

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY
A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

**Srovnání přesnosti digitálních elevačních modelů
SRTM a TanDEM-X na území Česka**
Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.
Diplomant: Bc. Kristýna Hemerková

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Kristýna Hemerková

Voda v krajině

Název práce

Srovnání přesnosti digitálních elevačních modelů SRTM a TanDEM-X na území Česka

Název anglicky

Evaluation of SRTM and TanDEM-X DEM accuracy in Czechia

Cíle práce

Cílem práce je srovnat kvalitu digitálních elevačních modelů SRTM a TANDEM-X na území Česka. 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. Mezi tradiční zdroje patří SRTM vytvořený z dat mise raketoplánu Endeavour v roce 2000. Nedávná mise TANDEM-X přinesla nový globální DEM. Autorka se v literární rešerši zaměří na problematiku DEM, srovná kvalitu nově dostupného TANDEM-X DEM s daty SRTM a vyhodnotí, které parametry mají vliv na přesnost modelů.

Doporučený rozsah práce

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., Kelldorfer, 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.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 68-82.
- Wessel, Birgit, et al. "Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139 (2018): 171-182.
-

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. a že jsem uvedla všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze dne 11. 12. 2019

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za metodické vedení práce, věcné připomínky, potřebný nadhled a takřka bezmeznou trpělivost.

Vděk také patří mým blízkým přátelům za duševní podporu. Petru N. a Patrikovi K. děkuji za možnost sdílení mých potíží. Tomáši P. za nezávislou korekturu, vyrovnaní se s nástrahami Wordu a vůbec za to, že se mi objevil v životě. Karolíně Š. děkuji za pomoc s anglickým překladem.

**Srovnání přesnosti digitálních elevačních modelů
SRTM a TanDEM-X na území Česka**

Abstrakt: Globální digitální elevační model SRTM je doposud široce využívaným zdrojem informací o zemském povrchu. Nedávno vydaný TanDEM-X má představovat nový standard v této oblasti. Bývají mylně považovány za znázornění samotného terénu, ale zahrnují také další objekty. Jsou tedy digitálními modely povrchu (DMP). Například vzhledem k nedostatečnému pronikání daných radarových pásem korunami stromů obsahují vegetaci. Porovnání vertikální přesnosti obou modelů ve verzích o rozlišení 90 metrů proběhlo na území České republiky. Součástí bylo posouzení vlivu vybraných environmentálních charakteristik. Jako referenční model byl zvolen lokální digitální model terénu (DMT) z laserového snímání. Vyšší přesnosti až na výjimky dosahoval SRTM ($RMSE_{SRTM} = 7,85$ m) oproti TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 9,23$ m). Spolu se sklonitostí vzrůstala chybovost obou modelů. Ke změnám chybovosti docházelo také s nadmořskou výškou. Lesní porost snižoval přesnost SRTM ($RMSE_{SRTM} = 12,5$ m) i TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 15,4$ m). V oblastech bez lesů byl přesnější TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 3,38$ m) než SRTM ($RMSE_{SRTM} = 3,84$ m). Nejvýraznějších odchylek od terénu dosahovaly oba modely v lesních oblastech.

Klíčová slova: validace, vertikální přesnost, radar, zkraslení vegetací

Evaluation of SRTM and TanDEM-X DEM accuracy in Czechia

Abstract: The SRTM Global Digital Elevation Model is a widely used source of information about the surface of the planet Earth. The recently released TanDEM-X is set to create a new standard in this area of expertise. They are commonly mistaken for the representation of the terrain itself, while in reality they also include other real-life objects, therefore they are considered Digital Surface Models (DSM). For example, due to insufficient penetration of tree canopy by given radar bands, they also include vegetation. The comparison of the vertical accuracy of both models, in version of a 3 arc sec resolution, was made in the Czech Republic. There was also included an assessment of the impact of several environmental characteristics. Local Digital Terrain Model (DTM) from a laser scanning was chosen to serve as a reference model. SRTM ($RMSE_{SRTM} = 7.85$ m) achieved, with few exceptions, a higher accuracy compared to TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 9.23$ m). However, the error rate of both models increased with ascending slope of the terrain. The changes in error rate also occurred with increasing altitude. Forest cover decreased the accuracy of both SRTM ($RMSE_{SRTM} = 12.5$ m) and TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 15.4$ m). In areas not including vegetation, TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 3.38$ m) was more accurate than SRTM ($RMSE_{SRTM} = 3.84$ m). The most significant deviations of terrain of both models were corresponding to the forest areas.

Key words: validation, vertical accuracy, radar, vegetation bias

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Literární rešerše.....	2
2.1 Digitální výškové modely	2
2.2 Proces digitálního modelování	3
2.3 Zdroje dat	4
2.3.1 Digitalizace topografických map	4
2.3.2 Pozemní geodetická měření	5
2.3.3 Družicové polohové systémy	5
2.3.4 Dálkový průzkum Země.....	7
2.4 Chyby v digitálních modelech.....	12
2.5 Globální a lokální modely	13
2.6 Vybrané modely	13
2.6.1 SRTM.....	13
2.6.2 TanDEM-X	14
2.6.3 DMR 5G.....	15
3. Metodika	16
3.1 Popis zájmového území.....	16
3.2 Sjednocení souřadnicových a výškových systémů.....	16
3.3 Extrakce dat	17
3.4 Vyhodnocení vertikální přesnosti.....	19
4. Výsledky	21
4.1 Základní charakteristiky přesnosti.....	21
4.2 Chybová kritéria celého území	21
4.3 Vliv nadmořské výšky	22
4.4 Vliv sklonitosti	24
4.5 Vliv krajinného pokryvu	25

4.6	Vizuální porovnání	27
5.	Diskuze.....	30
5.1	Celé území	30
5.2	Vliv nadmořské výšky	31
5.3	Vliv sklonitosti	32
5.4	Vliv krajinného pokryvu	32
5.5	Úpravy modelů	34
6.	Závěr	35
7.	Literatura	36
8.	Přílohy	42

1. Úvod

Přesná reprezentace zemského povrchu je základním předpokladem mnohých analýz. Jeho kvantitativním vyjádřením jsou právě digitální výškové (elevační) modely (DEM), které samy o sobě a z nich odvozené charakteristiky (například sklon) představují vstupní data. Přičemž pro kvalitu výstupních dat je klíčová přesnost těchto modelů. DEM jsou ale zatíženy různými chybami (Mukherjee a kol., 2013; O'Loughlin a kol., 2016), jejichž charakter se ovšem mění spolu se zemským povrchem (Mukherjee a kol., 2013; Yamazaki a kol., 2017). Této závislosti lze na druhou stranu využít pro jejich snazší odhalení a případné korekce.

Velmi cenným zdrojem informací právě o zemském povrchu jsou globální DEM. Řadí se mezi ně také modely SRTM a TanDEM-X vzniklé radarovým snímáním naší planety. Udávaná globální vertikální přesnost SRTM, reprezentujícím zemský povrch v roce 2000, je 16 metrů (Farr a kol., 2007). V případě TanDEM-X, který reprezentuje zemský povrch mezi lety 2010 a 2015, je 10 metrů (Wessel, 2018). Nabízí se otázka, jak budou dané modely přesné lokálně. Ze znalosti interakce radarových paprsků se zemským povrchem lze předpokládat zvýšený výskyt chyb v členitém terénu, ale také v oblastech s charakteristickým krajinným pokryvem. Především s lesy, ale také s městskou zástavbou a vodními plochami (Ouchi, 2013). Pro objektivní vyhodnocení přesnosti DEM bývají používána různá statistická kritéria. Vizuální porovnání jsou naproti tomu do určité míry subjektivní (Podobnikar, 2009), ale jsou vhodným doplňkem předchozího.

Jak je patrné již z názvu, hlavním cílem práce je:

- Zjištění a porovnání vertikální přesnosti digitálních výškových modelů SRTM a TanDEM-X na území České republiky.

Z této skutečnosti vyplývají jednotlivé dílčí cíle práce:

- Zhodnocení vlivu nadmořské výšky, sklonitosti a krajinného pokryvu na přesnost obou modelů.
- Vykreslení „prostorové struktury chyb“ porovnávaných modelů.

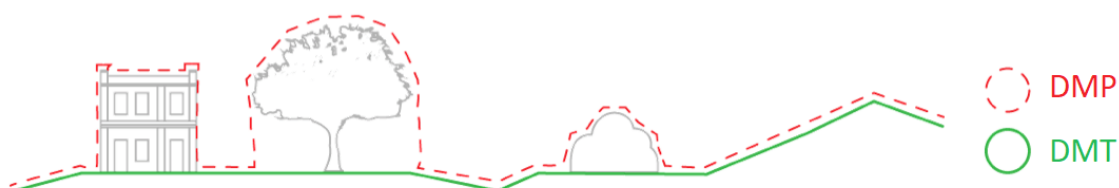
2. Literární rešerše

2.1 Digitální výškové modely

DEM obsahuje výškové (elevační) údaje určité lokality, které jsou v něm uloženy ve formátu x , y a z . Výškové body tedy mají vztah k referenčnímu povrchu a svou zeměpisnou šířku a délku (Dixon a Uddameri, 2016). Běžně se uvádí, že se jedná o 3D reprezentaci. Lze se ale setkat i s výrazem 2,5D pro zobrazení 2D geometrie v 3D prostoru (Huisman a de By, 2009; Brůha, 2017).

Rastrový model sestává z pravidelné mřížky (matice), ve které výškové údaje představují jednotlivé buňky. Jedná se o spojitě vyjádření povrchu, kdy se hodnota z pohybuje v rámci určité domény a je zjištělná v každém místě řešeného území. Naproti tomu vektorové pojetí zobrazuje diskrétní objekty, mezi kterými je prázdný prostor. Takovýto model popisuje povrch vrstevnicemi, liniemi spojujícími místa se stejnou výškou z , která nabývá konečných hodnot (Huisman a de By, 2009; Dixon a Uddameri, 2016; Miklín a kol., 2018). Na pomezí stojí nepravidelná trojúhelníková síť (*Triangular Irregular Network – TIN*), ve které jsou výškové body spojeny liniemi tak, že vzniká model z nepravidelných trojúhelníků. (Tang a kol., 2001; Dixon a Uddameri, 2016). Výška z ale v tomto modelu nabývá spojitých hodnot a je zjištělná kdekoli. TIN může lépe postihnout složitější povrch, kdy na nepravidelný terén spotřebuje více bodů a plošky trojúhelníků jsou tedy menší. Naopak na rovinatější oblasti méně bodů a větší plochy trojúhelníků (Dixon a Uddameri, 2016).

Vedle pojmu digitální výškový model (*DEM* také z anglického *Digital Elevation Model*) existují i další. Digitální model terénu (*DMT*) vyjadřuje čistě zemský povrch. Bývá zaměňován s *DEM*, nebo pod něj zařazován spolu s následujícím modelem. Digitální model povrchu (*DMP*) vyjadřuje území včetně staveb a rostlinného pokryvu (Miklín a kol., 2018), jak je patrné z obr. 1. O nich lze získat informace odečtením *DMT* od *DMP*.

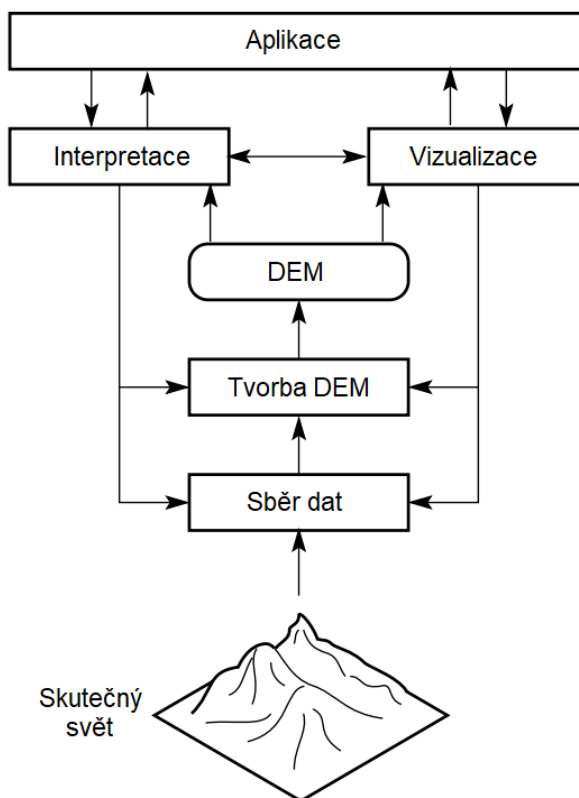


Obr. 1: Rozdíl mezi digitálním modelem povrchu a terénu (DroneDeploy, 2018; upraveno)

2.2 Proces digitálního modelování

Tento proces zahrnuje několik navzájem propojených a ovlivňujících se činností, jak je znázorněno na obr. 2, a obvyklé řazení bývá následující (Hutchinson a Gallant, 1999; Pike a kol., 2009):

- sběr dat – získání výškových dat různými metodami. Bývá zařazováno do následující činnosti.
- tvorba DEM – samotná konstrukce modelu, kdy se filtrují data a volí se vhodná metoda interpolace.
- manipulace DEM – úpravy vzniklého modelu, odstranění chyb, převzorkování tzn. změna rozlišení a případně konverze mezi datovými typy.
- interpretace DEM – analýza a získávání informací z modelu pro další zpracování nebo k dalším úlohám.
- vizualizace DEM – grafické ztvárnění modelu a odvozených informací. Nezbytné pro vizuální porozumění a hodnocení modelu.
- aplikace DEM – cílem všech předchozích činností může být digitální model sám o sobě, kdy jde pouze o jeho vizualizaci. Jinak jsou možnosti použití napříč různými měřítky a odvětvími.



Obr. 2: Hlavní činnosti s DEM (Hutchinson a Gallant, 1999; upraveno)

Během celého procesu musí být samozřejmě brán v potaz původ dat a účel modelu. Případné chyby se bez vhodných korekcí promítají do dalších činností s DEM včetně výsledků případných analýz. Dále je třeba brát na vědomí, že navzdory všem snahám DEM představuje nedokonalou reprezentaci zemského povrchu (Hutchinson a Gallant, 1999; Pike a kol., 2009; Gallant, 2011). Ten je totiž nemožné naměřit nebo simulovat s absolutní přesností kvůli jeho složitosti a nepravidelnosti. Počet a možnosti měření jsou navíc omezené. Přiblížení se skutečným hodnotám obecně závisí na rozlišení daného DEM, složitosti modelovaného povrchu a zvolené metodě sběru dat (Tang a kol., 2001).

2.3 Zdroje dat

Metody získávání dat pro tvorbu DEM se dělí do třech hlavních skupin: digitalizace topografických map, pozemní geodetická měření a dálkový průzkum Země (Nelson a kol., 2009; Dixon a Uddameri, 2016; Elkhachy, 2018). Každá z nich má své výhody a nevýhody, které je předurčují pro některá použití. Při volbě vhodné metody je nutné zohlednit určitá kritéria (Athmania a Achour, 2014; Elkhachy, 2018):

- velikost území
- požadovaná polohová a výšková přesnost
- požadovaná hustota bodů
- čas a cena tzn. náročnost přípravy, sběru a zpracování

2.3.1 Digitalizace topografických map

Potřebná data lze získat z vrstevnicových plánů zakreslených na analogových mapách kartografickou digitalizací nebo skenováním. Prvním zmíněným postupem vzniknou vektorová data, druhým data rastrová, která jsou následně vektorizována (Dixon a Uddameri, 2016). Tuto metodu lze provádět zcela manuálně, s různým stupněm automatizace, nebo plně automatizovaně. Nicméně analogové mapy se jako zdroj dat pro tvorbu modelů terénu již nepoužívají, případně jsou zdrojem poslední volby (Nelson a kol., 2009).

2.3.2 Pozemní geodetická měření

Měření probíhá ve styku se zemským povrchem. Výstupem této skupiny metod jsou diskrétní hodnoty a obecně spočívají v určování polohy pomocí měření vzdáleností a případně i úhlů (Ghilani a Wolf, 2012; Florinsky, 2016). Pro tvorbu DMT lze uplatnit nivelační i trigonometrická měření (Florinsky, 2016).

Nivelace spočívá v odečítání výškového rozdílu mezi dvěma body, přičemž pro jeden z nich je známa nadmořská výška. Na oba body je postavena měřičská lať se stupnicí a nivelační přístroj je umístěn přibližně do jejich středu. Optická osa dalekohledu tvoří záměrnou přímku, která je urovnána do vodorovné polohy. Tímto způsobem lze prostřednictvím výšek naměřených na obou latích určit neznámou nadmořskou výšku druhého bodu (Ghilani a Wolf, 2012). Naproti tomu s využitím trigonometrie lze určit současně výšku i polohu bodu. Princip spočívá v měření délky a vodorovného a svislého úhlu pomocí tachymetru. Poloha je zde vyjádřena polárními souřadnicemi, výšku lze určit právě trigonometricky (Ghilani a Wolf, 2012; Florinsky, 2016). V současnosti jsou ale stále častěji pro tyto účely používány tzv. totální stanice. Jedná se o kombinaci výše zmíněného měření vzdáleností a úhlů a navíc ještě výpočetní jednotky se specializovaným softwarem pro práci s naměřenými daty (Ghilani a Wolf, 2012).

Geodetická měření patří k nejpřesnějším, ale i nepracnějším metodám. Lze jimi pokrýt relativně malá a těžko přístupná území, kde jiné metody neposkytují dostatečnou přesnost (Ghilani a Wolf, 2012; Florinsky, 2016).

2.3.3 Družicové polohové systémy

Z globálních družicových polohových systémů (*Global Navigation Satellite System – GNSS*) je nejrozšířenější systém americké armády NAVSTAR GPS (*Navigation Signal using Time and Ranging Global Positioning System*). Aktivní je dále ruský GLONASS (Ghilani a Wolf, 2012; Sanz Subirana a kol., 2013). Evropský systém Galileo byl uveden do provozu v roce 2016, přičemž na rok 2020 je naplánováno vypuštění doplňujících družic (*European GNSS Agency, 2019*). V tomtéž roce je také očekáváno dokončení globálního pokrytí systémem BeiDou, který byl původně k dispozici pouze pro území Čínské lidové republiky (*BeiDou Navigation Satellite System, 2018*).

