

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

**Zhodnocení přesnosti TanDEM-X DEM ve vysokohorském
prostředí**

Diplomová práce

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

Diplomant: Bc. Petra Pracná

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Petra Pracná

Zemědělská specializace
Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

Zhodnocení přesnosti TANDEM-X DEM ve vysokohorském prostředí

Název anglicky

Accuracy assessment of TANDEM-X in a high mountain environment

Cíle práce

Cílem práce je posoudit kvalitu TanDEM-X DEM v horském prostředí. Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

Metodika

Digitální modely terénu (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, který je nyní předmětem validace. 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 vybrané vysokohorské lokalitě a vyhodnotí, které parametry mají vliv na přesnost modelu.

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Gdulová, K., Marešová, J. and Moudrý, V., 2020. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sensing of Environment*, 241, p.111724.
- 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.
- Hawker, L., Neal, J. and Bates, P., 2019. Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sensing of Environment*, 232, p.111319.
- 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.
- Walker, W. S., Kellndorfer, 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

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Konzultant

Kateřina Gdulová

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2021

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 3. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 16. 03. 2021

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma: Zhodnocení přesnosti TANDEM-X DEM ve vysokohorském prostředí vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Praze dne 31.3.2021

.....

(podpis autora práce)

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D., za jeho ochotu, vstřícnost a cenné rady při vedení této práce. Poděkování patří také rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Neoddělitelnou součástí využití globálních digitálních elevačních modelů (DEM) je znalost jejich přesnosti v různých prostředích a podmínkách. V této práci je ukázáno srovnání dvou volně dostupných DEM (TanDEM-X a SRTM) v rozlišení 90 m vzhledem k DTM i DSM. Zkoumané lokality se nachází ve vysokohorských oblastech Evropy. Referenční data byla získána metodou leteckého laserového skenování. Porovnání modelů spočívalo ve validaci rozdílů výšek jednotlivých buněk a byly počítány tyto charakteristiky: střední chyba, odmocnina ze střední kvadratické chyby, medián absolutních odchylek od mediánu a 90% kvantil. Do hodnocení přesnosti byly zahrnuty také environmentální charakteristiky jako nadmořská výška, sklonitost terénu a krajinný pokryv. V oblastech s vegetací se jasně ukazuje, že charakter validovaných modelů je blíže k DSM. Při srovnání RMSE pro DTM a DSM se v lesních oblastech odchylky u obou modelů pohybují mezi 2 - 7 m, ale mimo les jsou rozdíly jen nepatrné. Přesnost modelů významně klesala s narůstající sklonitostí, kdy se u svahů se sklonem vyšším než 40° především u TanDEM-X pohybovala v řádech desítek metrů. V porovnání SRTM a TanDEM-X dosahuje SRTM na všech lokalitách nižší RMSE než TanDEM-X, ale u hodnocení robustními metodami je ve většině parametrů TanDEM-X přesnější. Je evidentní, že s dodatečnými úpravami a zpřesněním na problematických lokalitách se přesnost TanDEM-X v budoucnu zvýší a bude kvalitním nástupcem SRTM.

Klíčová slova: DEM, validace, vertikální přesnost, topografie, krajinný pokryv

Abstract

The knowledge of DEM's accuracy throughout different conditions and environments is essential for their further application. The comparison of two freely available DEM's (TanDEM-X and SRTM) with 90 m resolution was made to both reference DTM and DSM. Study areas were selected in high mountain environment and the reference DEM were derived from aerial laser scanning. Following error metrics ME, RMSE, LE90 and NMAD were calculated for each study area. The environmental characteristic such as altitude, slope and land cover were taken into consideration as well. It is evident that in forested areas both validated DEM's clearly represent DSM. The RMSE difference between DTM and DSM range from 2 to 7 m in forest areas, while in non-forest areas these differences are negligible. With increasing slope, the accuracy of DEM's was decreasing rapidly. Especially for slope higher than 40° the RMSE of TanDEM-X reached up to several tens of meters. Validated by RMSE, SRTM is more accurate in all study areas. However, if robust methods of evaluation are used, TanDEM-X succeeds in most categories. With additional improvements TanDEM-X has potential to be far more accurate than SRTM and become its excellent successor.

Key words: DEM, validation, vertical accuracy, topography, land cover

Obsah

1	Úvod a cíle práce	11
2	Literární rešerše	12
2.1	Digitální model terénu	12
2.2	Digitální modelování	13
2.3	Zdroje dat pro tvorbu digitálních modelů terénu.....	14
2.3.1	Pozemní měření	14
2.3.2	Dálkový průzkum Země	14
2.4	Validované DEM.....	19
2.4.1	SRTM.....	19
2.4.2	TanDEM-X	20
2.5	Chyby v digitálních modelech a jejich hodnocení	21
2.5.1	Validace SRTM	22
2.6	Validace TanDEM-X	23
3	Metodika	24
3.1	Zájmová území	24
3.1.1	Centrální Pyreneje.....	24
3.1.2	Tatry.....	25
3.1.3	Italské Alpy.....	25
3.2	Použitá data	26
3.3	Práce s daty	27
3.4	Topografické charakteristiky	28
3.5	Vliv vegetace	29
3.6	Zhodnocení vertikální přesnosti	29
4	Výsledky	31
4.1	Celková přesnost ve studovaných oblastech	31

4.2	Krajinný pokryv	33
4.3	Nadmořská výška	35
4.4	Sklonitost.....	37
5	Diskuze	39
6	Závěr	40
7	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	41
8	Přílohy.....	46

Seznam použitých zkratk

ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
CHM	Model zachycující výšku vegetace (<i>Canopy Height Model</i>)
DEM	Digitální výškový model (<i>Digital Elevation Model</i>)
DLR	Německé centrum pro letectví a kosmonautiku
DPZ	Dálkový průzkum Země
DSM	Digitální model povrchu (<i>Digital Surface Model</i>)
DTM	Digitální model terénu (<i>Digital Terrain Model</i>)
GPS	Navigační systém (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
IMU	Inerciální měřicí jednotka
LE90	90% kvantil
LiDAR	Laserové skenování (<i>Light detection and Ranging</i>)
ME	Střední chyba (<i>Mean error</i>)
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NMAD	<i>Normalized Median Absolute Deviation</i>
NGA	National Aeronautics and Space Administration
RADAR	Radarové snímání (<i>Radio Detecting and Ranging</i>)
RMSE	Odmocnina střední kvadratické chyby (<i>Root Mean Square Error</i>)
SAR	Radar se syntetickou aperturou (<i>Synthetic Aperture Radar</i>)

1 Úvod a cíle práce

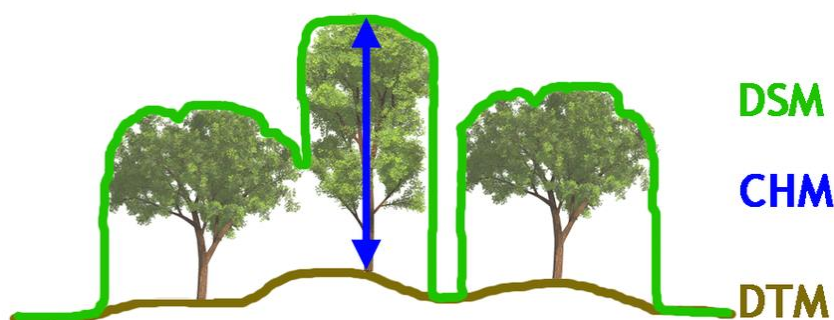
V některých oblastech světa jsou dostupné digitální modely s vysokým rozlišením získané především z dat leteckého laserového skenování. Využití digitálních výškových modelů (DEM; z anglického *Digital Elevation Model*) s vysokým rozlišením je limitované tím, že často nejsou volně dostupné a pokrytí je spíše lokálního charakteru. Z toho důvodu nachází uplatnění globální a téměř globální DEM. Existuje několik volně dostupných DEM lišících se způsobem pořízení dat, rozlišením, přesností výsledného produktu a také tím, zda jsou charakterem spíše digitální modely terénu (DTM; z anglického *Digital Terrain Model*) či digitální modely povrchu (DSM; anglicky *Digital Surface Model*). Jako první téměř globální DEM byl pro širokou veřejnost uvolněn SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) vytvořený na základě dat získaných v roce 2000 (Rabus et al., 2003; Farr et al., 2007). Odstraněním vegetace a dalších objektů na povrchu z SRTM byl odvozen MERIT (*Multi Error Removed Improved Terrain*), který patří mezi „Bare – Earth“ modely (Yamazaki et al., 2017). ASTER GDEM byl vytvořen z dat opatřených multispektrálním senzorem ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflectometr*) neseným satelitem Terra (Tachikawa et al., 2011). Mezi relativně nové DEM patří TanDEM-X, který je v této práci spolu s SRTM validován.

Všechny dostupné DEM jsou nevyhnutelně zatíženy různými chybami. Znalost těchto chyb je zásadní pro další analýzy (Mukherjee et al., 2013, Moudrý et al., 2018). Přestože už byla vypracována řada studií na hodnocení přesnosti TanDEM-X, jako nejnovějšího z volně dostupných digitálních elevačních modelů (Rizzoli et al., 2017, Grohmann, 2018; Wessel et al., 2018; Hawker et al., 2019), jen málokteré z nich se zaměřují na hodnocení v topograficky složitém terénu a vyšších nadmořských výškách (Gdulová et al., 2020; Uemaa et al., 2020). Cílem této práce je zhodnotit přesnost SRTM a TanDEM-X v ještě složitějším topografickém prostředí, než na které se zaměřily předchozí studie. Mezi konkrétní cíle práce patří zhodnocení a porovnání přesnosti vybraných modelů TanDEM-X a SRTM v Italských Alpách, v Tatrách na Slovensku a Pyrenejích ve Španělsku s digitálním modelem terénu a digitálním modelem povrchu, které byly získány přesnějšími metodami leteckého laserového skenování. Zhodnocení vlivu nadmořské výšky a sklonitosti na kvalitu porovnávaných DEM a zhodnocení vegetačního krytu na kvalitu TanDEM-X a SRTM.

2 Literární rešerše

2.1 Digitální model terénu

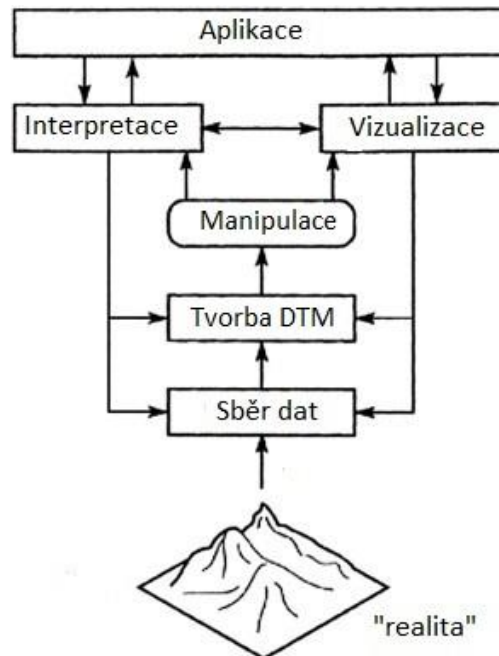
Digitální modely jako reprezentace zemského povrchu jsou využívány v mnoha oborech a jejich význam stále roste. V odvětvích environmentálního modelování je lze využít například k analýzám půdní eroze (Cama et al., 2020), při modelování prostorové distribuce druhů (Moudrý et Šimová, 2012), uplatnění mají také ve vulkanologii (Favalli et al., 2009), v hydrologii (Sampson et al., 2015) a při modelování povodní (Hawker et al., 2018). Terminologie se v různých částech světa liší a pojmy bývají často používány jako synonyma nebo různě zaměňovány (Li et al., 2005). V zahraniční odborné literatuře je možné se setkat s termínem DEM (*Digital Elevation Model*), který k aproximaci zemského povrchu využívá rastr ve vhodném rozlišení. Údaj o výšce je vztažený k referenční hladině a je obsažen v každé buňce rastru (Pike et al., 2008; El-Sheimy et al., 2005). Dalším používaným pojmem je DTM (*Digital Terrain Model*), který VÚGTK (2005) definuje jako digitální reprezentaci zemského povrchu v paměti počítače, složenou z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů. Termín DTM obvykle popisuje terén ve smyslu holého povrchu bez vegetace a objektů (El-Sheimy et al., 2005; Klimánek, 2008). Naopak DSM (*Digital Surface Model*) zobrazuje nejen povrch terénu, ale i vrchní plochy všech objektů na něm. Zvláštní případ je pak CHM (*Canopy Height Model*) (Perko et al., 2011), který umožňuje zjištění výšky vegetačního porostu tak, že od DSM je odečten DTM (obr. 1).



Obr. 1: Rozdíl mezi DSM, DTM a CHM (Perko et al., 2011)

2.2 Digitální modelování

Na výstupy, které jsou odvozením z DTM získány, je dle El-Sheimy et al. (2005); Hutchinson et Gallant (2000); Klimánek (2008), třeba hledět jako na výsledek několika souvisejících a vzájemně se prolínajících etap (obr. 2).



Obr. 2: Činnosti spojené s modelováním DTM. (Hutchinson et Gallant, 2000, p. 30), upraveno

- Tvorba DTM zahrnuje sběr dat a následně samotné vytvoření modelu.
- Manipulací se rozumí úpravy a odvození dalších modelů. Zahrnuje editaci, filtraci dat, spojení dat nebo modelů, konverzi z jedné datové struktury do jiné.
- Interpretace umožňuje pomocí analýzy DTM získat geomorfologické informace, jako jsou například svažitost a orientace ke světovým stranám. Může ale sloužit také k tvorbě hydrologických modelů.
- Vizualizace slouží kromě samotného zobrazení DTM také k snazšímu a rychlejšímu pochopení informací v něm obsažených.
- Aplikace DTM buď jako samotného digitálního modelu, nebo charakteristik, které se z něj dají odvodit.

