

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování**



**Fakulta životního  
prostředí**

**Srovnání přesnosti vybraných globálních  
digitálních modelů terénu na území Jizerských  
hor**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce: Ing. Petr Bašta**

**Bakalant: Gavrina Kristina**

**©2024 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kristina Gavrina

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

**Srovnání přesnosti vybraných globálních digitálních modelů terénu na území Jizerských hor**

Název anglicky

**Accuracy comparison of selected global digital terrain models in Jizerské Mountains**

---

### Cíle práce

Hlavním cílem práce bude srovnání přesnosti vybraných globálních digitálních modelů terénu (DMT): (1) FABDEM, (2) MERIT DEM a (3) Continental Europe DEM; a to pro zájmové území CHKO Jizerské hory. Jako referenční model terénu bude využit digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G).

Dílním cílem bude vypracování rešerše odborných zdrojů na zadané téma digitálních modelů terénu (viz metodiku).

### Metodika

V rámci teoretické části práce autorka popíše datové typy digitálních modelů terénu (raster, TIN, isolinie), možné způsoby získávání dat pro tvorbu DTM (GPS, laser-scan, DPZ) a dnešní dostupné datové sady DTM (zejména ZABAGED DMR a globální DMT).

V rámci metodické části budou blíže popsány analyzované datové soubory (FABDEM, MERIT DEM, CEDTM, DMR 5G) a rovněž proces jejich porovnání. Dále bude popsána zájmová lokalita.

Kapitola s výsledky bude obsahovat vlastní srovnání vybraných digitálních modelů terénu formou rastrové algebry a za vyhodnocení RMSE. Toto bude provedeno pro zájmovou lokalitu jako celek, ale také separátně pro hlavní kategorie land-use: lesní porosty, urbanizované plochy a ostatní plochy. Výsledky budou zhodnoceny formou diskuze.

**Doporučený rozsah práce**

30 normostran textů

**Klíčová slova**

Globální DMT, GIS, FABDEM, MERIT DEM, Continental Europe DEM, validace DEM

---

**Doporučené zdroje informací**

- El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A. (2005): Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and application. Artech House remote sensing library. Artech House, Inc., Canton Street, Norwood.
- Marsh et al 2023: Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment. Environ. Res. Commun. 5 (3), DOI 10.1088/2515-7620/acc56d
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991): Digital Elevation Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Ecological Applications. Hydrological Processes 5, s. 3-30.
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000): Terrain Analysis" Principles and Applications. John Wiley and Sons., 479 s.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2023/24 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Petr Bašta

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2024

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2024

**prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 09. 03. 2024

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/závěrečnou práci na téma: Srovnání přesnosti vybraných globálních digitálních modelů terénu na území Jizerských hor vypracovala samostatně a citoval/a jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedl/a na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědomá, 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 vědomá, 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 ..... dne .....

Podpis: .....

## Poděkování

Ráda bych vyjádřila svou upřímnou vděčnost vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Baštovi, za jeho vynikající podporu, ochotu a cenné rady během celého procesu tvorby práce. Také bych ráda poděkovala svým rodičům za neustálou podporu během mého studia.

## Abstrakt

Hlavním cílem této práce je podrobně porovnat přesnost tří globálních digitálních modelů terénu (DMT) - FABDEM, MERIT DEM a Continental Europe DEM - na zájmovém území Chráněné krajinné oblasti Jizerské hory, využívající digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G) jako model referenční.

V teoretické části práce jsou rozebrány různé typy digitálních modelů terénu (DMT) a metody získávání dat pro jejich tvorbu. Dále je provedena rešerše odborných zdrojů v této oblasti. V metodické části jsou popsány analyzované datové soubory a postupy jejich porovnání, včetně charakteristiky zájmové lokality.

V kapitole s výsledky jsou provedena srovnání tří posuzovaných DMT s referenčním modelem a vyhodnocení pomocí koeficientu RMSE, jak pro celou oblast, tak pro hlavní kategorie využití ploch. Tato práce poskytuje ucelený pohled na metody analýzy DMT a také na přesnost a kvalitu těchto globálních digitálních modelů terénu, což má potenciál výrazně přispět k lepšímu porozumění kvality posuzovaných DMT a k dalšímu využití těchto DMT v geografických a environmentálních studiích.

Hlavním závěrem je přesvědčivá výhoda využívání prostorových dat vyšší kvality. Během analýzy se potvrdilo, že modely CEDTM a MERIT DEM vykazují menší odchylky mezi posuzovanými a skutečnými hodnotami nadmořských výšek než model FABDEM, což naznačuje jejich vyšší přesnost ve sledované oblasti.

Provedený výzkum poskytuje důležité informace pro rozhodování o výběru mezi různými digitálními modely terénu.

## Klíčová slova

Globální DMT, GIS, FABDEM, MERIT DEM, Continental Europe DEM, validace DEM

## Abstract

The main aim of this thesis is to comprehensively compare the accuracy of three global digital terrain models (DTMs) - FABDEM, MERIT DEM, and Continental Europe DEM - within the territory of the Jizera Mountains Protected Landscape Area, using the digital terrain model of the 5th generation (DMR 5G) as a reference.

The theoretical part of the thesis will discuss various types of DTMs and methods for acquiring data for their creation. Furthermore, a review of relevant literature in this field will be conducted. The methodological section will describe the

analyzed datasets and the procedures for their comparison, including the characterization of the study area.

In the results chapter, a comparison of DTMs will be conducted, and evaluation using the RMSE coefficient will be performed, both for the entire area and for the main land use categories. This thesis will provide a comprehensive view of DTM analysis methods and a comprehensive view of the accuracy and quality of these global digital terrain models, which has the potential to significantly contribute to a better understanding of the relief of the Jizera Mountains and its further utilization in geographic and environmental studies.

The main conclusion is the compelling advantage of utilizing higher quality spatial data. The analysis confirmed that the CEDTM and MERIT DEM models show significantly smaller deviations between the predicted and actual elevation values than the FABDEM model, indicating their higher accuracy in the study area.

The research carried out provides important information for deciding the choice between different digital terrain models.

## Keywords

Global DTM, GIS, FABDEM, MERIT DEM, Continental Europe DEM, DTM validation

## Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	10
<b>2. Cíle práce</b> .....	10
<b>3. Literární řešerše</b> .....	11
<b>3.1 Definice a terminologie</b> .....	11
3.1.1 Digitální výškový model .....	11
3.1.2 Digitální model terénu .....	11
3.1.3 Digitální model povrchu .....	12
3.1.4 Globální DEM .....	12
3.1.5 Lokální DEM (regionální) .....	12
<b>3.2 Způsoby získávání dat pro digitální model terénu</b> .....	13
3.2.1 Laserové snímání terénu (LiDAR): .....	13
3.2.2 Fotogrammetrie: .....	13
3.2.3 Terestrická fotogrammetrie: .....	14
3.2.4 Metody SAR a InSAR .....	14
3.2.5 RTK GPS stanice .....	15
3.2.6 Mobilní GPS a GNSS .....	15
<b>3.3 Klasifikace modelů terénu podle formátu dat</b> .....	16
3.3.1 Rastrový formát: .....	16
3.3.2 Trojúhelníková síť (TIN): .....	16
3.3.3 Vrstevnice: .....	17
<b>3.4 Datové sady globálních DEM</b> .....	17
<b>3.5 Validace modelů terénu</b> .....	19
3.5.1 Hlavní přístupy hodnocení kvality DEM .....	19
3.5.2 Externí hodnocení kvality .....	20
3.5.3 Interní hodnocení kvality .....	21
<b>4. Charakteristika studijního území</b> .....	21
<b>4.1 Stručná charakteristika a popis Jizerských hor</b> .....	21
<b>5. Metodika</b> .....	23
<b>5.1 Vstupní data</b> .....	23
5.1.1 MERIT DEM .....	24
5.1.2 CEDTM .....	24
5.1.3 FABDEM .....	24
5.1.4 DMR 5G .....	25
5.1.5 Corine Land Cover .....	26



5.2. Popis postupu praktické části .....	26
6. Výsledky práce .....	32
6.1 Výsledky z výpočtu ukazatelů popisné statistiky .....	32
6.2 Výsledky výškových rozdílů prostřednictvím map a grafů .....	34
6.3 Výsledky podle RMSE a ME .....	38
7. Diskuze .....	40
8. Závěr .....	42
9. Seznam zdrojů a použité literatury .....	43
10. Seznam Obrázků .....	45

## 1. Úvod

Digitální modely terénu (DMT) jsou klíčovými nástroji v geografických informačních systémech (GIS) pro analýzu reliéfu a jeho využití v různých oblastech, jako je urbanismus, hydrologie nebo environmentální management. Přesnost těchto modelů je zásadní pro správné rozhodování a plánování v těchto oblastech. Tato práce se zaměřuje na detailní srovnání přesnosti tří globálních digitálních modelů terénu - FABDEM, MERIT DEM a Continental Europe DEM - na území Chráněné krajinné oblasti Jizerské hory. Cílem je poskytnout ucelený pohled na metody analýzy DMT a jejich přesnost, což může výrazně přispět k lepšímu porozumění reliéfu této oblasti a umožnit efektivnější využití těchto modelů v geografických a environmentálních studiích.

