

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování

Bakalářská práce

Analýza přesnosti digitálního elevačního modelu
TanDEM-X v Krkonoších

Autor: Denisa Kujovská
Vedoucí: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Denisa Kujovská

Vodní hospodářství

Název práce

Analýza přesnosti digitálního elevačního modelu TanDEM-X v Krkonoších

Název anglicky

Evaluation of TanDEM-X DEM in Krkonoše mountains

Cíle práce

Cílem práce je posoudit kvalitu digitálního elevačního modelu TANDEM-X na území Krkonošského národního parku (KRNAP). Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

Metodika

Digitální elevační modely (DEM) jsou zásadním vstupem v mnoha odvětvích environmentálního modelování (např. hydrologie, modelování druhové distribuce). 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. Nedávná mise TANDEM-X přinesla nový globální DEM s dosud nevídaným rozlišením 12m. Autorka se v literární rešerši zaměří na problematiku DEM a na nově dostupný TANDEM-X DEM. Tento DEM porovná s daty leteckého laserového skenování na území Krkonošského národního parku a vyhodnotí, které parametry mají vliv na přesnost modelu.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Grohmann, C. H. (2017). Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. arXiv preprint arXiv:1709.05016.
- Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., & Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217.
- Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Tridon, D. B., Bräutigam, B., ... & Wessel, B. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 119-139.
- Walker, W. S., Kelndorfer, J. M., & Pierce, L. E. (2007). Quality assessment of SRTM C-and X-band interferometric data: Implications for the retrieval of vegetation canopy height. *Remote Sensing of Environment*, 106(4), 428-448.
- Wessel, B., Gruber, A., Huber, M., Breunig, M., Wagenbrenner, S., Wendleder, A., & Roth, A. (2014, July). Validation of the absolute height accuracy of TanDEM-X DEM for moderate terrain. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International* (pp. 3394-3397). IEEE.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 17. 3. 2018

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2018

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze 22.4.2018

.....
Denisa Kujovská

Poděkování

Mé poděkování patří Vítězslavu Moudrému za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

Denisa Kujovská

Abstrakt: DEM TanDEM-X je globální digitální elevační model s dosud nejlepším dostupným rozlišením. Cílem práce bylo analyzovat vertikální přesnosti tohoto modelu na hornatém území Krkonoš a identifikovat hlavní aspekty, které tuto přesnost ovlivňují, ať už jsou environmentálního (svažitost, orientace svahů, zalesnění) či technického rázu (COV, COM). Data byla poskytnuta Německým střediskem pro letectví a kosmonautiku (DLR). Porovnání bylo provedeno s velmi přesným modelem terénu (DTM) a povrchu (DMP) Krkonoš z leteckého laserového skenování. Z environmentálních charakteristik nejvíce ovlivňuje vertikální přesnost zalesnění (pro DTM je ME na nezalesněném území 1,6 m a RMSE 4,9 m, v lesích ME 10,7 m a RMSE 14,4 m), dále svažitost (vertikální přesnost klesá úměrně se zvyšující se svažitostí) a až v poslední řadě orientace ke světovým stranám (při srovnávání s DTM byly největší chyby vypočteny na východních svazích, při srovnávání s DMP na západních svazích). Z technických specifik hraje velkou roli počet přeletů nad územím (chyby rapidně klesají, bylo-li provedeno dva a více přeletů), největší vertikální přesnosti bylo dosaženo, pokud byly všechny výšky získané v rámci různých přeletů konzistentní. Je důležité poukázat na různou vertikální přesnost, je-li DEM TanDEM-X uvažován jako model terénu či model povrchu. Při porovnání s DMP, podmínku absolutní vertikální přesnosti (10 metrů) splňuje zhruba 85 % hodnot, zatímco při srovnávání s DTM na zalesněném území zhruba polovina hodnot překračuje horní hranici této přesnosti. Tyto skutečnosti omezují možnosti použití modelu a koncový uživatel by si jich měl být vědom.

Klíčová slova: TanDEM-X, DEM, vertikální přesnost, Krkonoše

Abstract: DEM TanDEM-X is a global digital elevation model with the best available resolution. The main objective of this study was to assess the vertical accuracy of this model in the Krkonoše mountains and to identify the main aspects that affect this accuracy, whether they are environmental (slope, aspect, type of vegetation) or technical (COV, COM). The data were provided by German Aerospace Center (DLR). A very accurate LiDAR digital terrain model (DTM) and a digital surface model (DMP) served as a reference. With respect to the environmental characteristics, vertical accuracy is the most affected by the type of vegetation (when compared to DTM in the forestless area, the ME is 1,6 m and the RMSE 4,9 m, in the forested area, the ME is 10,7 m and the RMSE 14,4 m), then by the slope (vertical accuracy decreases proportionately with increasing slope) and the least by the aspect (the highest errors on the eastern slopes when compared to DTM, and on the western slopes when comparing with DMP). Concerning the technical characteristics, the number of flights over the territory is the most important one (errors decreased rapidly when two or more overflights were issued), the highest vertical accuracy was achieved when all gained altitudes were consistent. It is important to point out the varying vertical accuracy depending on the use of DEM TanDEM-X either as a terrain model or a surface model. When comparing with DMP, the condition of the absolute vertical accuracy (10 m) is met by 85 % of values, whereas when compared to DTM in a forested area, approximately one half of the values exceed the upper limit of this accuracy. These facts limit the possibilities of using the model and the end user should be aware of them.

Key words: TanDEM-X, DEM, vertical accuracy, Krkonose mountains

Obsah

1	Úvod	9
2	Literární rešerše	10
2.1	Zájmové území - Krkonošský národní park	10
2.1.1	Výběr zájmového území	10
2.1.2	Krkonošský národní park	11
2.2	Radar	12
2.2.1	Radar se syntetickou aperturou (SAR)	13
2.3	Digitální elevační model	14
2.4	Mise TanDEM-X	15
2.5	TanDEM-X DEM	15
2.6	LiDAR	16
2.6.1	Princip laserového skenování z letadla	16
3	Metodika	18
3.1	Sběr a příprava dat	18
3.2	Environmentální charakteristiky	19
3.2.1	Slope	20
3.2.2	Aspect	20
3.2.3	Zalesnění	21
3.3	Charakteristiky kvality TanDEM-X	22
3.3.1	DEM	22
3.3.2	COV	22
3.3.3	COM	23
3.4	Evaluace vertikální přesnosti	24
4	Výsledky a diskuze	25
4.1	Vertikální přesnost v závislosti na environmentálních charakteristikách	26
4.1.1	Typ vegetace	26
4.1.2	Svažitost	27
4.1.3	Orientace	29
4.2	Vertikální přesnost v závislosti na technických specifikách	31
4.3	Vliv environmentálních charakteristik na absolutní vertikální přesnost	32
5	Závěr	37

Úvod

Od roku 2016 je pro vědecké účely dostupný globální digitální elevační model (DEM) TanDEM-X s rozlišením 12 metrů a s dosud nevídanou vertikální přesností. Už dnes je pro komerční účely dostupná verze modelu s rozlišením 30 metrů, avšak v následujících letech bude komerčně dostupná i verze s tímto vyšším prostorovým rozlišením [Wessel et al., 2018]. DEM TanDEM-X byl vytvořen za pomoci dvou družic snímajících celý povrch Země a představuje unikátní možnost použití modelu ekology, krajinnými inženýry, vodohospodáři nebo například urbanisty pro nejrůznější účely. Dostupnost modelu, který spojitě pokrývá celou Zemi, umožňuje analyzování různých globálních procesů, jejichž modelování je dnes značně omezeno ať už nutností použití více lokálních modelů terénu nebo použitím dostupných globálních modelů, jejichž rozlišení či vertikální přesnost je omezena [Roth et al., 2002].

Udávané vertikální či polohové přesnosti jsou často brány jako fakt. Každý model je ale limitován celou řadou faktorů - vyspělostí použitých technologií, environmentálními charakteristikami terénu nebo i správným užitím koncovým uživatelem. Je tedy žádoucí tyto globální modely validovat s přesnými lokálními modely a zhodnotit tak možnosti jejich použití pro různé druhy reliéfu, popřípadě identifikovat a popsat podmínky, za kterých je přesnost globálního elevačního modelu dostačující a kdy už je omezena [Mukherjee et al., 2013]. Vzhledem k omezené dostupnosti dat TanDEM-X nebyl tento model doposud hojně validován.

Zejména v hornatých územích je možné přepokládat výskyt několika limitujících faktorů [Gupta et al., 2014]. Pro účely analýzy vertikální přesnosti DEM TanDEM-X byl vybrán Krkonošský národní park, který se vyznačuje velkou variabilitou terénu a vysokým procentem zalesnění. Porovnávní bude provedeno s velmi přesným lokálním modelem terénu a povrchu získaným technologií leteckého laserového skenování v roce 2012.

Cílem práce je představit nově dostupný DEM TanDEM-X a provést analýzu jeho vertikální přesnosti na zájmovém území Krkonošského národního parku. Záměrem je tedy nejen ověřit splnění uváděné vertikální přesnosti, ale také identifikovat kritéria, která tuto přesnost nejvíce ovlivňují na vybraném zájmovém území, a tím poukázat na možná omezení při použití DEM jako přesné reprezentace výškových poměrů. Bude zkoumán (i) *vliv environmentálních charakteristik* - zalesnění, svažitosti a orientace svahů ke světovým stranám, (ii) *vliv technických specifik TanDEM-X* - vertikální přesnost při určitém počtu přeletů družice či na základě konzistentnosti hodnot jednotlivých získaných výšek a v neposlední řadě (iii) *skutečné splnění podmínky absolutní vertikální přesnosti na celém území*.

Literární rešerše

2.1 Zájmové území - Krkonošský národní park

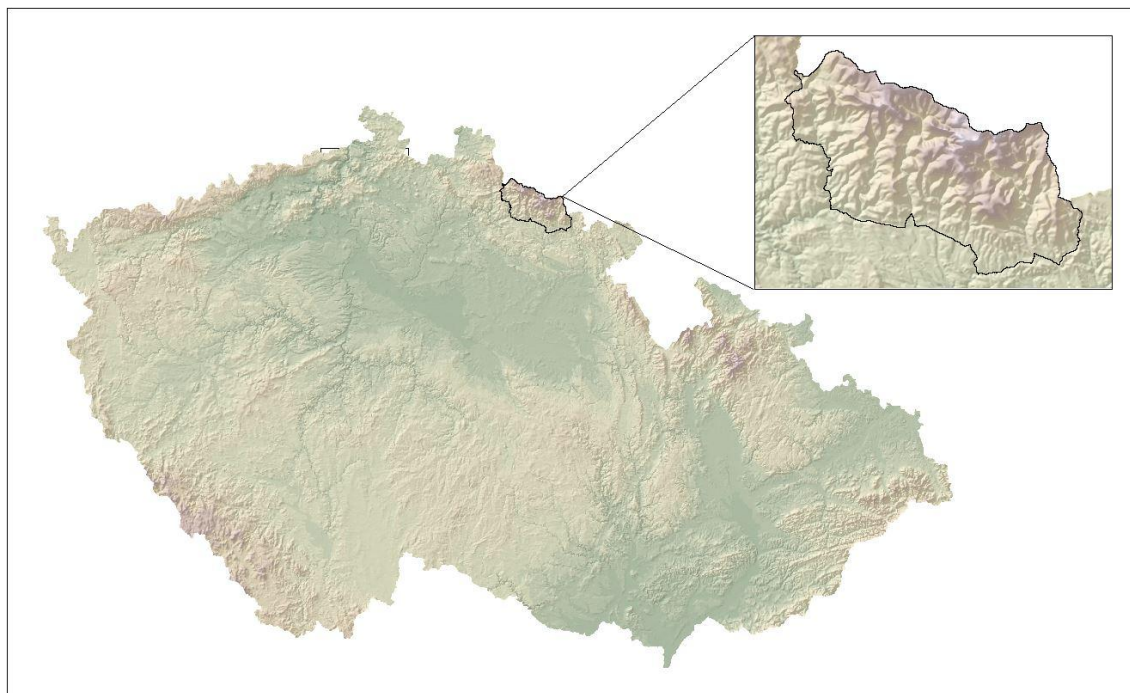
2.1.1 Výběr zájmového území

Zájmové území Krkonošského národního parku (dále KRNP) bylo vybráno z několika důvodů. Prvním důvodem je již proběhlé letecké laserové skenování, které bylo na území KRNPu provedeno v roce 2012, a z něho odvozený velmi přesný digitální elevační model (dále DEM), který slouží k porovnání přesnosti s DEM programem TanDEM-X.

Druhým důvodem je charakter zkoumaného území jako takového, tedy charakter pohoří. Různé studie zkoumající přesnost digitálních elevačních modelů v horách [Kolečka a Kozak, 2014, Bolstad a Stowe, 1994] došly k názoru, že při porovnávání těchto odvozených modelů s daty reálně zaměřenými v terénu často dochází k poměrně velkým chybám v charakteristikách terénu SLOPE a ASPECT.

