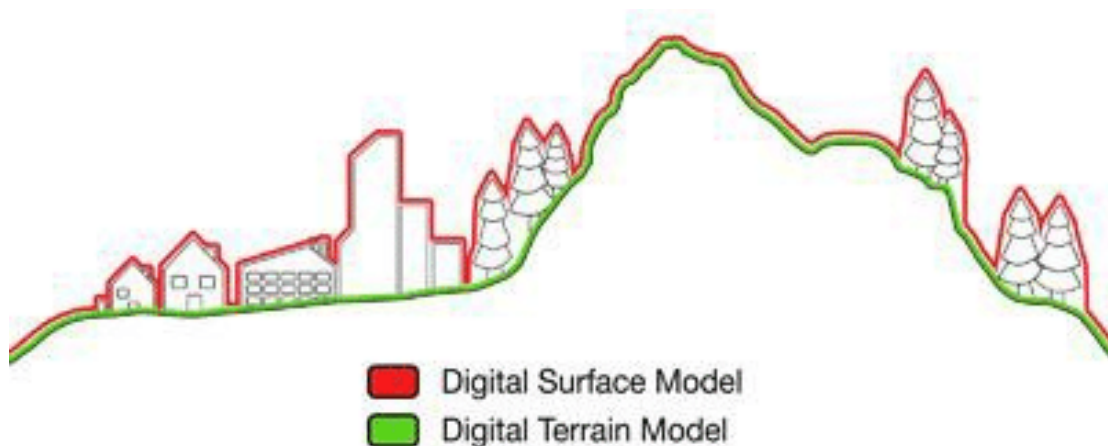
Obrázek 1 - Vizualizace TIN oproti Rastru (Julzarika, 2019)

2.2. DSM a DTM

DSM (digitální model povrchu) zachycuje všechny přírodní a uměle vytvořené prvky, které se na zemi nachází. Je užitečný při 3D modelování v telekomunikacích, městském

plánování a letectví. DTM na druhou stranu reprezentuje povrch pro holou zemi – resp. zobrazuje topografii zemského povrchu. Do prvků DTM lze zařadit například sklon, orientaci svahu, zakřivení, prvky jako jsou jámy, sedla, hřebeny či vrcholy (rozdíl DTM oproti DSM na obrázku č. 2). DTM jsou dnes podstatnou součástí pro zpracování dat v GIS i dalších oborech. Vzhledem k tomu, že za několik posledních desítek let došlo k rozvoji techniky a způsobů získávání dat, je dnes čím dál více přesnějších modelů s lepším rozlišením (Klimánek 2006).

Kvalita DTM se v posledním desetiletí výrazně zvýšila díky dvěma faktorům. Prvním bylo zavedení a vývoj nových metod sběru dat, zejména ze satelitů a letadel. Druhým faktorem je zvyšující se dostupnost dalších zdrojů dat, které jsou užitečné pro hodnocení kvality DTM nebo pro její zvyšování. Kromě leteckých snímků a vrstevnic lze použít i různé bodové datové sady s výškovými atributy, jako jsou body základní geodetické sítě, hraniční body katastru nemovitostí, databáze budov či bodové výškopisné údaje. Jedním z cílů hodnocení kvality DTM je splnění požadavků standardů prostorových dat. ISO (International Organization for Standardization) rozlišuje pět prvků kvality dat: úplnost, logickou konzistenci a tři typy přesnosti (polohovou, časovou a tematickou). Z hlediska povahy dat můžeme rozlišovat mezi absolutní a relativní přesností. Polohu (horizontální nebo vertikální) objektů (např. hřebenů nebo propadlin jako součástí DTM) lze přiřadit k absolutní přesnosti a nepravidelnost tvarů objektů k přesnosti relativní, tj. morfologicky vztažené k obecné poloze. Pojem přesnost je považován za součást přesnosti, která souvisí s měřítkem, rozlišením a také se zobecněním datových souborů (Podobnikar, 2008).



Obrázek 2 - Rozdíl mezi DTM a DSM (Asharyanto et al., 2015)

2.3. Dnes využívané výškové modely

2.3.1. ASTER GDEM

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model – zkráceně ASTER GDEM je pokročilý kosmický radiometr, který nesla družice Terra, vyslaná do vesmíru roku 1999. ASTER je společnou operací NASA a japonského ministerstva hospodářství, obchodu a průmyslu (METI), (Marwaha et al, 2021). Senzor ASTER má 14 spektrálních pásem (viditelné a blízké infračervené - VNIR, krátkovlnné infračervené a tepelné infračervené). Díky tomuto senzoru je možné stereoskopicky snímat data s rozlišením až 15 metrů. Pořízené stereoskopické dvojice se dají použít za účelem prostorového zobrazení území a lze tak vyčíst výškové poměry. (Yamaguchi, Y, et al., 1998) S tímto souvisí i jeden z cílů této mise, kterým bylo vytvořit globální DEM volně dostupný pro širokou veřejnost.

První verze globálního modelu z této mise (ASTER GDEM V1) byla vydána v roce 2009 a byla vytvořena z dat nasbíraných v období od 1. března 2000 do 30. listopadu 2007. GDEM V1 vznikl sloučením všech jednotlivých scén s maskou mraků a následným použitím různých algoritmů k odstranění abnormálních dat. V roce 2011 byla vydána verze 2. Vylepšení v GDEM V2 spočívalo v použití dalších scén nasbíraných v letech 2008 až 2010, což vedlo ke zlepšení pokrytí a částečnému odstranění chyb například z důvodů přítomnosti mraků ve snímcích a k vylepšení masky vody (Fujisada, H, et al. 2012). V srpnu 2019 vědecký tým ASTER vydal GDEM V3, finální verzi GDEM. Kromě přidání několika set tisíců dalších scén za účelem zlepšení kvality byla provedena přísná, automatická manuální korekce anomálií s cílem vytvořit co nejpřesnější GDEM (Abrams M. et al., 2020).

Data nasbírána touto misí pokrývají pevninu od 83° j. š. až po 83° s. š., což je téměř 99% souše na Zemi a dosahují rozlišení 1 úhlové vteřiny, což ve skutečnosti odpovídá přibližně 30m (Abrams M. et al., 2020). ASTER lze považovat za DSM, který reprezentuje povrch Země včetně výšky objektů nad terénem (např. vegetace, budovy). Absolutní vertikální přesnost výšek ASTER GDEM V3 byla odhadnuta na ~17 metrů. Tento produkt je volně dostupný pro veřejnost na stránkách NASA (https://lpdaac.usgs.gov/data_access/gdex), nicméně je potřebná registrace a souhlas s licenčními podmínkami pro používání.

2.3.2. SRTM DEM

Shuttle radar topography mission – zkráceně SRTM byl mezinárodní program vytvořený Laboratoří proudového pohonu NASA a NGA. Mise získávání dat byla zahájena 11. února roku 2000, raketoplán SRTM se nazýval Endeavour a byl na oběžné dráze 11 dní. SRTM využívá radar se syntetickou aperturou a interferometrii (InSAR) k vytvoření jednoho z nejpřesnějších digitálních výškových modelů Země (Marwaha et al., 2021). Každý bod na Zemi byl snímán alespoň dvakrát anténou o délce 60 metrů. Jedná se o největší strukturu, které létala ve vesmíru (Werner, 2001). Hlavním cílem bylo vytvořit DEM, který bude mít známé a globálně konzistentní chyby (Rodriguez et al., 2006).

SRTM DEM je dostupné ve třech verzích. Verze 1 vytvořená během let 2003-2004 obsahuje téměř nezpracovaná „raw“ data. Verze 2.1 z roku 2005 je upravenou verzí verze 1, kde byly artefakty (matoucí údaje – resp. prvky, které se ve skutečném terénu nevyskytují) odstraněny, ale prázdná místa ještě nejsou zaplněna. Nad USA jsou k dispozici s rozlišením 1 úhlové vteřiny (Farr T. et al., 2007). Verze 3 z roku 2013, známá také jako SRTM Plus, je vyplněna prázdnými místy pomocí ASTER GDEM a USGS GMTED2010. Tato verze je od roku 2014 k dispozici v globálním rozlišení 1 úhlové vteřiny, což odpovídá zhruba 30m (Liping et al, 2011).

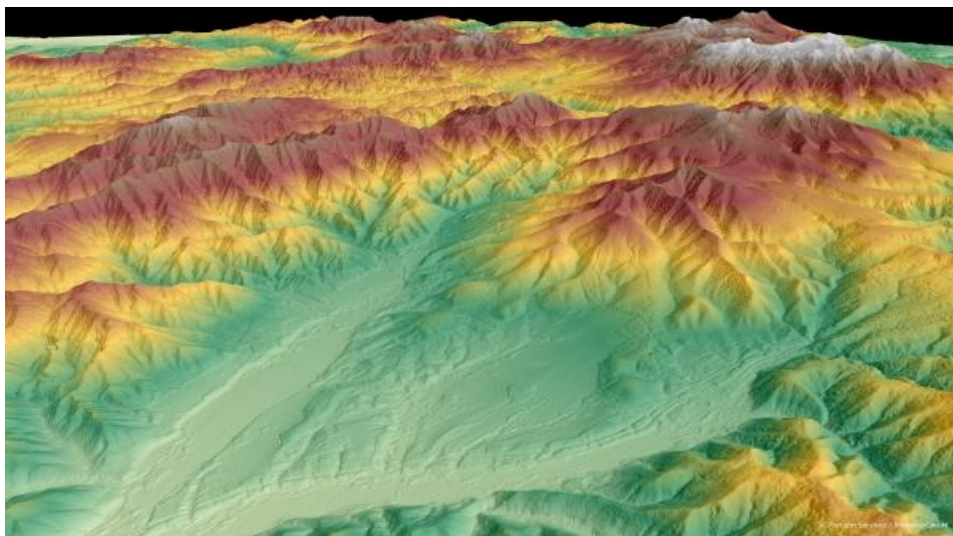
Data pokrývají pevninu od 60° s. š. až po 56° j. š., což odpovídá přibližně 80% povrchu Země. Polohová přesnost dat je 20m a absolutní výšková chyba 16m, což odpovídá necelým 10m úplné střední výškové chyby s 90 % intervalem spolehlivosti (Farr et al., 2007). Produkt SRTM DEM je dostupný ve dvou sadách, a to konkrétně SRTM30 a SRTM90 a je volně dostupný pro veřejnost, lze jej získat na stránkách USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

2.3.3. TanDEM-X

TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements) je inovativní radarová mise, která otevírá novou éru dálkového radarového průzkumu Země. TanDEM-X (dále jen TDX) je satelit navržen Německou vesmírnou agenturou. Mise probíhala od prosince roku 2010 do ledna 2015, dokončena byla v září roku 2016, od této doby je vytvořený model brán jako nejvíce konzistentní, přesný a nejúplnější globální DMT zemského povrchu (Zink et al., 2014). Zařízení se skládá ze dvou skoro identických satelitů, tedy TerraSAR-X (který byl vypuštěn o 3 roky dříve) a TDX, které od sebe létají ve vzdálenosti 300m – 500m. Tyto satelity nesou radarové senzory snímající v pásmu X, fungující na principu syntetické apertury (Krieger et al.). Jednotlivé snímky jsou nominálně pořízeny v bistatické konfiguraci - jedna družice

vysílá signál a obě současně přijímají zpětně rozptýlený signál ze zemského povrchu. To umožňuje pořizovat vysoce přesné interferogramy, které netrpí časovou a atmosférickou dekorelací (Rizzoli et al., 2017). Aby byl zajištěn co nejlepší výsledek, bylo každé místo snímáno alespoň dvakrát každou družicí ze stejného místa. V horších terénech, například horských územích se snímání provádělo i vícekrát za účelem odstranění radarového stínu (Wessel, 2018). Vykazovaná výkonnost z hlediska absolutní vertikální přesnosti byla provedena s použitím nejlepších 1 000 ověřovacích bodů ICESat na buňku DEM, které se vyznačují nejnižší prostorovou odchylkou. Získané výsledky potvrzují vynikající schopnosti systému, s celkovou absolutní výškové přesností na 90% hladině spolehlivosti pouhých 3,49 m, což je hluboko pod specifikací mise 10m. (Rizzoli et al., 2017). Hlavním cílem německé mise TDX bylo vytvoření vysoce přesného a globálního DMT s přesností alespoň deset metrů absolutní výškové chyby.

TDX DEM je výškový model, který lze získat ve třech rozlišeních a to sice rozlišení 12m (přesnost 0,4 úhlové vteřiny), 30m (přesnost 1 úhlové vteřiny) a 90m (přesnost 3 úhlové vteřiny). Rozlišení 12m a 30m jsou dostupná pouze pro vědecké účely, zatímco rozlišení 90m je volně dostupné pro veřejnost (Wessel, 2018), (dostupné z: <https://tandemx-science.dlr.de/>). TDX představuje také milník ve vývoji nových technologií budoucích kosmických misí SAR s letovou formací, jako je např. Tandem-L, bistatická mise SAR v pásmu L, kterou navrhla DLR (Německé středisko pro letectví a kosmonautiku) s cílem sledovat dynamické procesy na zemském povrchu s bezprecedentní přesností a časovým pokrytím (Moreira et al., 2015). Vizualizace TDX-DEM na obrázku č. 3, více k požadavkům pro datový výstup TDX v kapitole Metodika.



Obrázek 3 - TanDEM - X DEM (Marwaha et al., 2021)

2.3.4. ALOS WORLD 3D

Globální digitální model povrchu ALOS (Advanced Land Observing Satellite) neboli ALOS World 3D je globální datová sada DSM japonské Agentury pro výzkum vesmíru (JAXA). Družice ALOS byla v provozu od 24. ledna 2006 až do 22. dubna 2011, nicméně od roku 2014 je tento projekt dále rozvíjen. Sensor na palubě ALOS se nazývá PRISM (Portable Remote Imaging Spectrometer), což je nejmodernější zobrazovací spektrometr NASA (Mouroulis et al., 2010). Cílem mise bylo vytvoření co možná nejpřesnějšího digitálního modelu, který je volně dostupný.