V první části této práce je provedena literární rešerše, která představuje základní definice a terminologii související s digitálními modely terénu, způsoby získávání dat pro jejich tvorbu, klasifikaci modelů podle formátu dat a metodiky jejich validace. Následně je poskytnuta charakteristika studijního území, která se zaměřuje na stručný popis Jizerských hor a jejich geografických a geomorfologických charakteristik.

Metodická část popisuje vstupní data použita pro analýzu, postupy praktické části a charakteristiky zkoumané lokality. Výsledky práce obsahují srovnání tří globálních DMT a jejich vyhodnocení pomocí koeficientu RMSE pro celé zkoumané území a pro hlavní kategorie využití ploch. Nakonec následuje diskuse nad zjištěními výzkumu a příčinami charakteristik výsledků, která vyústí v závěrečné shrnutí pro další výzkum a praxi.

## 2. Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je provést detailní analýzu a srovnání přesnosti tří vybraných digitálních modelů terénu (FABDEM, MERIT DEM a CEDTM). Práce se zaměří na testování přesnosti těchto modelů s použitím "referenčního" (kontrolního) modelu terénu. Pro tento účel bude použit Digitální model reliéfu ČR 5. generace

(DMR 5G). Srovnání bude provedeno na základě zhodnocení odchylek mezi posuzovanými modely a referenčním modelem a následného vyhodnocení odmocniny střední kvadratické chyby (root mean square error, RMSE). Srovnání proběhne ve vybrané oblasti na území Jizerských hor.

## 3. Literární rešerše

V této kapitole bude rozebrána problematika digitálních modelů terénu, jejich kategorizace a dostupné zdroje těchto dat. Budou popsány hlavní metody sběru dat používané k sestavení těchto modelů, vyhodnocení jejich přesnost a použitelnost v různých kontextech.

### 3.1 Definice a terminologie

#### 3.1.1 Digitální výškový model

Digitální výškový (elevační) model (digital elevation model - DEM) je digitální reprezentací reliéfu zemského povrchu, matematický model, který kvantifikuje výšky jednotlivých bodů na zemském povrchu. Je tvořen souborem digitálních dat, která přesně popisují topografii daného území. Tato technologie je využívána v geoinformatice, urbanismu, geografii, geologii a mnoha dalších oblastech. DEM obsahuje soubor výškových bodů, kde každý bod reprezentuje konkrétní polohu na zemském povrchu a je charakterizován svou nadmořskou výškou. Data jsou organizována do mřížky nebo triangulační sítě, což umožňuje přesné zachycení topografických detailů. DEM lze obecně rozdělit na digitální modely povrchu, které měří horní povrch stromů, budov a dalších umělých prvků, a digitální modely terénu, které měří nadmořskou výšku povrchu Země, nebo tzv. 'holozem' (Hawker, 2022; López-Vázquez, 2023; Guth, 2021).

#### 3.1.2 Digitální model terénu

Digitální model terénu (DMT) je model povrchu Země bez staveb, stromů a dalších objektů na jeho povrchu v digitální podobě, která dovoluje jeho zpracování

prostředky informačních a komunikačních technologií. Zákonitě se jedná o zjednodušený model složitého reálného povrchu, a tudíž zobrazuje tento povrch ve specifikované podrobnosti a přesnosti. Tyto modely poskytují podrobné údaje o topografii, reliéfu a struktuře terénu. DMT může být vytvořen různými metodami, jako je laserové snímání terénu (LiDAR), fotogrammetrie, atd (Polidori, 2020; Li, Zhilin, 2004). Příkladem jsou testované modely FABDEM, MERIT DEM a CEDTM, jejichž bližší popis bude uveden v kapitole 'Klasifikace modelů terénu podle formátu dat'.

### **3.1.3 Digitální model povrchu**

Digitální model povrchu (angl. digital surface model, odtud zkratka DSM) je digitální reprezentací povrchu Země nebo jiného terénu, která obsahuje informace o výšce různých bodů na tomto povrchu spolu s objekty a vegetací. Na rozdíl od digitálního modelu terénu, který zahrnuje pouze zemský povrch bez překážek, DSM zachycuje všechny prvky na povrchu, včetně stromů, budov a další infrastruktury. Tento model primárně vzniká při použití automatizovaného sběru bodů pomocí obrazové korelace ve fotogrametrii, pomocí laserového skenování nebo radarového měření v dálkovém průzkumu Země (DPZ). Z digitálního modelu povrchu se získává digitální model terénu teprve následným zpracováním (Polidori, 2020). Příklady DSM: TanDEM-X, ALOS World 3D (Tadono, 2015; Rizzoli, 2017).

### **3.1.4 Globální DEM**

Globální DEM (GDEM) poskytuje úplný a podrobný přehled o reliéfu celého světa. Tyto modely jsou zpracovány pomocí satelitních dat a mají velkou prostorovou pokryvnost. Příkladem globálního DEM je model získaný ze satelitní mise s celosvětovým pokrytím. Prvním GDEM s volně přístupnými daty byla SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), dále příkladem jsou ASTER, WorldDEM, NASADEM, Copernicus DEM (López-Vázquez, 2023; Strobl, 2021).

### **3.1.5 Lokální DEM (regionální)**

Naopak lokální DEM neboli regionální DEM se zaměřuje na specifickou geografickou oblast nebo region. Tyto modely jsou často získávány s větší prostorovou a výškovou rozlišovací schopností, což umožňuje detailnější pohled na konkrétní oblast. Regionální DEM může být vytvořen pomocí různých technologií,

včetně LiDAR, fotogrammetrie nebo radarových metod, a je vhodný pro podrobné studie topografie ve specifických částech světa.

### **3.2 Způsoby získávání dat pro digitální model terénu**

DEM jsou klíčovým prvkem v geoinformatice, a jejich kvalita a přesnost jsou zásadní pro mnoho aplikací. Existuje několik metod získávání dat pro vytvoření DEM, z nichž každá přináší specifické výhody. Zde jsou klíčové metody a informace o nich:

#### **3.2.1 Laserové snímání terénu (LiDAR):**

LiDAR (z anglického: Light Detection and Ranging) je aktivní dálkový senzor využívající laserové světlo k měření vzdáleností od povrchu Země. Technologie LiDAR využívá diskrétní impulsy laserového světla, tyto impulzy měří čas odrazení od objektů, což umožňuje vypočítat vzdálenost k nim. Typická absolutní přesnost výškových měření LiDAR je od 10 do 20 centimetrů pro novější data (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2012).

LiDAR je schopen za sekundu zaměřit mezi 5 000 a 10 000 jednotlivých bodů. Přesné vzdálenosti se měří na základě odrazu laserového paprsku od terénních objektů. Když provádíme mapování, LiDAR generuje mnoho bodů, které po zpracování mohou být spojeny do digitálního modelu povrchu nebo 3D modelů budov a jiných struktur. Použitím různých filtrů lze z tohoto bodového mračka získat detailní digitální model terénu (Nelson, 2009; Webster 2005).

#### **3.2.2 Fotogrammetrie:**

Fotogrammetrie se opírá o analýzu fotografií a obrazů pro získání informací o tvaru a výšce terénu. Základním principem fotogrammetrie je využití dvojice sterea obrázků pro rekonstrukci původního tvaru 3-D objektů. Snímky jsou analyzovány s využitím trojrozměrné geometrie a paralaxy pro vytvoření digitálního modelu terénu. Moderní metody fotogrammetrie často kombinují fotografie s GPS daty pro dosažení vyšší přesnosti, přesnost produktů fotogrammetrie může dosahovat různých úrovní od desítek centimetrů až po metry. Fotogrammetrie může být využívána jak pro

globální, tak i pro lokální metodu získávání geografických informací (Li, Zhilin, 2004; Marzloff, 2006; Aber, 2010).

### **3.2.3 Terestrická fotogrammetrie:**

Používá se k vytváření 3D modelů terénu z fotografií pořízených z pevného stanoviště na zemi. Hlavní výhodou použití terestrické fotogrammetrie (TLS) v inventarizaci lesů je její schopnost rychle, automaticky a s milimetrovou přesností dokumentovat les, zejména s použitím specializovaného vybavení, snímá oblasti z pevných stanovišť, zahrnujících vegetaci a objekty.

Terestrická fotogrammetrie je obvykle považována za lokální metodu, která se zaměřuje na konkrétní lokality nebo objekty (Liang, 2016).

### **3.2.4 Metody SAR a InSAR**

Metoda SAR (Synthetic Aperture Radar) se používá k získání obrazů citlivých na terénní variace. Využívá tři techniky: radargrammetrie, interferometrie a radarclinometrie. Radargrammetrie měří paralaxu, zatímco interferometrie využívá fázových posunů. SAR k měření terénu využívá vlastní osvětlení mikrovlnami a zaznamenává odrazy od cílů, což umožňuje tvorbu obrazů ve dne i v noci za všech podmínek.

Princip SAR spočívá ve vysílání kuželového mikrovlnného paprsku na zem, kde každý impuls vytvoří radarovou stopu. Data o DTM jsou získávána pomocí interferometrie, která měří fázové rozdíly mezi dvěma radarovými obrazy téže oblasti.

InSAR (Interferometric SAR) je signálová technika, která odvozuje výškové informace z interferogramu. Lze s ní dosáhnout přesnosti 1 cm. Klíčovými výzvami jsou přesný výpočet fázových rozdílů a odhad základní linie (Li, Zhilin, 2004; Mariotti D'Alessandro, 2019; Wai Yip, 2023).