Třetím důvodem je diversita vegetačního pokryvu – střídají se území zalesněná, území trvale zemědělsky obhospodařovaná, větší sídla i osady, ve vyšších nadmořských výškách se také nachází poměrně specifická krajina nad hranicí lesa (v našich podmínkách je tato hranice zhruba v 1300 m.n.m.). Nad touto hranicí je vegetace omezena pouze na kleče, keře či bylinné patro, v nejvyšších partiích Krkonoš a na strmých svazích už nemusí být vegetační pokryv souvislý a terén je často pokryt pouze balvany či sutí (takovým příkladem je vrchol nejvýše položené hory Sněžky či strmé lavinové svahy Malé a Velké Studniční jámy)[Pilous, 2007b].

Posledním důvodem je jeho snadná dostupnost a předchozí znalost území autorem práce. Dostupnost je zde brána nejen ve smyslu vzdálenosti, ale také ve smyslu reálné možnosti fyzického vstupu na velkou část území národního parku. Ve srovnání s jinými méně turisticky navštěvovanými pohořími v zahraničí jsou Krkonoše propleteny velmi hustou sítí turistických cest, po dohodě s ochránci Správy KRNP je možný vstup i na běžně nepovolená území. Tato možnost terénního výzkumu spolu s předchozí znalostí území tak umožňuje lépe porozumět specifikům vytvořeného digitálního elevačního modelu.



Obrázek 2.1: Vymezení Krkonošského národního parku (data ČÚZK, zpracováno autorem)

2.1.2 Krkonošský národní park

Krkonošský národní park se rozkládá na území české části Krkonoš na severovýchodě Čech (Obrázek 2.1). Celé pohoří zaujímá plochu 639 km^2 , z toho česká část tvoří více než dvě třetiny plochy (tj. 454 km^2). Reliéf je polygenetický¹. Geomorfolog Vlastimil Pilous [2007a] popisuje reliéf pohoří následovně:

„Krkonoše představují kernou hornatinu (hrášt) se zbytky vyzdvížených zarovnaných povrchů v několika výškových úrovních (nejvýraznější a nejrozsáhlejší z nich jsou dva vrcholové s pozůstatkem úvalovitých údolí – po jednom v západní a východní části). Severní svah je výrazně zlomový, strmý a málo členitý (s početnými paralelními, ale mělkými údolími), jižní je naopak silně rozčleněný hlubokými a podstatně více rozvětvenými erozními údolími, které vymezují a vzájemně oddělují nižší a více či méně členité postranní hřebeny, označované jako rozsochy. Na obou stranách centrální nejvyšší části pohoří byly hlavní údolní závěry přemodelovány glaciálními a vrcholové polohy periglaciálními procesy.“

V poměru k malé rozloze a nevelké nadmořské výšce, srovnáváme-li s jinými evropskými pohořími, najdeme v Krkonoších mimořádné množství různých geologických a geomorfologických jevů. Hlavní příčinou je geologická a tektonická stavba, na území Krkonoš se totiž stýkají dvě rozdílné stavební jednotky (starší proterozoické krystalinikum a mladší paleozoický žulový pluton) a v tomto místě styku, na tzv. kontaktním dvoře, byly horniny tlakově a teplotně metamorfovány. Díky tomu vznikla mimo jiné i velmi vzácná akrotalpínská tundra [Pilous, 2013].

¹různorodého původu

V nejvyšších částech pohoří zůstal zachovalý starý třetihorní reliéf, proto byly v těchto místech vytvořeny rozsáhlé vrcholové, jen slabě zvlněné, plošiny. Zároveň mají Krkonoše, jako jediné naše pohoří, mnoho patrných glaciálních forem reliéfu (erozních – kary, trogy i akumulacních – morény a morénová jezera). O unikátnosti tohoto pohoří svědčí i vrchol Luční hory, který byl zcela přemodelován a ohraničen tzv. kryoplanačními terasami, což má v Evropě obdobu jen v nejmraznějších částech Skandinávie, popř. Severního Uralu [Pilous, 2013].

Nejvyšší horou Krkonoš, a zároveň i České republiky, je Sněžka (1603 m n.m.), která leží na státní hranici s Polskem. Ve čtvrtohorách byla vymodelována do podoby karlingu. Na jejích svazích se nachází rozsáhlá kamenná moře, drobné mrazové sruby, murové dráhy a kryoplanační terasy [Pilous, 2007b]. Všechny tyto útvary utváří značnou členitost a měly by být co nejvěrněji zachyceny i v odvozených DEM.

Krkonoše jsou i v současnosti pozměňovány různými geomorfologickými procesy. Vodní erozi jsou přemodelovávány koryta toků. Z mladých forem jsou dále patrné početné obří hrnce, obří kotle a říční ostrovy. Unikátní jsou i vývěry ponorných toků v Obřím a Koulovém dole [Pilous, 2013].

V Krkonoších pramení více větších toků (Labe, Úpa, apod.), které jsou vyživovány množstvím menších potoků. Není výjimkou, že mají tyto menší toky velký sklon koryta, díky němuž voda měla, a stále má, velkou sílu v modelování nových útvarů. Krkonoše jsou protkány spoustou ostře zařízých údolí, ze kterých se zvedají strmé svahy (příkladem může být Údolí Javořího potoka u Velké Úpy). U potoků nejsou výjimkou sklony nad 20 či 30 % (Klokotivý potok, Liščí potok, Pudlava, Úpička, atd.) [Tesař a Pilous, 2007]. Je tedy zřejmé, že i vodstvo (jezera, toky, vodopády) značně ovlivňuje podobu reliéfu. Zvláště lze mluvit i o lavinových svazích, kdy je terén modelován spadem lavin, které ničí zalesnění a přispívají tak i k následné erozi svahů². V nižších polohách najdeme množství mrazových srubů. Jedná se o skalní stupně vytvořené ve svahu mrazovým zvětráváním a následným odnosem [Pilous, 2013].

Na závěr je třeba uvést, že terén je měněn také antropogenní činností. V minulosti byla sídla značně roztráštěna a vzhledem k charakteru podnebí nebyla ani zemědělská činnost tak intenzivní jako jinde v České republice. Dnes jsou Krkonoše velmi turisticky atraktivní a dochází k velké expanzi stavební činnosti. Správa KRNAP samozřejmě neumožňuje výstavbu nových domů v nejvíce chráněných pásmech, hlavní sídla a výchozí místa pro turisty se ale rozšiřují (například Pec pod Sněžkou a Špindlerův Mlýn ve Východních Krkonoších), dochází tedy ke stavebním úpravám pozemků – jejich svažitosti, apod. I tyto úpravy jsou dnes omezovány. V minulosti byla také prohlubována a opevněna koryta toků v intravilánech.

2.2 Radar

Radar (zkratka pro Radio Detection and Ranging) je zařízení, které vysílá elektromagnetické záření a zpět přijímá informace o odrazu (echo) od různých objektů (zemský povrch, lidé, mraky, apod.) pomocí antény. Principiálně je tedy možné určit

²Největší lavina za posledních 100 let byla zaznamenána nad Modrým Dolem (Pec pod Sněžkou), masa valčího se sněhu zničila veškeré zalesnění na svahu. Měřila více než 1000 metrů a měla plochu 20 ha.

polohu či vzdálenost objektu, v případě pohybujících se objektů i predikovat jejich další chování [Skolnik, 2008]. Radary se dále dělí na aktivní a pasivní, kdy pasivní zařízení nejsou schopna radiové vlny sama vysílat, ale pouze echa přijímají.

Historie využití radaru začíná již od publikování teorie elektromagnetických vln roku 1865 Jamesem Clerkem Maxwellem, na nějž navázal na konci devatenáctého století německý fyzik Heinrich Hertz. O skutečném vývoji radaru lze hovořit až od 30. let 20. století, kdy byly zkoumány pro armádní účely možnosti využití elektromagnetického záření pro detekování letadel. Roku 1935 si Robert Watson-Watt nechal patentovat zařízení, jež pojmenoval radar. Poprvé byl použit na palubě letadla k mapování roku 1943, pro civilní účely však až v roce 1967 (mapování bylo provedeno na území Panamy, které do té doby nikdy nebylo dostatečně zdokumentováno z důvodu vysoké oblačnosti, která znemožňovala použití klasické fotografie) [Woodhouse, 2005].

Už v roce 1978 byl vytvořen první civilní satelit s radarovou SAR technologií - Seasat a první satelitní radar pro území Evropy byl vypuštěn roku 1991 (ERS-1) [Woodhouse, 2005]. Roku 2000 vznikl díky společné misi NASA a DLR elevační model SRTM, který tak vytvořil nejkompaktnější model terénu té doby. Globální elevační model byl výrazně zpřesněn až v letech 2010–2014 díky misi Tandem-X.

2.2.1 Radar se syntetickou aperturou (SAR)

Pro družicové snímkování za účelem tvorby modelů terénu se nejčastěji používá systém SAR - Synthetic Aperture Radar (česky Radar se syntetickou aperturou). Terminologická komise ČÚZK [Hánek, 2018] jej definuje jako:

"aktivní zobrazující radarové zařízení vysílající přesné impulzy elektromagnetického záření, jejichž odraz od objektu (resp. zemského povrchu) je zachycen anténou, pohybující se kolmo na směr měření. Pro definování přesné prostorové polohy místa odrazu se využívá měření doby letu impulzu a Dopplerova jevu. Pohybující se relativně malá anténa má vlastnosti velké antény (syntetická apertura se vyznačuje násobným fiktivně vytvořeným účinným průměrem)."

V praxi je tedy na pohybující se objekt (družice, letadlo) umístěna anténa. Směrem k zemi je vyslán paprsek, který se po kontaktu s objektem odrazí, a jeho část je vyslána zpět k přijímací anténě pod určitým úhlem, který je dále uvažován ve výpočtu. Aby bylo možné získat nezkrácené informace o objektech nacházejících se na Zemi, délka antény by musela být v řádech stovek metrů. Vytvoření takové antény by bylo pochopitelně velmi náročné. Pomocí systému SAR lze ale poměrně krátkou anténu tzv. "syntetizovat", tedy virtuálně prodloužit.

Poté, co je vyslán paprsek, se družice neustále pohybuje vpřed po své dráze. Signál je tedy zpětně zaznamenávám anténou několikrát v různých pozicích daných posunem samotné družice. Spojením mnoha těchto virtuálních antén, které přijímají příchozí paprsek, vznikne jedna dlouhá, "syntetizovaná" anténa. Délka této antény poté odpovídá dráze, kterou anténa urazila za čas, kdy přijímala informace z odraženého paprsku. Lillesand [2014] dokonce uvádí, že anténu dlouhou 2 metry lze tímto způsobem virtuálně prodloužit až na 600 m. Kromě tranzitního času je tedy zaznamenávána informace o fázovém posunu, změně frekvencí, a tím i Dopplerově jevu.

Pokud je objekt identifikován před anténou, signál má vyšší frekvenci, a naopak. [McCandless a Jackson, 2004].

2.3 Digitální elevační model

Digitální elevační modely, DEM, se začaly objevovat od padesátých let dvacátého století a staly se novým směrem fotogrammetrie [Rosenberg, 1955]. DEM, jakožto dvourozměrné diskrétní funkce s údajem o nadmořské výšce, se začaly hojně uplatňovat v topografii a sloužily jako prostředek pro vytvoření digitálních modelů terénu (angl. zkratka DTM), které představují dvourozměrnou diskrétní funkci pro potřeby morfometrie – ta se zabývá vyvozováním charakteristik tvarů zemského povrchu [Florinsky, 2016]. Pro úplnost je třeba zmínit i DSM, z anglického Digital Surface Model, česky Digitální model povrchu, který nedává informace o bodech nacházejících se přímo na zemi, ale zahrnují i veškeré objekty situované v daném bodě nad terénem, udávají tedy například údaje i o budovách či vegetaci. Každý z těchto typů nachází uplatnění v jiných odvětvích a situacích.

Podle další z mnoha definic je DEM pravidelná mřížka, která zobrazuje souvislé změny reliéfu v prostoru [Burrough, 1986]. Každý model je zjednodušením, proto si lze digitální elevační model představit jako mřížku, která se rozkládá na zemském povrchu a nese informaci o nadmořské výšce. Jednotlivé buňky mřížky mohou mít různé rozměry, čímž ovlivňují přesnost daného modelu.

Veškeré modely se mohou používat k analýze terénu (v případě DSM terénu spolu s dalšími objekty) a je zřejmé, že budou využívány stále častěji, protože umožňují zefektivnění práce v mnoha odvětvích (plánování nových staveb, hodnocení změn v čase, apod.).

Zjevnou limitací digitálních elevačních modelů je jejich přesnost. V současnosti existuje několik tzv. globálních DEM, kdy družice pomocí radarového skenování nebo fotogrammetrie získávají informace zpravidla o celém zemském povrchu. S velmi rychlým rozvojem technologií se toto globální snímkování stává přesnější, i tak ale zatím nedosahuje přesnosti typické například pro tzv. LiDAR, který za stejný čas zmapuje území o menší rozloze, ale s lepším rozlišením. LiDARu i problematice přesnosti budou věnovány samostatné kapitoly níže.

