

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA  
V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování**



**Analýza přesnosti digitálního elevačního  
modelu TanDEM-X v antropogenním terénu  
severočeských výsypek**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Vítězslav MOUDRÝ, Ph.D.

**DIPLOMANT:** Bc. Leona KUBCOVÁ

**2019**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Leona Kubcová

Voda v krajině

Název práce

**Analýza přesnosti digitálního elevačního modelu TanDEM-X v antropogenním terénu severočeských výsypek**

Název anglicky

**Evaluation of TanDEM-X DEM in the anthropogenic terrain of north-west Bohemia dumps**

---

### Cíle práce

Cílem práce je posoudit kvalitu digitálního elevačního modelu TANDEM-X v v antropogenním terénu severočeských výsypek. Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

### Metodika

Digitální elevační modely (DEM) jsou zásadním vstupem v mnoha odvětvích environmentálního modelování (např. hydrologie, modelování druhové distribuce). V současné době lze nalézt různé zdroje DEM s globálním pokrytím, které jsou obvykle získány odlišnými metodami, a tudíž mají různé rozlišení a vertikální přesnost. Nedávná mise TANDEM-X přinesla nový globální DEM s dosud nevídaným rozlišením 12m. Autorka se v literární rešerši zaměří na problematiku DEM a na nově dostupný TANDEM-X DEM. Tento DEM porovná s daty leteckého laserového skenování v oblasti severočeských výsypek 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**

- 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.
- Moudrý, V., Gdulová, K., Fogl, M., Klápště, P., Urban, R., Komárek, J., Moudrá, L., Štroner, M., Barták, V., & Solský, M. (2019). Comparison of leaf-off and leaf-on combined UAV imagery and airborne LiDAR for assessment of a post-mining site terrain and vegetation structure: prospects for monitoring hazards and restoration success. *Applied Geography*.
- Mukherjee, S., Joshi, P. K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. D., & Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217.
- Rizzoli, Paola, et al. "Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model." *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 132 (2017): 119-139.
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 54(2-3), 68-82.
- Wessel, Birgit, et al. "Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139 (2018): 171-182.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2018/19 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

---

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

**doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 12. 03. 2019

---

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. Veškerou literaturu a ostatní prameny, z nichž jsem čerpala při zpracování práce, řádně cituji a uvádím v seznamu použité literatury. Dále prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze dne 18. 4. 2019

*(Bc. Leona Kubcová)*

### **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Vítězslavovi Moudrému, Ph.D. za jeho trpělivost, ochotu, cenné rady a komentáře. Dále bych ráda poděkovala celé rodině za podporu po celou dobu studia.

V Praze dne 18. 4. 2019

*(Bc. Leona Kubcová)*

## ABSTRAKT

Digitální modely terénu a povrchu jsou v současnosti stále oblíbenější a používanější zdroj výškopisných údajů. Jedná se o způsob prezentace povrchu planety Země, který je mimo jiné používán v oblastech, kde dochází k častým změnám terénu, tj. zejména v oblastech těžby. Hlavním cílem práce je zhodnocení kvality digitálního modelu TANDEM-X s rozlišením 12 m a ověření jeho absolutní přesnosti 10 m v post těžební krajině Litvínovských výsypek. Dílčím cílem práce je posouzení vlivu environmentálních charakteristik (krajinný pokryv, sklonitost a orientace ke světové straně) na výslednou přesnost. Za účelem evaluace bylo nejprve klasifikováno mračno bodů z leteckého laserového skenování. Z klasifikovaného mračna byly generovány digitální modely terénu a povrchu, které byly následně použity jako referenční data k evaluaci modelu TANDEM-X. Absolutní přesnost modelu TANDEM-X je splněna na 88 % území při porovnání s DTM (digital terrain model) a na 96 % při porovnání s DSM (digital surface model). Výslednou přesnost nejvíce ovlivňuje krajinný pokryv, zatímco vliv sklonitosti a orientace ke světovým stranám není výrazný. Na nezalesněných plochách dosahuje TANDEM-X vysoké přesnosti (ME = 0,5 m; RMSE=1,4 m). Největší vliv na kvalitu modelu má zalesnění, které přesnost snižuje (ME = 5,6 m a RMSE = 6,7 m při porovnání s DTM, ME = 3,4 m a RMSE = 4,7 m při porovnání s DSM). I přes tyto rozdíly je absolutní chyba modelu TANDEM-X na Litvínovských výsypkách splněna. TANDEM-X lze úspěšně využít k monitorování změn terénu v těžebních oblastech.

**Klíčová slova:** digitální model terénu, digitální model povrchu, TANDEM-X, LiDAR, přesnost

## ABSTRACT

Digital models of terrain and surface are currently becoming an increasingly popular source of altimetry data. It's a way of presenting the Earth's surface, which is except for others used in areas with frequent terrain changes, eg. mining areas. The main objective of this thesis is a quality evaluation of a digital model TANDEM-X with a definition of 12 m and verification of a complete precision 10 m in a post mining area of Litvinovske vysypky. Partial focus of the thesis has also been put on an environmental impact (shape and slope of the landscape and orientation towards a cardinal direction) on the overall result. For evaluation purposes, the first ones to classify were the cloud points from an airline laser scanning. From the classified cloud, digital models of terrain and surface were generated, which were afterwards used as reference data for the evaluation of TANDEM-X. In comparison to DTM (digital terrain model) an absolute accuracy of TANDEM-X model is fulfilled at 88 per cent of areas, and 96 per cent in comparison with DSM (digital surface model). The overall accuracy is mostly affected by the shape of the landscape, whereas the influence of slope and orientation towards a cardinal direction is not so significant. TANDEM-X reaches a high accuracy (ME=0.5 m; RSME=1.4 m) at non-forested areas. The biggest influence on the quality of the model is afforestation, which decreases the accuracy (ME = 5,6 m and RMSE = 6 in comparison with DTM, ME = 3,4 m and RMSE = 4,7 m in comparison with DSM). Despite those differences, the absolute fault of TANDEM-X at Litvinovske vysypky, is fulfilled and TANDEM-X can be successfully used to monitor terrain changes in mining areas.

**Keywords:** digital terrain model, digital surface model, TANDEM-X, LiDAR, accuracy

# OBSAH

1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE .....	11
2. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	12
2.1. Geomorfometrie .....	12
2.2. Digitální výškové modely .....	12
2.2.1. Rastr a vektor .....	13
2.2.2. TIN .....	14
2.2.3. Měřítko .....	15
2.2.4. Interpolace .....	15
2.3. Sběr dat pro tvorbu modelů terénu .....	16
2.3.1. Globální navigační satelitní systémy – GNSS .....	16
2.3.2. Letecké laserové skenování – LiDAR .....	16
2.3.3. Radarové snímání .....	19
2.4. Využití digitálních modelů .....	21
3. METODIKA .....	22
3.1. Zájmové území .....	22
3.2. Charakteristiky kvality TANDEM-X .....	23
3.3. Letecké laserové skenování, klasifikace bodového mračka a tvorba referenčních modelů .....	24
3.4. Environmentální charakteristiky .....	26
3.4.1. Land Cover .....	26
3.4.2. Svažitost a orientace ke světovým stranám .....	26
3.5. Evaluace vertikální přesnosti .....	27
4. VÝSLEDKY A DISKUSE .....	30
4.1. Vliv charakteristik TANDEM-X .....	31
4.2. Kvalita TANDEM-X v porovnání s DTM .....	33
4.2.1. Vliv krajinného pokryvu .....	34
4.2.2. Vliv sklonitosti .....	36



4.2.3. Vliv orientace ke světové straně .....	37
4.3. Přesnost odhadu povrchu vegetace.....	38
4.3.1. Vliv krajinného pokryvu .....	40
4.3.2. Vliv sklonitosti .....	43
4.3.3. Vliv orientace ke světové straně .....	44
5. ZÁVĚR .....	45
6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	46
7. PŘÍLOHY.....	53

# SEZNAM ZKRATEK

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

CLC – Corine Land Cover

COM – Consistency Mask

COV – Coverage Map

ČR – Česká republika

ČÚZK – Český úřad zeměměřický a katastrální

DEM – Digital elevation model

DMP – Digitální model povrchu

DMP1G – Digitální model povrchu 1. generace

DMR4G – Digitální model reliéfu 4. generace

DMR5G – Digitální model reliéfu 5. generace

DMT – Digitální model terénu

DPZ – Dálkový průzkum Země

DSM – Digital surface model

DTM – Digital terrain model

GIS – Geografické informační systémy

GLONASS – Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema

GNSS – Globální navigační satelitní systémy

GPS – Globální polohový systém

HEM – Height error map

CHM – Canopy Height Model

IDW – Inverse Distance Weighting

LiDAR – Light Detection and Ranging

MAE – mean of absolute error

ME – mean error

RADAR – Radio Detection and Ranging

RMSE – root mean square error

SD – standard deviation

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

TIN – Triangulated Irregular network

VHR – Very high resolution

# 1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Digitální elevační modely (DEM) jsou hojně využívány v mnoha odvětvích environmentálního modelování, např. pro analýzy viditelnosti (Klouček et al., 2015), modelování druhové distribuce (Moudrý et Šimová, 2013), pro tvorbu modelů dna oceánů (Mashburn et al., 2018), k mapování povrchu zakrytého ledem (Carabajal et. Boy, 2016) nebo k monitorování post-těžební krajiny (Moudrý et al., 2019).

V současnosti je k dispozici několik DEM lišících se nejen svým rozlišením, ale i metodou sběru dat. DEM jsou zpravidla generovány z dat dálkového průzkumu Země, a to z leteckého laserového skenování nebo radarového snímání. V globálním rozsahu (tedy i pro území České republiky) je volně dostupný model radarového snímání SRTM (rozlišení 30 m) a TANDEM-X (rozlišení 90 m). TANDEM-X je také dostupný v rozlišení 12 m, ale pouze pro vědecké účely. Modely leteckého laserového skenování lze zařadit mezi modely s vysokým rozlišením (VHR – very high resolution). V ČR jsou volně dostupné digitální modely reliéfu čtvrté (rozlišení 5 m) a páté generace s rozlišením 2 m (ČÚZK, 2010). Digitální modely mezi sebou bývají často porovnávány (Grohmann, 2018; Mukherjee et al., 2013) a evaluovány (Vaze et al., 2010) za účelem ověření udávané přesnosti a vhodnosti daných modelů pro konkrétní využití, např. v ekologickém modelování (Moudrý et al., 2018). Přesnost digitálních modelů ovlivňuje nejen jejich rozlišení a metoda sběru dat, ale i několik environmentálních charakteristik jako je sklonitost, orientace ke světové straně nebo krajinný pokryv. Nepropustnost vegetace v zalesněných územích způsobuje snížení přesnosti modelů terénu oproti lokalitám s přímým výhledem na oblohu (např. pole a louky). V horských terénech nebo v místech ovlivněných antropogenní činností lze očekávat snížení přesnosti modelů vlivem častých terénních změn a velkých sklonitostí terénu (Gupta et al., 2014). V rámci této diplomové práce byla evaluována přesnost modelu TANDEM-X v post těžební krajině na Litvínovsku.

Hlavním cílem práce je posouzení přesnosti digitálního modelu TANDEM-X generovaného z dat radarového snímání interferometrií. Dílčím cílem je klasifikace bodového mračka z leteckého laserového skenování a vygenerování modelů terénu a povrchu, které sloužily jako referenční výškové modely při posouzení vlivu environmentálních charakteristik na přesnost TANDEM-X. Konkrétně se jedná o vliv krajinného pokryvu (zejména zalesnění), sklonitosti a orientace ke světovým stranám.

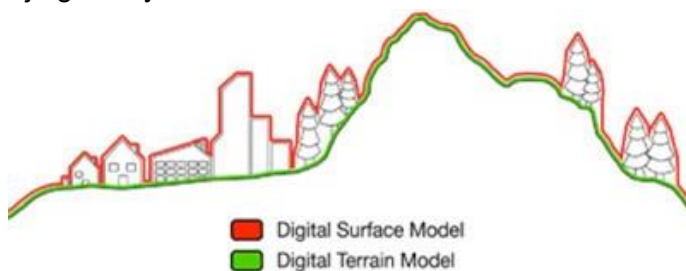
## 2. LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 2.1. Geomorfometrie

Věda zabývající se analýzami povrchu planety Země, které bývá často přezdíváno geomorfologická analýza nebo analýza terénu (Tuček, 1998), vychází z matematiky, informatiky a vědě o Zemi (Hengel et Reuter, 2009). Stále oblíbenější prezentací povrchu planety se stávají digitální modely. Hlavním účelem generování modelu je vytvoření co nejreálnější kopie planety – jejího terénu, povrchu nebo vegetačního krytu. Samotnému generování modelu v geografických informačních systémech (GIS) předchází sběr dat – dálkovým průzkumem Země (DPZ) nebo pozemním měřením (geodetická měření).

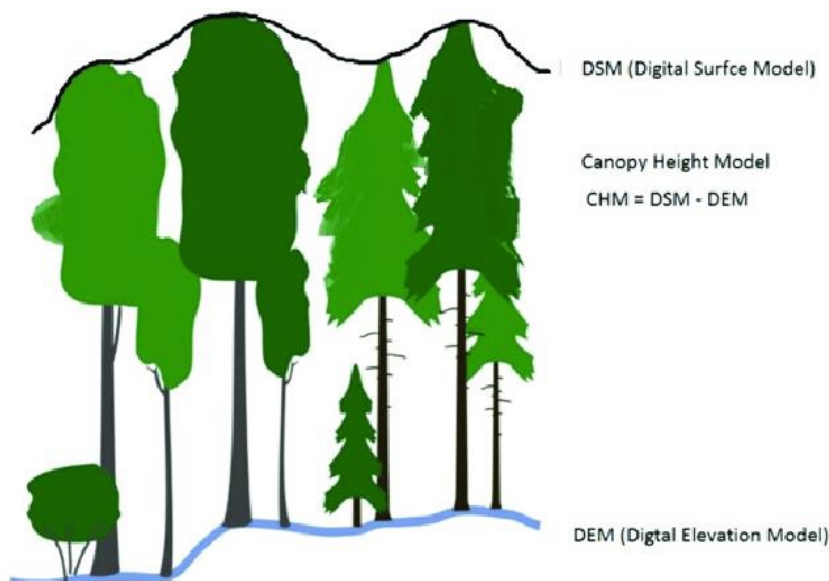
### 2.2. Digitální výškové modely

Digitální výškové modely jsou využívány v mnoha odvětvích environmentálního modelování- např. pro analýzy viditelnosti (Klouček et al., 2015), modelování druhové distribuce (Moudrý et Šímová, 2013), odhad solárního potenciálu (Fogl et Moudrý, 2016), k analýze změn využití půdy a změny půdního krytu (Cui et al., 2018), ke sledování struktury lesního porostu (Akay et al., 2009) nebo k modelování výšky porostu mangrove (Rahman et al., 2019). Dále bývají využívány ve stavebnictví, vodohospodářství a hydrologii (stanovení hranice zátopové oblasti, směr odtoku, vytyčení rozvodnice povodí). V digitálních modelech (DEM – digital elevation model) je terén rozdělen pravidelnou mřížkou (rastrem, gridem) na buňky, které jsou nositelem informace o výšce. Modely se dále dělí podle toho, zda buňky nesou informaci o nadmořské výšce holého terénu nebo terénu s objekty na něm. Tím vzniká odlišnost mezi DMT – digitálním modelem terénu (anglicky DTM – Digital Terrain Model) a DMP – digitálním modelem povrchu (DSM – Digital Surface Model). DSM popisuje planetu i s jejím pokryvem – budovy, vegetace. Rozdíl mezi typy modelu je graficky znázorněn na obrázku 1.



Obr. 1: Rozdíl mezi DSM a DTM, (Asharyanto et al., 2015)

Zvláštním modelem je Canopy Height Model (CHM), který je rozdílem mezi digitálním modelem povrchu a digitálním modelem terénu, tedy  $CHM = DSM - DEM$  (obrázek č. 2), a popisuje výšku vegetačního porostu.

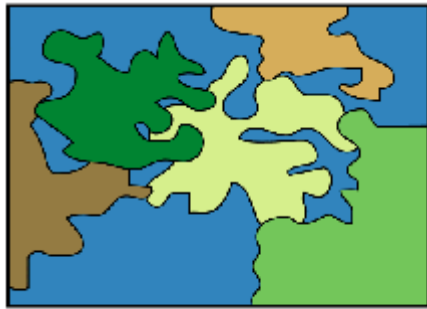


Obr. 2: Canopy Height Model, (Ahmad et al., 2017)

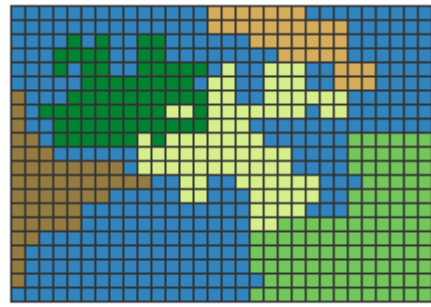
### 2.2.1. Rastr a vektor

Digitální modely lze generovat z vektorových vstupních dat. Vektorem jsou v geoinformačních systémech body, linie a polygony. Vrstevnice jsou liniovým vektorem, který spojuje místa se stejnou nadmořskou výškou. V současné době jsou vrstevnice k vytvoření DTM na našem území spíše vzpomínkou, nicméně v rozvojových zemích stále jediným zdrojem výškopisných informací. Vektorová data ve formě bodů jsou v současnosti hojně využívána - např. při generování modelů z dat leteckého laserového skenování (vzniká bodové mračno) nebo při ověření terénu pomocí GPS.

Rastr se skládá z buněk (zpravidla stejných), které jsou spojovány do pravidelné mřížky. Při vytváření rastru (gridu) se volí jeho rozlišení, které udává délku hran buněk (Martínek et al., 2007). Dle Krause (2000) jsou dvě varianty, jak mohou buňky nést informaci o nadmořské výšce. První možností je, že má každý vrchol buňky jinou nadmořskou výšku a výsledný model je tvořen „zborcenými“ pixely. Obvyklejší variantou je druhý způsob prezentace – informace je umístěna ve středu buňky a platí pro celou její plochu (fasetu). Rastr je nejčastěji používán k prezentaci spojitého jevu, čímž mohou být právě digitální modely a jevy z nich odvozené – sklon svahu, orientace, křivost atp.



Vektorový datový model

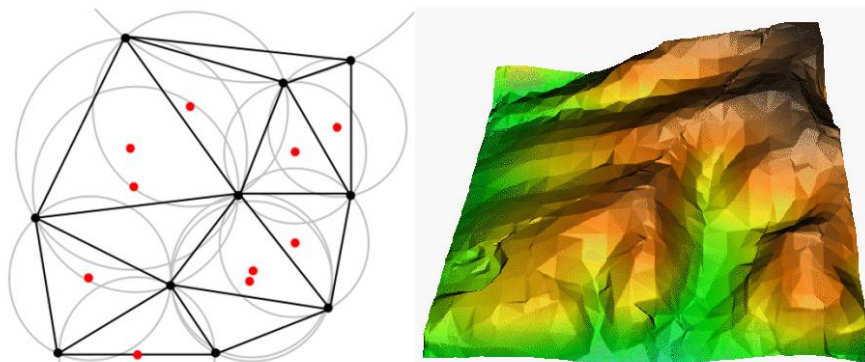


Rastrový datový model

Obr. 3: Rastrová a vektorová prezentace, (ArcGIS for Desktop, 2016)

### 2.2.2. TIN

TIN – Triangulated Irregular Network – je nepravidelná síť trojúhelníků, jejichž vrcholy nesou informace o poloze a nadmořské výšce. Síť se skládá z vrcholů (vertices), hran (edges) a plošek (faces). Síť trojúhelníků by měla co nejvíce přimykát skutečnému terénu. Proto v oblastech s velkou variabilitou dochází k vytvoření mnoha malých trojúhelníků nejpřesněji popisujících realitu. Body jsou do trojúhelníkové sítě spojeny tak, aby uvnitř kružnice opsané kterémukoliv trojúhelníku neležel žádný další bod. Tento způsob vytváření TIN je nejčastěji používanou triangulační metodou a nazývá se Delaunayova triangulace (obrázek 4). Nespornou výhodou TIN je popis povrchu v různých úrovních rozlišení, což u rastrů není možné. Oproti tomu je nevýhodou TINu nutnost vizuální inspekce a manuální kontroly sítě. Výhodou rastru je jeho jednoduchost na ukládání a k analýzám, další výhodou je jednoduchá integrace s rastrovými databázemi (Pacina et Brejcha, 2014).



