

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

Zhodnocení přesnosti TanDEM-X DEM a odvozených
hydrologických charakteristik

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Kateřina Gdulová

Bakalant: Jiří Rous

2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Rous

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Zhodnocení přesnosti TanDEM-X DEM a odvozených hydrologických charakteristik

Název anglicky

Accuracy assessment of the TanDEM-X DEM and derived hydrological characteristics

Cíle práce

Cílem práce je posoudit kvalitu digitálního modelu terénu TanDEM-X v horském prostředí německé strany Krušných hor.

Hlavním cílem je porovnání přesnosti modelu s dalšími volně dostupnými globálními digitálními modely Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) a MERIT a s digitálním modelem vytvořeným z laserového skenování Krušných hor, který je pro účely práce považován za referenční.

Metodika

Digitální modely terénu (DTM) jsou zásadním zdrojem informací pro různé prostorové analýzy. Zatímco v některých oblastech jsou pro tento účel dostupná data leteckého laserového skenování, v globálním měřítku je dostupnost o poznání horší. V nedávné době byl vytvořen globální model terénu TanDEM-X, jehož přesnost v různých typech terénu není dosud podrobně prozkoumána.

Práce zkoumá přesnost ze dvou hledisek, které jsou v práci popisovány zvlášť. První část porovnává nadmořské výšky z hlediska výškové zonace a sklonu. Druhá část pak porovnává vygenerovanou říční síť a její charakteristiky.

Doporučený rozsah práce

30

Klíčová slova

TanDEM-X, SRTM, MERIT, LiDAR, Hydrologie, GIS, DPZ

Doporučené zdroje informací

- Falorni, G., Teles, V., Vivoni, E. R., Bras, R. L., & Amaratunga, K. S. (2005). Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F2).
- Murphy, P. N., Ogilvie, J., Meng, F. R., & Arp, P. (2008). Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(12), 1747-1754.
- Nagaveni, C., Kumar, K.P. & Ravibabu, M.V. (2019). Evaluation of TanDEMx and SRTM DEM on watershed simulated runoff estimation. *J Earth Syst Sci* 128, 2 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s12040-018-1035-z>
- 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.
- Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschalk, U., Kosmann, D., & Roth, A. (2018). Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139, 171-182.

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Kateřina Gdulová

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 2. 2021

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 09. 03. 2021

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: Zhodnocení přesnosti TanDEM-X DEM a odvozených hydrologických charakteristik vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

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

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

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

V Praze dne

.....

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Kateřině Gdulové za vedení této práce a své rodině a přítelkyni za trpělivost a pochopení nejen při psaní, ale i během celého studia.

Abstrakt: TanDEM-X DEM je nový volně dostupný globální výškový model s velmi vysokou horizontální i vertikální přesností. Ačkoliv se jedná spíše o model povrchu, je z důvodu nedostatku přesnějších modelů, zejména v rozvojových zemích, využíván jako model terénu pro hydrologické modelování. Tato práce si klade za cíl zhodnotit vertikální přesnost TanDEM-X DEM v horském prostředí, vyhodnotit jeho vhodnost pro hydrologické analýzy a identifikovat, jak tuto přesnost ovlivňuje sklon svahu a nadmořská výška. TanDEM-X DEM byl validován ve dvou dostupných rozlišeních (12 a 90 m) a porovnán s dalšími volně dostupnými modely SRTM a MERIT v rozlišení 90 m. Evaluace přesnosti byla provedena porovnáním s velmi přesným digitálním modelem terénu získaným leteckým laserovým skenováním. TanDEM-X dosahuje vertikální přesnosti LE90 18.68 m pro 90metrovou variantu, a jen mírně horší přesnosti 20.68 m pro variantu 12metrovou. Nepatrně lepší vertikální přesnosti LE90 15.46 m dosahuje model SRTM. MERIT DEM převyšuje zbylé modely svou vysokou přesností LE90 9.54 m. Sklon je významným faktorem, který negativně ovlivňuje vertikální přesnost. Na svazích se sklonem pod 10° dosahuje TanDEM-X MAE 6.52 m, do 20° 10.99 m a do 30° dokonce 14.87 m. Ostatní digitální modely se chovají podobně. Pro odvození hydrologických charakteristik se jako nejpodstatnější jeví prostorové rozlišení modelů. Přesnější model generuje lepší výsledky, a proto je TanDEM-X DEM, který dosahuje srovnatelné vertikální přesnosti ve svém ojedinělém 12metrovém rozlišení, jako ostatní modely v rozlišení 90 m, výrazným posunem vpřed. TanDEM-X ve 12metrové variantě lze jednoznačně doporučit pro hydrologické analýzy a lze jen doufat v postupné uvolnění tohoto rozlišení i pro širokou veřejnost.

Klíčová slova: TanDEM-X, SRTM, MERIT, LiDAR, Hydrologie, GIS, DPZ

Abstract: TanDEM-X DEM is a new freely available global elevation model with very high horizontal and vertical accuracy. Although it is more of a surface model, it is used as a terrain model for hydrological modelling due to the lack of more accurate models, especially in developing countries. This work aims to evaluate the vertical accuracy of TanDEM-X DEM in the mountain environment, evaluate its suitability for hydrological analysis and identify how this accuracy is affected by the slope and the altitude. TanDEM-X DEM was validated in two available resolutions (12 and 90 m) and compared with other freely available SRTM and MERIT models in 90 m resolution. Accuracy evaluation was performed by comparison with a very accurate digital terrain model obtained by aerial laser scanning. TanDEM-X achieves a vertical accuracy of LE90 18.68 m for the 90-meter version, and only slightly worse accuracy of 20.68 m for the 12-meter version. The SRTM model achieves slightly better vertical accuracy of LE90 15.46 m. MERIT DEM outperforms the remaining models with its high accuracy of LE90 9.54 m. Slope is a significant factor that negatively affects vertical accuracy. On slopes below 10°, TanDEM-X MAE reaches 6.52 m, up to 20° 10.99 m and up to 30° even 14.87 m. Other digital models have similar trends. The spatial resolution of the models seems to be the most important for the derivation of hydrological characteristics. The more spatially accurate model generates better results, that is why the TanDEM-X DEM, which achieves comparable vertical accuracy in its unique 12-meter resolution as other 90 m models, is a significant step forward. TanDEM-X in the 12-meter variant can be unequivocally recommended for hydrological analyses and we can only hope for the release of this resolution for the general public.

Key words: TanDEM-X, SRTM, MERIT, LiDAR, Hydrology, GIS, Remote Sensing

OBSAH

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE	1
2	LITERÁRNÍ REŠERŠE	3
2.1	Digitální modely	3
2.2	Metody sběru dat pro DEM.....	3
2.3	Workflow tvorby říční sítě	6
3	METODIKA	8
3.1	Zájmové území	8
3.2	Charakteristika výškových modelů	9
3.3	Validační data.....	10
3.4	Předzpracování dat	11
3.5	Zpracování dat pro modelování říční sítě.....	12
3.6	Evaluace výškové přesnosti.....	15
4	VÝSLEDKY	17
4.1	Nadmořská výška	17
4.2	Sklon.....	19
4.3	Hydrologické charakteristiky	21
5	DISKUSE.....	23
6	ZÁVĚR	26
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	27
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	31
9	PŘÍLOHY	32
9.1	Příloha č. 1	32

SEZNAM ZKRATEK

DEM – Digital elevation model

DInSAR – Diferenční radarová interferometrie

DPZ – Dálkový průzkum Země

DSM – Digital surface model

DTM – Digital terrain model

IMU – Inertial Measurement Unit

LiDAR – Light Detection and Ranging

MAE – Mean Absolute Error

MERIT – Multi-Error-Removed Improved-Terrain

RADAR – Radio Detection And Ranging

RMSE – Root Mean Square Error

SAR – Synthetic Aperture RADAR

SLAR – Side-looking airborne radar

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Dálkový průzkum Země (DPZ) se v posledních letech stal nedílnou součástí pozorování změn probíhajících na planetě Zemi. Má velmi široké spektrum využití a mnoho oborů by bez něj nedokázalo fungovat v takové míře, jako je nyní standardem. Nespornou výhodou dálkového průzkumu Země je rychlost, kterou data dokážeme získat, a především rozsáhlé území, které je možno během relativně krátkého časového úseku obsáhnout.

Jedním ze sensorů využívaných v dálkovém průzkumu jsou radary. Radar je zařízení využívající radiových vln ke zkoumání povrchu Země. Výhodou radarů je nezávislost na denní době a počasí. Odpadá tak nutnost výběru snímků bez stínů a oblačnosti. Nejen proto se radové snímání stalo oblíbeným nástrojem pro tvorbu digitálních výškových modelů, které jsou důležitým podkladem pro nepřeborné množství environmentálních analýz.

Digitální výškové modely se v posledních dvaceti až třiceti letech stávají nedílnou součástí výzkumu a plánování v oblasti geomorfologie, klimatologie, územního plánování, zemědělství, mapování vegetace či pro plánování letů. Jednotlivé země používají jednak vlastní regionální výškové modely, například DMR5G produkovaný Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK), které jsou limitovány hranicemi, tak globální výškové modely. V současnosti patří mezi nejpoužívanější globální modely Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), který vznikl v roce 2000 s teoretickou výškovou přesností 16 metrů. Zásadním omezením pro mnohé aplikace, zejména v hydrologii, je fakt, že v oblastech s hustou vegetací SRTM nereprezentuje terén, ale spíše povrch vegetace. V roce 2017 představil tým Dai Yamazakiho z Tokijské univerzity upravený model SRTM a AW3D pojmenovaný Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM (MERIT DEM), který mimo jiné eliminuje chyby způsobené výškou vegetace. Výšková přesnost MERIT DEM je odhadována na 12 metrů (Yamazaki, et al., 2017). Zatím posledním příspěvkem do rodiny globálních výškových modelů je TanDEM-X DEM, který je produktem kooperace Německého vesmírného centra (DLR) a skupiny Airbus Defence & Space, jež byla zodpovědná za vývoj a výrobu satelitů (Wessel, 2018). Hlavním posláním projektu TanDEM-X bylo vytvoření velmi přesného výškového modelu, který bude globálně dostupný. Nejpresnější model odvozený z TanDEM-X má prostorové rozlišení 12 metrů, výškovou přesnost pak 10 metrů. Tato přesnost je pro určité analýzy bohužel

příliš malá. Lepšího horizontálního rozlišení lze v tuto chvíli za využití radarových snímků jen obtížně dosáhnout a provádí se pouze pro experimentální studie na lokální úrovni.