2.3 Zdroje dat pro tvorbu digitálních modelů terénu

Existuje několik způsobů sběru dat a následného vytvoření DEM. Jednotlivé metody se liší způsobem pořízení vstupních dat a jejich následným zpracováním, přesností, rozlišením a rozsahem. Způsoby získávání dat lze rozdělit na tři základní kategorie (Li et al., 2005; Klimánek, 2008):

1. Pozemní měření,
2. Dálkový průzkum Země,
3. Digitalizace existujících topografických dat.

2.3.1 Pozemní měření

Pozemní měření zahrnuje geodetické metody, kterými jsou nivelace a tachymetrické určování výšek bodů. Dalším způsobem pozemního sběru dat je metoda GNSS. Ani jedna z těchto metod není vzhledem k časové náročnosti vhodná pro tvorbu globálních DEM. Jsou to ale velmi přesné metody, které se dají použít pro validaci DEM vytvořených z dat získaných některou z metod DPZ. Všechny metody pozemního sběru dat mají společné to, že je člověk v přímém kontaktu se zemským povrchem.

2.3.2 Dálkový průzkum Země

Pro metodu, která umožňuje získávat informace o objektech a jevech bezkontaktními metodami, se v Čechách vžil termín DPZ (dálkový průzkum Země). Nelson et al. (2008) rozlišují metody DPZ podle způsobu pořízení dat na RADAR, LiDAR a leteckou fotogrammetrii. Halounová et Pavelka (2008) uvádí, že DPZ lze mimo jiné dělit podle zdroje elektromagnetického záření na aktivní a pasivní. U aktivních je v rámci měřicí aparatury navíc i zdroj vysílaného záření, kdy je měřena část jeho odraženého záření. U pasivních zdrojů je zdrojem záření Slunce, případně Země. Systémy DPZ je možné rozdělit také na letecké a družicové (Nelson et al., 2008).

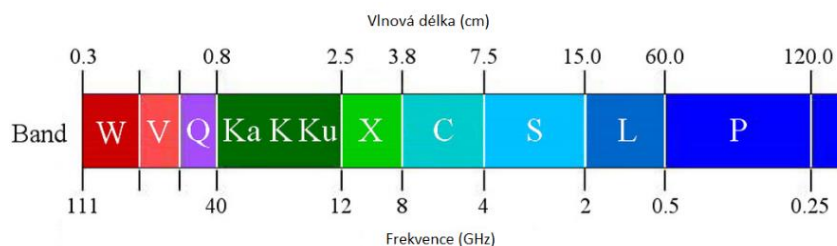
Radarové snímání

Radar (Radio Detection and Ranging) je aktivní mikrovlnný senzor. Používají se radary se syntetickou aperturou (SAR) a radary se skutečnou aperturou (SLAR). Princip SAR i SLAR jako aktivních systémů je vysílání pulzů a následné přijímání a zaznamenávání odrazů. Anténa měří čas mezi vyslaným a přijatým signálem a spolu s ním také jeho sílu (Li et al., 2005.; El-Sheimy et al., 2005). Prostorové rozlišení je

dáno i velikostí antény. Radary se skutečnou aperturou (SLAR - *Side-looking Airborne Radar*) mají anténu pevně připojenou pod letadlem a vychýlenou od svislice v rovině kolmé ke směru letu. Většina antén míří směrem vpravo od směru letu. Vzhledem k potřebné velikosti antény není tento způsob vhodný pro družicové nosiče, kde se využívají radary se syntetickou aperturou (SAR). Zlepšení rozlišení je dosaženo využitím Dopplerova posunu, kdy je možné na základě posunu frekvence oddělit střední úzkou část ze svazku paprsků, která odpovídá ortogonálnímu směru (Halounová et Pavelka, 2008; Kropáček et al., 2020).

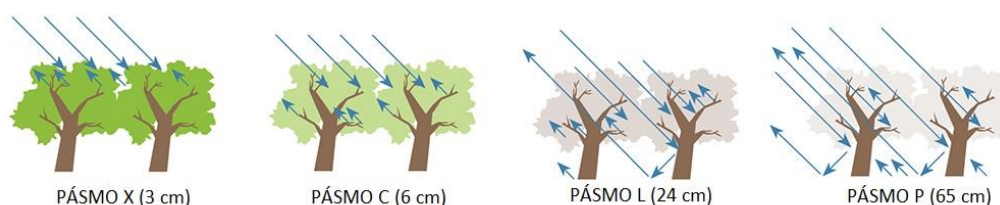
Jednou z metod získávání výškových údajů je radarová interferometrie. Princip této metody je založen na získávání radarového echa stejného místa, ale z různých poloh, čímž vzniká interferometrický pár. Toho lze dosáhnout buď tím, že je scéna jedním systémem pokryta dvakrát v krátkém časovém intervalu, nebo umístěním další antény na jedno zařízení a získání dvou radarových snímků z jednoho místa pod trochu jiným úhlem. Protože je umístění druhé antény ve vzdálenosti několika desítek metrů složitý technický problém, byla vymyšlena jiná realizace tohoto způsobu, tzv. konstelace družic. Jsou použity dvě družice letící blízko sebe na speciálně sladěných drahách. Z interferometrického páru se výška terénu určuje na základě fázového rozdílu. Druhá metoda se jmenuje radarová altimetrie. Využívá faktu, že se mikrovlnné záření šíří konstantní rychlostí a je možné ze zpoždění přijatého signálu vypočítat vzdálenost. Pokud je známa výška družice, je možné dopočítat nadmořskou výšku (Klimánek, 2008; Nelson et al., 2008; Kropáček et al., 2020).

Halounová a Pavelka (2008) jako rozdíl mezi radarovým snímáním a ostatními metodami DPZ uvádí schopnost mikrovlnného záření pronikat mlhou, smogem, jemným deštěm a mraky. Pro družicové radary jsou vyhrazena určitá frekvenční pásma (obr. 3), běžně se v civilním družicovém DPZ používají pásma X, C a L (Kropáček et al., 2020).



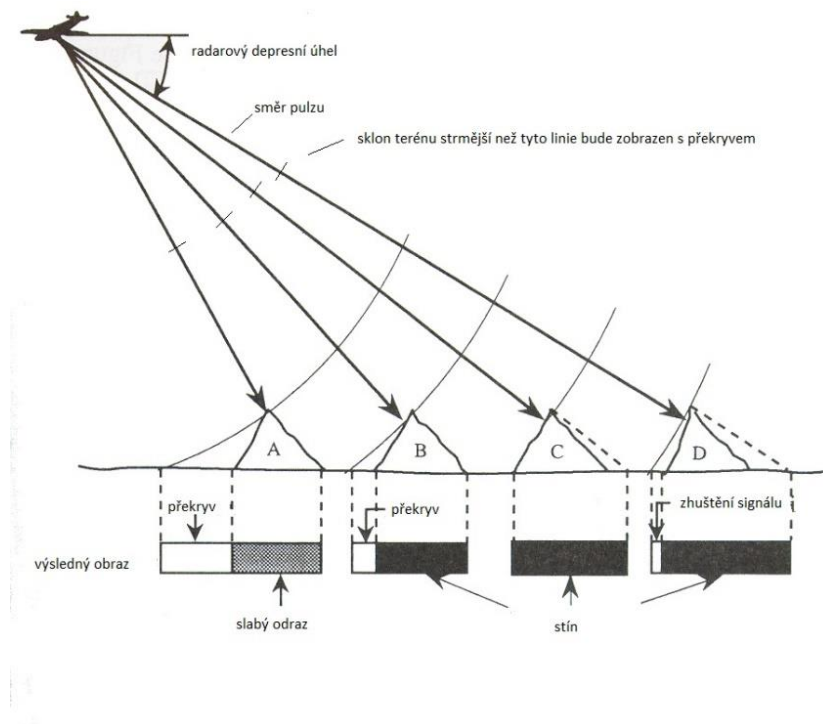
Obr. 3: Frekvenční pásma radaru (Ouchi K., 2013), upraveno

Při práci s radarovými systémy je třeba zvážit, s jakými vlnovými délkami radar pracuje (obr. 4). Radary vysílající v pásmu X ($\lambda =$ cca 3 cm) takřka neproniknou skrz listnaté stromy, ale odráží se od povrchu listů. Radary v pásmu L ($\lambda =$ cca 23 cm) naproti tomu jsou schopné proniknout skrz koruny stromů a odráží se od kmenů a větších větví. Mikrovlnné záření je schopné proniknout dokonce pod některé druhy povrchů jako je písek, půda a led (Nelson et al., 2008).



Obr. 4: SAR různých vlnových délek při kontaktu s vegetací (Herndon et al., 2020), upraveno

Výhodou radarových systémů na oběžných drahách je mapování velkých oblastí v krátkém čase a nezávislost na počasí. Nevýhodou je častý výskyt chyb a nedokonalé pokrytí. Ve srovnání s DEM vytvořenými topografickými metodami jsou radarové DEM zatíženy šumy, které komplikují vyhodnocení. Protože je horský reliéf členitý, projevují se zde častěji chyby způsobené nerovnostmi terénu (obr. 5). Tyto jevy, jak uvádí Halounová et Pavelka (2008), jsou ovlivněny vzdáleností od osy letu nosiče, terénní nerovností a sklonem svahu. Zhuštění signálu (*foreshortening*) je případ, kdy signál dorazí nejprve na bližší úpatí vyvýšeniny, potom na její vrchol, a nakonec na vzdálenější úpatí. Dojde tím ke zkrácení přivráceného svahu a prodloužení odvráceného svahu. Další chybou je překryv (*layover*), kdy je v obraze vrchol hory překlopen směrem k anténě. K překryvu dojde v případě, kdy je přivrácený svah strmější a signál nejdříve dorazí na vrchol vyvýšeniny, potom na bližší úpatí a nakonec na vzdálenější úpatí. V případě, kdy je strmější odvrácená strana vyvýšeniny, může nastat situace, že na ní záření vůbec nedopadne a v obraze vznikne radarový stín (*shadow*), tedy tmavé místo bez informací (Rizzoli et al., 2017; Kropáček et al., 2020).

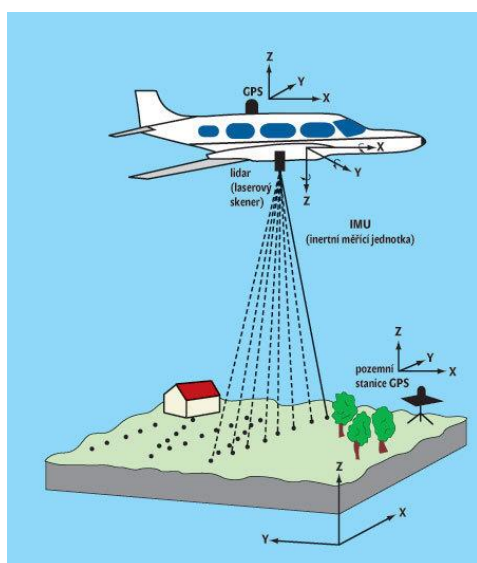


Obr. 5: Chyby způsobené nerovností terénu (Halounová et Pavelka, 2008), upraveno

Letecké laserové skenování – LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) je další z metod DPZ (obr. 6). Jedná se o aktivní sensor, který vysílá signál v nízkém infračerveném nebo zeleném viditelném spektru elektromagnetického záření a zaznamenává odražený signál (Nelson et al., 2008). Odražený signál je okamžitě převáděn do digitálního zobrazení a ukládán přímo do počítače (El-Sheimy et al., 2005). Soustava na mapování pomocí laserového skenování se skládá z laserové jednotky, skenovací jednotky, IMU (Inercial Measurement Unit), INS (Inertial Navigation System) a GPS přístroje. Při mapování jsou většinou GPS a INS (případně INU) zafixovány na křídle letadla nebo helikoptéry (Hodgson et al., 2005; Nelson et al., 2008). Doba mezi vysláním a přijutím signálu určuje vzdálenost senzoru od země (Nelson et al., 2008). Díky tomu, že se paprsek odráží od každé plochy objektu, vytvoří se posloupnost ech od nejvyšších po nejnižší (Klimánek, 2008). Poslední vracející se signál je obvykle odražený od zemského povrchu, ale v případě husté vegetace se může stát, že se paprsek odráží od ní a k zemi neprojde. Mračno bodů obvykle zaznamená jak charakter povrchu terénu, tak objektů na něm (Nelson et al., 2008). Jednou z největších výhod LiDARových systémů je vysoká přesnost dat a rychlejší zpracování než u fotogrammetrie, protože proces

zpracování je z velké části automatizovaný. Vzhledem ke schopnosti LiDARu generovat až 100 000 pulsů za sekundu, jsou měřeny i drobné změny terénu. Nevýhodou této metody je cena a nároky na interpretaci dat. Problémy nastávají především u strmých svahů, kde měření může být velmi nepřesné. Hustá vegetace často neumožňuje průnik paprsků až k zemi, je tedy potřeba pro získání DTM tato data odstranit (Smith, 2005).