Pro názornost lze uvést několik různých misí, při kterých byly v minulosti získány data pro vytvoření DEM pomocí družicového snímkování. Jedním z nejznámějších je SRTM DEM (zkratka pro Shuttle Radar Topography Mission). Při této misi družice Endeavour v roce 2000 pořídila data pro DEM mezi 60° severní a 57° jižní šířky a od roku 2003 jsou tato data dostupná, rozlišení je 30 m [Rabus et al., 2003]. Větší pokrytí poté nabízí novější ASTER GDEM (zdarma přístupný je od roku 2009, nejnovější třetí verze od roku 2016). Rozlišení zůstává stejné jako u SRTM, ASTER GDEM ovšem pokrývá území od 82° severní do 82° jižní šířky [Abrams, 2016]. Výrazně lepší přesnost poskytuje WorldDEM vytvořený z dat mise TanDEM-X, jehož rozlišení je 12 x 12 metrů. Protože je tato práce zaměřena právě na analýzu přesnosti DEM z TanDEM-X, je mu věnována celá podkapitola níže.

2.4 Mise TanDEM-X

V roce 2007 byla z Bajkonuru na oběžnou dráhu vynesena družice TerraSAR-X. Tato německá družice byla výsledkem spolupráce soukromého a veřejného sektoru, kde firma Astrium GmbH zajišťovala stavbu a nasazení družice na oběžnou dráhu, Německé centrum pro letectví a kosmonautiku její provoz a plnění vědeckých cílů. 21. června 2010 byla z Bajkonuru vynesena identická družice TanDEM-X (dále TDX), která se k TerraSAR-X připojila. Obě družice jsou vybaveny radarovým systémem SAR a obíhají po orbitě ve výšce 514 km v blízkosti u sebe (100–500 m) [Gonzalez, 2010].

Prvotní fáze získávání dat trvala čtyři roky od prosince 2010 do ledna 2015. Aby byla získána co nejpřesnější data, každé místo bylo snímkováno nejméně dvakrát ze stejného postavení družic. Horské terény byly snímkovány i vícekrát z různých pohledů, aby bylo zamezeno vzniku míst, kde nemohl radar získat žádná data z určitého směru [Wessel, 2016]. Hlavním produktem, který je komerčně distribuován, je TanDEM-X DEM, který představuje globální digitální elevační model. Mimoto lze ale získat a analyzovat i další produkty TanDEM-X.

2.5 TanDEM-X DEM

TanDEM-X nabízí výšková data s rozlišením, kterou žádný globální DEM dříve nenabízel. Ačkoliv jsou nabízena i data s rozlišením 30 x 30 m (tj. 1 arcsec) a 90 x 90 m (3 arcsec), významnější je nejpřesnější produkt 12 x 12 m (0,4 arcsec).

V tomto nejjemnějším rozlišení je absolutní horizontální přesnost představována chybou CE90³, a absolutní vertikální přesnost chybou LE90⁴, v obou případech by tato chyba měla být menší než 10 m. Výsledná relativní vertikální přesnost je udávána 2 m pro svahy mírnější nebo rovny 20 %, pro svahy strmější než 20 % je přesnost 4 m.

Pro kalibraci DEM se používají tzv. GCPs (angl. Ground Control Points) - tj. kontrolní místa na zemi, pro které jsou známy přesné hodnoty souřadnic. V tomto případě jsou to data používaná pro družice ICESat⁵. Souřadnicový systém originálně použitý pro DEM je WGS84-G1150. Další dílčí informační vrstvy, které jsou k dispozici pro analýzy jsou zobrazeny v Tabulce 1. Použité vrstvy jsou popsány v metodice.

³Pro 90 % bodů na snímku nebude polohová odchylka přesahovat uvedenou hodnotu.

⁴Pro 90 % bodů na snímku nebude výšková odchylka přesahovat uvedenou hodnotu.

⁵Ice, Cloud and Land Elevation Satellite

Komponenty	
DEM	výšková data
HEM	mapa výškových chyb dat
AMP	mozaika amplitudy SAR (průměrná hodnota)
AM2	mozaika amplitudy SAR (minimální hodnota)
WAM	vrstva indikace vody
COV	mapa pokrytí
COM	vrstva konzistence
LSM	vrstva překryvů a stínů
IPM	vrstva interpolace

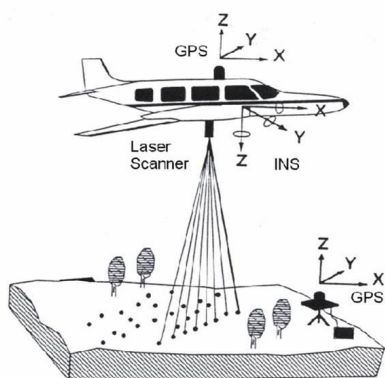
Tab. 1: Přehled dílčích komponent TanDEM-X DEM

2.6 LiDAR

Pro validaci a porovnání dat v této práci byl použit DEM vytvořený technologií LiDAR (z angl. Light Detection and Ranging). Tato metoda dálkového průzkumu Země je velmi přesná a v posledních letech hojně využívána. Přesnost těchto modelů vždy závisí na konkrétních podmínkách - použitém laseru, množství emitovaných paprsků za časový interval, počtu pozemních referenčních stanic, atd. Obvykle se ale směrodatná odchylka uvádí 5–10 cm v případě polohy a 7–15 cm pro výšku [Shekhar a Xiong, 2007].

2.6.1 Princip laserového skenování z letadla

Nejčastěji jsou LiDARová data získávána z letadla (popř. bezpilotními letouny, apod.). Na palubě se nachází několik samostatných zařízení – samotný sběr dat zajišťují zdroj laserového záření, optická soustava, mechanický prvek, detektor elektromagnetického záření a přesné hodiny. Dále je zde umístěna GPS jednotka, IMU (Inertial Measurement Unit) a počítač, který všechna data zaznamenává.



Obrázek 2.2: Princip LiDARu (Utah AGRC, 2018)

Zdroj vysílá laserový paprsek směrem k zemskému povrchu, ten se po kontaktu s objekty či zemí odrazí a pod stejným úhlem je vyslán zpět, kde je přijat detektorem. Čas, který uběhl od vyslání paprsku po jeho opětovné přijetí, měří velmi přesné hodiny. Souosost zdroje i přijímače zajišťuje optické zařízení, mechanický prvek poté směřuje paprsek různými směry, aby byl povrch snímán z rozdílných úhlů [Dolanský, 2004].

GPS jednotka, spolu s korekcemi z IMU, zajišťuje přesné zaznamenání polohy získaných bodů. Zpravidla je dostačující jedna GPS na palubě letadla a jedna přesně zaměřená referenční stanice. V nepřístupném terénu lze místo pozemní referenční stanice použít korekce získané z družic [Baltsavias, 1999b]. Pro větší přesnost lze

použít i více GPS na palubě či na povrchu.

IMU (z angl. Inertial Measurement Unit, česky volně přeloženo jako navigační jednotka) je soustava gyroskopů a akcelerometru. Gyroskopy přesně určují náklony letadla, akcelerometr jeho zrychlení [Dolanský, 2004]. Všechny tyto údaje jsou doplněny o GPS a následně je LiDAR schopný určit polohu se zmíněnou přesností 5 až 10 cm.

Vzdálenost se zjednodušeně určí ze vzorce:

$$R = c \frac{t}{2},$$

kde R je vzdálenost, kterou urazil paprsek v jednom směru, c je rychlost světla, a t je doba, kterou změřily hodiny mezi emisí a detekcí paprsku.

Nadmořská výška je poté rozdílem výšky letadla a vypočtené vzdálenosti R . Je zřejmé, že vzdálenost musí být ještě upravena o úhly vysílaného paprsku, popř. o zatížení systematickými chybami [Baltsavias, 1999a]. Výsledkem je tzv. bodové mračno, jehož hustota závisí na počtu emitovaných paprsků zdrojem za časový interval, na rychlosti letu či opakování přeletů. Bodové mračno lze klasifikovat a následně vyselektovat objekty, čímž vznikne digitální model terénu.

Metodika

3.1 Sběr a příprava dat

Data TANDEM-X jsou v současnosti poskytována v rozlišení 12 m pouze pro vědecké účely, a to pro projekty, které byly podány v rámci výzvy German Aerospace Center v roce 2016 (výzva Global TanDEM-X DEM-AO). Data byla poskytnuta v rámci projektu *Comparison of vegetation height derived from TanDEM-X DEM with reference Airborne Laser Scanning data for a mountainous areas in Czechia*.

Lidarový model, jenž je použit jako referenční pro porovnání s modelem TanDEM-X, byl pořízen v roce 2012 firmou Geodis Brno na celém území Krkonošského národního parku (celkově bylo nasnímáno území zhruba 564 km², tj. KRNP spolu s obalovou – buffer – zónou). Snímkování bylo prováděno v červenci a srpnu, kdy byly stromy ve vegetační fázi. Přeletová výška byla 700 m, skenovací úhel zhruba 30° a překryv sousedících skenovaných pásů asi 20 %. Data pořídil skener Riegl LMS-Q680i, hustota skenování byla cca 5 bodů/metr. Dle produktového listu je přesnost skeneru uváděna zhruba 20 mm. Originální bodové mračno bylo rozděleno na 7 508 dlaždic (obdélník se stranami 312,5 × 250 metrů).

Bodové mračno bylo klasifikováno automaticky nástroji LAStools a ENVI LIDAR. Po klasifikaci byl vytvořen raster DTM a CHM. DTM byl vytvořen z bodů klasifikovaných jako země (ground) s výsledným rozlišením 0,5 metru, následně byl vytvořen pomocí LAStools rastr CHM (Canopy Height Model), který představuje pouze výšku vegetace nad povrchem. V práci je porovnávána výška TanDEM-X jak s DTM, tak i s DMP (tj. digitální model povrchu - model DTM s přičtenou výškou vegetace z CHM). Všechna data byla před dalším zpracováním transformována do souřadnicového systému S-JTSK (EPSG:5514).

Úprava nadmořských výšek DEM TanDEM-X, jelikož tyto byly počítány jako výšky elipsoidické vztažené k elipsoidu WGS84-G1150, zatímco DTM LiDAR uvádí výšky ortometrické, byla provedena s použitím kvazigeoidu ČÚZK¹. Tento gravimetrický kvazigeoid představuje referenční plochu, která umožňuje převod na systém Bpv². Je tvořen souborem ESRI ASCII³, který obsahuje informace o zeměpisné délce a šířce spolu s výškou kvazigeoidu pro body na území České republiky [CUZK, 2018]. Tyto výšky byly interpolovány na rozlišení modelu TanDEM-X a odečteny od DEM TanDEM-X tak, aby odpovídaly výškám Bpv (a tedy i DTM LiDAR).

¹Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního, data jsou dostupná bez poplatku

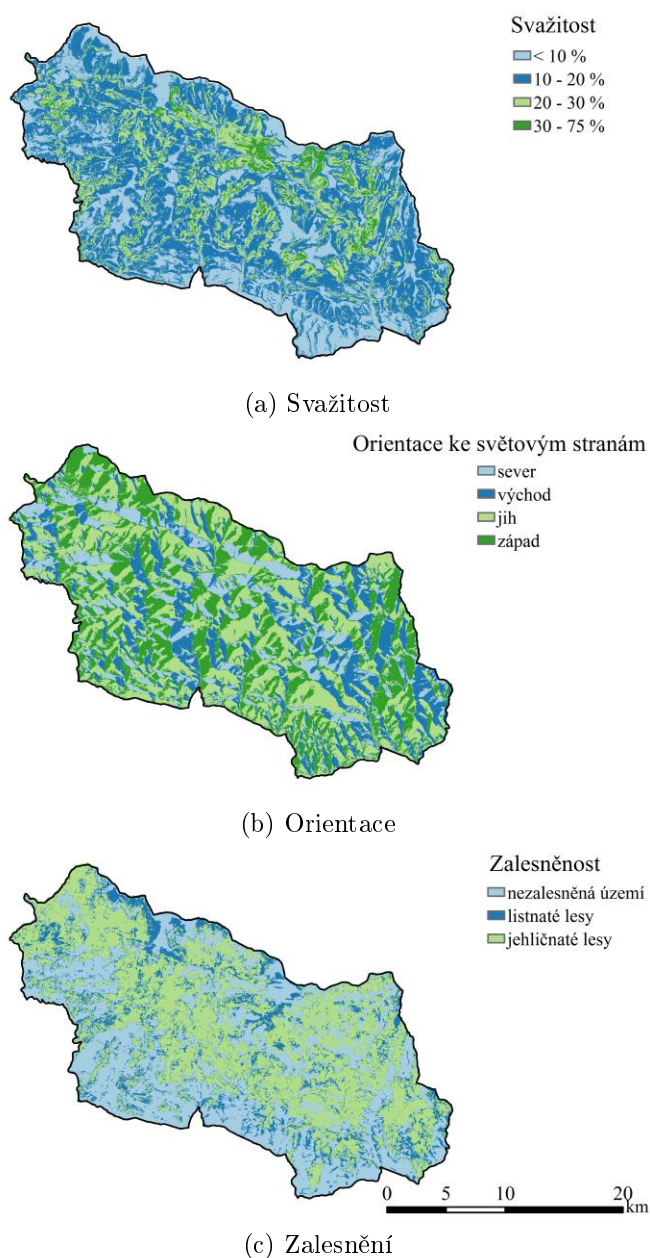
²balt po vyrovnání, výškový systém používaný v Česku

³zkratka pro American Standard Code for Information Interchange; soubor obsahující informace o rastru, v hlavičce např. velikost buňky, počet řádků a sloupců, souřadnice, dále hodnoty rastru v předdefinovaném pořadí

DEM odvozený z LiDARu byl zpracován tak, aby bylo možné zkoumat vliv charakteristik terénu na vertikální přesnost. Mezi zkoumané charakteristiky terénu patří svažitosť (Slope), orientace k světovým stranám (Aspect), dále je jako environmentální charakteristika uváděno zalesnění. Analýzou komponent TanDEM-X (COV, COM) je zkoumána závislost přesnosti výšek na počtu přeletů družice nad daným územím a konzistentnosti získaných hodnot (viz níže).