Alternativní metodou, která je využívána zejména pro tvorbu velmi přesných výškových modelů je laserové skenování – LiDAR. Laserové skenování probíhá obvykle z podstatně nižších výšek za využití letadel nebo vrtulníků a zabírá výrazně menší oblasti. Nedá se tedy mluvit o tvorbě globálních modelů, neboť náklady na jejich pořízení by byly enormní. Primární využití je pro tvorbu výškových modelů velmi vysokého rozlišení (např. 1 m) pro lokální analýzy. Sekundárně jsou tyto modely využívány k validaci méně přesných globálních modelů (Hawker, et al., 2019), (Vassilaki, et al., 2020).

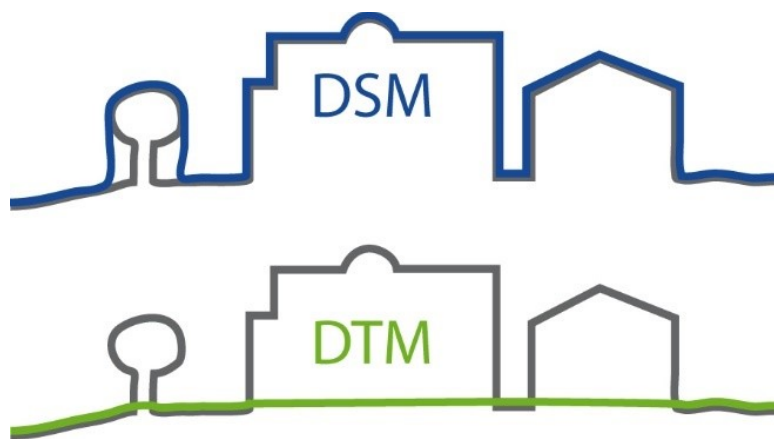
Tato práce se věnuje ověření přesnosti globálních výškových modelů. Cílem práce je posoudit vertikální přesnost digitálního modelu terénu TanDEM-X v 90 a 12metrové variantě v horském prostředí německé strany Krušných hor za použití velmi přesného referenčního DTM. Cílem je také porovnat výsledky s dalšími volně dostupnými modely SRTM a MERIT. První část je zaměřena na porovnání vertikální chyby v horském převážně zalesněném prostředí. Evaluace přesnosti je prováděna s ohledem na nadmořskou výšku a sklon terénu. Porovnávají jsou čtyři dostupné modely (SRTM DEM, MERIT DEM a TanDEM-X DEM 90 m) s digitálním modelem terénu odvozeným z laserového skenování. Jak již bylo naznačeno výše, radary použité ke skenování a následnou tvorbu DEM disponovaly sensory o vlnových délkách v pásmech C a X. Paprsky tak neprostoupily vegetací až na terén, což může zásadně ovlivnit hydrologické analýzy s modely prováděné (Farooq, et al., 2019). Proto se druhá část práce věnuje evaluaci odvozených hydrologických charakteristik a vhodnosti využití jednotlivých modelů pro hydrologické analýzy. Pro každý model je vygenerována říční síť. Odvozené charakteristiky jako je délka toku, velikost povodí nebo řád toku jsou porovnávány s říční sítí odvozenou z laserového skenování s rozlišením 2 metry.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 Digitální modely

Poprvé se začaly digitální výškové modely využívat již kolem roku 1950 pro automatické generování vrstevnicové sítě a kartografické účely. V současnosti stále více nacházejí uplatnění v geografických informačních systémech. Jsou využívány pro modelování záplavových území při různé n-letosti povodně nebo pro plánování staveb vodních nádrží. Poskytují zjednodušení při analýze a zobrazení jevů souvisejících s topografií a reliéfem terénu (Klimánek, 2006).

V této práci budou striktně oddělovány tři základní termíny týkající se výškových modelů. Digital terrain model (DTM) – česky digitální model terénu, často se zkracující na DMT, popisuje čistý zemský povrch bez vegetace a zástavby. Digital surface model (DSM) – česky digitální model povrchu, DMP, popisuje povrch takový, jaký skutečně je. Zobrazuje lidské výtvořiny a povrch vegetace. Digital elevation model (DEM) – česky digitální výškový model, tedy DVM, je chápán jako obecný pojem. Popisuje 2,5D rastrový model vztažený k referenčnímu povrchu (Klimánek, 2006). Tento rozdíl je patrný z obrázku 1 níže.



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

2.2 Metody sběru dat pro DEM

2.2.1 Technologie pro tvorbu DEM

S ohledem na velikost řešeného území jsou používány různé technologie pro tvorbu DEM. V současnosti se nejčastěji jedná o radarové snímání, LiDARové snímání a optické snímání. Umístění radaru na družice umožnilo snímání rozsáhlých oblastí v relativně krátkém čase. LiDAR je nejčastěji umísťován do letadel nebo vrtulníků,

které nalétávají menší území. Je preferováno využití vrtulníku, který léta pomaleji a umožňuje tak skenovat terén s vyšší přesností (McLaughlin, 2006). Výhodou laserového skenování je vysoké rozlišení. Četnost využívání snižuje vysoká cena.

Pro opravdu malé území se často využívá optických sensorů umístěných na dronech. Pomocí technologie structure from motion je následně vytvořen výškový model. Ten není tolik přesný, nicméně pořizovací náklady jsou výrazně nižší (Andersen, et al., 2006). Podobně lze data z optických sensorů využít i pro tvorbu globálních výškových modelů, jako je například AW3D30 DEM, který byl vytvořen na základě optických snímků pořízených družicí ALOS (Tadono, et al., 2014).

2.2.2 Radarové snímání

K radarovému snímání se používá mikrovlnná část spektra. První experimenty s radiovými vlnami prováděl Heinrich Hertz již koncem 19. století. (Buchwald, et al., 2021). Stejně jako většina velkých vynálezů byl radar vyvíjen k vojenským účelům. V roce 1915 použil Robert Watson-Watt radiové technologie k časnému varování před náletem. Později vyvinul technologii, která pomohla Velké Británii zvítězit v bitvě o Británii, a byl za to povýšen do rytířského stavu (Sim, 2014).

Radary jsou aktivní systémy, které pomocí antény vysílají pulsy mikrovlnného záření. Záření se na zemském povrchu odrazí zpět k anténě. Při příjmu je měřena amplituda a fáze. Radar použitý pro dálkový průzkum je obvykle umístěn na družici nebo v letadle. Výhodou radarových systémů je, nezávislost na denní době a počasí, proto je možné snímat planetu i v noci. Další výhodou radiové vlny je schopnost pronikat pod některé povrchy. Tato schopnost závisí na povrchu, vlastnostech prostředí a na vlnové délce. Ta se u RADARu pohybuje mezi 3 milimetry a 1 metrem (Rapant, 2006).

Radarové snímání využívá dvou metod. Jedná se o radarovou altimetrii a interferometrii (Dobrovolný, 1998). Radarová altimetrie je metoda využívaná především k měření výšky hladiny oceánů, případně zaledněných oblastí. (Stammer, et al., 2017) V současné době dosahuje velmi vysoké přesnosti měření až v řádu centimetrů. Radarový altimetr funguje tak, že vysílá radiové pulsy ve směru nadiru. Stejná anténa pak signál přijímá. Jedná se o mikrovlnné záření, které se šíří konstantní rychlostí. Radar zaznamená interval zpoždění a intenzitu přijatého signálu. Ze zpoždění signálu se odečítá vzdálenost. Z vrácené intenzity lze odvodit informace

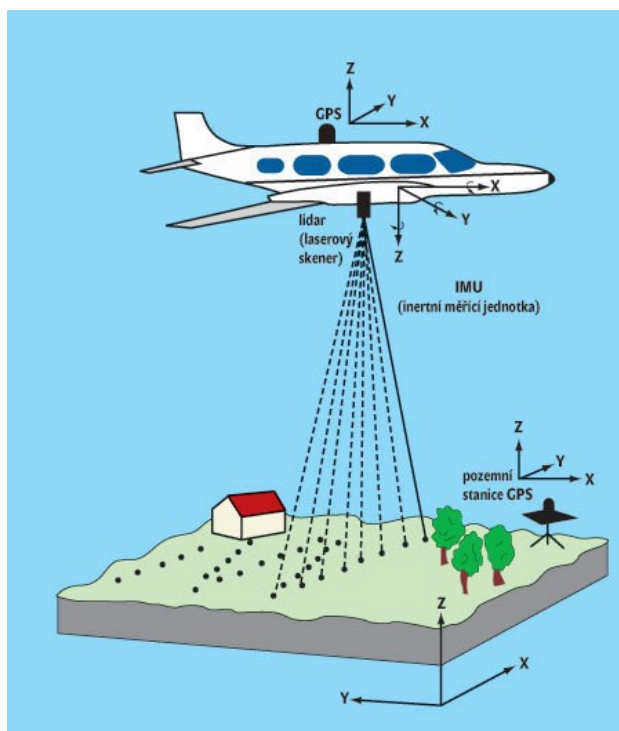
o odrazových vlastnostech a drsnosti povrchu. Tím získáme informaci nejen o výšce, nýbrž i o typu povrchu (Dobrovolný, 1998).

Radarová interferometrie je založena na získávání radarového echa ze dvou různých poloh družice, či letadla pro jeden bod na Zemi. Může být použita jedna družice, či konstelace více družic v tandemu, například německé TerraSAR-X a TanDEM-X. Výsledkem je interferogram pro určení relativních výškových rozdílů. Součástí této metody je diferenční radarová interferometrie (DInSAR). Využívá toho, že změna povrchu rozptylující signál se projeví jako další komponent fáze. (Dobrovolný, 1998)

2.2.3 LiDARové snímání

LiDAR podobně jako RADAR je zařízení využívající aktivní snímání. Je nezávislý na počasí a denní době (Andersen, et al., 2006) V posledních 20 letech se stává dostupnější a využívanější technologií. První systémy LiDAR byly používány na letadlech, později začaly být umísťovány na satelity a využívány k pozemnímu měření.