Obecně družicové polohové systémy sestávají ze třech segmentů. Klíčovým je ten kosmický, který je tvořen právě družicemi. Kontrolu a provoz systému provádí řídicí segment s pozemními monitorovacími stanicemi (Li a kol., 2005; Ghilani a Wolf, 2012; Sanz Subirana a kol., 2013; Dixon a Udamery, 2016), které družicím posílají navigační data. Ty je dále přeposílají přijímačům signálu, jež tvoří uživatelský segment. Posílaná data zahrnují mimo jiné časové údaje. Principem výpočtu polohy je totiž určení vzdálenosti mezi družicí a přijímačem. A právě rozdíl času mezi vysláním a příjmem rádiového signálu, se znalostí rychlosti světla, slouží k výpočtu vzdálenosti (Li a kol., 2005; Ghilani a Wolf, 2012; Sanz Subirana a kol., 2013).

Systém s globálním pokrytím je tvořen 24 družicemi (spolu s několika náhradními), které obíhají Zemi v 6 drahách. Je tak zajištěno, že z každého místa na planetě jsou „viditelné“ minimálně 4 družice (Sanz Subirana a kol., 2013). V podstatě by k určení polohy v prostoru postačily 3 družice (tři vzdálenosti ze tří známých bodů k určení pozice x , y a z ve 3D prostoru). Každá z nich kolem sebe definuje kulovou plochu s poloměrem vzdálenosti k přijímači. Průnikem dvou kulových ploch bude kruh. Třetí na něm určí dva body, kdy pouze jeden z nich leží na, nebo v blízkosti zemského povrchu a druhý ve vesmíru. (Li a kol., 2005; Sanz Subirana a kol., 2013). Vzhledem k principu výpočtu je ale zapotřebí přesného určení času t . Satelity jsou opatřeny atomovými hodinami, jichž lze využít pro výpočet čtvrté neznámé, a to jeho nepřesnosti. Což znamená zapojení oné 4. družice (Li a kol., 2005).

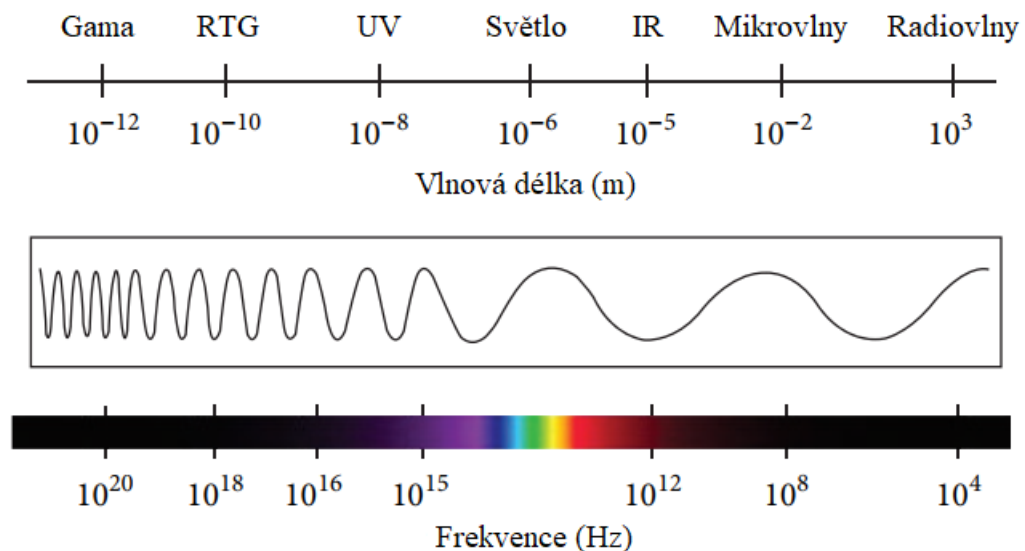
Určení polohy lze zvýšit pomocí diferenční *GNSS* (*DGNSS*), která omezuje vliv atmosféry, nepřesnosti atomových hodin a ne zcela ideálního uspořádání družic. Metoda spočívá v použití jednoho přijímače signálu jako „základny“, pro kterou jsou známy její souřadnice o velmi vysoké přesnosti. Jelikož jsou další použité přijímače relativně blízko, lze pro ně uvažovat stejné korekce. Toto měření může probíhat téměř v reálném čase (*real-time differential GNSS*). Případně lze naměřená data korigovat zpětně (Ghilani a Wolf, 2012; Dixon a Udamery, 2016). Pro účely korekcí mohou být využity již vybudované sítě rovnoměrně rozmístěných stanic. V České republice korekční data poskytuje národní systém CZEPOS (ČÚZK, 2019).

Přesnost *GNSS* měření závisí na použití případných korekcí, které ho ale prodražují. Je ovlivněna atmosférickými podmínkami, silou signálu, pohybem *GNSS* přijímače a překážkami na místě měření (stromy a budovy) (Dixon a Udamery, 2016).

Výšková složka z dosahuje vyšší nepřesnosti polohového měření, což vyplývá ze způsobu měření pomocí družic (Sanz Subirana a kol., 2013). GNSS měřením lze pokrýt relativně malá území, není proto ani tak ideální pro vznik DEM, ale používá se pro jejich validaci (Wessel a kol., 2018). Určování polohy pomocí GPS je také součástí měření metodami dálkového průzkumu Země, neboť je obvykle třeba znát polohu nosiče (Li a kol., 2005; Nelson a kol., 2009; Florinsky, 2016).

2.3.4 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) umožňuje sběr prostorových dat bez přímého kontaktu se zkoumanou oblastí. Metody DPZ se podle zdroje energie dělí na pasivní a aktivní. Pasivní metody jsou závislé na slunečním záření, které je odraženo (pouze ve dne), nebo na záření emitovaném Zemí jako tepelné specificky jednotlivými druhy povrchů. Aktivní metody využívají vlastního zdroje, který vysílá záření v různých částech elektromagnetického spektra (Musa a kol., 2015). Respektive od viditelného světla až po rádiové vlny, přičemž řazení je uvedeno na obr. 3, dle jednotlivých metod (Li a kol., 2005; Nelson a kol., 2009; Florinsky, 2016).



Obr. 3: Elektromagnetické spektrum (Lewicka a kol., 2015; upraveno)

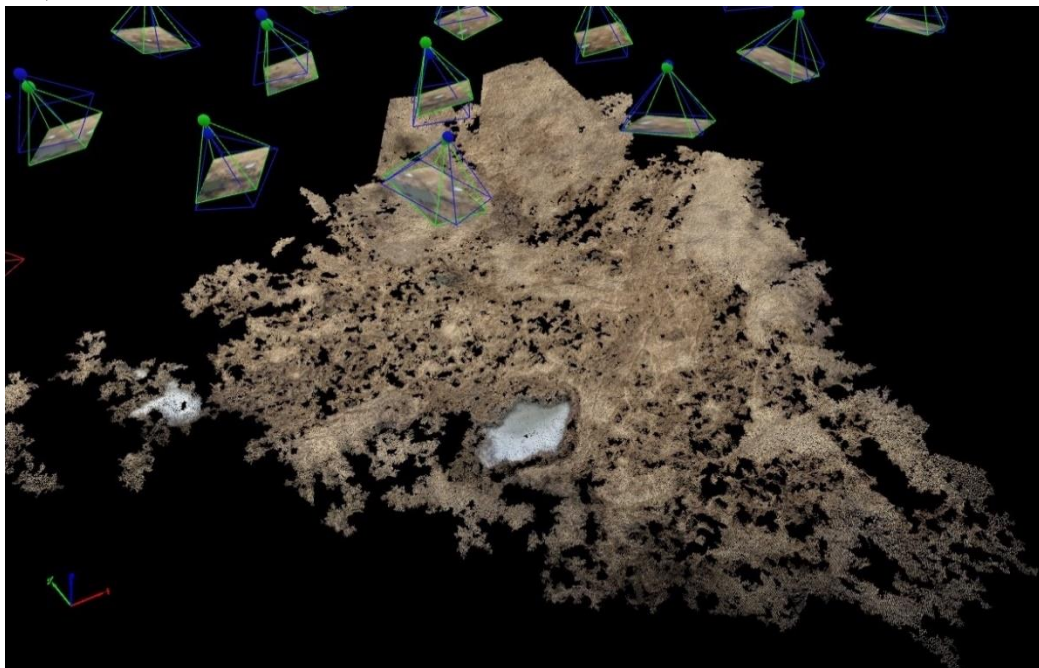
2.3.4.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je metoda, pomocí které lze získat prostorové informace z fotografií (Li a kol., 2005; Nelson a kol., 2009; Florinsky, 2016). Pro potřeby tvorby DEM bývá takto označována stereofotogrammetrie, která pracuje se stereoskopickými dvojicemi

snímků, z nichž je schopna zpětně rekonstruovat tvar a rozměr 3D objektů. Takovéto dvojice zachycují ten samý objekt nebo území, ale ze dvou různých pozic tak, že je zajištěn obvykle 60% překryv ve směru pohybu nosiče a 30% překryv mezi jednotlivými pásy (Li a kol., 2005).

Během snímání je vhodné vyznačit v terénu pozemní kontrolní body (*Ground Control Points – GCP*) o známých souřadnicích pro přesnější georeferenci vzniklého modelu. Také lze během letu využít *GNSS* korekce zprostředkované referenční stanicí (Nelson a kol., 2009; Ghilani a Wolf, 2012).

Software pro zpracování pořízených snímků hledá na pravém snímku identické body ze snímku levého (Li a kol., 2005). Pro výpočet souřadnic těchto bodů, tedy přítomných na překrývajících se částech snímků, je třeba znát geometrické parametry samotného snímání (mimo jiné vlastnosti kamery, pozice a orientace) (Florinsky, 2016), jak lze vyzorovat z obr. 4. Vypočítané bodové mračno je obvykle nutné pro tvorbu DMT dále upravit. Nezahrnuje totiž pouze body, které leží na terénu, ale i na povrchu objektů (vzrostlá vegetace a stavby) (Andersen a kol., 2004; Nelson a kol., 2009).



Obr. 4: Ukázka fotogrammetrické tvorby DMP (autorka)

Fotogrammetrické snímky pro vytváření DEM mohou být z leteckého nebo družicového snímání. První uvedená metoda je zpravidla vhodnější pro podrobnější nasnímání menšího území na rozdíl od použití družic (Ghilani a Wolf,

2012; Florinsky, 2016). Zpracovávané snímky jsou převážně v digitální podobě, popřípadě je lze fotogrammetricky naskenovat (Li a kol., 2005).

2.3.4.2 Laserové snímání

Principem této metody je analýza svazku laserových paprsků vyslaných systémem k zemskému povrchu, od kterého se odrazí zpět. Z časové prodlevy mezi vysláním a příjmem signálu lze ze znalosti rychlosti světla (jako u *GNSS*) určit vzdálenost mezi senzorem a povrchem. Vyslaný signál leží v infračerveném spektru, ale někdy také v zelené části viditelného spektra (Nelson a kol., 2009; Florinsky, 2016). Použité vlnové délky vyžadují bezmračné podmínky (Andersen a kol., 2004).

Inerciální navigace (soustava gyroskopů) spolu s vlastní *GNSS* zaznamenává náklon a polohu přístroje. Z těchto známých hodnot dochází k určení právě vzdáleností, ale i úhlů pro výpočet neznámých pozic na zemském povrchu (Ghilani a Wolf, 2012). Obdobně jako u předchozí jmenované metody lze využít pozemních kontrolních bodů a *GNSS* korekcí (Li a kol., 2005; Karan a kol., 2014).

Laserový systém je schopen vysílat až tisíce pulzů za sekundu (Karan a kol., 2014). Získaná data proto mohou tvořit i posloupnost $x, y, z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$, kde z_1 vyjadřuje první odraz (nejvyšší bod) a z_n odraz poslední (nejnižší zjištěný bod), který nejčastěji udává výšku terénu. V případě velmi husté vegetace tomu tak nemusí být (Andersen a kol., 2004; Nelson a kol., 2009). Naproti tomu vodní plochy signál nenavrací zpět a jsou tedy rozpoznatelné jako mezery v datech (Steuer a kol., 2011; Karan a kol., 2014).

Ze vzniklého bodového mračna je nutné odfiltrovat nechtěné hodnoty tzn. šum, hodnoty odlehlé a případně i hrubé chyby. Dále je třeba provést klasifikaci, tím je myšleno nalezení specifických struktur, tedy označení vegetace, vodních ploch nebo například budov. Generalizací klasifikovaných objektů je označováno jejich modelování (Li a kol., 2005; Karan a kol., 2014).

Laserové snímání (*LiDAR – Light Detection and Ranging*), též označováno jako laserová altimetrie, pro potřeby tvorby DEM je letecká a družicová (Florinsky, 2016). Použité kratší vlnové délky u laserového snímání jsou schopny poskytnout vysoké rozlišení a přesnost výsledného modelu (Norheim a kol., 2002; Nelson a kol.,

2009). Tímto měřením lze pokrýt i celé státy (Miklín a kol., 2018; Schumann a Bates, 2018).

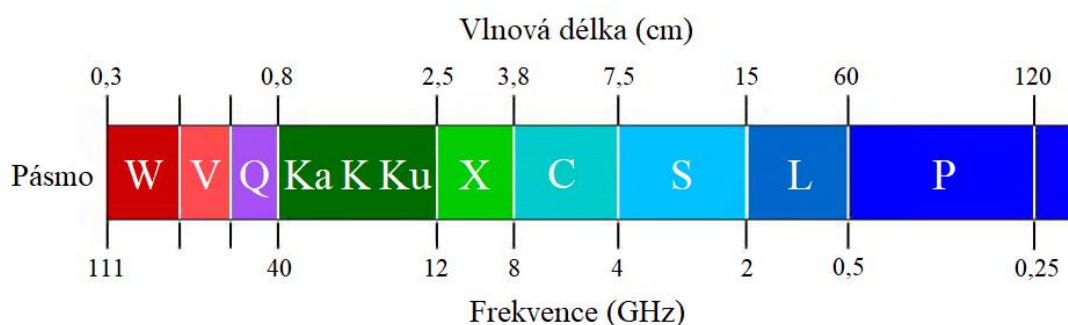
2.3.4.3 Radarové snímání

Radarové snímání (*RaDAR – Radio Detection and Ranging*) pracuje se signálem v mikrovlnném spektru. Většinou jsou získaná data používána jako obrazová. Ale protože je metoda velmi ovlivňována výškovým profilem terénu, lze ji použít ke sběru dat pro tvorbu DEM. Respektive pro tento účel jsou relevantní dva níže zmíněné způsoby radarového snímání (Li a kol., 2005).

Radarová interferometrie (*InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar*) pracuje na principu přijímání signálu odraženého ze stejného místa na zemském povrchu, ale ze dvou odlišných pozic (úhlů) – antén nebo družic samotných. Jsou tedy vytvářeny dvojice snímků, které jsou získány víceobletovou, nebo jednoobletovou interferometrií. U druhé zmíněné vytváří druhý snímek další anténa, která je ve smyslu DPZ pouze pasivní. Toto může být také zajištěno dvěma radarovými systémy zároveň (tandem družic) (Nelson a kol., 2009; Florinsky, 2016). Frekvence vysílání pulzů se jako u předchozí metody pohybuje v tisících hertzů. Přijatý signál je zaznamenán ve formě pixelů. Pořízené snímky jsou vůči sobě fázově posunuty a jejich zpracováním je následně získán tzv. interferogram pro určení relativních výškových rozdílů. Ty lze převést na nadmořské výšky. Přesnější výsledky poskytuje diferenční interferometrie, tedy rozdíl dvou interferogramů. Radargrammetrie na rozdíl od předchozího způsobu nepracuje s interferometrickým fázovým posunem, ale pouze s intenzitou signálu (Li a kol., 2005; Moreira a kol., 2013).

Použití radarového signálu není omezeno denní dobou a je schopno proniknout skrze mraky, v určitém rozsahu i skrze déšť. Je tedy téměř nezávislé na počasí. Mikrovlnná část elektromagnetického spektra používaná během radarového snímání byla rozdělena do jednotlivých dílčích pásem, jak je vyobrazeno na obr. 5 (Moreira a kol., 2013; Ouchi, 2013). Problémem některých z nich je jejich interakce se vzrostlou vegetací. Elektromagnetické záření se totiž nejlépe odráží od objektů velikostně shodných s danou vlnovou délkou. Krátké vlnové délky v tomto případě interagují s listím a menšími větvemi, a proto neproniknou až k holému povrchu. Signál o vyšší vlnové délce se naopak odráží od větších objektů, a proto je schopen lépe reprezentovat

terén (Rosen a kol., 2000). Pásmo C tedy vegetací proniká pouze částečně a pásmo X ještě méně. Naproti tomu pásma L a P jsou schopna vegetací velmi dobře proniknout (Ouchi, 2013). Díky pronikání vegetací se může zdát výhodným použití záření o co nejdelších vlnových délkách. Prostorové rozlišení je ale při dané délce antény nepřímo úměrné vlnové délce použitého signálu. Jinými slovy s rostoucí vlnovou délkou klesá spolu s přesností (Norheim a kol., 2002; Nelson a kol., 2009).



Obr. 5: Pásmo používaná pro radarové snímání (Ouchi, 2013; upraveno)

Vliv na radarové snímání terénu má také vlhkost půdy (Farghaly a kol., 2016). Signál je dále ovlivňován vlastnostmi povrchů, proto je přijímán zpět o různé intenzitě. Ze zaznamenané křivky intenzity signálu lze získat informace o odrazových vlastnostech (Kokaly a kol., 2014) a drsnosti povrchu. Drsnější povrch způsobuje více dílčích odrazů signálu a na snímku se toto projeví světlým odstínem. Naproti tomu jednotlivé hladké povrchy, například vodní plochy, se chovají jako zrcadlo a odrazí signál na druhou stranu. Senzor takovýto odraz nemůže zachytit, tím pádem se na výsledném snímku objeví temný povrch (Farghaly a kol., 2016). V městské zástavbě kombinace hladkých povrchů způsobují dvojitě odrazy, které signál naopak navrátí zpět (Ouchi, 2013).