Obr. 6: LiDAR – základní princip (Gojda M., 2006)

Letecká fotogrammetrie

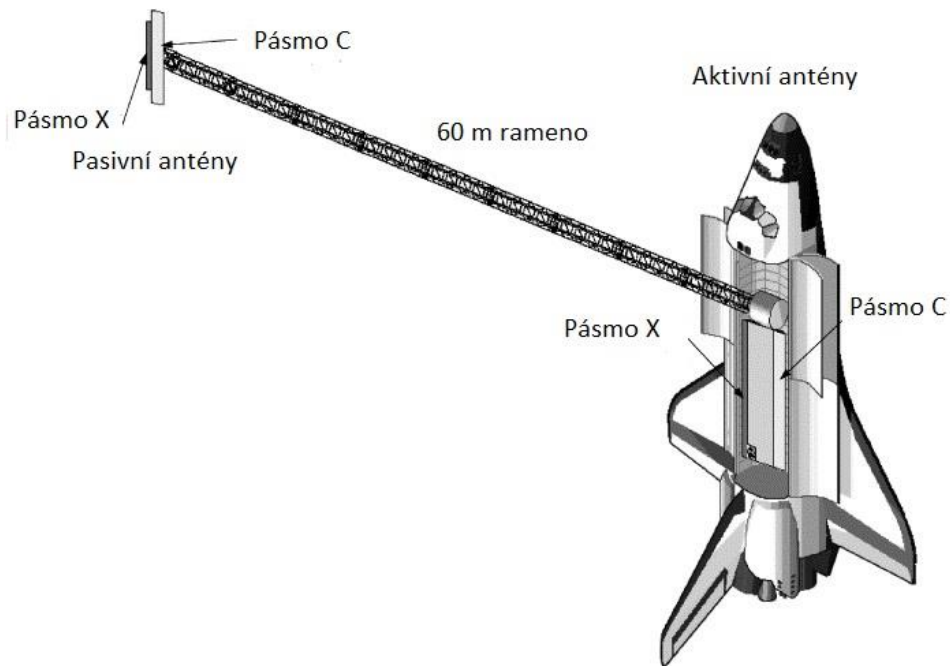
Letecká fotogrammetrie umožňuje sběr dat s vysokým rozlišením a dobrou kvalitou. Fotografie jsou obvykle v přirozených barvách, mohou být ale i černobílé, nebo výjimečně v infračervených barvách. Aby bylo možné získat výškové údaje, je nutné pořizovat snímky stereoskopicky a na kontrolních bodech umístěných na povrchu je třeba znát nadmořskou výšku. Pro vyhodnocení snímků je nutné znát prvky vnitřní a vnější orientace. Polohová i výšková přesnost závisí na měřítku snímku, jeho prostorovém rozlišení a přesnosti určení souřadnic vřícovacích bodů. Stereoskopický překryv je obvykle 60–80 % (Pavelka, 2003; Klimánek, 2008).

2.4 Validované DEM

2.4.1 SRTM

Projekt SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission) vznikl na základě spolupráce mezi NASA (National Aeronautics and Space Administration), NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) a s přispěním DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) a ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Cílem bylo získat kvalitní topografická data k vytvoření DEM mezi 60° severní šířky a 56° jižní šířky. Snímání povrchu bylo zajištěno pomocí speciální syntetické radarové apertury umístěné na raketoplánu Endeavour (obr. 7) během 11 denní mise v únoru 2000. Raketoplán obletěl Zemi každý den 16x, jednalo se tedy celkem o 176 obletů (NASA, 2015). K snímání byly použity dva sety antén, aby byl zajištěn princip radarové interferometrie. Hlavní anténa s aktivním systémem byla umístěna v nákladovém prostoru raketoplánu. Druhý pasivní set byl připevněn na teleskopické šedesátimetrové rameno. Byly použity radary SIR-C (the Shuttle Imaging Radar-C) a X-SAR (the X-Band Synthetic Aperture Radar). Za radar SIR-C (5,6 cm) byla zodpovědná NASA, radar X-SAR (3,1 cm) byl poskytnut DLR. Vzhledem k lepšímu rozlišení X-SAR senzoru, byla snímána užší dráha a radar pokrýval zhruba jen polovinu území oproti SIR-C (Farr et al., 2007).

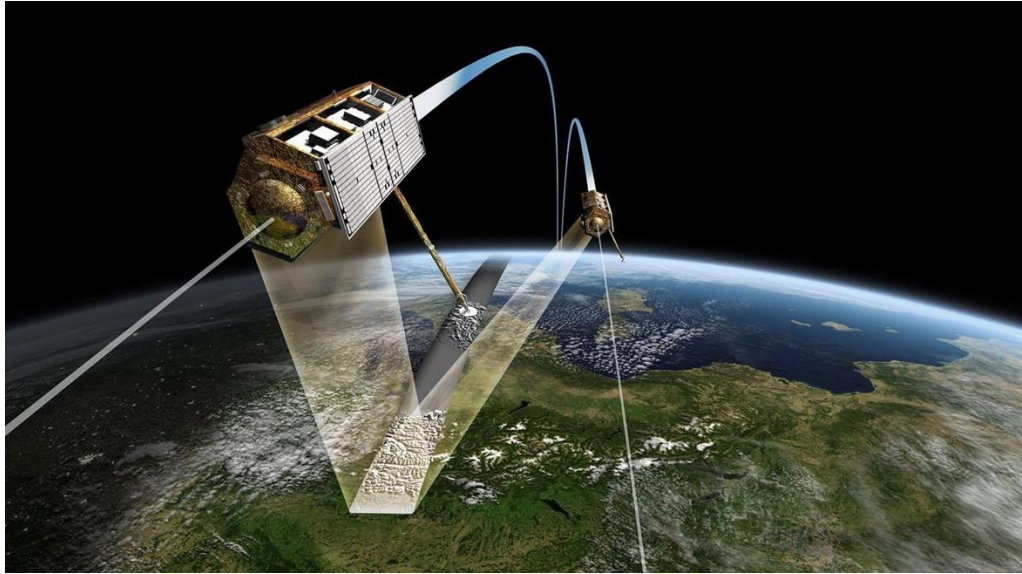
Na podkladech snímání byly vytvořeny tři oficiální verze, které mají různé charakteristiky. Ve verzi 1.0 se jednalo o dva modely s různým rozlišením. První pro území USA v rozlišení 1 úhlové vteřiny (přibližně 30 m) a druhý pro území mimo USA s rozlišením 3 úhlových vteřin (přibližně 90 m). NGA udělala několik dodatečných úprav dat, které zahrnovaly například odstranění vyvýšenin a prohlubní, které nejsou součástí reálného povrchu Země, zpřesnění vodstva a linie pobřeží. Díky tomu vznikla verze 2.0. s dalšími drobnými úpravami byla následně uvolněna verze 2.1. Třetí oficiální verze je SRTM 3.0, jejímž hlavním cílem bylo doplnění prázdných míst daty získanými z jiných elevačních modelů (NASA, 2015).



Obr. 7: Raketoplán Endeavour a hlavní komponenty (Rabus et al., 2003), upraveno

2.4.2 TanDEM-X

TanDEM-X je ojedinělý projekt, jehož cílem bylo vytvoření globálního, konzistentního DEM s nebyvalou přesností. Vznikl díky partnerství soukromého a státního sektoru mezi společnostmi Astrium GmbH a Německým centrem pro letectví a kosmonautiku (DLR). Data získávají dva téměř identické satelity Terra SAR-X (TSX) a TanDEM-X (TDX) vybavené technologií SAR. Terra SAR-X byla vypuštěna v roce 2007 a od roku 2010, kdy proběhlo vypuštění družice TanDEM-X, společně snímají zemský povrch. Oba satelity jsou na nízké oběžné dráze ve výšce zhruba 500 km, doba přeletu Země je 11 dní. Jedná se o jednofrekvenční SAR pracující v pásmu X (Krieger et al., 2013). Satelity létají v koordinované formaci jen několik set metrů od sebe. Jako nejvýhodnější byla zvolena formace Helix (obr. 8), která umožňuje kompletní mapování zemského povrchu. Severní i jižní polokoule mohou být mapovány ve stále stejné formaci, kdy pro jednu polokouli používají vzestupnou dráhu a pro druhou sestupnou (Krieger et al., 2013; Rizzoli et al., 2017; Wessel et al. 2018).



Obr. 8: Formace Helix družic TSX a TDX (DLR, 2020)

V roce 2016 byla dokončena verze TanDEM-X s rozlišením 0,4 úhlové vteřiny (90 x 90 m). Z této verze vznikly odvozením ještě modely s rozlišením 1 úhlové vteřiny (30 m) a 3 úhlových vteřin (90 m). Volně k dispozici je model TanDEM-X 90 m, ostatní jsou pouze pro vědecké účely a na vyžádání. Charakteristiky přesnosti TanDEM-X 12 m vyjádřené jako 90% kvantil jsou pro absolutní polohovou i vertikální přesnost méně než 10 m. Relativní vertikální chyba pro svažitost do 20 % vychází 2 m, nad 20 % 4 m. Vzhledem k průměrování při zpracování je přesnost odvozeného 90 m DEM vyšší (DLR, 2021).

2.5 Chyby v digitálních modelech a jejich hodnocení

Měřená data vždy obsahují chyby bez ohledu na použité metody měření. Původ těchto chyb vychází z (Li et al., 2005):

- Chyby vstupních dat,
- nepřesnost techniky použité ke sběru dat,
- chyby způsobené měřičem (lidské chyby),
- chyby způsobené zpracováním dat.

Obecně se v teorii chyb a vyrovnávacím počtu chyby dělí na (Hampacher et Radouch, 2003; Li et al., 2005):

- Omyly a hrubé chyby,
- systematické chyby,
- náhodné chyby.

Omyly a hrubé chyby nejsou způsobeny podmínkami měření, ale nesprávnými úkony. Výsledek nápadně vybočuje ze skupiny měření. Pro odhalení hrubých chyb a omylů je vhodné provádět opakovaná měření. Tyto chyby není možné zpracovávat statistickými metodami, z měření se vylučují, případně se měření opakuje. Systematické chyby mají obvykle původ v nějakém faktoru, který při určitých stejných podmínkách měření ovlivňuje ve stejném smyslu opakovaná měření. Tyto chyby obsahují stejnou systematickou složku a jsou vzájemně závislé. Klasifikačním měřítkem je způsob působení v čase nebo v prostoru na skupinu měření stejného druhu. Náhodné chyby vznikají při měření stejné veličiny za použití stejné metody i podmínek. Mohou nabývat různé velikosti i znamínka a jsou nepředvídatelné. Při větším množství měření mají náhodné chyby stejného druhu charakter náhodné veličiny s příslušným rozdělením. Pravděpodobnost vzniku kladné nebo záporné chyby určité velikosti je stejná. Malé chyby jsou pravděpodobnější než velké a nad určitou mez se nevyskytují (Hampacher et Radouch, 2003).

Časté zdroje chyb v DEM získaných SAR interferometrií závisí na krajinném pokryvu a charakteru terénu. Ve vysokohorském prostředí se projevují chyby, na které má vliv reliéf terénu v kombinaci se specifickým umístěním radarového senzoru. V oblastech s hustou vegetací se projevuje omezená schopnost radaru pronikat vegetací a objevuje se zvýšený výskyt nejistot v interferometrickém posunu. V případě oblastí s vysokým výskytem sněhu a ledu se objevuje ve větší míře zatížení chybami, protože v závislosti na vlastnostech ledu je radar schopen pronikat až 10 m pod povrch (Rizzoli et al., 2017).

2.5.1 Validace SRTM

Speciálně pro validaci SRTM byla pořízena data pozemním způsobem měření agenturami JPL a NGA. Tato referenční měření proběhla za pomoci GPS přístrojů umístěných na jedoucích vozech na většině kontinentů. Odlehlá měření byla při validaci vyloučena. Pro každý blok dat z SRTM v rozlišení 30 m byla GPS měření zprůměrována, tak aby měl každý pixel stejnou váhu. Část dat byla použita k výpočtu absolutní chyby výšky a druhá část k odhadu polohové přesnosti. Tato data byla v průběhu let doplněna na problematických místech jinými metodami (Farr et al., 2007). Rodriguez et al. (2006) na základě této sady dat provedli srovnání a vypočetli charakteristiky vertikální přesnosti pro jednotlivé kontinenty. Vzhledem k tomu, že referenční data byla získána na silnicích, nejsou tyto výsledky relevantní pro složitý

topografický terén a pro terén s hustou vegetací. Carabjal et Harding (2006) se zaměřili na srovnání dat SRTM s ICESat daty, kdy s využitím dat MODIS o krajinném pokryvu dokázali vliv vegetačního krytu na nadhodnocování výšek. V topologicky složitějším terénu se přesností SRTM DEM zabývali Mukherjee et al. (2013), kteří srovnávali několik DEM (ASTER, Cartosat, GCPs, SOI) v západní části pohoří Siválík, které tvoří jihozápadní okraj Himaláje. Zaměřili se především na přesnost DEM se stoupající nadmořskou výškou a sklonitostí terénu. Kolecka et Kozak (2014) porovnávali SRTM s daty získanými fotogrammetrickými metodami CODGiK (Central National Geodetic and Cartographic Inventory) v polských Tatrách. Zjišťovali, jaký efekt měl reliéf na radarové snímky pro pásma C i X. Hodnotili také vliv vegetace, nadmořské výšky, sklonitosti a orientace ke světovým stranám na přesnost SRTM DEM.