Laserové skenování probíhá nejčastěji z letadla, ve kterém se nachází několik zařízení zprostředkující samotné skenování (Obrázek 2). Jedná se hlavně o zdroj laserového paprsku, velmi přesné GPS, počítače a inertial measurement unit (IMU), tedy jednotky, která se skládá z gyroskopů a akcelerometru, které měří náklony a zrychlení. Princip spočívá ve vyslání laserového pulsu směrem k zemi, hodiny měří čas, za který se vrátí. Ze vzorce $d = \frac{c \cdot t}{2}$, kdy c je rychlost světla a t je čas mezi vysláním a přijetím pulsu, se vypočítá výška letadla nad terénem. Pozice a náklon letadla je znám. Tímto je určena pozice bodu odrazu, jeho souřadnice a nadmořská výška. Vzniká tak bodové mračno, které je následně klasifikováno. (Jaboyedoff, et al., 2012) Pro přesné určení polohy letadla se využívá satelitů a referenčních stanic na povrchu Země, kdy v ideálních podmínkách stačí jedna referenční stanice. Přesnost dosahuje až 5 cm (Baltsavias, 1999).



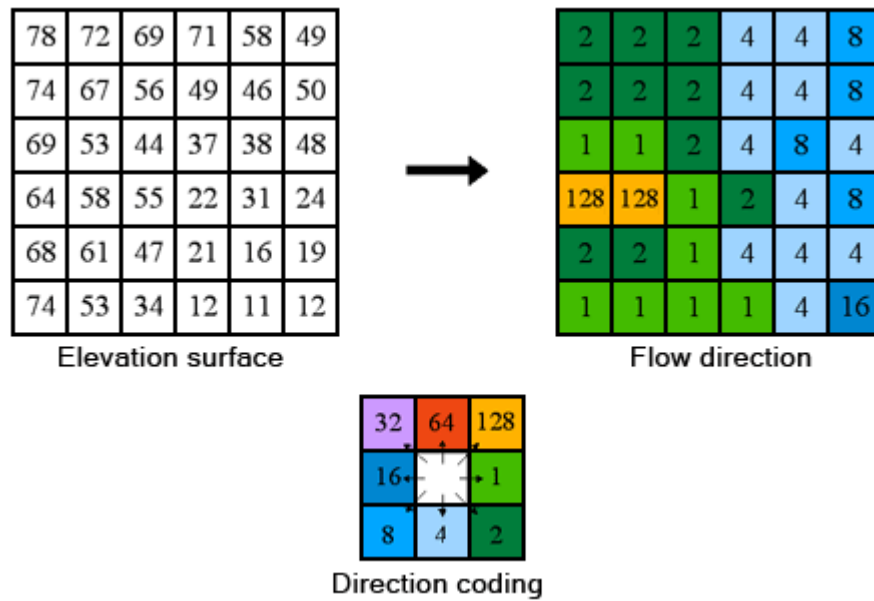
Obrázek 2: Princip fungování LiDARu (Gojda, 2006)

2.3 Workflow tvorby říční sítě

2.3.1 Flow direction

Flow direction je jedna z hydrologických charakteristik používaných pro zjištění směru toku. Tato charakteristika je získávána z digitálních výškových modelů terénu. Pro určení směru je třeba znát hodnotu výšky pro jednotlivé pixely rastru výškového modelu. Flow model je algoritmus, který určuje, s jakými sousedními pixely bude při výpočtu směru počítáno.

Nejčastěji využívaný model je D8 model, který popsal Jenson, et al., (1988). Tento způsob vypočítá sklon pro každou sousední buňku, horizontální, vertikální i diagonální. Sklon je počítán mezi středy každé buňky. Vzdálenost mezi horizontálně a vertikálně sousedními buňkami je tedy 1, mezi diagonálně sousedními 1,414 jako druhá odmocnina čísla 2. Maximální sklon se rovná rozdílu hodnot sousedních pixelů dělených jejich vzdáleností a vynásobený 100. Maximální sklon je poté vyznačen podle kódování, které je znázorněné v obrázku 3.



Obrázek 3: Kódování směru maximálního sklonu (ESRI, 2020)

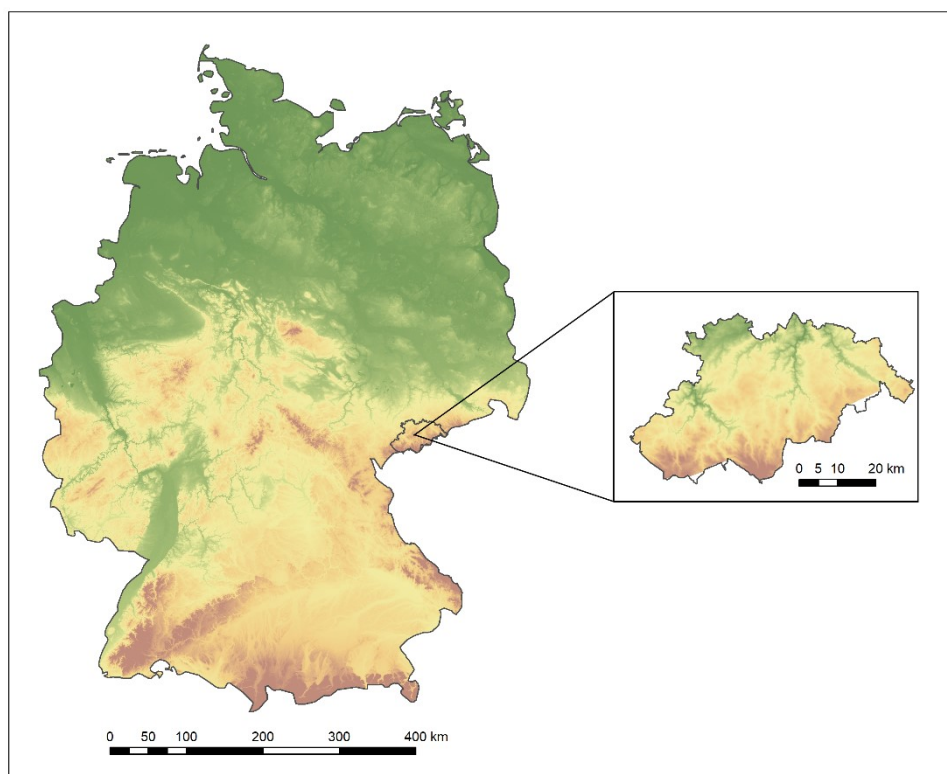
V případě, že je více výsledků stejných, algoritmus vyhodnotí pixely o úroveň dále. Buňka, která má nižší hodnotu než její okolní buňky, není považována za prohlubeň, nýbrž za chybu. Její hodnota je tedy nastavena na nejnižší hodnotu její sousední buňky. Model D8 považuje za prohlubeň dvě a více buněk, které mají shodnou hodnotu a zároveň je tato hodnota nižší než jejich okolní buňky. Nelze pro ně určit směr toku. Jedná se o single flow direction (SFD) model. Z každé buňky může voda odtékat pouze, a právě do jedné jiné. (Jenson, et al., 1988). D8 model bude používán v této práci.

3 METODIKA

3.1 Zájmové území

Zájmové území se nachází na německé straně Krušných hor, německy Erzgebirge. Oblast má rozlohu 1827 km². Krušné hory jsou kerné pohoří, které se táhne v západovýchodním směru na hranicích Ústeckého kraje v České republice a Saska v Německu. Na jižní straně po vyzvednutí kry vznikl zlom s 600 až 700 metrů vysokými svahy. Na německé straně klesají hory pozvolně do vnitrozemí. Nejvyšší vrchol německé strany je Fichtelberg s 1214 m. n. m (Britannica, 2011).

Toto území bylo vybráno primárně z důvodu, že jsou k dispozici volně dostupná data z provedeného laserového skenování využitelná pro tvorbu DTM. Tento velmi přesný model je použit jako referenční. Dalším důvodem je vhodnost prostředí. Terén je horského charakteru s velkým množstvím svahů a údolí. Tato heterogenita prostředí umožňuje analyzovat DEM z více úhlů pohledu.



Obrázek 4: Mapa zájmového území

3.2 Charakteristika výškových modelů

V této práci je využíváno tři volně stažitelných globálních výškových modelů. Jedná se o TanDEM-X 90 m, SRTM a MERIT. Dále je použita 12metrová varianta TanDEM-X, která je dostupná k vědeckým účelům.

3.2.1 TanDEM-X DEM

TanDEM-X DEM byl vyprodukovaný Německou vesmírnou agenturou. Podklady pro tento model byly sbírány čtyři roky mezi prosincem 2010 a lednem 2015 družicemi TanDEM-X a TerraSAR-X. Družice TanDEM-X byla vynesena na oběžnou dráhu v roce 2010, tři roky po družici TerraSAR-X. Jedná se o dvě identické družice obíhající po orbitě ve výšce 514 km v těsné konstelaci 100 až 500 metrů (Bartusch, 2010). Obě družice nesou radar se syntetickou aperturou a snímají v pásmu X. Pro získání co nejlepších výsledků bylo každé místo snímáno minimálně dvakrát ze stejného postavení družic. V členitějších terénech, jako jsou horská území, bylo snímání provedeno i vícekrát z různých míst pro eliminaci radarového stínu. (Wessel, 2018).

TanDEM-X DEM je globální výškový model dostupný ve třech rozlišeních - 12metrové (0,4 arcsec) a 30metrové (1 arcsec) je k dispozici pouze k vědeckým účelům. Model s 90metrovým (3 arcsec) rozlišením je dostupný k volnému stažení. Výškový model pokrývá celou planetu Zemi od pólu k pólu. Absolutní horizontální přesnost DEM v nejvyšším 12metrovém rozlišení by na 90 % úrovni spolehlivosti neměla přesáhnout 10 metrů. Absolutní vertikální přesnost na stejné úrovni spolehlivosti by také neměla přesáhnout 10 metrů. Relativní vertikální přesnost pro svahy s menším než 20 % sklonem musí být nižší než 2 metry a na svazích s vyšším sklonem 4 metry. 90 % úroveň spolehlivosti znamená, že 90 % buněk na snímku tuto podmínku splní (Wessel, 2018).