Pozemní metody sběru dat sehrávají klíčovou roli v dosažení vysoké přesnosti v geografických studiích. Je však důležité zdůraznit, že tato vysoká přesnost je kompenzována omezeným rozsahem použití. Tyto metody jsou obvykle aplikovatelné pouze na relativně malých územích, což může být výzvou při pokusech získat data pro širší geografické analýzy nebo pro globální měření v rámci rozsáhlých projektů.

Mezi tyto pozemní metody patří například RTK GPS stanice nebo mobilní GPS, které budou popsány v následujících podkapitolách.

### 3.2.5 RTK GPS stanice

RTK GPS (Real-Time Kinematic GPS) je technologie, která umožňuje dosažení vysoké přesnosti polohy (obvykle do 5 cm) pomocí mobilních GPS zařízení, která jsou připojena na stacionární RTK GPS stanice.

Tato metoda využívá korekce poskytované stacionární stanicí k eliminaci chyb signálu GPS a dosahuje přesnosti na úrovni jednotek centimetrů.

RTK GPS jsou obvykle považovány za lokální metodu. Tato technologie se často používá pro měření polohy v konkrétní lokalitě nebo regionu s vysokou přesností, zejména při práci na menších územích.

Co se týče snímání terénu, RTK GPS poskytuje informace o výšce terénu, při tomto měření jsou zahrnuty různé prvky, včetně vegetace, budov a dalších objektů, které ovlivňují terénní reliéf (De Pace, 2023; Perez-Ruiz, 2011).

### 3.2.6 Mobilní GPS a GNSS

Základním principem měření na bázi GPS (Global Positioning System and Global Navigation Satellite System) je protínání vzdálenosti. K určení neznámé polohy ve 3D prostoru jsou potřeba tři vzdálenosti od tří známých bodů.

Global Positioning System (GPS) a Global Navigation Satellite System (GNSS) jsou geoinformační technologie, které se používají k měření přesné polohy poskytující také přesnou časovou referenci téměř kdekoli na světě (Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Existuje několik (globálních nebo regionálních) satelitních systémů, jako je NAVSTAR GPS, GLONASS, Galileo, Beidou/Compass nebo IRNSS; princip jejich fungování je však stejný a je založen na třech hlavních segmentech: prostor, ovládání a uživatel.

GPS slouží k získání geografických souřadnic bodů na zemském povrchu. Pro vytvoření DMT nebo DSM je pak potřeba kombinovat GPS s dalšími technologiemi, jako jsou laserové snímání terénu (LiDAR) (Vojtek, 2016).

GPS poskytuje dvě hlavní služby: Precision Positioning Service (PPS) a Standard Positioning Service (SPS). PPS je šifrovaná služba určená pro armádu a

další oprávněné vládní uživatele. SPS si neúčtuje žádné přímé uživatelské poplatky a používají je miliardy civilních a komerčních uživatelů po celém světě (Elliott, 2017).

Každá z těchto metod má své výhody a omezení, a volba závisí na konkrétních potřebách projektu a dostupných prostředcích. Kombinace různých metrik může vést k vytvoření komplexnějšího a přesnějšího digitálního modelu terénu.

### **3.3 Klasifikace modelů terénu podle formátu dat**

Klasifikace DEM podle formátu dat je klíčovým aspektem, který ovlivňuje způsob, jakým jsou data reprezentována a využívána. Tři hlavní typy formátů zahrnují rastrový formát, trojúhelníkovou síť (TIN) a izoliny (vrstevnice). Každý z těchto formátů nabízí specifické výhody a je vhodný pro určité aplikace.

#### **3.3.1 Rastrový formát:**

Rastrové modely terénu jsou založeny na pravidelné mřížce pixelů, kde každý pixel reprezentuje hodnotu nadmořské výšky. Tento formát umožňuje snadnou a rychlou analýzu terénu, a je často využíván v geografických informačních systémech (GIS). Pravidelná struktura umožňuje efektivní zpracování, ale může někdy nedostatečně zachytit složité detaily reliéfu. Velikost pixelů (rozlišení mřížky, neboli gridu) hraje klíčovou roli při zachycování detailů reliéfu v rastrových modelech terénu. Čím menší je velikost pixelu, tím vyšší rozlišení modelu bude dosaženo, což umožňuje lepší zachycení malých a jemných terénních detailů.

Při vytváření DEM je důležité vybrat vhodné rozlišení podle konkrétních potřeb analýzy a aplikací. Pokud je rozlišení příliš hrubé, mohou se ztratit jemné terénní charakteristiky. Naopak příliš vysoké rozlišení může vést k nadměrnému objemu dat a náročnějšímu zpracování.

#### **3.3.2 Trojúhelníková síť (TIN):**

TIN reprezentuje terén pomocí nepravidelné sítě trojúhelníků, které propojují body s různými nadmořskými výškami. Tato struktura je obzvláště vhodná pro zobrazování komplexních a nepravidelných terénů, jako jsou hory nebo kaňony. TIN



umožňuje detailnější modelování terénu a je často používán v inženýrských a geodetických aplikacích (Pacina, 2014).

### 3.3.3 Vrstevnice:

Vrstevnice jsou klasickým způsobem reprezentace terénu, kde čáry spojují body se stejnou nadmořskou výškou. Tento formát je tradičně využíván na topografických mapách a poskytuje vizuálně intuitivní přehled o změnách reliéfu. Nicméně, pro digitální zpracování může být náročný a méně efektivní než rastrové nebo TIN formáty (Voženík, 2001).

## 3.4 Datové sady globálních DEM

Konkrétní příklady DEM, které jsou v současné době používány nebo jsou známy pro svou kvalitu a přesnost:

MERIT DEM (Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM) je globální digitální model terénu, který vznikl odstraněním chyb z předchozích DMT a kombinací více datových zdrojů. Nabízí relativně vysokou prostorovou rozlišení a přesnost (Yamazaki, 2017).

FABDEM (Forest and Buildings Removed Copernicus Digital Elevation Model) je digitální model terénu odvozený odstraněním lesů a budov, což umožňuje lepší analýzu reliéfu bez vlivu vegetace a umělých struktur (Marsh, 2023).

CEDTM (Continental European Digital Terrain Model) je digitální model terénu zaměřený na kontinentální Evropu. Tento digitální model terénu je založený na třech veřejně dostupných digitálních modelech povrchu a předpovídáný pomocí Ensemble Machine Learning (EML) (Hengl, 2020).

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) byla mise vyslaná raketoplánem, která používala radarovou interferometrii k vytvoření digitálního modelu reliéfu s vysokým rozlišením. Poskytuje globální data o výškách terénu (Mouratidis, 2019).

ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) využívá data z ASTER senzoru umístěného na satelitu

Terra. Poskytuje globální model terénu s rozlišením zhruba 30 metrů (Mouratidis, 2019).

Globální TanDEM-X DEM získaný s jednorůchodovou interferometrií SAR byl dokončen v září 2016. TanDEM-X je mise německých družic TerraSAR-X a TanDEM-X, které společně vytvářejí vysokorychlostní digitální model povrchu na globální úrovni (Wessel, 2018).

WorldDEM je globální datová sada poskytující digitální model povrchu se satelitním průletovým radarem. Produkt WorldDEM je založen na radarových datech získaných během mise TanDEM-X, která je financována z Public Private Partnership mezi německým státem (European Space Agency, Sinergise, 2021).

NEXTMap World 30 od Intermap Technologies je sloučený datový model využívající jako vstupní zdroj opravená veřejná data, poskytuje globální digitální model povrchu s rozlišením 30 metrů (Intermap Technologies, 2013).

Copernicus DEM (Copernicus Global Digital Elevation Models) je globální digitální model reliéfu poskytující podrobné informace o výškách zemského povrchu. Vytvořen byl v rámci služby Copernicus Land Monitoring Service, tento DSM je odvozen z upraveného DSM s názvem WorldDEM, kde bylo zahrnuto zploštění vodních ploch a konzistentní tok řek (European Space Agency, Sinergise, 2021).

GMTED (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data). Datový soubor GMTED2010 s více úrovněmi rozlišení nahrazuje dřívější verzi s názvem GTOPO30. Tyto údaje byly shromážděny z různých zdrojů pomocí agregačních metod a zahrnují informace o terénech s různými úrovněmi detailu, což umožňuje široké využití od vědeckého výzkumu po plánování infrastrukturních projektů (Danielson, 2011).

ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) je produktem laserového skenování Země systémem ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) a slouží k měření výšek zemského povrchu, mraků a ledu. Tyto údaje se využívají ke studiu změn v ledovém krytu, atmosférických jevech a geologických procesech (Markus, 2017).

GEDI (The Global Ecosystem Dynamics Investigation) je mise, která využívá laserový dálkoměr ke studiu struktury lesů a povrchu Země. Údaje shromážděné pomocí mise

GEDI poskytují informace o výškách stromů a pomáhají porozumět globální dynamice ekosystémů, což je klíčové pro ekologický a klimatický výzkum (Potapov, 2020).