Obr. 4: Delaunayova triangulace, TIN, (Documentation QGIS 2.8, 2016)

### 2.2.3. Měřítko

Mezi základní parametry ovlivňující finální kvalitu a přesnost digitálních modelů patří jejich měřítko. Každý rastr lze rozdělit na jednotlivé pixely, které nesou hodnotu daného spojitého jevu (nadmořská výška, sklonitost, orientace, křivost). Délka hrany tohoto pixelu (buňky) udává rozlišení, kterého model dosahuje. Čím delší jsou hrany buněk, tím nižší je rozlišení daného modelu a naopak. S rostoucím rozlišením roste časová náročnost na vytvoření modelu, a ne vždy je vhodné volit podrobná měřítko. V modelech s vysokým rozlišením se více projevují chyby měření, které jsou u modelů s nižším měřítkem „skryty“. O volbě měřítka se podrobněji zmiňuje Goodchild (2011).

### 2.2.4. Interpolace

Při rastrové prezentaci spojitého jevu bývají hodnoty dopočítávány pomocí prostorové interpolace. Interpolace tedy slouží k výpočtu hodnot v místech, kde nebyly naměřeny (Klimánek, 2006). Interpolační algoritmy se na základě matematických principů snaží ze zadaných vstupních hodnot predikovat chování reálného terénu. Kvalita vstupních dat (zejména hustota naměřených bodů a jejich přesnost) společně se zvolenou interpolační metodou ovlivňují kvalitu výsledného digitálního modelu terénu (Pacina et Brejcha, 2014). K interpolaci lze využít několik metod. Jednou z nich je IDW (Inverse Distance Weighting), která vychází z průměru okolních bodů inverzně vážených jejich vzdáleností. Zjednodušeně lze říci, že nejbližší hodnota u interpolovaného bodu nejvíce ovlivňuje její výslednou hodnotu. Jsou tak zachována naměřená maxima a minima vstupních dat. Druhou interpolační metodou je Spline. Funkci Spline si lze představit jako ohebné pravítko, které se snaží co nejpřesněji projít všemi naměřenými body. Povrch je z naměřených hodnot interpolován po částech a vytváří se hladké povrchy (Klimánek, 2006). Při této metodě může docházet k tzv. extrapolaci, při které mohou být dosažena nová maxima a minima oproti vstupním datům. Topo to Raster – nástroj, který byl vytvořen speciálně pro generování hydrologicky korektních DEM. Interpolační metoda kombinuje výše popsané metody. Funkce je schopna vytvořit digitální model tak, aby povrch kopíroval náhlé změny terénu jako jsou například vodní toky. Hydrologicky korektní DEM nesmí obsahovat umělé prohlubně a špice, což je v rámci algoritmu Topo to Raster ošetřeno (Pacina et Brejcha, 2014). Do interpolačního algoritmu lze vložit například bodová vrstva nevyšších míst, liniová vrstva osy říční sítě, hranice vodních ploch nebo vrstva známých terénních depresí.

## 2.3. Sběr dat pro tvorbu modelů terénu

Existuje několik metod, kterými lze získat data sloužící k vytvoření digitálních modelů. Metoda sběru dat samozřejmě ovlivňuje přesnost a kvalitu výsledných modelů a je obvykle volena podle následujících kritérií: velikost zájmového území, časová náročnost sběru dat, finanční náklady, požadovaná hustota bodů, polohová přesnost, výšková přesnost a požadované rozlišení. Obecně lze metody rozdělit do dvou skupin:

- **Dálkový průzkum Země:** fotogrammetrie, radarové snímání, laserové skenování, výhodou je časová nenáročnost a pořizování dat pro velká území

- **Pozemní měření:** do této skupiny řadíme veškerá geodetická měření a měření globálními navigačními satelitními systémy (GNSS), tyto metody jsou časově náročné, vhodné u menších pozorovaných území, ale oproti dálkovému průzkumu Země mnohem přesnější

### 2.3.1. Globální navigační satelitní systémy – GNSS

V současné době se stále využívá systém GPS (Global Positioning System), GLONASS (Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema) a od roku 2016 i nově spuštěný evropský systém GALILEO. Při zjišťování polohy pomocí GNSS se využívají dvě metody. První z nich – kódové měření – určuje vzdálenosti mezi přijímačem a družicemi tzv. dálkoměrnými kódy. Kódy jsou vysílány jednotlivými družicemi a přijímačem umožňují přečíst čas, kdy byla část signálu vyslána (Rapant, 2002). Druhým způsobem je fázové měření, u něhož se zpracovávají vlastní nosné vlny vysílané mezi přijímačem a družicemi. Pro správné určení polohy musí přijímač získat signál nejméně od 4 družic. Přesnost určení polohy ovlivňuje mimo jiné i jejich stav a přesnost hodin na družicích (Klimánek, 2006).

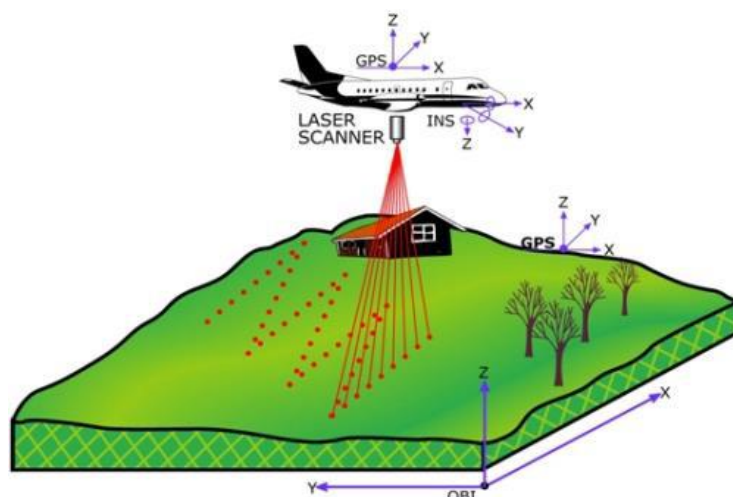
### 2.3.2. Letecké laserové skenování – LiDAR

Letecké laserové skenování nazývané LiDAR (Light Detection and Ranging) je jednou z metod dálkového průzkumu Země. Vývoj této technologie započal zhruba před 25 lety a je stále oblíbenější metodou. Letecké laserové snímání se v současné době nejvíce používá k získání dat a následnému vytváření digitálních modelů terénu, 3D modelů měst, analýze elektrického vedení či vegetačního pokryvu. Jedná se o



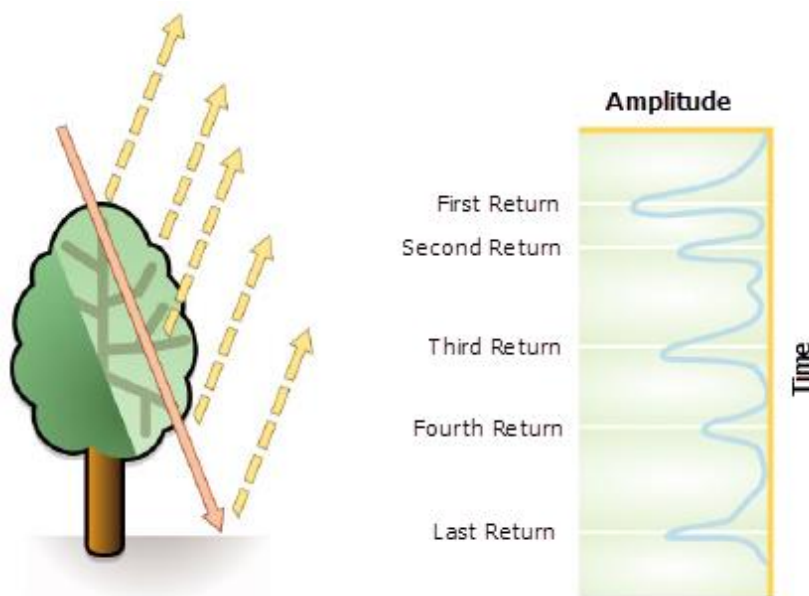
technologii, která je výrazně rychlejší než měření pozemní a umožňuje sběr velkého množství polohopisných a výškopisných údajů.

Každé letadlo je vybaveno GNSS přijímačem, díky kterému je zaznamenávána trasa letu a poloha naměřených bodů. Na letadle je umístěn laserový skener, který směrem k zemskému povrchu vysílá ve vysoké rychlosti svazek laserových paprsků (laserový puls). Vlnová délka těchto paprsků se pohybuje v rozmezí 800–1500 nm (Wehr et Lohr, 1999). U laserového pulsu se měří čas, za který paprsek urazí cestu od skeneru k Zemi, od které se odrazí zpět k letadlu. Na letadle je umístěn citlivý detektor, jimž jsou odražené paprsky zachycovány a spolu s velice přesnými hodinami je měřen čas, za který paprsek urazil dráhu tam i zpět. Známe tedy čas  $t$  a rychlost světla  $v$  ( $v = 299,79 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ ). Ze vztahu:  $t = 2d/v$  lze vypočítat vzdálenost bodu, od kterého se paprsek odrazil. Obrázek č. 5 znázorňuje způsob získávání lidarových dat a vysílaný laserový paprsek.



Obr. 5: LiDAR a svazek paprsků, (Büyüksalih, I., 2016)

Prostřední paprsky jsou vysílány kolmo k zemskému povrchu, okrajové až pod úhlem  $25^\circ$ . Každý paprsek má tvar kužele s vrcholem u letadla a podstavou v odrazovém místě. Se zvyšující se vzdáleností měřeného bodu od laserového skeneru se zvětšuje plocha základny kužele (Klimánek, 2006). Na obrázku č. 6 můžeme vidět, jakým způsobem paprsek zachycuje různé vrstvy zemského povrchu. Získaná data vytváří tzv. mračno bodů (point cloud), které lze pomocí automatizovaných funkcí rozdělit na skupiny bodů- např. terén, vegetace a budovy. Standardním binárním formátem pro ukládání dat leteckého skenování je formát LAS, který lze bez ztráty komprimovat na formát LAZ.



Obr. 6: Odraz laserového paprsku v různých vegetačních úrovních, (ArcGIS Desktop, 2016)

Leteckým laserovým skenováním nad územím České republiky v letech 2009 až 2013 byla nasbírána data, ze kterých byl následně generován Digitální model reliéfu čtvrté generace (DMR4G). DMR4G vychází z bodů pravidelné čtvercové sítě 5 x 5 m. Každý bod nese souřadnice X, Y a H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání. Udávaná střední chyba výšky v odkrytém terénu je 0,3 m a v zalesněném terénu 1 m. Digitální model reliéfu páté generace (DMR5G) prezentuje přirozený, popř. antropogenně upravený zemský povrch v nepravidelné trojúhelníkové síti TIN. Stejně jako u DMR4G nesou body souřadnice X, Y a H a model vznikl leteckým skenováním. Oproti DMR4G se však liší udávaná střední chyba, která je dle ČÚZK (2010) v zalesněném prostředí 0,3 m a v terénu s volným výhledem na oblohu 0,18 m. DMP1G – digitální model povrchu první generace prezentuje území České republiky i s jejím povrchem jako jsou stavby a rostlinný pokryv pomocí trojúhelníkové nepravidelné sítě bodů. Střední chyba výšky tohoto modelu dosahuje 0,4 m u přesně vymezených objektů (budov) a u přesně neohrazených objektů (např. lesy) 0,7 m. (ČÚZK, 2010).

### 2.3.3. Radarové snímání

Mapování reliéfu Země pomocí radarových senzorů řadíme mezi aktivní systémy dálkového průzkumu Země. Tato metoda pracuje na principu vysílání elektromagnetického záření, které je po odražení od zemského povrchu registrováno. Vlnová délka tohoto záření se pohybuje od 1 mm až po jeden metr. Díky nižší frekvenci záření můžeme získávat data i přes nepříznivé podmínky počasí (mlha, déšť), skrze vegetaci a pod sněhovou pokrývkou (Rapant, 2006). Jedná se o detekci a měření vzdálenosti pomocí mikrovlnného (radarového) záření. Radary fungují v pásmu se supervysokou frekvencí (3-30 GHz) na vlnové délce 10–100 mm. Metody používané pro sběr dat za účelem vytvoření digitálních elevačních modelů jsou radarová interferometrie a radarová altimetrie (Markham et. Morris, 2002).

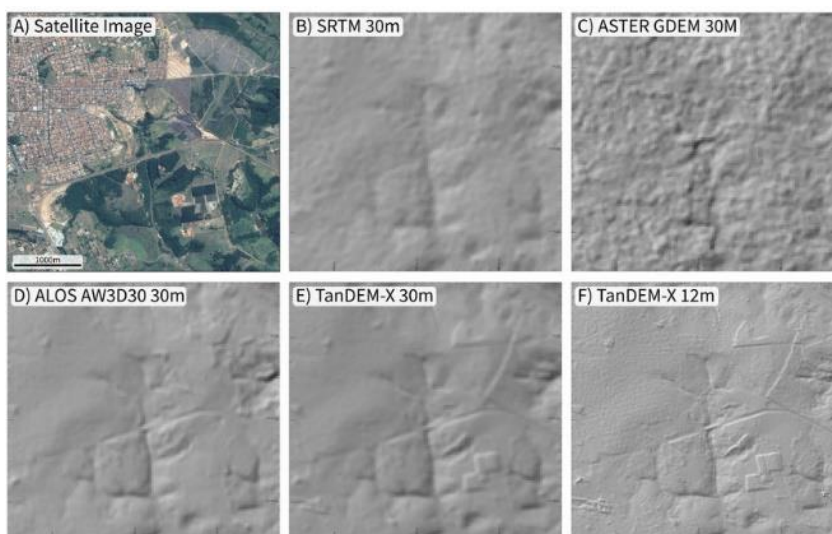
Práce radaru spočívající v měření vzdáleností nazýváme radarová altimetrie. Častým umístěním přístrojů bývají družice, u altimetrů zpravidla na družice ERS-1. Měření funguje na obdobném principu jako u laserového snímání, tzn. radar zaznamenává čas, za který se vyslaný signál odrazí od předmětu a vrátí zpět. Záření se šíří konstantní rychlostí, takže dokážeme zjistit vzdálenost nosiče od povrchu, kde se záření odrazilo. Pokud známe polohu nosiče, můžeme následně spočítat výšku snímaného povrchu. Ze snímání radarovou altimetrií byl vytvořen digitální model ASTER. Nejvíce se altimetrie využívá například pro tvorbu modelů dna oceánů (Mashburn et al., 2018), terénu (Markham et. Morris, 2002) nebo povrchu zakrytého ledem (Carabajal et. Boy, 2016).

Na odlišném principu funguje radarová interferometrie. Ta je založena na získávání radarových dat zkoumaného místa z více zdrojů (družice, pozice letadla, část dráhy). Vlivem toho aspektu dochází k rozdílům ve fázích získaných z odlišných pozic a po zpracování obrazových prvků vzniká tzv. interferogram, který slouží k určení relativních výškových rozdílů mezi prvky. Relativní výškové rozdíly lze následně převést na nadmořské výšky (Klimánek, 2006). Interferometrie je využívána s radarovými systémy družicových tandemů ERS-1 a ERS-2, ale i s radary na letadlových nosičích. Mezi nejvýznamnější z nich patří TOPSTAR a IFSARE. Radarovou interferometrií byla získána data pro SRTM a TANDEM-X. Radarová interferometrie se využívá např. k mapování vulkanické činnosti z družice TanDEM – X (Rossi et. al., 2016).

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) je digitální model terénu vytvořený v rámci amerického projektu ve spolupráci NASA a NGA za pomoci německých a italských kosmických agentur. Data pro téměř celou planetu byla v roce 2000 během

11 dní pořízena principem radarové interferometrie z raketoplánu Endeavour. Opakovaným snímáním vznikly dva produkty – SRTM GL1 s rozlišením 30 m, tj. jedna úhlová vteřina a SRTM GL3 s rozlišením 90 m, které je rovno rozlišení 3 uhlových vteřin (GISAT, 2008). Přesnost SRTM by měla dosahovat polohové přesnosti 20 m a absolutní chyby výšky menší než 16 m, což odpovídá necelým 10 m úplné střední výškové chyby s 90 % intervalem spolehlivosti (Farr et al., 2007). Data SRTM jsou volně dostupná.

V roce 2010 byla z kazachstánského kosmodromu vynesena družice TanDEM – X, která se ve výšce 500 km připojila ke svému dvojčeti TerraSAR- X. Tyto družice společně pořizují data ze stejného pruhu zemského povrchu po celé zeměkouli. Data byla snímána v bi-statickém módu, který spočívá v tom, že radarové impulzy vysílá jedna družice, ale obě družice přijímají signál odražený od zemského povrchu (GISAT, 2013). Digitální model (WorldDEM) generovaný z měření těchto družic disponuje rozlišením 12 m, absolutní přesností 10 m a relativní přesností v terénu se sklonem do 20 % 2 m. V místech s vyšším sklonem je udávaná relativní přesnost 4 metry (Rizzoli et al., 2017).



Obr. 7: Porovnání modelů s odlišným rozlišením, (Grohmann, C.H., 2018)

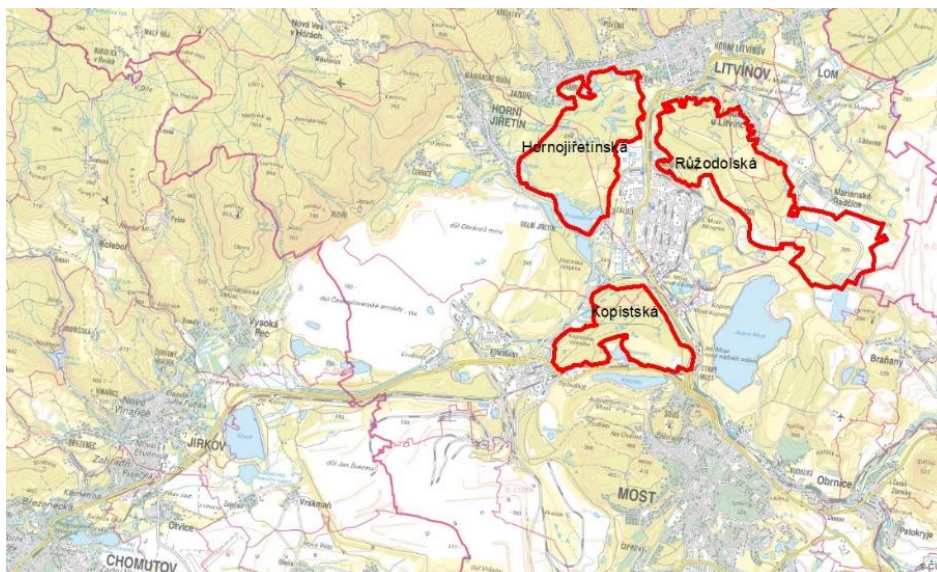
## 2.4. Využití digitálních modelů

Digitální modely jsou v hojně využívaným zdrojem výškopisných dat, které lze využít nejen ve stavebním inženýrství pro tvorbu vizualizací a v přírodních vědách pro modelování odtoku, určení hranic povodí nebo šíření znečištění. Jedním z prvotních příkladů použití je modelování drenážní sítě na základě DEM (Martz et. Garbrecht, 1992). V současné době se digitální modely stávají stále používanějším zdrojem dat při obnově krajiny (restoration ecology). Pro obnovu krajiny je důležité monitorovat krajinnou pokrývku, druhy stanovišť, detekovat změny, popř sledovat úniky ropy a dalších chemikálií (Reif et Theel, 2016). Zambory et al. (2019) na základě digitálních výškových modelů a depresí v říční nivě identifikovali bývalé koryto řeky. Na základě této studie by mělo dojít k obnově původního toku a k navrácení původního hydrologického režimu krajiny. Obnovou nížinných toků za účelem přirozeného zachycování a ukládání oxidu uhličitého v Evropě a Severní Americe se zabývají Brown et al. (2018). Restaurátorskými technikami pro otevřené lesní ekosystémy v Evropě a Severní Americe se zabývá Hanberry et al. (2017). Na základě dat pořízených z bezpilotních letadel a dat z leteckého laserového skenování lze posuzovat stav post – těžební krajiny a její vegetační strukturu (Moudrý et al., 2019).