2.6 Validace TanDEM-X

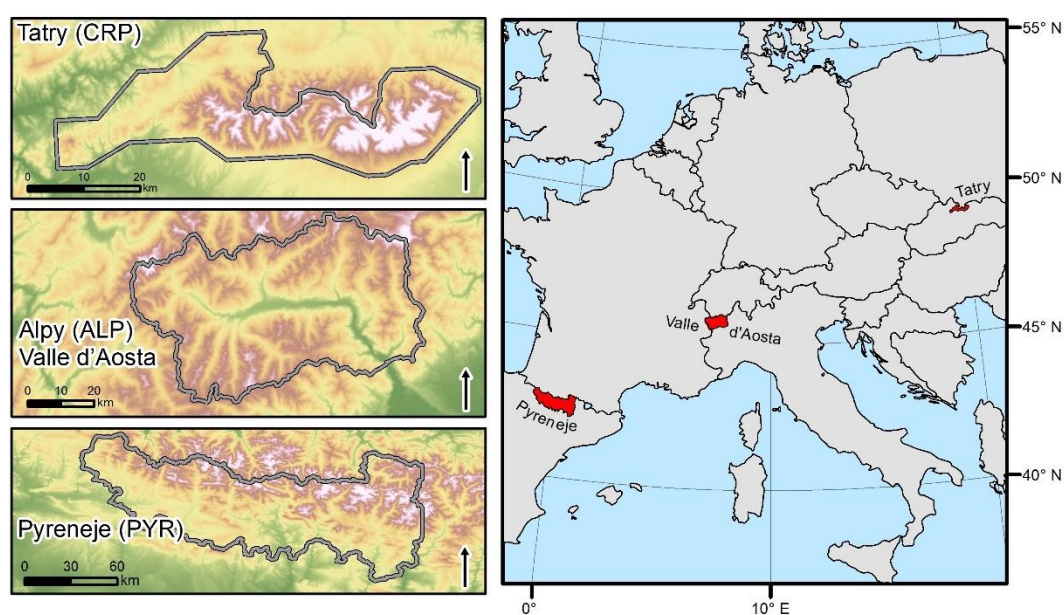
Přesnost modelu TanDEM-X hodnotili Rizzoli et al. (2017) na základě porovnání s daty ICESat. Vzhledem k rozdílným vlastnostem radarového snímání TanDEM-X a laserového snímání ICESat byly patrné větší rozdíly v oblastech s vegetací a v oblastech pokrytých sněhem. Pro každou buňku DEM bylo vybráno 1000 ICESat bodů, které měly nejmenší rozdíl ve výšce oproti TanDEM-X. Tímto způsobem se upřednostnila přesnost v rovinnatějších oblastech. Grohmann (2018) porovnal přesnost s dalšími DEM (SRTM, ASTER GDEM a ALOS AW3D30) na sedmi lokalitách v Brazílii, které byly vybrány tak, aby pokryly co nejširší škálu s ohledem na geomorfologii a krajinný pokryv. Porovnáním s dvěma sadami dat získanými GPS měřeními hodnotili přesnost Wessel et al. (2018). Tyto sady dat byly pořízeny během let 2008-2009, aby bylo možné hodnotit globální přesnost modelu. Měření proběhla za pomoci GPS antén připevněných na automobilech pohybujících se po silnicích na všech kontinentech kromě Antarktidy. Hawker et al. (2019) pro srovnání použili volně dostupné DEM TanDEM-X 90 m, SRTM a MERIT s referenčními daty získanými z leteckého laserového skenování na 32 vybraných nivních lokalitách na šesti kontinentech. Přesnost hodnotili s ohledem na krajinný pokryv, sklonitost a orientaci ke světovým stranám. Vliv krajinného pokryvu a topografických charakteristik řeší porovnáním TanDEM-X s DSM i DTM ve třech horských lokalitách Gdulová et al. (2020). Uemaa et al. (2020) zkoumali

přesnost šesti volně dostupných globálních DEM na čtyřech vybraných lokalitách a porovnávali je s lokálními DEM získanými leteckým laserovým skenováním.

3 Metodika

3.1 Zájmová území

Pro hodnocení přesnosti DEM byly v této práci vybrány vysokohorské lokality ve třech státech – Tatry na Slovensku, Pyreneje ve Španělsku a Alpy v Itálii (obr. 9). S ohledem na téma práce byly lokality vybírány ve vysokohorském prostředí a s dostupností dat leteckého laserového skenování.



Obr. 9: Zájmová území

3.1.1 Centrální Pyreneje

Řešené území se nachází ve španělských Centrálních Pyrenejích v těsné blízkosti státní hranice s Francií. Práce se zaměřuje na topograficky nejsložitější část Pyrenejí, kde se nachází nejvyšší vrcholy dosahující výšek téměř 3400 m n. m. (Pico de Aneto, Monte Perdido nebo Pico de Postes). Jsou zde rozeklané štíty obklopené ledovci, kaňony s divokými řekami s vodopády a špatně přístupná hluboká údolí (Šlégr, 2002). Hlavní hřeben je tvořen staršími metamorfovanými a paleozoickými horninami, kratší horská pásma jsou z druhohorních hornin a na jihu se nachází oblasti tvořené třetihorními horninami. V době čtvrtohorního zalednění vznikla rozsáhlá ledovcová údolí a řada rozervaných oblastí s velkým množstvím jezer ledovcového původu, horských řek a potoků (Šlégr, 2002; Büdeler, 2003). Pyreneje jsou poměrně

hodně zalesněné, do 1600 m n. m. převládají listnaté stromy, které pak postupně přechází v jehličnany, vyskytující se někde až do výšky 3000 m n. m. Ve srovnání se střední Evropou je hranice lesa posunuta o 600–800 metrů (Šlégr, 2002). V severní části území se nachází nejstarší pyrenejský národní park s rozlohou 2046 ha – Park Natural de Ordesa, jedinečné kaňonovité údolí pod vrcholem Monte Perdido. Na východě je přírodní park Postes – Maladeta (Büdeler, 2003).

3.1.2 Tatry

Tatry jsou nejvyšší částí Karpat a nacházejí se na hranici Slovenska a Polska. V této práci je řešená jen část Tater, která je na území Slovenska. Tatry mají protáhlý tvar ve směru východ – západ. Lze je rozdělit na dva podcelky: Východní a Západní Tatry (TANAP, 2012). Karpaty jsou typickým pásebným pohořím se žulovým jádrem a okrajovými pásmy tvořenými vyzdviženými sedimenty. Často se jedná o druhohorní vápence. Během dob ledových se na severních svazích Vysokých Tater nacházely ledovce, které vyhloubily kary, nakupily morény a přispěly k vyzdvižení ostrých štítů v některých částech pohoří. Pásmo lesů je tvořeno především smrkem ztepilým spolu s dalšími jehličnany a dosahuje do výšek 1400 až 1700 m n. m. Navazují na ně porosty klečí a ve výšce kolem 1800 m n. m. se přidává nízký jalovec, pak následuje alpský stupeň (Šlégr, 2002). Převážná část rostlin se řadí do západokarpatské flóry. Velikost území, značné výškové rozdíly, různorodost geologického podloží a půdního složení umožňují přežití různorodé škály druhů, některých dokonce s jedinečným výskytem na Slovensku. K uchování přírodního bohatství zde byl v r. 1948 vyhlášen Tatranský národní park. (Šlégr, 2002; TANAP, 2012).

3.1.3 Italské Alpy

Řešená část Alp se nachází na severozápadě Itálie na hranicích států Švýcarsko a Francie. Italská odborná literatura dělí Alpy na Západní, Střední a Východní. Rozhraní je tvořeno průsmyky Simplon a Brenner (Král, 1999). Většina okolních států používá jednodušší dělení na Západní a Východní Alpy (Šlégr, 2002). Italské Alpy jsou dlouhé přibližně 1200 km a rozprostírají se na ploše velké téměř 5200 km² (Paranunzio R. et al., 2016). Prostor Západních Alp je vzhledem ke kolizi Africké a Evropské tektonické desky mnohem nahuštěnější a strmější než ostatní oblasti Alp, proto se zde nachází nejvyšší alpské vrcholy jako například Mont Blanc (4808 m n. m.) a Matternhorn (4478 m n. m.) (Fitzsimons et Veit, 2001; Paranunzio et al., 2016). Na těchto nejvyšších vrcholech je soustředěna největší ledovcová oblast v Západních

italských Alpách. Území je velmi členité s hlubokými údolními, strmými svahy a velkým množstvím horských řek (Král, 1999). V miocénu existovalo odvodňování od hlavního centrálního hřebenu svahovými toku k severu a jihu. Charakteristická podélná alpská údolí vznikala při postupném vyzdvihování Alp od konce pliocénu. Alpy se zdvihají i v současnosti a některá údolí se tímto vlivem rozšiřují v brázdy a pánve. Příčná údolí zůstávají úzká se skalnatými soutěskami. Velehorský alpský reliéf vznikl ve čtvrtohorách, kdy se na jeho vzniku kromě vyzdvihování Alp podílelo především čtvrtohorní zalednění. Ledovce za sebou zanechaly mohutné morénové amfiteátry a hluboká ledovcová údolí. Ve vrcholových oblastech vytvořila glaciální eroze spolu se zvětráváním ostré hřebeny a štíty (Král, 1999; Fitzsimons et Veit, 2001). Hranice lesů se na severních okrajích nachází ve výšce 1600 m n.m., na jižní straně je posunuta až do výšky 2200 m n.m. Ve spodních stupních jsou listnaté a smíšené lesy, výš jsou pak jehličnany. Na pásmo lesů navazuje pásmo kosodřeviny, ještě výš jsou rozprostřeny alpské louky s bohatou květenou (Šlégr, 2002). Zasahuje sem zčásti Národní park Grand Paradiso nazvaný podle nejvyššího vrcholu Grajských Alp (Alpi Graie), kde se nachází rozsáhlé horské hole s malými ledovci a horskou květenou (Král, 1999).

3.2 Použitá data

DEM TanDEM-X a SRTM byly porovnány s referenčními DTM a DSM získanými z leteckého laserového skenování. Pro zájmové území v Pyrenejích byla použita data DTM05 a DSM05. Digitální modely byly získány interpolací z dat pořízených v letech 2008-2015 leteckým laserovým skenováním v rámci programu LIDAR 1st Coverage. of the National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA). Bodové mračno bylo snímáno s hustotou 0,5 bodu/m² a výsledné elevační modely jsou v rozlišení 5x5 m (CNIG, 2021). Na Slovensku probíhá letecké laserové skenování postupně v rámci jednotlivých lokalit. V práci byly použity digitální modely reliéfu (terénu) DMR 5.0 a povrchu DMP 1.0 z lokality č. 26 – Tatry, které vznikly interpolací z klasifikovaného mračna bodů (z vybraných klasifikačních tříd). Rozlišení výsledných modelů je 1x1 m. Tato data byla pořízena mezi červnem a zářím v roce 2018. Body byly snímány s minimální hustotou 5 bodů na m². (GKÚ Bratislava, 2021). Pro lokalitu v Alpách byly použity elevační modely DTM 2008 a DSM 2008. Data pořízená laserovým skenováním v letech 2005-2006 byla v roce 2008 doplněna. Rozlišení je 2x2 m (INVA, 2018).

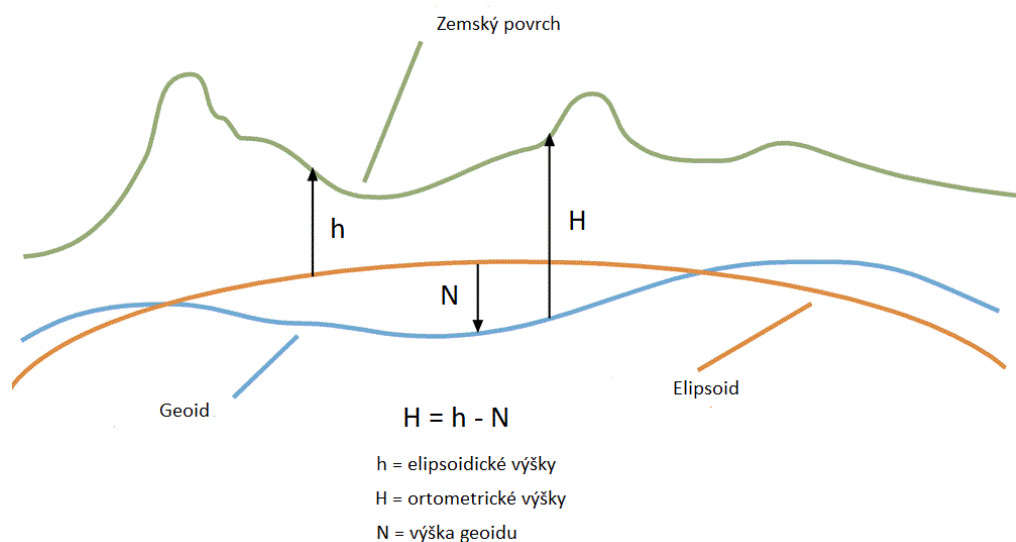
Informace o krajinném pokryvu byly získány z CLC (CORINE Land Cover). Tento program byl zahájen Evropskou komisí v roce 1985 s cílem zajistit přístup ke kvalitním informacím o životním prostředí v rámci Evropského společenství. Vrstva CLC byla vytvořena poprvé pro rok 1990 a od roku 2000 probíhá aktualizace každých 6 let. Od roku 2012 je databáze CLC součástí pan-evropské složky programu Copernicus. Obsahuje celkem 44 tříd krajinného pokryvu, nejmenší mapovací jednotkou je 25 ha pro plošné jevy a šířka 100 m pro liniové jevy (Copernicus, 2021). Vybrané vlastnosti a informace o použitých DEM a krajinném pokryvu jsou uvedeny na obr. 8. Model SRTM byl použit ve verzi 3.

	Souřadnicový systém	Výškový systém	Roky mapování	Zdroj	Rozlišení
LIDAR PYR 30N	ETRS 89-UTM30	ETRS 89	2008 - 2015	CNIG	5x5
LIDAR PYR 31N	ETRS 89-UTM31	ETRS 89	2008 - 2015	CNIG	5x5
LIDAR CRP	ETRS 89-UTM34	ETRS 89	2018	ÚGKK SR	1x1
LIDAR ALP	ED50-UTM32	ED 50	2005 - 2008	SCT GEOPORTALE	2x2
SRTM	WGS 84	EMG 96	2000	CGIAR CSI	90x90
TanDEM-X	WGS 84	WGS 84	2010 - 2015	DLR	90x90
CLC 2000	ETRS 89	-	1999 - 2001	EEA	100x100
CLC 2012	ETRS 89	-	2011 - 2012	EEA	100x100

Tab. 1: Přehled použitých DEM

3.3 Práce s daty

Data byla upravena v programu ArcMap 10.7.1. Jednotlivé bloky dat byly u všech porovnávaných DEM spojeny nástrojem *Mosaic to New Raster*. Pro hodnoty, které neobsahují údaj o výšce a jsou vyjádřeny jako -32 767, byly pomocí funkce *Set Null* nastaveny *No data*. Referenční DTM a DSM byly pomocí *Project Raster* transformovány do UTM s nastavenou bilineární interpolací. S použitím nástroje *Aggregate* bylo změněno rozlišení na 90 x 90 m. V *Environments* byly rastry přichyceny pomocí *Snap raster*, aby nedocházelo k vertikálním posunům. Nástrojem *Extract by Mask* byly lokality oříznuty podle vrstvy DTM. Všechny referenční DTM i SRTM jsou na rozdíl od TanDEM-X v ortometrických výškách. TanDEM-X má výšky odvozené od elipsoidu WGS84. Výška na geoidu (undulace geoidu) je rozdíl výšky mezi geoidem a elipsoidem v konkrétním bodě (obr. 10). Tyto rozdíly mohou nabývat desítek metrů, je proto třeba je sjednotit (Mukherjee et al., 2013). Odečtení undulace bylo provedeno pomocí rastru EGM2008-1.