### 3.5 Validace modelů terénu

DEM jsou klíčovým prvkem v geovědách, a zajištění jejich kvality je nezbytné pro mnoho aplikací. Kvalita DEM je ovlivňována během různých fází zpracování, od sběru elevací po interpolaci při resamplingu, s lokálním vlivem pokrytí půdy a sklonu terénu. Cílem této podkapitoly je přehled hlavních metod hodnocení kvality, které lze rozdělit do dvou přístupů: s nebo bez referenčních dat, označovaných jako externí a interní hodnocení kvality.

#### 3.5.1 Hlavní přístupy hodnocení kvality DEM

Srovnání testovaného DEM s terénními měřeními je jedním z nejzákladnějších přístupů, kde geodetické metody, včetně globálního navigačního satelitního systému (GNSS), poskytují přímé porovnání mezi modelem a skutečnými terénními podmínkami.

Srovnání se provádí metodou cross-validace. Principem cross-validace DEM je vzájemné porovnání všech hodnot pixelů testovaného DEM s hodnotami pixelů referenčního DEM. Jako referenční DEM obvykle slouží produkt leteckého laserscanu (ALS) regionálního rozsahu většího měřítka, což je i DMR 5G.

Metoda cross-validace neboli leave-one-out provádí toto porovnání pro každý pixel datové sady zvlášť (Erdogan, 2009), zatímco metoda jack-knifing, využívaná pro hodnocení interpolace DEM z bodového mračna, nejprve vybere ze všech bodů datové sady jednorázově určitou část, interpolaci provede bez nich a pak v těchto bodech opět porovnává hodnoty měřené s hodnotami interpolovanými (Desmet, 1997). Cross-validace se tak zaměřuje na trénování modelu na jednom datovém souboru a jeho testování na jiném. Tato strategie pomáhá odhalit, jak dobře se model generalizuje na nová data a jeho schopnost zachytit variabilitu terénních podmínek.

Používání statistických ukazatelů, jako jsou koeficienty korelace a střední kvadratická chyba, umožňuje kvantitativní hodnocení rozdílů mezi DEM a referenčními daty. Ze zjištěných rozdílů mezi hodnotami pixelů testovaného a

referenčního DEM se statistickými metodami počítají kritéria pro vyhodnocení chyb (reziduí testovaného DEM). Existuje celá řada těchto kritérií, ale nejvíce používaným kritériem u DEM je odmocnina střední kvadratické chyby (root mean square error, RMSE), případně střední chyba (mean error, ME) (Ajvazi & Czimer, 2019).

RMSE a ME jsou standardní metriky používané především pro přizpůsobení modelu (optimální výběr parametrů daného modelu), validaci modelu, výběr modelu, porovnání modelů (mezi několika konkurenčními modely) a vyhodnocení prognóz. RMSE je míra odmocniny ze středních čtverců chyb mezi předpokládanými a pozorovanými/skutečnými hodnotami (Singla, 2022). Abychom porovnali různé interpolační metody, zkoumáme rozdíl mezi známými daty a předem předpokládanými daty pomocí střední absolutní chyby a střední kvadratické chyby, níže je uvedeno rovnice (obr. č. 1) (kde  $\hat{z}(x_i)$  je předpokládaná hodnota a  $z(x_i)$  je pozorovaná (známá) hodnota) (Ajvazi & Czimer, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2},$$

Obrázek 1 Vzorec pro výpočet RMSE

Detailní vyhodnocení přesnosti modelů terénu je nezbytné pro plné pochopení jejich schopnosti přesné reprezentace povrchu Země. V oblastech s hustou vegetací se pro posouzení kvality DEM používají jako referenční data získaná pomocí LiDARu a fotogrammetrie, protože jiné metody měření zde mohou mít omezenou účinnost a nejsou proto vhodná pro posuzování přesnosti (Pakoksung, 2016).

### 3.5.2 Externí hodnocení kvality

Externí hodnocení kvality se provádí porovnáním DEM s externími kontrolními daty. Může se jednat o bodové mraky, konturové linie, topografické profily nebo přesnější DEM.

Pro externí hodnocení musí být externí data výrazně přesnější a hustší než hodnocený DEM. Hlavními složkami hodnocení kvality DEM jsou systematické, náhodné a hrubé chyby (Polidori, 2020).

### 3.5.3 Interní hodnocení kvality

Interní hodnocení kvality nevyžaduje externí data a je založeno na kritériích realismu s využitím znalostí o obecném chování topografických povrchů.

Dva hlavní metody interního hodnocení zahrnují vizuální kontrolu a kvantitativní analýzu. Vizuální kontrola je založena na vnímání tvarů reliéfu a umožňuje identifikovat nerealistické charakteristiky. Kvantitativní analýza je založena na univerzálních pravidlech, kterým by měly odpovídat topografické povrchy (Polidori, 2020).

Validace modelů terénu je komplexním procesem, který vyžaduje kombinaci různých metod a přístupů. Kombinace externích a interních metod umožňuje získat komplexní a důvěryhodné hodnocení přesnosti a spolehlivosti DEM, což je klíčové pro jejich úspěšné využití v různých oblastech aplikací. Tato kapitola představila přehled hlavních přístupů k validaci modelů terénu a zdůraznila důležitost kombinace externích a interních metod hodnocení kvality pro dosažení vyváženého a důkladného posouzení výsledných DEM.

## 4. Charakteristika studijního území

V této kapitole je stručně popsáno zájmové území Jizerských hor, které je znázorněno na obrázku č. 2. Nejprve je poskytnut stručný přehled jeho geografických charakteristik, včetně místopisné polohy. Dále je diskutována topografie a geologický základ tohoto regionu, včetně zmínky o pramenících tocích a klimatických faktorech.

### 4.1 Stručná charakteristika a popis Jizerských hor

Jizerské hory představují nejsevernější pohoří České republiky. Jejich území však nekončí státní hranicí, ale podstatnou částí zasahuje do Polska. Zde se také nachází nejvyšší hora Jizerských hor, Wysoka Kopa (1126 m n. m.). Na české straně je nejvyšším bodem Smrk (1124 m n. m.), nejnižší je položena hladina Smědé u Frýdlantu (320 m n. m.). Délka pohoří ve směru západ-východ činí 30 km, šířka ve

směru severojižním pak až 20 km. Geologický základ je tvořen krkonošsko-jizerským žulovým plutonem, který je na několika místech prostoupen paleogenními bazalty.

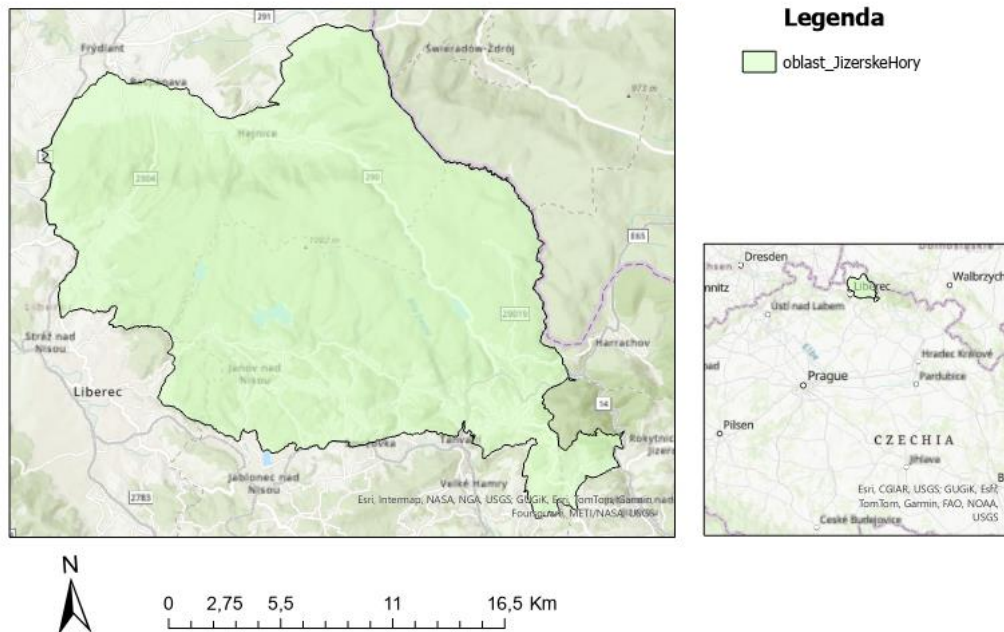
Jizerské hory řadíme do segmentu starohorně-prvohorní obloukovité zóny obklopující na severu jádro Českého masivu, tzv. Jugikum (lužická oblast), které se na základě odlišné geologické stavby a stáří dále dělí na několik samostatných jednotek (Procházková, 2016).

V Jizerských horách pramení řada toků, které však náleží do dvou různých úmoří, neboť Jizerskými horami probíhá evropské rozvodí mezi Severním a Baltickým mořem.

Klíma je tvořeno mnoha faktory; mezi klíčové v Jizerských horách patří různá nadmořská výška (od 350 do 1124 m n.m.), georeliéf určující směry proudění větru, vegetace a podíl vodních ploch (Kazdová, 2022).

Charakter květeny Jizerských hor může být označena jako velmi monotónní, bez většího počtu významnějších druhů. Tento stav je výsledkem kombinace minerálně chudého žulového podloží, vlhkého a chladného podnebí a až do nedávna dlouhodobě souvislého zalesnění. Přirozená bezlesí ve vrcholových částech hor nejsou kompaktní, nýbrž se vyskytují v podobě roztroušených rašelinných lokalit. Původní lesní porosty tvořily jedlobukové pralesy, v nejvyšších polohách klimaxové smrčiny a v rašelinných oblastech přecházely podmáčené smrčiny v kleče. Vliv na diverzitu má i lidská činnost a to v obou směrech – v jejím zvyšování i snižování. (Kazdová, 2022).