Radarová data často obsahují různé druhy šumu a chybné nebo opomenuté hodnoty způsobené výraznými prvky na zemském povrchu (Nelson a kol., 2009; Yamazaki a kol., 2017). Terénní nerovnosti a dále různé nevhodné vztahy sklonu svahu a „úhlu pohledu“ družice mohou způsobit slabý odraz, stín a také zhuštění nebo překryv signálu (Moreira a kol., 2013). Ve výsledném DEM se poté projeví jako terénní nesrovnalosti, kterých se lze vyvarovat pouze opatrnějším snímáním v rizikových oblastech (Wessel, 2018). Co se týče šumu jsou vyvíjeny různé algoritmy na jeho odstranění (Gallant, 2011), stejně tak v případě vegetace k přiblížení se DMT (O'Loughlin a kol., 2016; Yamazaki a kol., 2017). Nicméně i pro takto opravené DEM ale platí do určité míry omezení původního modelu (Hawker a kol., 2018). Chybějící

data lze také doplnit z jiného digitálního modelu (NASA, 2015; Yamazaki a kol., 2017).

Radarová technika umožňuje snímat ve větších výškách a vyšší rychlostí než ta laserová a pokryje tedy rozsáhlejší území. Použité kratší vlnové délky u laserového snímání jsou ale schopny poskytnout vyšší rozlišení a přesnost výsledného DEM (Norheim a kol., 2002; Nelson a kol., 2009). Z tohoto vyplývá specifické použití obou těchto metod pro lokální, nebo globální modely.

2.4 Chyby v digitálních modelech

Data získaná pozemním měřením i dálkovým průzkumem Země jsou zatížena chybami stejně jako kterékoli jiné měření (Huisman a de By, 2009; Ramešová a Mattas, 2010). Projevují se od vstupních dat přes samotný model (kde se mohou přidat mimo jiné interpolační chyby) až po jeho aplikaci. Analýza chyb je proto nezbytnou součástí tvorby DEM (Hutchinson a Gallant, 1999). Dle klasické teorie chyb bývají rozdělovány do třech skupin (Wise, 2000; Li a kol., 2005, Huisman a de By, 2009; Horský a Horský, 2010; Ramešová a Mattas, 2010):

- náhodné chyby – vždy ovlivňují měření a nelze se jim vyhnout, bývají ale malé. Vznikají kombinací řady neznámých a vzájemně nezávislých vlivů.
- systematické chyby – týkají se použitých přístrojů. Při opakování měření tím samym přístrojem mohou zůstat nepovšimnuty, protože chyba je stále stejná.
- hrubé chyby – projevují se značně vychýlenými hodnotami. Lze se jim vyhnout správně a pečlivě provedeným měřením.

Cílem měření je samozřejmě určení pravé hodnoty, respektive její odhad co nejbližší. Nebo v závislosti na požadované přesnosti co možná nejbližší využitím korekcí na všechny známé systematické chyby. Stejně tak použitím dostatečného počtu opakovaných měření pro minimalizaci chyb způsobených náhodnými jevy (Horský a Horský, 2010).

V případě DEM se chyby objevují v horizontálním i vertikálním směru. Nesprávná výška z může být na správné poloze a naopak, nebo kombinace obojího (Elkhrachy, 2017). Pro posouzení přesnosti DEM jsou používány dva různé přístupy.

Kvantitativní založený na statisticko-matematickém principu a kvalitativní na vizuální analýze (Podobnikar, 2009; Athmania a Achour, 2014; Adeola a kol., 2017).

Obvyklým postupem posouzení kvality DEM je porovnání jeho výšek z se známými hodnotami vzatými obvykle z přesnějšího modelu (Wise, 2000; Wessel a kol., 2018). Změny chyb v prostoru vyjádřeném DEM bývají počítány pro jednotlivé kategorie sklonu a krajinného pokryvu kvůli jejich náchylnosti vůči chybám ve snímání povrchu. Někdy bývají také zobrazeny čistě jako „prostorová struktura chyb“ (Wise, 2000; Yamazaki a kol., 2017; Hawker a kol., 2018). Je nutné také zmínit, že přesnost DEM se odvíjí od jejich prostorového rozlišení (Adeola a kol., 2017).

2.5 Globální a lokální modely

V posledních desetiletích proběhly snahy o zmapování povrchu celé planety. Výsledné globální DEM z radarového družicového snímání jsou na mnoha místech jednou z mála informací o zemském povrchu (Yamazaki a kol., 2017). Letecké laserové snímání je finančně nákladné a tento aspekt není schopna vyvážit ani jeho přesnost způsobená schopností proniknout vegetací a menší náchylností k rozptylu signálu (Hawker a kol., 2018). Proto je i vzhledem k logistickým důvodům dostupné převážně v rozvinutých zemích nebo jen pro malá území (DeWitt a kol., 2017; Yamazaki a kol., 2017). Stejně tak fotogrammetrie, která také bývá využívána jako zdroj pro „národní“ modely (Schumann a Bates, 2018), ale je přece jenom dostupnější než laserové snímání (DeWitt a kol., 2017). Výhodou globálních modelů zůstává jejich samotná globálnost, tedy jistá konzistentnost dat po celém zemském povrchu potřebná pro environmentální modelování v tomto měřítku (Farr a kol., 2007).

2.6 Vybrané modely

2.6.1 SRTM

Data pro tento globální digitální model byla získána mezi 11. a 22. únorem 2000 během mise raketoplánu (*The Shuttle Radar Topography Mission – SRTM Endeavour*). Spolupracovali na ní americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (*National Aeronautics and Space Administration – NASA*) spolu s pod současným názvem *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)*, dále Italská kosmická

agentura a Německé středisko pro letectví a kosmonautiku (*DLR – Deutschen Zentrums für Luft – und Raumfahrt*) (NASA, 2015).

Snímání povrchu, fungující na principu radarové interferometrie, bylo zajištěno dvěma systémy. Jeden snímal v pásmu C (vlnová délka 5,6 cm) a druhý v pásmu X (vlnová délka 3,1 cm). Hlavní antény byly umístěny uvnitř nákladového prostoru raketoplánu a boční byly umístěny na druhý konec 60 metrů dlouhého stožáru, tedy do volného prostoru. Snímání probíhalo mezi 60° severní (jižní cíp Grónska) a 56° jižní šířky (souostroví Ohňová země) a byl tak zajištěn pokryv cca 80 % zemského povrchu 159 oblety. Z toho bylo 99,96 % povrchu nasnímáno nejméně jedenkrát, 94,59 % nejméně dvakrát a 50 % nejméně třikrát a více. Cílem bylo nasnímání každé oblasti nejméně dvakrát ze dvou různých „úhlů pohledu“ ve snaze vyhnout se radarovému stínu (Farr a kol., 2007).

První verze modelu SRTM, respektive SRTM-C podle použitého pásma, byla uvolněna v roce 2003. V následných verzích byla data opravována v problematických oblastech. Byly vymezeny vodní plochy a příbřežní oblasti, odstraněny terénní nesrovnalosti a vyplněna prázdná místa s použitím dalších modelů. Vzniklý digitální model byl po dlouhou dobu k dispozici o rozlišení 1 úhlové vteřiny (30 metrů) pro území Spojených států a 3 úhlových vteřin (90 metrů) pro zbytek světa (NASA, 2015). V letech 2014 a 2015 byl postupně uvolněn ve vyšším zmíněném rozlišení pro celý svět (Mukul a kol., 2017). Verze SRTM-X je také k dispozici, ale v podobě 50 kilometrů širokých křížících se pásů, mezi kterými nejsou žádná data z důvodu jiného způsobu snímání (Farr a kol., 2007; DLR, 2018a).

2.6.2 TanDEM-X

Projekt TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*) vznikl ve spolupráci Německého střediska pro letectví a kosmonautiku a společnosti *Airbus Defence & Space*. Zemský povrch byl snímán radarovým signálem v pásmu X družicemi TerraSAR-X a TanDEM-X od 12. prosince 2010 do 16. ledna 2015 (Wessel, 2018).

Družice snímaly v tandemovém uspořádání obvykle ve vzdálenosti 250 až 500 metrů od sebe, kdy jedna z nich vysílala signál, který následně obě družice přijímaly zpět. Tímto způsobem byl nasnímán veškerý zemský povrch (Rizzoli a kol., 2017)

minimálně dvakrát ze stejného směru, ale z rozdílného „úhlu pohledu“. Problematické hornaté oblasti byly nasnímány také z opačného směru opět kvůli možným radarovým stínům bez dat (Wessel, 2018).

Vývoj vzniklého digitálního modelu o rozlišení 0,4 úhlové vteřiny (12 metrů) byl dokončen v září 2016. Z něj byly odvozeny modely o rozlišení 1 (30 metrů) a 3 úhlových vteřin (90 metrů) (stejně tak jako u SRTM). Poslední zmíněné rozlišení je volně k dispozici pro vědecké účely. Poskytování modelů o lepším rozlišení je omezeno z důvodu možného komerčního zneužití (DLR, 2018b).

2.6.3 DMR 5G

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) je výstupem z Projektu tvorby nového výškopisu České republiky. Vznikl ve spolupráci Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství. Skenování pásma „Střed“ proběhlo od 22. března do 10. října 2010, pásma „Západ“ od 9. března do 27. června 2012 a pásma „Východ“ v období od 8. dubna do 11. listopadu 2013.

Laserové skenování bylo prováděno ze speciálního letounu v průměrné výšce 1200 nebo 1400 metrů nad terénem v závislosti na vzrůstu vegetace. Jednotlivé bloky převážně o šířce 10 kilometrů s podobnou členitostí a v určitém rozmezí nadmořských výšek byly spojovány do bloků s délkou nanejvýš 60 kilometrů.

Vzniklé bodové mračno bylo dále upravováno vzhledem k nesterjnoměrné hustotě dat. V místech, kde nebyla data pořízena, byly hodnoty interpolovány. Jinde byly naopak ředěny (ČÚZK, 2015). DMR 5G byl dokončen 30. června 2016 na celém území České republiky a je průběžně aktualizován (ČÚZK, 2018).

3. Metodika

3.1 Popis zájmového území

Česká republika leží přibližně mezi 48° a 51° severní šířky a 12° a 19° východní délky uprostřed Evropy. Jedná se o malý stát o rozloze necelých 79 tisíc km² bez přístupu k moři. Většinu našeho území tvoří nízké vysočiny. Nížiny zaujímají pouze malou část a rozkládají se kolem velkých řek. Hlavně Labe (Polabská nížina) a Moravy (Hornomořská a Dolnomoravský úval). Pohoří se nachází většinou podél hranic na jihozápadě, západě a severu země. Mezi nejdůležitější patří Šumava, Český les, Krušné hory, Jizerské hory, Krkonoše, Orlické hory, Jeseníky a Moravskoslezské Beskydy (Cvejnová, 2003). Nejvyšším vrcholem je krkonošská Sněžka se svými 1603 m n. m. Nejnižším přirozeným bodem je výtok Labe u Hřenska ve výšce 115 m n. m. (Cvejnová, 2003; Uxa a kol., 2015). Kromě již zmíněných řek patří mezi nejvýznamnější také Vltava a Odra. Přirozená jezera nemají velký význam a nachází se ojediněle v horských oblastech. V dřívějších dobách byly budovány rozsáhlé rybníční soustavy. Nalezneme u nás také velké přehradní nádrže (Cvejnová, 2003). Česká republika patří k nejlesnatějším státům Evropy. Lesy zaujímají 34 % území. Hlavní lesní území se nachází v nadmořských výškách nad 500 m n. m., kde je dostatek srážek (Cvejnová, 2003; Ministerstvo zemědělství, 2018).

3.2 Sjedenocení souřadnicových a výškových systémů

Porovnávají budou již popsané modely SRTM a TanDEM-X vůči referenčnímu DMT. Jejich vybrané výchozí vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1. Model SRTM byl použit ve verzi 4.1 vytvořené *CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)* (Jarvis a kol., 2008).

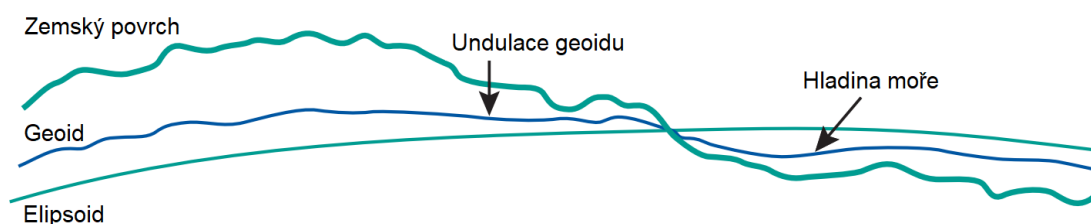
	SRTM	TanDEM-X	Referenční DMT	CLC 2018
Souřadnicový systém	WGS 84	WGS 84	S-JTSK	ETRS 1989
Výškový systém	EMG 96	WGS 84	Bpv	-
Rok(y) mapování	2000	2010 - 2015	2009 - 2013*	2017 - 2018
Poskytovatel	CGIAR CSI	DLR	ČÚZK	EEA

Tab. 1: Údaje porovnávaných modelů (* průběžně aktualizován)

Původní rozlišení referenčního DMT bylo sníženo nástrojem *Aggregate* na 90 m. Pro model SRTM i TanDEM-X byl uplatněn zpočátku stejný postup. Jednotlivé bloky byly spojeny dohromady pomocí nástroje *Mosaic to New Raster*. Následovala

změna souřadnicového systému pomocí *Project Raster* z původního WGS 84 do S-JTSK používaným v České republice. Byla zvolena bilineární metoda převzorkování s transformačním klíčem *S_JTSK_To_WGS_1984_1* a výsledná velikost buněk nastavena na 90 m. Poté bylo ze vzniklého rastru vyjmuto požadované území nástrojem *Extract by Mask*, přičemž jako šablona byl použit referenční DMT. Vůči kterému byly ořezávané rastry přichyceny, aby se zabránilo posunu buněk. Tímto byla vyřešena horizontální odlišnost použitých modelů.

Referenční DMT a stejně tak SRTM jsou vertikálně v podstatě vztaženy k mořské hladině. Výškový systém referenčního DMT je Balt po vyrovnání. SRTM je vztažen ke geoidu EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*) a jeho výšky jsou tedy také ortometrické, jak vyjadřuje obr. 6. Problém nastal u TanDEM-X, jehož výšky jsou odvozeny od elipsoidu WGS84 a bylo tedy nutné je přepočíst pomocí modelu kvazigeoidu. Ten je tvořen 1024 nivelačními body na území České republiky, pro které jsou známy s dostatečnou přesností jejich hodnoty nadmořské a také elipsoidické výšky. Ty byly interpolovány metodou univerzálního krigování do rastru o rozlišení 90 m. Vypočítaná undulace byla následně odečtena od TanDEM-X.



Obr. 6: Vztah geoidu a elipsoidu (Huisman a de By, 2009; upraveno)

3.3 Extrakce dat

Nejprve byla pomocí funkce *Raster to Point* vytvořena bodová vrstva odpovídající středům buněk referenčního DMT. Výsledných 9 752 064 bodů bylo následně použito ve funkci *Extract Multi Values to Points* jako spádová vrstva pro konkrétní hodnoty všech použitých rastrů.

Nadmořské výšky referenčního DMT byly funkcí *Reclassify* rozčleněny do deseti tříd po 100 m n. m., a to od 200 až do 1000 m n. m. a více, jak je vyjmenováno v tab. 2. Dále byla z referenčního DMT funkcí *Slope* vytvořena vrstva sklonitosti, která byla následně rozdělena pomocí *Reclassify* do pěti tříd po 5° až do 20° a více.

Vrstva lesů byla získána z CLC 2018, která byla uvedena již v tab. 1. *CORINE Land Cover*, zkráceně *CLC*, je výsledkem projektu *Copernicus* na mapování evropského krajinného pokryvu. Vzniká pod záštitou Evropské agentury pro životní prostředí (*European Environmental Agency – EEA*) v současnosti již každých šest let (EEA, 2019). Protože je rastrová verze tohoto mapování v rozlišení 100 m, byla stažena vektorová verze. Ta byla následně funkcí *Polygon to Raster* podle krajinného pokryvu zasahujícího do středu buněk převedena na rastr vhodný k potřebným analýzám. Funkcí *Extract by Mask* byl vyjmut krajinný pokryv pouze na území České republiky. Konečná vrstva ne/přítomnosti lesa vznikla pomocí funkce *Reclassify*, kdy do jedné kategorie byly zařazeny listnaté, jehličnaté a smíšené lesy a do druhé všechny ostatní druhy krajinného pokryvu.

	Rozloha (km ²)	(%)
Celé území	78 992	100
Kategorie nadmořské výšky (m)	Rozloha (km ²)	(%)
< 200	3 622	4,58
200 - 300	15 271	19,3
300 - 400	13 700	17,3
400 - 500	19 380	24,5
500 - 600	13 657	17,3
600 - 700	7 031	8,90
700 - 800	2 925	3,70
800 - 900	1 672	2,12
900 - 1000	888	1,12
1000 <	846	1,07
Kategorie sklonitosti (°)	Rozloha (km ²)	(%)
< 5	53 062	67,2
5 - 10	17 261	21,9
10 - 15	5 664	7,17
15 - 20	2 002	2,54
20 <	830	1,05
Kategorie krajinného pokryvu	Rozloha (km ²)	(%)
Bezlesí	52 993	67,1
Lesnaté oblasti	25 999	32,9

Tab. 2: Rozdělení analyzovaných vrstev do jednotlivých kategorií

Z bodové vrstvy, která přejala nadmořské výšky referenčního DMT, SRTM, TanDEM-X, kategorie sklonitosti, kategorie nadmořských výšek a údaje o ne/přítomnosti lesa byly odstraněny na první pohled nelogické hodnoty. Referenční DMT v Letovické přehradní nádrži chybně dosahoval nadmořských výšek až

1220 metrů. Proto bylo z odpovídajícího sloupce odstraněno 40 hodnot nadmořských výšek spolu s jejich kategoriemi a souvisejících 65 hodnot sklonitosti. Dále sklonitost logicky nebyla přítomna v okrajových bodech, tedy na hranicích státu, jednalo se o 21 170 hodnot. V modelu TanDEM-X je nepřítomnost dat před úpravou výškového systému označována jako -32 767, což je nejnižší možná hodnota 16bitového signum zápisu. Z Orlické přehradní nádrže byly odstraněny dvě tyto hodnoty spolu s dalšími zápornými hodnotami. Ty se dále vyskytovaly v řece Kamenici a třech dalších prudkých lesních lokalitách v Libereckém kraji včetně Krkonoš. Na záporné hodnoty v Orlické přehradní nádrži navíc navazovaly dvě neočekávaně nízké kladné hodnoty 33,9 a 45,2 metru, které byly také odstraněny. V tomto případě se celkově jednalo o 104 hodnot. Veškeré dosavadní zpracování dat bylo provedeno v programu ArcMap 10.6.1 (ESRI, 2018).