## 3. METODIKA

### 3.1. Zájmové území

V rámci diplomové práce byly porovnány modely na třech výsypkách – Růžodolská, Hornojřetínská a Kopistská. Tyto výsypky se nachází v Ústeckém kraji v okrese Most (obrázek 8). Růžodolská výsypka ležící jižně od města Litvínov o rozloze 10,2 km<sup>2</sup> patří mezi výsypky lomu ČSA. Dříve se na severní části území nacházela obec Dolní Litvínov. Lesnická a zemědělská rekultivace byla na území zahájena v roce 1972. Jihozápadně od města Litvínov se na ploše 7,1 km<sup>2</sup> rozprostírá Hornojřetínská výsypka. Výsypka dolu Obránců míru byla v letech 1969–2006 převážně lesnický rekultivována. Na severozápadu města Most leží převážně zemědělsky rekultivovaná výsypka o rozloze 4,3 km<sup>2</sup>. Výsypka lomu Obránců míru získala jméno Kopistská podle zaniklé obce Kopisty. Ortofota jednotlivých výsypek jsou vložena do příloh (příloha 1–3). Detail základní mapy pro jednotlivé výsypky též vložen (jako příloha 4-6).



Obr. 8: Výsypky na Mostecku, (Kubcová, L., 2019)

### 3.2. Charakteristiky kvality TANDEM-X

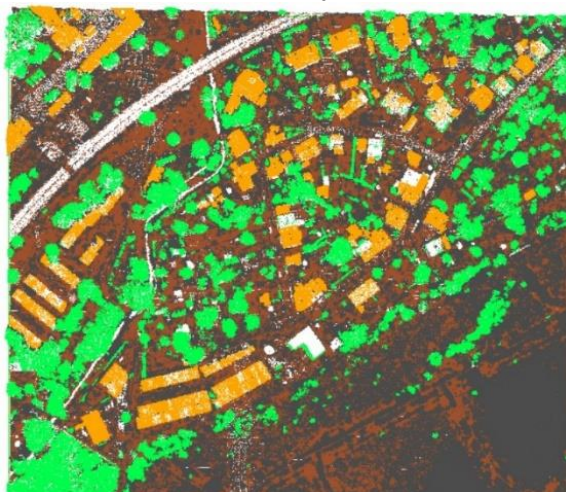
Společně s modelem TANDEM-X jsou dodávány charakteristiky COM, COV a HEM, které byly použity pro popis a odhad očekávané přesnosti v řešeném území. COM (Consistency mask) je vrstva konzistentních hodnot. Pixely, jejichž výškové hodnoty jsou z nějakého důvodu nestejnoroelé, se promítají do této vrstvy. Rozlišujeme dva typy nestejnoroelostí – velký absolutní rozdíl výšek vznikající zejména na nesouvislých územích a malý absolutní rozdíl výšek, který zvyšuje výškovou chybu daného digitálního modelu. Coverage map (COV) udává, kolik platných výškových hodnot bylo použito na vytvoření výsledných hodnot. Jedná se o mapu „pokrytí“. Se zvyšující se hodnotou pokrytí roste počet přeletů nad daným územím. HEM (Height error map) reprezentuje hodnotu chyby výšky pro každý pixel rastru. Chyba je prezentována formou směrodatných odchylek a je odvozena z interferometrické soudržnosti. Jedná se o odhad „kvality výšky“ (Wessel, 2016). V rámci diplomové práce jsou porovnávány digitální elevační modely, kde je hodnota výšky  $h$  dána váženým průměrem výšek pro daný pixel. Každé výšce je přiřazena váha, která odpovídá směrodatným odchylkám z HEM. Čím větší je směrodatná odchylka, tím menší má váhu příslušná výška na výslednou výšku. Mapy COM, COV, HEM a DEM vloženy do příloh. Udávaná relativní přesnost modelu TANDEM-X je 2 m do sklonitosti 20 % a 4 m u strmějších svahů. Absolutní přesnost modelu je 10 m.



### 3.3. Letecké laserové skenování, klasifikace bodového mračka a tvorba referenčních modelů

Mračno bodů bylo získáno 18. 5. 2017 v odpoledních hodinách leteckým laserovým skenováním společnosti ÚVGZ AV ČR, v.v.i. – CzechGlobe za dobrých atmosférických podmínek. Ke skenování byl použit laserový skener Riegel LMS Q780 umístěný na leteckém nosiči Cessna 208B. Snímání proběhlo v letové výšce 1030 m nad povrchem v rychlosti 60 m/s. Skener pracoval v zorném úhlu 60° s maximálním dosahem 5800 m a vlnovou délkou 1064 nm.

Leteckým laserovým skenováním vznikne mračno bodů, které je nutné klasifikovat na skupiny (např. budovy, vodní plochy, nízký vegetační porost, vysoký vegetační porost atd.). Poskytnuté mračno bodů ve formátu laz bylo zpracováno pomocí nástrojů LAStools. V prvním kroku byl použit nástroj „lastile“, který rozdělil letové linie na zhruba stejně velké dlaždice za účelem snížení výpočtového času. Nástrojem „lasground“ byly v těchto dlaždicích klasifikovány body, které reprezentují terén a byla vypočtena jejich nadmořská výška. Dále byl proveden výpočet nadmořské výšky ostatních odrazových bodů. K tomuto výpočtu byl použit nástroj „lasheight“. V posledním kroku byl využit nástroj „lasclassify“, jehož použitím bylo mračno bodů klasifikováno na výše zmiňované skupiny.

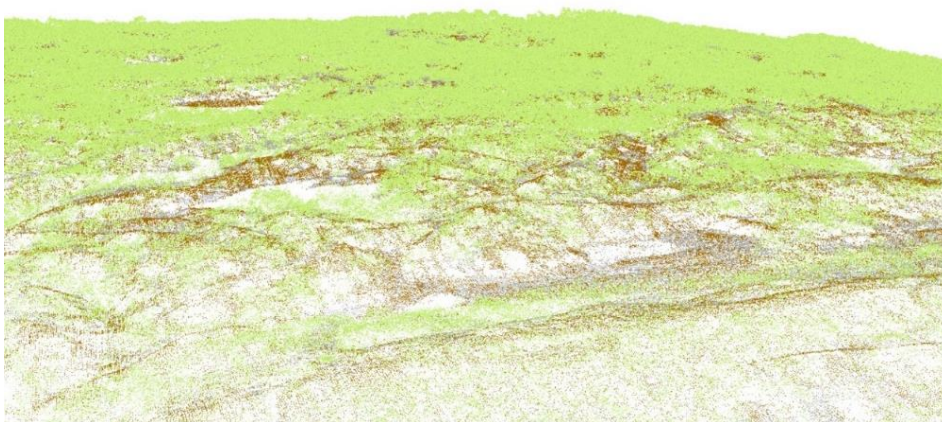


Obr. 9: Klasifikované mračno bodů, (Kubcová, L., 2019)

Použitím všech doposud zmíněných nástrojů vznikla data ve formátu laz. K prohlížení vytvořených dlaždic a kontrole výstupů lze využít nástroj „lasview“, programy ArcMap 10.6.1 a ArcScene 10.6.1. Pomocí lasview lze zobrazit mračno bodů v obou formátech. Do prostředí ArcScene vstupují data ve formátu las, a proto byly dlaždice na tento formát převedeny nástrojem „laszip“. Nástrojem „las2dem“ byly vytvořeny digitální modely ve formátu .asc, které lze vkládat do prostředí ArcMap.



Klasifikace mračka bodů byla provedena s různým nastavením klasifikačních parametrů. Klasifikovaná mračka byla vizuálně kontrolována pomocí generovaných TIN a průřezem mračka bodů v problematických místech. Nejlepší dvě zvolené klasifikace byly dále porovnány odečtením rastrů z nich vytvořených. Tím byla nejen zhodnocena správnost automatické klasifikace, ale zároveň došlo i k identifikaci zbývajících problematických míst. V ArcMap byl z klasifikovaného mračka bodů generován digitální model funkcí „LAS Dataset to Raster“, která dlaždice spojí a vytvoří jeden digitální model. Vzhledem k hustotě bodů a kvalitě skenovaných dat je model generovaný z LiDARu považován za model referenční.



*Obr. 10: Klasifikovaný terén a vegetační porost na Hornojiřetínské výsypce, (Kubcová, L., 2019)*

### 3.4. Environmentální charakteristiky

#### 3.4.1. Land Cover

Krajinný pokryv byl převzat z vrstvy Corine Land Cover (CLC). CLC je volně dostupná polygonová vrstva popisující krajinný pokryv na území ČR. Nejmenší mapovací jednotkou pro polygony byla stanovena plocha 25 ha. Vrstva krajinného pokryvu pro rok 2018 vychází z aktualizované polygonové verze pokryvu v roce 2012 (European Data Portal, 2019). Díky této vrstvě lze rozdělit jednotlivé buňky rastru podle krajinného pokryvu a porovnávat tak vliv vegetace na přesnost modelu. Mapa krajinného pokryvu je vložena do příloh (příloha 9).

#### 3.4.2. Svazitost a orientace ke světovým stranám

Mezi důležité environmentální charakteristiky, které ovlivňují přesnost výškových modelů, patří sklonitost a orientace ke světovým stranám. Digitální model TANDEM – X disponuje vertikální přesností 2 m v lokalitách se sklonem do 20 %. V místech s vyšší sklonitostí je deklarována vertikální přesnost 4 m (Wessel et al., 2018). Sklonitost (Slope) popisuje maximální hodnotu změny výšky. Funkce „Slope“ počítá hodnotu změny podle sousedních buněk, a to jak přímo sousedních, tak i buněk diagonálně sousedních. Pro správný výpočet je nutné, aby alespoň 7 z 8 sousedních buněk obsahovalo platnou hodnotu. Jako výstup lze zvolit sklonitost v procentech s rozmezím 0 % - 100 % nebo ve stupních (0°– 90°). Sklonitost na zájmových územích byla rozdělena do 4 skupin (viz. tabulka č. 1). Další významnou charakteristikou je orientace vůči světovým stranám. U této funkce je výsledkem azimut (úhel) ve stupních v hodnotě 0–360° (rozdělení podle světových stran v tabulce č. 1). Mapy sklonitosti a orientace ke světovým stranám jsou vloženy do příloh (příloha 7 a 8).

Skupina č.:	Sklonitost (%):	Světová strana:	Orientace (°):
1	0-10	S	315-45
2	10-20	V	45-135
3	20-30	J	135-225
4	30-80	Z	225-315

Tabulka 1: Rozdělení sklonitosti a orientace ke světovým stranám do skupin

### 3.5. Evaluace vertikální přesnosti

Základem evaluace přesnosti je porovnání dvou nebo více datových sad. Jejich odlišnosti lze popsat statistickými údaji, ukazateli ME, MAE a RMSE. Mean error (ME) je střední chyba, která udává průměrný rozdíl datových sad. Pokud je výsledná hodnota záporná, posuzovaný model podhodnocuje. MAE (mean of absolute error, střední absolutní chyba) je absolutní průměr rozdílu výšek datových sad. RMSE (root mean square error, střední kvadratická chyba) je rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi výškovými daty. Čím nižší je hodnota ukazatele RMSE, ME a MAE, tím přesnější je posuzovaný model. Vzorce pro výpočet ME, MAE a RMSE:

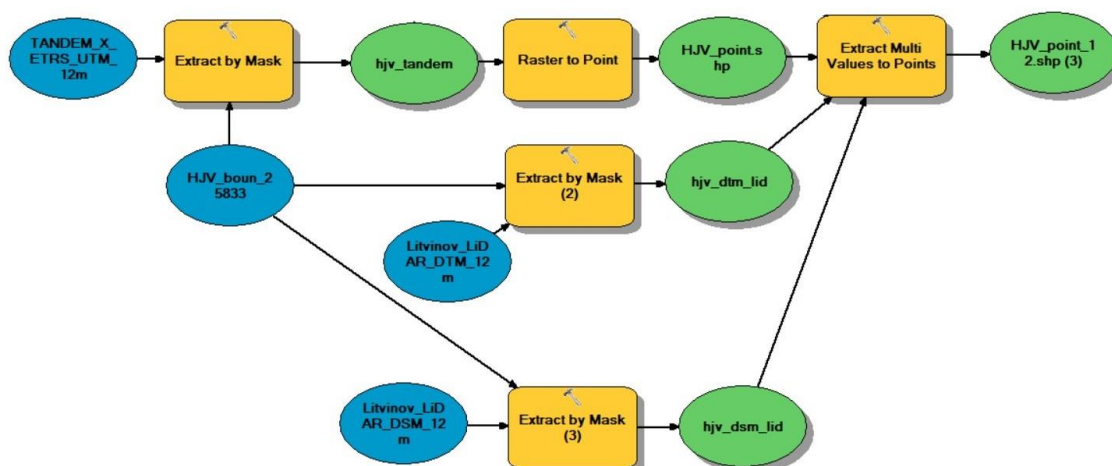
$$ME = \sum \frac{(DEM1-DEM2)}{n} ,$$

$$MAE = \sum \frac{(|DEM1-DEM2|)}{n} ,$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (DEM1-DEM2)^2}{n}} ,$$

kde DEM1 jsou výšky z prvního modelu (TANDEM-X), DEM2 výšky z referenčního modelu (LiDARových dat) a n počet hodnot.

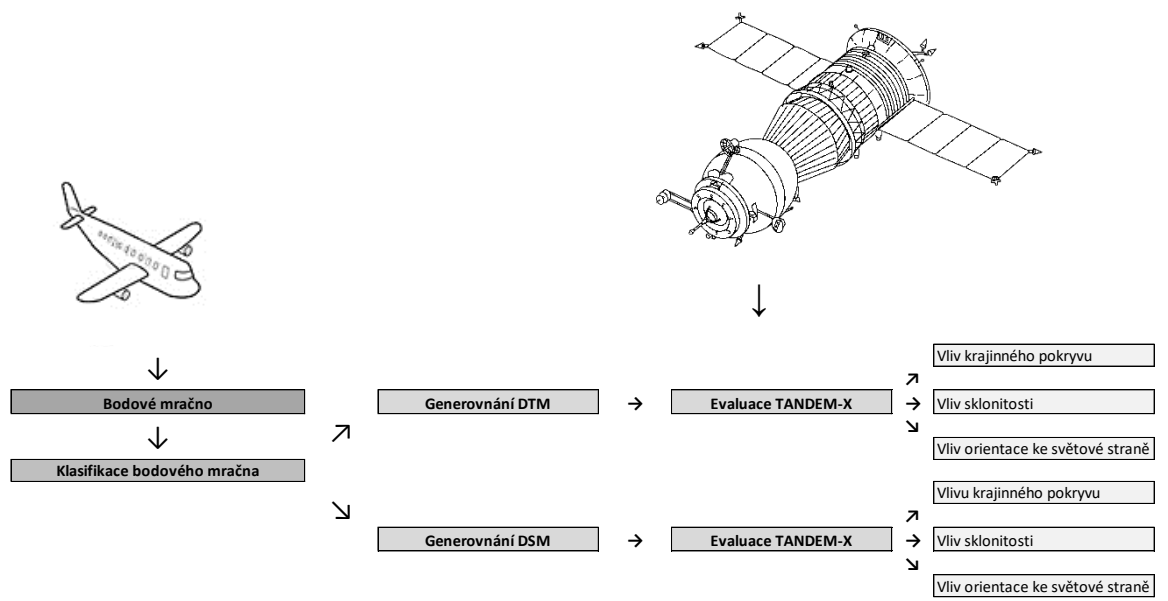
Nejprve byly modely (TANDEM-X, DTM a DSM generované z dat leteckého laserového skenování) oříznuty podle hranic zájmových území. K oříznutí rastrů podle polygonové hranice byl použit nástroj „Extract by Mask“. Digitální model TANDEM-X byl následně rozložen na body nástrojem „Raster to Point“. Nově vytvořená bodová vrstva odpovídala středům buněk, tzn. vznikla bodová síť o rozměrech 12 x 12 m (všechny modely disponují rozlišením 12 m). Nástrojem „Extract Multi Values to Points“ byly každému bodu přiřazeny nadmořské výšky z použitých rastrů. Tento postup byl vložen do „ModelBuilderu“ (obrázek 11) a spuštěn pro všechny tři lokality.



Obr. 11: Postup získání nadmořských výšek bodů z několika rastrů, (Kubcová, L., 2019)

Do atributové tabulky bodového shapefilu, který vznikl rozložením rastru, tímto postupem přibyl sloupec s hodnotami nadmořských výšek v daných bodech. Každému bodu byla přiřazena informace o krajinném pokryvu („Intersect“). Typy krajinného pokryvu byly rozděleny na dvě skupiny – zalesněné a nezalesněné území. Do zalesněného území byly zařazeny kategorie: listnaté lesy a zemědělské oblasti s přirozenou vegetací. Do kategorie nezalesněné území byly zařazeny louky, pastviny a nezavlažovaná orná půda. Haldy a skládky, stejně jako nízký porost v lese, byly ponechány jako samostatné kategorie. K tomuto rozřazení došlo po prozkoumání lokalit na ortofoto. Vodní plochy, průmyslové a obchodní areály, zástavba a komunikace byly z hodnocení vlivu krajinného pokryvu odebrány. Za účelem evaluace přesnosti podle sklonitosti byly do nově vytvořeného sloupce typu „double“ vložena čísla skupiny, do které daná sklonitost patří (viz. tabulka č. 1). V některých bodech (zejména okrajových) došlo k přiřazení neplatných hodnot, proto byly tyto body z klasifikace odebrány. Obdobným způsobem byla bodům přidělena orientace ke světové straně.

Atributová tabulka byla exportována do excelového sešitu, kde byly odečtením datových sad zjištěny konkrétní rozdíly mezi nadmořskými výškami. Následně byl soubor vložen do statistického softwaru R (verze 1.1.463), ve kterém byly vypočteny statistické ukazatele RMSE, ME a MAE. Nainstalovány a použity byly následující balíky: readxl (Bryan, 2018), data.table (Dowle, 2018) a hydroGOF (Bigiarini, 2017). Na obrázku č. 12 je znázorněno schéma evaluace modelu TANDEM-X.