# Oblast Jizerský hory



Obrázek 2 Mapa oblasti Jizerských hor

## 5. Metodika

Praktická část bakalářské práce byla zpracována v prostředí Geoinformačních systémů, v aplikaci ArcGIS Pro společnosti ESRI.

### 5.1 Vstupní data

Vstupní data pro analytickou část Bakalářské práce byla vstřícně poskytnuta vedoucím práce. Následně byl proveden detailní popis těchto dat. Konkrétně se jedná o tři digitální modely terénu (MERIT DEM, CEDTM, FABDEM), které detailně mapují povrch zbavený vegetace. Pro účely posouzení jejich přesnosti byly tyto tři testované modely porovnány s referenčním modelem DMR 5G, který lze považovat za nej přesnější model digitální model terénu dostupný pro celou Českou republiku.

### 5.1.1 MERIT DEM

MERIT DEM představuje výškové hodnoty terénu s rozlišením 3 úhlových vteřin (~90 m na rovníku) a pokrývá pevninské plochy mezi 90° severní šířky a 60° jižní šířky, odkazované na geoid EGM96.

DEM snímáné z vesmíru (spaceborn laser scans) jsou základním vstupem pro mnoho geovědních studií, ale stále obsahují nezanedbatelné chyby ve výšce. MERIT DEM s vysokou přesností byl vytvořen odstraněním hlavních složek chyb z existujících datových sad DEM (NASA SRTM3 DEM, JAXA AW3D DEM, DEM od Viewfinder Panoramas) pomocí filtračních technik. Po odstranění chyb se zvýšila plocha pevninských oblastí s mapovanou vertikální přesností max. do 2 metrů z 39 % na 58 % (Yamazaki, 2017).

MERIT DEM lze označit za model, který je blíže DTM než jiné globální DEM. Přesto jej ale nelze považovat 100% za DTM, protože dosud nedošlo k vynětí budov z tohoto modelu v celosvětovém měřítku (Hawker, 2022).

### 5.1.2 CEDTM

Digitální model terénu pro kontinentální Evropu je založen na třech veřejně dostupných digitálních modelech povrchu. Z nich byl pomocí souboru modelů strojového učení (EML) nasimulován model nejpravděpodobnějších výšek terénu, tedy holé země. Tento model poskytuje pokrytí většiny Evropy a nabízí rozlišení 30x30 metrů (Hengl, 2020).

### 5.1.3 FABDEM

Digitální model reliéfu Copernicus nazývaný FABDEM (Forest and Buildings Removed Copernicus Digital Elevation Model), který byl vyvinut s odstraněním lesů a budov, představuje první globální datový model s rozlišením 30 metrů, založený na strojovém učení a dostupný pro veřejnost. Tento model simuluje povrch bez vegetace a budov (Marsh, 2023), (Hawker, 2022).

Vizuální analýza provedená pomocí elevačních profilů a metrik chyb potvrzuje úspěšné snížení zkreslení FABDEM způsobeného urbanizací a lesy, alespoň do určité míry ve srovnání se základním DEM. Algoritmus odstranění lesů v modelu FABDEM úspěšně snižuje výšky korun na polovinu původních hodnot. Chybové



metriky ukazují průměrnou absolutní chybu (MAE) přibližně 14, 10 a 3 metry na testovaných lokalitách v různých typech terénu (Dandabathula, 2023).

#### 5.1.4 DMR 5G

DMR 5G, čili Digitální model reliéfu 5. generace pro Českou republiku, vytváří digitální záznam o povrchu Země s detailními informacemi o výškách a topografii. Jeho unikátnost spočívá v reprezentaci výškových hodnot v nepravidelné triangulační síti (TIN) s X, Y a H souřadnicemi, kde H označuje nadmořskou výšku v systému Balt po vyrovnání (Bpv). Tato reprezentace nabízí precizní informace s celkovou střední chybou výšky 0,18 m v otevřeném terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Proto jej lze považovat za nejpřesnější zdroj výškopisných dat, který je dostupný pro celé území ČR.

Tento model slouží jako klíčový nástroj pro analýzu terénních podmínek, zejména při plánování pozemkových úprav, návrhu dopravních a vodohospodářských staveb a při modelování přírodních jevů. Jeho výšková data jsou klíčovým zdrojem pro vytváření vrstevnic, což umožňuje podrobné mapování a počítačovou vizualizaci reliéfu s vysokým stupněm detailu.

Průběžná aktualizace DMR 5G je prováděna Zeměměřickým úřadem v rámci celkové modernizace Základní báze geografických dat České republiky. Tento proces zahrnuje digitální stereofotogrammetrii a letecké laserové skenování, což zajišťuje aktuálnost a přesnost informací o výškách terénu, včetně oblastí, kde probíhá změna v krajině (Brázdil, 2019) (Geoportál: ČÚZK, 2023). V současné době se již připravuje 6. generace této datové sady.

S přihlédnutím k tomu, že zkoumané digitální modely terénu jsou zaměřeny na mapování povrchu zbaveného vegetace, budov a dalších artefaktů (DTM), se zájem soustředí nejen na celkovou chybu těchto modelů, ale také na specifickou chybovost v různých typech prostředí. Proto si tato práce klade za cíl také zjištění, jak se chyba testovaných DTM projevuje (1) v lesnatých oblastech, (2) v urbanizovaných oblastech a (3) ve všech ostatních typech krajiny, jako jsou holé terény, travní porosty, orná půda a vodní plochy. Pro účely vymezení těchto tří kategorií využití a pokryvu území (land-use a land-cover) byl využit dataset CORINE Land Cover (CLC) ve verzi z roku 2018.

### 5.1.5 Corine Land Cover

CLC2018 je součástí datasetů Corine Land Cover (CLC), vytvořených v rámci Služby monitorování země Copernicus, a zobrazuje stav pokrytí země/používání půdy pro rok 2018 v Evropě. Data CLC jsou založena na klasifikaci satelitních snímků od národních týmů zemí EEA a spolupracujících zemí (EEA39), které jsou dále integrovány do souvislé mapy pokrytí povrchu Země na území Evropy. Tato služba poskytuje důležité informace pro implementaci prioritních oblastí Environmentálních akčních programů EU, jako je ochrana ekosystémů, sledování změn klimatu nebo hodnocení vodních zdrojů. CLC je součástí pan-evropského komponentu Služby monitorování země Copernicus, poskytující informace z leteckých pozorovacích systémů a DPZ a monitorování in situ (CORINE Land Cover 2018, 2020).

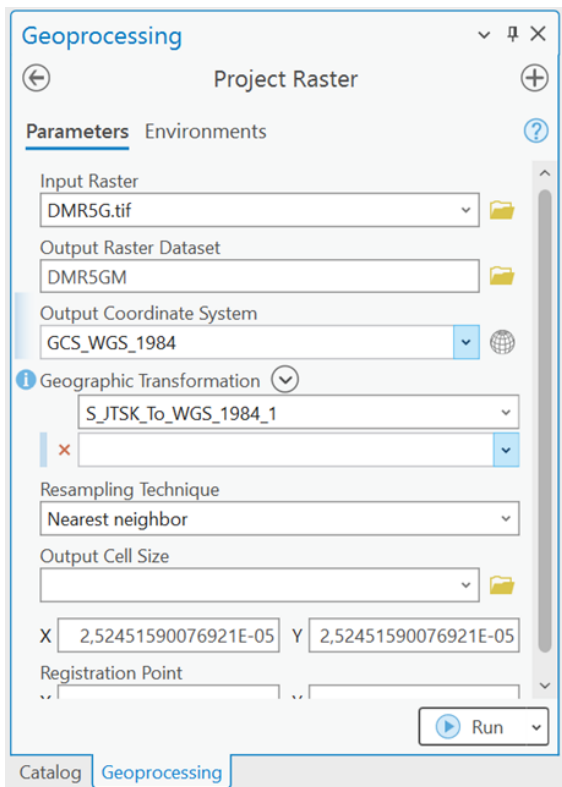
### 5.2. Popis postupu praktické části

Pro účely vzájemného porovnání testovaných DEM s referenčním DMR 5G bylo nutné nejprve sjednotit souřadnicový systém a prostorové rozlišení DMR5G. Vzájemné srovnávání bylo následně prováděno pro tři kategorie land use a land cover. Níže jsou uvedeny funkce, které byly postupně aplikovány v prostředí GIS.