ALOS DSM pokrývá celosvětové pozemní oblasti pomocí 3 milionů archivů snímků. ALOS poskytuje produkt pro komerční účely s lepším rozlišením, než ten, který je volně dostupný. Tím je digitální 3D mapa, která byla využita v široké škále aplikací, jako je tvorba map, předpověď škod při přírodních katastrofách a průzkum vodních zdrojů (Tadono et al., 2014). Tato digitální 3D mapa se skládá z digitálního výškového modelu (DEM), který může reprezentovat terén s prostorovým rozlišením přibližně 5 metrů. V květnu 2015 agentura JAXA vydala ALOS World 3D-30m (AW3D30), což je bezplatná globální datová sada DSM s horizontálním rozlišením přibližně 30m (1 úhlové vteřiny). Nejaktuálnější verze byla vydána v dubnu roku 2019 (ALOS product description, 2019).

2.4. LiDAR

První systémy LiDAR (Light Detection and Ranging) se začaly používat na letadlech a až o několik let později byly umístěny na družice a využity k měření Země. Dnes je LiDAR známý jako aktivní metoda dálkového průzkumu, kterou lze použít na kosmických, leteckých i pozemních platformách (Pinliang et. al, 2018).

LiDAR je technologie, která měří vzdálenost na základě zaznamenání rozdílu v čase mezi vysláním a přijetím laserového signálu. Lze použít jak pulzní, tak kontinuální lasery. Pulzní lasery vysílají energii velmi krátkého trvání a zjišťují vzdálenosti na základě amplitudy přijatých signálů, naproti tomu kontinuální lasery zjišťují vzdálenosti na základě fázového rozdílu mezi vysílanými a přijímanými signály (Baltsavias 1999b). Tato technologie se skládá ze zdroje laserového paprsku, GPS, počítače a IMU (inertial measurement unit), což je elektronické zařízení, které pomocí kombinace akcelerometrů, gyroskopů a někdy i magnetometrů měří a hlásí specifickou sílu, úhlovou rychlost a někdy i orientaci tělesa. Výhodou LiDARu je, že data lze sbírat ve dne i v noci, pokud není hustá mlha, kouř nebo vysoká vlhkost - například déšť, sníh a mraky mezi laserovým systémem a objektem. Další důležitou vlastností LiDARu je, že laserový paprsek může proniknout mezerami v korunách stromů a může měřit jak strukturu korun, tak výšku terénu pod stromovým zápojem (Pinliang et al. 2018).

2.5. ICESat a ICESat-2

2.5.1. Vývoj mise ICESat

ICESat byla první vesmírná laserová výšková mise pro zkoumání Země a byla v provozu od roku 2003 do roku 2009 (Schutz et al., 2005). ICESat nesl na palubě výškový altimetr GLAS což je první laserový měřicí přístroj (lidar) pro nepřetržité globální pozorování Země, který provádí jedinečná pozorování atmosféry jako důležitou součást programu ESE. Laser altimetru GLAS vysílá krátké pulzy infračerveného světla a viditelného zeleného světla. Laserové pulzy s frekvencí 40krát za sekundu zaznamenávají stopy o průměru 70 metrů, rozmístěné v intervalech 170 metrů podél zemského povrchu (icesat.gsfc.nasa.gov, 2022) Kvůli problémům s životností laseru byla strategie sběru dat družice ICESat změněna z nepřetržitého provozu na 30denní periody dvakrát až třikrát ročně. Navzdory tomuto periodickému režimu provozu se jednalo o velmi úspěšnou misi, která umožnila odhadnout celkové změny hmotnosti grónského a antarktického ledového příkrovu a také jejich regionální změny (Pritchard et al., 2009). Navzdory úspěchu mise ICESat zjistila vědecká komunita některá omezení, která bránila plnému využití datové sady pro vědecké účely, zejména pro určování změn v kryosféře. Na základě těchto zjištění byly stanoveny různé potřeby, požadavky a potenciální návrhy pro následnou misi ICESat-2 (Abdalati et al., 2010).

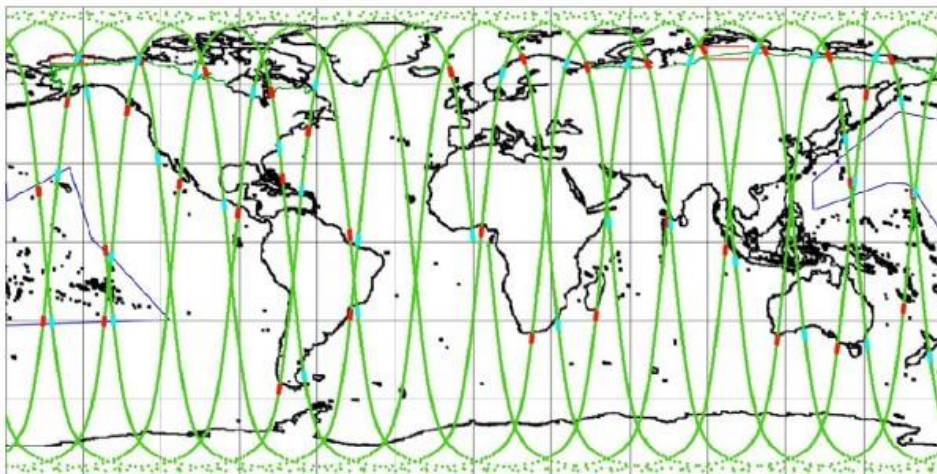
2.5.2. Vývoj mise ICESat-2

Mise ICESat-2 byla vypuštěna na oběžnou dráhu v září 2018 a byla navržena za cílem vylepšení prostorového rozlišení a schopnosti měření příčného sklonu dráhy oproti družici ICESat. ICESat-2 byl zkonstruován tak, aby měl menší rozměr, více přístrojů, a měl schopnost rozlišit drsnější terén pro přesnější měření hmotnosti bilance horských a okrajových ledovců, díky čemuž může lépe kvantifikovat podíl pevninského ledu na současném zvyšování hladiny moří. Mikropulzní laser na palubě ICESat-2 se nazývá ATLAS (více v kapitole ATLAS str. 9), (Markus et al., 2017). Družice ICESat-2 také shromažďuje údaje o pevninských a oceánských oblastech ve středních a nižších zeměpisných šířkách s využitím operační schopnosti zaměřování mimo nadmořskou výšku, aby bylo možné vytvořit optimalizovaný (neopakující se) soubor měření výšky korun stromů, který přispěje k vytvoření globálního hodnocení uhlíku v atmosféře (Markus et al., 2017). Mise ICESat-2 je přínosem i pro další vědecké oblasti. Vědci zkoumající atmosféru a její procesy mají přístup k odvozeným atmosférickým datům a vlastnostem mraků, zatímco oceánografové získali dispozici globální údaje o výškách oceánů a vln. Hydrologové mají k dispozici globální výšku vnitrozemských vodních

ploch a s tím související vlastnosti (Jasinski et al., 2016), jakož i tloušťku sněhu na pevnině a monitorování věčně zmrzlé půdy.

ICESat-2 létá na 91denní přesně opakované oběžné dráze na 92° úhlu sklonu, což zajišťuje pokrytí až do 88° severní a jižní šířky 1387 pozemních segmentů (obr. č. 4). Nominální výška oběžné dráhy je přibližně 500 km. Vzhledem k tomu, že počet pozemních drah a úhel sklonu jsou ve srovnání s družicí ICESat odlišné, pozemní dráhy družice ICESat-2 se neshodují s pozemními drahami družice ICESat. Existuje však značný počet míst, kde se pozemní dráhy ICESat a ICESat-2 kříží, zejména v polárních oblastech, což umožní propojení dat ICESat-2 s ICESat. Družice ICESat-2 shromažďuje opakovaná pozorování polárních oblastí. Pro střední zeměpisné šířky se díky operačnímu měření mimo nadír pod různými úhly vytvoří hustá síť měření (Lefsky et al., 2007).

Podobně jako družice ICESat, ICESat-2 poskytuje geofyzikální produkty pro různé typy povrchu, jako je pevninský led (ATL06), mořský led (ATL07), terén/vegetace (ATL08), atmosféra (ATL09), oceány (ATL12) a vnitrozemské vody (ATL13). Vědecký požadavek mise pro suchozemské ekosystémy uvádí, že družice ICESat-2 bude provádět měření nadmořské výšky, která umožní nezávislé určení globální výšky vegetace, s rovníkovým měřením vzdálenosti mezi pozemními dráhami menšími než 2 km po dobu dvou let (Markus et al., 2017).



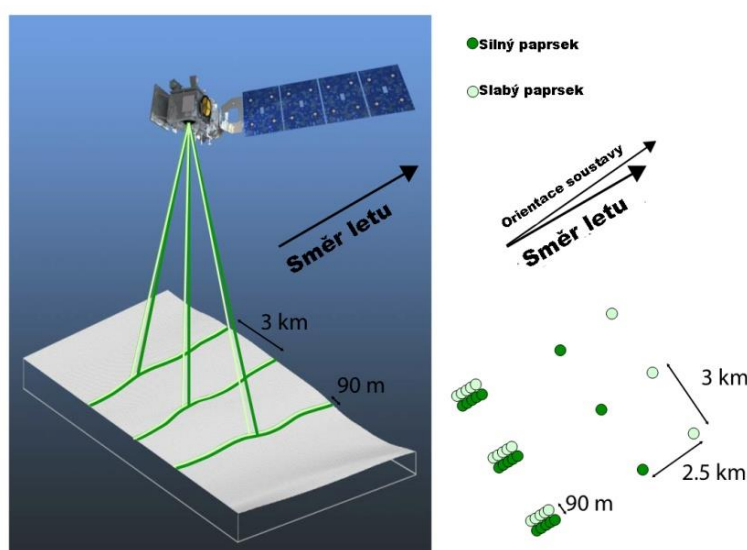
Obrázek 4 - Ilustrace jednoho dne oběhu sondy ICESat-2 (Markus et al., 2017)

Modré a červené úseky oběžné dráhy označují místa přechodu z polárního "režimu opakovaného sledování" do "režimu terén/vegetace" (Markus et al., 2017)

2.5.3. ATLAS

Přístroj ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) na palubě družice ICESat-2 je lidarový systém s detekční citlivostí na úrovni fotonů. Jde o novou technologii laserového určování polohy. Přístroj ATLAS má tři hlavní systémy, těmi jsou vysílač, který generuje laserové pulsy, přijímač, kde se fotony detekují a systém monitorování, který zahrnuje laserový referenční systém pro určení směru zaměření laseru (Neumann et al., 2019). ATLAS má celkem 6 paprsků uspořádaných do pole 2×3 . Mírným vychýlením sondy během letu se na zemi vytvoří tři páry paprsků, přičemž každý pár bude od sebe vzdálen 3,3 km a šířka páru bude 90 m (Markus et al., 2016), (obr. č. 5). Přestože měřený signál je malý (to znamená nízký poměr signálu k šumu - SNR), výhoda lidarů s počítáním fotonů je velká z hlediska snížených nároků na výkon laseru, což umožňuje menší přístrojové zatížení. Přístroj ATLAS také pracuje s vyšší opakovací frekvencí, která umožňuje lepší prostorové rozlišení podél jeho dráhy. Přestože je letecký mapovací systém v kosmickém mapování nový, laserové mapování s počítáním fotonů se ukázalo jako úspěšný mapovací nástroj pro místní mapování terénu a vegetace (Swatantran et al., 2016).

Systém ATLAS se od komerčních lidarů liší tím, že je schopen detekovat odraz laseru na úrovni jednotlivých fotonů. Většina komerčních lidarových systémů zaznamenává tisíce fotonů z odražené energie, které spustí detekci, když amplituda vráceného signálu překročí určitý práh. Dalším aspektem je náchylnost k šumu slunečního pozadí. Pro zlepšení účinnosti detektoru je na přístroji umístěn šumový filtr Etalon, který propouští pouze světlo o vlnové délce 532 nm, což je vlnová délka detektorové soustavy ATLASu (Swatantran et al., 2016).



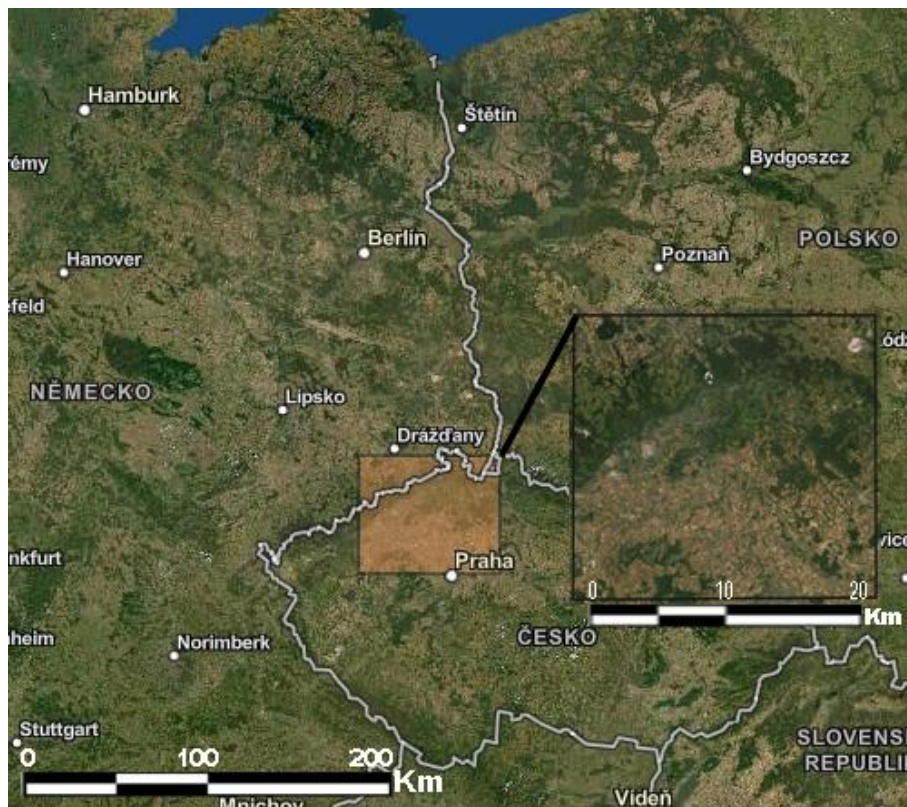
Obrázek 5 - Vizualizace rozložení paprsků ICESat-2(nsidc.org).