DEM byl stažen zde: <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/>

3.2.2 Shuttle Radar Topography Mission DEM

Výškový model SRTM byl vytvořen z dat získaných během speciální mise raketoplánu Endeavour. Tato mise probíhala v únoru roku 2000 a snímání trvalo 11 dní. Během této doby byl nasnímán povrch Země mezi 60°severní šířky a 56°jižní šířky (van Zyl, 2001). Každý bod Země byl snímán minimálně dvakrát pomocí 60 metrů dlouhé antény, což byla největší sktruktura, která kdy létala ve vesmíru (Werner, 2001). SRTM DEM byl dostupný ve dvou úrovních. SRTM1 pouze pro USA

s prostorovým rozlišením 30 metrů a SRTM3, které pokrývá 80 % pevninského území celého světa s prostorovým rozlišením 90 metrů. V roce 2014 začala USGS poskytovat DEM s prostorovým rozlišením 30 metrů pro celý svět. Souřadnicový systém je WGS84, výškový systém EGM96. Teoretická výšková přesnost je 16 metrů (Farr, et al., 2007).

SRTM DEM byl stažen z USGS EarthExplorer.

3.2.3 MERIT

MERIT DEM je vylepšený a zpřesněný výškový model vytvořený týmem japonského vědce Daie Yamazakiho. Jako výchozí výškové modely byly použity SRTM3 (do 60°s.š.) a AW3D-30m DEM (nad 60°s.š.). DEM pořízený z vesmíru trpí čtyřmi hlavními vertikálními chybami. Jsou jimi výška stromů, speckle noise, stripe noise a absolutní chyba (Yamazaki, et al., 2017). Speckle noise můžeme chápat jako zazrnění obrazu z radaru, způsobené hlavně rozdílnou reflektancí povrchu. Stripe noise je v případě SRTM způsoben nepatrnými pohyby dlouhého interferometrického stožáru na raketoplánu Endeavour (Rodríguez, et al., 2006). Yamazaki, et al., (2017) vyvinuli metodu, která tyto chyby detekovala a odstranila. Nový výškový model dosahuje vyšší vertikální přesnosti než původní SRTM. Na 90 % úrovni spolehlivosti dosahuje odchylka 12 metrů, což převyšuje původních 16 metrů u SRTM. Souřadnicový systém je WGS84, výškový systém EGM96 (Yamazaki, et al., 2017).

Výškový model MERIT je k dispozici ke stažení pro nekomerční využití na tomto odkazu: http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/

3.3 Validáčnı data

3.3.1 LiDAR

Referenční model použitý pro validaci přesnosti jiného DEM, by měl mít minimálně třikrát lepší přesnost než model posuzovaný (Maune, et al., 2018). Nejvyšší vertikální přesnosti dosahuje s 10 metry TanDEM-X DEM. Z tohoto důvodu byl jako referenční model zvolen DTM vytvořený z LiDARu, který zpravidla dosahuje řádově vyšší přesnosti. LiDARový model byl vytvořen z podkladů stažených z geoportálu spolkové země Sasko. Primární data byla uložena ve formátu LAZ. Laserové skenování bylo provedeno firmou Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen v únoru 2015, tedy mimo vegetační sezonu. Hustota bodů je nejméně 4 body na metr čtvereční. Skenování dosahuje vertikální přesnosti 0,15 metru. Jako referenční systém

byl použit ETRS UTM33N. Prostorové rozlišení jsou 2 metry. Pro potřeby této práce bylo rozlišení převzorkováno na 12, respektive 90 metrů a referenční systém byl převeden do WGS84 UTM33N. Zpracování dat bylo provedeno v software LAStools. Jedná se o DTM, tedy model čistého povrchu.

Surová data byla stažena zde: <https://www.geodaten.sachsen.de/>

3.4 Předzpracování dat

SRTM a MERIT byly staženy jako již hotové rastry z výše zmíněných odkazů. Bylo zkontrolováno lícování a následně byly oříznuty na zájmové území podle DEM z LiDARu. Jejich souřadnicové a výškové systémy jsou shodné. Rozlišení je 90x90 metrů.

TanDEM-X DEM měl, na rozdíl od ostatních modelů, elipsoidickou výšku. Elipsoidická výška je vzdálenost od referenčního elipsoidu k terénu. Ta je v oblasti zájmového území vyšší oproti nadmořské výšce o zhruba 45 metrů. Tomuto rozdílu se říká výška undulace. Pro porovnání bylo nutné tuto výšku odečíst.

Z webových stránek Českého úřadu zeměměřického a katastrálního byla stažena bodová vrstva obsahující výšky undulace pro Českou republiku a nejbližší okolí. Tato vrstva byla interpolována metodou *Kriging* v rozlišení 12, respektive 90 metrů. Interpolovaný rastr byl přetransformován funkcí *Project Raster* do referenčního systému WGS84 UTM33N. Klíčové je nastavení parametru *Snapping* k rastru TanDEM-X DEM pro přesné slícování. Rastr ve správném souřadnicovém systému byl odečten od původního výškového modelu a tím vznikl korigovaný model použitelný pro další analýzy.

3.5 Zpracování dat pro modelování říční sítě

3.5.1 Fill

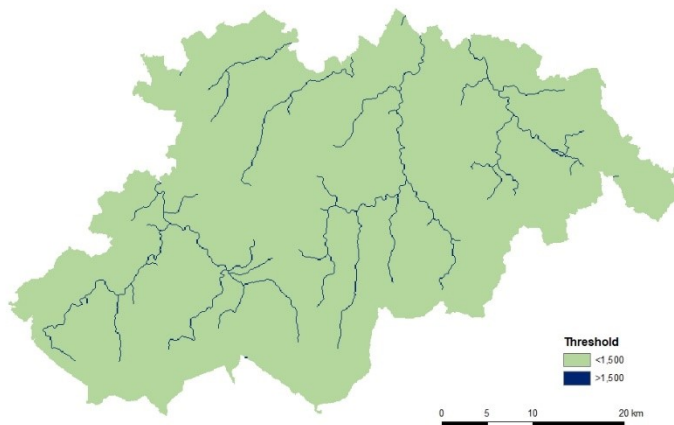
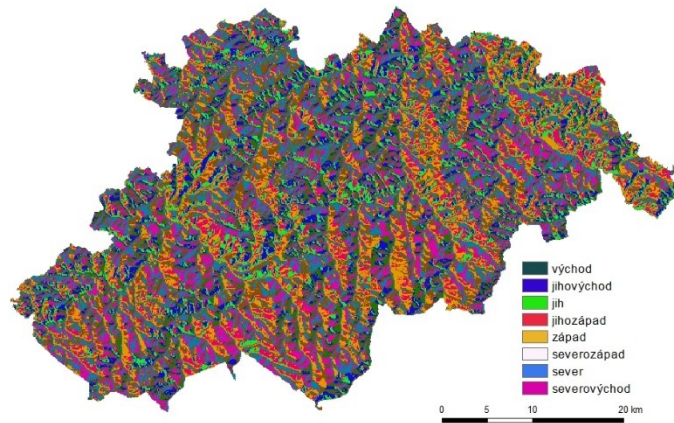
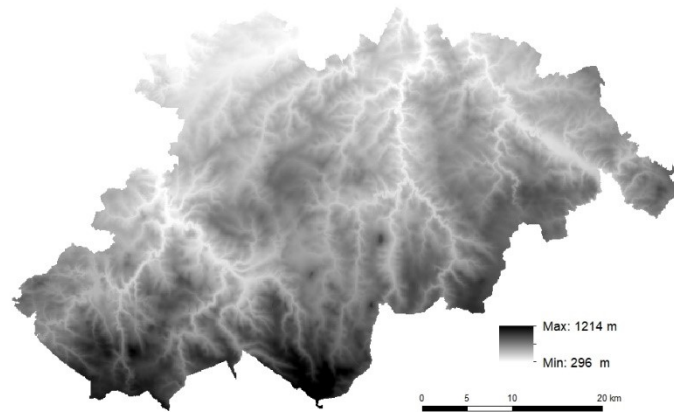
Pro následující analýzy bylo třeba zajistit, aby ve výškovém modelu nebyly žádné prohlubně a sníženiny, tedy místa, odkud voda neodtéká. Bez tohoto opatření bylo sice možné následující kroky provést, nicméně výsledná data by neměla vypovídající hodnotu. Pro vyplnění bezodtokových oblastí v modelu byla použita funkce *Fill* z balíčku *Spatial analyst*.

3.5.2 Flow direction

Pomocí funkce *Flow Direction* z balíčku *Spatial analyst* byl vytvořen nový rastr z výškového modelu. Jako typ směru byl zvolen D8, o kterém je psáno v rešeršní části této práce. Výsledný rastr je zobrazen na obrázku číslo 5 níže. Je na něm možné pozorovat hřbety a údolí.

3.5.3 Flow accumulation

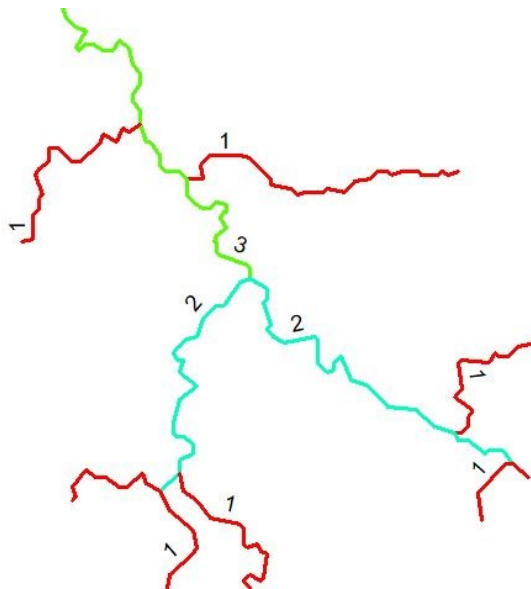
Dříve vygenerovaný rastr směru odtoku byl použit jako vstupní v této funkci. Výsledkem je další rastr, který zobrazuje, kudy voda odtéká. Hodnoty nově vzniklého rastru se zobrazují jako roztažené v celém intervalu. Bylo nutné je zobrazit jako klasifikované. Byla zvolena prahová hodnota 1500, při které bylo zobrazeno již dostatečné množství toků, jak může být vidět na mapě níže. Pro referenční DTM z LiDARu byla použita prahová hodnota 3037500 pro 2metrové rozlišení, která po přepočtu odpovídá právě prahové hodnotě 1500. V případě TanDEM-X DEM 12 m byla zvolena prahová hodnota 84375. Výsledek tohoto a předchozích kroků je zobrazen na obrázku číslo 5.