Obr. 10: Znáznornění rozdílu mezi výškami na geoidu a elipsoidu

Pomocí funkce *Raster to Point* byly převedeny vrstvy referenčních DSM do bodové vrstvy. Následně pomocí funkce *Extract Multi Values to Points* byla k jednotlivým bodům přiřazena data z porovnávaných vrstev a informace o krajinném pokryvu získaná z datové sady CLC.

3.4 Topografické charakteristiky

Při hodnocení přesnosti byl brán v úvahu vliv topografických charakteristik na přesnost DEM, tedy vliv nadmožské výšky a sklonitosti terénu. Sklonitost byla počítána z referenčních DTM pomocí nástroje *Slope*. Získané hodnoty byly přiřazeny k bodové vrstvě použitím *Extract Multi Values to Points*. Charakteristiky přesnosti byly počítány v programu RStudio 1.2.5033 spolu s ostatními hodnocenými parametry. Hodnoty sklonitosti byly rozděleny do pěti kategorií (tab. 2) s ohledem na charakter rozložení dat. Hodnoty nadmořských výšek byly pro Alpy rozděleny do osmi kategorií, pro ostatní pohoří byla horní kategorie snížena adekvátně maximální nadmořské výšce.

Kategorie	Nadmořská výška (m)	Sklonitost (°)
1	<800	< 10
2	800-1200	10-20
3	1200-1600	20-30
4	1600-2000	30-40
5	2000-2400	> 40
6	2400-3000	
7	3000-4000	
8	4000-5000	

Tab. 2: Rozdělení kategorií pro nadmořskou výšku a sklonitost

3.5 Vliv vegetace

Data CLC byla nástrojem *Reclassify* rozdělena na dvě kategorie, a to na lesní oblasti a oblasti bez lesů. Do kategorie lesů byly zařazeny lesy listnaté, smíšené a jehličnaté. Všechny ostatní kategorie byly klasifikovány jako oblasti bez lesů vzhledem k charakteru porovnávaných lokalit. V programu R byla následně odfiltrována data, na kterých mezi lety 2000 a 2012 proběhla změna. Porovnání bylo uděláno vůči DTM i DSM.

3.6 Zhodnocení vertikální přesnosti

Vertikální přesnost byla pro všechny lokality hodnocena ve vztahu k DSM i DTM, protože ač je svým charakterem jak SRTM, tak TanDEM-X spíš DSM, bývá často v mnoha studiích uvažován jako DTM. Práce s daty a výpočty probíhaly ve statistickém software R verze 3.4.3. a byly počítány následující charakteristiky přesnosti:

ME (Mean Error) – střední chyba

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{DEM_i} - h_{REF_i}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$$

RMSE (Root mean square error) – odmocnina střední kvadratické chyby

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

kde n je počet porovnávaných hodnot, h_{DEM} výška konkrétního bodu ve srovnávaném DEM (SRTM nebo TanDEM-X) a h_{REF} výška v referenčním DTM či DSM, případně Δh_i jsou rozdíly mezi referenčními a srovnávanými hodnotami. Pomocí střední chyby

je možné odhalit systematickou chybu. Znamínko u ME naznačuje, zda zkoumaný model spíše nadhodnocuje nebo podhodnocuje. RMSE ukazuje průměrný rozsah chyby. Jak střední chyba, tak odmocnina střední kvadratické chyby předpokládají normální rozdělení dat, kdy by podle teorie chyb mělo 68,3 % dat spadnout do intervalu $\mu \pm \sigma$, kde μ je systematická chyba a σ je STD (směrodatná odchylka). Existují metody, kterými je možné se vypořádat s odlehlými hodnotami. Většinou jsou založené na určení krajní meze, kterou hodnoty nesmí překročit. Hohle et Patuckova (2006) pro určení meze použili $|\Delta h_i| > 3 \cdot RMSE$. Jsou i další přístupy, kdy se použije např. pravidlo 3σ , kde σ je hodnota pro směrodatnou odchylku odvozená z původního souboru dat.

Ne všechna odlehlá měření jsou ale těmito metodami odhalena. Pokud histogram měření odhalí např. šikmost, nebo jiné nepravidelnosti, je k určení přesnosti vhodné použít metody, které tolik nezohledňují odlehlá měření. Využívají se k tomu výběrové kvantily, které můžou být podle potřeby zvoleny v různých hodnotách. V případě velkého množství odlehlých hodnot se doporučuje použít NMAD (Normalized Median Absolute Deviation) nebo LE_{90} (absolutní odchylka 90 % kvantilu).

$$NMAD = 1.4826 \cdot median_i(|\Delta h_i - m_{\Delta h}|)$$

$$LE_{90} = Q_{|\Delta h|}(0.9)$$

NMAD odpovídá mediánu absolutních hodnot odchylek od mediánu a je pro normální rozdělení přenásoben hodnotou 1,4826. Může být považován za odhad pro STD, ovšem není citlivý na odlehlé hodnoty. Pokud je objem měřených hodnot veliký, jedná se o ekvivalent STD v případě normálního rozdělení (Höhle et Höhle, 2009). LE_{90} říká, že 90 % hodnot je menších nebo rovných vypočítané hodnotě (Wessel et al., 2018). Pro hodnoty s normálním rozdělením je hodnota $LE_{90} = STD \cdot 1.65$.

4 Výsledky

4.1 Celková přesnost ve studovaných oblastech

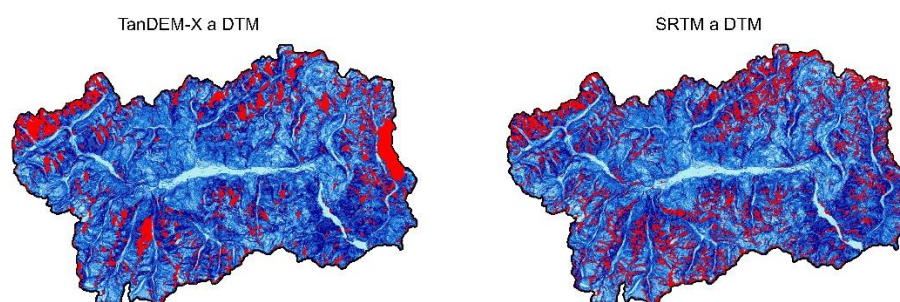
Z hlediska ME a především RMSE vychází model SRTM jako přesnější téměř ve všech zkoumaných lokalitách (tab. 3). V Pyrenejích (PYR) i v Tatrách (CRP) vzhledem k DTM vychází ME kladná, tedy zde modely nadhodnocují. V porovnání s DSM je naopak vidět podhodnocení modelu, které potvrzuje schopnost částečného proniknutí radarových paprsků vegetací. V Alpách (ALP) je situace u TanDEM-X odlišná a model je podhodnocený k DTM i DSM. Rozdíl je pravděpodobně způsoben tím, že téměř 80 % buněk z celé lokality je bez lesů, přičemž v ostatních lokalitách je to jen přibližně 50 %. Kritérium pro misi TanDEM-X, že 90 % absolutních odchylek je menších než 10 m bylo splněno jen v lokalitě Pyreneje. U SRTM, kde je tato odchylka 16 m, je požadovaná přesnost ve vztahu k DSM splněna na všech lokalitách.

TanDEM-X									
DTM	ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)	DSM	ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
ALP	-2.30	46.53	21.79	6.23	ALP	-4.73	46.23	19.48	4.47
CRP	4.10	27.62	21.74	9.40	CRP	-1.67	25.92	13.11	4.70
PYR	2.07	17.80	11.75	4.67	PYR	-1.56	17.08	7.02	2.72

SRTM									
DTM	ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)	DSM	ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
ALP	1.86	13.27	16.05	7.25	ALP	-0.57	12.40	13.66	5.66
CRP	4.37	11.81	17.49	9.28	CRP	-1.40	10.13	13.54	6.52
PYR	2.83	11.99	12.61	5.73	PYR	-0.80	10.90	9.88	4.71

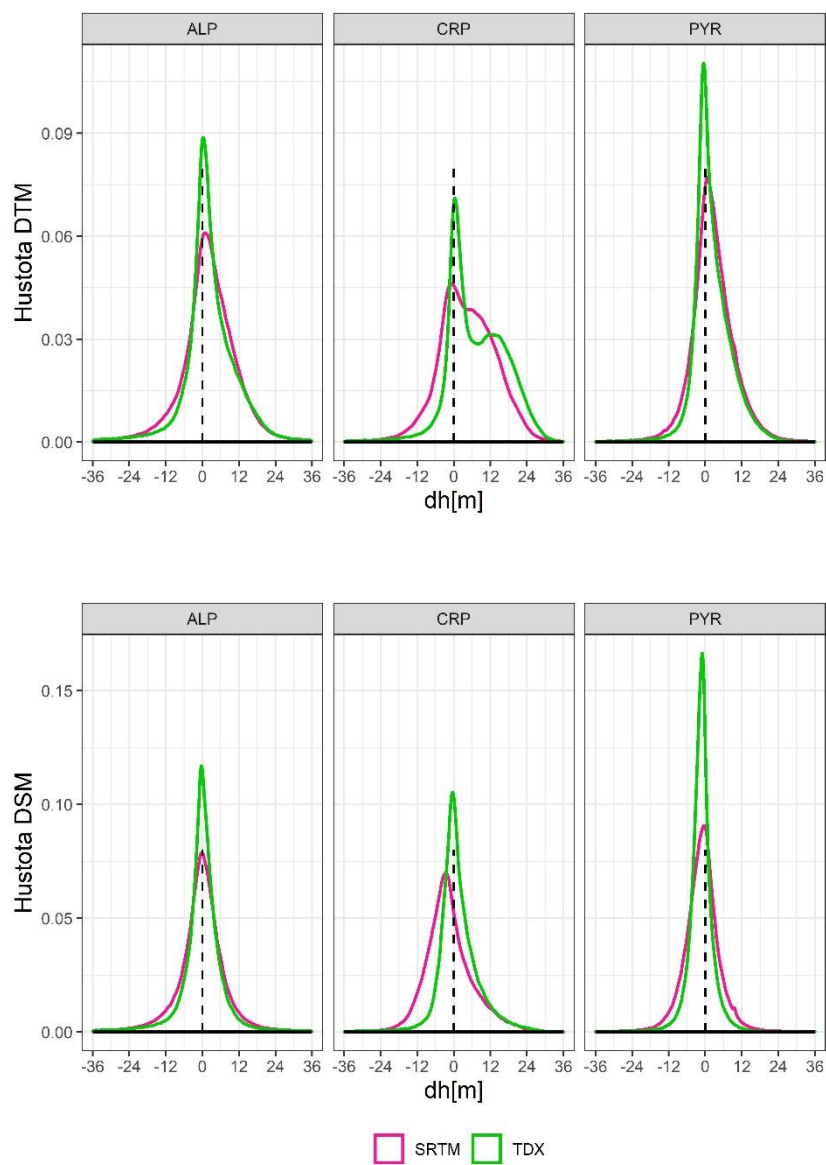
Tab. 3: Celková přesnost v jednotlivých lokalitách

Na obr. 11 je znázorněno prostorové rozložení hodnot, které se nevešly do 90% kvantilu a charakter výskytu těchto hodnot ukazuje, že u TanDEM-X existují problematické lokality, na kterých se vyskytuje značné množství odlehlých hodnot. SRTM má odlehlé hodnoty rozprostřeny rovnoměrněji do prostoru.



Obr. 11: Prostorové rozložení 10 % hodnot s největším rozdílem

Při porovnání grafů hustoty (obr. 12), vychází TanDEM-X ve smyslu blízkosti nule jako přesnější. Velký rozdíl mezi RMSE a NMAD ukazuje, že TanDEM-X je na většině místech přesnější, ale obsahuje množství buněk s relativně velkými chybami.