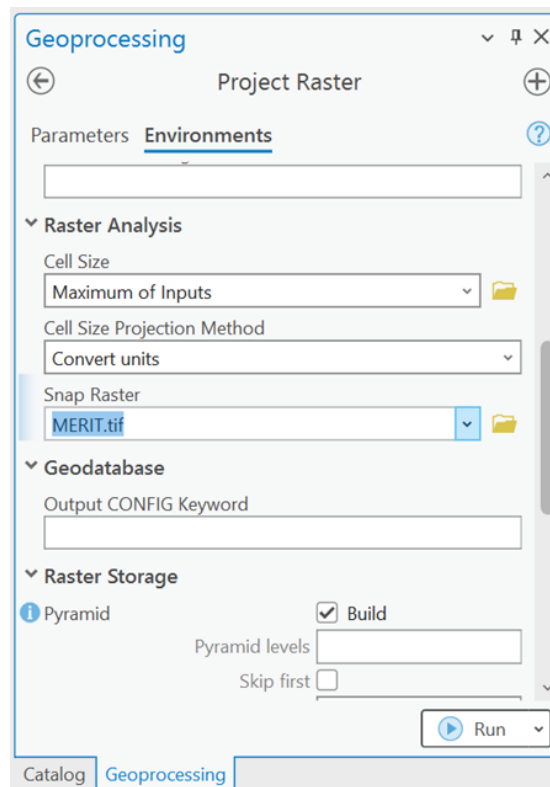
V průběhu metodiky byly systematicky porovnávány dvojice rastrů, kde prvním byl jeden z testovaných digitálních modelů terénu (MERIT DEM / CEDTM / FABDEM) a druhým referenční DMR 5G. Nicméně referenční DMR 5G musel pro každé srovnání projít určitými úpravami: 1) bylo nezbytné provést převod do totožného souřadnicového systému jako testovaný DEM pomocí funkce Project Raster; 2) rozlišení bylo upraveno tak, aby odpovídalo rozlišení testovaného DEM pomocí funkce Resample.

Nastavení funkce *Project Raster* dokumentuje (obrázek č. 3). Vstupem (Input) do této funkce byl referenční raster (DMR 5G). Výsledkem (Output Raster Dataset) pak byl upravený raster DMR 5G s nově nastaveným souřadnicovým systémem shodným s cílovým rasterem (MERIT DEM, FABDEM nebo CEDTM). Tyto výsledné rastry byly nazvány DMR5GM (pro MERIT DEM), DMR5GF (pro FABDEM) a DMR5GC (pro CEDTM). Nový souřadnicový systém se definuje v rámci parametru Output Coordinate System. Dále je potřeba nastavit v prostředí Environmnets (obrázek č. 4), že cílovým souřadnicovým systémem bude ten odpovídající cílovému

rastru a že výsledný raster DMR5GM/F/C se má přichytit k cílovým rastrům (nastavení Snap Raster). Zbylé parametry není nezbytné upravovat, respektive nastaví se automaticky dle cílového rastru.



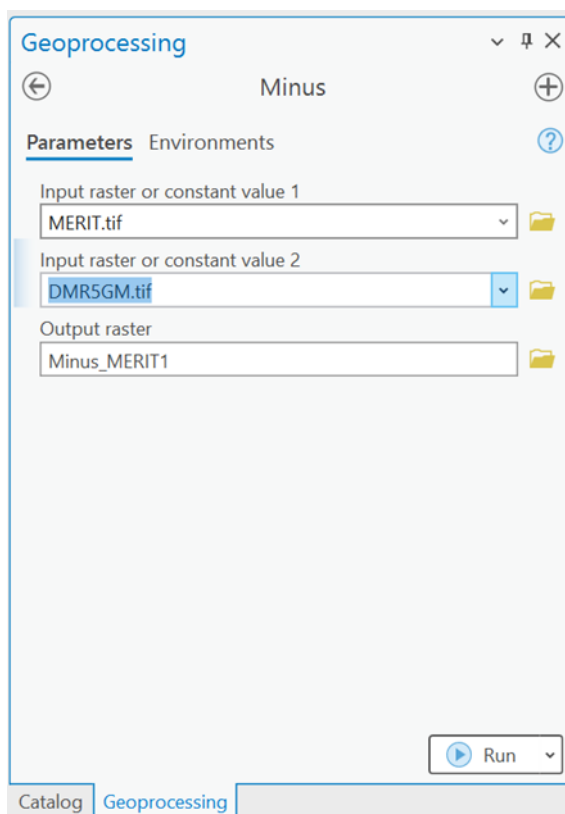
Obrázek 3 funkce Project Raster



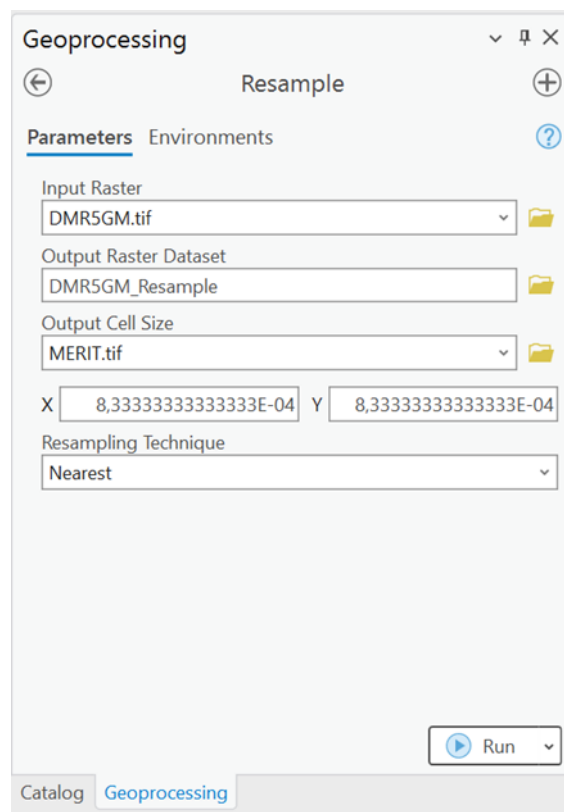
Obrázek 4 funkce Project Raster (Environmnets)

Použitím funkce *Resample* bylo upraveno prostorové rozlišení (tj. velikost pixelů) testovaného DEM (obrázek č. 5). Vstupem byla nově vzniklá data z předchozí funkce (DMR5GM, DMR5GF nebo DMR5GC). Nastavení rozlišení bylo provedeno dle cílových rasterů (MERIT, FABDM nebo CEDTM). Zbývající parametry byly nastaveny automaticky. Výsledné rastry byly nazvány DMR5GM\_Resample, DMR5GF\_Resample, DMR5GC\_Resample.

Klíčová byla aplikace funkce *Minus*. Pomocí funkce *Minus* byl získán pro každý pixel rozdíl nadmořských výšek mezi testovaným a referenčním rasterem DMR (obrázek č. 6). Cílový raster (MERIT, FABDM nebo CEDTM) byl využit jako první vstupní argument do funkce *Minus*. Jako druhý argument byl zadán příslušný referenční digitální model reliéfu (DMR5GM, DMR5GF nebo DMR5GC). Výsledkem byly nové hodnoty, které reprezentují rozdíly v nadmořských výškách mezi jednotlivými testovanými DEM a referenčním modelem, s názvy *Minus\_MERIT1.*, *Minus\_FABDEM1.*, *Minus\_CEDTM1.*