Obrázek 5: Použití funkcí Fill, Flow direction a Flow accumulation

3.5.4 Extrahování toku

Pomocí funkce *Raster Calculator* byl vytvořen nový rastr nabývající hodnot 1 pro pixely toku a 0 pro pixely mimo tok. Následně byla použita funkce *Stream Order*, do které vstupuje vrstva směru toku a rastr vzniklý v předchozím kroku. Takto byl získán nový rastr diskretních hodnot zobrazující klasifikaci toku dle Strahlera. Při soutoku dvou toků, které mají stejnou klasifikaci, se klasifikace zvedne o 1. Při soutoku dvou různých klasifikací se zachovává ta vyšší, jak je možno vidět na obrázku číslo 6. Funkce *Raster To Polyline* poté převedla rastr na linii pro další výpočty.



Obrázek 6: Klasifikace toku dle Strahlera

Funkcí *Intersect* byly nalezeny pixely, které jsou společné pro referenční a zkoumaný tok. Tím byla určeno množství společných bodů s DTM z laserového skenování.

3.6 Evaluace výškové přesnosti

3.6.1 Validací metriky

Pro zhodnocení přesnosti byla zvoleny metriky Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) a 90% kvantil (LE90). Bylo ověřeno, že hodnoty nenabývají normálního rozdělení.

RMSE představuje rozdíl průměrných odchylek mezi skutečnými hodnotami, v této práci reprezentovanými hodnotami výškového modelu z LiDARu a měřenými hodnotami, tj. hodnot z DEM MERIT, SRTM a TanDEM-X. Matematicky lze vyjádřit jako:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{di} - Z_{ri})^2}$$

kde: Z_{di} je hodnota korespondující výšky referenčního modelu

Z_{ri} je i -tá hodnota odvozené výšky z DEM

n je počet kontrolních bodů

MAE neboli střední absolutní chyba, je průměr všech absolutních chyb jednotlivých párových dvojic naměřených a predikovaných hodnot. Matematicky lze vyjádřit jako:

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

Kde: x_i je predikovaná hodnota referenčního modelu

x je naměřená hodnota

n je počet naměřených hodnot

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

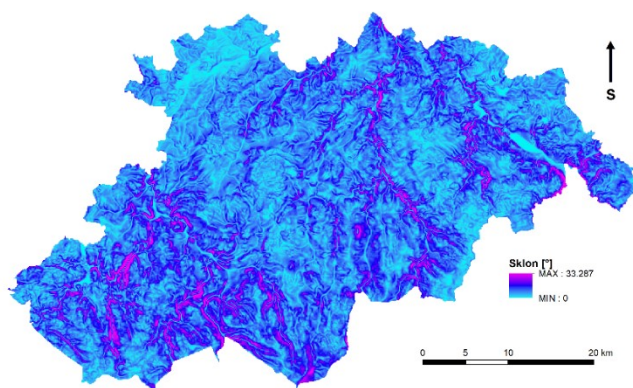
$$LE90 = Q_{|\Delta h|}(0,9)$$

3.6.2 Vytvoření výškových pásem

Z výškového model vytvořeného z LiDARového snímání, který je v této práci použit jako validační, byly pomocí funkce *contour* vytvořeny vrstevnicové polygony. Pro rozlišení výškových pásem byla určena hodnota 100 metrů, počínaje nadmořskou výškou 300 metrů. Tato nová vrstva složí k rozdělení rastrů výškových modelů.

3.6.3 RMSE, MAE a LE90 nadmořské výšky dle výškových pásem

Pro účely spočítání RMSE byly použity výškové modely po aplikaci nástroje *fill*, tedy po vyplnění bezodtokových oblastí. Z těchto rastrů byly vyextrahovány hodnoty jednotlivých pixelů, které dostaly atribut podle umístění ve výškovém pásmu. Následně byla přesnost modelu zhodnocena v několika arbitrárně zvolených výškových pásmech.



Obrázek 7: Mapa sklonu ve stupních

3.6.4 Vytvoření sklonových pásem

Sklon byl spočítán pomocí funkce *Slope*. Za jednotku byly zvoleny stupně. Následně byl rastr rozdělen pomocí funkce *Reclassify* a *Raster to Polygon* do čtyř kategorií po 10 stupních. Mapu sklonu můžeme vidět na obrázku číslo 7

3.6.5 RMSE, MAE a LE90 nadmořské výšky dle sklonových pásem

Pro každé pásmo sklonu, tedy pro území pod 10°, 10° - 20°, 20° - 30° a nad 30° byly stejně jako v případě výškových pásem odečteny hodnoty pixelů, které dostaly atribut podle sklonu.

4 VÝSLEDKY

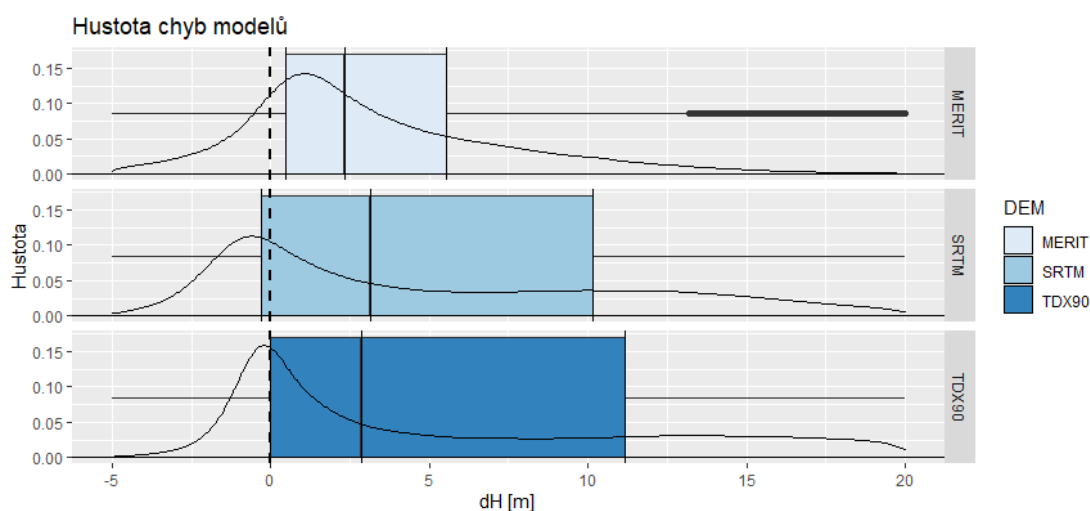
4.1 Nadmořská výška

V této práci byly porovnány tři globální výškové modely MERIT, SRTM, TanDEM-X ve variantě 12metrové a 90metrové s velmi přesným digitálním modelem terénu odvozeným z laserového skenování. Tímto byla zjištěna vertikální přesnost jednotlivých modelů. Výsledky ukazují velmi podobné hodnoty u modelů TanDEM-X a SRTM, zatímco MERIT DEM je svou přesností převyšuje ve všech charakteristikách (tabulka 1).

Model	RMSE [m]	MAE [m]	LE90 [m]
MERIT	5.58	4.02	9.54
SRTM	8.78	6.33	15.46
TanDEM-X 90 m	10.46	7.30	18.68
TanDEM-X 12 m	11.06	7.11	20.68

Tabulka 1: Přesnost modelů podle jednotlivých metrik

Obrázek číslo 8 zobrazuje rozdíl výšek jednotlivých modelů pomocí boxplotu a křivky rozložení chyb. Box rozděluje datovou sadu po kvantilech. Spodní hranice boxu zobrazuje 25% kvantil, horní pak 75 %. Čára uvnitř boxu pak ukazuje medián, ten dělí sadu na dvě shodné poloviny. Nejmenší rozptyl hodnot vykazuje model MERIT, který tak potvrzuje nejvyšší přesnost ve všech zkoumaných aspektech. Modely SRTM a TanDEM-X 90 m se výrazněji neliší.



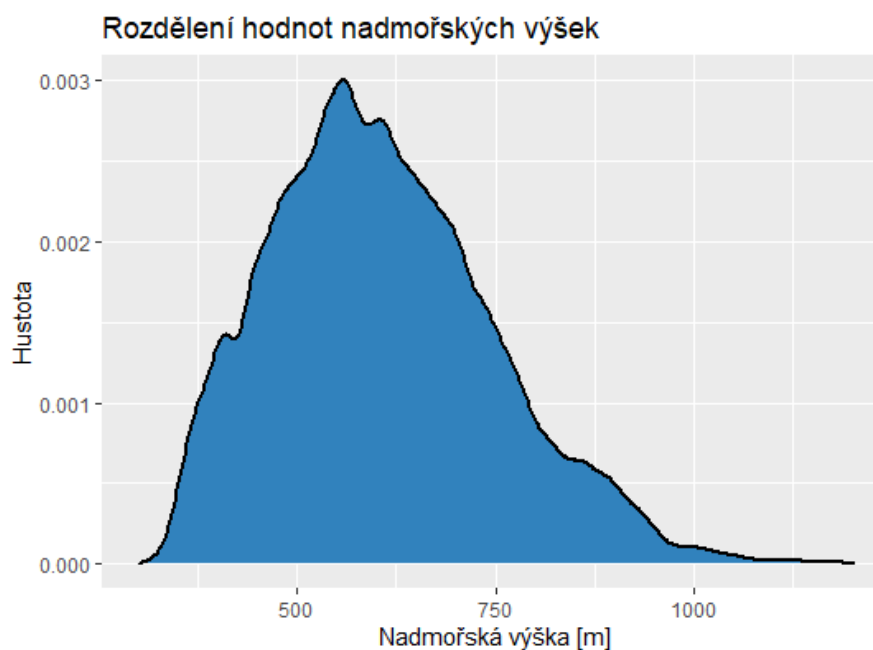
Obrázek 8: Boxplot a density plot odchylek od LiDAR DTM

Při bližším pohledu do tabulky číslo 2 je možno vidět zhoršující se tendenci u všech modelů podle metriky LE90 až po úroveň cca 800 metrů nad mořem. Poté se přesnost opět zlepšuje. Tento trend můžeme přičíst rozdílnému množství vstupních dat

pro jednotlivá pásma (Obrázek 9). Tato skutečnost by měla být podrobena dalšímu výzkumu. Nicméně lze konstatovat, že na základě tabulky číslo 1, vychází MERIT jako výrazně přesnější model. SRTM a TanDEM-X DEM vykazují podobné výsledky.