Obr. 12: Graf hustoty pravděpodobnosti odchylek SRTM a TanDEM-X od referenčních DTM a DSM

4.2 Krajinový pokryv

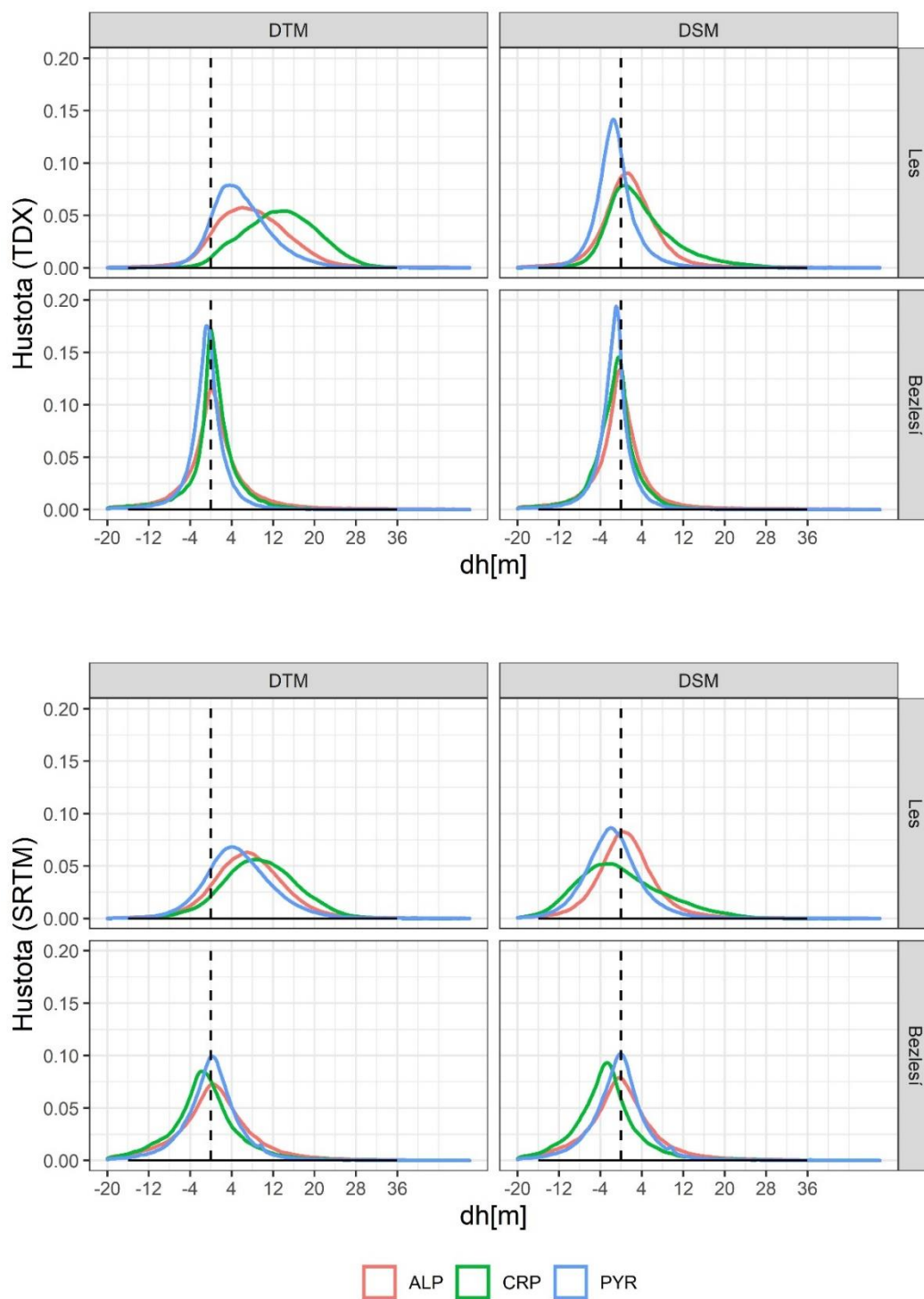
Z hlediska RMSE vychází SRTM jako přesnější model. Především je to patrné v oblastech Alp a Tater, na místech, kde nejsou lesy. Překvapivě jsou zde odchylky větší než v lesních oblastech. Důvod bude zřejmě v netypické krajině. Obvykle se největší odchylky koncentrují v místech, kde je hustá vegetace, ale ve vysokohorských oblastech s velice složitou topografií a strmými svahy, se jako složitější jeví měření samotného terénu. Vliv na to má také fakt, že v oblastech s vegetací je terén obvykle mírnější než ve vyšších nadmořských výškách, kde se sklonitost svahů zvyšuje. ME ukazuje, že oba modely podhodnocují v oblastech bez lesů a v oblastech s lesy nadhodnocují, TanDEM-X má tyto odchylky výraznější než SRTM. Z hlediska NMAD vychází lépe TanDEM-X (tab. 4).

TanDEM-X											
Krajinový pokryv	Počet buněk	Lokalita	DTM				Lokalita	DSM			
			ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)		ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
Lesy	91 237	ALP	8.15	21.11	18.45	4.83	ALP	1.87	19.06	10.62	4.71
Bezlesí	310 739		-6.38	53.26	27.95	6.23		-7.30	53.20	27.73	4.27
Lesy	57 370	CRP	13.33	15.71	22.65	7.35	CRP	3.86	8.74	13.18	5.53
Bezlesí	60 252		-6.65	36.92	13.78	3.16		-8.11	36.94	12.88	3.46
Lesy	445 497	PYR	6.47	17.94	13.84	5.25	PYR30	-0.58	16.21	6.80	2.44
Bezlesí	533 631		-1.69	17.68	7.31	2.64		-2.39	17.78	7.33	2.72

SRTM											
Krajinový pokryv	Počet buněk	Lokalita	DTM				Lokalita	DSM			
			ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)		ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
Lesy	91 237	ALP	7.41	10.70	16.32	6.49	ALP	1.13	6.91	10.01	4.98
Bezlesí	310 739		-0.31	14.15	15.84	6.43		-1.23	13.97	15.29	5.97
Lesy	57 370	CRP	9.46	12.13	18.83	7.06	CRP	-0.02	8.60	13.57	8.04
Bezlesí	60 252		-1.55	11.42	13.59	5.41		-3.01	11.67	13.48	5.03
Lesy	445 497	PYR	6.09	14.24	14.27	6.08	PYR	-0.96	12.22	9.66	4.85
Bezlesí	533 631		0.05	9.65	10.16	4.52		-0.66	9.63	10.15	4.42

Tab. 4: Přehled výsledků dosažených v rámci jednotlivých lokalit

Přítomnost lesa zvyšuje chybovost vůči DTM u obou porovnávaných modelů, nejvíc patrné je to v Tatrách, kde je nejen velký počet kladných odchylek, ale téměř celá hustota je koncentrovaná v kladných hodnotách (obr. 13). V oblastech, kde není les dosahuje TanDEM-X vyšší přesnosti oproti SRTM.



Obr. 13: Hustota vegetačního pokrytí ve všech lokalitách

4.3 Nadmořská výška

S rostoucí nadmořskou výškou přesnost obou modelů klesá. V tab. 5 je patrné, že oba modely v nižších nadmořských výškách nadhodnocují a následně přichází zlom a začínají oba modely podhodnocovat, což při porovnání s DTM koreluje s hranicí lesa. RMSE v Alpách se příliš neliší při porovnání s DSM ani DTM, stejně tak je to i v Pyrenejích. Naopak v Tatrách je do nadmořské výšky 1600 metrů rozdíl odchylek v porovnání s DSM výrazně nižší. NMAD se ve vyšších nadmořských výškách zvyšuje u TanDEM-X, nejvýraznější je to v Tatrách. Z hlediska LE90 se hodnoty až do výšek 2000 m n. m. u obou modelů relativně blíží požadované hodnotě 10 m.

TanDEM-X											
Nadmořská výška (m)	Počet buněk	Lokalita	DTM				DSM				
			ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)	Lokalita	ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
<800	21210	ALP	3.91	8.79	11.29	3.21	ALP	0.55	7.03	6.06	2.00
800-1200	29261		8.43	21.91	16.58	6.67		3.06	20.15	9.05	3.60
1200-1600	45066		8.30	20.81	19.45	7.81		2.87	18.78	11.84	4.40
1600-2000	68605		4.41	23.64	17.91	7.09		-0.02	22.66	11.66	4.51
2000-2400	88206		-2.66	34.22	13.27	4.23		-3.84	34.20	12.21	3.75
2400-3000	116307		-7.19	55.25	36.07	4.79		-7.23	55.23	36.15	4.74
3000-4000	32325		-27.67	96.38	123.52	9.15		-27.72	96.40	123.42	9.10
4000-5000	996		-74.59	169.20	304.31	21.82		-74.46	169.23	304.35	21.10
<800	11109	CRP	8.50	12.31	21.84	8.22	CRP	1.76	5.65	8.88	2.58
800-1200	50414		12.60	14.90	22.81	8.93		3.64	7.63	13.28	4.78
1200-1600	29957		7.79	11.56	17.39	7.74		1.61	7.70	9.76	4.76
1600-2000	21807		-4.95	28.38	10.70	3.04		-5.60	28.57	11.19	4.34
2000-2400	6246		-32.70	74.38	118.05	11.30		-32.75	74.36	116.70	11.71
2400-3000	235		178.28	217.64	355.81	136.83		178.16	217.78	357.78	137.35
<800	109780	PYR	1.46	5.66	6.71	2.23	PYR	-0.79	4.98	4.96	1.61
800-1200	309621		4.14	16.55	10.92	4.69		-0.61	15.42	5.95	2.44
1200-1600	222272		6.14	18.11	14.49	6.60		-0.44	16.21	6.62	2.94
1600-2000	150878		1.87	16.73	10.47	4.49		-1.03	16.21	6.85	2.79
2000-2400	118833		-1.24	15.17	8.10	3.10		-1.95	15.31	8.12	2.97
2400-3000	60808		-7.11	29.10	17.99	4.30		-7.64	29.43	18.95	4.37
3000-3500	1595		-28.36	58.31	98.50	11.16		-29.33	59.05	100.89	11.42

SRTM											
Nadmořská výška (m)	Počet buněk	Lokalita	DTM				DSM				
			ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)	ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)	
<800	21210	ALP	3.25	7.91	11.49	3.91	ALP	-0.11	6.35	8.23	3.15
800-1200	29261		5.37	9.62	14.95	6.55		0.01	6.83	9.59	4.59
1200-1600	45066		6.57	11.31	16.89	7.37		1.14	8.24	10.83	5.05
1600-2000	68605		5.85	10.32	15.40	6.69		1.42	7.80	10.51	4.83
200-2500	88206		0.77	8.35	11.69	5.71		-0.41	8.07	11.25	5.13
2400-3000	116307		-0.93	13.87	16.64	6.86		-0.97	13.86	16.62	6.83
3000-4000	32325		-6.39	25.25	28.74	10.50		-6.44	25.27	28.64	10.41
4000-5000	996		-17.87	43.68	47.05	12.02		-17.74	43.64	45.77	11.95
<800	11109	CRP	4.90	9.53	16.70	7.99	CRP	-1.84	6.57	10.54	3.88
800-1200	50414		9.07	11.80	18.93	8.00		0.10	8.12	13.41	7.05
1200-1600	29957		4.73	8.90	14.39	7.26		-1.45	7.34	11.75	6.33
1600-2000	21807		-2.59	10.75	13.39	6.09		-3.24	11.00	13.55	6.06
2000-2400	6246		-3.39	21.91	31.49	11.21		-3.44	22.39	32.88	11.28
2400-3000	235		-14.76	34.37	56.05	21.45		-14.63	34.89	54.23	23.78
<800	109780	PYR	1.79	4.92	8.28	8.28	PYR	-0.45	4.40	7.38	3.05
800-1200	309621		3.52	7.55	11.37	11.37		-1.24	5.85	8.33	4.05
1200-1600	222272		5.87	15.75	14.74	14.74		-0.71	13.65	9.49	4.82
1600-2000	150878		2.52	14.00	12.27	12.27		-0.38	13.02	10.20	5.01
2000-2400	118833		0.77	11.59	11.70	11.70		0.06	11.47	11.70	5.47
2400-3000	60808		-1.52	13.28	16.32	16.32		-2.05	13.50	16.71	7.28
3000-3500	1595		-6.93	21.15	29.78	29.78		-7.89	21.89	30.59	12.71

Tab. 5: Vliv nadmořské výšky na porovnávané DEM

4.4 Sklonitost

Se zvyšující se sklonitostí přesnost obou modelů klesá (tab. 6). V oblastech se sklonem do 10° se oba modely ve všech lokalitách z hlediska kritéria 90% chybovosti vejdou do 10 m. V Alpách je 10 m překročeno až ve sklonitosti nad 30°, v Pyrenejích dokonce až ve sklonech větších než 40°. V Tatrách je naopak překročeno 10 m už při sklonech nad 10°. Ve sklonech nad 40° začínají oba modely podhodnocovat s výjimkou Pyrenejí, ale u TanDEM-X je tento trend mnohem výraznější. RMSE vychází líp u SRTM, NMAD naopak u TanDEM-X kromě poslední kategorii největších sklonů.

TanDEM-X											
Sklonitost (°)	Počet buněk	Lokalita	DTM				Lokalita	DSM			
			ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)		ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
<10	17655	ALP	-0.02	8.99	6.62	1.62	ALP	-1.19	8.75	5.56	1.31
10-20	60456		1.07	15.14	8.96	3.28		-0.59	14.68	5.64	2.46
20-30	111720		1.97	21.86	12.95	4.98		-0.67	21.23	7.31	3.42
30-40	120455		2.21	32.81	17.95	7.03		-0.94	32.18	12.27	4.77
>40	91690		15.16	83.17	93.08	15.06		17.07	83.03	92.88	12.51
<10	13065	CRP	5.26	8.55	14.71	4.68	CRP	0.96	4.78	5.72	1.64
10-20	34512		8.64	12.20	19.71	9.47		2.32	7.26	10.51	3.51
20-30	31729		9.04	14.29	21.35	11.09		1.89	9.29	11.16	4.98
30-40	29645		6.51	17.27	21.58	10.16		0.49	14.07	11.45	5.88
>40	10786		27.54	74.62	107.97	15.63		28.88	74.50	107.79	14.06
<10	142207	PYR	0.08	5.03	4.10	1.34	PYR	-0.98	4.82	3.35	1.02
10-20	294771		1.40	8.42	6.90	3.37		-1.38	7.80	4.65	2.01
20-30	306358		2.63	10.36	10.39	5.07		-1.42	9.12	6.09	2.77
30-40	186798		3.72	17.46	14.30	6.86		-1.00	16.16	8.04	3.71
>40	39571		-1.70	48.77	38.16	11.22		-5.26	48.33	38.79	8.64

SRTM											
Sklonitost (°)	Počet buněk	Lokalita	DTM				Lokalita	DSM			
			ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)		ME (m)	RMSE (m)	LE90 (m)	NMAD (m)
<10	17655	ALP	0.80	6.03	7.10	2.71	ALP	-0.37	5.75	6.03	2.43
10-20	60456		1.86	5.77	9.39	4.46		0.20	4.66	7.02	3.53
20-30	111720		2.72	7.24	11.70	5.92		0.09	5.58	8.29	4.43
30-40	120455		3.08	9.70	14.93	7.98		-0.08	7.94	11.40	6.08
>40	91690		-0.48	22.92	28.06	13.89		-2.39	22.43	27.11	12.29
<10	13065	CRP	3.50	7.11	12.39	6.34	CRP	-0.81	5.24	8.68	3.27
10-20	34512		5.72	9.37	15.98	8.38		-0.60	7.10	11.67	5.35
20-30	31729		5.90	10.42	17.24	9.27		-1.25	7.82	12.59	6.73
30-40	29645		3.99	11.01	17.78	10.32		-2.03	8.72	13.54	7.29
>40	10786		-1.25	21.71	29.85	13.68		-2.59	21.81	29.99	12.13
<10	142207	PYR	1.16	6.40	5.79	2.35	PYR	0.09	6.05	5.14	2.19
10-20	294771		1.68	6.80	8.01	4.19		-1.10	6.07	6.81	3.57
20-30	306358		2.76	9.54	11.29	5.93		-1.29	8.31	8.85	4.80
30-40	186798		4.31	13.81	15.29	7.81		-0.41	12.14	11.43	6.16
>40	39571		3.55	25.17	27.87	12.88		-0.01	24.24	26.84	11.52

Tab. 6: Vliv sklonitosti na porovnávané DEM

5 Diskuze

Oba řešené DEM byly už několikrát evaluovány, a to jak z globálního hlediska, tak i pro menší lokality. Vzhledem k tomu, že většina uváděných autorů validovala vzhledem k DTM, nebo nebyla dostatečně specifická, jsou v diskuzi uváděny výsledky vůči DTM. Rodriguez et al. (2006) se při srovnání vertikální přesnosti SRTM vůči GPS měření na různých kontinentech dostali na hodnotu RMSE mezi 8 až 10 m. Tato validační měření byla získána díky GPS měření z pohybujících se vozidlech a jednalo se tedy o terén, který nebyl topograficky složitý. Wessel et al. (2018) podobným způsobem hodnotili i přesnost pro TanDEM-X, kdy RMSE vyšla 1,29 m. V této práci hodnoty RMSE pro TanDEM-X vychází 17,80 – 46,53 m a pro SRTM 11,81 – 13,27 m. Především u TanDEM-X jsou hodnoty RMSE výrazně vyšší než hodnoty dosažené ve studii Wessel et al. (2018), nicméně je třeba vzít v potaz, že se jedná o porovnání údajů s výrazně odlišnou topografií, a tudíž není až tak překvapivé.