Obr. 12: Schéma evaluace, (Kubcová, L., 2019)

## 4. VÝSLEDKY A DISKUSE

Dle mapy pokrytí (COV) byly nad celým územím Hornojřetínské a Kopistské výsypky 4 přelety. Na výsypce Růžodolské je čtyřmi přelety pokryto pouze 40 % území, ale i přesto vykazuje nejvyšší přesnost. Dle mapy konzistentních hodnot (COM) je na všech výsypkách více než 90 % výšek konzistentních, čímž by měla být zajištěna poměrně vysoká přesnost. Konkrétní zastoupení bodů v těchto charakteristických skupinách je uvedeno v tabulce č. 2.

zastoupení buněk v %	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská
<i>buněk celkem:</i>	49345	29685	70573
<i>COM:</i>			
1	0,00%	0,00%	0,05%
8	91,61%	94,99%	97,92%
9	6,57%	0,54%	1,53%
10	1,82%	4,47%	0,50%
<i>COV:</i>			
3,00	0,00%	0,00%	59,96%
4,00	100,00%	100,00%	40,04%

Tabulka 2: Zastoupení v jednotlivých skupinách charakteristiky TANDEM-X

Bodové mračno bylo klasifikováno na terén a povrchové skupiny (vegetace atp.), z nichž byly nadále úspěšně vytvořeny digitální modely terénu a povrchu sloužící k evaluaci modelu TANDEM-X. Hornojřetínská výsypka obsahovala celkem 49 345, Kopistská 29 685 a Růžodolská 70 573 buněk. Absolutní přesnost 10 m je splněna jak při porovnání s DTM, tak i při porovnání s DSM. Tuto přesnost splňuje 88 % buněk evaluovaných modelem terénu a 96 % buněk evaluovaných podle DSM. Průměrná sklonitost terénu je na Hornojřetínské a Kopistské výsypce cca 7,5 %, na výsypce Růžodolské 5,4 %. Růžodolská a Hornojřetínská výsypka jsou na polovině své rozlohy zalesněny, na Kopistské výsypce zabírá les zhruba 80 % její celkové rozlohy. Počet buněk spadajících do definovaných skupin sklonitosti, svažitosti a krajinného pokryvu v procentuálním zastoupení je uveden v tabulce č. 3.

zastoupení buněk v %	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská
<i>buněk celkem:</i>	49345	29685	70573
<i>zalesněná území:</i>	50,18%	78,08%	52,79%
<i>nezalesněná území:</i>	2,87%	16,91%	36,00%
<i>nízký porost v lese:</i>	38,35%	4,33%	6,71%
<i>haldy a skládky:</i>	-	-	1,85%
<i>vyřazeno:</i>	8,60%	0,68%	2,66%
<i>slope 1 (0-10):</i>	69,71%	72,46%	85,65%
<i>slope 2 (10-20):</i>	23,32%	24,83%	11,32%
<i>slope 3 (20-30):</i>	5,94%	2,23%	2,16%
<i>slope 4 (30-80):</i>	0,84%	0,25%	0,60%
<i>vyřazeno:</i>	0,19%	0,23%	0,26%
<i>průměrný sklon:</i>	7,58%	7,15%	5,40%
<i>S:</i>	19,10%	23,03%	23,36%
<i>V:</i>	22,25%	21,85%	21,26%
<i>J:</i>	33,16%	31,23%	30,50%
<i>Z:</i>	25,20%	23,19%	24,00%
<i>vyřazeno:</i>	0,29%	0,70%	0,88%

Tabulka 3: Zastoupení v jednotlivých skupinách environmentálních charakteristik

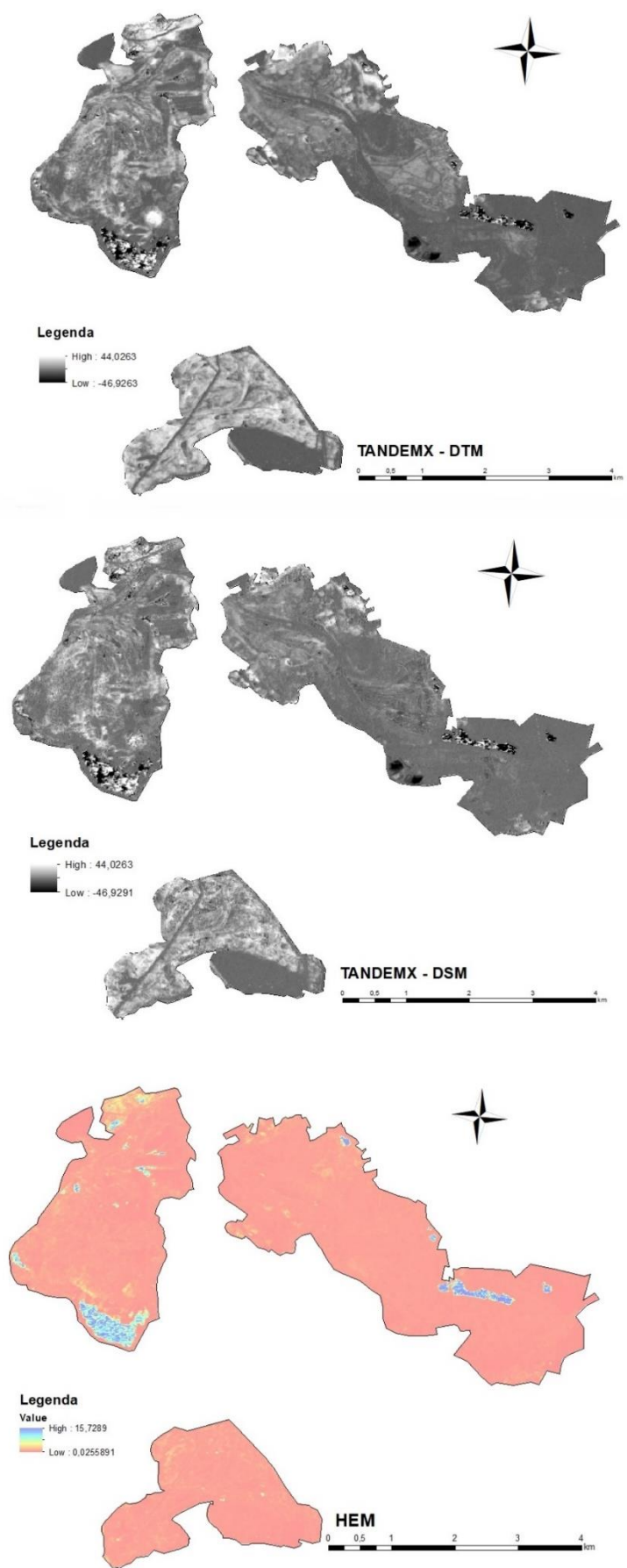
## 4.1. Vliv charakteristik TANDEM-X

Z následující tabulky (č. 4) je patrné, že počet přeletů nad zájmovým územím má minimální vliv na rozdíly mezi modely. Buňky, které nesplňují absolutní přesnost na Horňojřetínské a Kopistské výsypce, jsou pokryty 4 přelety. Na Růžodolské výsypce je 4 přelety pokryto cca 70 % nesplňujících buněk. Většina těchto buněk spadá do skupiny „všechny výšky jsou konzistentní“.

<i>nesplněná absolutní chyba</i>				
<b>TANDEM-X vs. DTM</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>běnek celkem:</i>	5367	6962	1803	14132
<i>COV 3:</i>	0%	0%	24,5%	3,1%
<i>COV 4:</i>	100%	100%	75,5%	96,9%
<i>COM 1:</i>	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%
<i>COM 8:</i>	77,5%	87,8%	84,5%	83,5%
<i>COM 9:</i>	13,5%	0,3%	6,8%	6,1%
<i>COM 10:</i>	9,0%	11,9%	8,5%	10,3%
<b>TANDEM-X vs. DSM</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>buněk celkem:</i>	1862,00	2138,00	686,00	4686,00
<i>COV 3:</i>	0%	0%	32,2%	4,7%
<i>COV 4:</i>	100%	100%	67,8%	95,3%
<i>COM 1:</i>	0,0%	0,0%	0,4%	0,1%
<i>COM 8:</i>	57,7%	80,4%	72,6%	70,2%
<i>COM 9:</i>	31,6%	0,6%	15,6%	15,1%
<i>COM 10:</i>	10,7%	19,0%	11,4%	14,6%

Tabulka 4: Rozdělení buněk nesplňujících absolutní přesnost do charakteristik TANDEM-X

High error map (HEM) nabývá na zájmových výsypkách hodnot 0–15, 73 m. Na Růžodolské výsypce je průměrná absolutní chyba dle charakteristiky HEM 0,57 m, na Kopistské 0,50 m a na zbývajících Horňojřetínské 0,82 m. Na obrázku č. 13 jsou vyobrazeny rozdíly mezi TANDEM-X a digitálními modely na Litvínovských výsypkách (rozdíly na jednotlivých výsypkách vloženy do příloh). Je zde patrná obdobná struktura jako u mapy HEM. Nejvyšší rozdíly jsou dle této mapy v místech s vodní plochou, které byly z hodnocení podle krajinného pokryvu vyřazeny. Z následujícího obrázku je jasně vidět, kde se modely nejvíce odlišují.



Obr. 13: Rozdíl TANDEM-X a DTM, rozdíl TANDEM-X a DSM, (Kubcová, L., 2019)

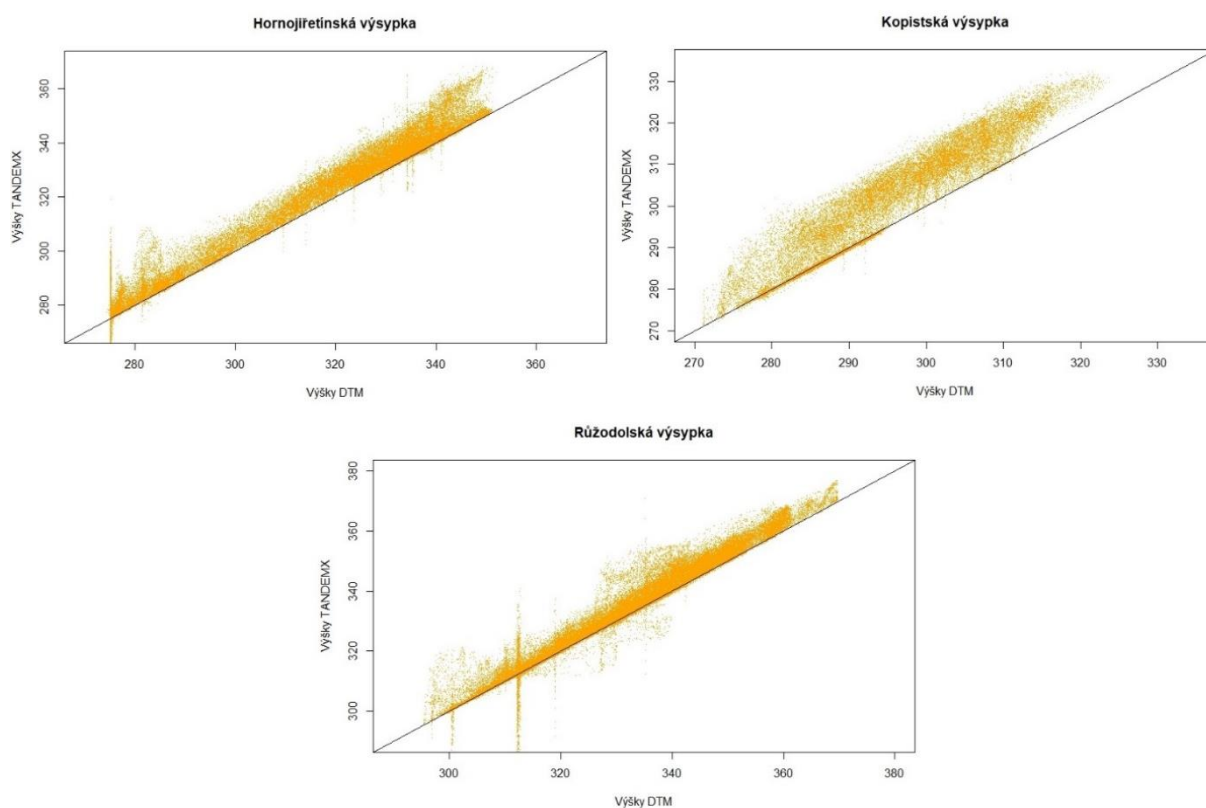


## 4.2. Kvalita TADNEM-X v porovnání s DTM

TANDEM-X na všech studovaných výsypkách terén nadhodnocuje. Průměrný rozdíl nadmořských výšek je na Hornojiřetínské výsypce 4,3 m, na Kopistské 6,3 m a na Růžodolské 2,0 m. Střední kvadratická chyba rozdílů (RMSE) nadmořských výšek je nejnižší na Růžodolské výsypce (4,0 m), o něco vyšší na Hornojiřetínské (6,4 m) a nejvyšší na výsypce Kopistské (7,7 m). Kompletní přehled statistických ukazatelů uveden v tabulce č. 5. Nadhodnocování terénu je graficky znázorněno na obrázku 14.

TANDEM-X vs. DTM	Hornojiřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	4,33	6,25	2,04	4,20
MAE (m):	4,80	6,38	2,48	4,55
RMSE (m):	6,44	7,70	3,95	6,03
první kvartil (m):	1,23	-14,24	0,11	-4,30
medián (m):	3,62	-4,41	1,17	0,13
třetí kvartil (m):	6,84	3,54	3,47	4,62
min (m):	-46,93	-33,45	-36,88	
max (m):	44,03	19,28	35,43	
směrodatná odchylka (m):	4,77	10,98	3,38	6,38

Tabulka 5: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM, (Kubcová, L., 2019)



Obr. 14: Korelace nadmořských výšek DTM na jednotlivých výsypkách, (Kubcová, L., 2019)

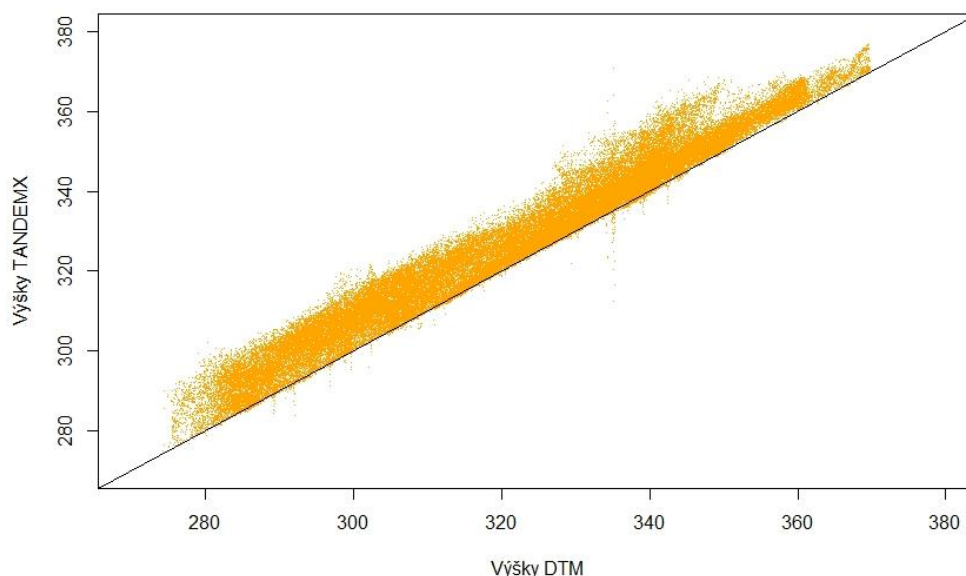
#### 4.2.1. Vliv krajinného pokryvu

V zalesněných oblastech je průměrná střední střední chyba 5,6 m a RMSE 6,7 m. TANDEM-X je jednoznačně nejpřesnější na Růžodolské výsypce (ME = 5,6 m a RMSE = 4,8 m), což může být způsobeno nižší sklonitostí oproti ostatním výsypkám. Naopak největší rozdíly jsou zaznamenány na výsypce Kopistské (ME = 7,8 m a RMSE = 8,62 m), která je ze tří porovnávaných území nejvíce zalesněna. Absolutní přesnost je splněna na 90 % buněk.

Oproti tomu na nezalesněných územích s přímým výhledem na oblohu je výrazně omezen vliv vegetace na přesnost modelu, díky čemuž TANDEM-X dosahuje vysoké přesnosti (všechny buňky splňují danou přesnost). Průměrný rozdíl nadmořských výšek mezi TANDEM-X a DTM na Litvínovských výsypkách je 0,5 m a střední kvadratická chyba 1,4 m, což potvrzuje splnění absolutní přesnosti.

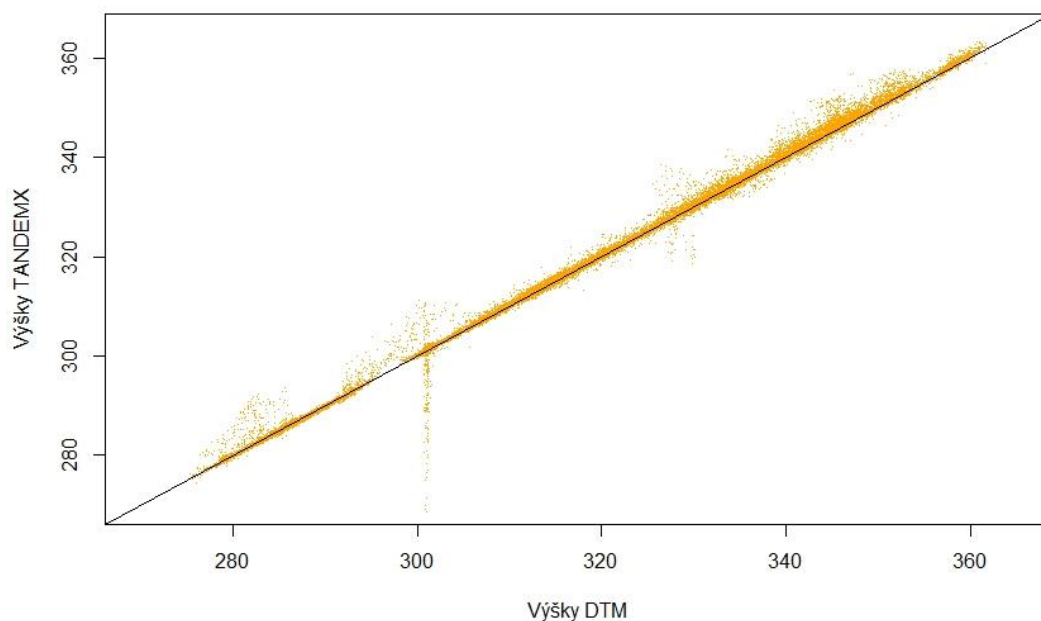
Nízký porost v lese dosahuje hodnoty 4,2 m u střední kvadratické chyby. Průměrná chyba u tohoto krajinného pokryvu je 3,1 m a 96 % buněk splňuje absolutní přesnost. V této kategorii je opět patrný vliv vegetace na výslednou přesnost. Haldy a skládky jsou skupina vyskytující se pouze na Růžodolské výsypce. Podle statistických ukazatelů je zde terén podhodnocován – průměrný rozdíl je -2,6 m a RMSE 4,8 m, nicméně i zde je na všech pixelech splněna absolutní přesnost. Veškeré statistické údaje rozdílů nadmořských výšek mezi modelem TANDEM-X a DTM rozdělených podle krajinného pokryvu zapsány v tabulce č. 6. Nadmořské výšky jsou opět porovnány graficky na obrázku č. 15 a 16.

Zalesněná území



Obr. 15: Korelace nadmořských výšek DTM zalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019)

### Nezalesněná území



Obr. 16: Korelace nadmořských výšek DTM nezalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019)

<b>TANDEM-X vs. DTM - zalesněné</b>	Hornojiřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	5,30	7,80	3,58	5,56
MAE (m):	5,39	7,78	3,65	5,61
RMSE (m):	6,83	8,62	4,78	6,74
splněno:	99,1%	70,0%	99,7%	89,6%
<b>TANDEM-X vs. DTM - nezalesněné</b>	Hornojiřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	0,55	0,64	0,40	0,53
MAE (m):	0,25	0,03	0,72	0,33
RMSE (m):	1,34	1,33	1,49	1,38
splněno:	99,7%	99,9%	99,8%	99,8%
<b>TANDEM-X vs. DTM - nízký porost</b>	Hornojiřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	4,11	3,63	1,53	3,09
MAE (m):	4,06	3,45	1,44	2,98
RMSE (m):	5,34	4,72	2,64	4,23
splněno:	94,2%	95,5%	98,4%	96,0%
<b>TANDEM-X vs. DTM - haldy a skládky</b>	Růžodolská			
ME (m):	-2,62			
MAE (m):	3,16			
RMSE (m):	4,83			
splněno:	99,8%			

Tabulka 6: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM podle krajinného pokryvu

## 4.2.2. Vliv sklonitosti

Dalším faktorem, který ovlivňuje přesnost modelu, je sklonitost terénu. Statistické údaje výškových rozdílů mezi TANDEM-X a DTM rozdělených do skupin podle sklonitosti popisuje tabulka č. 7. Ve všech skupinách sklonitosti je nejpřesnější Růžodolská výsypka. Na Litvínovských výsypkách mezi sklonitostí do 10 % a do 20% přesnost klesá. Naopak od 20 % sklonitosti se přesnost s rostoucí sklonitostí zvyšuje. Nicméně je třeba říct, že počet buněk v těchto kategoriích byl velmi nízký (viz. tabulka 2).

<b>TANDEM-X vs. DTM - slope 1 (0-10)</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	3,91	5,50	1,97	3,79
<i>MAE (m):</i>	4,58	5,67	2,42	4,22
<i>RMSE (m):</i>	6,47	7,18	3,93	5,86
<i>splněno:</i>	89,4%	80,3%	97,5%	91,9%
<b>TANDEM-X vs. DTM - slope 2 (10-20)</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	5,41	8,35	2,61	5,46
<i>MAE (m):</i>	5,43	8,36	2,95	5,58
<i>RMSE (m):</i>	6,46	9,02	4,17	6,55
<i>splněno:</i>	88,6%	66,0%	97,0%	84,9%
<b>TANDEM-X vs. DTM - slope 3 (20-30)</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	5,00	7,41	2,11	4,84
<i>MAE (m):</i>	5,02	7,46	2,64	5,04
<i>RMSE (m):</i>	6,08	8,35	3,59	6,01
<i>splněno:</i>	90,7%	70,8%	99,0%	90,6%
<b>TANDEM-X vs. DTM - slope 4 (30-80)</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	4,65	5,30	1,05	3,66
<i>MAE (m):</i>	4,67	5,50	0,78	3,65
<i>RMSE (m):</i>	5,75	6,94	3,74	5,47
<i>splněno:</i>	92,3%	79,5%	99,1%	94,4%

Tabulka 7: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM podle sklonitosti

### 4.2.3. Vliv orientace ke světové straně

Při porovnání přesnosti podle orientace ke světové straně dosahuje nejvyšší přesnosti jih a západ. Zde jsou dosažené ukazatele stejné (ME = 3,9 m, RMSE = 5,7 m). Nejhorší přesnost při porovnání modelu TANDEM-X s DTM vykazuje orientace bodů na sever. Zde je střední chyba 4,7 m a střední kvadratická chyba 6,4 m. Body orientované na východ jsou přesnější než body na sever, pokud porovnáme ME, která je 4,5 m. Dosažená RMSE je v obou případech 6,4 m. Nejpřesnější výsypkou je jednoznačně Růžodolská, a to ve všech skupinách. Nejhorší přesnost je opět pozorována na výsypce Kopistské, kde je u bodů orientovaných na sever dosažená RMSE dokonce 8,7 m. Nicméně i přes takto velké výkyvy je na všech lokalitách a na všech světových stranách splněna absolutní přesnost 10 m. V tabulce č. 8 jsou zapsány všechny pozorované hodnoty.