Výška [m]	LE90 [m]			
	MERIT	SRTM	TDX 90 m	TDX 12 m
301-400	8.31	13.60	15.80	7.50
401-500	8.50	14.20	17.10	13.80
501-600	9.01	15.30	18.70	19.00
601-700	10.10	16.40	19.70	21.30
701-800	10.70	16.20	19.30	22.30
801-900	10.50	15.10	18.10	21.30
901-1000	8.00	12.50	14.20	19.30
1001-1100	5.44	9.24	9.82	14.60
1101-1200	4.97	5.45	5.67	10.10
>1201	3.87	4.47	3.00	4.65

Tabulka 2: Chybové metriky pro výšková pásma



Obrázek 9: Rozdělení nadmořských výšek podle četnosti

Výsledky ostatních metrik k nahlédnutí v příloze č. 1.

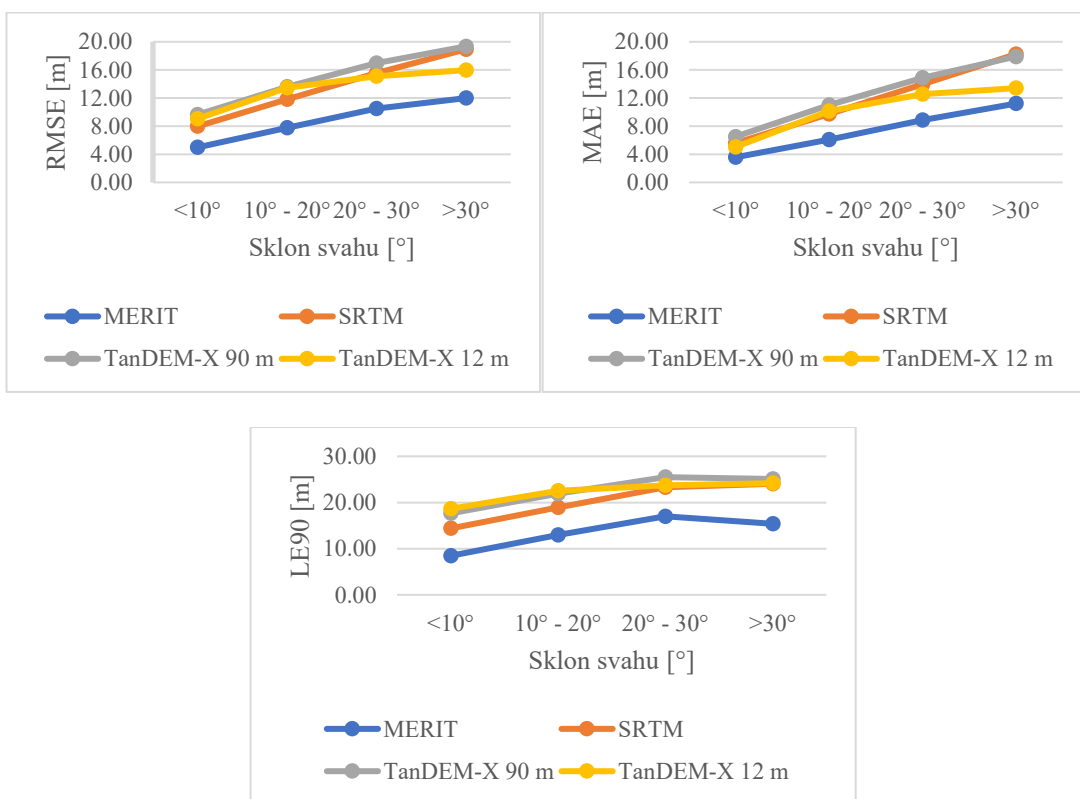
4.2 Sklon

V zájmové oblasti německé strany Krušných hor byly vypočítány tři chybové metriky, RMSE, MAE a LE90 pro pásma sklonu. Při vzájemném porovnání obou modelů TanDEM-X vidíme, že podle metrik RMSE a MAE převyšuje 12metrový model svou přesností model 90metrový ve všech pásmech sklonu. Pouze v případě LE90 do 20° vychází lépe model s nižším prostorovým rozlišením. Pokud porovnáme výsledky těchto metrik s dalšími volně dostupnými modely, tak můžeme konstatovat, že model MERIT svou přesností výrazně převyšuje zbývající dva modely SRTM a TanDEM-X DEM v obou variantách (Tabulka 3).

RMSE [m]				
Sklon	MERIT	SRTM	TanDEM-X 90 m	TanDEM-X 12 m
<10°	4.99	7.98	9.65	9.06
10° - 20°	7.75	11.82	13.62	13.44
20° - 30°	10.5	15.54	16.98	15.12
>30°	11.99	18.93	19.35	15.97
MAE [m]				
Sklon	MERIT	SRTM	TanDEM-X 90 m	TanDEM-X 12 m
<10°	3.58	5.61	6.52	5.05
10° - 20°	6.08	9.72	10.99	10.15
20° - 30°	8.86	13.94	14.87	12.54
>30°	11.21	18.24	17.90	13.41
LE90 [m]				
Sklon	MERIT	SRTM	TanDEM-X 90 m	TanDEM-X 12 m
<10°	8.46	14.39	17.65	18.63
10° - 20°	12.95	18.92	21.94	22.57
20° - 30°	17.01	23.27	25.49	23.74
>30°	15.42	24.06	25.07	24.19

Tabulka 3: Metriky RMSE, MAE a LE90 pro pásma sklonu

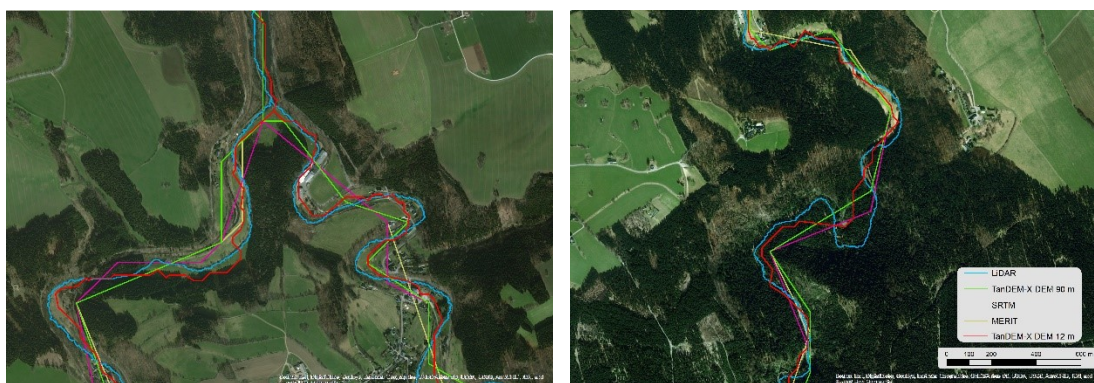
Vertikální přesnost se snižuje s narůstající sklonitostí (Obrázek 10). Je zřejmé, že SRTM, které při nižších sklonech vykazuje vyšší přesnost oproti TanDEM-X DEM, tak s rostoucím sklonem se blíží právě TanDEM-X. V oblastech se sklonem nad 30° je podle metriky MAE dokonce méně přesný. TanDEM-X s rozlišením 12 metrů se s rostoucím sklonem svou přesností přibližuje modelu MERIT.



Obrázek 10: RMSE, MAE a LE90 pro pásma sklonu

4.3 Hydrologické charakteristiky

Výřezy z vygenerované říční sítě z jednotlivých modelů můžeme vidět na obrázku 11. Vzhledem ke skutečnosti, že všechny tři porovnávané globální digitální výškové modely mají stejné rozlišení, pozorujeme velmi podobný průběh všech toků. Nicméně zejména v nepříliš přímých liniích je patrný rozdíl v počtu a směru zákrut. Je zřejmé, že tok odvozený z LiDARu, na obrázku reprezentovaný modrou barvou, nejvíce meandruje. Toky z TanDEM-X 90 m, SRTM a MERITu mají vizuálně podobný průběh. TanDEM-X 12 m podle předpokladu svou přesností zbylé modely převyšuje.



Obrázek 11: Odvozená říční síť

Předchozí tvrzení podporuje tabulka číslo 4. Délka toku generovaného z LiDARového snímání je 431.1 km. Ostatní toky jsou kratší. MERIT a TanDEM-X se liší o méně než 1 kilometr. 351.26, respektive 352.15. Větší rozdíl u SRTM značí nižší přesnost. Délka toku z 12metrový TanDEM-X je 393.47 km, nejvíce se tak blíží toku referenčnímu.

	LiDAR	MERIT	SRTM	TDX 90 m	TDX 12 m
Délka toku [km]	431.1	351.26	347.21	352.15	393.47
Velikost povodí [km ²]	1607.84	1639.49	1637.49	1642.97	1618.35
Maximální pořadí toku	3	3	3	3	3
Počet shodných bodů s LiDAR	X	1512	1395	1322	2202

Tabulka 4: Hydrologické charakteristiky

Další zkoumanou vlastností byla velikost povodí. Ve všech případech, to znamená u modelu MERIT, SRTM i TanDEM-X, vyšla plocha povodí větší než u referenčního DTM. Všechny odvozené říční sítě mají dle Strahlera nejvyšší klasifikaci 3. Vzhledem k tomu, že mají stejné rozlišení a bylo pro jejich odvození zvolena stejná prahová hodnota, to není překvapivý výsledek. Počet shodných bodů označuje počet prolnutí referenčního a zkoumaného toku. Tento parametr vyšel nejvyšší u modelu TanDEM-x 12 m, což by jen dokazovalo jeho přesnost.