3.4 Vyhodnocení vertikální přesnosti

Pro kvantitativní analýzu vertikální přesnosti byly použity statistické ukazatele ME (*Mean Error* – střední chyba, též průměrná odchylka) a RMSE (*Root-mean-square Error* – odmocnina střední kvadratické chyby), které předpokládají normální rozdělení chyb tzn. odchylek mezi porovnávanými modely.

$$ME = \frac{1}{n} \sum (h_i - h_{ref}) = \frac{1}{n} \sum \Delta h_i$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \Delta h_i^2}$$

Přičemž n je počet hodnot, h_i výška konkrétního místa v SRTM, nebo TanDEM-X a h_{ref} je výška v referenčním DMT. Pomocí ME lze odhalit systematickou chybu, v tomto případě nad-, nebo podhodnocování modelu. Jeho nevýhodou je, že záporné a kladné odchylky se mohou navzájem anulovat. Absolutní hodnota by však znemožnila určení jejich směru. RMSE měří průměrný rozsah chyby, a protože jsou odchylky před zprůměrováním umocněny, klade toto kritérium důraz na velké hodnoty. Výsledné odchylky u obou těchto ukazatelů jsou ve stejné jednotce jako vstupní hodnoty a ideálním výsledkem je nula (Hanel a Vizina, 2014).

Někteří autoři (Höhle a Höhle, 2009) doporučují použití dalších chybových kritérií. Byl proto vybrán medián \tilde{h} (50% kvantil) rozdělující soubor na poloviny a NMAD (*Normalized Median Absolute Deviation* – normalizovaná mediánová absolutní odchylka), která jako výchozí bod uvažuje právě medián. Normalizace MAD spočívá v přenásobení měřítkovou konstantou c , která je pro normální rozdělení rovna 1,4826 (Hanel a Vizina, 2014).

$$NMAD = 1,4826 \text{ medián } (|\Delta h_i - \tilde{h}|)$$

Tato kritéria nejsou ovlivněna odlehlými hodnotami a jsou nezávislejší na rozdělení dat. Dále bývá doporučováno „podívat se na data“ například prostřednictvím histogramů (Höhle a Höhle, 2009). Zmíněná statistická analýza dat byla provedena v programu R 3.6.0 (R Core Team, 2019). Kvalitativní analýza byla provedena vizuálním porovnáním mapových výstupů, výšek v určitém rozmezí vynesných ve formě bodových grafů a vybraném podélném profilu.

4. Výsledky

4.1 Základní charakteristiky přesnosti

V tab. 3 jsou uvedeny výškové rozsahy jednotlivých modelů. SRTM i TanDEM-X nadhodnocují průměr, a to o 3,6, respektive 5,3 metru. Směrodatnou odchylkou jsou si oba porovnávané modely velice podobné a liší se pouze o 0,1 metru. Nejnižší naměřené místo v referenčním modelu je ve výšce 40,50 m n. m. v lomu Bílina. V modelu SRTM je to o 8,50 metru výše na stejné lokalitě. Stejně tak TanDEM-X, ale o -2,14 metru níže. Nejvyšší naměřené místo, Sněžku, na které se také modely shodly, oba podobně podhodnocují. SRTM o -16 a TanDEM-X o -17 metrů.

	Referenční DMT	SRTM	TanDEM-X
Průměr	447,9	451,5	453,2
Směrodatná odchylka	180,2	182,4	182,3
Nejnižší hodnota	40,50	49,00	38,36
Nejvyšší hodnota	1598	1582	1581

Tab. 3: Výškové rozsahy modelů

Spodní mez rozsahu odchylek od referenčního DMT se u obou modelů po zanedbání extrémních odlehlých hodnot příliš neliší, jak vyjadřuje tab. 4. U TanDEM-X je to -121,2 metru a v SRTM ještě o -1,6 metru nižší hodnota. Nejvyšší odchylka je v TanDEM-X 131,3, ale v SRTM 156,7 metru. V tomto směru vypadá již výrazněji lépe TanDEM-X.

	SRTM	TanDEM-X
Nejnižší hodnota	-122,8	-121,2
Nejvyšší hodnota	156,7	131,3

Tab. 4: Rozsah odchylek

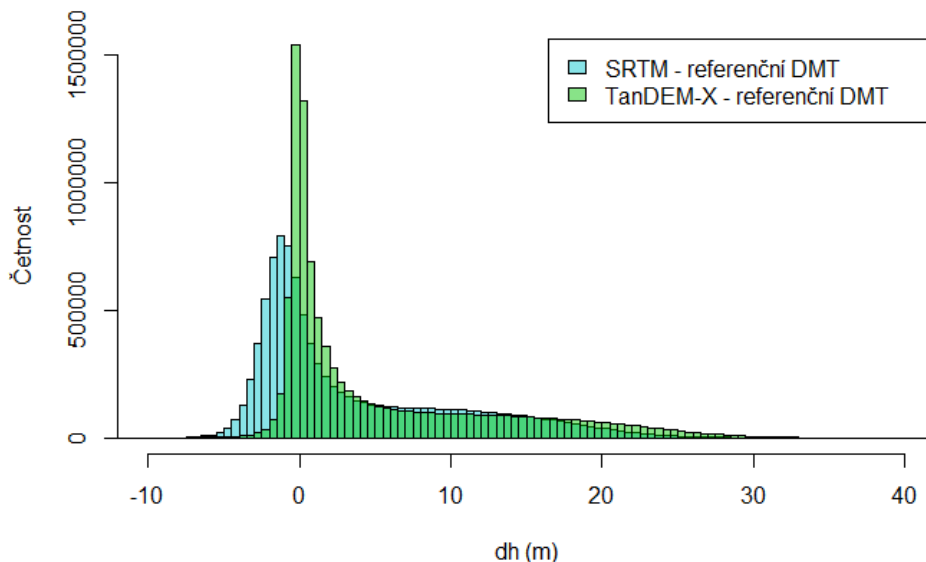
4.2 Chybová kritéria celého území

Z vyhodnocení ME a RMSE celého území vychází lépe model SRTM. Jeho ME je o -1,69 metru nižší než u TanDEM-X. Přesto oba modely podle tohoto kritéria nadhodnocují, jak je patrné z tab. 5. RMSE je u SRTM také nižší, a to o -1,38 metru. Medián je vyšší u TanDEM-X o 0,83 metru. Naproti tomu SRTM vykazuje NMAD vyšší o 1,21 metru.

Celé území				
	ME	RMSE	Medián	NMAD
SRTM	3,59	7,85	0,57	3,99
TanDEM-X	5,28	9,23	1,43	2,78

Tab. 5: Chybová kritéria celého území

Pokud jsou ale rozdíly obou modelů vůči referenčnímu DMT vyneseny do histogramu, vyplyne z toho situace znázorněná na obr. 7. U obou modelů se vyskytuje tzv. pravý ocas, který tvoří relativně malé množství velkých kladných odchylek. Více je jimi zatížen TanDEM-X. Navíc model SRTM je schopen kladné odchylky vyrovnat těmi zápornými, jak ukazuje ME, ale i medián. Naproti tomu je vyšší jeho NMAD. Vizuálně vychází jako přesnější (ve smyslu shodnosti) a správnější (zde ve smyslu blízkosti nule) TanDEM-X.



Obr. 7: Histogram odchylek SRTM a TanDEM-X od referenčního DMT

4.3 Vliv nadmořské výšky

ME u modelů SRTM i TanDEM-X shodně roste spolu s výškou, jak lze vyčíst ze souhrnné tab. 6 a příslušného grafu v příloze 1, s výjimkou poslední souhrnné kategorie. V kategorii do 200 metrů ME modelu SRTM dosahuje 0,15 a v té následují 0,55 metru. Průměrná hodnota odchylek v TanDEM-X je vyšší ve všech kategoriích. Nejvyšších hodnot dosahují oba modely v kategoriích od 800 do 900 metrů a od 900 do 1000 metrů. A to 8,19, respektive 8,56 metru model SRTM a 10,3, respektive 10,4 metru model TanDEM-X. Až v poslední kategorii se hodnoty ME obou modelů přiblíží, kdy SRTM vykazuje chybovost 6,75 a TanDEM-X 6,96 metru.

RMSE vychází v nadmořských výškách do 200 metrů lépe u TanDEM-X o -0,32 metru. V následujících kategoriích dosahuje nižších hodnot opět SRTM. U obou modelů má RMSE vzrůstající charakter spolu s výškou s výjimkou druhé kategorie od 200 do 300 metrů, kdy u SRTM poklesne o -1,11 metru a u TanDEM-X o -0,05 metru. Tato kategorie vykazuje také nejnížší chybovost. Nejvyšších hodnot stejně jako u ME dosahují kategorie od 800 do 900 metrů a od 900 do 1000 metrů. Chybovost SRTM je zde 10,9, respektive 11,0 metru a TanDEM-X 13,0, respektive 13,1 metru. Podobné hodnoty dosahuje TanDEM-X také v předcházející kategorii. V poslední souhrnné kategorii nad 1000 metrů RMSE klesá.

		Kategorie nadmořské výšky (m)			
		ME	RMSE	Medián	NMAD
< 200	SRTM	0,15	6,10	-1,09	2,09
	TanDEM-X	2,26	5,78	0,36	0,89
200 - 300	SRTM	0,55	4,99	-0,80	2,04
	TanDEM-X	2,48	5,73	0,36	1,03
300 - 400	SRTM	2,76	7,03	0,23	3,36
	TanDEM-X	4,53	8,31	1,17	2,42
400 - 500	SRTM	3,96	7,90	0,89	4,21
	TanDEM-X	5,48	9,39	1,58	3,09
500 - 600	SRTM	4,76	8,72	1,67	5,31
	TanDEM-X	6,17	10,2	2,14	3,91
600 - 700	SRTM	6,53	10,1	4,69	8,52
	TanDEM-X	8,17	12,1	5,33	8,11
700 - 800	SRTM	7,62	10,7	6,75	8,87
	TanDEM-X	9,77	13,0	8,65	10,6
800 - 900	SRTM	8,19	10,9	7,77	8,85
	TanDEM-X	10,3	13,0	9,48	9,85
900 - 1000	SRTM	8,56	11,0	8,22	7,97
	TanDEM-X	10,4	13,1	9,61	8,91
1000 <	SRTM	6,75	9,20	6,59	6,81
	TanDEM-X	6,96	9,96	5,58	6,79

Tab. 6: Vývoj chybových kritérií spolu s nadmořskou výškou

Medián dosahuje u SRTM nejnížší hodnoty -1,09 metru v první kategorii pod 200 metrů. V následující kategorii také dosahuje záporné hodnoty, a to -0,80 metru. Medián TanDEM-X v obou počátečních kategoriích je 0,36 metru. U obou modelů dochází k pozvolnému nárůstu až do kategorie od 500 do 600 metrů, za kterou již medián roste prudčeji. V předposlední kategorii dosáhnou oba modely svých nejvyšších hodnot. SRTM 8,22 a TanDEM-X 9,61 metru. Poslední souhrnná kategorie opět znamená pokles, ve kterém si SRTM pohorší oproti TanDEM-X o 1,01 metru.

NMAD zpočátku kopíruje vývoj mediánu s tím rozdílem, že lepších hodnot dosahuje TanDEM-X. A to 0,89 a 1,03 metru v prvních dvou kategoriích. Prudký nárůst opět nastává za kategorií od 500 do 600 metrů, za kterou NMAD modelu SRTM vzrůstá o 3,21 metru. Obdobně TanDEM-X, který nejvyšší hodnoty dosahuje v kategorii od 700 do 800 metrů, a to 10,6 metru. Zde také vrcholí NMAD modelu SRTM s 8,87 metry, o 0,02 více než v té následující. Následuje pokles a v poslední souhrnné kategorii se oba modely potkávají. SRTM zde vykazuje NMAD 6,81 metru a TanDEM-X o -0,02 menší.

V příloze 2 je uvedena sada histogramů jednotlivých kategorií nadmořských výšek. Patrná je snižující se přesnost obou modelů v podobě klesajícího poměru hodnot okolo nuly a nárůst zatížení tzv. pravým ocasem. Tím je ale více zatížen TanDEM-X, naproti tomu v poslední kategorii lze z příslušného histogramu snadno vyčíst nárůst jeho přesnosti. Patrné je v této kategorii také snížení zatížení velkými odchylkami u obou modelů.

4.4 Vliv sklonitosti

S narůstající sklonitostí roste ME u obou modelů, jak je patrné z tab. 7 a příslušného grafu v příloze 3. SRTM opět vykazuje lepší hodnoty a nejnižší chybovosti dosahuje v kategorii do 5 stupňů, a to 1,90 metru. TanDEM-X zde také dosahuje své nejnižší hodnoty, a to 3,51 metru. Nejvyšších hodnot dosahuje poslední kategorie nad 20 stupňů. SRTM 11,9 a TanDEM-X 14,3 metru.

Vývoj RMSE je obdobný jako u ME. Nejnižší hodnota SRTM 6,13 metru je v kategorii do 5 stupňů. Stejně tak TanDEM-X s 7,25 metry. Nejvyšší hodnoty jsou v kategorii nad 20 stupňů. Pro SRTM 14,2 a pro TanDEM-X 17,1 metru.

Medián roste spolu se sklonitostí a je nižší u modelu SRTM. V kategorii do 5 stupňů je záporný s -0,35 metry. TanDEM-X zde dosahuje mediánu 0,55 metru. Nejvyšší hodnoty se vyskytují v poslední souhrnné kategorii. Model SRTM 12,0 metru a TanDEM-X o 2,4 metru vyšší.

V prvních dvou kategoriích je NMAD vyšší u modelu SRTM, poté se situace obrací. Nejnižší hodnoty vykazuje TanDEM-X v první kategorii, a to 1,41 metru. NMAD také roste spolu se sklonitostí, ale s mírným poklesem mezi 15 a 20 stupni.

V poslední kategorii dosahují oba modely svých nejvyšších hodnot. Model SRTM 7,97 metru a TanDEM-X o 1,58 metru více.

		Kategorie sklonitosti (°)			
		ME	RMSE	Medián	NMAD
< 5	SRTM	1,90	6,13	-0,35	2,49
	TanDEM-X	3,51	7,24	0,55	1,41
5 - 10	SRTM	5,63	9,39	3,68	7,27
	TanDEM-X	7,32	10,9	4,48	6,82
10 - 15	SRTM	9,24	11,9	8,92	8,17
	TanDEM-X	11,3	14,0	10,7	9,61
15 - 20	SRTM	11,3	13,4	11,2	7,60
	TanDEM-X	13,6	16,0	13,4	9,00
20 <	SRTM	11,9	14,2	12,0	7,97
	TanDEM-X	14,3	17,1	14,4	9,55

Tab. 7: Vývoj chybových kritérií spolu se sklonitostí

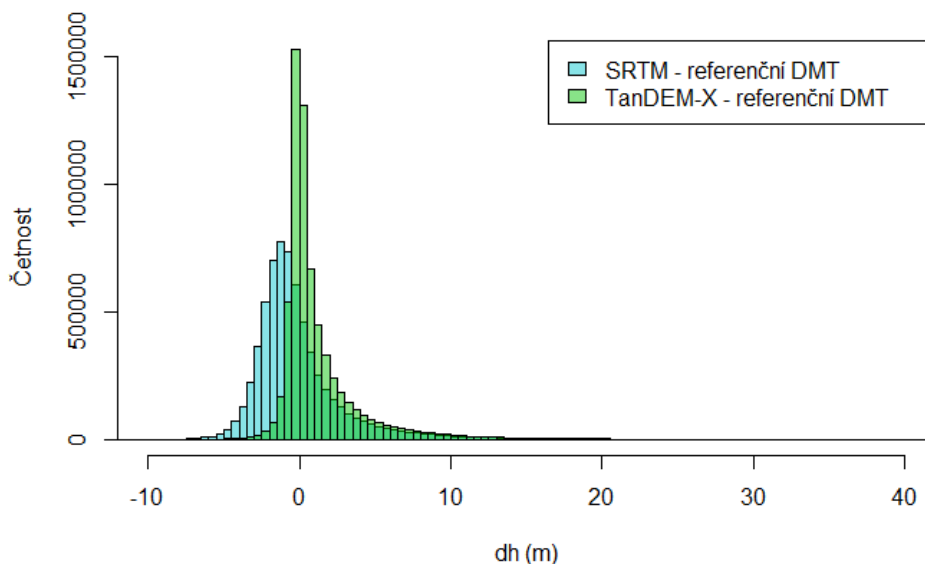
V příloze 4 je opět uvedena příslušná sada histogramů. V prvních dvou kategoriích sklonitosti je patrná zaměřenost obou modelů okolo nuly, která je ve třetí kategorii patrná ještě v případě TanDEM-X. Postupně také u obou modelů znovu narůstá množství velkých kladných odchylek, kterými je znovu méně zatíženo SRTM. Histogramy postupně přebírají tvar takřka normálního rozdělení, které je patrné také z přiblížení se hodnot ME a mediánu u obou modelů.

4.5 Vliv krajinného pokryvu

ME v bezlesí u SRTM dosahuje takřka nulové hodnoty -0,00220 metru a TanDEM-X 1,26 metru, jak lze vidět v tab. 8. RMSE je naproti tomu v případě TanDEM-X nižší o -0,46 metru. Medián SRTM je záporný, a to -0,76 metru. Blíže nule je ale TanDEM-X s 0,29 metry, což je patrné i z histogramu na obr. 8. Rovněž NMAD je nižší u TanDEM-X, který je ale stále zatížen větším množstvím kladných odchylek.