<b>TANDEM-X vs. DTM - Sever</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	4,52	7,63	1,97	4,71
<i>MAE (m):</i>	5,01	7,67	2,48	5,05
<i>RMSE (m):</i>	6,46	8,67	4,10	6,41
<i>splněno:</i>	95,0%	85,8%	100,0%	95,6%
<b>TANDEM-X vs. DTM - Jih</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	4,37	5,19	2,05	3,87
<i>MAE (m):</i>	4,71	5,39	2,49	4,20
<i>RMSE (m):</i>	6,44	6,92	3,85	5,74
<i>splněno:</i>	88,0%	73,2%	98,2%	89,7%
<b>TANDEM-X vs. DTM - Východ</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	4,64	6,58	2,34	4,52
<i>MAE (m):</i>	5,23	6,68	2,76	4,89
<i>RMSE (m):</i>	6,78	8,03	4,34	6,38
<i>splněno:</i>	88,8%	83,3%	99,0%	92,4%
<b>TANDEM-X vs. DTM - Západ</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
<i>ME (m):</i>	3,87	6,11	1,86	3,94
<i>MAE (m):</i>	4,41	6,24	2,27	4,31
<i>RMSE (m):</i>	6,12	7,45	3,59	5,72
<i>splněno:</i>	92,3%	81,7%	99,6%	93,7%

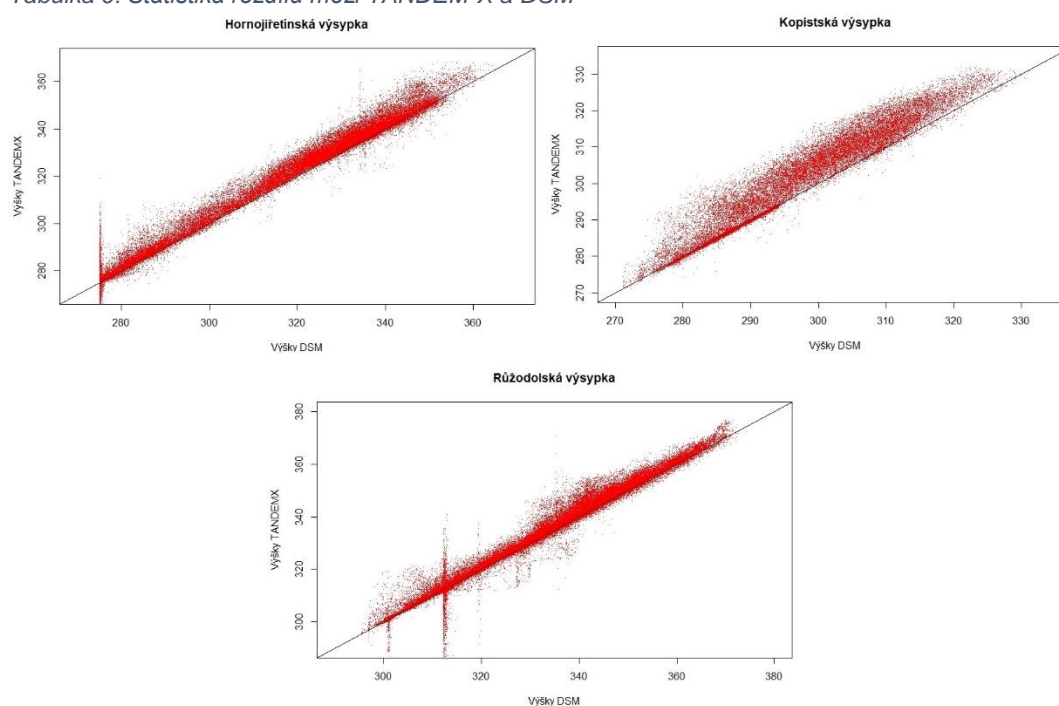
Tabulka 8: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM podle orientace ke svět. straně

### 4.3. Přesnost odhadu povrchu vegetace

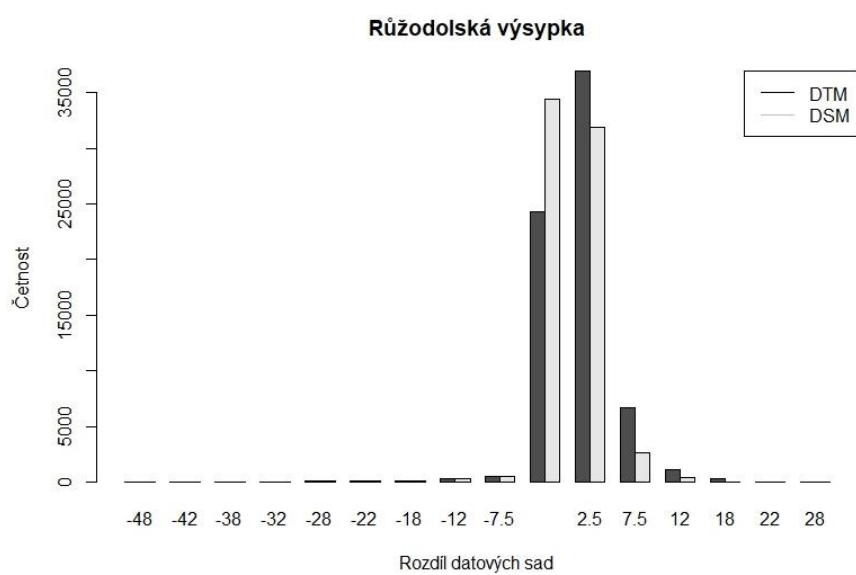
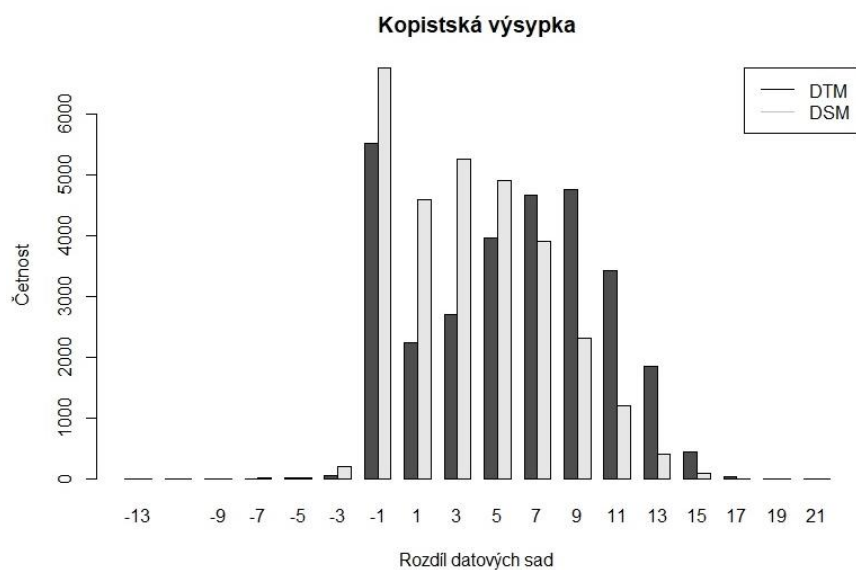
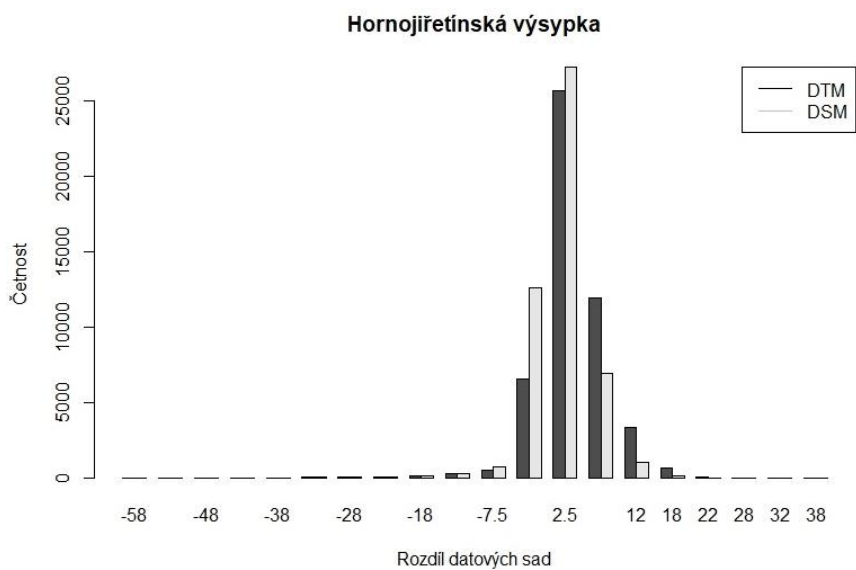
Menších rozdílů v nadmořských výškách nabývá TANDEM-X oproti digitálnímu modelu povrchu. Deklarovanou absolutní přesnost splňují všechny výsypky na 96 % zájmového území. Průměrný rozdíl výšek na celém zájmovém území je 2,5 m a RMSE 4,4 m, z čehož vyplývá, že je povrch modelem TANDEM-X nadhodnocován. Obecně lze říci, že digitální model TANDEM-X dle statistiky nabývá menších rozdílů než ve srovnání s DTM. Evaluací přesnosti TANDEM-X se ve svých studiích zabývají Wessel et al. (2018) a Grohman (2017). Vzhledem k tomu, že je TANDEM-X dostupný poměrně krátce, neexistuje mnoho studií o jeho přesnosti. Nadhodnocování je způsobeno zalesněním a změnou výšky porostu. Přesnost modelů je výrazně ovlivňována nejen vegetačním pokryvem, ale i sklonitostí a orientací míst ke světové straně. Konkrétní statistické hodnoty pro všechny lokality jsou uvedeny v tabulce č. 9. Grafické porovnání výšek z obou modelů je na obrázku č. 17 a histogram rozdílů datových sad na obrázku 18.

TANDEM-X vs. DSM	Hornojřetínská	Kopistská	Růždolská	vše
ME (m):	2,56	4,09	0,97	2,54
MAE (m):	3,28	4,29	1,60	3,06
RMSE (m):	4,83	5,53	2,88	4,41
první kvartil (m):	0,32	-16,97	-0,13	-5,59
medián (m):	1,94	-7,01	0,43	-1,55
třetí kvartil (m):	4,41	2,61	1,70	2,91
min (m):	-46,93	-40,81	-37,15	
max (m):	44,03	19,23	35,38	
směrodatná odchylka (m):	4,09	11,92	2,71	6,24

Tabulka 9: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM



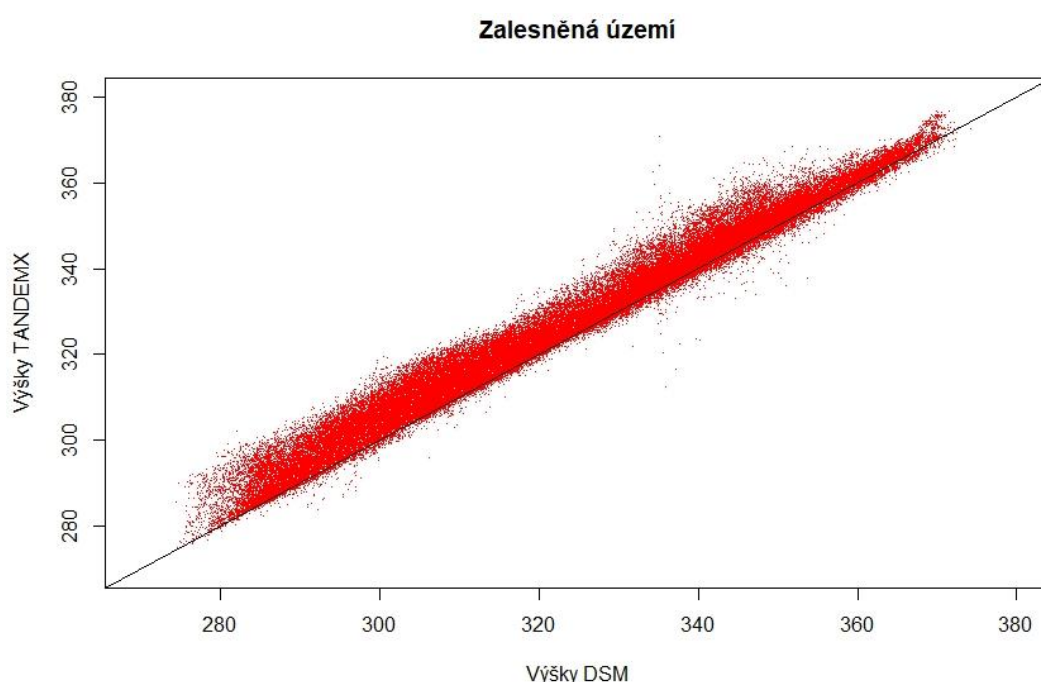
Obr. 17: Korelace nadmořských výšek DSM na jednotlivých výsypkách, (Kubcová, L., 2019)



Obr. 18: Histogram rozdílů nadmořských výšek, (Kubcová, L., 2019)

### 4.3.1. Vliv krajinného pokryvu

Na zalesněných územích je rozdíl mezi TANDEM-X a DSM zhruba o 2 m nižší než rozdíl oproti DTM a absolutní chyba je splněna na 97 % území. I v tomto porovnání je nejpřesnější Růžodolská výsypka, kde je dosažena střední kvadratická chyba (3,2 m) nejnižší. Na Hornojířetínské výsypce je RMSE 4,8 m a na Kopistské 6,2 m. Průměrný rozdíl v nadmořských výškách na zalesněných plochách je na Litvínovských výsypkách 3,4 m. Na těchto územích více odpovídá model TANDEM-X digitálnímu modelu povrchu. Grafické porovnání nadmořských výšek zalesněných území je na obrázku č. 19.



Obr. 19: Korelace nadmořských výšek DSM zalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019)

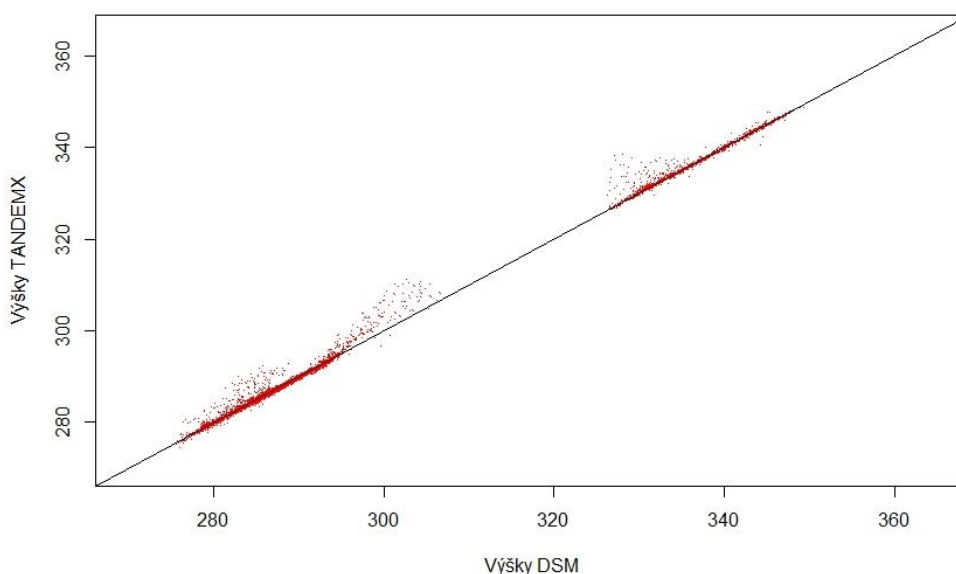
V oblastech s přímým výhledem na oblohu dosahoval model vysoké přesnosti již při porovnání s modelem terénu. Průměrný rozdíl nadmořských výšek na Litvínovských výsypkách je 0,4 m a střední kvadratická chyba 1,1 m. Rozdíl mezi modelem povrchu a modelem terénu na nezastavěných územích s přímým výhledem na oblohu je tedy naprosto minimální a v obou případech je u všech buněk splněna absolutní přesnost. Výrazné rozdíly mezi DTM a DSM by byly pozorovány právě ve zmíněné zástavbě. Na obrázku 20 jsou porovnány výšky na nezalesněných plochách.

Body spadající do krajinného pokryvu „nízký porost v lese“ dosahují nejmenších rozdílů na Růžodolské výsypce (ME = 1 m, RMSE = 1,8 m). Naopak nejnižší přesnost vykazuje výsypka Hornojířetínská se střední chybou 2,7 m a střední



kvadratickou chybou 3,6 m, což je pravděpodobně způsobeno tím, že tento krajinný pokryv zabírá zhruba 40 % celkové rozlohy výsypky, tj. mnohem více než u zbývajících výsypek. Průměrný rozdíl nadmořských výšek u nízkého porostu v lese je 1,9 m, což je zhruba poloviční rozdíl než u zalesněných území. TANDEM – X při porovnání s DSM u hald a skládek podhodnocuje, stejně jako u modelu terénu. Rozdíl mezi DTM a DSM je zde obdobně jako u nezalesněných území takřka minimální. Statistika rozdílů vyobrazena v tabulce č. 10.

**Nezalesněná území**

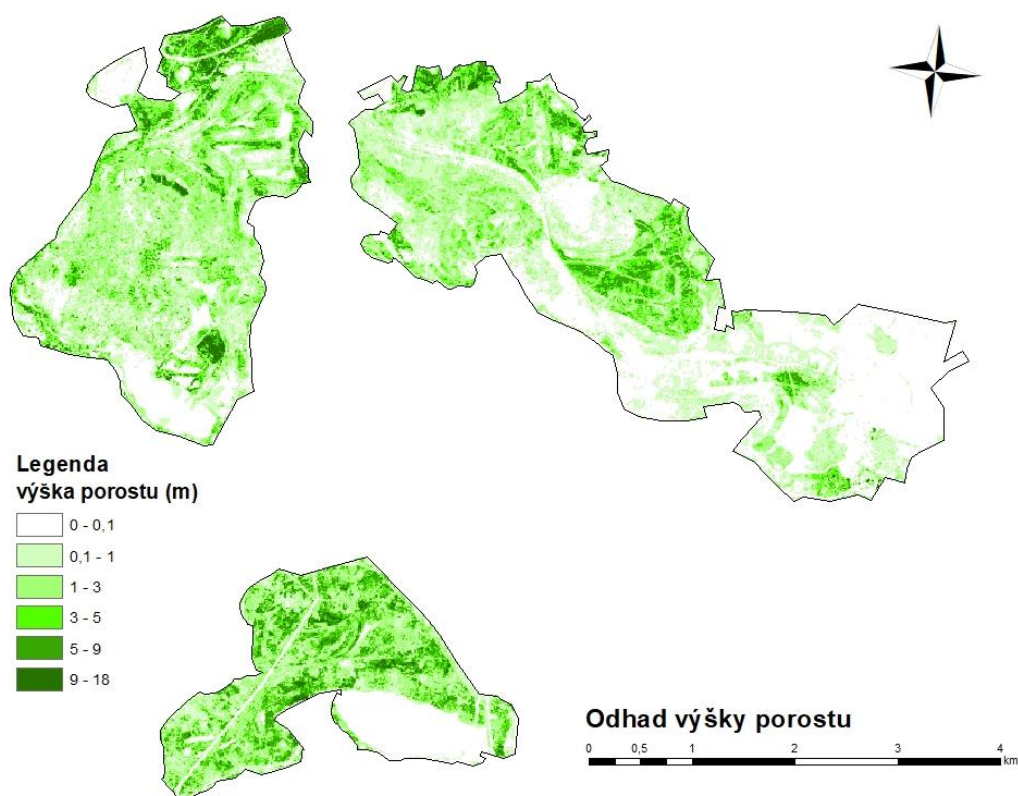


Obr. 20: Korelace nadmořských výšek DSM nezalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019)

<b>TANDEM-X vs. DSM - zalesněné</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	3,12	5,25	1,84	3,40
MAE (m):	3,48	5,15	2,16	3,60
RMSE (m):	4,75	6,20	3,16	4,70
splněno:	99,7%	90,6%	99,8%	96,7%
<b>TANDEM-X vs. DSM - nezalesněné</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	0,48	0,53	0,15	0,38
MAE (m):	0,08	-0,99	0,56	-0,12
RMSE (m):	1,07	0,95	1,24	1,09
splněno:	99,9%	99,9%	99,8%	99,9%
<b>TANDEM-X vs. DSM - nízký porost</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,69	2,10	0,99	1,92
MAE (m):	2,44	1,83	0,70	1,66
RMSE (m):	3,63	2,84	1,77	2,74
splněno:	98,6%	99,0%	99,5%	99,0%
<b>TANDEM-X vs. DSM - haldy a skládky</b>	Růžodolská			
ME (m):	-2,68			
MAE (m):	3,17			
RMSE (m):	4,84			
splněno:	99,8%			

Tabulka 10: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM podle krajinného pokryvu

Zatím existuje jen málo studií, které kvalitu TANDEM X evaluovali. Nicméně, lze předpokládat, že bude TANDEM-X zatížen na stejné zdroje chyb jako SRTM (oba modely vznikly radarovou interferometrií). Největší vertikální chyby vznikají na Růžodolské výsypce, která je na většině území zalesněná. Odhadovaná výška porostu ovlivňující přesnost na Litvínovských výsypkách je na obrázku 21. Vliv vegetačního pokryvu na přesnost výsledného digitálního modelu je ovlivněn i dobou, ve kterém družice nebo letadlo proletí nad daným územím. V zimě je pravděpodobnost zkreslení skutečné výšky porostu mnohem vyšší než na jaře a v létě. Během zimy jsou koruny listnatých lesů holé, takže do nich paprsek pronikne mnohem snáze, protože není odražen listím (Ortiz et al., 2012). Vlivem vegetace na přesnost modelů se zabýval už Sun (2003), který porovnával vertikální přesnost SRTM s jinými modely terénu. Ve své studii rozdělil zájmové území (Sibiř) na dvě části – zalesněnou a nezalesněnou. Výsledná přesnost SRTM na zalesněné části je výrazně ovlivňována vegetací vyšší než 10 m a vzrůstající sklonitostí. To, že je zalesnění hlavním zdrojem chyb, potvrzují Kolečká et Kozák (2014), kteří evaluovali přesnost SRTM v Tatrách, a Ludwig et Schneider (2006). Průměrná střední chyba na zalesněných částech zájmových území v této diplomové práci je u modelu terénu 5,6 m a RMSE 6,7 m, u modelů povrchu jsou tyto ukazatele 3,4 a 4,7 m. Na územích, která nejsou ovlivněna porostem, tzn. ani obdobím sběru dat, vykazuje TANDEM-X vysokou přesnost, a to jak u modelu terénu, tak u modelu povrchu.