3. Metodika

3.1. Zájmové území

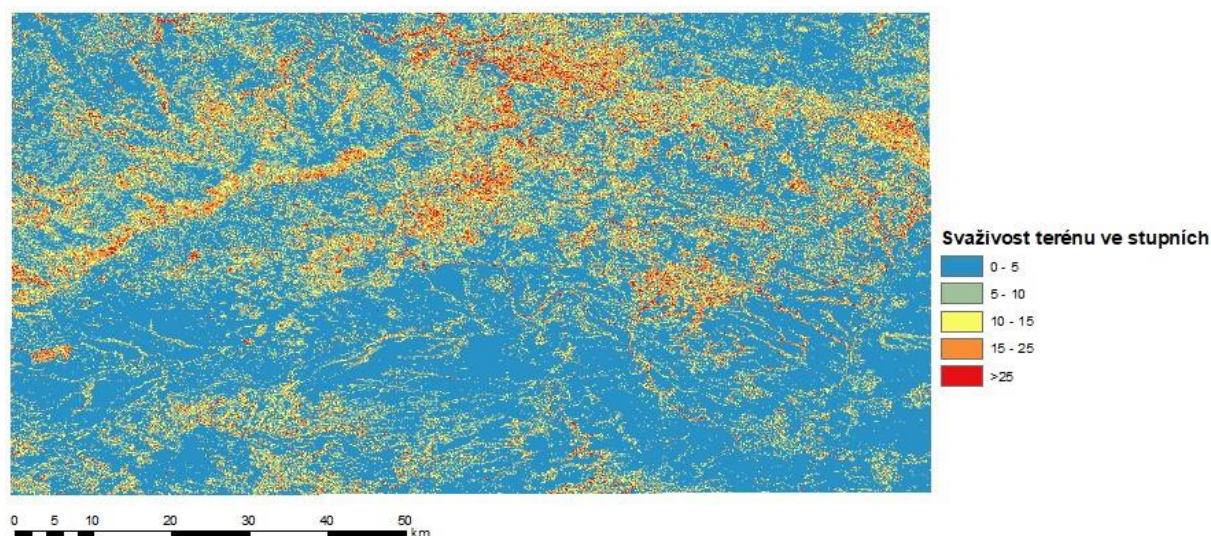
Převážná část zájmového území se nachází v České Republice, kde zasahuje do Českého středohoří, Jizerských hor, Českého Švýcarska, Lužických hor, části Slavkovského lesa a zhruba do poloviny Krušných hor. Tato oblast by se dala jednoduše charakterizovat jako Severní Čechy. V Krušných horách sdílí část s Německou stranou, v Jizerských horách zasahuje do Německa i Polska. Jeho celková rozloha činí 12 166 km². Severní Čechy jsou jednou z nejpestřejších oblastí v ČR. Krajinný pokryv zde nabízí řadu jevů a útvarů jako jsou roviny, horská pásma, vulkanické vrcholy, skalní oblasti či rozsáhlé lesní porosty. Do této oblasti spadá i národní přírodní rezervace Kaňon Labe, což je nejmohutnější pískovcový kaňon v celé Evropě.

Toto území bylo vybráno ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem byla dostupnost dat, druhým heterogenita povrchu. Tato oblast nabízí širokou škálu rozlišení krajinného pokryvu, což dělá analýzy mnohem zajímavější z hlediska vztažnosti právě k různým typům krajiny. Vyobrazení zájmového území se nachází níže na obrázku č. 6



Obrázek 6 – Vizualizace zájmového území

Výšková měření jsou často ovlivněna svažitostí terénu. Čím větší svažitost ve stupních, tím větší bude negativní dopad na výsledek měřených hodnot. Na obrázku č. 7 lze vidět vizualizaci svažitosti v zájmovém území.



Obrázek 7 - Svažitost terénu v zájmovém území

3.2. ATL08

V praktické části práce byla používána data z ATL08, tedy data týkající se terénu a vegetace. Konkrétně šlo o metriky h_{canopy_abs} pro vegetaci a $h_{te_best_fit}$ pro terén. V práci budou následně zmiňovány jako ATL08-Vegetace/Terén.

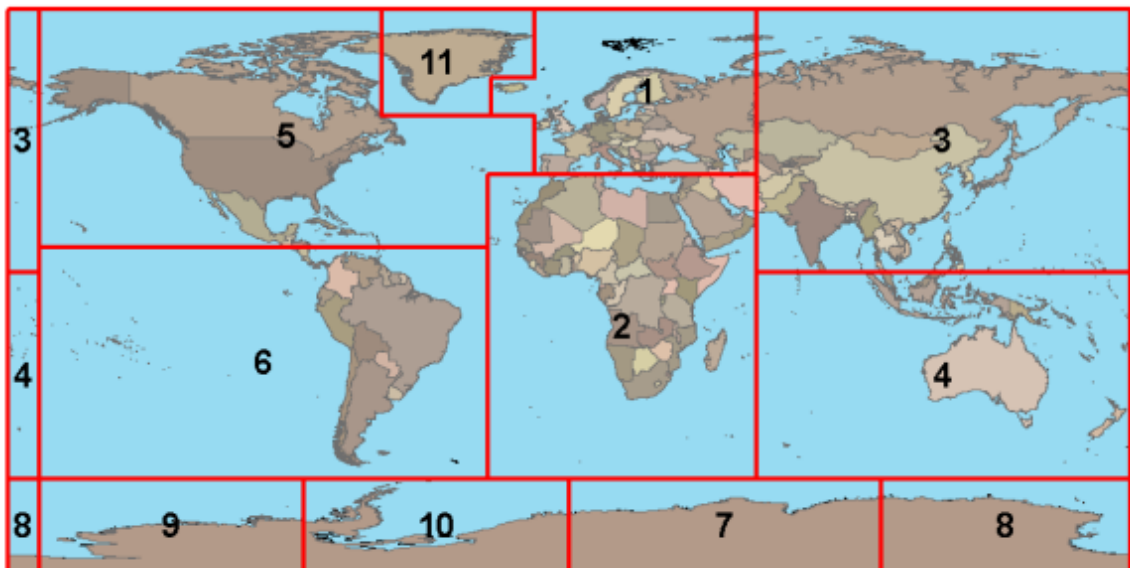
3.2.1. ATL08 – specifikace

Datová sada ATL08 obsahuje výšky nad elipsoidem WGS84 pro povrch země a korun stromů. Data byla získána přístrojem ATLAS (Neuenschwander, 2018). Na produkt ATL08 lze odkazovat podle regionů, které jsou zhruba přiřazeny podle kontinentů, jak ukazuje obrázek č. 8. Pro regiony pokrývající Antarktidu (regiony 7, 8, 9, 10) a Grónsko (region 11), algoritmus ATL08 předpokládá, že se zde nenachází žádný porost.

Identifikace povrchu země i vegetace je zdaleka nejkritičtější úkolem, je totiž nutné zjistit výšku horní hranice vegetace i výšku terénu ležícího pod ní. V rámci přípravy družice ICESat-2 vyvinula NASA inženýrský testovací přístroj (Brunt et al., 2016), aby zjistila proveditelnost technologie, a tato data usnadnila vývoj algoritmu pro výrobu geofyzikálních produktů družice ICESat-2. Metodika přijatá pro ATL08 využívá iterační přístup filtrování signálních fotonů pro zachycení jak horní i dolní vertikální hranice ve směru podél dráhy. Tyto dolní a horní hranice se používají jako odhady přízemní a horní části vegetace. Bylo zjištěno, že tato metoda zachovává topografii a

zachycuje fotony vrcholů vegetace a zároveň eliminuje šumové fotony. (Markus et al., 2017). Jakmile jsou fotony klasifikovány jako terén nebo vegetace, jsou použity k výpočtu parametrů datového produktu ATL08. Pevná velikost parametru „step“ je 100m, aby byla zajištěna kontinuita parametrů datového produktu ATL08. Konzistentní velikost „step“ zajišťuje, že metriky vegetace a terénu jsou v podélných produktech pro uživatelskou komunitu jednotné. Nad zarostlými plochami by rozlišení 100m mělo poskytnout přibližně 140 signálních fotonů, z nichž lze provést výpočty parametrů terénu a vegetace. Budou však existovat případy, kdy bude více než 140 fotonů a případy, kdy jich bude méně. Pokud je v kroku 100m méně než 50 označených fotonů signálu, nebudou provedeny žádné výpočty a v datovém produktu budou uvedeny neplatné hodnoty. Proměnlivost počtu fotonů se přičítá odrazivosti povrchu (tj. povrchy s vyšší odrazivostí odrážejí více fotonů) a atmosférickým podmínkám (tj. mlha/oblačnost zvyšující optickou hloubku na úroveň, kdy signální fotony nejsou rozeznatelné od fotonů pozadí), (Neuenschwander, 2018).

Datový produkt ATL08 je ve formátu HDF5 a je k dispozici prostřednictvím webové stránky National Snow and Ice Data Center (NSIDC). Každý paprsek (1 ze 6) nebo skupina pozemních drah (dále jen GT – ground tracks) se zpracovává nezávisle pro každou oběžnou dráhu (tj. referenční pozemní dráha). Každá skupina GT v datovém produktu ATL08 obsahuje podskupiny pro výšku země, stejně tak i pro paprsek a referenční parametry používané při zpracování ATL08 (Neuenschwander, 2018).



Obrázek 8 - Regiony pro ATL08 (Neuenschwander, 2018)

3.3. Požadavky na přesnost TanDEM-X DEM

TanDEM-X DEM byl navržen tak, aby splnil, či překročil specifikace uvedené v tabulce č. 1 (Wessel, 2016).

Specifikace nejdůležitějších parametrů pro přesnost měření TanDEM-X	
Požadavky na přesnost	Číselná specifikace
Relativní vertikální přesnost	2m (pro svah menší než 20%)
	4m (pro svah větší než 20%)
Absolutní vertikální přesnost	10m
Absolutní horizontální přesnost	10m
Prostorové rozlišení	12m
Pokrytí	97%

Tabulka 1 - Specifikace parametrů přesnosti pro TanDEM-X

Parametry přesnosti byly brány z veřejného dokumentu DLR pro specifikaci produktu TanDEM-X DEM (dostupný zde: <https://tandemx-science.dlr.de/>) a jsou vysvětleny v následujícím přehledu.

Absolutní vertikální výšková přesnost je vyjádřena jako lineární chyba v 90% intervalu spolehlivosti. Uvedená absolutní vertikální přesnost DEM musí být lepší než 10 m.

Relativní vertikální výšková přesnost je definována jako nejistota mezi dvěma odhady výšky způsobenými náhodnými chybami. Odpovídající hodnoty jsou vyjádřeny jako lineární chyby na 90% hladině spolehlivosti. Referenční oblast pro dva odhady výšky je $1^\circ \times 1^\circ$, což odpovídá přibližně 111 km x 111 km na rovníku.

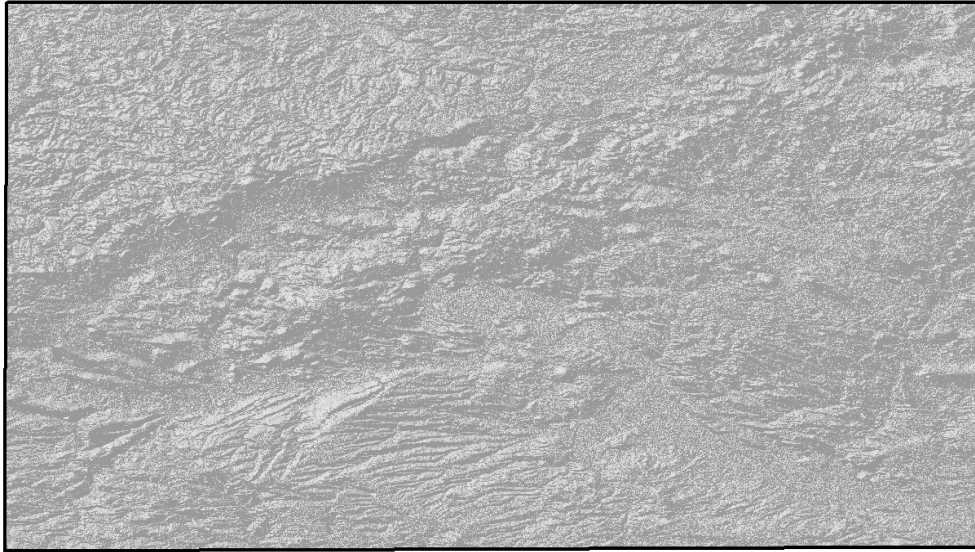
Relativní vertikální přesnost musí být menší než 2 m pro terén s nízkým a středním reliéfem (převažující sklon menší než 20 %) a 4 m pro terén s vysokým reliéfem (převažující sklon větší než 20 %).

Absolutní horizontální přesnost je definována jako nejistota horizontální polohy bodu způsobená náhodnými a nekorigovanými systematickými chybami. Hodnota je vyjádřena jako kruhová chyba na 90% hladině spolehlivosti. Absolutní horizontální přesnost musí být lepší než 10 m.