5 DISKUSE

Z volně dostupných dat může těžit široká veřejnost. Složitost přístupu k nim se napříč různými obory liší. Získání výškových modelů použitých v této práci patří k těm jednodušším. Každý si tak může stáhnout libovolný model nebo jeho část a použít k vlastním účelům zdarma. Na rozdíl od DMR5G poskytovaným ČÚZK, který i přesto, že je pořízen z veřejných peněz, je nutné platit. Hlavním motivem ke zpracování této práce byla potřeba ověření jejich přesnosti a uplatnění pro analýzy, které nevyžadují maximální detail.

Tato práce se zaměřuje na tři DEM – TanDEM-X, SRTM a MERIT, který vychází ze SRTM a měl by vykazovat vyšší přesnost (pokud za referenční plochu použijeme model terénu). Vzhledem ke stejnému způsobu pořízení těchto modelů je předpoklad, že jejich charakteristiky budou mít podobný průběh. Předpoklad o nejvyšší přesnosti splnil MERIT bez závislosti na dalších aspektech, jako je sklon, orientace či zalesnění. MAE dosáhlo hodnoty nepatrně nad 4 metry a LE90 se vešlo do uváděné přesnosti 12 metrů. Do předepsaných 16 metrů se vešel model SRTM. TanDEM-X pak určené absolutní vertikální přesnosti 10 metrů v porovnání s DTM nedosáhl. Ve studii Uemaa, et al., (2020) došli k podobnému závěru. Podle jejich výsledků v oblasti Nového Zélandu dosahuje LE75 10.64 m, 15.1 m a 16.27 m pro MERIT, SRTM, respektive TanDEM-X. Wessel, et al., (2018) ve své práci evaluuje přesnost TanDEM-X DEM pomocí pozemních kontrolních bodů. Při výběru referenčních bodů byla záměrně vybírána místa bez vegetačního krytu. Kontrolní body se tak nacházejí na otevřených loukách a nezalesněných plochách. V případě měření v lese byly body umístěny na cesty či mýtiny. Výsledky jejich studie tak vykazují velmi přesné hodnoty ME do 1 metru. Ve srovnání s touto bakalářskou prací můžeme vidět výrazné rozdíly. Ty jsou dané rozdílnou metodikou srovnání referenčního a měřeného bodu, kdy v bakalářské práci byla jako referenční uvažována plocha DTM nikoli bod. Výsledky ukazují, že k TanDEM-X a SRTM je nutné přistupovat jako k modelům povrchu, nikoliv terénu, jak je občas běžné a pro analýzy vyžadující model terénu využívat spíše MERIT. Pokud se i přesto uživatel rozhodne využít TanDEM-X nebo SRTM jako model terénu, musí vzít v úvahu výraznou vertikální chybu, jejíž rozsah vzhledem k různým charakteristikám prostředí byl evaluován v této práci (viz také Wessel, et al., (2018)).

Největší důraz ve vědeckých člancích zabývajících se tímto tématem se klade na evaluaci přesnosti v závislosti na sklonu svahu. Zvyšující se sklon působí negativně na vertikální přesnost modelu. Tuto tezi komentují Gdulová, et al. (2020) přímo pro TanDEM-X, či Rizzoli, et al., (2017). MERIT DEM by podle autorů měl dosahovat absolutní vertikální přesnosti při 90 % kvantilu 12 metrů. Tu převyšuje při sklonu do 10° a pouze nepatrně nedosahuje při sklonu do 20°. SRTM by při stejné podmínce měl dosahovat přesnosti 16 metrů. Tu ovšem splňuje pouze v území s nejnižší svažitostí do 10°. TanDEM-X DEM nedosahuje předepsané přesnosti 10 metrů v žádném pásmu a v území nad 10° dosahuje dokonce více než dvojnásobné nepřesnosti. Bylo zjištěno, že v případě všech analyzovaných modelů dochází se zvyšujícím se sklonem k poklesu vertikální přesnosti. Pokles je prakticky lineární až do 30°, kdy se trend zpomalí a v případě MERIT DEM se absolutní vertikální přesnost dokonce zlepší. Rizzoli, et al., (2017) ve studii porovnávají TanDEM-X DEM s referenčními body ICESat. Ty jsou v minimálním množství zastoupeny v hornatějších oblastech. Výsledky jejich práce vykazují přesnější hodnoty v kategorii sklonu do 20° i nad 20°. V 97.76 % případů byla splněna podmínka o relativní vertikální přesnosti. Tedy 2 metry v oblastech do 20° sklonu a 4 metry nad 20° sklonu. Ke zhodnocení vertikální přesnosti TanDEM-X DEM na území České republiky přistoupili Gdulová, et al., (2020). Jejich zájmová území se nacházela v prostředí s podobnou charakteristikou jako zájmové území této práce. Jednalo se o pohoří Krkonoše, Šumava a Jeseníky. Ve studii rozdělují sklon po 10°. V případě porovnání s DTM z LiDARu přicházejí s velmi podobnými výsledky jako tato bakalářská práce. Obecně lze říci, že porovnávání různých modelů, které vznikaly v jiném časovém období a jinou metodou, s sebou přináší chyby. Digitální výškové modely vytvořené na základě radarových snímků ve většině případů odpovídají digitálnímu modelu povrchu, tzn. povrchu vegetace případně staveb. TanDEM-X převyšuje SRTM v 72 % pixelů. Jedním z důvodů může být rostoucí vegetace (Boltad, et al., 1994), tím druhým pak použití jiného frekvenčního pásma antény. Pásmo C použité v případě SRTM umožňuje větší penetraci do vegetace než pásmo X (Tanase, et al., 2015). Rozdíl mezi těmito dvěma modely v době pořízení snímků je i 15 let. Toho se využívá pro analýzy změny výšky vegetace nebo sledování geohazardů jako například pohybu ledovců, zemské hmoty a vulkanické činnosti (Wael, et al., 2013). K těmto situacím dochází

velmi často v horském terénu, který je díky své členitosti problematický pro sběr dat pomocí radarů.

V této práci byly porovnávány tři modely se stejným rozlišením s velmi přesným DTM porízeným z laserového skenování. Z nich byla vyextrahována říční síť. Velmi podobné výsledky mají MERIT a TanDEM-X, následovány SRTM. Zvláštností je menší plocha povodí přesnějšího modelu v porovnání s ostatními 90metrovými modely. Tato skutečnost je s největší pravděpodobností způsobena rozdílnou velikostí pixelů. V případě, že okrajová buňka rastru s 90metrovým rozlišením, byť jen z části spadá do povodí, je přičtena celá plocha pixelu a to 8100 m². V případě LiDARu jsou to pouze 4 m².

Počet shodných bodů je v případě hodnocení toků lehce zavádějící. Označuje počet prolnutí referenčního a zkoumaného toku. To ale nereflektuje skutečnost, jestli se oba toky opravdu podobají nebo ne. Polidori, et al., (2020) uvádí hlavní chyby, které vznikají při extrakci toku z DEM. Patří mezi ně absolutní chyba polohy a nerealistický tvar. V případě shodného směru toků můžeme vizuálně posoudit, že jsou si toky podobné, a tudíž i modely vykazují podobnost. Přitom nemusí dojít k jedinému prolnutí.

Několik autorů se věnuje vlivu rozlišení na přesnost analýz, například Vaze, et al., (2010), Gao (1997) nebo Kienzle (2004). Pro účely bakalářské práce byla poskytnuta 12metrová varianta TanDEM-X DEM k porovnání s volně dostupnou 90metrovou variantou. Vaze, et al., (2010) uvádějí, že výškové modely získané laserovým snímáním dosahují vyšších přesností. To platí i při převzorkování a snížení rozlišení pro porovnání s méně přesnějším modelem. Podle jejich závěrů je doporučeno používat v případě dostupnosti přesnější modely, které mohou být následně převzorkovány pro urychlení procesů. Studie, kterou provedl Kienzle (2004), říká, že v málo členitém prostředí s minimem vegetace je možné nahradit velmi přesné modely modely s nižším rozlišením. S vyšším rozlišením klesá přesnost výrazněji v území horském s vyšším sklonem. Ke stejnému výsledku došel i Gao (1997). Na základě provedené extrakce říční sítě v této práci lze konstatovat, že 12metrový model vykazuje přesnější výsledky. Největší rozdíly oproti 90metrové variantě TanDEM-X můžeme pozorovat v území s vyšším sklonem.

6 ZÁVĚR

Na německé straně Krušných hor byly provedeny analýzy, které zkoumaly vertikální přesnost tří globálních digitálních výškových modelů povrchu – TanDEM-X, SRTM a MERIT. Cílem bylo ověřit vertikální přesnost TanDEM-X ve dvou variantách (90 a 12 metrů) a porovnat ji s dalšími volně dostupnými modely. Z těchto analýz vyplynulo, že v zájmovém území dosahuje TanDEM-X vertikální přesnosti LE90 pro 90metrovou variantu 18.68 metrů, pro 12metrovou pak 20.68 metrů. Což je překvapivě dobrý výsledek vzhledem k tomu, že evaluace byla provedena pomocí DTM. SRTM dosáhl deklarované přesnosti pod 16 metrů, která je vztažena k DSM. Model MERIT převyšuje ostatní dva modely ve všech třech použitých metrikách, kdy střední chyba dosahuje 4.02 metrů a RMSE 5.58 metrů. Oproti tomu TanDEM-X 90 m pouze 7.30, respektive 10.46 metrů.