Validací DEM na menších lokalitách se zabývali Hawker et al. (2019), kteří porovnávali přesnost modelů MERIT, SRTM a TanDEM-X v rozlišení 90 m na údolních nivách. Výsledné RMSE bylo pro TanDEM-X 3,10 m a RMSE pro SRTM 3,91 m. Grohmann (2018) při hodnocení přesnosti sedmi lokalit v Brazílii dospěl k závěru, že RMSE pro SRTM vycházela 3,11 - 8,24 m a pro TanDEM-X 0,98 - 7,15 m. Uuema et al. (2020) při porovnání lokalit v Estonsku, Číně, na Novém Zélandu dospěli k výsledkům RMSE pro TanDEM-X 7,16 - 15,05 m a u SRTM 6,59 - 13,07 m. Tyto hodnoty korespondují s výsledky získanými v této práci pro SRTM, ale TanDEM-X vychází podstatně hůře.

Hodnocení přesnosti SRTM ve vysokohorském prostředí (konkrétně v Himalájích) se zabývali Mukherjee et al. (2013) a jako výslednou hodnotu uvádí RMSE 17,76 m. Mimo to dospěl k závěru, že spolu zvyšující se nadmořskou výškou klesala i přesnost. V této práci to až s drobnými výjimkami platí pro porovnání s DSM. V případě DTM nejprve RMSE stoupá, ale mezi 1200 – 1600 m n. m. v Itálii i na Slovensku klesne. V Pyrenejích je tento pokles znatelný až v následující kategorii, což je způsobeno tím, že má posunutou hranici lesa přibližně o 200 m proti ostatním lokalitám. V dalších kategoriích se pak RMSE zase zvyšuje. Největší vliv na přesnost v těchto lokalitách měla sklonitost. První zlom nastává u sklonitosti kolem 10°, což potvrzují i další autoři (Wessel et al., 2018; Kolečka et Kozak, 2014; Hawker et al. 2019). Nikdo z nich ale nehodnotil tak strmé svahy jako jsou hodnoceny v této práci.

Gdulová et al. (2020) popsali, že LE90 nad 40° strmě narůstá, což odpovídá výsledkům v této práci.

Z hlediska krajinného pokryvu je u obou hodnocených modelů patrný větší vliv vegetačního pokrytí než samotné rozdíly mezi modely. Chybovost modelů se sice liší v hodnotách, ale trend rozložení hustoty je podobný. Výjimkou jsou Tatry, kde rozdíl mezi DTM a TanDEM-X je výraznější než u SRTM.

Při porovnání NMAD a RMSE je vidět, že přestože TanDEM-X dosahuje vyšších hodnot RMSE než SRTM, tak naopak NMAD má lepší TanDEM-X. Při vizuálním porovnání rozložení chyb pro TanDEM-X a SRTM je také vidět, že je celkově TanDEM-X přesnější. Zároveň ale mezi SRTM a TanDEM-X dají vysledovat problematické lokality a nabízí se otázka, zda je metoda radarového snímání pro tyto lokality vhodná a jestli by nebylo dobré udělat srovnání také s jiným modelem vytvořeným pomocí optického snímání (ASTER GDEM, AW3D30).

6 Závěr

Ve třech vysokohorských lokalitách byly s referenčními daty porovnány dva volně dostupné DEM TanDEM-X a SRTM v rozlišení 90 m. Oba modely mají dle očekávání lepší výsledky při porovnání s DSM než s DTM. Na přesnost modelů v komplexním terénu vysokých hor má největší vliv sklonitost terénu. Výsledky ukazují, že na jednotlivých lokalitách je z hlediska RMSE přesnější než SRTM, ale je zatížen vyšší koncentrací odlehlých hodnot, jejichž odstranění vyžaduje další úpravy modelu. Zatímco v případě SRTM proběhlo již několik doplnění a jeho přesnost se díky těmto úpravám zlepšila. TanDEM-X je zatím dostupný jen v první verzi a k jeho zpřesnění musí teprve dojít. K tomu je třeba tušit, kde se problematická místa s nízkou přesností nacházejí.

7 Přehled literatury a použitých zdrojů

Büdeler R., 2003: Pyreneje 1. 1. vydání, Praha. Freytag&berndt. ISBN 80-7316-091-9.

Cama M., Schillaci C., Kropáček J., Hochschild V., Bosino A., Maerker M. 2020: A Probabilistic Assessment of Soil Erosion Susceptibility in a Head Catchment of the Jemma Basin, Ethiopian Highlands. *Geosciences*. 10, 248.

CNIG ©2020: Centro de Descargas – Digital Elevation Models (online) [cit. 2021.02.22], dostupné

z: http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/locale?request_locale=en.

Copernicus, 2021: Copernicus Land Monitoring Service – Corine Land Cover (online) [cit. 2021-02-22], dostupné z <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.

DLR, 2020: Congratulations, TanDEM-X – 10 years od 3D mapping from space (online) [cit. 2021.02.22], dostupné

z: https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2020/02/20200625_congratulations-tandem-x-ten-years-of-3d-mapping-from-space.html

DLR, 2021: The TanDEM-X 90 m Digital Elevation Model (online) [cit. 2021.02.22], dostupné z: <https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/>

El-Sheimy N., Valeo C., Habib A., (2005): Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications. Artech House.

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* 45 (3-4), 33.

Favalli M., Fornaciai A., Pareschi M.T., 2009, LIDAR strip adjustment: Application to volcanic areas, *Geomorphology* 111 (3–4), 123-135.

Fitzsimons S., Veit H. 2001: Geology and Geomorphology of the European Alps and the Southern Alps of New Zealand: A Comparison. *Mountain Research and Development* 21(4), 340-349.

Gdulová K., Marešová J., Moudrý V., 2020: Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment, *Remote Sensing of Environment*, 241, 111724.

GKÚ Bratislava ©2021: Geoportál – ZBGIS a ŠMD, Letecké laserové skenovanie a DMR 5.0 (online). [cit. 2021.02.22], dostupné z: <https://www.geoportal.sk/sk/udaje/lis-dmr/>.

Gojda M. 2006: Zaniklá krajina – pohled z výšky, *Laserový skener v archeologii, Vesmír* 85, 614.

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

Halounová L., Pavelka K, 2008: Dálkový průzkum Země. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 193.

Hampacher M., Radouch V., 2003: Teorie chyb a vyrovnávací počet 10. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 159.

Hawker L., Bates P., Neal J., Rougier J., 2018: Perspectives on Digital Elevation Model (DEM) Simulation for Flood Modeling in the Absence of a High-Accuracy Open Access Global DEM, *Frontiers in Earth Science* 6, 1-9.

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*, 232, 111319.

Herndon K., Meyer F., Flores A., Cherrington Kucera L., 2020: What is Synthetic Aperture Radar. (online) [cit. 2021.22.2], dostupné z: <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>.

Hodgson M., Jensen J., Raber G., Tullis J., Davis B., Thompson G., Schuckman, K. 2005: An Evaluation of Lidar-derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71.

Höhle, J., Potuckova, M., 2006: The EuroSDR test checking and improving of digital terrain models, In: EuroSDR Official Publication no. 51. ISBN 9789051794915

Höhle J., Höhle M., 2009: Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (4), 398-406.

Hutchinson M. F., Gallant J. C., 2000: Representation of terrain. In: Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. (eds.): *Geographical Information Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, 105-24.

INVA ©2018 – GeoPortale SCT (online). [cit. 2021.02.22], dostupné z: <https://geoportale.regione.vda.it/>

Klimánek M., 2008: *Digitální modely terénu*. Dotisk. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. ISBN 978-80-7157-982-3.

Kolecka N., 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.

Král V., 1999: *Fyzická geografie Evropy*. Praha: Academia. ISBN 80-200-0684-2, 131–165.

Krieger G., Zink M., Bachmann M., Bräutigam B., Schulze D., Martone M., Hajnsek I., 2013: TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica*, 89, 83-98.

Kropáček J., Moravec D., Komárek J., 2020: *Dálkový průzkum – I, verze 1.3*, Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.

Li Z., Zhu Q., Gold Ch., 2005: *Digital Terrain modeling: Principles and Methodology*. CRC Press, Florida.

Moudrý V., Šimová P., 2012, Influence of positional accuracy, sample size and scale on modelling species distributions: a review, *International Journal of Geographical Information Science*, 26 (11), 2083-2095.

Moudrý V., Lecours V., Gdulová K., Gábor L., Moudrá L., Kropáček J., Wild J., 2018: On the use of global DEMs in ecological modelling and the accuracy of new bare-earth DEMs, *Ecological Modelling*, 383 (18), 3-9.

- 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.
- NASA, ©2015: The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Collection User Guide. 17.
- Nelson A, Reuter H.I., Gessler P., 2008: DEM Production Methods and Sources. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science* 33, Elsevier, 772.
- Ouchi K., 2013: Recent Trend and Advance of Synthetic Aperture Radar with Selected Topics. *Remote Sensing* 5 (2), 716-807.
- Paranunzio R., Laio F., Chiarle M., Nigrelli G., Guzzetti F.: 2016: Climate anomalies associated with the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16, 2085-2106.
- Pavelka K., 2003: *Fotogrammetrie 20. České vysoké učení technické v Praze, Praha*, 193.
- Perko R., Raggam H., Deutscher J., Gutjahr K., Schardt M., 2011: Forest Assessment Using High Resolution SAR Data in X-Band. *Remote Sensing* 3 (4), 792-815.
- Pike R.J., Evans I.S. Hengl T., 2008: DEM Production Methods and Sources. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science* 33, Elsevier, 772.
- Rabus B., Eineder M., Roth 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 (4), 241 – 262.
- 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*, 132, 119-39.
- Rodriguez E., Morris C.S., and Belz, J.E., 2006: A global assessment of the SRTM performance, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72 (3), 249–260.

Sampson, C.C., Smith, A.M., Bates, P.D., Neal, J.C., Alfieri, L., Freer, J.E., 2015: A high resolution global flood hazard model. *Water Resour. Res.* 51 (9), 7358-7381.

Smith S.E., 2005: Topographic mapping. In Grunwald, S. (ed.) *Environmental Soil-Landscape Modeling, Geographic Information Technologies and Pedometrics*, CRC Press, 504.

Šlégr J., 2002: *Světová pohoří: přehledové i podrobné mapy, turistické trasy, alpinismus, sport, fauna a flóra, podnebí, Evropa*, Knižní klub, Praha, 176 ISBN 80-242-0822-9

Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A., 2011. Characteristics of ASTER GDEM version 2. In: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, pp. 3657-3660.

TANAP, ©2012: *Tatranský národní park TANAP* (online). [cit. 2021.02.22]. Dostupné z: <http://spravatanap.sk/web/index.php>.

Uuemaa, E.; Ahi, S.; Montibeller, B.; Muru, M.; Kmoch, A, 2020: Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing*, 12 (21) 3482.

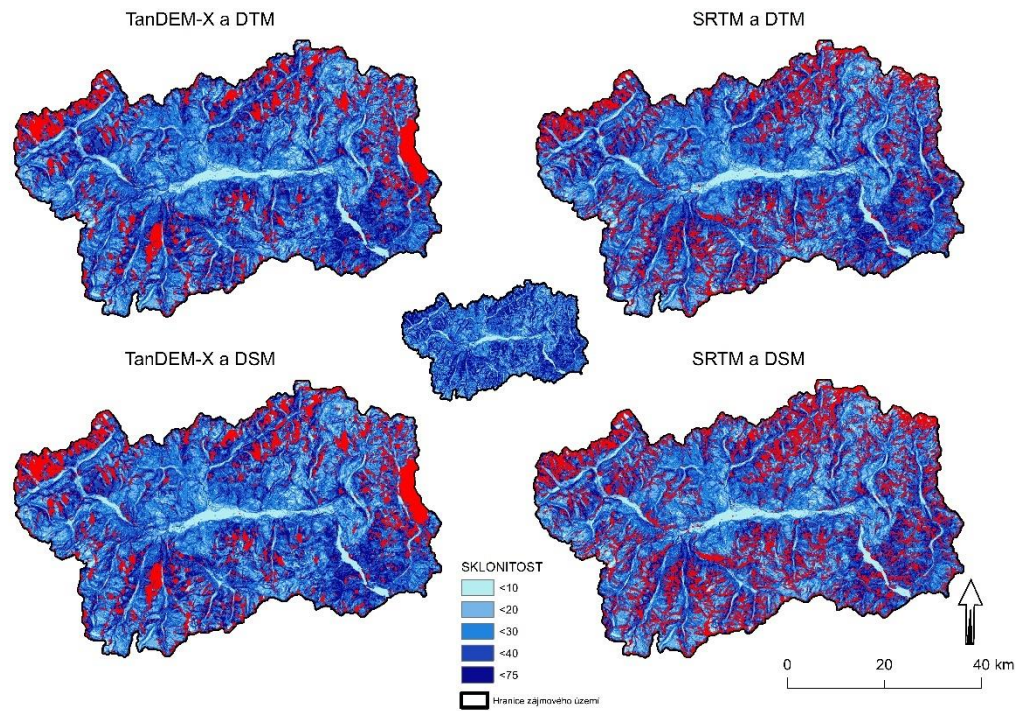
VÚGTK, ©2005: *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí*. (online). [cit. 2021.02.22]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník/>.