3.2 Environmentální charakteristiky

Rozložení environmentálních charakteristik na území Krkonoš je zobrazeno na Obrázku 3.1.

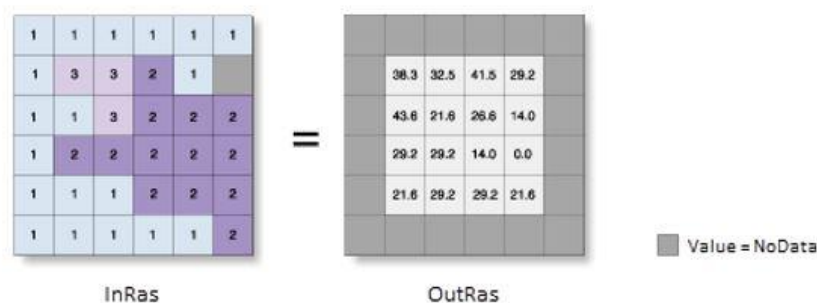


Obrázek 3.1: Přehled environmentálních charakteristik

3.2.1 Slope

V technickém popisu dat TanDEM-X je uvedena deklarovaná relativní vertikální přesnost 2 metry pro svahy mírnější nebo rovny 20 %, pro svahy strmější je přesnost 4 metry. Lze se domnívat, že sklon svahu bude výrazně ovlivňovat přesnost výsledného modelu terénu.

K určení sklonitosti je používána funkce **Slope**. Principem je určení maximální hodnoty změny výšky (z-value) dané buňky oproti buňkám sousedním. Nejčastěji uvažujeme všech osm sousedních buněk (sousední buňky přímé i diagonální) a výpočet tedy probíhá v matici 3×3. Princip je lépe představitelný ze schématu níže (obr.3.2). Pro výpočet je nutné, aby alespoň sedm z osmi sousedních buněk obsahovalo platnou hodnotu. Dále se volí jednotky, přičemž výsledná svažitost je udávána v procentech (hodnoty 0 až 100 %) nebo stupních (0 až 90°).



Obrázek 3.2: Schéma výpočtu funkce Slope (Esri,2018)

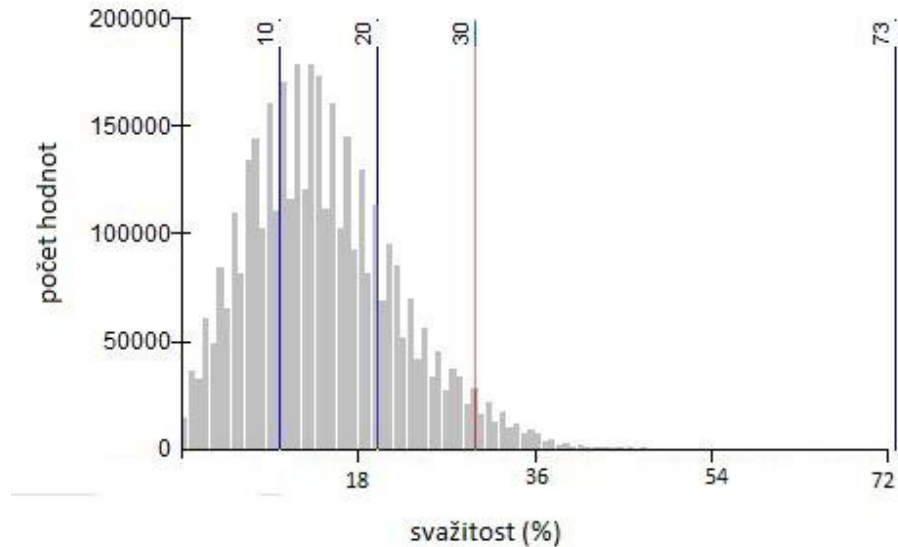
V této studii byla svažitost uvažována v procentech a následně klasifikována do čtyř skupin. Svažitost:

- menší než 10 %
- 10 až 20 %
- 20 až 30 %
- větší než 30 %

Třídy byly voleny s ohledem na rozdělení hodnot v celém datovém souboru (viz obrázek 3.3) a pro tyto byly porovnávány přesnosti výšek z DEM TanDEM-X vůči LiDARu.

3.2.2 Aspect

Dále byla zkoumána možná kauzalita odchylek výšek a různé orientace svahů vůči světovým stranám pomocí funkce **Aspect**. Její výpočet je podobný funkci Slope - stejně tak počítá hodnotu prostřední buňky pomocí osmi sousedních buněk (tzn. matice 3×3).



Obrázek 3.3: Rozdělení svažitostí na území KRNAP

Výpočtem je dán azimut – úhel ve stupních měřen od severu po směru hodinových ručiček nabývající hodnot 0–360°. Pro naše účely byly výsledky rozděleny podle úhlu do 4 skupin:

- $(315,360) \cup (0,45) =$ sever,
- $(45,135) =$ východ,
- $(135,225) =$ jih,
- $(225,315) =$ západ.

3.2.3 Zalesnění

Je předpokládáno, že přesnost TanDEM-X DEM je ovlivněna zalesněním území. Pro tuto analýzu byla použita data Copernicus Forest Type 2012 v rozlišení 20×20 m. Tato data jsou volně stažitelná⁴ a byla použita místo známějšího datasetu Corine Land Cover (taktéž produkt Copernicus), který sice rolišuje více typů využití území, má ale horší rozlišení.

Forest type umožňuje rozlišit území nezalesněná a zalesněná, a tyto dále specifikovat jako lesy listnaté a jehličnaté. Nezalesněnému území byla přiřazena hodnota 0, listnatým lesům 1 a jehličnatým lesům 2. Lze předpokládat, že přesnost bude různá v těchto třech kategoriích a je proto žádoucí provést samostatnou analýzu pro každou z nich.

Raster Forest Type má tato specifika:

- MMU (tj. minimální mapovací jednotka) = 0,5 ha,
- MMW (tj. minimální mapovací šířka) = 20 m,

⁴Stažitelná na: <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests>.

- hustota pokryvu stromů $\geq 10 - 100$ % [Langanke, 2016].

Prakticky to tedy znamená, že malá zalesněná území s rozlohou menší než půl hektaru, šířkou pod 20 m a velmi malou hustotou zalesnění jsou chybně klasifikována jako nezalesněná území. Vzhledem k charakteru zkoumaného území, na kterém se nachází zejména velké zalesněné celky, je možné chybu vzniklou nesprávným určením vegetačního pokryvu na malých celcích považovat za téměř zanedbatelnou a neměla by značně ovlivnit výsledky analýzy.

3.3 Charakteristiky kvality TanDEM-X

Následující popis charakteristik kvality TanDEM-X je převzat z technické zprávy poskytované spolu s daty [Wessel, 2016]. Obrázek 3.4 zobrazuje přehled těchto charakteristik na zájmovém území.

3.3.1 DEM

Originální poskytnutá výšková data představují elipsoidické výšky při použití elipsoidu WGS84 (datum WGS84-G1150)⁵. Hodnota výšky h je dána váženým průměrem výšek pro daný pixel vypočtených podle následujícího vzorce:

$$h = \frac{\sum_{k=1}^K w_k h_k}{\sum_{k=1}^K w_k},$$

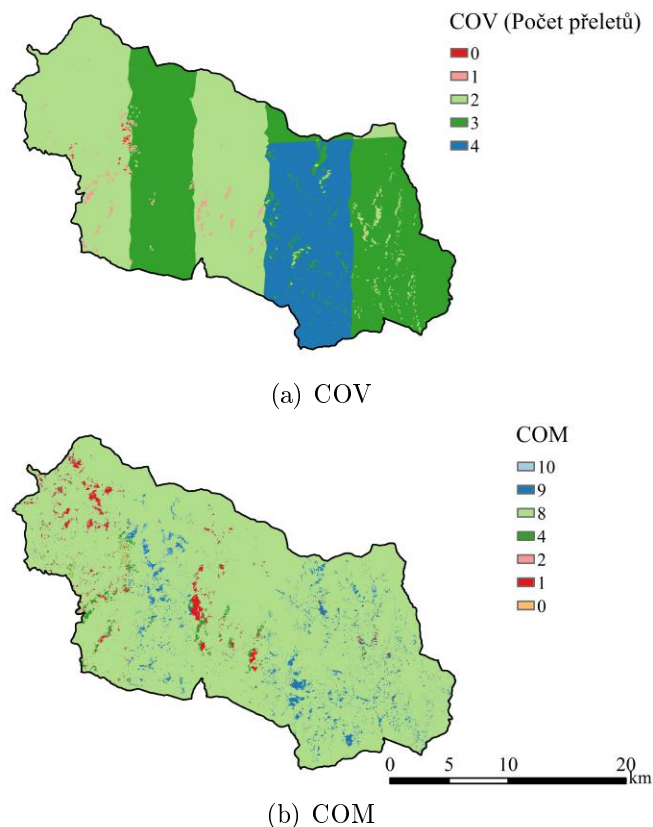
kde w_k jsou váhy přiřazené daným výškám, tak aby odpovídaly směrodatným odchylkám z HEM. Ve výsledku to znamená, že čím větší je směrodatná odchylka z HEM, tím menší má daná výška váhu v celkovém výsledku.

Pokud nejsou pro daný pixel žádná platná data, elipsoidická výška se udává jako -32767 m. Pro potřeby zjišťování "věrohodnosti" hodnoty určitého pixelu se používá především analýza HEM, COM a COV.

3.3.2 COV

Mapa pokrytí (COV, z angl. Coverage map) udává, kolik platných hodnot výšek bylo použito pro vytvoření finální mozaiky. Na zájmovém území Krkonošského národního parku jsou to většinou 2 nebo 3 pokrytí, v menší části i 4 pokrytí. Nabízí se logická interpretace, že čím více pokrytí daného místa, tím více bude vypočtená výška odpovídat výšce reálné, a proto je i tato hypotéza dále rozebírána v praktické části práce. Konkrétní počet přeletů nad územím KRNAPu je zobrazen na mapě (Obrázek 3.4).

⁵výše je popsána metoda jejich transformace



Obrázek 3.4: Přehled technických charakteristik TanDEM-X

3.3.3 COM

Pixely, jejichž výškové hodnoty jsou z nějakého důvodu nekonzistentní, se promítají do tzv. COM (z angl. Consistency mask, volně přeloženo jako Vrstva konzistentních hodnot). Tato nestejnorodost výšek může být dvojího typu:

- velký absolutní rozdíl výšek (vzniká například na nesouvislých územích)
- malý absolutní rozdíl výšek, který ovšem zvětšuje odpovídající výškovou chybu

Ve výsledné vrstvě je pixelům přiřazována hodnota 0 až 10 podle toho, jak sourodé či nesourodé dané výšky jsou (Tabulka 2).

Hodnoty COM	
0	žádná data, neplatná data
1	velké nekonzistentnosti
2	menší nekonzistentnosti
4	pouze jedno pokrytí
8	všechny výšky jsou konzistentní
9	velké nekonzistentnosti, k dispozici alespoň jeden konzistentní pár výšek
10	menší nekonzistentnosti, k dispozici alespoň jeden konzistentní pár výšek

Tab. 2: Hodnoty a jejich popis v COM

Na území KRNP se vyskytují všechny z výše uvedených hodnot ve vrstvě COM (obr. 3.4).

3.4 Evaluace vertikální přesnosti

Nejprve byla vytvořena bodová vrstva, která odpovídá středům buněk rastru 12×12 m, a následně byly těmto bodům přiřazeny hodnoty výšek získaných z LiDARu (DTM a DTM upravený o výšky z CHM) a DEM TanDEM-X, dále charakteristiky svažitosti, orientace, vegetačního krytu, COM a COV. Samotná analýza byla provedena ve statistickém softwaru R. Následně byly odstraněny veškeré hodnoty *null*. Celkový počet bodů před odstraněním hodnot *null* byl 3 580 157, po jejich odstranění klesl počet na 3 566 707 bodů, které byly analyzovány. Evaluace byla provedena zvláště pro nezalesněná a zalesněná území, přičemž zalesněná území byla dále detailněji rozlišena na listnaté a jehličnaté lesy. Typ vegetace byl zohledněn v analýze každé z environmentálních charakteristik. Jako dva hlavní ukazatele (chyby) použité pro analýzu přesnosti digitálního elevačního modelu TanDEM-X byly vybrány ME a RMSE.