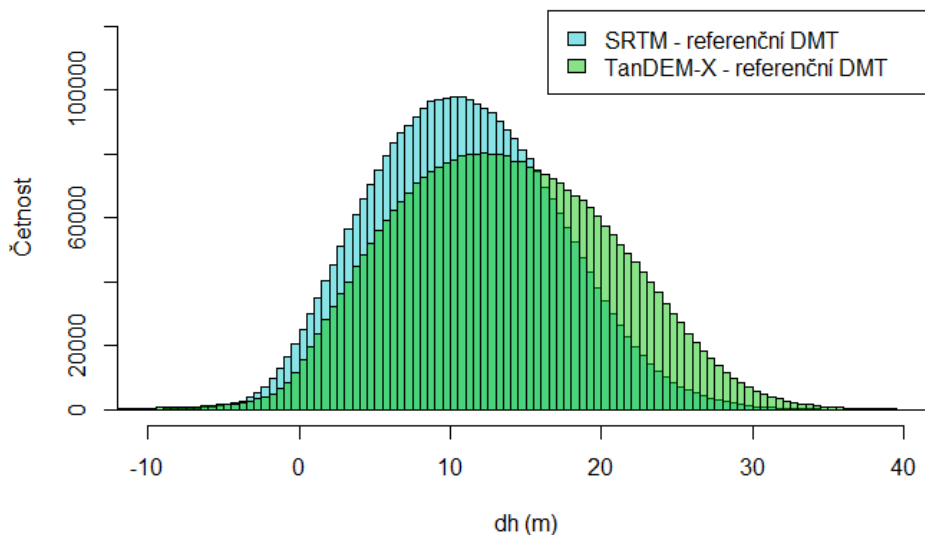
		Kategorie krajinného pokryvu			
		ME	RMSE	Medián	NMAD
Bezlesí	SRTM	-0,00220	3,84	-0,76	2,49
	TanDEM-X	1,26	3,38	0,29	1,41
Lesy	SRTM	10,9	12,5	10,7	7,27
	TanDEM-X	13,5	15,4	13,2	6,82

Tab. 8: Chybová kritéria v závislosti na ne/přítomnosti lesa



Obr. 8: Histogram odchylek SRTM a TanDEM-X od referenčního DMT v bezlesí

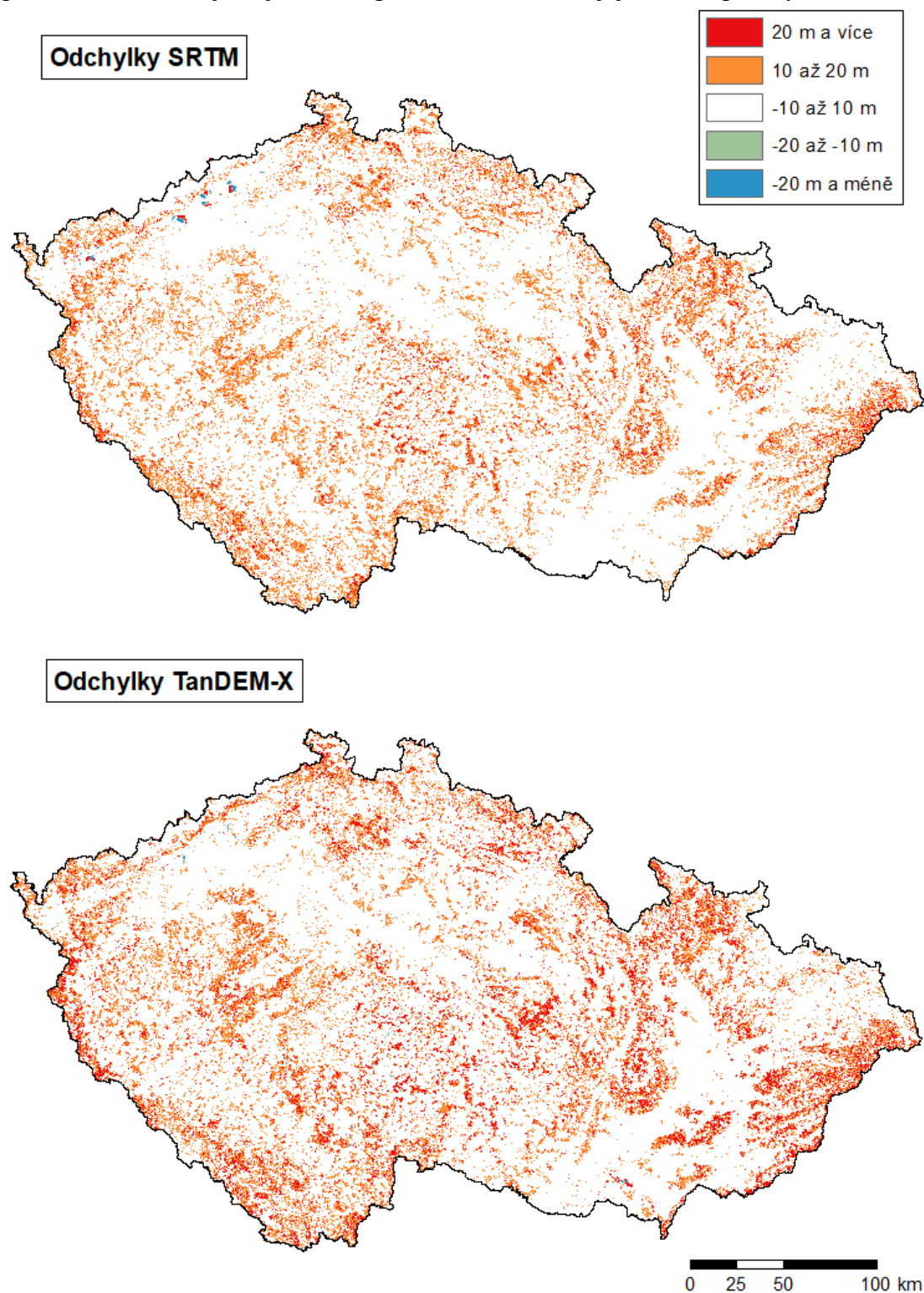
Přítomnost lesa u obou modelů zvyšuje chybovost. V lesních oblastech se ME zvyšuje u SRTM na 10,9 a u TanDEM-X na 13,5 metru. Stejně tak RMSE dosahuje u modelu SRTM lepších hodnot oproti TanDEM-X. Medián a NMAD také jak lze usuzovat rovněž z příslušného histogramu na obr. 9. Na něm je dokonce patrné normální rozdělení, které lze vypočítat u obou modelů už z přiblížení se hodnot ME a mediánu.



Obr. 9: Histogram odchylek SRTM a TanDEM-X od referenčního DMT v lesních oblastech

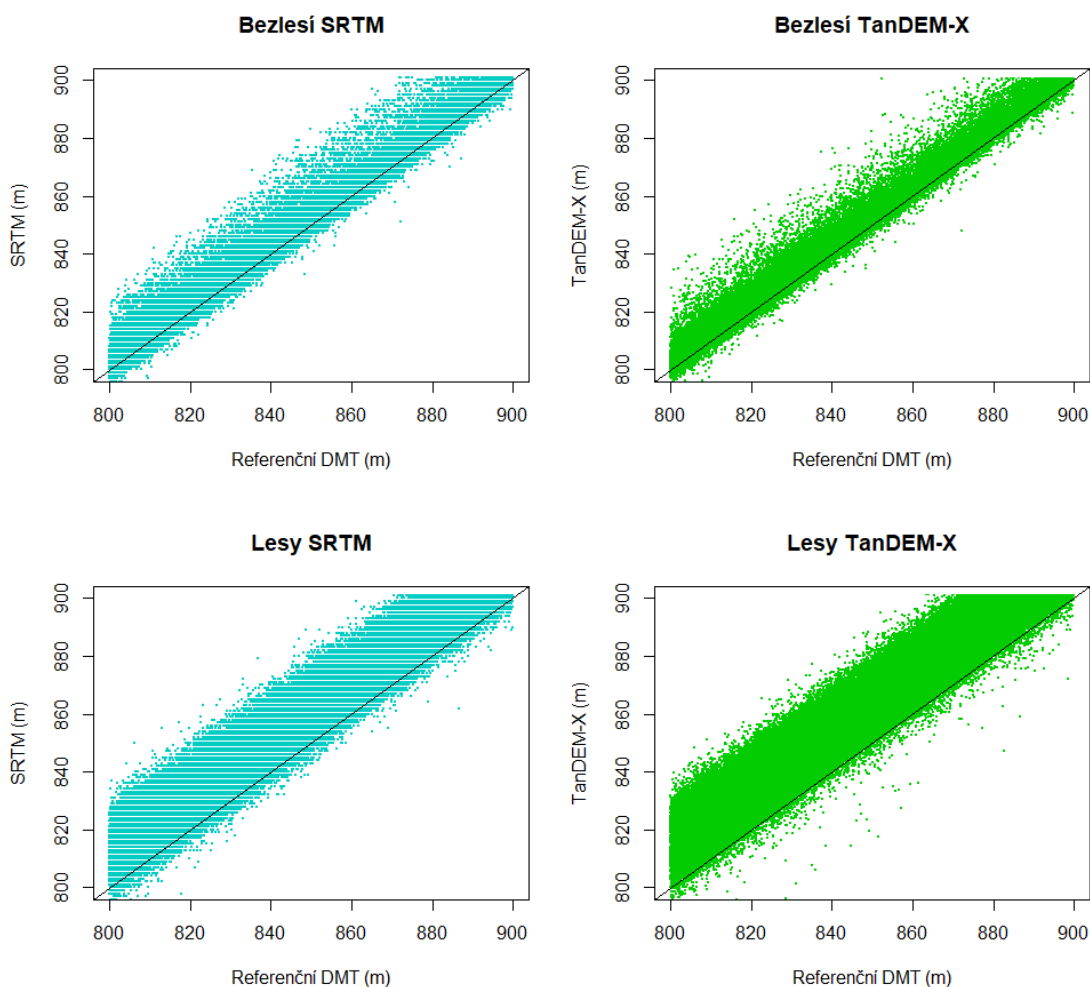
4.6 Vizuální porovnání

Dle kvalitativní analýzy provedené na mapových výstupech nadhodnocují oba modely ve stejných oblastech, jak lze spatřit na obr. 10. Převážně se jedná se o lesní oblasti po celém státě, přičemž znatelně více nadhodnocuje TanDEM-X. Po překrytí odchylek právě vrstvou lesů, jako je tomu v příloze 5, se ukážou jejich další příčiny.



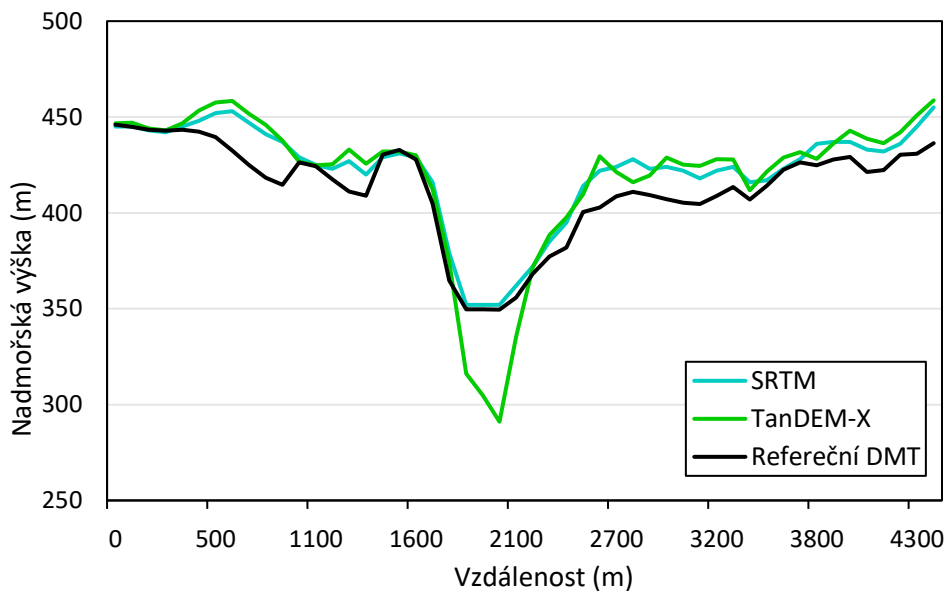
Obr. 10: Rozdíly SRTM a TanDEM-X vůči referenčnímu DMT

Chyby v lesních oblastech dále doplňují přechodová stadia lesa a křovin (jedna z kategorií dle původní vrstvy CLC), jak lze nejlépe spatřit v CHKO Jeseníky v příloze 6. Nadhodnocení je rovněž patrné v hlavním městě Praze vlivem nezahrnutí kategorie plochy městské zeleně do lesních oblastí. Vyšší chybovost zde také způsobuje rozsáhlá městská zástavba rozeznatelná v příloze 7. Díky rozdílu v čase mapování referenčního DMT a SRTM je zachycen pohyb výsypek z těžby hnědého uhlí v Sokolovské a Mostecké pánvi. V menší míře je tento jev patrný také z rozdílu referenčního DMT oproti TanDEM-X, jak lze porovnat také v příloze 8. Ten má na rozdíl od předešlého modelu problémy ve vodních plochách, kde silně nadhodnocuje, ale místy naopak podhodnocuje. Nejpatrnější je tento jev u přehradních nádrží Nové Mlýny na jihu Moravy, v jejichž okolí se nachází relativně málo vegetace. Detailnější pohled je uveden v příloze 9.



Obr. 11: Porovnání výšek SRTM a TanDEM-X v určitém rozmezí v závislosti na ne/přítomnosti lesa vůči referenčnímu DMT

Z vynesení jednotlivých výšek v rozsahu 800 až 900 metrů modelů SRTM, nebo TanDEM-X ve formě bodů vůči referenčnímu DMT lze rozpoznat předcházející poznatky. Oba modely výrazně nadhodnocují v lesních oblastech. TanDEM-X neznatelně více, naproti tomu v bezlesí je zaměřenější. TanDEM-X má v obou případech více odlehlých hodnot. Dále model SRTM ztelněji konstantně podhodnocuje, jak si lze povšimnout na lineárním porovnání modelů na obr. 11.



Obr. 12: Podélný profil vybrané lokality

Na obr. 12 je letecký snímek již zmiňované Orlické přehradní nádrže. Červená čára znázorňuje podélný profil, který je dále rozepsán ve formě grafu. Oba modely nadhodnocují v lesních částech. Naproti tomu v bezlesí se přibližují referenčnímu DMT. TanDEM-X se na dně nádrže propadá až o -58,4 metru.

5. Diskuze

5.1 Celé území

Co se týče území jako celku vychází v této práci oproti referenčnímu DMT z laserového snímání ve většině použitých chybových kritérií jako přesnější model SRTM ($RMSE_{SRTM} = 7,86$; $RMSE_{TanDEM-X} = 9,23$ m). Jak již bylo vysvětleno na příslušném histogramu, rozložení dat svědčí svým způsobem ve prospěch TanDEM-X, ale pro porovnání s dalšími studiemi není tato metoda příliš vhodná. Opravená verze SRTM zkoumaná v této práci byla sice uvolněna již v roce 2008, ale dokončená verze TanDEM-X teprve v roce 2016. Není tedy k dispozici závratné množství studií zabývajících se druhým zmíněným modelem, natož srovnávajících je mezi sebou.

SRTM bylo hodnoceno na různorodých lokalitách. V členité horské krajině indické části Himaláje (Mukherjee a kol., 2013) vycházela chybová kritéria při porovnání s fotogrammetrickým DMP mnohem výrazněji ($RMSE_{SRTM} = 17,76$ m) než v této práci. Hodnoty bližší nule ($RMSE_{SRTM} = 9,20$ m) autoři zaznamenali při porovnání s body z DGPS měření, které ale byly získány v umírněnějších částech zájmového území. V Alžírsku a Tunisku jiní autoři (Athmania a Achour, 2014) také v porovnání s DGPS měřením došli k nižším chybovým kritériím ($RMSE_{SRTM} = 3,6$ m) na lokalitě s mírným terénem a bez vegetace tentokrát v porovnání s lokalitou opačného charakteru ($RMSE_{SRTM} = 8,3$ m). Na území Austrálie (Rexer a Hirt, 2014), jejíž terén není obecně příliš členitý ani zalesněný a opět v porovnání s DGPS body vyšla chybová kritéria také nízká ($RMSE_{SRTM} = 4,5$ m).

Srovnání SRTM a TanDEM-X o rozlišení 30 metrů proběhlo na několika brazilských lokalitách (Grohman, 2018). Chybová kritéria SRTM autorovi vycházela podstatně hůře ($RMSE_{SRTM} = 3,11$ až $8,24$ m; $ME_{SRTM} = -4,89$ až $-0,26$ m) než v případě TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 0,98$ až $7,15$ m; $ME_{TanDEM-X} = -0,02$ až $0,08$ m). Jako problematické se ale v případě této studie nabízí použití TanDEM-X o vysokém rozlišení, tedy 12 metrů, jako referenčního modelu vůči jeho další verzi a zcela odlišnému modelu. Modely SRTM a TanDEM-X o rozlišení 90 metrů však byly nedávno navzájem porovnávány vůči DMT z laserového snímání na vybraných údolních nivách po celém světě (Hawker a kol., 2019). TanDEM-X zde také vykazoval celkově lepší výsledky ($RMSE_{TanDEM-X} = 3,10$ m) oproti SRTM ($RMSE_{SRTM} = 3,91$ m).

Další studie (Wessel a kol., 2018) hodnotila TanDEM-X o rozlišení 12 metrů. V porovnání s DGPS body vycházel velmi dobře ($RMSE_{TanDEM-X} = 1,29$ m; $ME_{TanDEM-X} = -0,17$ m), ale dle autorů měření dostatečně nereprezentovala rozmanitost terénu. Proto vybrali tři lokality, k nimž si obstarali digitální výškové modely. Lokalita v Jihoafrické republice převážně klidnějšího rázu pokrytá nevýraznou vegetací a s DMT z laserového snímání analogicky nevykazovala nijak výrazné hodnoty chybových kritérií ($RMSE_{TanDEM-X} = 6,79$ m; $ME_{TanDEM-X} = 0,27$ m). Zalesněná hornatá lokalita v Německu také ne ($RMSE_{TanDEM-X} = 3,80$ m; $ME_{TanDEM-X} = -0,79$ m), ale data pro její DMP byla naskenována na jaře před olistěním stromů. Japonská lokalita rovněž s výrazným terénem a vegetací vyšla dle autorů poněkud hůře ($RMSE_{TanDEM-X} = 6,18$ m; $ME_{TanDEM-X} = 3,79$ m), a to údajně z důvodu fotogrammetrického původu DMP, ale její výsledky se velmi podobaly této práci.