K největším rozdílům mezi modely dochází v různě svažitém terénu. Zatímco velmi přesný MERIT splnil deklarovanou vertikální přesnost v zóně do 10° a skoro i do 20° (12.95 m) a SRTM v zóně do 10°, tak TanDEM-X nedosahuje této přesnosti nikde. Se zvyšujícím se sklonem se velmi rychle zhoršuje přesnost všech modelů. MERIT potvrzuje předpoklad a dosahuje lepších výsledků než zbylé dva modely, které se výsledky velmi podobají. TanDEM-X ve své 12metrové variantě s rostoucím sklonem dosahuje vyšší přesnosti než varianta 90metrová.

Vygenerované říční sítě na první pohled vypadají velmi podobně. Při stejném rozlišení jednotlivých DEM to není překvapující výsledek. Po vypočítání základních charakteristik můžeme konstatovat, že říční síť odvozená z modelu TanDEM-X 12 m měří nejvíce kilometrů, konkrétně 393.47 km. Tedy o necelých 38 km méně než referenční tok odvozený z DTM z LiDARu. Nabývá také největšího počtu společných bodů. Na základě odvozených charakteristik lze jednoznačně říct, že vyšší horizontální rozlišení digitálního modelu poskytuje lepší podklad pro hydrologické analýzy. Z 90metrových modelů se v zájmovém území nepatrně vymyká MERIT DEM. SRTM a TanDEM-X DEM vypadají jak vizuálně, tak na základě charakteristik velmi podobně. Nicméně pro podrobnější analýzy nelze doporučit ani jeden.

TanDEM-X DEM s rozlišením 90 metrů najde jistě uplatnění podobně jako SRTM. Je aktuálnější a prostředí pro stažení je také velmi přívětivé. Prostorové rozlišení 12 metrů nabízí stejně dobrou vertikální přesnost a je tak příslibem pro budoucnost.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Andersen, Hans-Erik, McGaughey, Robert J. a Reutebuch, Stephen E. 2006. Assessing the influence of flight parameters and interferometric processing on the accuracy of x-band ifsar-derived forest canopy height models. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*. 2006. stránky 110-116.

Baltsavias, E.P. 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999. Sv. 54, stránky 164-198. 0924-2716.

Bartusch, Michael. 2010. DLR. *Space Administration*. [Online] 2010. https://www.dlr.de/rd/en/desktopdefault.aspx/tabid-2440/3586_read-16692/3586-read-16692/.

Boltad, Paul V. a Stowe, Timothy. 1994. An Evaluation of DEM Accuracy: Elevation, Slope, and Aspect. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 1994. Sv. 60, stránky 1327-1332.

Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2011. *Ore Mountains*. místo neznámé : Encyclopædia Britannica, 2011.

Buchwald, J., Yeang, CP a Stemeroff, N. 2021. What Heinrich Hertz discovered about electric waves in 1887–1888. *Archive for History of Exact Sciences*. 2021. Sv. 75, stránky 125–171.

Dobrovolný, Petr. 1998. *Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu*. Brno : Masarykova univerzita, 1998. 8021018127.

ESRI. 2020. How Flow Direction works. *ArcGIS Pro*. [Online] 2020. [Citace: 17.. 1. 2021.] <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm>.

Farooq, Muhammad, Shafque, Muhammad a Khattak, Muhammad Shahzad. 2019. Flood hazard assessment and mapping of River Swat using. *Natural Hazards*. 2019. Sv. 97(2), str. 17. 477–492.

Farr, Tom G., et al. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. 2007. Sv. 45, str. 33. 8755-1209.

Gao, Jay. 1997. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information*. 1997. stránky 199-212. 1365-8816.

Gdulová, Kateřina, Marešová, Jana a Moudrý, Vítězslav. 2020. Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model in a mountain environment. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Sv. Volume 241, str. 15. 0034-4257.

Gojda, Martin. 2006. Zaniklá krajina – pohled z výšky. místo neznámé : Vesmír, 2006. Sv. 85.

Hall, Michael. 2014. Global Elevation Data Enhance Exploration and Development. *Earth Imaging Journal*. [Online] 2014. [Citace: 10.. 2. 2021.] <https://eijournal.com/print/articles/global-elevation-data-enhance-exploration-and-development>.

Hawker, Laurence, Neal, Jeffrey a Bates, Paul. 2019. Accuracy assessment of the TanDEM-X 90 Digital Elevation Model for selected floodplain sites. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Sv. 232, str. 15. 0034-4257.

Jaboyedoff, Michel, et al. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*. 2012. Sv. 61, stránky 5-28.

Jenson, S. K. a Domingue, J. O. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. místo neznámé : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1988. Sv. 54, stránky 1593-1600.

Kienzle, Stefan. 2004. The Effect of DEM Raster Resolution on First Order, Second Order and Compound Terrain Derivatives. *Transactions in GIS*. 2004. stránky 83–111.

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

Maune, David F. a Nayegandhi, Amar. 2018. Digital elevation model technologies and applications : the DEM users manual. 3rd místo neznámé : Bethesda, MD : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2018. str. 652. 9781570831027 .

- McLaughlin, R.A. 2006.** Extracting transmission lines from airborne LIDAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2006. Sv. 3(2), stránky 222-226.
- Polidori, Laurent a Hage, Mhamad El. 2020.** Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. *Remote Sens*. 2020. Sv. 12, str. 36.
- Rapant, Petr. 2006.** *Geoinformatika a geoinformační technologie*. místo neznámé : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 80-248-1264-9.
- Rizzoli, Paola, et al. 2017.** Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Sv. 132, stránky 119-139. ISSN 0924-2716.
- Rodríguez, Ernesto, Morris, Charles S. a Belz, J. Eric. 2006.** A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2006. Sv. 72, stránky 249-260.
- Sim, Philip. 2014.** Making waves: Robert Watson-Watt, the pioneer of radar. [Online] BBC, 2014. [Citace: 12.. 1. 2021.] <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-tayside-central-27393558>.
- Stammer, Detlef a Cazenave, Anny. 2017.** *Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces*. Boca Raton : CRC Press, 2017. 9781315151779.
- Tadono, T., et al. 2014.** Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry*. 2014. Sv. II-4, stránky 71-76.
- Tanase, Mihai A., et al. 2015.** Detecting and Quantifying Forest Change: The Potential of Existing C- and X-Band Radar Datasets. *PLOS ONE*. 2015. Sv. 10(6), str. 14.
- Uuemaa, E., et al. 2020.** Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sens*. 2020. Sv. 12, str. 23.
- van Zyl, Jakob J. 2001.** The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*. Pasadena : autor neznámý, 2001. Sv. 48, stránky 559-565.

- Vassilaki, Dimitra I. a Stamos, Athanassios A. 2020.** TanDEM-X DEM: Comparative performance review employing LIDAR data and DSMs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Sv. 160, stránky 33-50. 0924-2716.
- Vaze, Jai, Teng, Jin a Spencer, Georgina. 2010.** Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*. 2010. Sv. Volume 25, Issue 10, stránky 1086-1098. 1364-8152.
- Wael, Abdel Jaber, et al. 2013.** Surface elevation changes of glaciers derived from SRTM and TanDEM-X DEM differences. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2013. stránky 1893-1896.
- Werner, Marian. 2001.** Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Mission Overview. *Frequenz -Berlin*. 2001. Sv. 55, stránky 75-79.
- Wessel, Birgit. 2018.** TanDEM-X Ground Segment – DEM Products Specification Document. [Online] EOC, DLR, 2018. [Citace: 10.. 1. 2021.] <https://tandemx-science.dlr.de>. TD-GS-PS-0021.
- Wessel, Birgit, et al. 2018.** Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Sv. Volume 139, stránky 171-182. 0924-2716.
- Yamazaki, Dai, et al. 2017.** A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*. 2017. Sv. 44, stránky 5844-5853.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Rozdíl mezi DTM a DSM (Hall, 2014).....	3
Obrázek 2: Princip fungování LiDARu (Gojda, 2006).....	6
Obrázek 3: Kódování směru maximálního sklonu (ESRI, 2020)	7
Obrázek 4: Mapa zájmového území.....	8
Obrázek 5: Použití funkcí Fill, Flow direction a Flow accumulation	13
Obrázek 6: Klasifikace toku dle Strahlera	14
Obrázek 7: Mapa sklonu ve stupních	16
Obrázek 8: Boxplot a density plot odchylek od LiDAR DTM	17
Obrázek 9: Rozdělení nadmořských výšek podle četnosti.....	18
Obrázek 10: RMSE, MAE a LE90 pro pásma sklonu	20
Obrázek 11: Odvozená říční síť	21
Tabulka 1: Přesnost modelů podle jednotlivých metrik.....	17
Tabulka 2: Chybové metriky pro výšková pásma.....	18
Tabulka 3: Metriky RMSE, MAE a LE90 pro pásma sklonu	19
Tabulka 4: Hydrologické charakteristiky	22
Tabulka 5: RSME podle nadmořské výšky.....	32
Tabulka 6: MAE podle nadmořské výšky.....	32

9 PŘÍLOHY

9.1 Příloha č. 1

Tabulky hodnotících metrik vertikální přesnosti podle nadmořské výšky.

Výška [m]	RMSE [m]			
	MERIT	SRTM	TDX 90 m	TDX 12 m
301-400	5.07	7.41	8.41	5.80
401-500	5.03	7.65	9.03	7.44
501-600	5.24	8.26	9.83	9.41
601-700	5.91	9.48	11.29	11.90
701-800	6.29	10.16	12.30	13.39
801-900	6.48	9.85	11.98	13.67
901-1000	5.03	8.16	9.18	12.03
1001-1100	3.53	6.09	6.31	8.98
1101-1200	3.07	3.18	3.15	6.02
>1201	2.58	2.93	2.14	2.93

Tabulka 5: RSME podle nadmořské výšky

Výška [m]	MAE [m]			
	MERIT	SRTM	TDX 90 m	TDX 12 m
301-400	3.46	4.79	5.15	2.95
401-500	3.53	5.11	5.60	3.72
501-600	3.65	5.57	6.31	5.07
601-700	4.31	6.94	8.02	6.77
701-800	4.76	8.25	10.11	9.94
801-900	5.20	8.27	10.24	11.33
901-1000	3.92	6.98	7.75	9.72
1001-1100	2.75	5.14	5.34	7.28
1101-1200	2.50	2.41	2.40	4.73
>1201	2.17	2.58	1.95	1.90

Tabulka 6: MAE podle nadmořské výšky