ME (Mean Error, střední chyba) je průměr rozdílu výšek TanDEM-X a lidarového DTM, resp. DMP. Záporná hodnota ukazuje, že DEM TanDEM-X "podhodnocuje", tedy uvádí nižší nadmořskou výšku než LiDAR, kladná naopak.

RMSE (Root Mean Square Error) je jedna z nejčastěji používaných metrik pro určení míry neurčitosti. Jedná se o rozptyl rozdělení četností odchylek mezi původními výškovými daty a daty TanDEM-X. Větší hodnota RMSE představuje větší rozptyl, proto čím menší RMSE, tím je DEM přesnější. Rovnice pro výpočet obou chyb jsou uvedeny níže:

$$ME = \sum \frac{(T - L)}{n},$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (T - L)^2}{n}},$$

kde T jsou hodnoty DEM TanDEM-X a L výšky z lidarového snímkování (DTM nebo DMP).

V dílčích analýzách environmentálních charakteristik byl porovnáván elevační model TanDEM-X jak s digitálním modelem terénu (DTM), tak s digitálním modelem povrchu (DMP). V analýze charakteristik kvality byl použit pouze DMP, který lépe koresponduje s rozložením výšek TanDEM-X. Nakonec bylo graficky zpracováno, jak velká část hodnot odpovídá udávané absolutní vertikální přesnosti 10 metrů.

Výsledky a diskuze

Na průměrné chyby ME a RMSE má vliv i celkový počet hodnot, které spadají do rozlišovaných kategorií. Pro názornost jsou v Tabulce 4.1 uvedeny procentuální hodnoty zastoupení jednotlivých kategorií či intervalů. Zhruba 99 % území bylo snímkováno alespoň dvakrát a zároveň 92 % hodnot výšek bylo počítáno z výšek konzistentních (COM kategorie 8), měly by tedy vykazovat vysokou vertikální přesnost. Přibližně 65 % území je zalesněno, přičemž převažují lesy jehličnaté. Polovina svahů spadá do intervalu svažitosti 10 – 20 %.

Tabulka 4.1: Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií v rámci celého souboru

svažitost	%	orientace	%	COV	%	COM	%	lesy	%
(0,10)	27	<i>sever</i>	16	<i>jeden</i>	1	1	1,8	<i>nezalesněné</i>	35
(10,20)	49	<i>východ</i>	22	<i>dva</i>	45	2	0,2	<i>listnaté</i>	17
(20,30)	20	<i>jih</i>	34	<i>tři</i>	37	4	0,8	<i>jehličnaté</i>	48
(30,75)	4	<i>západ</i>	28	<i>čtyři</i>	17	8	92,4	-	-
-	-	-	-	-	-	9	4,0	-	-
-	-	-	-	-	-	10	0,9	-	-

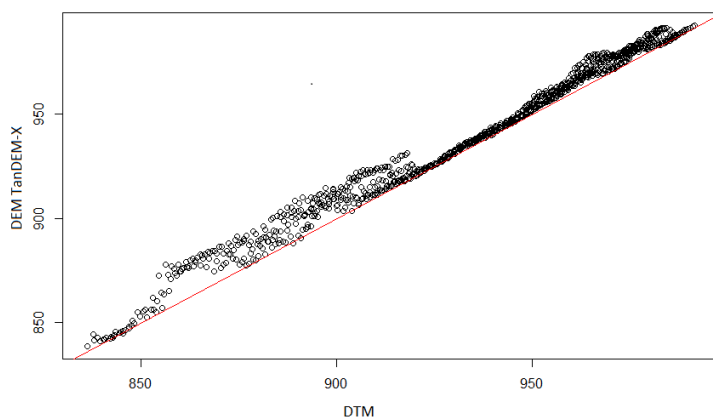
Střední chyba pro celý datový soubor při porovnání s DTM vyšla **7,6 m**, RMSE **12,1 m**. Při porovnání s DMP jsou chyby ME a RMSE **-1,5 m** a **7,4 m**. Srovnání s oběma modely je znázorněno v grafu (Obrázek 4.1). Při porovnání s DTM TanDEM-X spíše nadhodnocuje. Tento trend je patrný v nižších polohách v rámci pohoří. Na grafu zobrazujícím porovnání s DMP je naopak zřejmě rovnoměrnější rozdělení napříč všemi výškami. Globální elevační model tedy spíše odpovídá modelu povrchu¹, což ve své nejnovější studii uvádí i Wessel [2018].

Je-li uvažován DEM jako model povrchu, celková ME vyhovuje relativní vertikální přesnosti uvedené v průvodní technické zprávě [Wessel, 2016]². Zároveň je zřejmé, že TanDEM-X obecně podhodnocuje výšku vegetace na studovaném území.

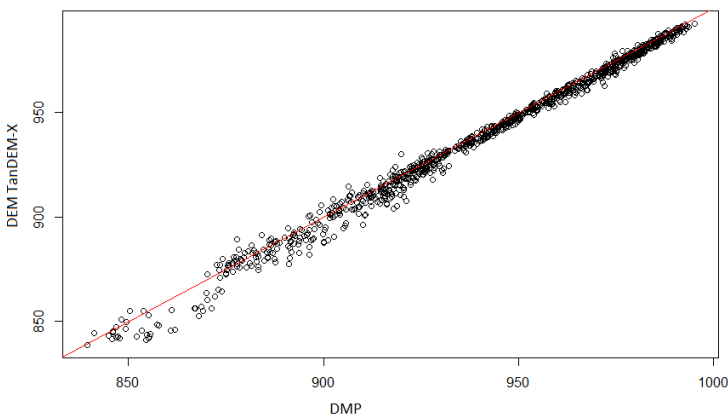
Protože data TanDEM-X jsou dostupná pouze krátce, dodnes nebylo vydáno mnoho odborných publikací, které by tento DEM analyzovaly. Některé publikace byly vydány ještě před rokem 2016, než byl dostupný kompletní DEM, tyto ale analyzují pouze snímkování první družice TeraSAR-X před připojením TanDEM-X. Kompletním produktem TanDEM-X, který je dostupný od roku 2016, se ve svých studiích podrobně zabývají Grohmann [2017] a Wessel [2018]. Mnoho studií ovšem evaluovalo globální DEM SRTM, jehož přesnosti vztahovaly k různým topografickým charakteristikám, a lze se domnívat, že DEM TanDEM-X bude vykazovat principálně stejné problémy při porovnávání s různou svažitostí, orientací a vegetačním pokryvem.

¹Obecně jsou globální elevační modely (SRTM, TanDEM-X, apod.) chápány a používány spíše jako modely terénu, nikoliv model povrchu.

²Pro svahy do 20 % 2 metry, pro větší svažitost 4 metry.



(a) DTM



(b) DMP

Obrázek 4.1: Korelace jednotlivých modelů

4.1 Vertikální přesnost v závislosti na environmentálních charakteristikách

4.1.1 Typ vegetace

Vliv typu vegetace je zřejmý z Tabulky 4.2 (a) a (b). Při porovnání elevačního modelu TanDEM-X s DTM (a) je nízká střední chyba a RMSE pouze pro nezalesněná území (1,64 m a 4,93 m). Lze tedy říci, že DEM TanDEM-X skutečně není modelem terénu, odpovídá daleko spíše modelu povrchu. I při porovnání s DMP bylo dosaženo nejnižších chyb na nezalesněném území (ME pod 1 metr, RMSE pod 5 metrů), největší ME mají listnaté a RMSE jehličnaté lesy. DEM TanDEM-X výšku vegetace oproti skutečnosti podhodnocuje. Vyslaný paprsek se ne vždy odrazí zpět od vrcholu koruny stromu, často projde níže do koruny a teprve poté se vrací zpět. Toto je dáno vlnovou délkou, zatímco krátké vlnové délky se odrazí zpět od koruny stromu, dlouhé vlnové délky korunou spíše procházejí [Schmitt et al., 2015]. Z toho důvodu se stromy (ale i další objekty) mohou jevit nižší než ve skutečnosti jsou. Záleží tedy

Porovnání s DTM - typ vegetace		
	RMSE	ME
nezalesněná území	4.93	1.64
listnaté lesy	11.35	6.85
jehličnaté lesy	15.49	12.10

(a)

Porovnání s DMP - typ vegetace		
	RMSE	ME
nezalesněná území	4.82	-0.96
listnaté lesy	7.79	-2.49
jehličaté lesy	8.78	-1.64

(b)

Tabulka 4.2: ME a RMSE podle typu vegetace v porovnání s (a) DTM a (b) DMP

i na tom, kdy přesně družice přelétala nad daným pásem. Pokud by například byl uskutečněn pouze jeden přelet nad daným územím (analýza v závislosti na počtu přeletů viz níže), a to ještě mimo vegetační období stromů, skutečné výšky by byly podhodnoceny daleko více. Nebyl by možný odraz od listů stromů a paprsek by snáze pronikl níže [Ortiz et al., 2012].

Vlivem vegetace na vertikální přesnost se zabýval i Sun [2003]. Ve studii byla porovnávána vertikální přesnost SRTM s jinými DTM. Nerozlišuje typ lesa, zkoumané území Sibíře rozděluje pouze na nezalesněné a zalesněné území. Dle něj je chyba výrazně ovlivněna vegetací vyšší než 10 metrů. Udává, že ačkoliv na nezalesněném území SRTM splňuje podmínku absolutní vertikální přesnosti, na zalesněném území je tato přesnost horší než deklarovaná, zvláště v kombinaci se zvětšující se svažítostí svahů. I v případě Krkonoš při porovnávání s DTM je vertikální přesnost DEM TanDEM-X zejména v jehličnatých lesích velmi zhoršena oproti nezalesněným územím (ME takřka dvojnásobná oproti listnatým lesům, rozdíl v RMSE ovšem není tak výrazný). Další studie se zabývá vertikální přesností SRTM ovlivněnou rázím terénu na území polských Tater (zalesnění asi 70 %). Zde uvádí zalesnění jako hlavní zdroj chyb, kdy na zalesněném území je ME větší o cca 10 metrů oproti nezalesněnému území a i RMSE je vyšší [Kolecka a Kozak, 2014]. Ludwig a Schneider [2006] rozlišují více typů land coveru, i zde při analýze SRTM největší chybu vykazovaly zalesněné plochy.

Wessel [2018], který analyzuje DEM TanDEM-X, sice uvádí ME i pro zalesněná území menší než 1 metr a $RMSE \pm 1,8$ metru, tato vysoká přesnost je ale dána použitím jiné metody srovnávání. Namísto plošné analýzy přesného DEM používá jednotlivé GPS body, které jsou, jak sám uvádí, i v zalesněném území umístěny nejčastěji na cestách, tedy na odkrytých plochách v rámci lesů.

4.1.2 Svažítost

Výsledky uvedené v Tabulce 4.3 ukazují, že svažítost má velký vliv na vertikální chybu modelu TanDEM-X. Při porovnávání s DTM i DMP je vždy nejmenší ME i RMSE na mírně svažitém území do 10 %. Na nezalesněném málo svažitém území je ME pouze -0,39 m a RMSE 3,26, což lze považovat za velmi dobrou přesnost globálního DEM. Relativní vertikální přesnost, která je pro TanDEM-X uváděna do 2 metrů na svazích do 20 %, také byla na velké části území splněna. Největší střední chyba byla vypočtena pro interval svažítosti 20 – 30 %, chyba naopak znovu klesá na svazích nad 30 %. Tento pokles je možné odůvodnit menším počtem hodnot, které spadají do tohoto intervalu (viz Tabulka 4.1) a také faktem, že velmi strmé svahy nebývají zalesněny. RMSE roste kontinuálně se zvyšující se svažítostí.

Porovnání s DTM		
Zalesněná i nezalesněná území		
Interval svažitosti	RMSE	ME
(0,10)	8.42	4.49
(10,20)	12.54	8.02
(20,30)	14.43	10.11
(30,75)	13.88	9.48
Listnaté lesy		
(0,10)	8.05	4.49
(10,20)	11.08	6.71
(20,30)	13.71	8.90
(30,75)	13.53	8.70
Jehličnaté lesy		
(0,10)	13.20	10.37
(10,20)	15.87	12.47
(20,30)	16.14	12.53
(30,75)	15.79	12.31
Nezalesněná území		
(0,10)	3.20	0.94
(10,20)	5.11	1.71
(20,30)	7.67	3.53
(30,75)	8.08	3.33

(a)

Porovnání s DMP		
Zalesněná i nezalesněná území		
Interval svažitosti	RMSE	ME
(0,10)	4.67	-0.60
(10,20)	7.62	-1.59
(20,30)	9.45	-2.74
(30,75)	8.77	-1.28
Listnaté lesy		
(0,10)	4.74	-1.03
(10,20)	7.71	-2.51
(20,30)	9.57	-3.71
(30,75)	9.71	-2.66
Jehličnaté lesy		
(0,10)	6.34	-0.76
(10,20)	8.81	-1.54
(20,30)	10.05	-2.61
(30,75)	9.10	-0.94
Nezalesněná území		
(0,10)	3.26	-0.39
(10,20)	5.19	-1.21
(20,30)	6.94	-2.12
(30,75)	7.14	-1.10

(b)

Tabulka 4.3: ME a RMSE podle jednotlivých intervalů svažitosti v porovnání s (a) DTM a (b) DMP

Rostoucí svažitost je pravděpodobně nejčastěji analyzovaným topografickým činitelem, který je spojován se snižováním vertikální přesnosti, v mnoha různých publikacích. Ve svých studiích se jí zabývají při porovnávání se SRTM Kolečka a Kozak [2014], Sun [2003], Ludwig a Schneider [2006], Mouratidis [2010], Miliareisis a Paraschou [2005] a Gorokhovich a Voustianiouk [2006]. Přímo TanDEM-X evaluují na základě svažitosti Wessel [2018], Rizzoli [2017] a Grohmann [2017].