Posledním parametrem jsou prázdná data, která se nemohou vyskytnout z několika důvodů, včetně špatného poměru signálu a šumu (SNR) nad písečnými pouštními oblastmi, stíny, v horách a kaňonech atp. Dále se jedná o mezery, které vznikají v důsledku absence získaných dat nebo vstupních DMT s vyhovující kvalitou, nebo vodní plochy. Podle specifikace mise musí být maximálně 3 % všech pixelů DMT nad územím, kde se nachází (bez vodních ploch) být označeny jako neplatné % všech pixelů DMT nad územím, kde se nachází (bez vodních ploch) být označeny jako neplatné (Rizzoli et al., 2017).

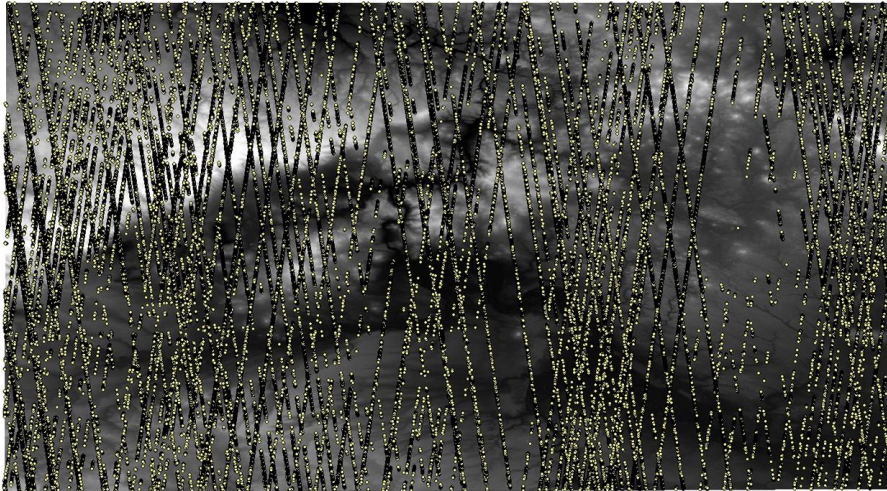
3.4. Předzpracování dat

Nejprve byla zpracována data TanDEM-X. Surová data DEM byla v rozlišení 12m a 90m, (staženo z: <https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/>, TDX v rozlišení 12m byl poskytnut vedoucím práce). Data TDX90 byla stažena v šesti segmentech, bylo tedy nutné je nejprve sjednotit dohromady a poté oříznout podle zájmového území. (Na obrázku č. 10 lze vidět vizualizaci hillshade dat TDX90, pro lepší pochopení struktury terénu v zájmovém území)

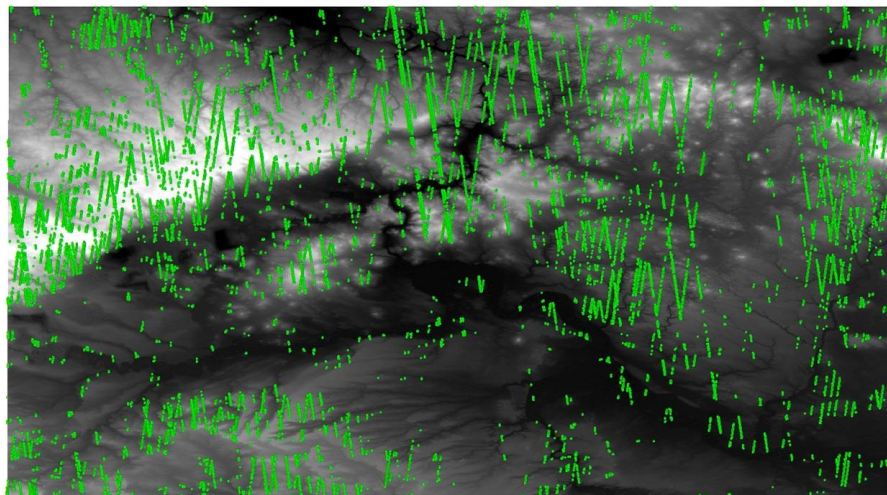


Obrázek 9 - Hillshade dat TDX v rozlišení 12m - vizualizace

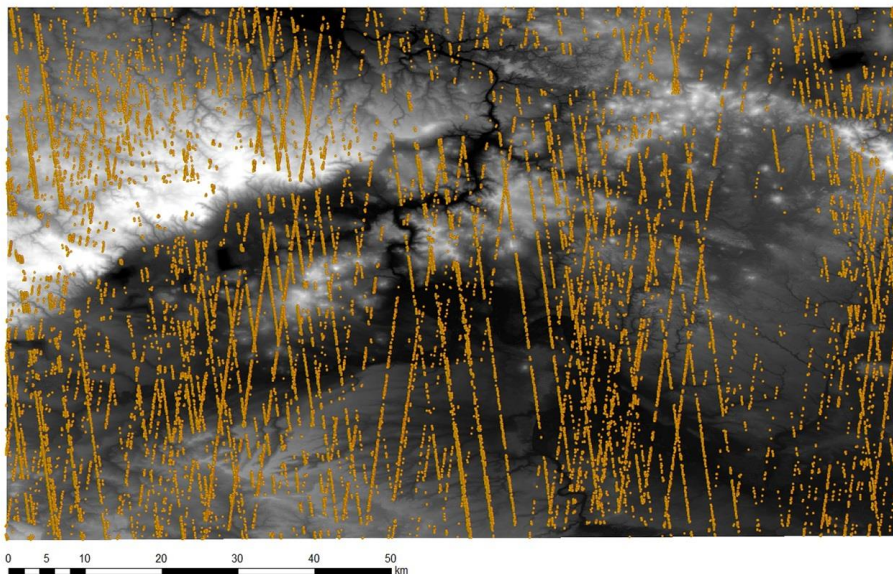
Data z družice ICESat-2 byla pořízena zde: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, jedná se o data nasbíraná v časovém rozmezí tří let, od 1. 1. 2018 do 1. 1. 2021. Všechna data byla ve formátu HDF5, zpracování těchto dat proběhlo pomocí několika vytvořených skriptů v R., nejprve bylo vytvořeno 6 csv tabulek pro jednotlivé „beams“ - paprsky z ATL08, ty byly poté spojeny do jedné tabulky obsahující vybrané metriky důležité pro zamýšlené analýzy, konkrétně se jedná o *h_te_best_fit*, *h_canopy_abs* a souřadnice. Z této tabulky byla vytvořena bodová vrstva. Dalším krokem předzpracování dat bylo přiřazení hodnot TDX12/90 k bodové vrstvě dat ATL08, aby bylo možné je validovat. K tomu byla použita funkce Extract Multi Values to Points, což vytvořilo tabulku se všemi výškovými hodnotami TDX12/90 a ATL08. Vizualizace dat ATL08 se nachází na obr. č. 11, data jsou vyobrazena pro celé zájmové území, lesy a zemědělské plochy. V této vizualizaci jsou již provedené všechny filtrace nevhodících se hodnot. Všechna data byla zpracována v softwaru Arcmap 10. 7. 1., nastavený souřadnicový systém pro vizualizace byl WGS84(4326).



Všechny body ATL08



Body ATL08 v lesích



**Body ATL08
na zemědělských
plochách**

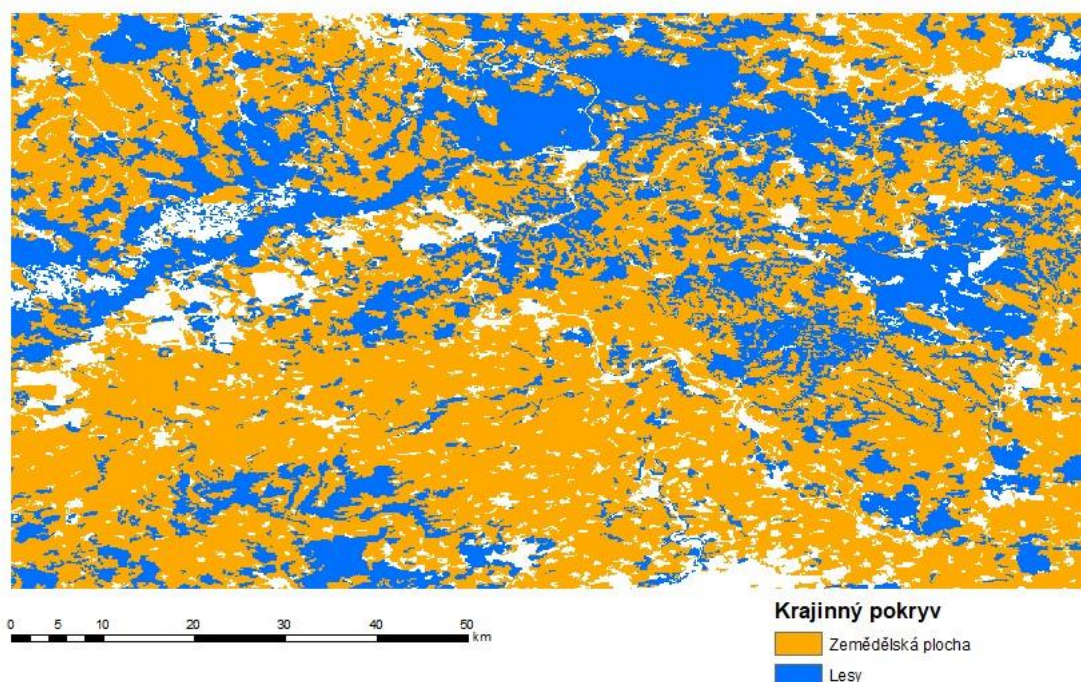


Obrázek 10 - Vizualizace ATL08 pro všechna data, ale i s ohledem na krajinný pokryv

Pro analýzu na základě krajinného pokryvu byla stažena vrstva Corine Land Cover 2018 (dostupné zde: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>). Vrstva byla oříznuta na velikost zájmového území a reklasifikována pouze podle lesních a zemědělských ploch (vstupní hodnoty viz tabulka 2). Opět byla použita funkce Extract Multiple Values to Points, což vytvořilo tabulku všech metrik s rozdělením podle typu krajinného pokryvu. Rozdělení dle CLC viz obr. č. 12 – v závorkách jsou uvedeny oficiální kódy pro typy krajinných pokryvů. Pro lepší analýzu byla předzpracovaná data nakonec podrobena detailnější filtraci – konkrétně byly odstraněny všechny hodnoty, které se buďto nenacházely v jednom z měření (tj. neměly svůj protějšek k porovnání), či hodnoty, které měly rozdíl v řádu stovek metrů. Nastaveno bylo tedy kritérium rozdílů měření v rozmezí -50m až 50m.

Pro zemědělské plochy
Nezavlažovaná orná půda (211)
Vinice (221)
Ovocné stromy a plantáže bobulovin (222)
Pastviny (231)
Komplexní pozemky s různými typy obdělávání (242)
Zemědělská půda s významnými plochami přirozené vegetace (243)
Pro lesy
Listnaté lesy (311)
Jehličnaté lesy (312)
Smíšené lesy (313)

Tabulka 2 - Vstupní hodnoty pro rozdělení krajinného pokryvu na lesy/zem. plochy



Obrázek 11 - Vizualizace krajinného pokryvu CLC2018

Všechna zpracovaná data byla v souřadnicovém systému WGS84. Vertikální i horizontální koordinační systém modelů TDX je WGS84 – G1150, výšky modelu TDX jsou elipsoidické. Data ATL08 mají souřadnicový systém ITRF2014, ITRF je realizací Mezinárodního terestrického referenčního systému (ITRS), který spravuje Mezinárodní služba pro rotaci Země a referenční systémy. Rozdíl výšek WGS84-G1150 a ITRF2014 je zanedbatelný, neboť tyto realizace se shodují na úrovni přibližně 10 centimetrů a neexistují žádné oficiální transformační parametry – data tedy nemusela být nijak transformována.

3.5. Validace dat, porovnání výsledků měření TDX a ICESat-2

3.5.1. Srovnání výškových měření

Hlavním cílem srovnání výškových měření bylo zjistit, jak moc se od sebe liší naměřená data z TDX12/90 a výškové metriky z ATL08. Jako referenční data zde byla použita data TDX12/90, ze kterých byla odečítána měření ATL08 pro terén a vegetaci. Všechny výpočty proběhly pro data v celém území, ale i pro data omezená na krajinný pokryv – konkrétně lesy a zemědělské plochy, dále bylo měření rozděleno podle svažitosti terénu. Pro vizualizaci rozdílů měření byly vytvořeny histogramy a vizualizace rozložení rozdílů měření v jaké části území se nachází největší rozdíly. K tomu byly vytvořeny grafy hustoty četnosti měření, pro porovnání, v jaké výšce se nachází nejvíce měření. Posledním způsobem validace dat v této práci byl výpočet validačních metrik, konkrétně se jedná o metriky ME, MAE, RMSE a LE90, které byly vypočteny vždy pro celou oblast a pro lesy/zemědělské plochy. Stejný výpočet proběhl i v závislosti na sklonu terénu.

ME – Mean error (česky střední chyba) je neformální termín, který obvykle označuje průměr všech chyb v souboru. "Chyba" v tomto kontextu znamená nejistotu měření nebo rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou/správnou hodnotou. Formálnější termín pro chybu je chyba měření, nazývaná také chyba pozorování.