Obr. 21: Odhad výšky porostu na zájmových výsypkách, (Kubcová, L., 2019)

### 4.3.2. Vliv sklonitosti

Statistické údaje výškových rozdílů mezi TANDEM-X a DSM rozdělených do skupin podle sklonitosti popisuje tabulka č. 11. Digitální modely povrchu opět nabývají nižších rozdílů než digitální modely terénu. Vypočtená ME je na Litvínovských výsypkách 2,8 m a RMSE 4,5 m. Paradoxně je zde přesnější TANDEM-X u strmějších svahů (ME = 2,5 m a RMSE = 4,1). Tento fakt lze vysvětlit tím, že na strmějších svazích není porost tak hustý jako na rovnějších plochách a dochází k menšímu zkreslení vlivem vegetačního pokryvu. Evaluací přesnosti modelů na základě sklonitosti se zabývá např. Kolečká et Kozák (2014) a Mouratidis (2010). TANDEM-X podle sklonitosti evaluovali Wessel (2018), Rizzoli (2017) a Grohman (2017). Výsledkem jejich studií je předpokládaný fakt – se zvyšující se sklonitostí terénu klesá přesnost modelu. V této práci je zaznamenána opačná tendence, která může být způsobena tím, že se jedná o antropogenní terén s výraznými terénními nerovnostmi.

<b>TANDEM-X vs. DSM - slope 1 (0-10)</b>	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,24	3,64	0,97	2,28
MAE (m):	3,18	3,88	1,59	2,88
RMSE (m):	4,97	5,22	2,92	4,37
splněno:	95,1%	93,7%	99,1%	96,9%
<b>TANDEM-X vs. DSM - slope 2 (10-20)</b>				
	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	3,40	5,35	1,09	3,28
MAE (m):	3,57	5,43	1,72	3,57
RMSE (m):	4,57	6,33	2,71	4,54
splněno:	96,7%	90,0%	99,2%	95,6%
<b>TANDEM-X vs. DSM - slope 3 (20-30)</b>				
	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	3,08	4,92	0,76	2,92
MAE (m):	3,24	5,06	1,55	3,29
RMSE (m):	4,21	6,02	2,38	4,20
splněno:	97,1%	92,4%	99,6%	97,2%
<b>TANDEM-X vs. DSM - slope 4 (30-80)</b>				
	Hornojřetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,74	3,59	-0,03	2,10
MAE (m):	2,94	3,94	0,83	2,57
RMSE (m):	3,85	5,27	2,91	4,01
splněno:	98,1%	93,2%	99,3%	98,2%

Tabulka 11: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM podle sklonitosti

### 4.3.3. Vliv orientace ke světové straně

V tabulce č. 12 jsou vyobrazeny dosažené statistické ukazatele porovnávající TANDEM-X a digitální model povrchu. Nejvyšší přesnost vykazuje jižní strana se střední chybou 2,3 m a střední kvadratickou chybou 4,1 m. Nižší přesnost oproti jihu vykazuje západ (ME= 2,4 a RMSE= 4,3 m) a východ (ME = 2,7; RMSE 4,7 m). Nejnižší přesnost je stejně jako při porovnání s DTM pozorována na severu. Zde je ME 2,9 m a střední kvadratická chyba 4,7 m. Obdobně jako u DTM je i zde nej přesnější lokalitou Růžodolská výsypka. Naopak nejhorší přesnost je pozorována na výsypce Kopistské. Na Litvínovských výsypkách nemá zásadní vliv na přesnost modelu TANDEM-X orientace ke světovým stranám. Toto zjištění potvrzuje i Grohmann (2017), dle jehož studie model nevykazuje příliš velké odchylky mezi jednotlivými světovými stranami.

<b>TANDEM-X vs. DSM - Sever</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,72	5,08	0,94	2,91
MAE (m):	3,41	5,19	1,60	3,40
RMSE (m):	4,80	6,27	3,03	4,70
splněno:	98,7%	96,6%	100,0%	98,9%
<b>TANDEM-X vs. DSM - Jih</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,59	3,32	0,96	2,29
MAE (m):	3,14	3,58	1,62	2,78
RMSE (m):	4,64	4,89	2,80	4,11
splněno:	94,7%	93,8%	99,5%	96,8%
<b>TANDEM-X vs. DSM - Východ</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,78	4,28	1,06	2,71
MAE (m):	3,61	4,44	1,68	3,24
RMSE (m):	5,20	5,65	3,09	4,65
splněno:	96,1%	96,3%	99,7%	97,8%
<b>TANDEM-X vs. DSM - Západ</b>	Hornojihetínská	Kopistská	Růžodolská	vše
ME (m):	2,24	4,06	0,95	2,42
MAE (m):	3,06	4,29	1,54	2,96
RMSE (m):	4,74	5,51	2,68	4,31
splněno:	96,6%	93,4%	99,9%	97,5%

Tabulka 12: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM podle orientace ke světové straně

## 5. ZÁVĚR

Na území Litvínovských výsypek byla provedena evaluace vertikální přesnosti digitálního elevačního modelu TANDEM-X s rozlišením 12 m, jehož udávaná relativní přesnost je u svahů do 20 % sklonitosti 2 m a u svahů strmějších 4 m. Garantovaná absolutní přesnost je 10 m. Model byl evaluován digitálním modelem terénu a digitálním modelem povrchu. Tyto referenční modely byly generovány z dat leteckého laserového skenování. Výslednou přesnost ovlivňuje krajinný pokryv, sklonitost terénu a orientace svahů ke světovým stranám. Na nezalesněných místech dosahuje TANDEM-X vysoké vertikální přesnosti se střední chybou 0,5 m v porovnání s DTM. Na zalesněných plochách odpovídá spíše modelu povrchu se střední chybou 3,4 m. Je zde zřejmý zásadní vliv vegetace. U sklonitosti pod 20 % je průměrná chyba TANDEM – X v porovnání s DTM 4,7 m, v porovnání s DSM 2,8 m. Pixely modelu terénu se sklonitostí nad 20 % dosahují střední chyby 4,3 m. Největší vliv orientace ke světové straně je patrný na svazích orientovaných na sever a na východ. Zde je střední kvadratická chyba rozdílů s DTM 6,4 m. RMSE na ostatních světových stranách se pohybuje okolo hodnoty 5,7 m. U DSM jsou patrné vyšší rozdíly u bodů orientovaných na sever a východ než u bodů orientovaných jižně a západně. Absolutní přesnost je podle statistik splněna jak u modelu terénu, tak u modelu povrchu, a to u všech pozorovaných environmentálních faktorů ovlivňujících přesnost digitálních modelů. Při porovnání s modelem terénu splňuje absolutní přesnost 88 % buněk, při porovnání s DSM 96 % buněk. Počet přeletů nad zájmovým územím nemá zásadní vliv na přesnost, stejně jako zařazení buněk do skupin v charakteristice COM.

## 6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### Odborné publikace, články:

AKAY A. E., OGUZ H., KARAS I. R. et ARUGA K., 2009: Using LiDAR technology in forestry activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151 (15), 117-125.

BROWN A. G., LESPEZ L., SEAR D. A., MACAIRE J., HOUBEN P., KLIMEK K., BRAZIER R. E., OOST K. et PEARS B., 2018: Natural vs anthropogenic streams in Europe: History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth – Science Reviews*, 180 (18), 185-205.

FOGL M. et MOUDRÝ V., 2015: Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66 (16), 73-80.

GOODCHILD M. F.M., 2011: Scale in GIS: An Overview. *Geomorphology*, 130 (11), 5-9.

GROHMAN C. H., 2018: Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. *Remote Sensing of Environment*, 212 (18), 121-133.

GUPTA R., SINGH M. K., SNEHMANI S., et GANJU A., 2014: Validation of SRTM X band DEM over Himalayan Mountain. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(4), 71-74.

HANBERRY B., KABRICK J., DUNWIDDIW P., HARTEL T., JAIN T. et KNAPP B., 2017: Restoration of temperate savannas and woodlands. *Routledge Handbook of Ecological and Environmental Restoration*, Routledge, 142–157.

HENGEL T. et REUTER I. H., 2009: *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Soil Science 33, Amsterdam, Oxford, 765 s.

KLIMÁNEK M., 2006: Digitální modely terénu. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 85 s.

KLIMÁNEK M. et DOUDA P., 2006: Hydrologické modelování v GIS Idrisi na základě DMT. Informační a poradenské centrum PEF v Praze, Praha, 1-7 s.

KLOUČEK T., LAGNER O. et ŠÍMOVÁ P., 2015: How does data influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. *Applied Geography*, 64 (15), 46-54.

KOLECKA N. a KOZAK J, 2014: Assessment of the Accuracy of SRTM C – and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), 897-912.

KRAUS K., 2000: *Photogrammetrie Band 3*. Dümmler Verlag, Bonn, 459 s.

LUDWIG R. et SCHNEIDER P., 2006: Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5), 339-358.

MARTÍNEK K., KOPAČKOVÁ V., ŠTYCH P., BRAVENÝ L., 2007: GIS a DPZ v geologický vědách v prostředí ArcGIS a jeho extenzí. Ctt Praha, Praha, 156 s.

MARTZ L. W. et GARBRECHT J., 1992: Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from Digital Elevation Models. *Computers and Geosciences*, 18, 747-761.

MOUDRÝ V. et ŠÍMOVÁ P., 2013: Relative importance of climate, topography, and habitats for breeding wetland birds with different latitudinal distributions in the Czech Republic. *Applied Geography*, 44 (13), 165-171.

MOUDRÝ V., LECOURS V., GDULOVÁ K., GÁBOR L., MOUDRÁ L., KROPÁČEK J. et 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.

MOUDRÝ V., GDULOVÁ K., FOGL M., KLÁPŠTĚ P., URBAN R., KOMÁREK J., MOUDRÁ L., ŠTRONER M., BARTÁK V. et SOLSKÝ M., 2019: Comparison of leaf-off and leaf-on combined UAV imagery and airborne LiDAR for assessment of a post-mining site terrain and vegetation structure: prospects for monitoring hazards and restoration success. *Applied Geography* 104 (19), 32-41.

MOURATIDIS A., BRIOLE P. et KATSAMBALOS K., 2010: SRTM 3? DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements. A case study from North Greece. 31(12), 6205-6222.

MUKHERJEE S., JOSHI P. K., MUKHERJEE S., GHOSH A., GARG R. D. et MUKHOPADHYAY A., 2013: Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 205-217.

ORTIZ S., BREIDENBACH J., KNUTH R. et KÄNDLER G., 2012: The Influence of DEM Quality on Mapping Accuracy of Coniferous and Deciduous Dominated Forest Using TerraSAR-X Images. *Remote Sensing*, 4, 661-681.

PACINA J. et BREJCHA M., 2014: Digitální modely terénu. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 73 s.

RAPANT P., 2002: Družicové polohové systémy. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 200 s.

RAPANT P., 2006: Geoinformatika a geoinformační technologie. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 500 s.

RIZZOLI P., MARTONE M., GONZALEZ C., WECKLICH CH., TRIDON D. B., BRÄUTIGAM B., BACHMANN M., SCHULZE D., FRITZ T., HUBER M., WESSEL B., KRIEGER G., ZINK M. et MOREIRA A., 2017: Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132 (2017), 119–139.

ROSSI C., MINET CH., FRITZ T., EINEDER M. et BAMLER R., 2016: Temporal monitoring of subglacial volcanoes with TanDEM-X — Application to the 2014–2015 eruption within the Bárðarbunga volcanic system, Iceland. *Remote Sensing of Environment*, 181 (2016), 186–197.

SCHMITT M., SHAHZAD M. et ZHU X., 2015: Reconstruction of Individual Trees from Multi-Aspect TomoSAR Data. *Remote Sensing of Environment*, 165, 175-185.

SUN G., RANSON K., KHARUK V., et KOVACS K., 2003: Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 401-411.

TUČEK J., 1998: *Geografické informační systémy, principy a praxe*. Computer Press, Praha, 424 s.

VAZE J., TENG J. et SPENCER G., 2010: Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environment Modelling & Software*, 25 (10), 1086-1098.

WEHR A. et LOHR U., 1999: Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 68-82.

WESSEL B., 2016: TanDEM-X Ground Segment - DEM Products Specification Document. EOC - Earth Observation Center, Issue 3.1.

WESSEL B., HUBER M., WOHLFART CH., MARSCHALK U., KOSMANN D. et ROTH A., 2018: Accuracy assessment of the global TanDEM-X Digital Elevation Model with GPS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139 (18), 171-182.

ZAMBRORY C. L., ELLIS H., PIERCE C. L., ROE K. J., WEBER M. J., SCHILLING K. E., YOUNG N. C., 2019: The Development of a GIS Methodology to Identify Oxbows and Former Stream Meanders from LiDAR-Derived Digital Elevation Models. *Remote Sensing*, 11 (1), 12.

## **Internetové zdroje:**

AHMAD F., GOPARAJU L. et QAYUM A., 2017: Natural Resource Mapping Using Landsat and Lidar towards Identifying Digital Elevation, Digital Surface and Canopy Height Models (online) [cit. 2019.01.26], dostupné z <[https://www.researchgate.net/publication/315688737\\_Natural\\_Resource\\_Mapping\\_Using\\_Landsat\\_and\\_Lidar\\_towards\\_Identifying\\_Digital\\_Elevation\\_Digital\\_Surface\\_and\\_Canopy\\_Height\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/315688737_Natural_Resource_Mapping_Using_Landsat_and_Lidar_towards_Identifying_Digital_Elevation_Digital_Surface_and_Canopy_Height_Models)>.

ASHARYANTO H., SOEKSMANTONO B. et WIKANTIKA K., 2015: Three Dimensional City Building Modelling with Lidar Data (Case Study: Ciwaruga, Bandung) (online) [cit. 2019.01.29], dostupné z <[https://www.researchgate.net/publication/308063830\\_THREE\\_DIMENSIONAL\\_CITY\\_BUILDING\\_MODELLING\\_WITH\\_LIDAR\\_DATA\\_CASE\\_STUDY\\_CIWARUGA\\_BANDUNG](https://www.researchgate.net/publication/308063830_THREE_DIMENSIONAL_CITY_BUILDING_MODELLING_WITH_LIDAR_DATA_CASE_STUDY_CIWARUGA_BANDUNG)>.

BIGIARINI M. Z., 2017: HydroGOF (online) [cit. 2019.04.06], dostupné z <<https://www.rdocumentation.org/packages/hydroGOF/versions/0.3-10>>.

BRYAN J., 2018: readxl (online) [cit. 2019.04.06], dostupné z <<https://www.rdocumentation.org/packages/readxl/versions/1.1.0>>.

CARABAJAL C. et BOY J.-P., 2016: Valuation of Aster Gdem V3 Using Icesat Laser Altimetry (online) [cit. 2019.02.02] dostupné z



<[https://www.researchgate.net/publication/303948448\\_EVALUATION\\_OF\\_ASTER\\_GDEM\\_V3\\_USING\\_ICESAT\\_LASER\\_ALTIMETRY](https://www.researchgate.net/publication/303948448_EVALUATION_OF_ASTER_GDEM_V3_USING_ICESAT_LASER_ALTIMETRY)>.

CUI X., ZHANG J., WU X., HAO N. et WANG Q., 2018: Dynamic Change of Land Cover of Qinling Mountains Based on MODIS NDVI (online) [cit. 2019.01.29], dostupné z <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8598639/references#references>>.

ČÚZK, ©2010: Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP1G) (online) [cit.2018.08.08], dostupné z <[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(1g2aw3vlky25oosdrtowp1xk\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=303](https://geoportal.cuzk.cz/(S(1g2aw3vlky25oosdrtowp1xk))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=303)>.

ČÚZK, ©2010: Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR4G) (online) [cit. 2018.08.08], dostupné z <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(bminsy1qusdrn2hcb5pym5dd\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=301](http://geoportal.cuzk.cz/(S(bminsy1qusdrn2hcb5pym5dd))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301)>.

ČÚZK, ©2010: Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR5G) (online) [cit.2018.08.08], dostupné z <[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(qlyumkoyquaybq2pnfckydy4\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(qlyumkoyquaybq2pnfckydy4))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)>.

DOWLE M., 2018: data.table (online) [cit. 2019.04.06], dostupné z <<https://www.rdocumentation.org/packages/data.table/versions/1.11.4>>.

EUROPEAN DATA PORTAL, 2019: CORINE Land Cover 2018 databáze České republiky (CLC18\_CZ) (online) [cit. 2019.03.03] dostupné z <<https://www.europeandataportal.eu/data/en/dataset/5b7a9ba5-1f34-4aca-a6ec-5c87c0a80138>>.

FARR T., ROSEN P., 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. et ALSDORF D., 2007: The Shuttle Radar Topography Mission (online) [cit. 2019.02.02], dostupné z <[https://www.researchgate.net/publication/200459069\\_The\\_Shuttle\\_Radar\\_Topography\\_Mission](https://www.researchgate.net/publication/200459069_The_Shuttle_Radar_Topography_Mission)>.

GISAT, ©2008: SRTM DEM (online) [cit. 2019.02.02], dostupné z <<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/srtm-gdem>>.

MARKHAM K. J. et MORRIS W. A., 2002: A comparison of radar altimetry and repeat pass interferometry as methods of producing digital terrain elevation models (online) [cit. 2019.02.02], dostupné z <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1027269>>.

MASHBURN J., AXELRAD P., LOWE S. T. et LARSON K. M., 2018: Global Ocean Altimetry With GNSS Reflections From TechDemoSat-1 (online) [cit. 2019.02.02] dostupné z <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8352736>>.

RAHMAN M. M., LAGOMASINO D., LEE S., FATOYINBO L., AHMED I. et KANZAKI M., 2019: Improved assessment of mangrove forests in Sundarbans East Wildlife Sanctuary using WorldView 2 and TanDEM-X high resolution imagery (online) [cit.

2019.01.28], dostupné z  
<[https://www.researchgate.net/publication/330218211\\_Improved\\_assessment\\_of\\_mangrove\\_forests\\_in\\_Sundarbans\\_East\\_Wildlife\\_Sanctuary\\_using\\_WorldView\\_2\\_and\\_TanDEM-X\\_high\\_resolution\\_imagery](https://www.researchgate.net/publication/330218211_Improved_assessment_of_mangrove_forests_in_Sundarbans_East_Wildlife_Sanctuary_using_WorldView_2_and_TanDEM-X_high_resolution_imagery)>.