Zatímco Bolstad a Stowe [1994] uvádějí přesnost odvozených nadmořských výšek na svažitém terénu srovnatelnou s ostatními územími (tzn. v rámci standardních chyb použitých DEM), ostatní studie si všimají rostoucí chyby ve vertikální přesnosti se zvyšující se svažitostí. Autoři se shodují na výrazném efektu svažitosti, na různých studijních územích ale uvádějí různé hodnoty svažitosti, nad kterou se začíná chyba výrazně zvyšovat. Mouratidis [2010] jako tuto hranici uvádí svahy vyšší než 18° (tj. 32,5 %). Na území Tater se chyba výrazně zvyšovala na svazích strmějších než 30° (tj. 58 %), nad 70° ME dokonce přesahovala 100 metrů, a celkově došla studie k závěru, že SRTM nedosahuje příliš velké přesnosti v Tatrách a jim podobných pohořích, a proto není příliš vhodný na analýzy v podobném typu terénu (velmi strmé svahy, velká variabilita nadmořských výšek, apod.) [Kolečka a Kozak, 2014]. K podobným závěrům došla i analýza na území Německa, kde autoři uvádějí rychlý růst střední chyby od rovných ploch po svahy do 12° , poté zůstávala chyba téměř neměnná, a velmi signifikantní růst v ME byl zazname-

nán opět od svahů nad 30° [Ludwig a Schneider, 2006]. Gorokhovich a Voustianiouk [2006] uvádí jako tuto mezní hodnotu 10° (17 %), nad které se ME zvýšila dvakrát oproti mírnějším svahům pod 10°. Poslední dvě studie přitom nepočítají RMSE.

Při porovnávání TanDEM-X Wessel [2018] rozděluje dataset také na svahy pod a nad 10°, přičemž i zde je ME i RMSE nad 10° dvakrát vyšší než v první kategorii. Rizzoli [2017] analyzuje relativní vertikální přesnost, kterou dělí pro svahy pod 20 % a nad 20 %, stejně jako v technické zprávě TanDEM-X. Uvádí, že tato relativní vertikální přesnost (tzn. 2 metry pro svahy mírnější než 20 %, 4 metry pro strmější) byla splněna téměř v 98 % bodů, v 50 % je tato přesnost dokonce menší než 1 metr pro svahy menší než 20 % a 2 metry pro svahy strmější. Sám autor ale doporučuje analýzu v porovnání s lokálními DEM a to zejména v hornatém terénu, protože ve studii nebyl žádný takový terén zahrnut³.

4.1.3 Orientace

Výsledné chyby ME a RMSE pro orientaci svahů vůči světovým stranám jsou hůře interpretovatelné než v případě svažitosti. Z Tabulky 4.4 je zřejmé, že v případě obou porovnání, tedy s DTM i DMP, jsou chyby při orientaci na sever a jih velmi podobné, zatímco východní a západní orientace se velmi liší, a to i o mnoho metrů. Při porovnání s DTM je ME orientace na západ vždy nejnižší a na východ vždy nejvyšší v rámci všech kategorií vegetačního pokryvu. Severní a jižní orientace poté představuje jakousi střední hodnotu mezi těmito dvěma extrémy. RMSE je nejvyšší vždy pro východ, v ostatních směrech jsou RMSE sobě velmi podobné.

Při porovnávání s DMP jsou ME pro severní a jižní orientaci podobné jako u DTM, největší ME chyba (tedy nejvíce podhodnocená výška) je na západních svazích, nejmenší na východních svazích. Při východní orientaci je dokonce zcela převrácené znaménko a DEM TanDEM-X, který převážně v celém souboru podhodnocuje skutečné výšky vegetace (tedy DMP), výšky nadhodnocuje, a to nejvíce v jehličnatých lesích, které pokrývají největší plochu. RMSE je poté vždy nejvyšší při orientaci na západ, nejnižší na východ (vyjma nezalesněného území), přičemž chyba na západně orientovaných svazích je 2× až 3× vyšší oproti východně orientovaným. Množství svahů s různými orientacemi je přitom téměř rovnoměrně rozdělené (viz Tabulka 4.1).

S podobnými výsledky přišlo i několik studií. Při analýze přesnosti SRTM na Krétě byla vypočítána nejvyšší chyba v RMSE i ME v případě orientace na severozápad, západ a jihozápad (největší chyba při západní orientaci byla 12,5 metru, nejmenší při severovýchodní orientaci 1 metr) [Miliaresis a Paraschou, 2005]. Ludwig a Schneider [2006], kteří mají jedno ze svých zájmových území situováno taktéž v horském prostředí, popisují trend v chybách orientace ke světovým stranám. ME na svazích, jež jsou odvrácené od radaru, je spíše kladná (DEM tedy nadhodnocuje), chyba na svazích směřujících čelem k vyslanému paprsku je spíše záporná. Kolečka a Kozak [2014] zjistili různé výsledky při porovnávání dvou různých DEM SRTM (X-band a C-band). Zatímco v jednom případě byla největší ME na východních svazích a nejmenší na jihozápadních svazích, v případě druhého DEM byla největší na severozápadních a nejmenší na jihovýchodních svazích (na SZ ME

³Ve studii je DEM TanDEM-X porovnáván s body ICESat, které nejsou téměř vůbec dostupné v hornatých terénech [Rizzoli et al., 2017].

více než třikrát větší než na SV). Ke stejným závěrům došli i Ludwig a Schneider [2006]. I Gorokhovich a Voustianiouk [2006] si všimli podobných výsledků (největší chyba na SZ, nejmenší na JV), zároveň uvádějí, že obecně jsou skutečné hodnoty na SZ nadhodnocené a na JV podhodnocené.

Analýzy Tandem-X [Grohmann, 2017, Rizzoli et al., 2017, Wessel et al., 2018] se nijak nezaměřují na analýzu v závislosti na orientaci svahů. Pouze Grohmann [2017] uvádí, že nebyla nalezena příliš velká odchylka mezi chybami počítanými pro jednotlivé světové strany, a dále si povšiml, že při porovnávání DEM TanDEM-X a SRTM je SRTM na severních svazích vyšší než TanDEM-X a na jižních svazích nižší.

Porovnání s DTM			Porovnání s DMP		
Zalesněná i nezalesněná území			Zalesněná i nezalesněná území		
Orientace	RMSE	ME	Orientace	RMSE	ME
sever	12.42	8.41	sever	6.78	-1.16
východ	14.03	10.58	východ	4.50	0.51
jih	11.34	6.84	jih	6.29	-1.30
západ	11.12	5.66	západ	10.34	-3.62
Listnaté lesy			Listnaté lesy		
sever	10.42	6.11	sever	6.32	-1.80
východ	14.22	10.72	východ	4.91	-0.45
jih	11.57	7.20	jih	7.40	-2.44
západ	9.14	4.17	západ	10.35	-4.49
Jehličnaté lesy			Jehličnaté lesy		
sever	14.62	11.43	sever	7.68	-1.20
východ	17.42	15.74	východ	4.84	1.27
jih	15.88	13.03	jih	7.44	-1.11
západ	14.12	8.99	západ	12.18	-4.54
Nezalesněná území			Nezalesněná území		
sever	3.48	1.20	sever	3.26	-0.33
východ	5.79	2.74	východ	3.65	-0.12
jih	4.95	1.60	jih	4.71	-1.12
západ	4.52	0.95	západ	6.13	-1.57

(a)

(b)

Tabulka 4.4: ME a RMSE podle jednotlivých světových stran v porovnání s (a) DTM a (b) DMP

4.2 Vertikální přesnost v závislosti na technických specifikách

Výsledky chyb vertikální přesnosti při porovnávání komponent COM a COV byly předvídatelné. Při porovnávání počtu přeletů (Tabulka 4.5) je vidět výrazně zvýšená ME i RMSE chyba v případě, že jsou dostupná data pouze z jednoho přeletu. V takovém případě je ME 13 metrů, zatímco pro dva přelety je výrazně snížena na 2,6 metru, a pro čtyři přelety dosahuje dokonce 0,24 metru. I RMSE je snížena z téměř 30 metrů na 4 metry. V technické zprávě [Wessel, 2016] je uvedeno, že pro tvorbu DEM byly všechny body snímkovány alespoň dvakrát pro dosažení větší vertikální přesnosti. Na zájmovém území Krkonoš je 1 % hodnot, které byly snímkovány pouze jednou (Tabulka 4.1). Velmi pravděpodobně byly při druhém snímkování tyto body ve stínu, ačkoliv toto riziko se snaží zmírnit použitím dvou družic zároveň v různém postavení.

Do dnešního dne se analýzou závislosti vertikální přesnosti na COV zabývali pouze Rexer a Hirt [2016]. Uvádějí, že dosažená vertikální přesnost zcela jistě závisí na COV, avšak dosažená střední chyba se v případě různého počtu přeletů nad jimi zkoumaným územím (Tasmánií) nemění tak výrazně jako v Krkonoších. V případě jednoho přeletu byla spočítána průměrná odchylka od skutečných výšek 3 metry, v případě sedmi přeletů 2 metry.

Celé území		
Počet přeletů	RMSE	ME
jeden	29.70	-13.11
dva	8.52	-2.61
tři	5.77	-0.82
čtyři	4.23	0.24

Tabulka 4.5: Chyby v závislosti na COV pro DMP

Nejmenších středních chyb i RMSE v závislosti na kategoriích Vrstvy konzistentnosti výšek (COM) bylo dosaženo, pokud hodnoty spadaly do kategorie *Všechny výšky konzistentní* (Tabulka 4.6), přičemž tato tvoří převážnou část celého území (zhruba 92 %, viz Tabulka 4.1). Je zajímavé, že v případě většího počtu přeletů, ale zároveň velké nekonzistentnosti mezi získanými výškovými údaji, je ME větší, než pokud byl uskutečněn přelet pouze jeden. Vzhledem k opačným výsledkům u RMSE pro tyto dvě kategorie je však možné, že ME byla pouze výrazně ovlivněna odlehlými hodnotami. Na 97 % území byl k dispozici alespoň jeden konzistentní pár pro výpočet výsledné výšky, lze tedy konstatovat, že nekonzistentnost výšek se na výsledné vertikální přesnosti a jejich chybách ME a RMSE nepodílí velkou měrou.

Celé území		
Konzistentnost	RMSE	ME
velké nekonzistentnosti	24.50	-15.01
menší nekonzistentnosti	12.45	-6.47
pouze jedno pokrytí	29.70	-13.11
všechny výšky konzistentní	5.74	-1.07
velké nekonzistentnosti, alespoň 1 konzistentní pár	12.25	-3.53
menší nekonzistentnosti, alespoň 1 konzistentní pár	8.99	-2.49

Tabulka 4.6: Chyby v závislosti na COM pro DMP

4.3 Vliv environmentálních charakteristik na absolutní vertikální přesnost

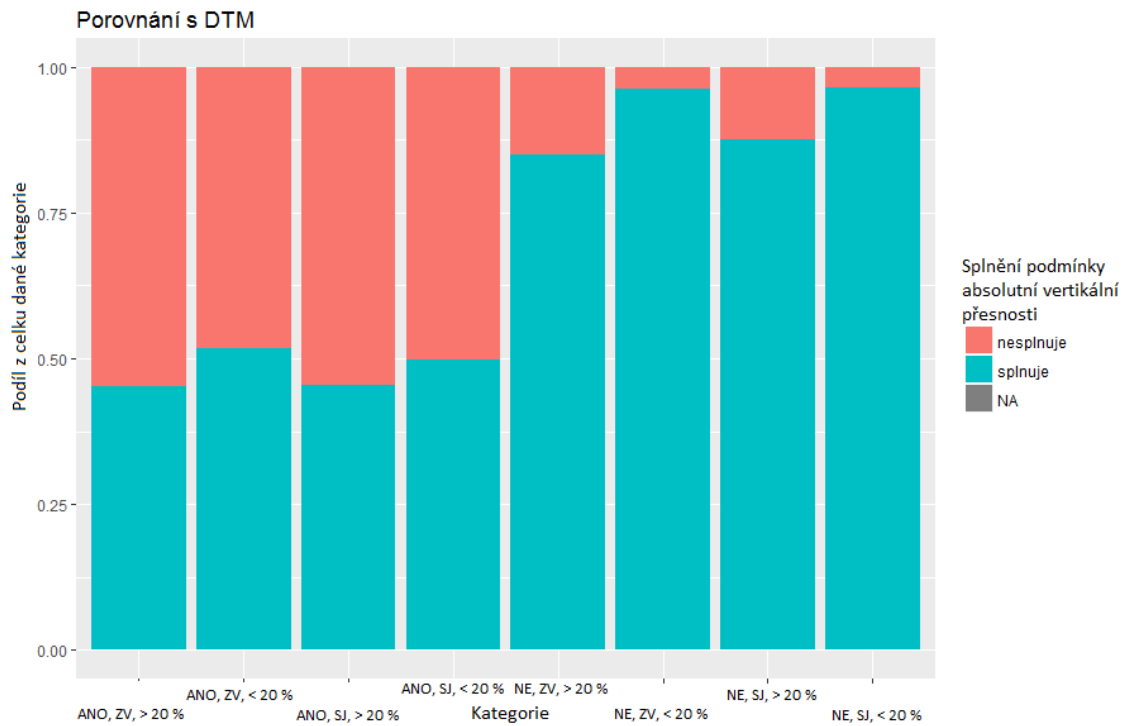
V následujících grafech (Obrázek 4.2, 4.3) je dataset rozdělen na osm kategorií podle kritérií, zda se hodnoty nachází:

- na zalesněném území (v grafu *ANO*) nebo na nezalesněném území (v grafu *NE*)
- na svazích pod 20 % (v grafu *< 20 %*) nebo nad 20 % (v grafu *> 20 %*)
- na svazích orientace severní a jižní (v grafu *SJ*) nebo západní a východní (v grafu *ZV*)

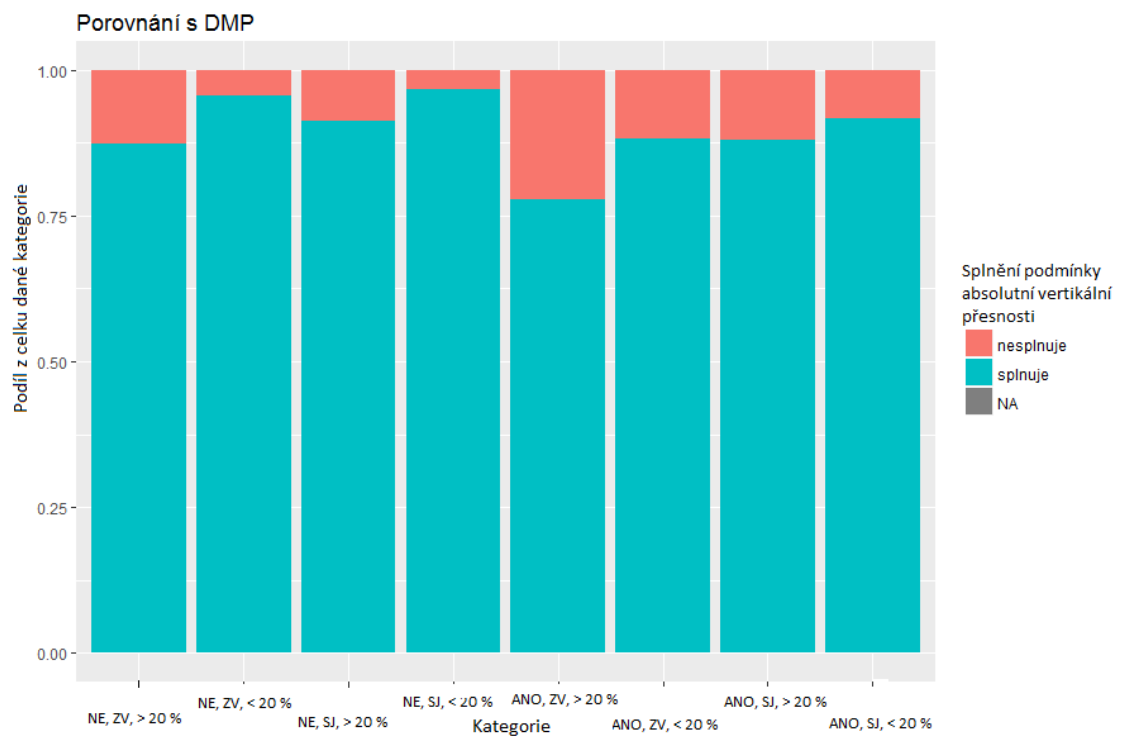
Na obrázku 4.2 je zobrazeno rozdělení chyb pro všechny body a je patrné, že DEM TanDEM-X odpovídá daleko spíše DMP než DTM. Porovnáme-li s DTM, ve všech kategoriích, kde se body nachází v lese, podmínku absolutní vertikální přesnosti do 10 metrů splňuje pouze cca 50 % hodnot. Druhým nejvýznamnějším faktorem je svazitost, orientace se na výsledcích podepisuje z těchto tří kritérií nejméně. Nejvíce hodnot splňujících absolutní vertikální přesnost se tedy při porovnávání s DMT nachází mimo les, na svazích do 20 %, které jsou orientovány na sever nebo jih.

Detailněji lze vertikální přesnost v rámci kategorií rozlišit na Obrázku 4.3, kde jsou zobrazeny různé intervaly přesnosti. Je patrné zcela rozdílné rozložení chyb ve vypočtených výškách, pokud je porovnáváno s DMT nebo DMP. Při porovnávání s DTM (Obrázek 4.3 (a)) jsou výšky téměř vždy nadhodnoceny, přičemž největší procento hodnot je nadhodnocených v případě snímkování lesa na svazích pod 20 % se severo-jihní orientací (nadhodnoceno zhruba 95 % všech hodnot). Téměř se nevyskytují body, kde by byly výšky podhodnoceny o více než 10 metrů. Naopak v lesních porostech západní či východní orientace na svazích nad 20 % je více jak čtvrtina všech hodnot nadhodnocena o 20 a více metrů.

Takto velkým absolutním chybám je více zamezeno porovnáváním s DMP. Větší část grafu tvoří hodnoty podhodnocení skutečné výšky vegetace, ovšem podhodnocení o více než 20 metrů se ve významnější míře objevuje pouze v kategorii zalesněných svahů nad 20 % s orientací na západ a jih, do tohoto intervalu však spadá pouze cca 10 % hodnot. V dalších kategoriích spadá většina hodnot do vertikální přesnosti ± 10 metrů.

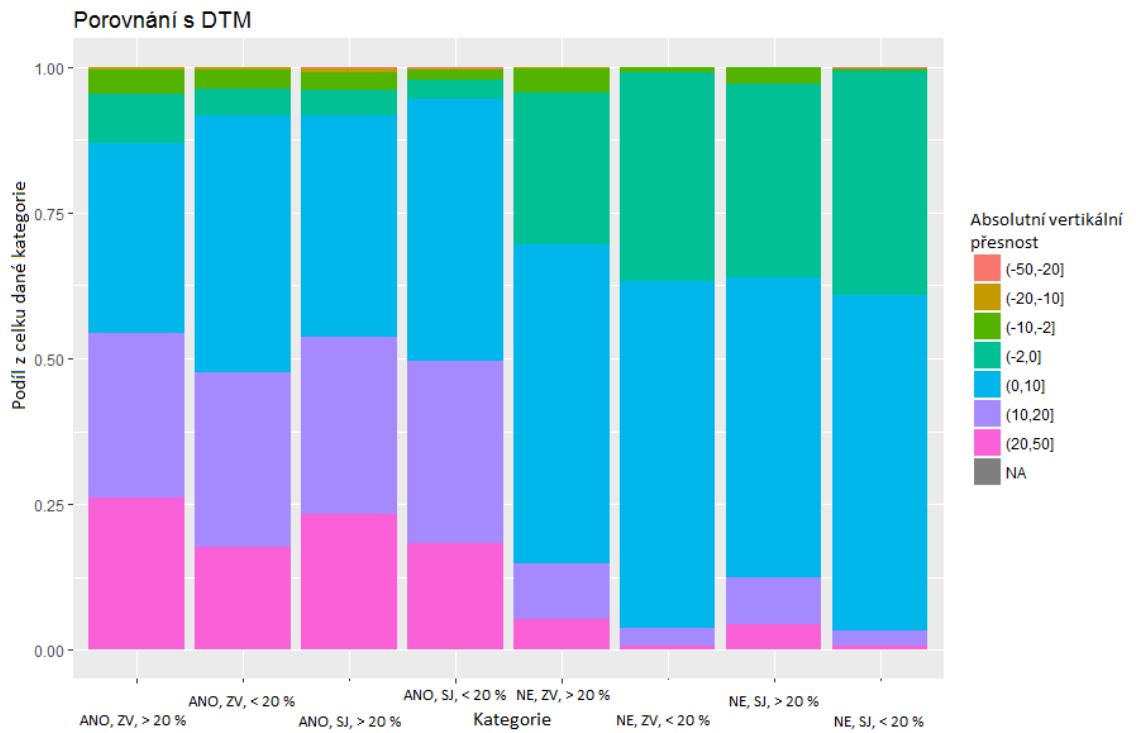


(a)

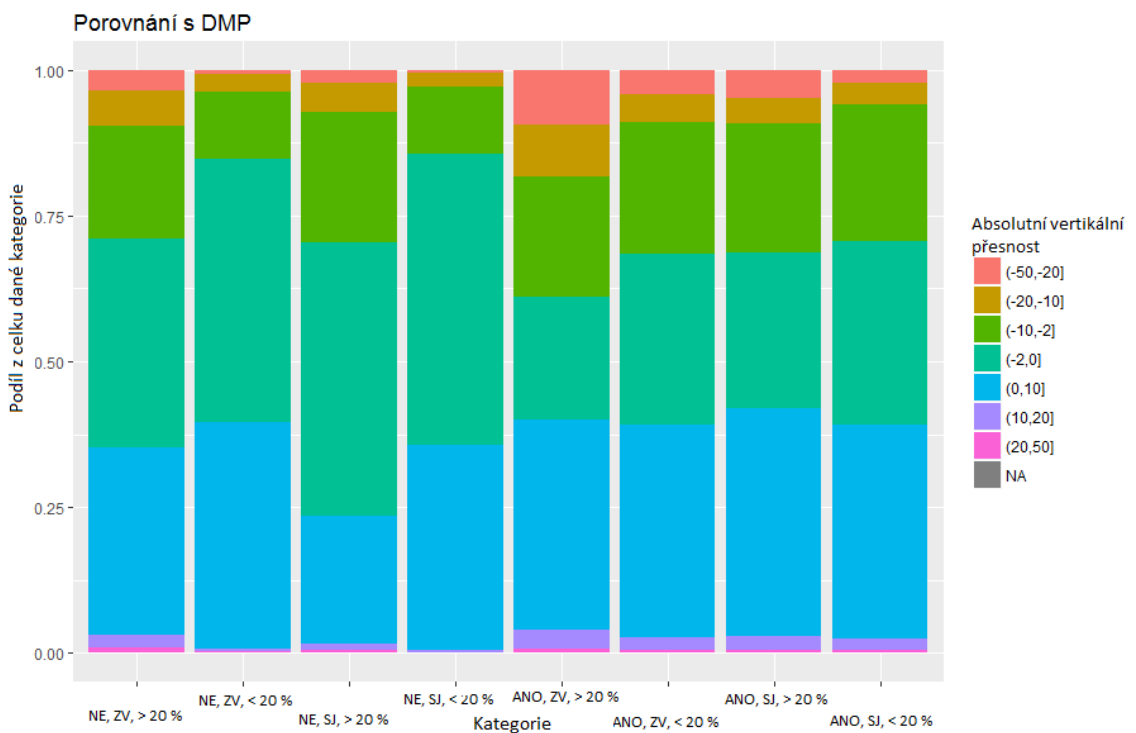


(b)

Obrázek 4.2: Splnění podmínky absolutní vertikální přesnosti v rámci jednotlivých kategorií při porovnání s (a) DTM a (b) DMP



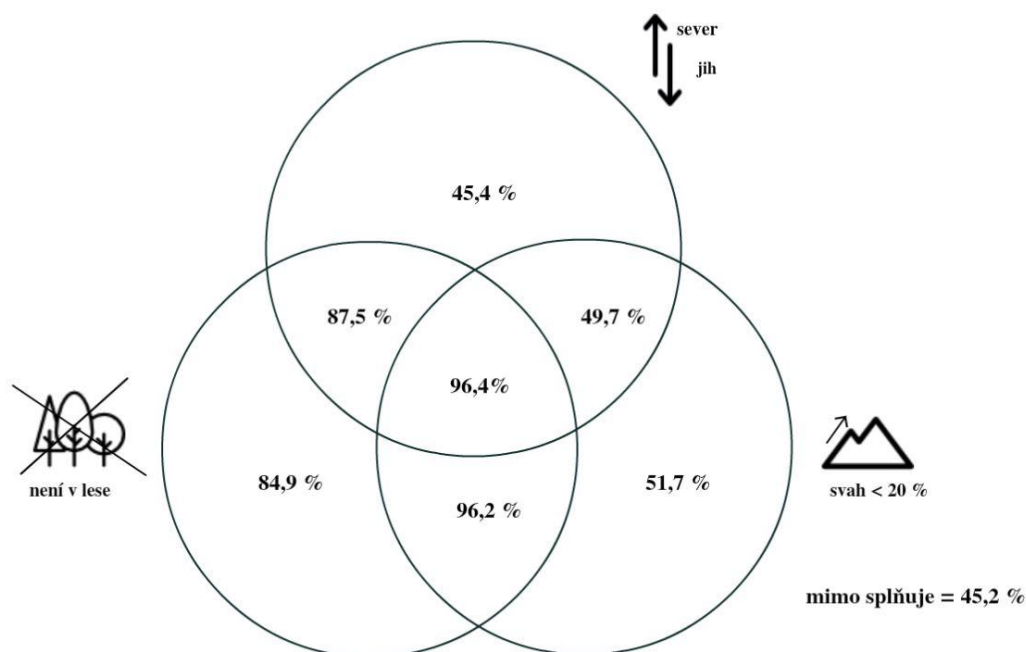
(a)