Wessel B., Huber M., Wohlfart Ch., 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* 139, 171-182.

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* 44 (11), 5844-5853.

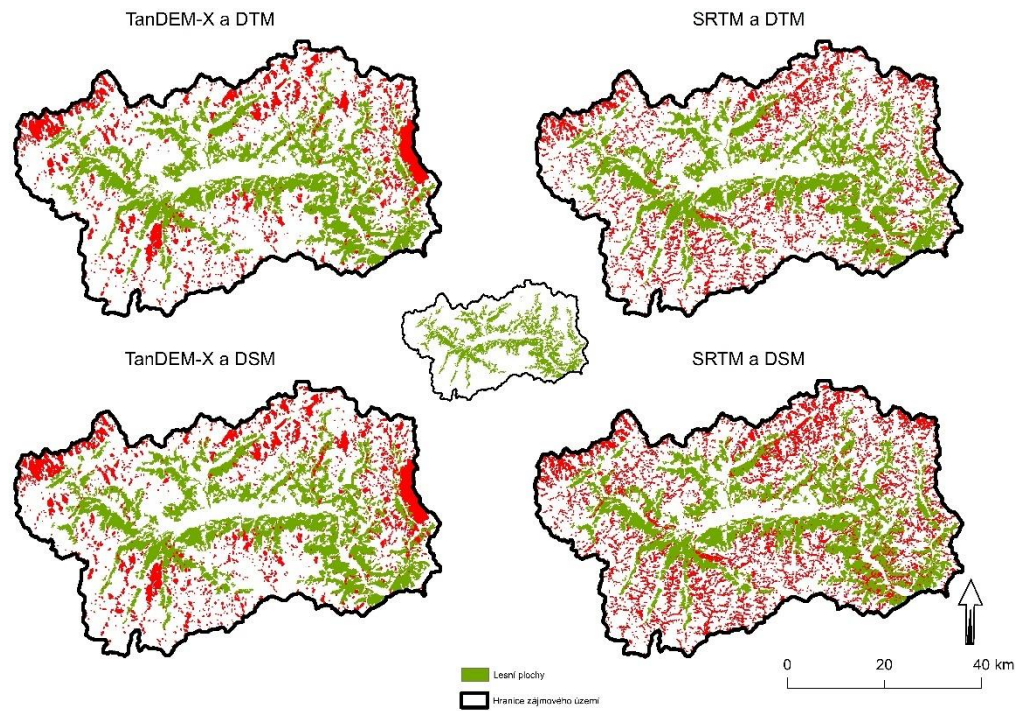
8 Přílohy

PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ LE90 V KONTEXTU SKLONITOSTI TERÉNU V ALPÁCH



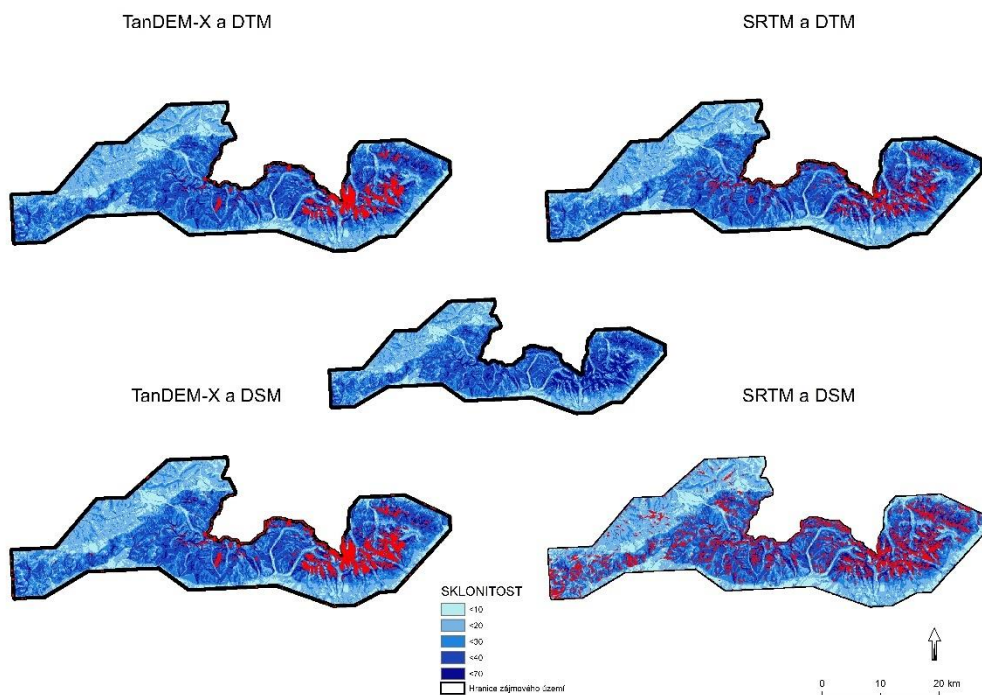
Příloha 1: Polohové rozložení 10 % největších odchylek v kontextu se sklonitostí svahů

PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ LE90 V KONTEXTU VEGETAČNÍHO KRYTU V ALPÁCH



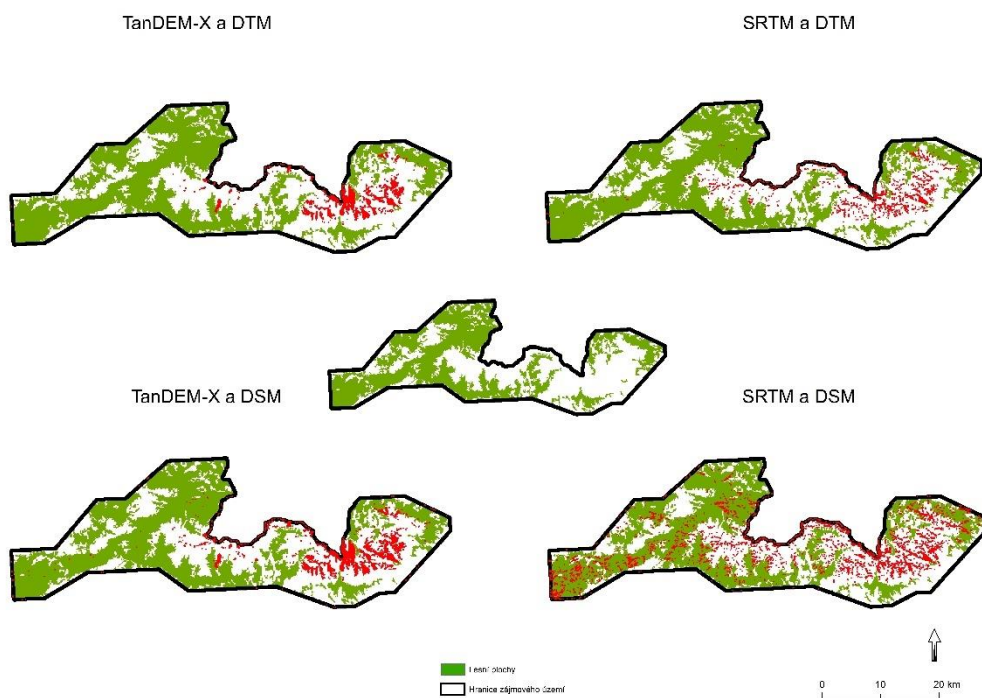
Příloha 2: Polohové rozložení 10 % největších odchylek v kontextu vegetace

PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ LE90 V KONTEXTU SKLONITOSTI TERÉNU V TATRÁCH



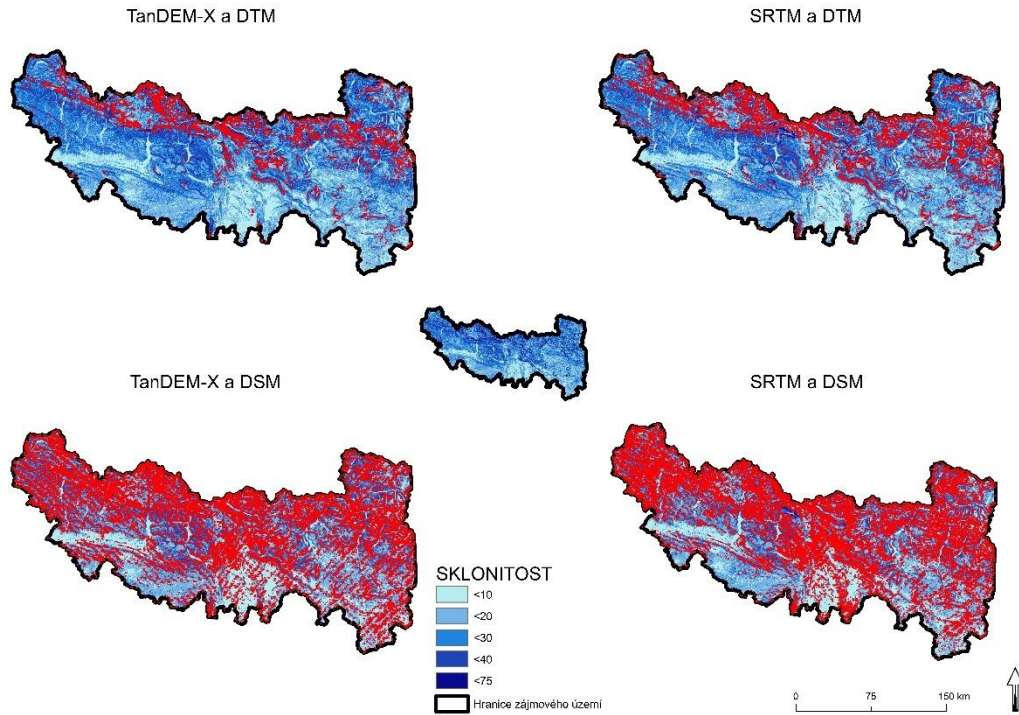
Příloha 3: Polohové rozložení 10 % největších odchylek v kontextu se sklonitostí svahů

PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ LE90 V KONTEXTU VEGETAČNÍHO KRYTU V TATRÁCH



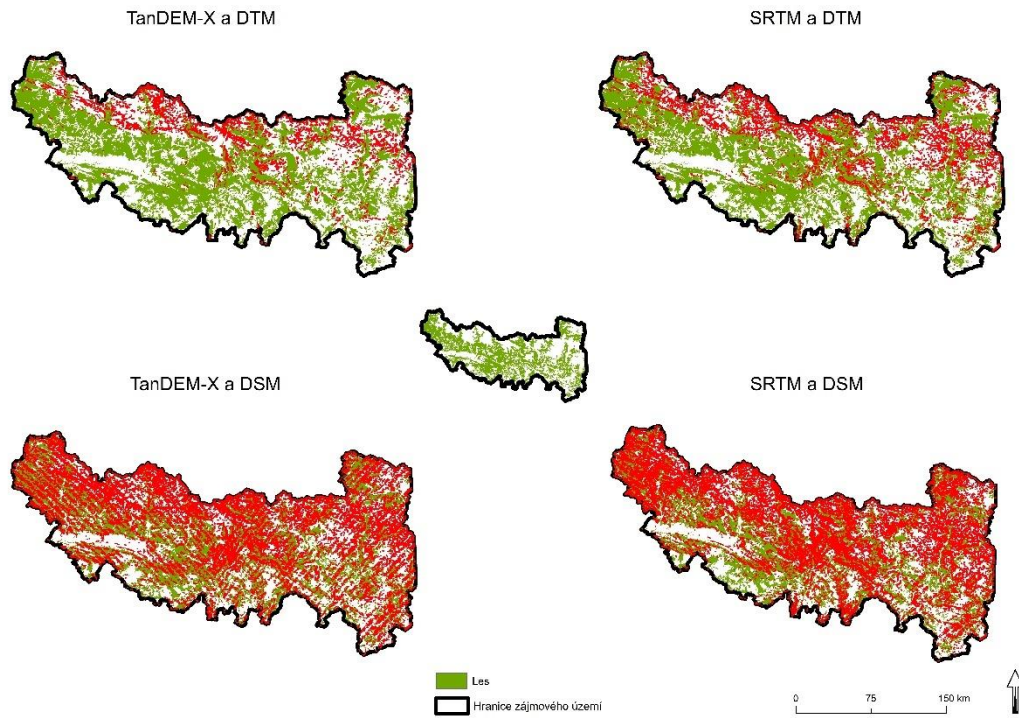
Příloha 4: Polohové rozložení 10 % největších odchylek v kontextu vegetace

PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ LE90 V KONTEXTU SKLONITOSTI V PYRENEJÍCH



Příloha 5: Polohové rozložení 10 % největších odchylek v kontextu sklonitosti svahů

PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ LE90 V KONTEXTU VEGETAČNÍHO KRYTÍ V PYRENEJÍCH



Příloha 6: Polohové rozložení 10 % největších odchylek v kontextu vegetace