LE90 zobrazuje 90% kvantil rozdílu v absolutní hodnotě mezi zkoumaným a referenčním modelem. Vzorcem vyjádřeno jako:

$$LE90 = Q_{|\Delta h|}(0,9)$$

MAE, Mean absolute error (česky střední absolutní chyba) měří průměrnou velikost chyb v souboru předpovědí bez ohledu na jejich směr (klad/zápor). Je to průměr absolutních rozdílů mezi předpovědí a skutečným pozorováním v testovaném vzorku, kde všechny jednotlivé rozdíly mají stejnou váhu

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x|$$

Kde:

- n** je počet všech naměřených hodnot
- x_i** je skutečná hodnota
- x** je předpokládaná hodnota

RMSE, Root mean squared error (česky střední kvadratická chyba) je kvadratické bodovací pravidlo, které rovněž měří průměrnou velikost chyby. Je to odmocnina z průměru čtvercových rozdílů mezi předpovědí a skutečným pozorováním.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

Kde:

- P_i** je predikovaná hodnota
- O_i** je pozorovaná hodnota
- n** je počet pozorování

4. Výsledky

V této práci byl porovnáván model TanDEM-X DEM ve dvou rozlišeních, 12 a 90 metrů s referenčními daty ATL08. Z ATL08 byla použita data o výšce terénu (*h_{te_best_fit}*) a vegetace (*h_{canopy_abs}*). Pomocí výpočtu metrik ME, MAE, RMSE, LE90 byla zjištěna přesnost měření a rozdíly hodnot TDX12/90 oproti ATL08-Vegetace/Terén. Dále byl zkoumán vliv krajinného pokryvu a svažitosti terénu pro všechna měření.

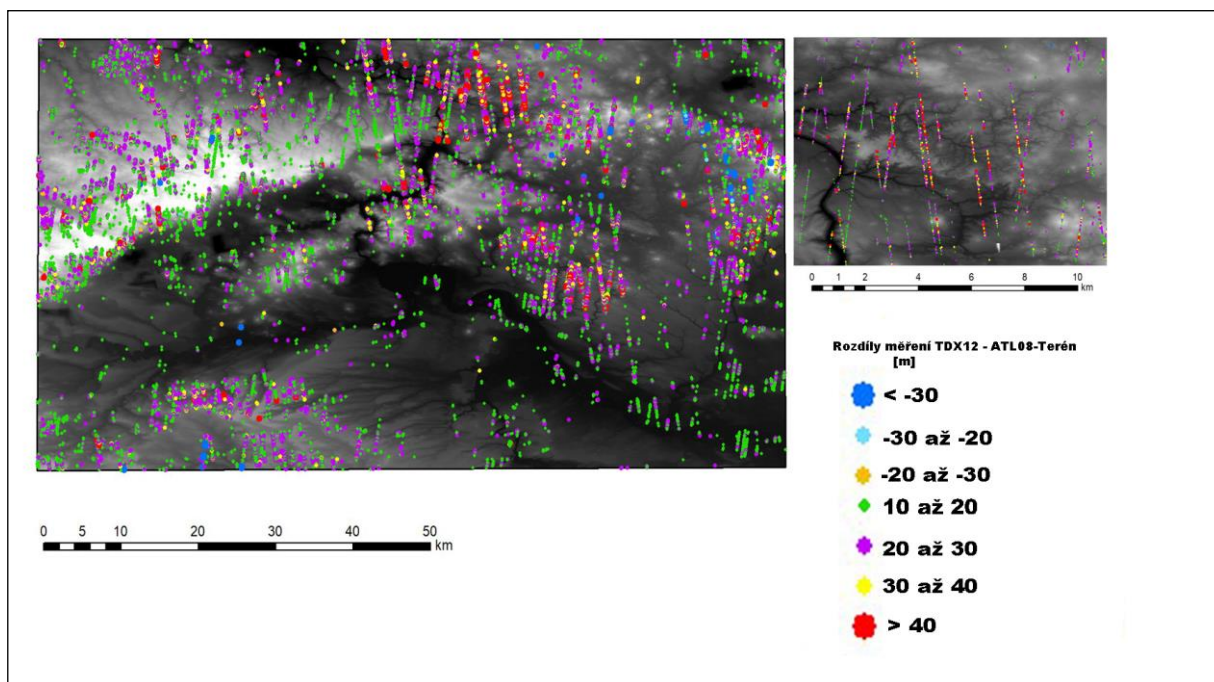
4.1. Srovnání výškového měření pro terén

Výsledky v tabulce č. 3 ukazují velmi podobné hodnoty pro TDX12 a TDX90. TDX12 sice dosahuje o něco lepších výsledků, ale tento rozdíl je tak malý, že ho lze zanedbat. Bylo zjištěno, že k nejhorším výsledkům dochází v lesích a naopak k nejpresnějším výsledkům na zemědělských plochách. Vizualizace rozdílů měření v zájmovém území se nachází na obr. č. 13 a 14 s rozlišením podle typu krajinného pokryvu, z důvodu podobných hodnot TDX12 a TDX90 je zde vizualizace pouze pro variantu s lepším rozlišením. Hodnoty v rozmezí -10m až 10m nejsou zobrazeny.

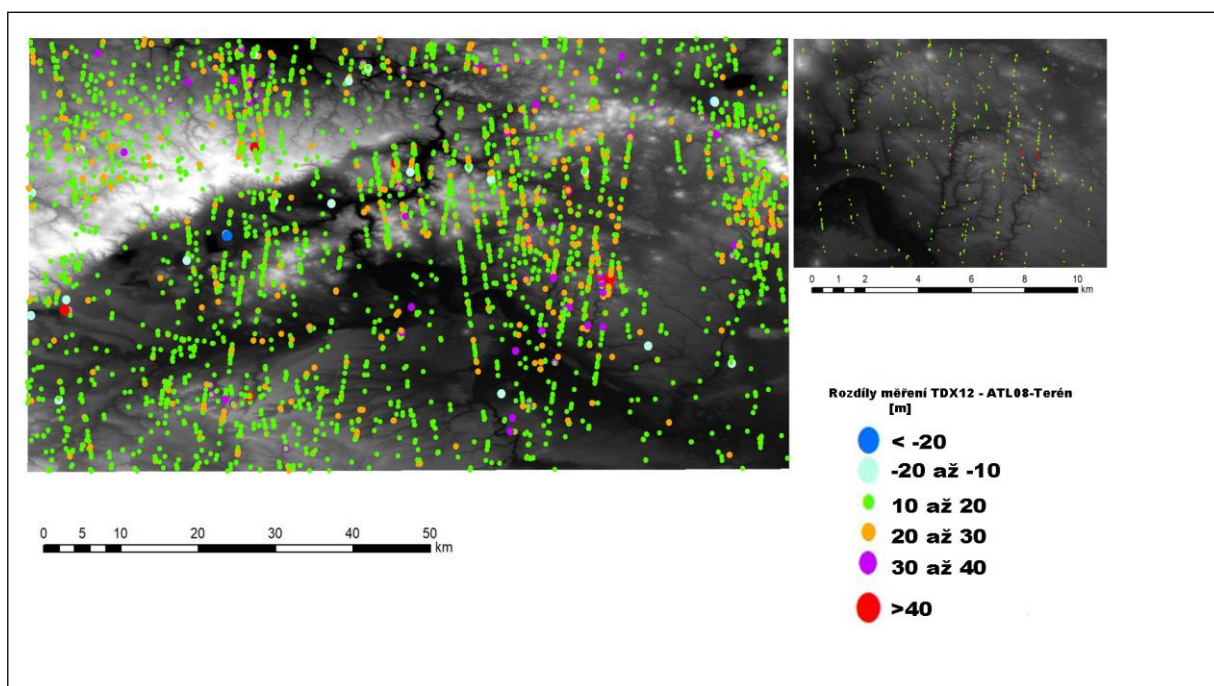
Výška terénu ATL08 v porovnání s naměřenou hodnotou TDX12m				
	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	LE90 [m]
Studovaná oblast celkem	6,97	7,94	12,92	21,19
Lesy	14,15	14,61	17,76	26,22
Zemědělské plochy	2,4	3,44	7,9	10,19
Výška terénu ATL08 v porovnání s naměřenou hodnotou TDX90m				
	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	LE90 [m]
Studovaná oblast celkem	6,89	8,4	13,11	20,83
Lesy	13,94	14,72	17,95	26,88
Zemědělské plochy	2,4	4,23	8,18	10,35

Tabulka 3 – Výpočet metrik pro TDX v porovnání s ATL08-Terén

Z obrázku č. 13 lze vyčíst, že největší rozdíly v měření jsou ve většině případů ve stejné části území, tyto naměřené rozdíly kopírují jakýsi vzorec a nejsou rozmístěny náhodně po zájmovém území – většinou se drží i ve stejné dráze měření. V případě měření na zemědělských plochách už by se o náhodné chybě mluvit dalo, neboť v tomto případě se zde nenachází tolik vysokých rozdílů v měření a víceméně jsou rozmístěny nezávisle na sobě v zájmovém území.

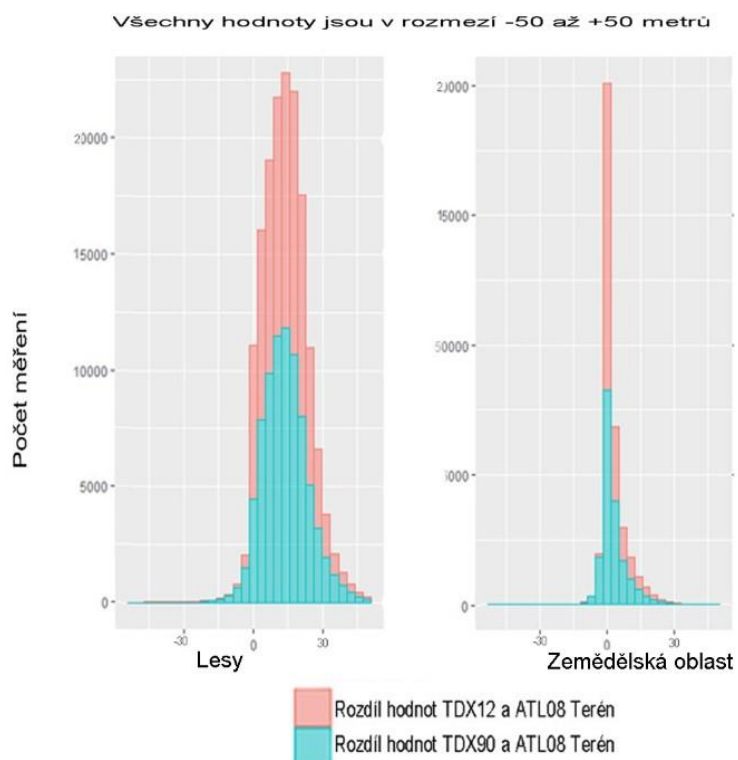


Obrázek 12 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Terén pro lesy



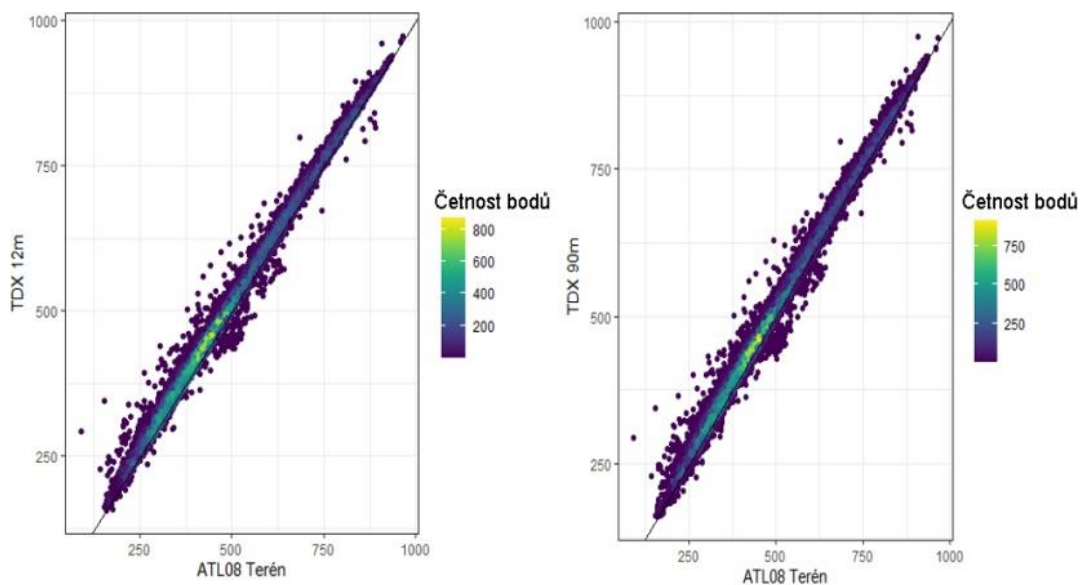
Obrázek 13 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Terén pro zemědělské plochy

Dále byly také vytvořeny histogramy rozdílů měření (obr. 15) s rozdělením na krajinný pokryv (pro celé území viz přílohy). Většina rozdílů je kladná tj. měření TDX12/90 má tendenci nadhodnocovat oproti ATL08-Terén. V lesích jsou vypočtené rozdílů rozmístěny hlavně v intervalu 0 – 30 metrů, zatímco na zemědělských plochách se většina pohybuje okolo nuly.