(b)

Obrázek 4.3: Přehled dosažené vertikální přesnosti v rámci jednotlivých kategorií při porovnání s (a) DTM a (b) DMP

Z Vennova diagramu (Obrázek 4.4) je nejzřetelněji vidět vliv jednotlivých charakteristik na splnění celkové vertikální přesnosti, porovnávané-li s DTM. Procentuální hodnoty uvádí podíl bodů v rámci kategorie, které splňují podmínku absolutní vertikální přesnosti ± 10 metrů. Jsou-li splněna všechna tři kritéria, která byla identifikována jako nejdůležitější pro maximální zvýšení přesnosti (tj. nachází-li se body mimo les, na svazích mírnějších než 20 % s orientací k severu či jihu), 96,4 % hodnot splňuje absolutní přesnost. Naopak pouze 45,2 % hodnot této podmínce vyhovuje, pokud jsou body umístěny v lese, na strmých svazích orientovaných k východu či západu. Prokazatelně nejmenší vliv má kritérium orientace ke světovým stranám. Změníme-li v poslední popisované kategorii pouze orientaci z východo-západní na severo-jihní, procento vyhovujících hodnot se zvýší pouze o dvě desetiny. Největší vliv má zalesnění. Pokud se body nachází mimo les, nehledě na ostatní kritéria, 85 a více % bodů splňuje absolutní vertikální přesnost. Vice versa, nachází-li se body v lese, podmínku přesnosti splňuje pouze cca 50 % bodů.



Obrázek 4.4: Vennův diagram závislosti vertikální přesnosti na environmentálních charakteristikách v porovnání s DTM

Vliv jednotlivých kritérií závisí i na jejich vzájemných kombinacích. Například při analýze SRTM na se Gorokhovich a Voustianiouk [2006] zabývali jak vlivem svažitosti, tak i orientace svahů. Došli k závěru, že ačkoliv se větší chyba vyskytuje na všech severozápadních a jihovýchodních svazích, statisticky významné jsou tyto chyby až na svazích nad 10° . Carabajal a Harding [2005] při analýze SRTM dávají do souvislosti zalesnění se svažitostí, přičemž roustoucí míra zalesnění má větší vliv než rostoucí svažitost terénu. Největších chyb je tedy dosahováno při zalesnění 80 - 100 % na nejprudších svazích. I Rizzoli [2017], zabývající se přímo TanDEM-X, dává do souvislosti zalesnění a svažitost. Avšak vzhledem k použití jiné metody analýzy, tedy použití GPS bodů umístěných zejména na cestách místo spojitého DEM, je

nárůst ME i RMSE mezi rovným a zvlněným terénem velmi podobný jedná-li se o zalesněné i nezalesněné území. Bolstad a Stowe [1994] dávají do souvislosti kromě zalesnění a svažitosti i nadmořskou výšku - místa na strmých svazích hustě zalesněná a ve větší nadmořské výšce vykazují větší vertikální nepřesnosti než rovinná místa, bez vegetace a v nižších nadmořských výškách.

Závěr

Na území Krkonošského národního parku byla provedena analýza vertikální přesnosti digitálního elevačního modelu TanDEM-X. Udávaná relativní vertikální přesnost globálního modelu je 2 metry pro svahy mírnější než 20 % a 4 metry pro svahy strmější při prostorovém rozlišení 12 metrů. Absolutní vertikální přesnost je 10 metrů. Předmětem analýzy bylo celkové ověření těchto údajů na zájmovém území (toto území je charakterizováno variabilitou terénu a velkým zalesněním) a posouzení vlivu environmentálních charakteristik terénu či technických vlastností TanDEM-X na vertikální přesnost. Bylo zjištěno, že DEM TanDEM-X odpovídá spíše modelu povrchu než terénu, což je fakt, na který je třeba brát zřetel při používání tohoto modelu v praxi. Bereme-li jej tedy jako model povrchu, výsledná střední chyba je menší než ± 2 metry (RMSE 7,4 metru), avšak je potřeba brát ohled na konkrétní faktory, které přesnost významně ovlivňují. Obecně má DEM TanDEM-X tendenci skutečné výšky vegetace spíše podhodnocovat.

(i) Jako nejvýznamnější kritérium, které velmi ovlivňuje výslednou přesnost modelu, bylo identifikováno zalesnění. Nacházely-li se analyzované body na nezalesněném území, ME pro celý datový soubor byla menší než 1 metr, RMSE menší než 5 metrů, což je velmi dobrá přesnost pro model tohoto typu. Dalším významným faktorem byla svažitost terénu, přičemž chyby ME i RMSE se zvyšují spolu se zvětšující se svažitostí. Co se týče orientace těchto svahů, i ta hraje roli ve výsledné chybě. Zatímco chyby na severních a jižních svazích vykazovaly podobné hodnoty, při porovnávání s DTM byla identifikována nejnižší vertikální přesnost na východních svazích, při porovnání s DMP na západních svazích.

(ii) Technické parametry mají na výslednou přesnost také velký vliv. Pokud byla k dispozici v daných bodech data pouze z jednoho přeletu družice, ME i RMSE byly velmi vysoké a v tomto případě nelze doporučit, aby byl DEM uvažován jako odpovídající obraz skutečného povrchu. Pokud bylo uskutečněno dva a více přeletů, chyby ME i RMSE se rapidně snížily. Pokud byly všechny získané výšky při více přeletech konzistentní, ME a RMSE poukazují na velkou přesnost DEM, větší chyby byly spočítány pro případ velkých nekonzistentností, popř. pouze jednoho pokrytí. Na převážné většině území byly všechny výšky konzistentní.

(iii) Podmínka absolutní vertikální přesnosti byla splněna v případě porovnávání s DMP ve většině analyzovaných bodů, přičemž tuto přesnost nejvíce snižovalo, nacházely-li se body v lese, na svazích nad 20 % východně či západně orientovaných. Při srovnávání s DTM nebyla podmínka absolutní vertikální přesnosti splněna asi u poloviny hodnot, pokud se tyto nacházely v lese.

Literatura

- [Abrams, 2016] Abrams, M. (2016). ASTER global DEM version 3, and new ASTER water body dataset. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B4:107–110.
- [Baltsavias, 1999a] Baltsavias, E. (1999a). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2):199–214.
- [Baltsavias, 1999b] Baltsavias, E. (1999b). Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2):164–198.
- [Bolstad a Stowe, 1994] Bolstad, P. V. a Stowe, T. (1994). Evaluation of DEM accuracy. Elevation, slope, and aspect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(11):1327–1332.
- [Burrough, 1986] Burrough, P. (1986). Principles of geographical information systems for land resources assessment. *Geocarto International*, 1(3):54–54.
- [Carabajal a Harding, 2005] Carabajal, C. C. a Harding, D. J. (2005). ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models. *Geophysical research letters*, 32(22):L22S01.
- [CUZK, 2018] CUZK (2018). Nová realizace systému ETRS89 v ČR (online). dostupné z: www.cuzk.cz/Zememerictvi/Geodeticke-zaklady-na-uzemi-CR/GNSS/Nova-realizace-systemu-ETRS89-v-CR.aspx.
- [Dolanský, 2004] Dolanský, T. (2004). *Lidary a letecké laserové skenování*. Acta Universitatis Purkynianae n.99, Ústí nad Labem.
- [Florinsky, 2016] Florinsky, I. V. (2016). Digital Terrain Modeling: A Brief Historical Overview. In Florinsky, I. V., editor, *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology (Second Edition)*. Academic Press, second edition.
- [Gonzalez, 2010] Gonzalez, D. (2010). TanDEM-X (online). *DLR - Space Administration - TanDEM-X*, dostupné z: <http://www.dlr.de/rd/en/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586-read-16692/>.
- [Gorokhovich a Voustianiouk, 2006] Gorokhovich, Y. a Voustianiouk, A. (2006). Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104(4):409–415.
- [Grohmann, 2017] Grohmann, C. H. (2017). Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. *ArXiv e-prints*, (1709.05016).

- [Gupta et al., 2014] Gupta, R., Singh, M. K., Snehmami, S., a Ganju, A. (2014). Validation of SRTM X band DEM over Himalayan Mountain. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(4):71–74.
- [Hánek, 2018] Hánek, P. (2018). Radar se syntetickou aperturou (SAR) (online). *Slovník VÚGTK*, dostupné z: www.vugtk.cz/slovník.
- [Kolecka a Kozak, 2014] Kolecka, N. a Kozak, J. (2014). Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6):897–912.
- [Langanke, 2016] Langanke, T. (2016). *GIO land (GMES/Copernicus initial operations land) High Resolution Layers (HRLs) – summary of product specifications*. GIO land team at the EEA.
- [Lillesand et al., 2014] Lillesand, T., Kiefer, R. W., a Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- [Ludwig a Schneider, 2006] Ludwig, R. a Schneider, P. (2006). Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5):339–358.
- [McCandless a Jackson, 2004] McCandless, S. a Jackson, C. R. (2004). Principles of synthetic aperture radar. *SAR Marine User's Manual*, pages 1–23.
- [Miliareisis a Paraschou, 2005] Miliareisis, G. C. a Paraschou, C. V. (2005). Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(1):49–59.
- [Mouratidis et al., 2010] Mouratidis, A., Briole, P., a Katsambalos, K. (2010). SRTM 3? DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: A case study from North Greece. 31(12):6205–6222.
- [Mukherjee et al., 2013] Mukherjee, S., Joshi, P., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R., a Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21:205–217.
- [Ortiz et al., 2012] Ortiz, S., Breidenbach, J., Knuth, R., a Kändler, G. (2012). The Influence of DEM Quality on Mapping Accuracy of Coniferous- and Deciduous-Dominated Forest Using TerraSAR-X Images. *Remote Sensing*, 4:661–681.
- [Pilous, 2007a] Pilous, V. (2007a). Geografické vymezení. In Flousek, J., editor, *Krkonoše - Příroda, Historie, Život.*, pages 13–18. Baset, Praha.
- [Pilous, 2007b] Pilous, V. (2007b). Horopis. In Flousek, J., editor, *Krkonoše - Příroda, Historie, Život.*, pages 19–28. Baset, Praha.
- [Pilous, 2013] Pilous, V. (2013). Neživá příroda krkonoš. *Živa*, (4):160–163.

- [Rabus et al., 2003] Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., a Bamler, R. (2003). The Shuttle Radar Topography Mission—A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57:241–262.
- [Rexer a Hirt, 2016] Rexer, M. a Hirt, C. (2016). Evaluation of intermediate TanDEM-X digital elevation data products over Tasmania using other digital elevation models and accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 63(5):599–609.
- [Rizzoli et al., 2017] Rizzoli, P., Martone, M., Gonzalez, C., Wecklich, C., Tridon, D. B., Bräutigam, B., Bachmann, M., Schulze, D., Fritz, T., Huber, M., Wessel, B., Krieger, G., Zink, M., a 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.
- [Rosenberg, 1955] Rosenberg, P. (1955). Information theory and electronic photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 21(4):543–555.
- [Roth et al., 2002] Roth, A., Knopfle, W., Strunz, G., Lehner, M., a Reinartz, P. (2002). Towards a global elevation product: combination of multi-source digital elevation models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4):675–679.
- [Schmitt et al., 2015] Schmitt, M., Shahzad, M., a Zhu, X. (2015). Reconstruction of Individual Trees from Multi-Aspect TomoSAR Data. *Remote Sensing of Environment*, 165:175–185.
- [Shekhar a Xiong, 2007] Shekhar, S. a Xiong, H. (2007). *Encyclopedia of GIS*. Springer Science & Business Media.
- [Skolnik, 2008] Skolnik, M. (2008). *Radar Handbook, Third Edition*. Electronics electrical engineering. McGraw-Hill Education.
- [Sun et al., 2003] Sun, G., Ranson, K., Kharuk, V., a Kovacs, K. (2003). Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*, 88(4):401–411.
- [Tesař a Pilous, 2007] Tesař, M. a Pilous, V. (2007). Vodopis. In Flousek, J., editor, *Krkonoše - Příroda, Historie, Život.*, pages 13–18. Baset, Praha.
- [Wessel, 2016] Wessel, B. (2016). *TanDEM-X Ground Segment - DEM Products Specification Document*. EOC - Earth Observation Center, Issue 3.1.
- [Wessel et al., 2018] Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschalk, U., Kosmann, D., a Roth, A. (2018). Accuracy Assessment of the Global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139:1–12.
- [Woodhouse, 2005] Woodhouse, I. H. (2005). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press.