REIF M. K. et THEEL H. J., 2016: Application for restoring degraded, damaged, transformed, or destroyed ecosystems (online) [cit. 2019.03.15], dostupné z <<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ieam.1847>>.

TACHIKAWA T., HATO M., KAKU M. et IWASAKI A., 2011: Characteristics of ASTER GDEM version 2 (online) [cit. 2019.02.02] dostupné z <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6050017&isnumber=6048881>>.

## Seznam obrázků:

Obr. 1: Rozdíl mezi DSM a DTM, (Asharyanto et al., 2015) .....	12
Obr. 2: Canopy Height Model, (Ahmad et al., 2017).....	13
Obr. 3: Rastrová a vektorová prezentace, (ArcGIS for Desktop, 2016) .....	14
Obr. 4: Delaunayova triangulace, TIN, (Documentation QGIS 2.8, 2016) .....	14
Obr. 5: LiDAR a svazek paprsků, (Büyüksalih, I., 2016) .....	17
Obr. 6: Odraz laserového paprsku v různých vegetačních úrovních, (ArcGIS Desktop, 2016) .....	18
Obr. 7: Porovnání modelů s odlišným rozlišením, (Grohmann, C.H., 2018) .....	20
Obr. 8: Výsypky na Mostecku, (Kubcová, L., 2019) .....	22
Obr. 9: Klasifikované mračno bodů, (Kubcová, L., 2019) .....	24
Obr. 10: Klasifikovaný terén a vegetační porost na Hornojiřetínské výsypce, (Kubcová, L., 2019).....	25
Obr. 11: Postup získání nadmořských výšek bodů z několika rastrů, (Kubcová, L., 2019) .....	28
Obr. 12: Schéma evaluace, (Kubcová, L., 2019) .....	29
Obr. 13: Rozdíl TANDEM-X a DTM, rozdíl TANDEM-X a DSM, (Kubcová, L., 2019) .....	32
Obr. 14: Korelace nadmořských výšek DTM na jednotlivých výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	33
Obr. 15: Korelace nadmořských výšek DTM zalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	34
Obr. 16: Korelace nadmořských výšek DTM nezalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	35
Obr. 17: Korelace nadmořských výšek DSM na jednotlivých výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	38
Obr. 18: Histogram rozdílů nadmořských výšek, (Kubcová, L., 2019) .....	39
Obr. 19: Korelace nadmořských výšek DSM zalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	40
Obr. 20: Korelace nadmořských výšek DSM nezalesněných území na všech výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	41
Obr. 21: Odhad výšky porostu na zájmových výsypkách, (Kubcová, L., 2019) .....	42

URL3:<<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/how-features-are-represented-in-a-raster.htm>>. [cit. 2019.01.29]

URL4:<[https://docs.qgis.org/2.8/de/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html](https://docs.qgis.org/2.8/de/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html)>. [cit. 2019.01.29]

URL5:<[https://www.researchgate.net/publication/323678251\\_Building\\_Zone\\_Regulation\\_Compliance\\_Using\\_LIDAR\\_Data\\_Real-Life\\_Tests\\_in\\_Istanbul](https://www.researchgate.net/publication/323678251_Building_Zone_Regulation_Compliance_Using_LIDAR_Data_Real-Life_Tests_in_Istanbul)>. [cit. 2019.01.029]

URL6:<<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>>. [cit. 2019.01.29]

URL7: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/slope.htm>>. [cit. 2019.03.05]

URL8: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/aspect-function.htm>>. [cit. 2019.03.05]

## Seznam tabulek:

Tabulka 1: Rozdělení sklonitosti a orientace ke světovým stranám do skupin .....	26
Tabulka 2: Zastoupení v jednotlivých skupinách charakteristik TANDEM-X .....	30
Tabulka 3: Zastoupení v jednotlivých skupinách environmentálních charakteristik.....	30
Tabulka 4: Rozdělení buněk nesplňujících absolutní přesnost do charakteristik TANDEM-X.....	31
Tabulka 5: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM, (Kubcová, L., 2019) .....	33
Tabulka 6: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM podle krajinného pokryvu .....	35
Tabulka 7: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM podle sklonitosti .....	36
Tabulka 8: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DTM podle orientace ke svět. straně .....	37
Tabulka 9: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM.....	38
Tabulka 10: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM podle krajinného pokryvu.....	41
Tabulka 11: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM podle sklonitosti .....	43
Tabulka 12: Statistika rozdílů mezi TANDEM-X a DSM podle orientace ke světové straně .....	44

## Seznam příloh:

Příloha 1: Růžodolská výsypka – ortofoto, (Kubcová, L., 2019).....	53
Příloha 2: Kopistská výsypka – ortofoto, (Kubcová, L., 2019).....	53
Příloha 3: Hornojiřetínská výsypka – ortofoto, (Kubcová, L., 2019) .....	54
Příloha 4: Růžodolská výsypka – základní mapa, (Kubcová, L., 2019) .....	54
Příloha 5: Kopistská výsypka – základní mapa, (Kubcová, L., 2019) .....	55
Příloha 6: Hornojiřetínská výsypka – základní mapa, (Kubcová, L., 2019) .....	55
Příloha 7: Sklonitost terénu na zájmových výsypkách (Kubcová, L., 2019) .....	56
Příloha 8: Orientace terénu ke světovým stranám na zájmových výsypkách (Kubcová, L., 2019) .....	56
Příloha 9: Krajinný pokryv na zájmových výsypkách, (Kubcová, L., 2019).....	57
Příloha 10: COM, (Kubcová, L., 2019).....	57
Příloha 11: COV, (Kubcová, L., 2019) .....	58
Příloha 12: HEM, (Kubcová, L., 2019) .....	58
Příloha 13: DEM, (Kubcová, L., 2019) .....	59
Příloha 14: Rozdíl mezi TANDEM-X a DTM/DSM na Růžodolské výsypce, (Kubcová, L., 2019).....	59
Příloha 15: Rozdíl mezi TANDEM-X a DTM/DSM na Kopistské výsypce, (Kubcová, L., 2019) .....	60
Příloha 16: Rozdíl mezi TANDEM-X a DTM/DSM na Hornojiřetínské výsypce, (Kubcová, L., 2019).....	60

## 7. PŘÍLOHY



Příloha 1: Růžodolská výsypka – ortofoto, (Kubcová, L., 2019)

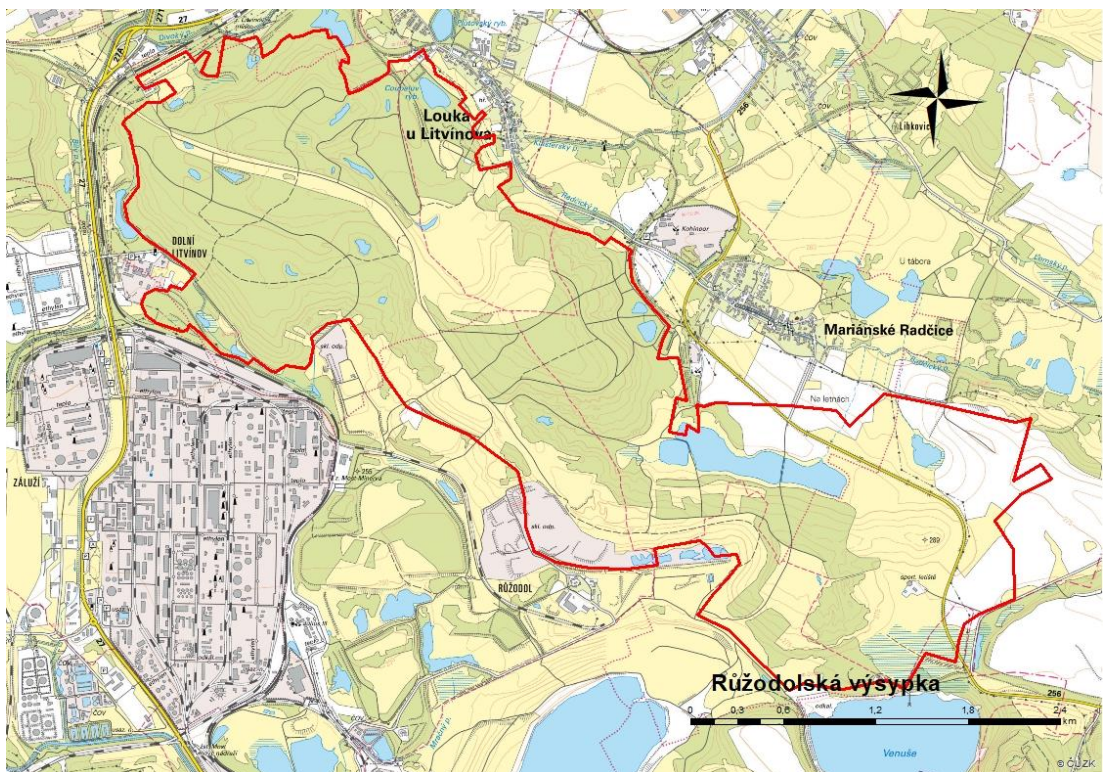


Příloha 2: Kopistká výsypka – ortofoto, (Kubcová, L., 2019)



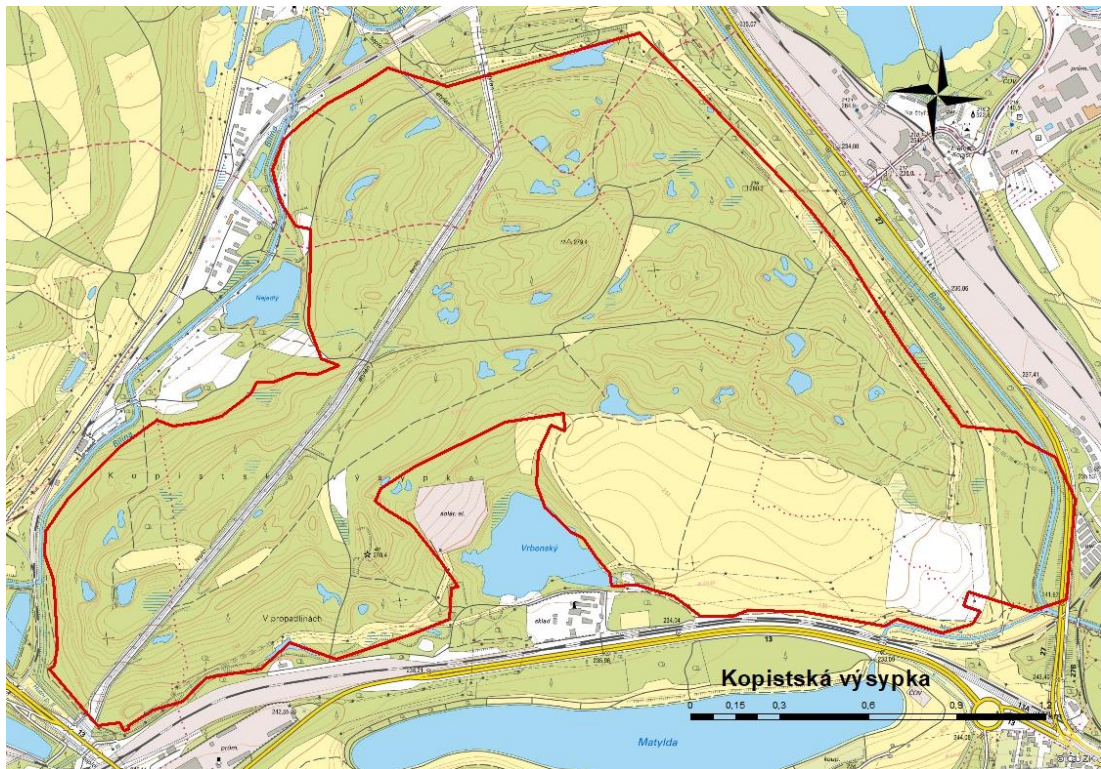


Příloha 3: Hornojřetinská výsypka – ortofoto, (Kubcová, L., 2019)

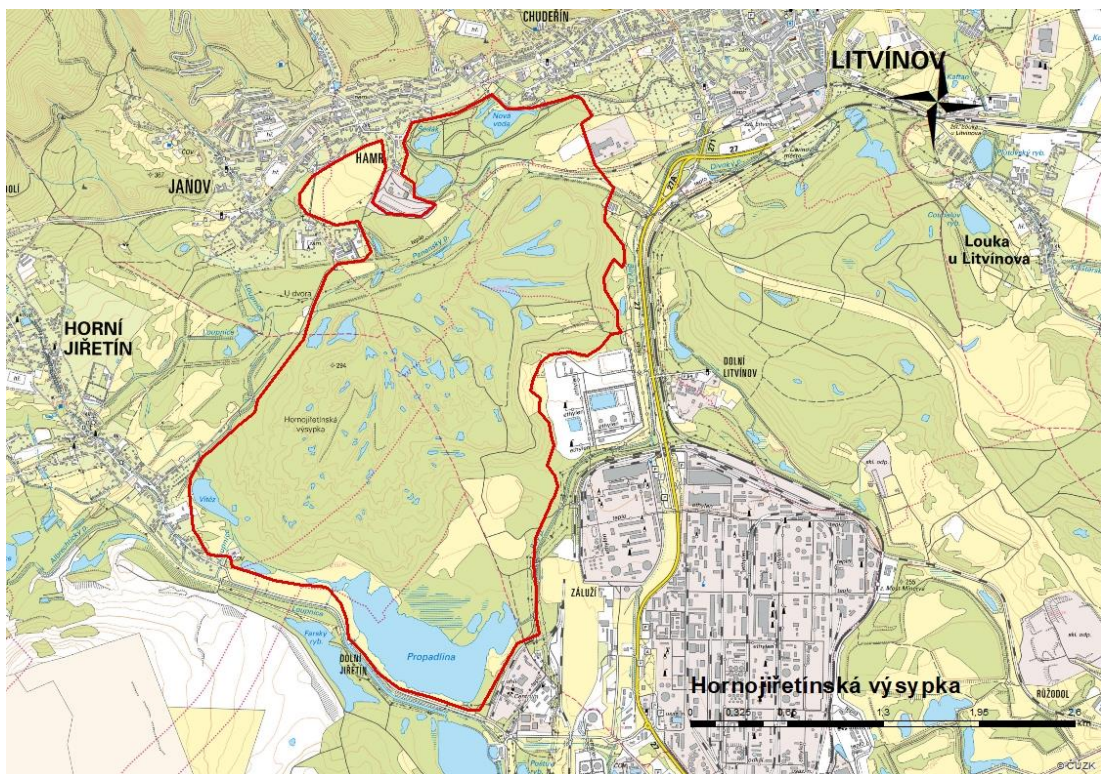


Příloha 4: Růžodolská výsypka – základní mapa, (Kubcová, L., 2019)



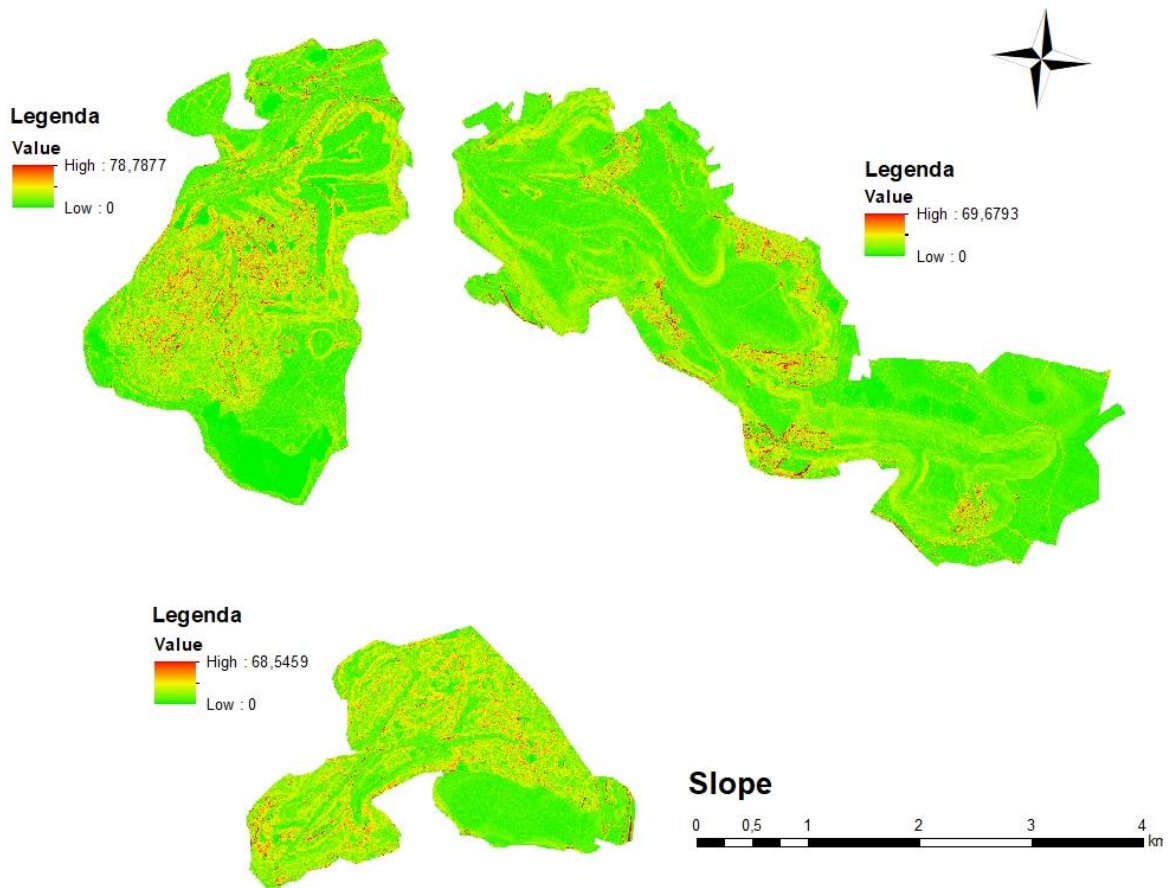


Příloha 5: Kopitská výsypka – základní mapa, (Kubcová, L., 2019)

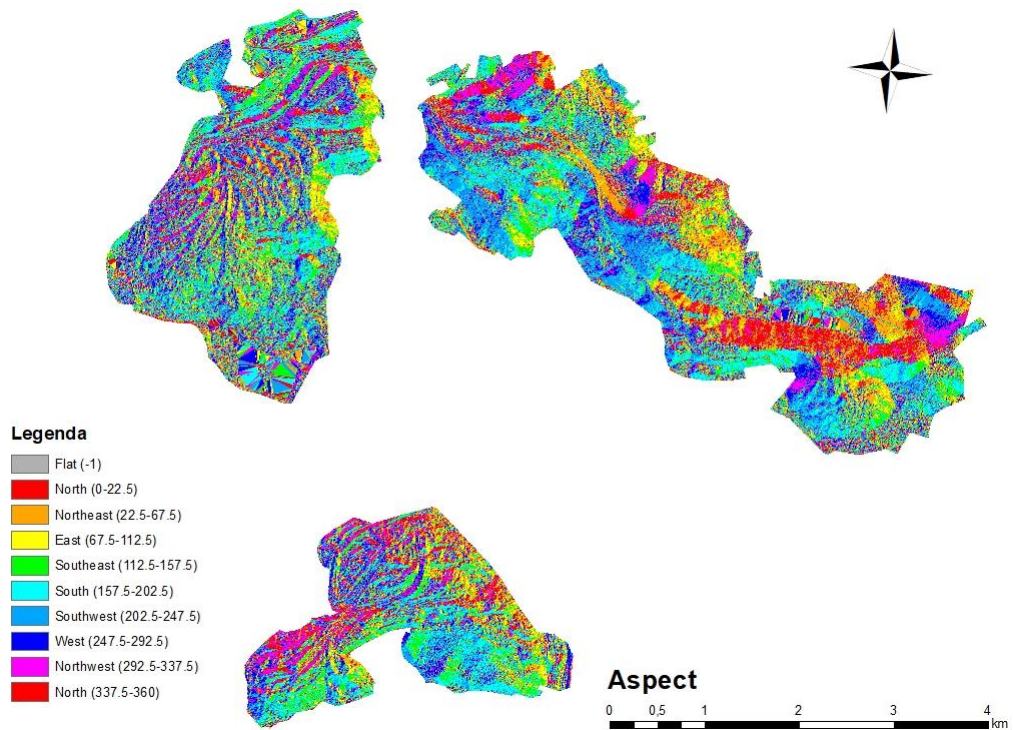


Příloha 6: Hornojřetinská výsypka – základní mapa, (Kubcová, L., 2019)