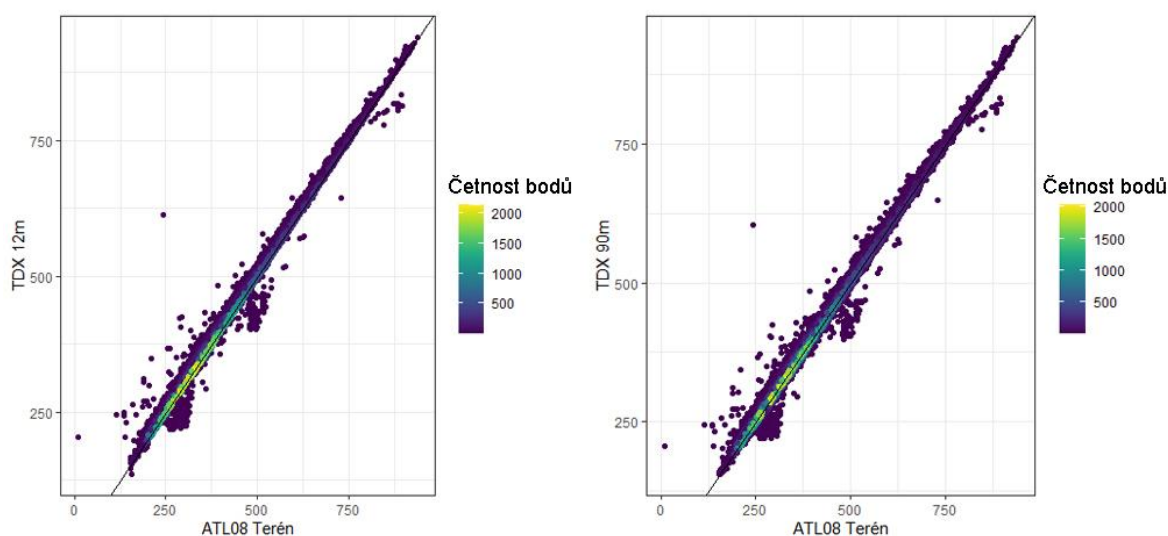


Obrázek 14 - Histogram rozdílů měření TDX12/90 a ATL08-Terén pro lesy/zemědělské plochy

Pro vizualizaci četnosti naměřených nadmořských výšek byly vytvořeny grafy hustoty, zde jsou uvedeny pouze pro zemědělské plochy a lesy (obr. č. 16, 17), graf hustoty pro celé zájmové území viz přílohy. Rozděleny byly podle TDX12/90 pro celkové zájmové území a s ohledem na krajinný pokryv.



Obrázek 15 - Rozdělení hustoty TDX12/90 v porovnání s ATL08-Terén pro lesy



Obrázek 16 - Rozdělení hustoty TDX12/90 v porovnání s ATL08-Terén pro zemědělské plochy

V zájmové oblasti byly vypočítány metriky MAE, RMSE a LE90 s ohledem na sklon terénu (tabulka č. 4) Porovnáván zde byl TDX12/90 oproti ATL08-Terén. Při porovnání obou modelů lze vidět, že podle metriky RMSE a LE90 je model TDX12 o něco přesnější, ale v případě do 10° sklonu vychází lépe TDX90. Pro sklon byly metriky vypočítány pouze pro celé zájmové území bez ohledu na krajinný pokryv.

SKLON	MAE [m]		RMSE [m]		LE90 [m]	
	TDX12	TDX90	TDX12	TDX90	TDX12	TDX90
0° - 5°	4,78	5,16	9,94	9,85	15,84	15,06
5° - 10°	8,41	8,93	12,88	12,86	21,14	20,43
10° - 15°	11,53	12,04	15,54	15,91	24,33	24,82
15° - 25°	13,93	14,42	17,63	18,31	26,7	28,65
>25°	16,36	17,16	20,37	21,79	29,3	31,64

Tabulka 4 - Výpočet metrik MAE, RMSE a LE90 s ohledem na sklon terénu, porovnání s měřením ATL08-Terén

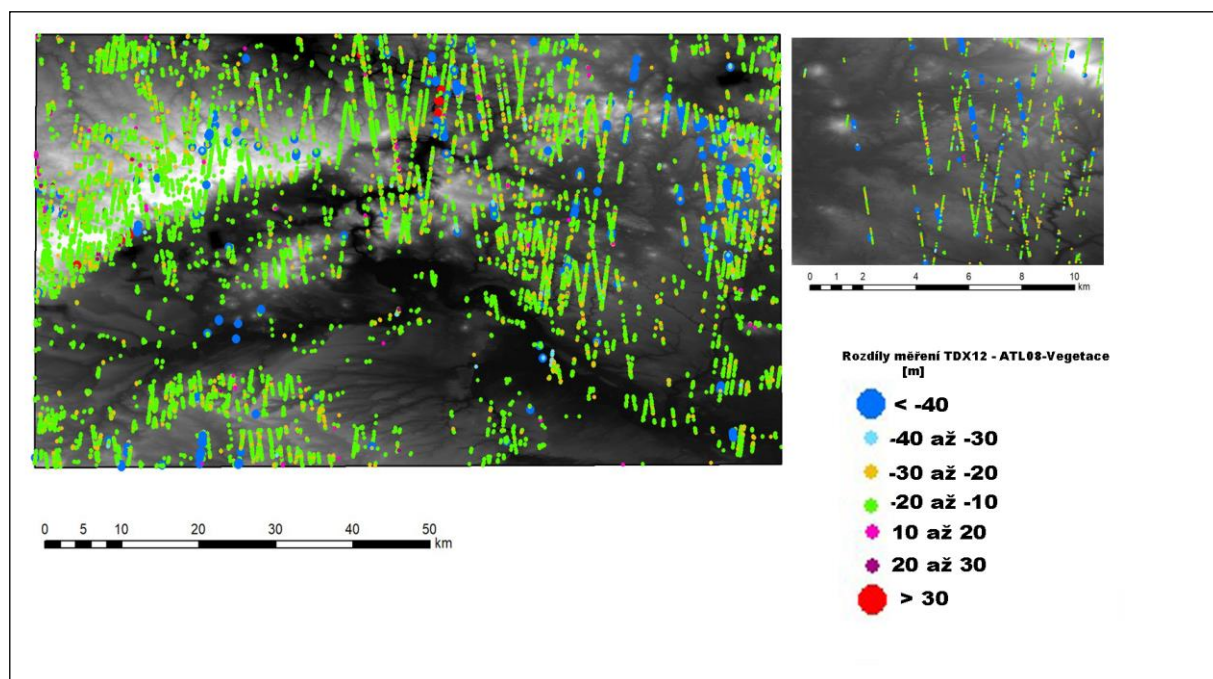
4.2. Srovnání výškového měření pro vegetaci

V této části jsou uvedeny všechny výsledky ve srovnání s ATL08-Vegetace (viz tabulka č. 5). Výsledky naznačují, že model TDX v obou variantách má mnohem lepší vztah k měření zemědělských ploch, než lesů. Lze pozorovat neobvyklý nárůst LE90, hlavně v zemědělských oblastech, kde je tato hodnota téměř dvojnásobně vyšší, než v porovnání s terénem.

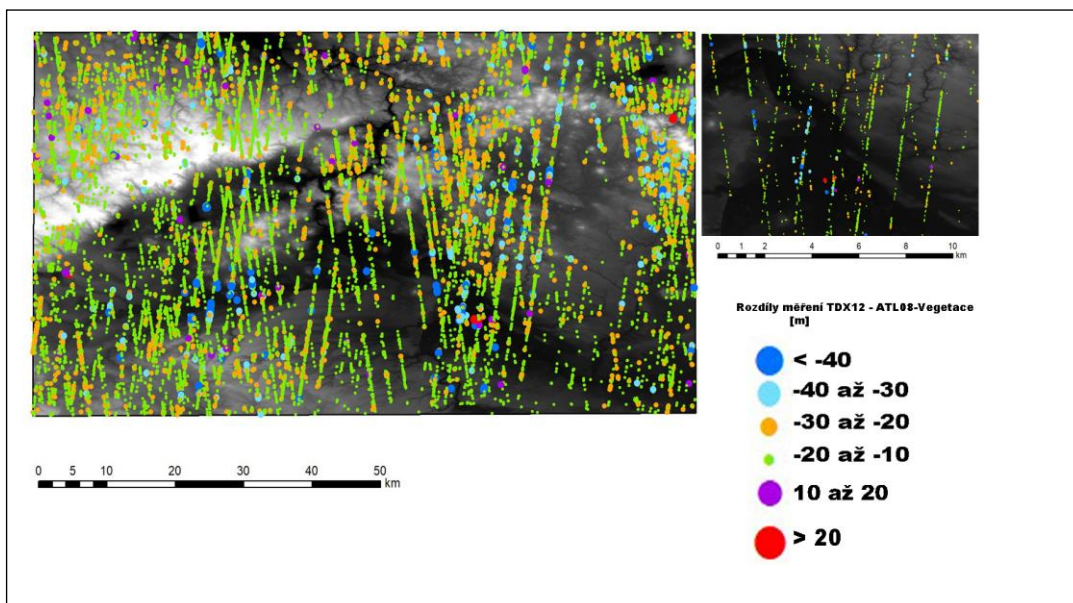
Výška vegetace ATL08 v porovnání s naměřenou hodnotou TDX12m				
	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	LE90 [m]
Studovaná oblast celkem	-11,67	12,11	15,86	20,17
Lesy	-12,17	12,77	16,12	21,53
Zemědělské plochy	-11,75	11,88	15,77	19,43
Výška vegetace ATL08 v porovnání s naměřenou hodnotou TDX90m				
	ME [m]	MAE [m]	RMSE [m]	LE90 [m]
Studovaná oblast celkem	-11,74	12,35	16,24	20,83
Lesy	-12,38	13,27	16,85	22,82
Zemědělské plochy	-11,75	11,97	15,97	19,82

Tabulka 5 - Výpočet metrik pro TDX v porovnání s ATL08-Vegetace.

Rozdíly v měření zde vyšly záporně, tj. hodnoty ATL08-Vegetace mají větší naměřenou výšku. Vizualizace rozdílů naměřených hodnot (obr. 18, 19) byla i zde znázorněna pouze pro TDX12 s ohledem na krajinný pokryv. Opět byl nastaven interval -10m až 10m, kde tyto hodnoty nejsou zobrazeny pro lepší přehled chybných měření. Vizualizace těchto rozdílů v podobě histogramů na obr. č. 20

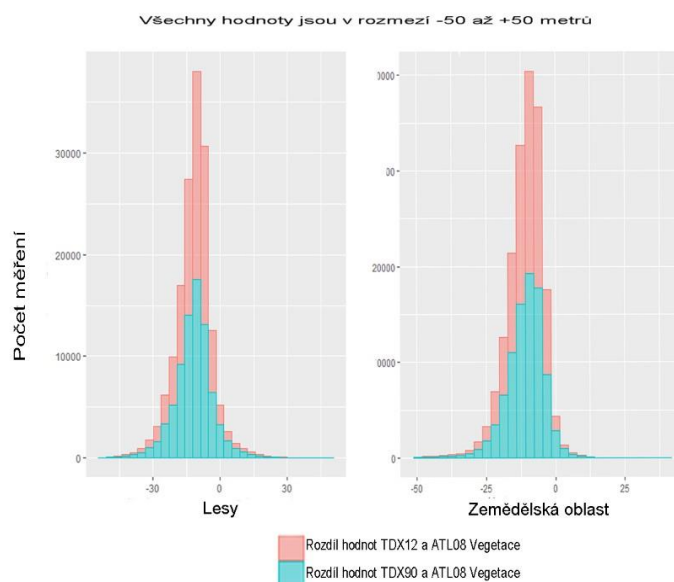


Obrázek 17 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Vegetance pro lesy



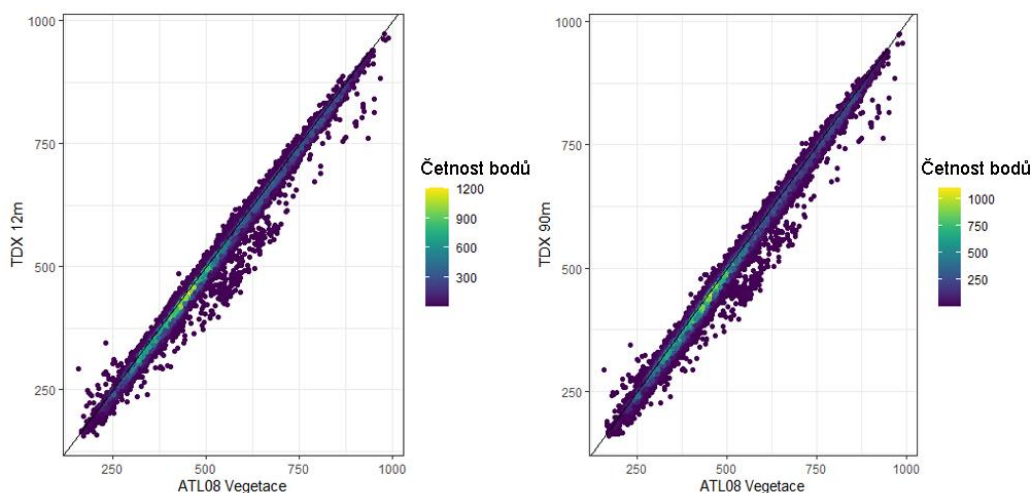
Obrázek 18 - Vizualizace rozdílů měření TDX12 - ATL08-Vegetace pro zemědělské plochy

V případě pro zemědělské plochy lze pozorovat, že většina rozdílů měření zde byla v intervalu od -10 do -20m. Tyto výsledky jsou rovnoměrně rozloženy po celém území, stejně tak i v případě pro lesy. V obou případech jsou největší naměřené chyby až na výjimky relativně u sebe. Kladné hodnoty rozdílů měření se zde nachází jen ve velmi řídkém počtu.