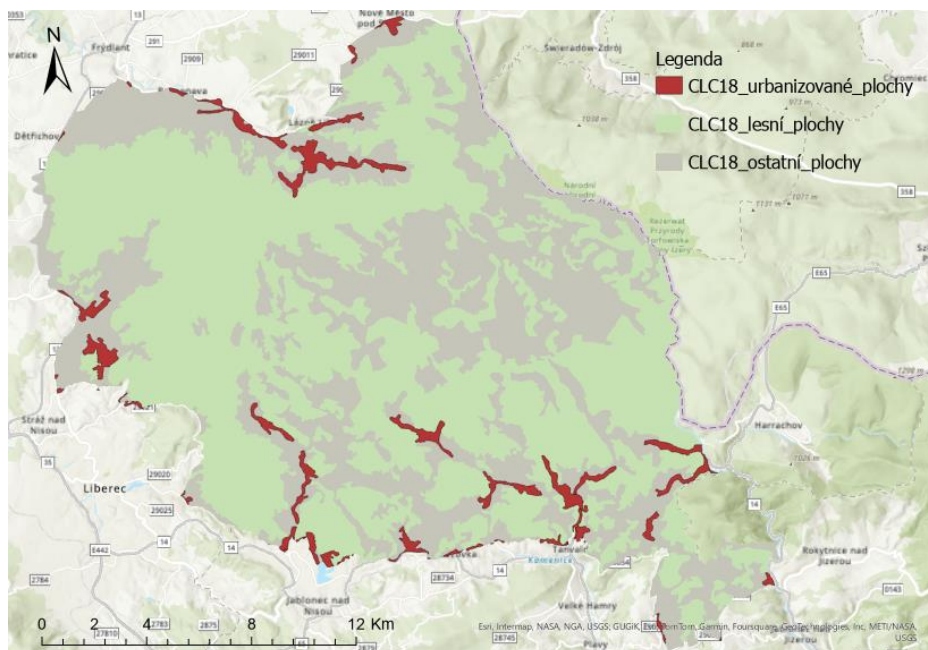
Obrázek 6 funkce Resample



Obrázek 5 funkce Minus

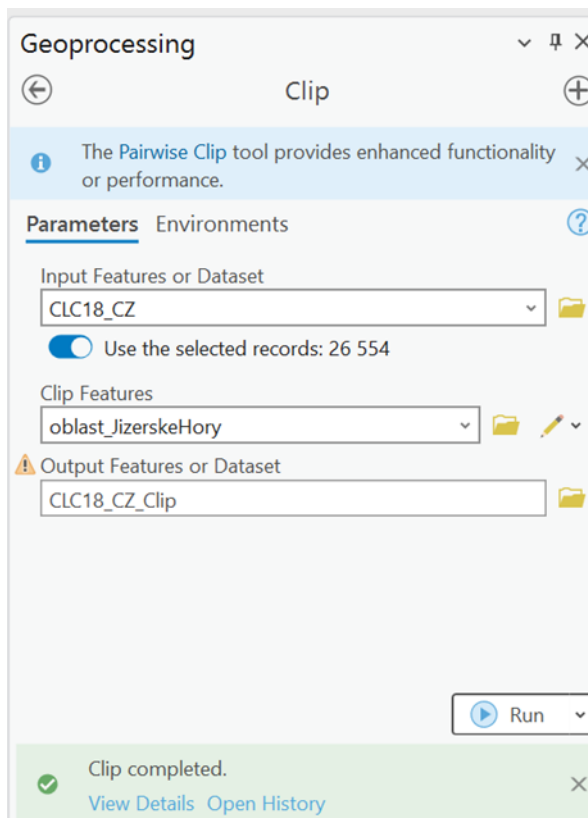
Použitím funkce *Clip* (obrázek č. 8) byla oříznuta vstupní vrstva CLC18\_CZ, pokrývající celé ČR, do polygonu vymezení zájmové území (oblast Jizerské Hory). Nově vzniklá vrstva byla nazvána CLC18\_CZ\_Clip, která obsahuje data CLC pouze v požadované oblasti.

Nastavením funkce *Select by Attribute* byly následně vyexportovány tři kategorie (Urbanizované a technizované areály, lesní areály a ostatní areály) podle legendy CORINE land cover do tří samostatných vrstev: CLC18\_CZ\_1, CLC18\_CZ\_les, CLC18\_CZ\_ostatní (obrázek č. 7).

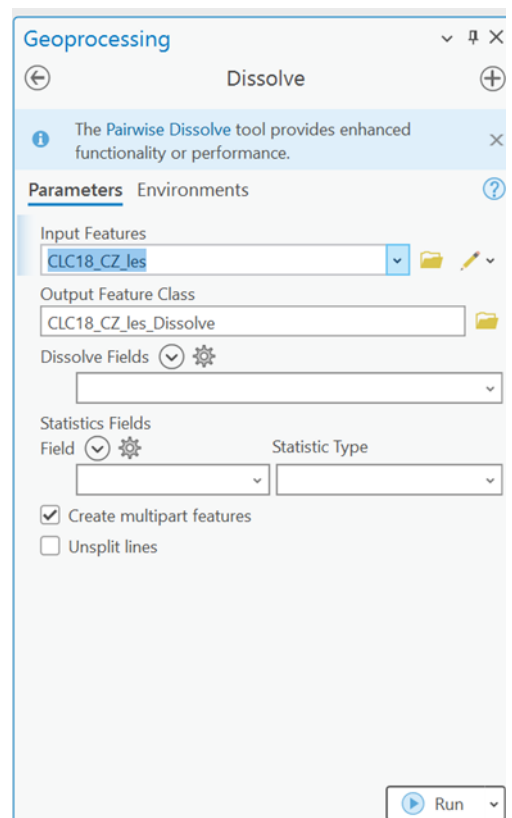


Obrázek 7 Mapa oblasti Jezerských hor (se 3 kategoriemi: urbanizované, lesní a ostatní plochy)

Pomocí funkce *Dissolve* (Obrázek č. 9) byly všechny polygony stejné kategorie spojeny do jednoho prvku, což je výhodné pro následnou aplikaci funkce *Zonal Statistics as Table*. Výstup z funkce *Select by Attribute* byl využit jako vstupní hodnota, výstupem z funkce *Dissolve* jsou tři upravené vrstvy CLC: CLC18\_CZ\_les\_Dissolve pro lesní plochy, CLC18\_CZ\_1\_Dissolve pro urbanizované a technické areály a CLC18\_CZ\_ostatní\_Dissolve pro ostatní kategorie land use a land cover.



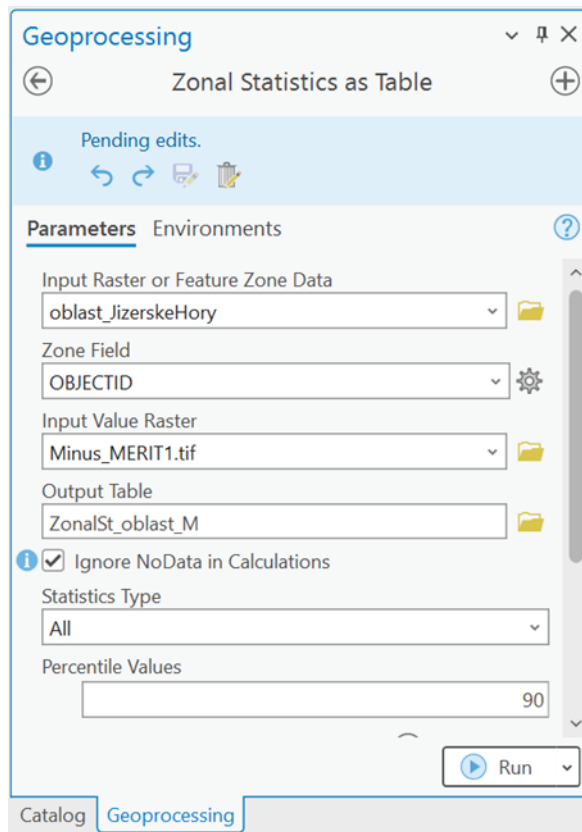
Obrázek 8 funkce Clip



Obrázek 9 funkce Dissolve

Následně použitím funkce *Zonal statistics as table* (Obrázek č. 10) byl zpracován výpočet ukazatelů popisné statistiky. Tato funkce byla provedena pro všechny kombinace tří variant rozdílů mezi testovanými DEM a referenčním DMR, 3 varianty land use a land cover (lesní oblasti, urbanizované plochy, ostatní plochy) a také pro celou oblast Jizerských hor.

Vstupním datovým souborem pro parametr Zone Data byl polygon vymežující analyzovanou oblast, tj. polygon Jizerských hor (oblast\_JizerskeHory) nebo nově vzniklé polygony land use a land cover (CLC18\_CZ\_les\_Dissolve, CLC18\_CZ\_1\_Dissolve, CLC18\_CZ\_ostatni\_Dissolve). Jako Value Raster byly vloženy rastery rozdílů nadmořských výšek (Minus\_MERIT 1., Minus\_FABDEM1., Minus\_CEDTM1). Takto byly vypočteny základní ukazatele popisné statistiky, které byly programem automaticky zapsány do příslušných atributových tabulek.



Obrázek 8 funkce Zonal statistics as table

Celkem bylo vytvořeno 12 tabulek, z nichž každá obsahuje specifické ukazatele popisné statistiky pro danou kombinaci analýzy. Výsledné tabulky byly nazvány podle dané kombinace vstupního rastru a land use. Například tabulka ZonalSt\_oblast\_M obsahuje statistiky pro oblast Jizerských hor a model MERIT1., zatímco tabulka ZonalSt\_CLC18\_lesF obsahuje statistiky pro lesní oblasti Jizerských hor a model FABDEM1.

Na základě údajů z předešlé funkce Zonal Statistics as Table byly na závěr vyhodnoceny pro každou variantu srovnání ještě dvě chybová kritéria RMSE a ME, a to podle rovnic uvedených v závěru kapitoly 3 Literární rešerše.

## 6. Výsledky práce

Tato část bakalářské práce popisuje výsledky praktického výzkumu, který je prezentován prostřednictvím tabulek, map a grafů. Výsledky jsou popsány jak pro celou oblast Jizerských hor, tak i pro konkrétní kategorie land use a land cover.

### 6.1 Výsledky z výpočtu ukazatelů popisné statistiky

Níže uvedené tabulky (tab. č. 1, 2, 3, 4) reprezentují ukazatele popisné statistiky vyhodnocené pro rozdíly výšek (tj. odchylky) mezi posuzovanými modely MERIT/FABDEM/CEDTM a referenčním DMR5G, a to pro vybrané kategorie land use a land cover. Tabulky obsahují důležité údaje pro analýzu, jako jsou maximální a minimální hodnoty, rozpětí, střední hodnoty a směrodatné odchylky porovnávaných DEM. Na základě těchto údajů lze snadno porovnávat data mezi sebou a poskytnout hodnocení.