Na výsledných hodnotách chybových kritérií se tedy podílí více faktorů, které již byly nastíněny v rešerši. Kromě původu referenčních dat samozřejmě hlavně záleží na vlastnostech samotného území, jestli je například schopno případné výrazné lokální odchylky vykompenzovat a celkové hodnocení modelu bude tedy dobré. Právě proto jsou vhodná vizuální hodnocení pro zjištění skutečného stavu a členění území právě dle nadmořské výšky, sklonu a ne/přítomnosti vegetace. Přičemž je třeba mít na vědomí, že se také ovlivňují navzájem.

5.2 Vliv nadmořské výšky

Spolu s nadmořskou výškou narůstaly zpravidla také hodnoty chybových kritérií modelu SRTM ($RMSE_{SRTM} = 6,10; 4,99$ až $11,01; 9,20$ m), tak i TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 5,78; 5,73$ až $13,13; 9,96$ m). Dalším autorům (Mukherjee a kol., 2013) chybová kritéria SRTM narůstala spolu s každou další kategorií ($RMSE_{SRTM} = 7,11$ až $26,05$ m). Jejich zájmové území však pouze místy přesahovalo 900 m n. m. Mnohem vyšší hodnoty chybových kritérií oproti této práci lze opět vysvětlit členitějším himalájským terénem. Podobný vývoj zaznamenali v Austrálii (Rexer a Hirt, 2014) také u SRTM ($RMSE_{SRTM} = 4,19$ až $15,06$ m), ale opět s jinak zvolenou poslední souhrnnou kategorií, a to nad 800 m n. m. Navíc opět jak již bylo zmíněno, australský terén a také krajinný pokryv jsou poněkud specifické.

Právě krajinný pokryv totiž pravděpodobně způsobuje vylepšení přesnosti SRTM a TanDEM-X v poslední souhrnné kategorii nad 1000 m n. m. S rostoucí nadmořskou výškou sice roste množství srážek, ale klesá teplota. To způsobuje ubytěk vzrostlé vegetace, která tak již neomezuje radarové paprsky. Skokový nárůst chybových kritérií za kategorií od 500 do 600 m n. m. může naopak způsobovat výskyt hlavních lesních území od této nadmořské výšky (Cvejnová, 2003).

5.3 Vliv sklonitosti

Hodnoty chybových kritérií narůstaly také spolu se sklonitostí ($RMSE_{SRTM} = 6,13$ až $14,19$ m; $RMSE_{TanDEM-X} = 7,24$ až $17,09$ m). Stejný jev zaznamenalo mnoho autorů, jak v případě SRTM, tak i TanDEM-X s tím, že se obecně hodnoty v jednotlivých studiích navzájem lišily v závislosti na náročnosti terénu (Mukherjee a kol., 2013; Grohman, 2018; Wessel a kol., 2018; Hawker a kol., 2019). Sklon sám o sobě ztěžuje snímání radarovými paprsky (Moreira a kol., 2013; Yamazaki a kol., 2017). Vliv vegetace zde může být do určité míry zanedbán, protože lesní porost se převážně vyskytuje v rovinném až mírně sklonitém terénu.

Ve studii také srovnávající oba modely o rozlišení 90 metrů (Hawker a kol., 2019) autorům vycházela vyšší odmocnina střední kvadratické chyby u SRTM ($RMSE_{SRTM} = 3,61$ až $7,40$ m) oproti TanDEM-X ($RMSE_{TanDEM-X} = 2,92$ až $6,42$ m). Což je v rozporu s výsledky této práce, ale zmíněná studie neposkytuje dostatek informací pro jeho zdůvodnění.

5.4 Vliv krajinného pokryvu

Co se týče již několikrát zmiňované vegetace, v mnoha studiích se ukázalo, že její přítomnost snižuje přesnost radarového snímání. V případě Himaláje (Mukherjee a kol., 2013) si autoři zabývající se SRTM povšimli na základě vizuálního porovnání přítomnosti kladných odchylek v hornatých částech zájmového území porostlých vegetací. Naopak záporné odchylky se nacházely v otevřené krajině s ostatními kategoriemi krajinného pokryvu. Rovněž na území Austrálie (Rexer a Hirt, 2014) vycházela chybová kritéria SRTM vyšší v lesních oblastech ($RMSE_{SRTM} = 5,20$ m) než v bezlesí ($RMSE_{SRTM} = 3,43$ m). Tito autoři na základě svých výsledků konstatovali, že vyjadřuje spíše zemský povrch než terén. Stejně tak kladné směřování

odchylek na území Alžírsko a Tunisko (Athamania a Achour, 2014) bylo vysvětleno rozdílem vůči DGPS terénnímu měření a SRTM byl označen jako DMP. Oficiálně je přitom SRTM označen jako digitální výškový model (Farr a kol., 2007; NASA, 2015). Ve zprávě k němu vydané je však upozornění na nedostatečný průnik vegetací pro reprezentaci pouze terénu (Farr a kol., 2007).

Jiným autorům (Wessel a kol., 2018), kromě chybových kritérií vyšších v lesních oblastech ($RMSE_{TanDEM-X} = 1,84$ m) než v oblastech s nižší vegetací ($RMSE_{TanDEM-X} = 1,12$ m), při srovnání TanDEM-X a DGPS měření, vyšla po vizuálním porovnání najevo podobná situace jako v této práci. Po odečtení od referenčního DMT na jedné z lokalit kladné odchylky odpovídaly vegetaci a městské zástavbě. Již v úvodu studie autoři označovali TanDEM-X spíše jako DMP a tuto skutečnost opakovali také v závěru. Podobný poznatek je však uváděn již v dokumentaci samotného modelu (Wessel, 2018). S upozorněním na opačný problém, a to na skutečnost, že místo odrazu se nachází ve vrchní části koruny vegetace, a ne na ní samotné. Jako DMP je také TanDEM-X definován v „datovém průvodci“ na oficiálních stránkách poskytovatelské organizace (DLR, 2018b). Přitom ujasnění, jestli daný model (včetně referenčního) vyjadřuje terén, nebo povrch, je ve studiích důležité pro interpretaci výsledků.

V úvodu studie srovnávající SRTM a TanDEM-X v Brazílii autor (Grohman, 2018) tyto digitální výškové modely výslovně označoval jako DMP. Stejně tak další autoři (Hawker a kol., 2019), kteří dále upozorňovali na skutečnost, že výšky v obou modelech odpovídají „odraznému povrchu“ daných pásem. V jejich studii jim v bezlesí ($RMSE_{SRTM} = 2,99$ m; $RMSE_{TanDEM-X} = 2,04$ m), ale i v zalesněných oblastech ($RMSE_{SRTM} = 6,04$ m; $RMSE_{TanDEM-X} = 5,68$ m) vyšel jako přesnější model TanDEM-X. Povšimli si také zatížení modelu větším množstvím velkých kladných odchylek oproti SRTM. Na nich má pravděpodobně velký podíl právě vegetace. Protože jak již bylo vysvětleno v rešerši, pásmo C více proniká vegetací než pásmo X, ale na úkor celkové přesnosti. V lesních oblastech vykazoval SRTM lepší výsledky ale v této práci ($RMSE_{SRTM} = 12,5$ m; $RMSE_{TanDEM-X} = 15,4$ m). Tuto skutečnost bylo možné vypožorovat už z chybových kritérií a příslušného histogramu, ale také z lineárního porovnání modelů a vybraného podélného profilu. Naopak v bezlesí si lépe vedl TanDEM-X ($RMSE_{SRTM} = 3,84$ m; $RMSE_{TanDEM-X} = 3,38$ m) navzdory již zmiňovanému zatížení.

5.5 Úpravy modelů

Při porovnávání s TanDEM-X je třeba vzít na vědomí, že se jedná o nekorigovanou verzi, jak se ostatně uvádí v „datovém průvodci“ na oficiálních stránkách organizace poskytující tento model. Může tedy zahrnovat mimo jiné odlehle hodnoty a prázdná místa. Důležitá je ale zejména zmínka o „oblastech šumu“ právě ve vodních plochách, na strmých svazích a v lokalitách s hustou vegetací (DLR, 2018b). Minimálně v případě pro TanDEM-X problematických vodních ploch by bylo možné jednu z přídatných vrstev (*Water Indication Mask*) použít k odvození „vodní masky“, která by normalizovala jejich hodnoty. Případně letos byla vydána TanDEM-X vrstva krajinného pokryvu znázorňující lesy, bezlesí, sídla a vodní plochy, byť o rozlišení 50 metrů (DLR, 2019). Naopak daná verze SRTM je již čtvrtá v pořadí a dostupná pouze sama o sobě.

V budoucnu pravděpodobně bude k dispozici také korigovaná verze TanDEM-X. Ať už uvolněná DLR nebo zpracovaná jinou odbornou skupinou. V případě verze SRTM o rozlišení 90 metrů byla některými autory (O’Loughlin a kol., 2016) dokonce do určité míry globálně odstraněna vegetace a kromě ní v jiné studii (Yamazaki a kol., 2017) také šum, ať už náhodný nebo systematický, a místy konstantní vertikální posun způsobený nedostatkem kontrolních bodů. Bylo by podnětné na území České republiky porovnat přesnost také těchto korigovaných verzí. Stejně tak verzí SRTM a TanDEM-X o vyšším rozlišení 30 metrů. Případně verze SRTM-X pro další vyhodnocení vlivu vegetace na různá pásma radarového snímání a jako další referenční model použít DMP.

6. Závěr

V této práci byla hodnocena přesnost globálních modelů SRTM a TanDEM-X o rozlišení 90 metrů na území České republiky. Ve srovnání s lokálním DMT vykazoval lepší výsledky model SRTM ($RMSE_{SRTM} = 7,85$ m; $RMSE_{TanDEM-X} = 9,23$ m). Vytvořené histogramy odhalily zatížení obou modelů velkými kladnými odchylkami. Více jimi byl zatížen TanDEM-X. Model SRTM je byl schopen kompenzovat zápornými odchylkami, zato pík modelu TanDEM-X byl výrazně koncentrován v oblasti nuly. Porovnávaná verze TanDEM-X byla uveřejněna teprve v roce 2016 a na rozdíl SRTM nebyla zkorigována. Je zde tedy prostor pro zvýšení přesnosti TanDEM-X.

Spolu s nárůstem nadmořské výšky docházelo ke změnám hodnot chybových kritérií u obou modelů. Se sklonitostí hodnoty chybových kritérií vzrůstaly. Krajinný pokryv, odvozený z vrstvy CORINE Land Cover, ovlivňoval přesnost obou modelů. Přičemž v lesních oblastech docházelo k jejímu snížení. Modely SRTM i TanDEM-X lze na základě výsledků této práce, ale i jiných autorů, označit jako DMP z důvodu omezeného pronikání daných radarových pásem vegetací. V bezlesí se zvyšovala přesnost obou modelů, přičemž přesnější zde byl model TanDEM-X. Dle mapových výstupů, které byly součástí vizuální analýzy, většina kladných odchylek obou modelů odpovídala lesním oblastem.

7. Literatura

Adeola F. O., Jolaade O., Adeyemi O., 2017: An Assessment of Digital Elevation Model for Geospatial Studies: A Case Study of Alawa Town, Niger State, Nigeria. *Ife Research Publications in Geography*, Vol. 15, p. 31-51.

Andersen H.-E., McGaughey R. J., Carson W. W., Reutebuch S. E., Mercer B., Allan J., 2004: A comparison of forest canopy models derived from LIDAR and INSAR data in a Pacific Northwest conifer forest. 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, Dresden, p. 211-17.

Athmania D., Achour H., 2014: External Validation of the ASTER GDEM2, GMTED2010 and CGIAR-CSI-SRTM v4.1 Free Access Digital Elevation Models (DEMs) in Tunisia and Algeria. *Remote Sensing* Vol. 6, p. 4600-20.

BeiDou Navigation Satellite System, 2018: System (online) [cit. 2019-10-01], dostupné z <<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>>.

Brůha L., 2017: Modely prostorových dat v GIS: od 2D k 3D. *Geografické rozhledy*, r. 26, č. 4., s. 18-19.

ČÚZK, 2015: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G). Praha, 12 s.

ČÚZK, 2018: Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) (online) [cit. 2019-03-14], dostupné z <[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(xyaqregnggnlgmbjdy ytbfs4\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(xyaqregnggnlgmbjdy ytbfs4))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)>.

ČÚZK, 2019: Síť permanentních stanic GNSS České republiky (online) [cit. 2019-10-02], dostupné z <<http://czepos.cuzk.cz/>>.

Cvejnová J., 2003: Co chcete vědět o České republice. Univerzita Karlova v Praze, Praha, 158 s.

DeWitt J. D., Warner T. A., Chirico P. G., Bergstresser S. A., 2017: Creating high-resolution bare-earth digital elevation models (DEMs) from stereo imagery in an area of densely vegetated deciduous forest using combinations of procedures designed for lidar point cloud filtering. *GIScience & Remote Sensing*, Vol. 54, No. 4, p. 552-72.

Dixon M., Uddameri V., 2016: GIS and Geocomputation for Water Resource Science and Engineering. John Wiley & Sons, Hoboken, 540 p.

DLR, 2018a: SRTM X-SAR Digital Elevation Models. Cologne, 3 p.

DLR, 2018b: The TanDEM-X 90m Digital Elevation Model (online) [cit. 2019-03-12], dostupné z <<https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90>>.

DLR, 2019: Global TanDEM-X forest map is available (online) [cit. 2019-12-03], dostupné z <https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2019/02/20190506_globale-tandem-x-waldkarte-verfuegbar.html>.

DroneDeploy: Digital Terrain Model – DTM (online) [cit. 2019-02-12], dostupné z <<https://support.dronedeploy.com/docs/digital-terrain-model>>.

EEA, 2019: CORINE Land Cover (online) [cit. 2019-03-21], dostupné z <<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>>.

Elkhrachy I., 2017: Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. Ain Shams Engineering Journal, Vol. 9, No. 4, p. 1807-17.

ESRI (Environmental System Research Institute), 2019: ArcGIS Desktop: Release 10.6.1. Redlands.

European GNSS Agency, 2018: FAQ (online) [cit. 2019-10-01], dostupné z <<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/faq>>.

Farghaly D., Elba E., Urban B., 2016: Towards Sustainable Land Uses within the Elbe River Biosphere Reserve in Lower Saxony, Germany by Means of TerraSAR-X Images. Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol. 4, No. 3, p. 97-121.

Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., 2007: The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, Vol. 45, No. 2, 33 p.

Florinsky I. V., 2016: Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology (2nd edition). Elsevier, Amsterdam, 486 p.

Gallant J., 2011: Adaptive smoothing for noisy DEMs. In: Hengl T., Evans I. S., Wilson J. P., Gould M. (eds.): *Geomorphometry 2011*, International Society for Geomorphometry, Redlands, p. 37-40.

Ghilani Ch. D., Wolf P. R., 2012: *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics* (13th edition). Pearson, London, 984 p.

Grohman C. H., 2018: Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 212, p. 121-133.

Hanel M., Vizina A., 2014: *Metody vyhodnocování vodohospodářských dat*, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 141 s.

Hawker L., Bates P., Neal J., Rougier J., 2018: Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 6, Art. 233, 9 p.

Hawker L., Neal J., Bates P., 2019: Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 232, 15 p.

Höhle J., Höhle M., 2009: Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 64, No. 4, p. 398-406.

Horský J., Horský P., 2010: Vyjadřování výsledků měření. *Elektro*, r. 19, č. 12, s. 6-9.

Huisman O., de By R. A., 2009: *Principles of Geographic Information Systems: An introductory textbook* (4th ed.). The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, 540 p.

Hutchinson M. F., Gallant J. C., 1999: Representation of terrain. In: Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. (eds.): *Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, p. 105-24.

Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E., 2008: Hole-filled SRTM for the globe Version 4 (online) [cit. 2019-03-21], dostupné z: [<https://cgiaresci.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>](https://cgiaresci.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/).

Karan E. P., Sivakumar R., Irizarry J., Guhathakurta S., 2014: Digital Modeling of Construction Site Terrain Using Remotely Sensed Data and Geographic Information Systems Analyses. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 140, No. 3, 12 p.

Kokaly R. F., Clark R. N., Swayze G. A., Livo K. E., Hoefen T. M., Pearson N. C., Wise R. A., Benzel W. M., Lowers H. A., Driscoll R. L., Klein A. J., 2017: USGS Spectral Library Version 7. U.S. Geological Survey, Reston, 61 p.

Lewicka K., Siemion P., Kurcok P., 2015: Chemical Modifications of Starch: Microwave Effect. *International Journal of Polymer Science*, Vol. 2015, 10 p.

Li Z., Zhu Q., Gold Ch., 2005: *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*. CRC Press, Boca Raton, 318 p.

Ministerstvo zemědělství, 2018: Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2017. Praha, 118 s.

Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K. P., 2013: A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, Vol. 1, No. 1, p. 6-43.

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*, Vol. 21, p. 205-17.

Mukul M., Srivastava V., Jade S., Mukul M., 2017: Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. *Scientific Reports*, Vol. 7., 10 p.

Musa Z. N., Popescu I., Mynett A., 2015: A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 9, p. 3755-69.

NASA, 2015: *The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide*. 17 p.

Nelson A., Reuter H. I., Gessler P., 2009: DEM Production Methods and Sources In: Hengl T., Reuter H. I. (eds.): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, p. 65-85.

Norheim R. A., Queija V. R., Haugerud R. A., 2002: Comparison of LIDAR and INSAR DEMS with dense ground control. In: *Proceedings of the ESRI 2002 User Conference, San Diego, 9 p.* (online) [cit. 2019-03-09], dostupné z <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc02/pap0442/p0442.htm>>.

O'Loughlin F. E., Paiva R. C. D., Durand M., Alsdorf D. E., Bates P. D., 2016: A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 182, p. 49-59.