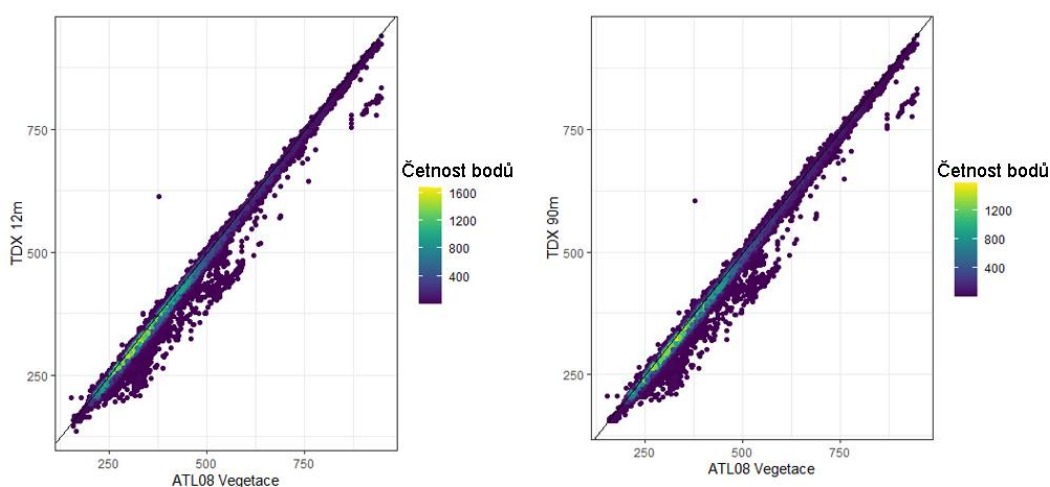


Obrázek 19- Histogram rozdílů měření TDX12/90 a ATL08-Vegetace pro lesy/zemědělské plochy

Vizualizace četnosti naměřených nadmořských výšek pomocí grafů hustoty je zde také pouze pro zemědělské plochy a lesy (obr. č. 21, 22), pro graf hustoty měření pro celé zájmové území – viz přílohy.



Obrázek 20 - Rozdělení hustoty bodů TDX12/90 v porovnání s ATL08 Vegetace pro lesy



Obrázek 21 - Rozdělení hustoty bodů TDX12/90 v porovnání s ATL08 Vegetace pro zemědělské plochy

I v této části byly vypočítány metriky MAE, RMSE a LE90 v závislosti na sklonu terénu (tabulka č. 6), v tomto případě lze opět pozorovat nárůst všech hodnot při zvyšujícím se sklonu. Model TDX12 je přesnější ve všech výsledcích, než TDX90, ale tyto rozdíly měření se od sebe liší jen velmi málo, pouze v případě LE90 zhruba od 15° sklonu je rozdíl kolem 3 metrů.

SKLON	MAE [m]		RMSE [m]		LE90 [m]	
	TDX12	TDX90	TDX12	TDX90	TDX12	TDX90
0° - 5°	11,4	11,43	15,4	15,45	18,08	18,12
5° - 10°	12,02	12,24	15,51	15,76	19,6	20,14
10° - 15°	12,74	13,18	16,19	16,87	21,51	22,64
15° - 25°	13,82	16,62	17,37	18,5	23,75	26,06
>25°	15,32	16,57	19,04	20,81	27,53	30,43

Tabulka 6 - Výpočet metrik MAE, RMSE a LE90 s ohledem na sklon terénu, porovnání s měřením ATL08 Vegetace

5. Diskuze

Tato práce se zabývá validací výškových měření TanDEM-X DEM. Referenčními daty použitými v této práci byla data ATL08 – konkrétně použité metriky *h_te_best_fit* a *h_canopy_abs*. Důležitým předpokladem pro relevantnost výsledků předkládané práce je přesnost dat ATL08. Existuje několik studií, které se přesností a zhodnocením produktu ATL08 zabývají. Neuenschwander a Pitts (2018) popisuje produkt ATL08 - jaké obsahuje metriky a na jakém principu funguje algoritmus zpracování těchto dat. Přesnost měření byla ověřována v oblasti Sonoma v Kalifornii a v Aljašské tundře a tajze. Jak bylo zjištěno v této studii, výsledky simulovaných dat použitých pro analýzy se ukázaly jako velice přesné, nicméně existují faktory, které tuto přesnost negativně ovlivňují. Algoritmus zpracování dat má největší problém hlavně v případě, kdy se od pozorované plochy odrazí nízký počet signálních fotonů. Počet odražených fotonů detekovaných systémem ATLAS je do značné míry ovlivněn odrazivostí povrchu (Neuenschwander et al., 2020). V důsledku toho byl vyvinut podpůrný algoritmus, který dokáže detekovat a následně eliminovat šum signálních fotonů, který negativně ovlivňuje výsledné měření. Pokud nedojde k odstranění těchto šumových fotonů, dochází k chybné klasifikaci výšky terénu. Další faktor, který negativně ovlivňuje měření, je hustá vegetace. Když se například větší část fotonů odrazí od koruny stromu, než od země, je výška vztažena ke koruně. Výsledky v této studii potvrzují, že složitá topografie s hustou vegetací představuje největší problém při měření, i přesto však autoři uvádí, že měření ATL08 je velmi přesné a lze jej využít jako referenční datovou sadu (Neuenschwander a Pitts, 2018). Podobně Dandabathula et al. (2020) validovali ATL08 pomocí diferenciální GPS a uvádějí průměrnou chybu blízkou nule a RMSE menší než 12cm.

Využitím dat ICESat-2 pro validaci digitálních výškových modelů se zabývala studie Carabajal et al. (2020), kteří používali data z ATL08 – konkrétně produkty *h_te_interp*, *h_te_uncertainty*, kterými validovali SRTM DEM s rozlišením 90m. Aby dosáhli co nejlepších výsledků, zabývali se v této studii hlavními faktory, které mají negativní vliv na přesnost měření. Ve studii Li et al., (2021) se také zabývali právě faktory ovlivňujícími přesnost měření. Mezi ně patří například vliv oblačnosti, typ krajinného pokryvu, vliv odrazivosti terénu, počet odražených fotonů, vliv atmosféry (resp. počtu aerosolů, mraků) či síla paprsku (weak x strong). Pro všechny tyto vlivy byla nastavena určitá omezení, která měla vést k co nejlepším výsledkům, což vedlo ke zlepšení přesnosti o 4% až 37%.

Aby se zjistila vertikální přesnost různých souborů dat DEM, mnoho studií porovnávalo hodnoty DEM s referenčními DEM. Nezávislé studie globálních nebo regionálních

DEM navíc ukazují, že skutečná vertikální přesnost je často vyšší než oficiální přesnost (Ramm et al., 2007). DEM lze také validovat velmi přesně zaměřenými body na povrchu, například měření GPS, kterou použili například Kosmann et al. (2010), nebo Wessel et al., (2018). V této studii se zabývali vertikální přesností TanDEM-X DEM (dále TDX) v rozlišení 12 metrů v celosvětovém měřítku. Referenčními daty v této studii byla kinematická data GPS (dále KGPS) rozložená na všech kontinentech vyjma Antarktidy, jejichž přesnost byla lepší než 0,5m. Z hlediska absolutní vertikální chyby vykazoval TDX v této studii velmi nízké průměrné hodnoty v porovnání s KGPS, kde přesnost měření LE90 vyšlo 2m, což je velmi dobrý výsledek. I v této studii brali v potaz členitost terénu na výsledné měření, např. v zastavěných oblastech vyšla odchylka RMSE vyšší +/- o 1,8m, ale v nižší vegetaci +/- 1,1m. U všech zkoumaných datových souborů v této studii data TanDEM-X splňují cíl 10 m, často až pětinasobně. Výsledky v této bakalářské práci nebyly zdaleka tak přesné, nicméně nelze říci, že za to může nepřesnost měření TanDEM-X. Při porovnání dat TanDEM-X s ATL08-Terén vyšly hodnoty RMSE 7,9m (TDX12) a 8,18m (TDX90) pro zemědělské plochy, nicméně RMSE pro lesy vyšla 17,76m (TDX12) a 17,95m (TDX90), což potvrzuje vliv krajinného pokryvu na přesnost měření. Pro ATL08-Vegetace byly hodnoty RMSE 15,86m (TDX12) a 16,24m (TDX90) pro zemědělské plochy, pro lesy 16,12m (TDX12) a 16,85m (TDX90). Hlavním předpokladem je fakt, že měření ATL08 použité pro validaci v této bakalářské práci obsahuje mnoho nepřesných hodnot, v důsledku toho byla přibližně čtvrtina těchto hodnot odstraněna. Dalším důvodem, proč hodnoty LE90 na zemědělských plochách dosahují vysokých čísel, může být nepřesná klasifikace podle corine land cover. Tato vrstva má pevně danou velikost buňky a v některých případech klasifikuje reálné prvky jinak – resp. do zemědělských ploch může přidat části měst, lesů a naopak.

Častými referenčními daty pro validaci DEM jsou také data ICESat/GLAS (Geoscience laser altimetersystem). Například Simard et al., (2016) validovali nový NASADEM na území USA. Studie Feng, Muller (2016) se zabývala validací TanDEM-X a zmíněným ICESat/GLAS pro oblast Spojeného Království. Přesnost TanDEM-X iDEM (Intermediate Digital Elevation Models – s rozlišením 0,4 až 3 úhlové vteřiny (12 – 30 metrů)) byla validována pomocí dat GLA14 (produkt GLAS obsahující informace o povrchu Země). V této studii byl řešen i vztah sklonu terénu. Pro oblasti se sklonem menším než 5° vyšla hodnota RMSE 5,24m, mezi 5° až 10° bylo naměřeno 10,5m, od 10° do 20° 15,3 metrů a pro sklon větší než 20° byla výsledná hodnota 20,6m. Podobně v předkládané práci byl zaznamenán výrazný vliv sklonu terénu na přesnost TanDEM-X DEM. Pro sklon do 5° je RMSE 9,9m, od 5° do 10° 12,9m, od 10° - 15° 15,m, od 15° do 25° 17,63m a pro sklon vyšší než 25° je tato hodnota 20,4m. Tyto výsledky naznačují, že sklon terénu má silný vliv na vertikální přesnost TanDEM-X.

6. Závěr

Bakalářská práce se zabývala problematikou validace TanDEM-X DEM (dále uvedeno jako TDX) dat v rozlišení 12 a 90 metrů. Validace proběhla vůči měřením ICESat-2, konkrétně jeho produktu ATL08 s rozdělením na terén (metrika *h_{te}_best_fit*) a vegetaci (metrika *h_{canopy_abs}*) v zájmové oblasti, která zasahuje do části České Republiky, Německa a Polska. Hlavní metoda validace dat proběhla pomocí výpočtu metrik ME, MAE, RMSE a také výpočtu vertikální přesnosti LE90. Z analýz v této práci plyne, že modely TDX12 a TDX90 jsou si velice podobné a ve všech případech se od sebe moc nelišily. Výrazný vliv na přesnost TanDEM-X DEM má krajinný pokryv. Pro zemědělské plochy platí, že nadmořské výšky jsou velmi podobné měření terénu z dat ICESat-2, naopak v případě lesů docházelo k výraznému nadhodnocení terénu. V případě porovnání s vegetací se výšky moc neshodují. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost měření je svažítost terénu. V této práci byl potvrzen významný vliv svažítosti, který negativně ovlivňuje přesnost TanDEM-X DEM. Výsledky RMSE pro celé zájmové území v porovnání s terénem jsou pro TDX12 12,92 metrů a pro TDX90 13,11 metrů. Pro porovnání s vegetací jsou hodnoty RMSE pro TDX12 15,86 metrů a pro TDX90 16,24 metrů. Většina rozdílů TDX12/90 se drží v rozmezí 30 metrů. Nadhodnocení dat TanDEM-X DEM oproti měřením ATL08-Terén vyšlo dle očekávání, v případě vegetace tyto hodnoty výrazně podhodnocují, což je očekávaný výsledek v lesích, ale zarážející na zemědělských plochách. Proč tomu tak je se nepodařilo zjistit, což nabízí podnět pro podrobnější výzkum v navazující studii.

7. Seznam zdrojů:

Abdalati W. et al., (2010) "The ICESat-2 Laser Altimetry Mission," in Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 5, str. 735-751, May 2010, doi: 10.1109/JPROC.2009.2034765.

Abrams, M., Crippen, R., & Fujisada, H. (2020). ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). *Remote Sensing*, 12(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/rs12071156>

Asharyanto, Hudan & Soeksmantono, Budhy & Wikantika, Ketut. (2015). Three dimensional city modeling with lidar data (case study: Ciwaruga Bandung).

Baltsavias, E.P. , (1999b). Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 199–214.

Brunt, K.M., Neumann, T., Amundson, J., Kavanaugh, J., Moussavi, M., Walsh, K., Cook, W., Markus, T., (2016.) MABEL photon counting laser altimetry data in Alaska for ICESat-2 simulations and development. *Cryosphere Discuss.* 1–31.

Carabajal, C. C., & Boy, J. P. (2020). ICESat-2 altimetry as geodetic control. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B3), 1299–1306. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1299-2020>

Dandabathula, G., Verma, M., & Rao Sitiraju, S. (2020). Evaluation of best-fit terrain elevation of ICESat-2 ATL08 using DGPS surveyed points. *Journal of Applied Geodesy*, 14(3), 285–293. <https://doi.org/10.1515/jag-2020-0003>

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., ... et SEAL, D., (2007): The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, str. 45(2).

Favey, E., Geiger, A., Gudmundsson, G.H., Wehr, A., (2003). Evaluating the potential of an airborne laser-scanning system for measuring volume changes of glaciers. *Geografiska Annaler: Series A Physical Geography* 81 (4), 555–561.

Feng L., Muller J.P. (2016) Icesat validation of tandem-x i-dems over the UK. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens.* S. 2016;41:129–136. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-129-2016.

Fujisada, H.; Urai, M.; Iwasaki, A. (2012) Technical methodology for ASTER global DEM. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012, 50, 3725–3736.

GISAT: ASTER GDEM, 2017: [online]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/aster-gdem>

Guth, P.L., (2006). Geomorphometry from SRTM – comparison to NED. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72 (3), 269–277

Hayakawa, S. Yuichi, Oguchi T., Zhou L., (2008); Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3; *Geophysical Research Letters*, Volume 35, Issue 17

Holmes, K. W., Chadwick, O. A., & Kyriakidis, P. C. (2000). Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology*, 233(1–4), 154–173. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00229-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00229-8).