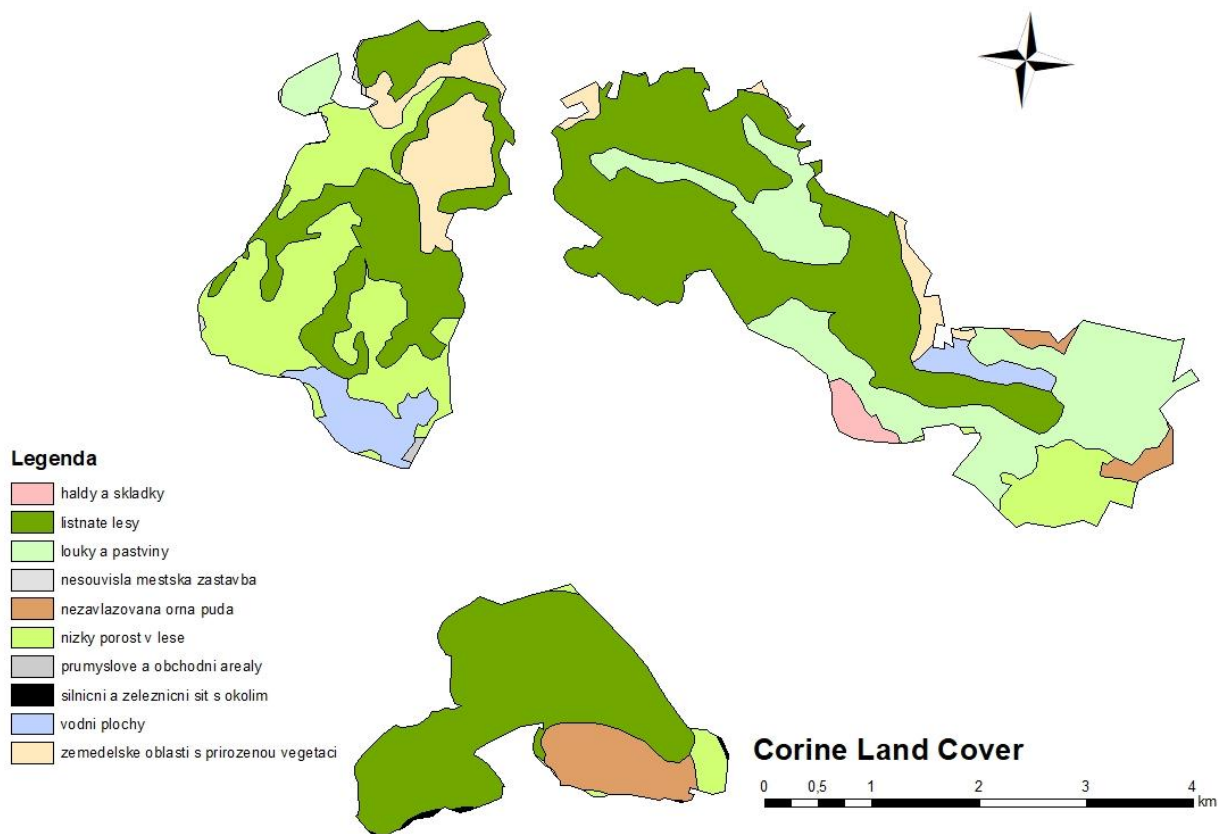


Příloha 7: Sklonitost terénu na zájmových výsypkách (Kubcová, L., 2019)

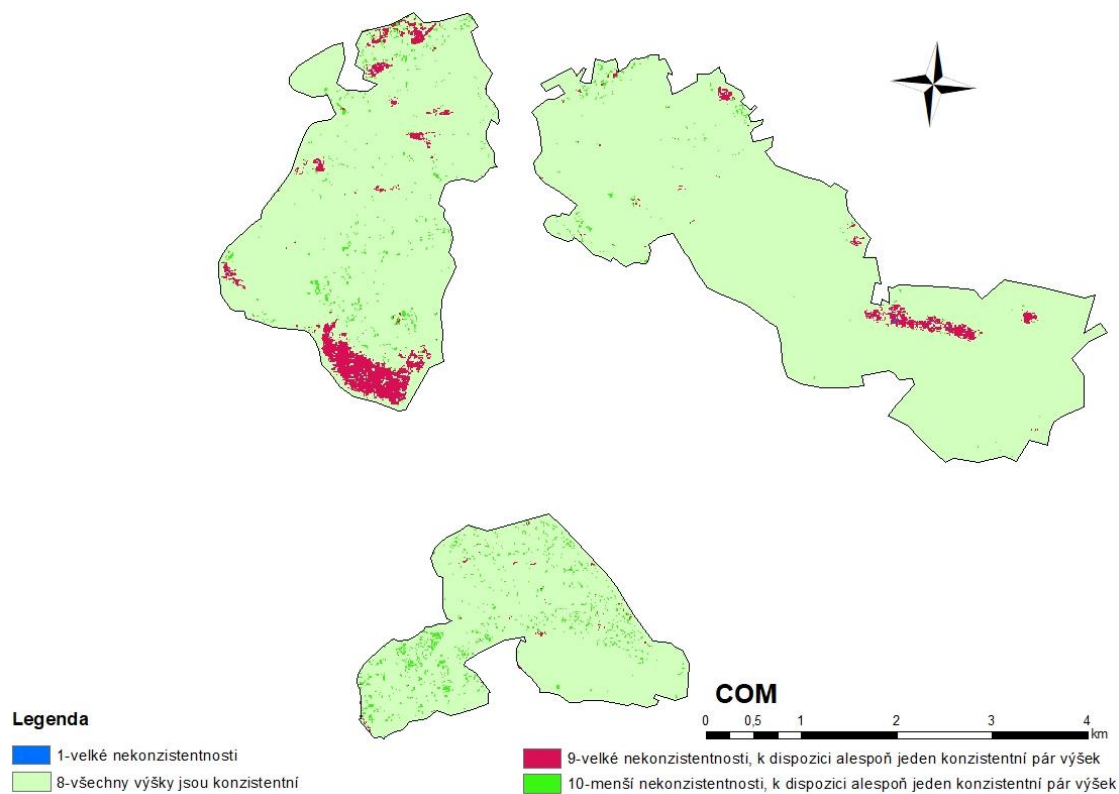


Příloha 8: Orientace terénu ke světovým stranám na zájmových výsypkách (Kubcová, L., 2019)

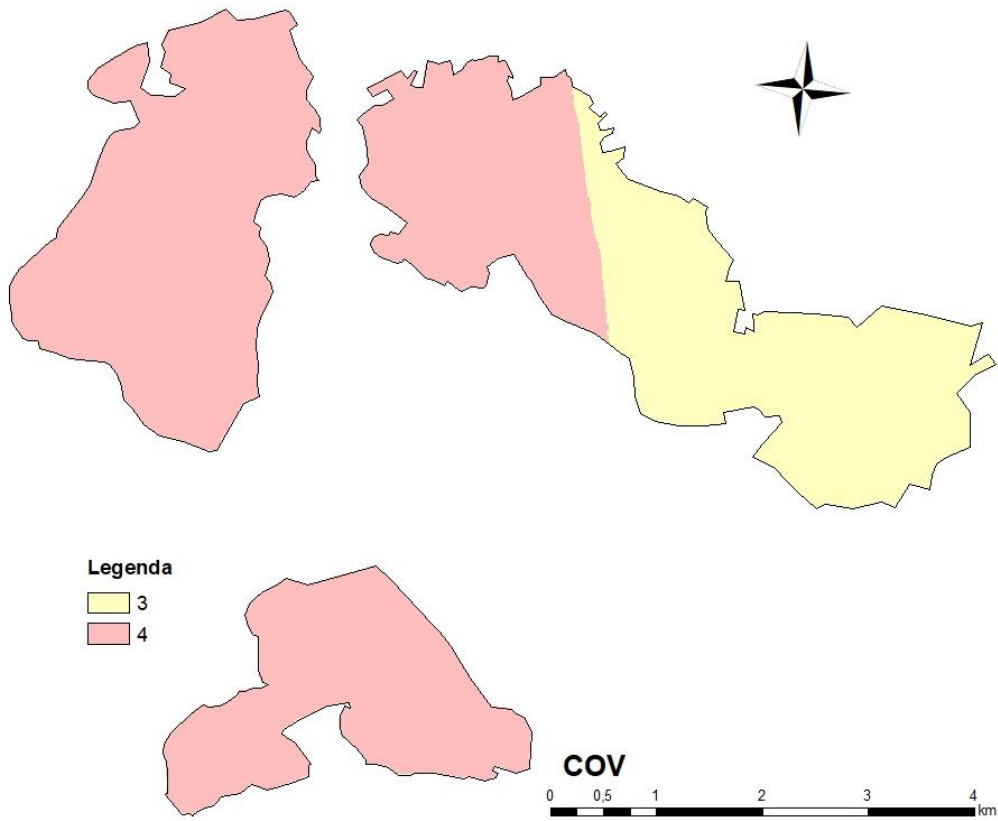




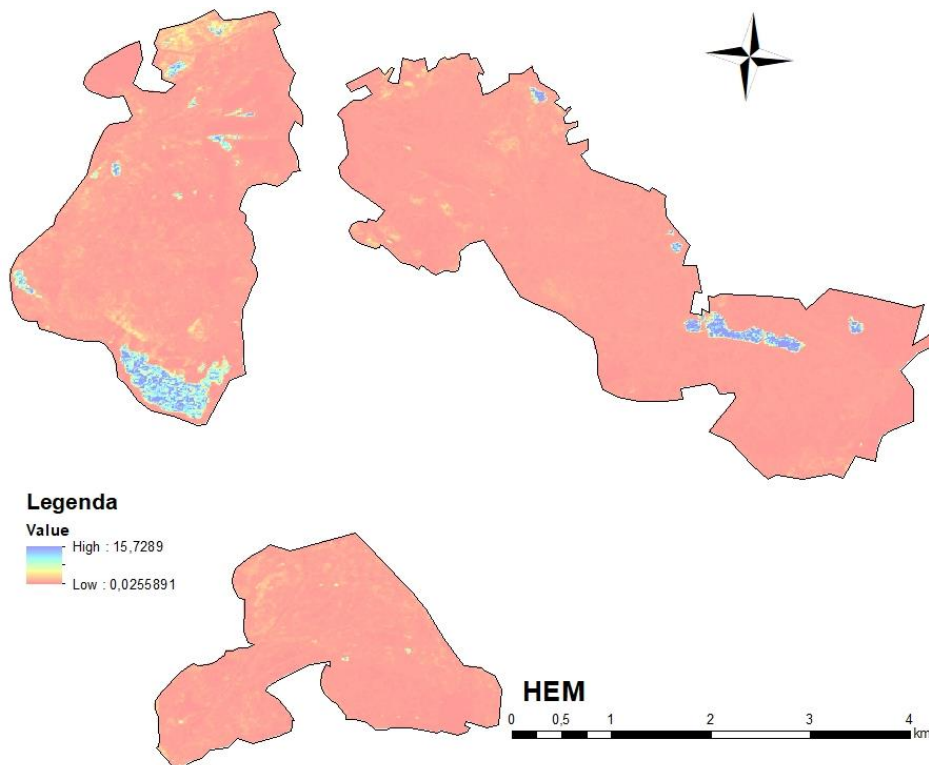
Příloha 9: Krajinový pokryv na zájmových výsypkách, (Kubcová, L., 2019)



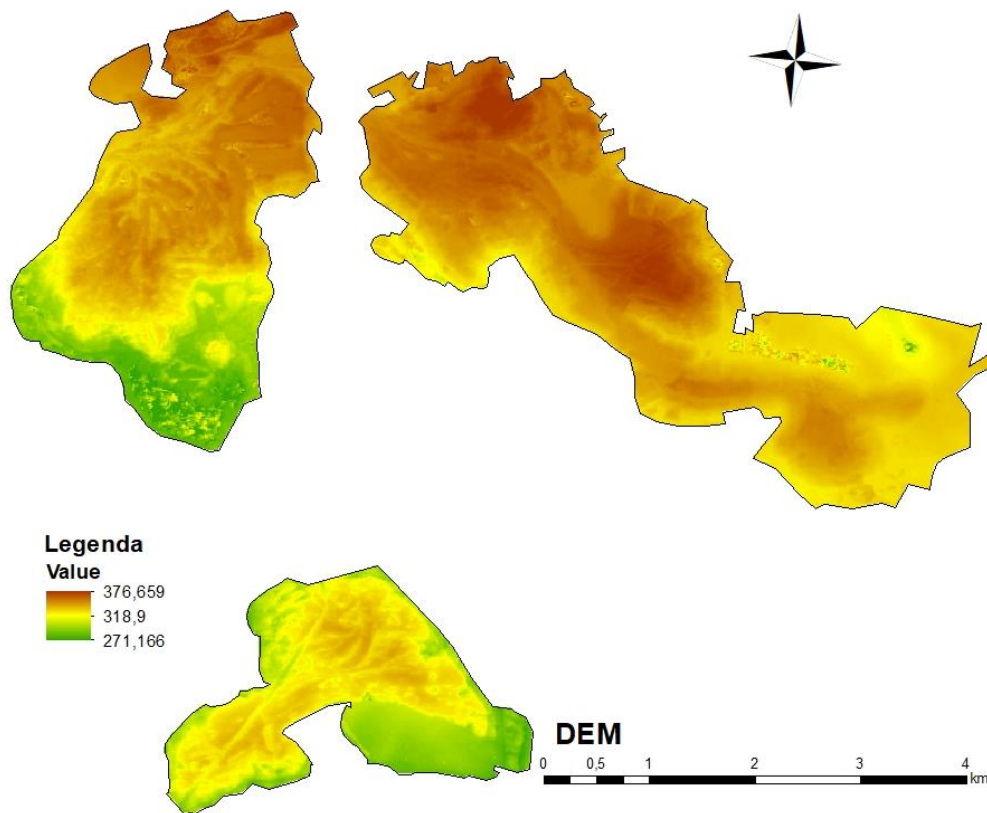
Příloha 10: COM, (Kubcová, L., 2019)



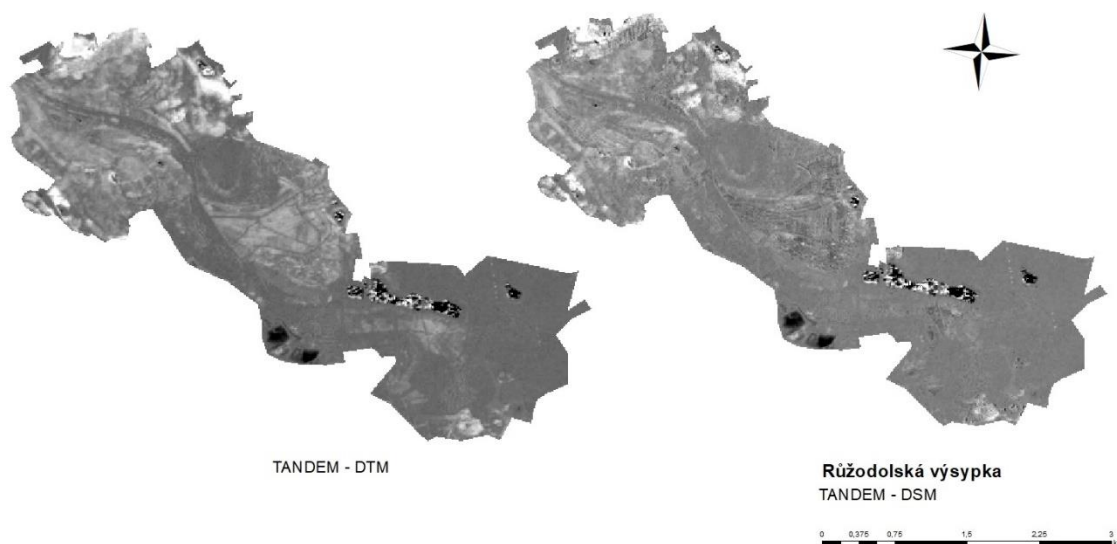
Příloha 11: COV, (Kubcová, L., 2019)



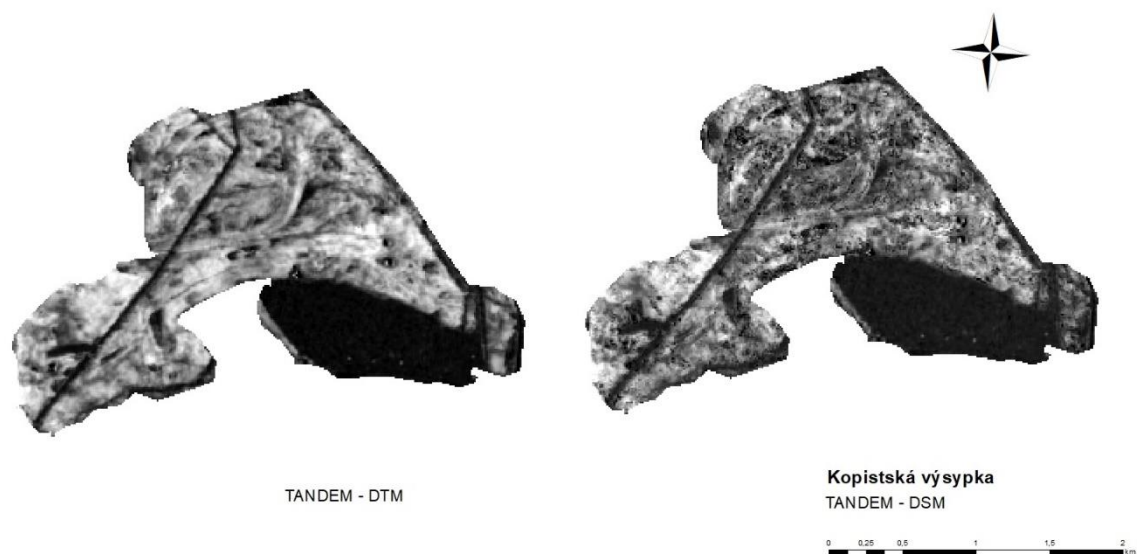
Příloha 12: HEM, (Kubcová, L., 2019)



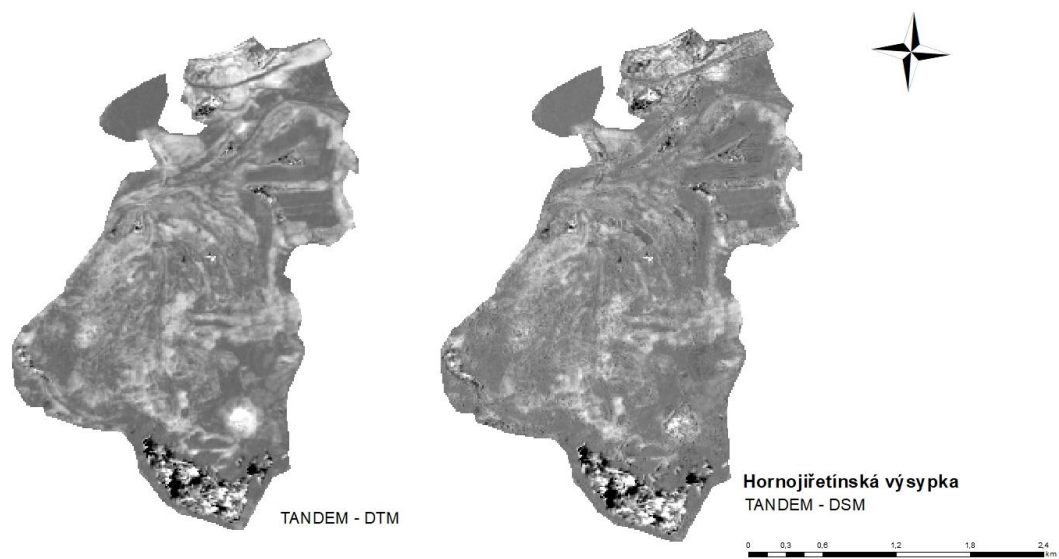
Příloha 13: DEM, (Kubcová, L., 2019)



Příloha 14: Rozdíl mezi TANDEM-X a DTM/DSM na Růždolské výsypce, (Kubcová, L., 2019)



Příloha 15: Rozdíl mezi TANDEM-X a DTM/DSM na Kopistké výsypce, (Kubcová, L., 2019)



Příloha 16: Rozdíl mezi TANDEM-X a DTM/DSM na Hornojřetínské výsypce, (Kubcová, L., 2019)