Ouchi K., 2013: Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. *Remote Sensing*, Vol. 5, No. 2, p. 716-807.

Pike R. J., Evans I. S., Hengl T., 2009: *Geomorphometry: A Brief Guide* In: Hengl T., Reuter H. I. (eds.): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, p. 3-30.

Podobnikar T., 2009: Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, Vol. 2, No. 2, 10 p.

R Core Team, 2019: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<http://www.R-project.org>>.

Ramešová L., Mattas D., 2010: Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí: Nežádoucí jevy v procesu kalibrace a jejich eliminace. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 80 s.

Rexer M., 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*, Vol. 63, No. 5, p. 599-609.

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. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 132, p. 119-39.

Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., Goldstein R. M., 2000: Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 3, p. 333-82.

Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., 2013: *GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals and Algorithms*. ESA Communications, Noordwijk, 225 p.

Schumann G. J.-P., Bates P. D., 2018: The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 6, 5 p.

Steuer H., Schäffler U., Gross A., 2011: Detection of standing water bodies in Lidar-data. *Proceedings of Earth Observations of Global Changes 2011*, p. 1-4.

Tang G., Strobl J., Gong J., Zhao M., Chen Z., 2001: Evaluation on the accuracy of digital elevation models. *Journal of Geographical Sciences* Vol. 11, No. 2., p. 209–16.

Uxa T., Křížek M., Mida P., 2015: Relativní výšková členitost reliéfu. *Geografické rozhledy*, r. 24, č. 4, s. 22-3.

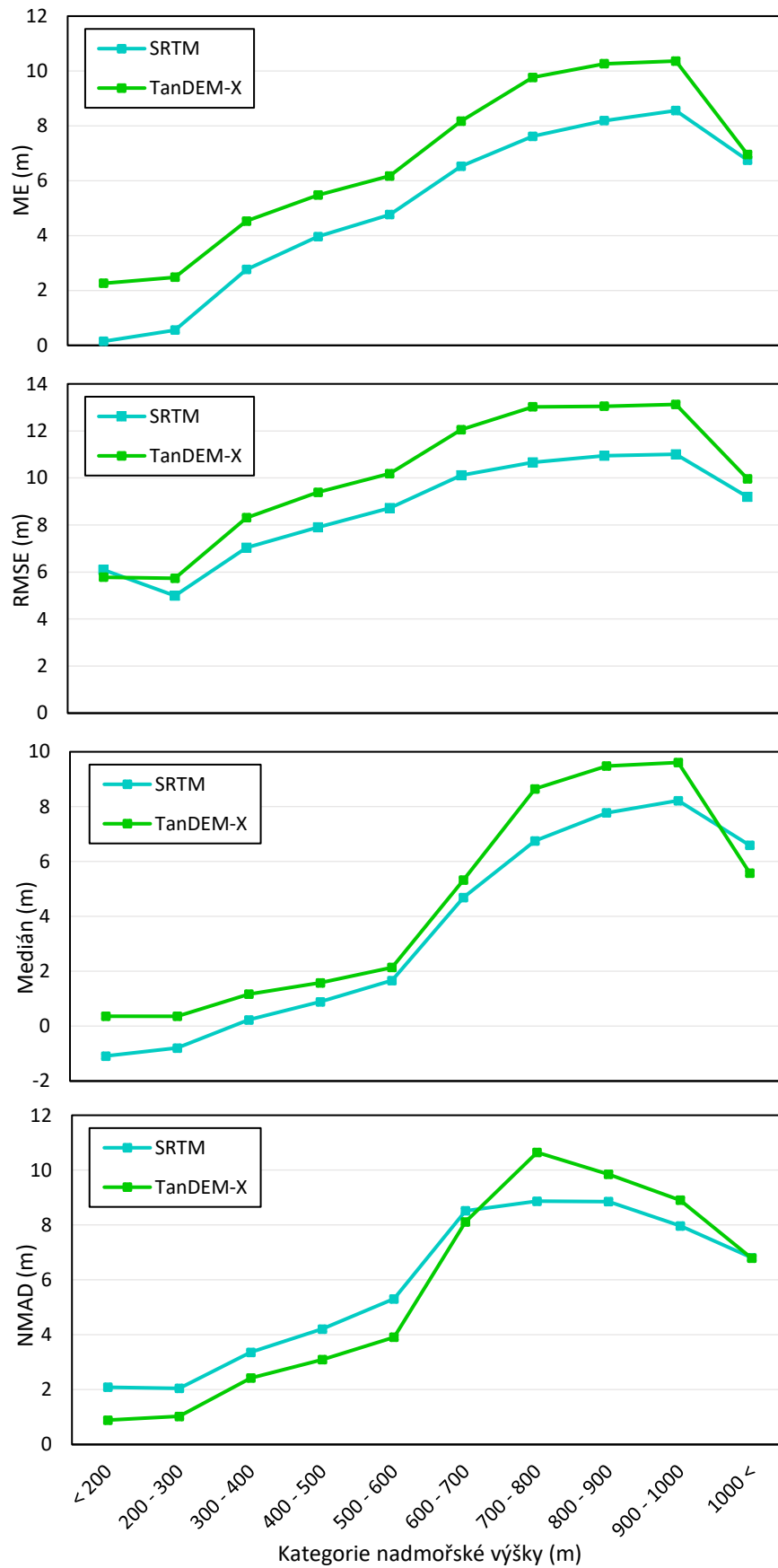
Wessel B., 2018: *TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document*. DLR, Cologne, 49 p.

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. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 139, p. 171-182.

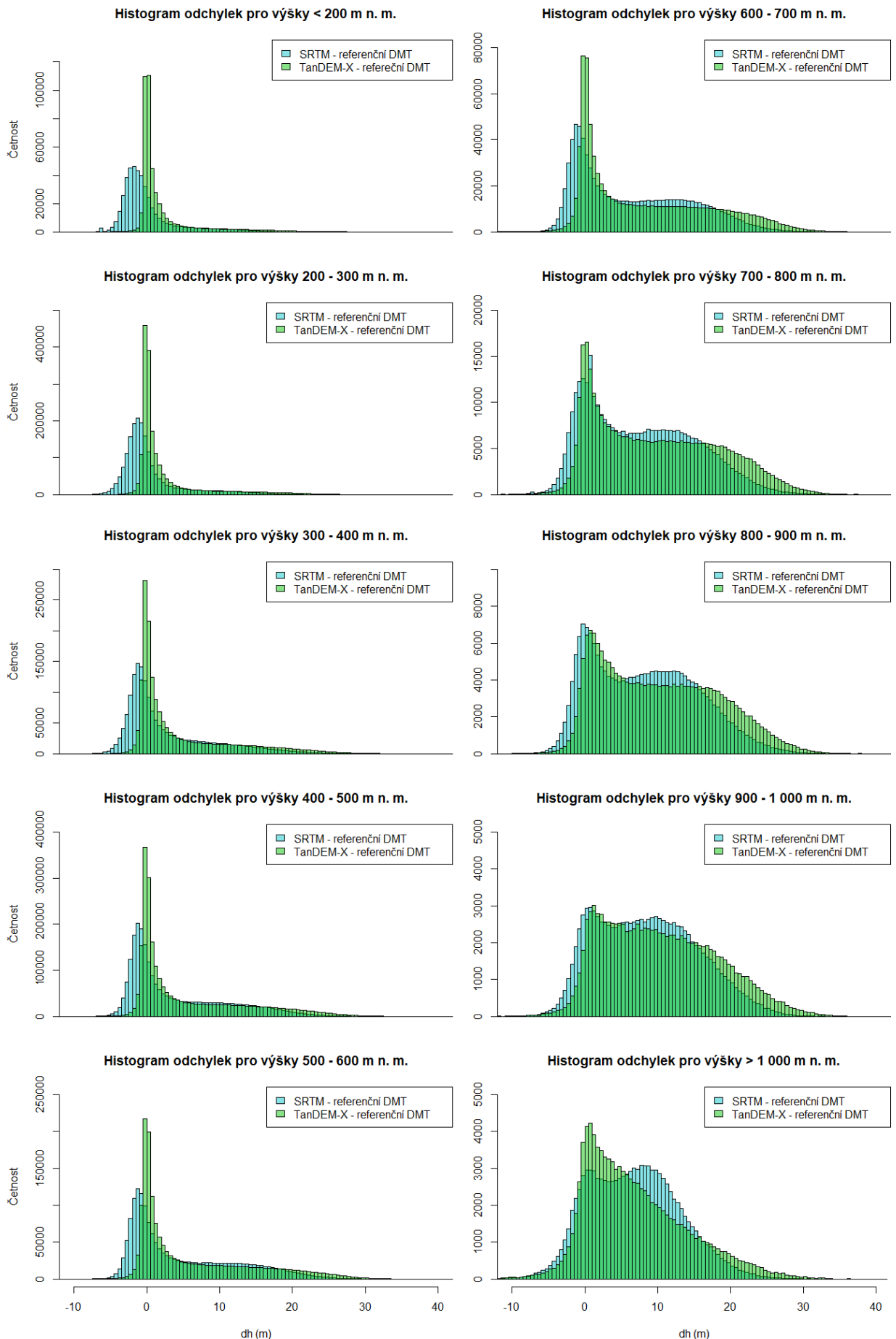
Wise S., 2000: Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, Vol. 14, No. 11-12, p. 1909-29.

Yamazaki D., Ikeshima D., Tawatari R., Yamaguchi T., O'Loughlin F., Jeffery C. N., Sampson C. C., Kanae S., Bates P. D., 2017: A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 11, p. 5844-53.

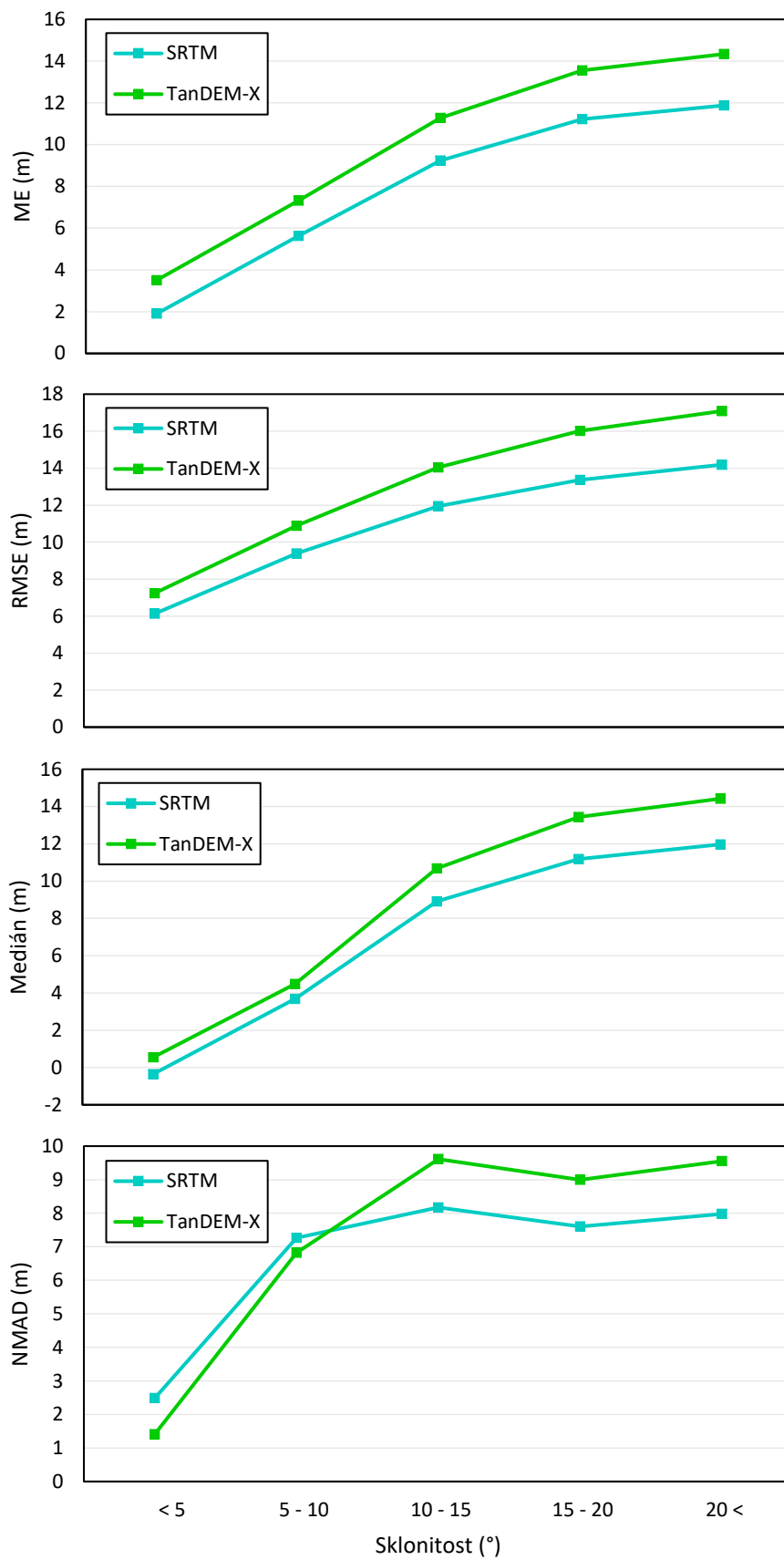
8. Přílohy



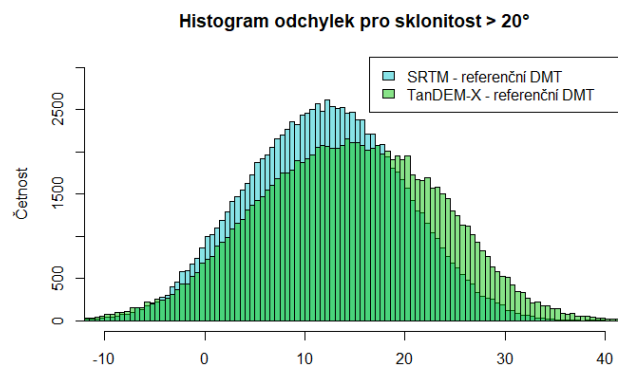
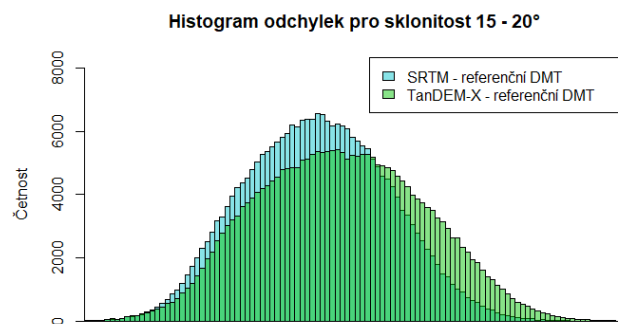
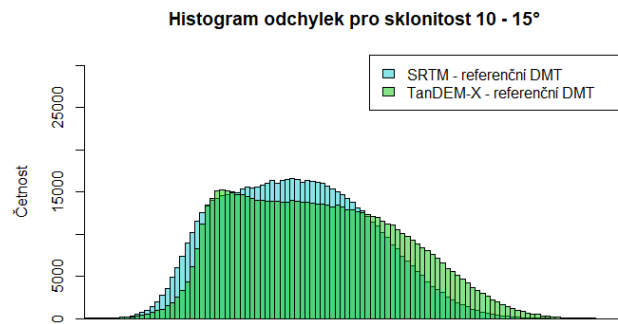
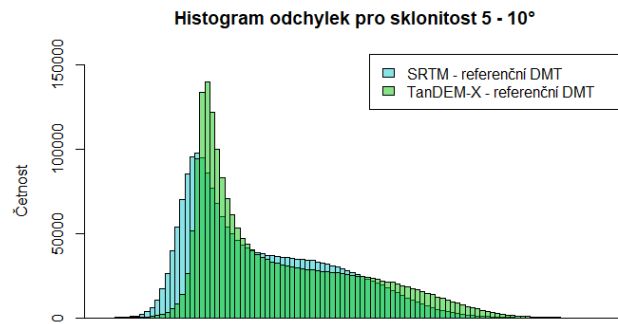
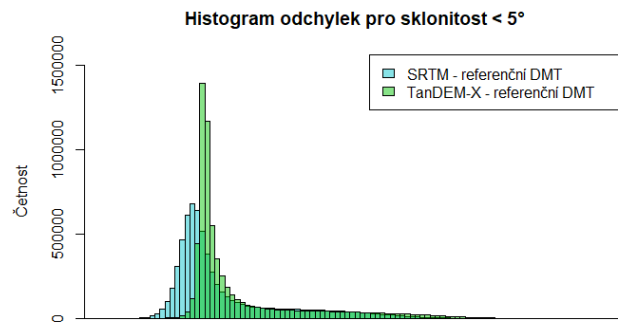
Příloha 1: Vývoj chybových kritérií spolu s nadmořskou výškou v grafické podobě