Jasinski, M. F., Stoll, J. D., Cook, W. B., Ondrusek, M., Stengel, E., & Brunt, K.M. (2016, accepted). Inland and near shore water profiles derived from the high altitude Multiple Altimeter Beam Experimental Lidar (MABEL). *J. Coast. Res.*

Julzarika, Atriyon & Djurdjani, Djurdjani. (2019). DEM classifications: opportunities and potential of its applications. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 6. 1897-1905. 10.15243/jdmlm.2019.064.1897.

Kervyn, F., (2001). Modelling topography with SAR interferometry: illustrations of a favourable and less favourable environment. *Computer & Geoscience* 27, 1039–1050

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

Kosmann, D., Wessel, B., Schwieger, V., (2010). Global Digital Elevation Model from TanDEM-X and the Calibration/Validation with worldwide kinematic GPSTracks. XXIV FIG International Congress 2010, Sydney, Australia.

Köthe, R. et Bock, M. (2009): Preprocessing of Digital Elevation Models–derived from Laser Scanning and Radar Interferometry–for Terrain Analysis in Geosciences. *Proc. Geomorph*: 155-161.

Krieger G. et al., (2007). "TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3317-3341, Nov. 2007, doi: 10.1109/TGRS.2007.900693.

Lefsky, Michael & Keller, Michael & Pang, Yong & Camargo, Plínio & Hunter, Maria. (2007). Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms. *Journal of Applied Remote Sensing*. 1. 10.1117/1.2795724.

Li, B., Xie, H., Liu, S., Tong, X., Tang, H., & Wang, X. (2021). A method of extracting high-accuracy elevation control points from icesat-2 altimetry data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 87(11), 821–830. <https://doi.org/10.14358/PERS.21-00009R2>

Li, G., Tang, Xx, Wang, Z., ;Gan, Y., Lu, G., Li, H., Xie, D., (2019). Preliminary Accuracy Validation and Analysis of ICESat-2 Laser Atimetry Data in China by Airborne LiDAR Data, American Geophysical Union, Fall Meeting 2019,[28. 3. 2022]

Liping Yang, Xingmin Meng & Xiaoqiang Zhang (2011): SRTM DEM and its application advances, *International Journal of Remote Sensing*, 32:14, 3875-3896

Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., Farrell, S., Fricker, H., Gardner, A., Harding, D., Jasinski, M., Kwok, R., Magruder, L., Lubin, D., Luthcke, S., Morison, J., Nelson, R., Neuenschwander, A., Palm, S., ... Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>

Martin, P. H., Leboeuf, E. J., Dobbins, J. P., Daniel, E. B., et Abkowitz, M. D., (2005): Interfacing GIS with water resource models: A state-of-the-art review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(6): 1471-1487.

Marwaha N., Duffy E., (2021). - Everything you need to know about Digital Elevation Models (DEMs), Digital Surface Models (DSMs), and Digital Terrain Models (DTMs). <https://up42.com/>, online [12. 03. 2021.] <https://up42.com/blog/tech/everything-you-need-to-know-about-digital-elevation-models-dem-digital>

Moreira A. et al., (2015) "Tandem-L: A Highly Innovative Bistatic SAR Mission for Global Observation of Dynamic Processes on the Earth's Surface," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 3, no. 2, Str. 8-23, June 2015, doi: 10.1109/MGRS.2015.2437353..

Mouroulis P., B. van Gorp, R. O. Green, D. Cohen, D. Wilson, D. Randall, J. Rodriguez, O. Polanco, K. Balasubramanian, R. Vargas, R. Hein, H. Sobel, M. Eastwood, H. Dierssen, (2010) "Design of an Airborne Portable Remote Imaging Spectrometer (PRISM) for the Coastal Ocean," Earth Science Technology Forum (ESTF2010), Arlington, VA, June 22-24, 2010

Mukherjee S., Joshi P.K., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R., Mukhopadhyay A. (2016). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM) i. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2013;21:205–217. doi: 10.1016/j.jag.2012.09.004

Neueschwander, A., et al. (2019) Ice, Cloud, and Land Elevation 1 Satellite 2 (ICESat-2) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land-Vegetation Along-Track Products (ATL08) release 002. National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Centre, 2019. [2022]

Neumann, T. A., A. Brenner, D. Hancock, S. B. Luthcke, J. Lee, J. Robbins, K. Harbeck, J. Saba, K. M. Brunt, A. Gibbons, et al. 2019. ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 2. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL03.002>. [30. 3. 2022].

Pinliang Dong, Chen Qi. (2018). LiDAR Remote Sensing and Applications, Published by: © 2018 by Taylor & Francis Group, LLC. 2018. Str. 1 - 62

Podobnikar T. (2008). Simulation and representation of the positional errors of boundary and interior regions in maps (Chapter 7), Moore, A., Drecki, I. (eds.). Geospatial vision: new dimensions in cartography (Lecture notes in geoinformation and cartography), 141–169

Pritchard, H., Arthern, R., Vaughan, D. et al. (2009) Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. Nature 461, 971–975. <https://doi.org/10.1038/nature08471>

Rahman, A. A., (1994): Digital terrain model data structures. Bulletin Ukur, JIB, 5: 61-74.

Ramm, K., Schwieger, V., (2007). Requirements on Kinematic GPS-Measurements for the Evaluation of Height Accuracy within the TanDEM-X Project”, DLR TanDEM-X Ground Segment Document TD-PGS-TN-3061.

Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Borla Tridon, D., Bräutigam, B., Bachmann, M., Schulze, D., Fritz, T., Huber, M., Wessel, B., Krieger, G., Zink, M., & Moreira, A. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 119–139. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>

Rodriguez, E., Morris, C. S. et Belz, J. E., (2006): A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing*, 72(3): 249-260.

San, B.T., Suzen, M.L., (2005). Digital elevation model (DEM) generation and accuracy assessment from ASTER stereo data. *International Journal of Remote Sensing* 26 (22), 5013–5027.

Santillana, J. R., Makinano-Santillana, M., Ampayon, B. C., et Del Norte, A., (2016): Vertical Accuracy Assessment of 30-M Resolution Alos, Aster, and Srtm Global Dems Over Northeastern Mindanao, Philippines. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: str 149-156.

Schenk, T., (1996). Digital aerial triangulation. *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 31 (B3), 735–745.

Swatantran, A., Tang, H., Barrett, T. et al. (2016). Rapid, High-Resolution Forest Structure and Terrain Mapping over Large Areas using Single Photon Lidar. *Sci Rep* 6, 28277 dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep28277>

Tadono T., H. Ishida, F. Oda, S. Naito, K. Minakawa, and H. Iwamoto, (2014) “Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM,” *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.II-4, str.71-76, 2014.

Wessel, B., (2016). TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document. EOC, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany, Public Document TD-GSPS-0021, Issue 3.3, 2022. [Online]. Available: <https://tandemx-science.dlr.de/>.

Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschalk, U., Kosmann, D., & Roth, A. (2018). Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, str. 139, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017>

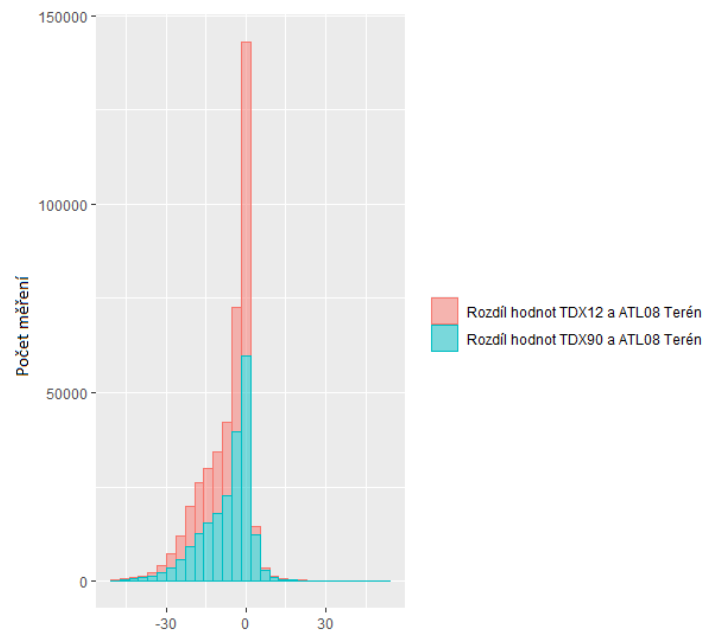
Werner, Marian. (2001). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Mission Overview. *Frequenz -Berlin*. 2001. Sv. 55, str. 75-79.

Wilson, John P., & John C. Gallant. (2000). Digital Terrain Analysis. Terrain Analysis: Principles and Applications, January, str. 2–29.

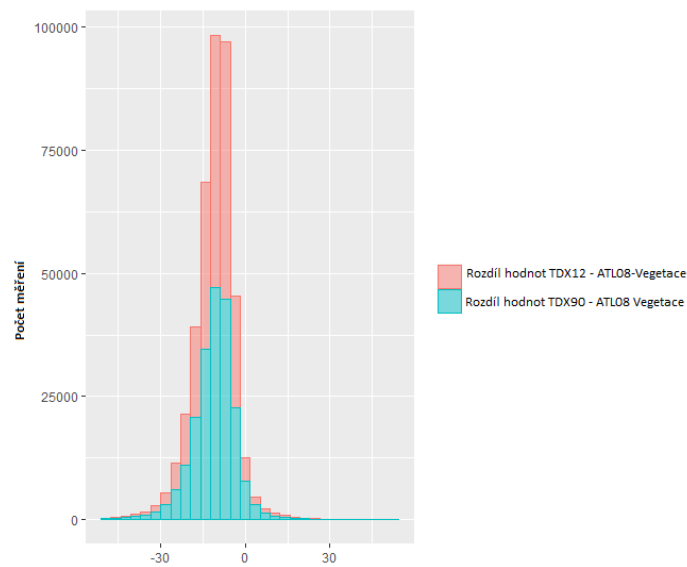
Y. Yamaguchi, A. B. Kahle, H. Tsu, T. Kawakami and M. Pniel, (1998) "Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 36, no. 4, pp. 1062-1071, July 1998, doi: 10.1109/36.700991.

Zink, M. et al., (2014). TanDEM-X: the new global DEM takes shape. IEEE Geosci. Remote Sens. Mag. 2 (2), str. 8–23

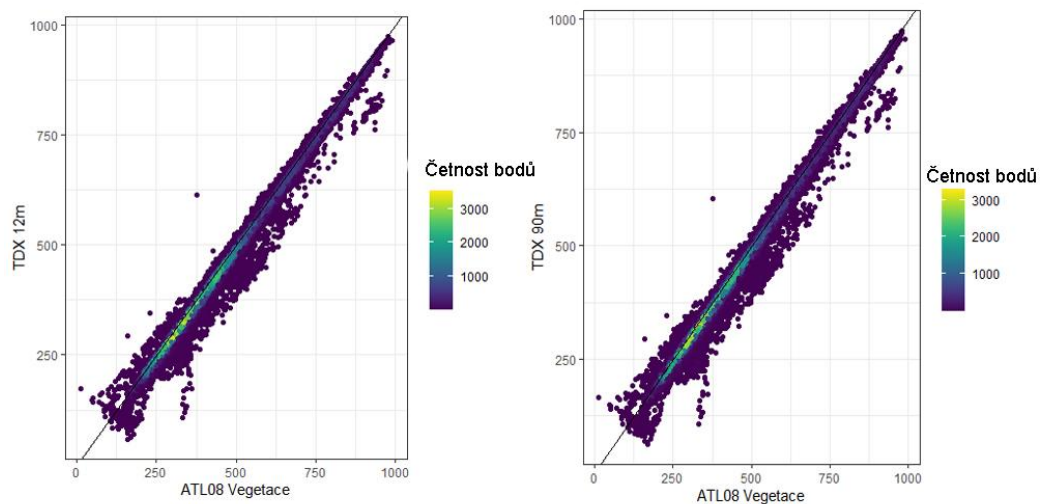
8. Přílohy



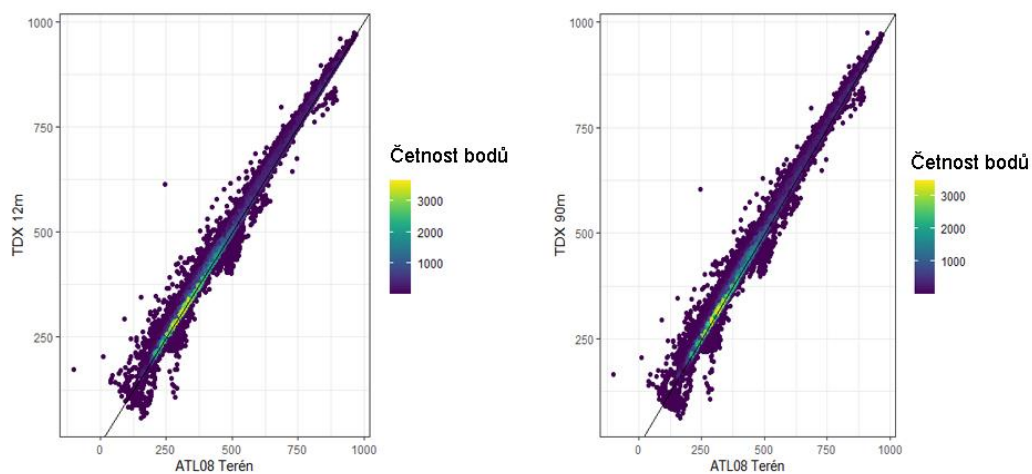
Obrázek 22 - Histogram rozdílu měření TDX12/90 - ATL08-Terén pro celé území



Obrázek 23 - Histogram rozdílu měření TDX12/90 - ATL08-Vegetace pro celé území



Obrázek 24 - Graf hustoty měření TDX12/90 s ATL08-Terén pro celé území



Obrázek 25 - Graf hustoty měření TDX12/90 s ATL08-Vegetace pro celé území