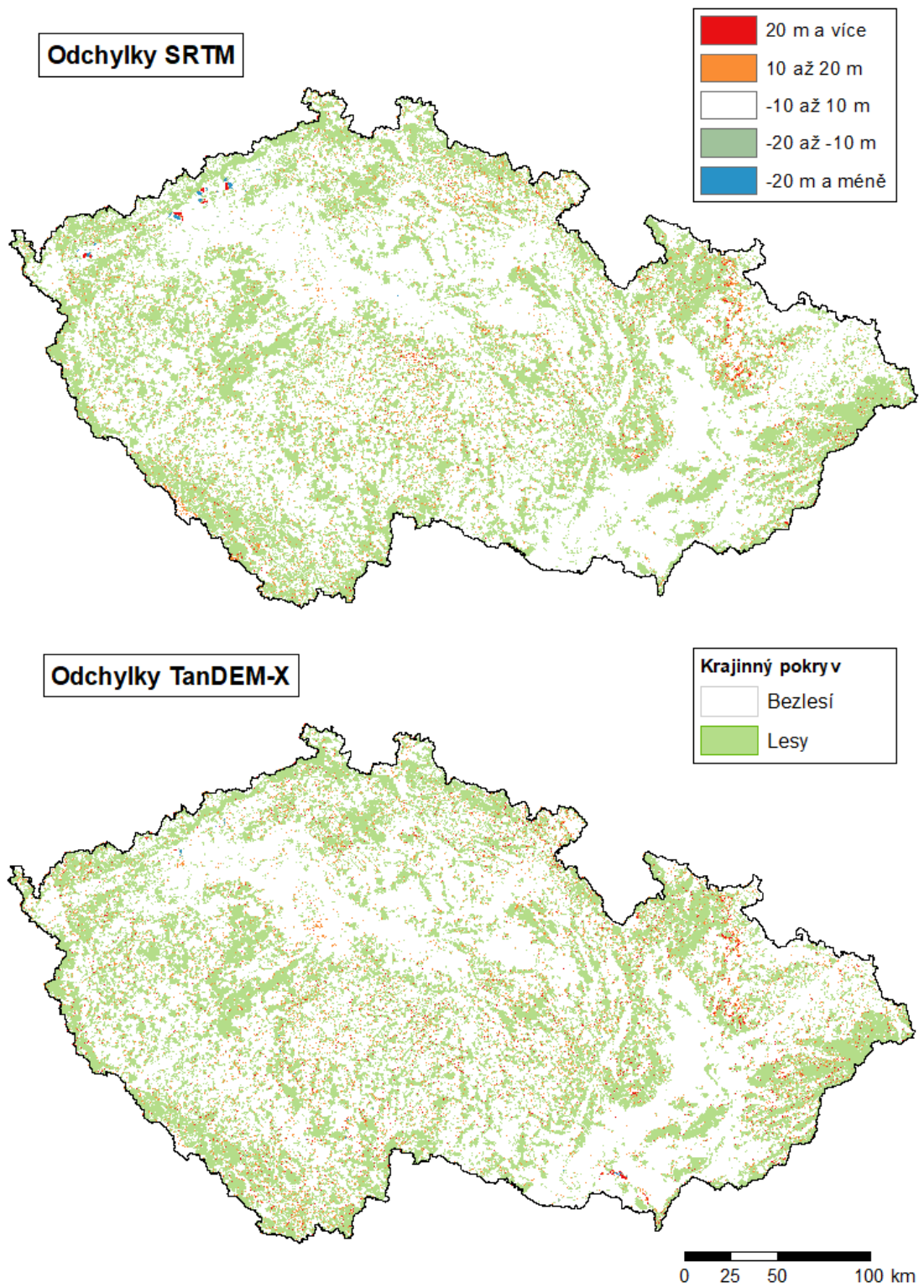
Příloha 2: Histogramy odchylek v jednotlivých kategoriích nadmořských výšek



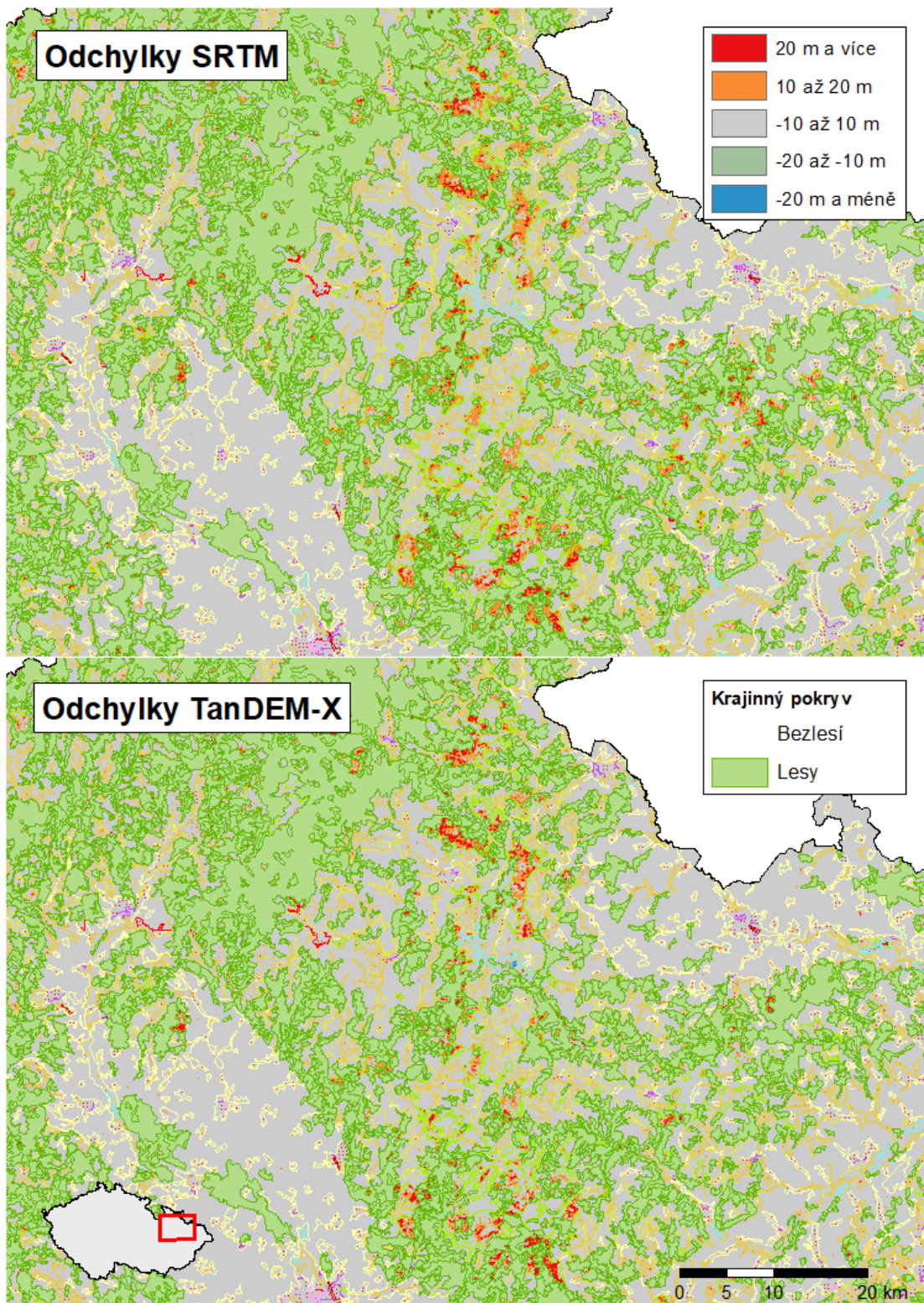
Příloha 3: Vývoj chybových kritérií spolu se sklonitostí v grafické podobě



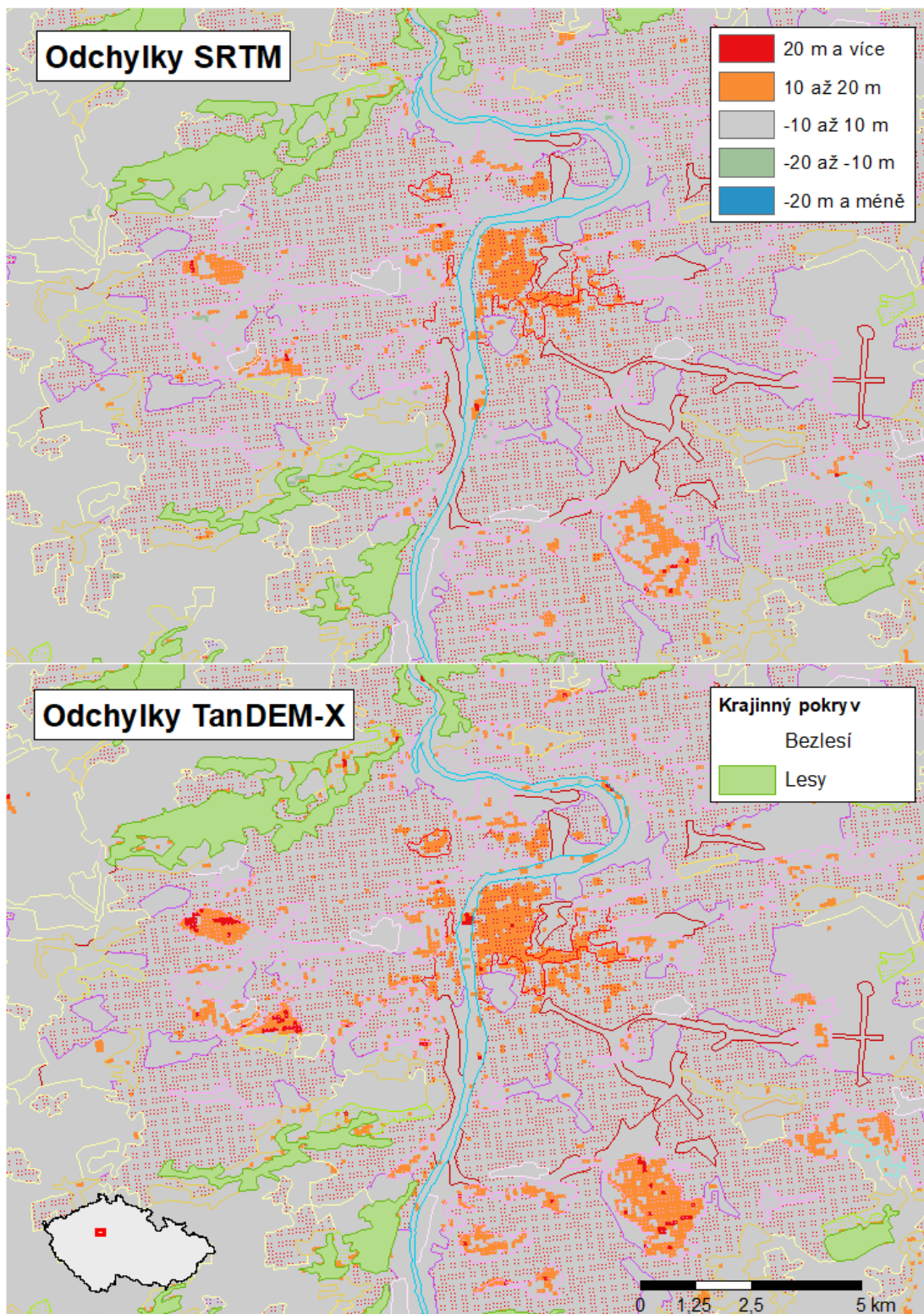
Příloha 4: Histogramy odchylek v jednotlivých kategoriích sklonitosti



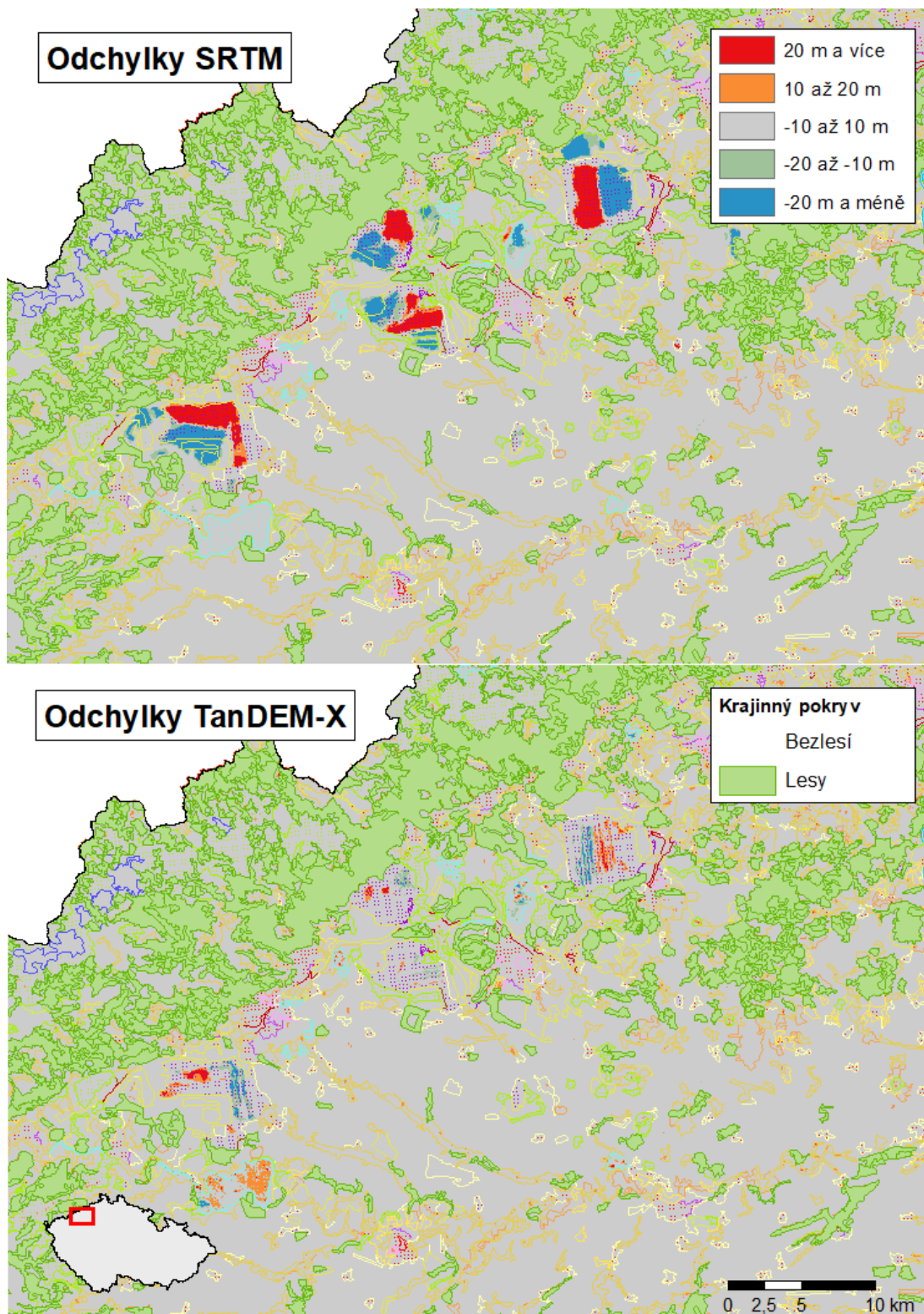
Příloha 5: Rozdíly SRTM a TanDEM-X vůči referenčnímu DMT spolu s vrstvou lesů



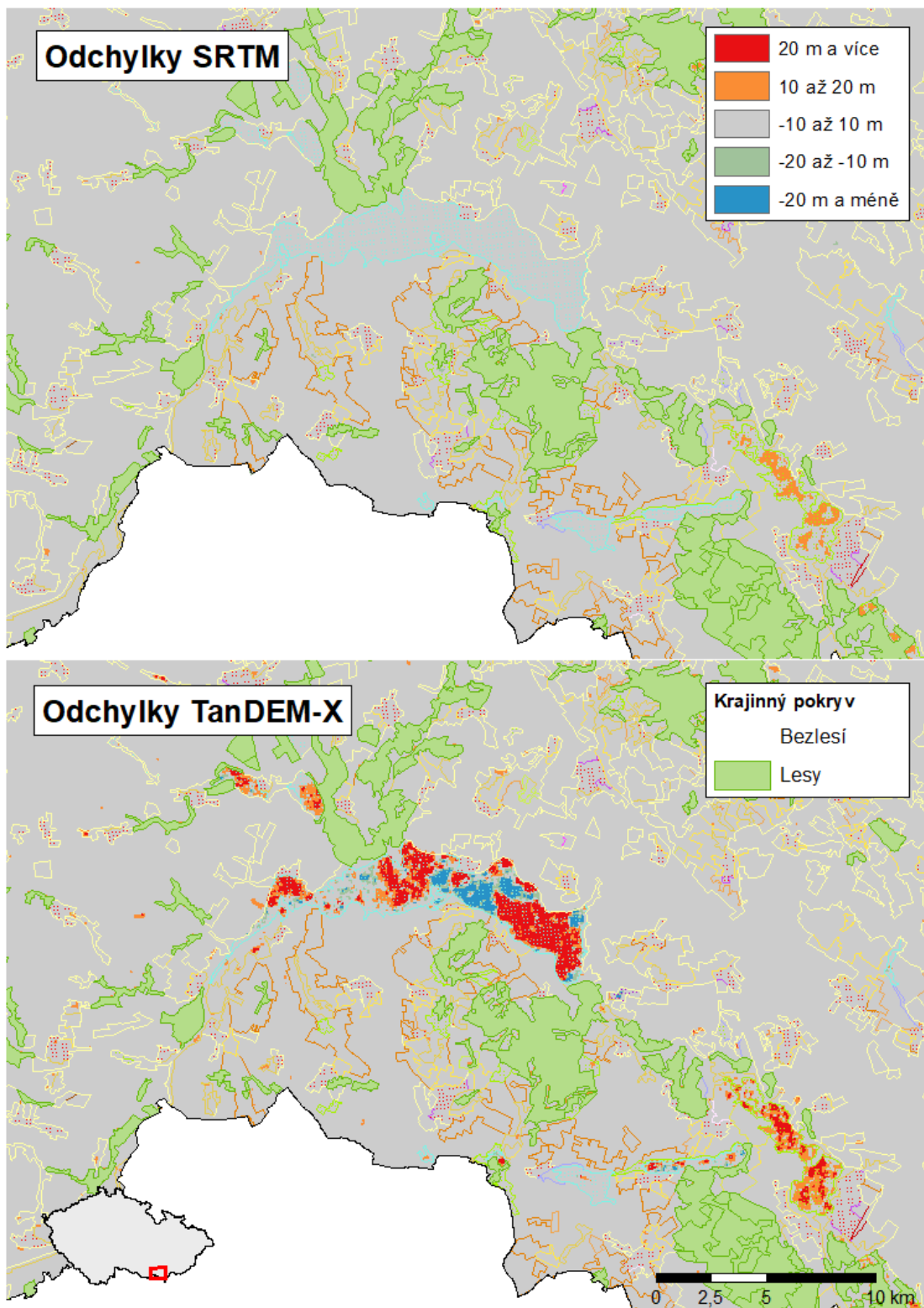
Příloha 6: Lokální výrazné odchylky – CHKO Jeseníky



Příloha 7: Lokální výrazné odchylky – hlavní město Praha



Příloha 8: Lokální výrazné odchylky – lomy v Mostecké pánvi



Příloha 9: Lokální výrazné odchyly – přehradní nádrže Nové Mlýny