Tabulka 1 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro lesní oblasti

LESNÍ PLOCHY	Minimum (m)	Maximum (m)	Rozpětí (m)	Střední hodnota (m)	Směrodatná odchylka (m)
MERIT vs. DMR 5G	-28,34	28,93	57,27	1,63	6,20
FABDEM vs. DMR 5G	-55,47	33,56	89,03	-4,28	7,07
CEDTM vs. DMR 5G	-45,18	27,49	72,67	-3,03	5,63

Tabulka 2 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro urbanizované oblasti

URBANIZOVANÉ PLOCHY	Minimum (m)	Maximum (m)	Rozpětí (m)	Střední hodnota (m)	Směrodatná odchylka (m)
MERIT vs. DMR 5G	-13,56	23,25	36,81	1,46	3,74
FABDEM vs. DMR 5G	-36,44	20,48	56,92	-0,61	3,43
CEDTM vs. DMR 5G	-16,95	19,96	36,92	0,21	2,55



Tabulka 3 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro ostatní oblasti

OSTATNÍ PLOCHY	Minimum (m)	Maximum (m)	Rozpětí (m)	Střední hodnota (m)	Směrodatná odchylka (m)
MERIT vs. DMR 5G	-20,09	20,90	40,99	-0,25	3,85
FABDEM vs. DMR 5G	-27,47	25,98	53,46	-3,70	4,84
CEDTM vs. DMR 5G	-25,01	21,22	46,22	-2,54	2,99

Tabulka 4 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro celé území Jizerských hor

CELÉ ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	Minimum (m)	Maximum (m)	Rozpětí (m)	Střední hodnota (m)	Směrodatná odchylka (m)
MERIT vs. DMR 5G	-28,34	28,93	57,27	0,90	5,42
FABDEM vs. DMR 5G	-55,47	33,56	89,03	-3,95	6,24
CEDTM vs. DMR 5G	-45,18	27,49	72,67	-2,74	4,74

Na první pohled je patrné, že podle minimálních a maximálních údajů v tabulkách vidíme maximální rozpětí u modelu FABDEM (od -55,47 m do 33,56 m pro celé území Jizerských hor – viz tabulka č. 4) a minimální u modelu MERIT (od -28,34 m do 28,93 m pro celé území). Z toho lze usuzovat, že model MERIT má odchylky od referenčního DMR5G nejmenší. Rovněž střední hodnoty odchylek (tj. střední chyba, ME) toto zjištění potvrzují: MERIT má střední střední chybu nejbližší 0 m, zatímco CEDTM ji má téměř -3 m a FABDEM dokonce -4 m. Oba posledně jmenované modely tak výšky na území Jizerských hor z větší míry podhodnocují, což znamená, že ukazují povrch níže, než se vyskytuje reálný povrch podle referenčního modelu DMR5G. Model MERIT výšky mírně nadhodnocuje.

V lesních oblastech (tabulka č. 1) vykazoval model MERIT rovněž menší rozpětí odchylek než modely FABDEM a CEDTM. To naznačuje, že MERIT má větší přesnost při reprodukci údajů o nadmořské výšce v zalesněných oblastech. Model FABDEM vykazuje nejvyšší rozpětí i směrodatnou odchylku, což vypovídá o nejmenší přesnosti ze všech testovaných modelů terénu v zalesněných oblastech. Dle střední

chyby výšek ve srovnání s referenčními hodnotami i zde platí, že modely FABDEM (ME = -4,28 m) a CEDTM (ME = -3,03 m) výšky v lesních oblastech většinou podhodnocují, zatímco model MERIT je mírně nadhodnocuje a jeví se podle tohoto kritéria jako nejpřesnější (ME = 1,63 m).

V urbanizovaných oblastech (tabulka č. 2) je situace odlišná: nejmenší rozpětí odchylek opět vykazoval model MERIT, přestože model CEDTM také vykazuje podobné hodnoty a model FABDEM vykazoval v urbanizovaných oblastech největší rozpětí. Nicméně z pohledu střední chyby vykazuje nejmenší hodnotu model CEDTM (ME = 0,21 m), následuje FABDEM (ME = -0,61 m) a MERIT se jeví jako nejméně přesný (ME = 1,46 m). MERIT opět výšky nadhodnocuje, FABDEM je podhodnocuje. Celkově vzato, na území urbanizovaných ploch vykazují všechny posuzované modely největší přesnosti.

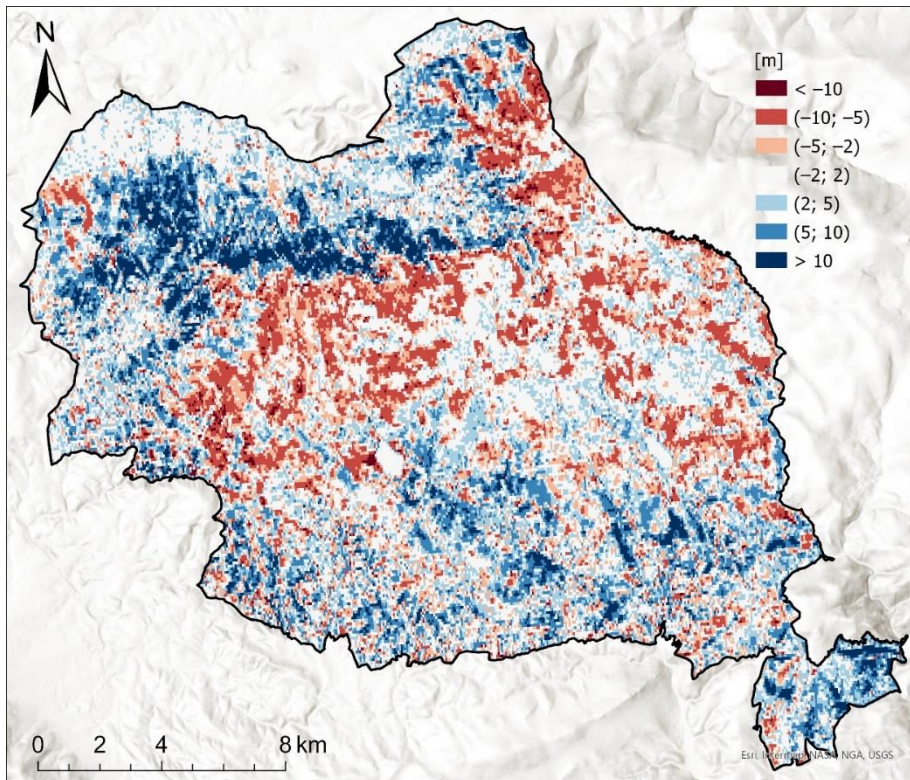
V ostatních typech land use a land cover (tabulka č. 3) vykazoval model MERIT opět nejmenší rozpětí odchylek ve srovnání s ostatními modely, ale i přes to zde všechny tři posuzované modely vykazují poměrně podobné odchylky od referenčního modelu. Model MERIT si vede nejlépe ale také podle střední chyby (ME = -0,25 m).

Dle výše uvedených výsledků lze obecně říci, že model MERIT je nejpřesnější ze studovaných terénních modelů v regionu Jizerských hor, zejména v zalesněných oblastech, zatímco pro urbanizované plochy a ostatní plochy má poměrně velkou přesnost také model Continental Europe DEM. Naproti tomu model FABDEM vykazuje nejvyšší střední chybu, což znamená, že je méně přesný při reprodukci dat o nadmořské výšce.

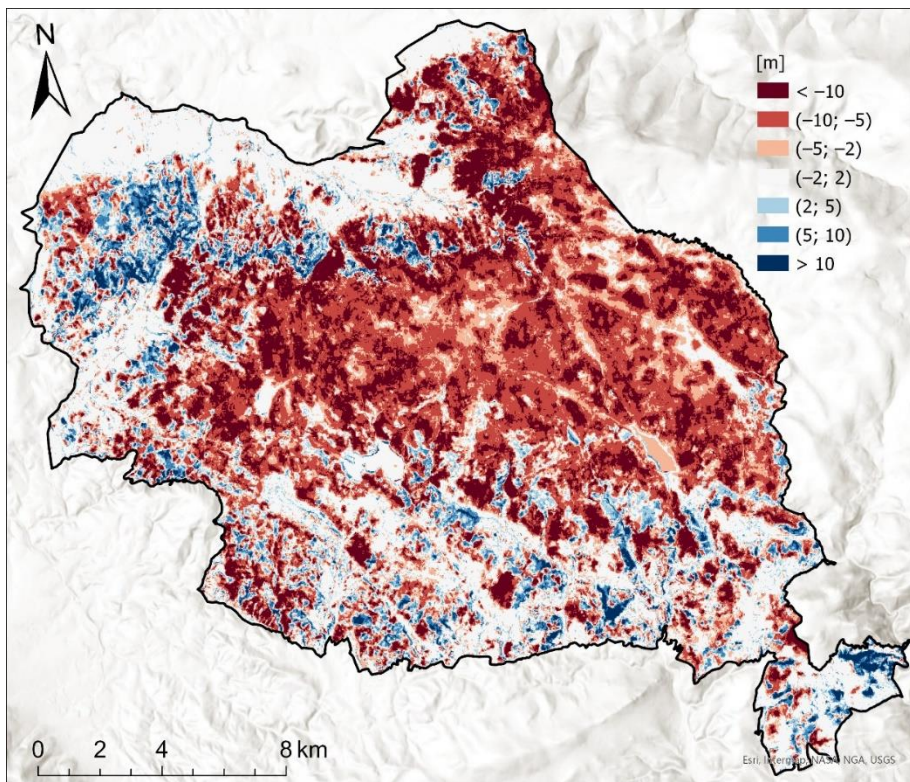
## 6.2 Výsledky výškových rozdílů prostřednictvím map a grafů

V následující sekci bakalářské práce jsou prezentovány výsledky z praktického výzkumu, které zahrnují detailní analýzu map a histogramů.

Níže uvedené mapy (obrázek č. 11, 12 a 13) a krabicové grafy (obrázky č. 14, 15 a 16), které reprezentují odchylky výšek posuzovaných modelů terénu od referenčního modelu pro zájmovou oblast Jizerských hor.

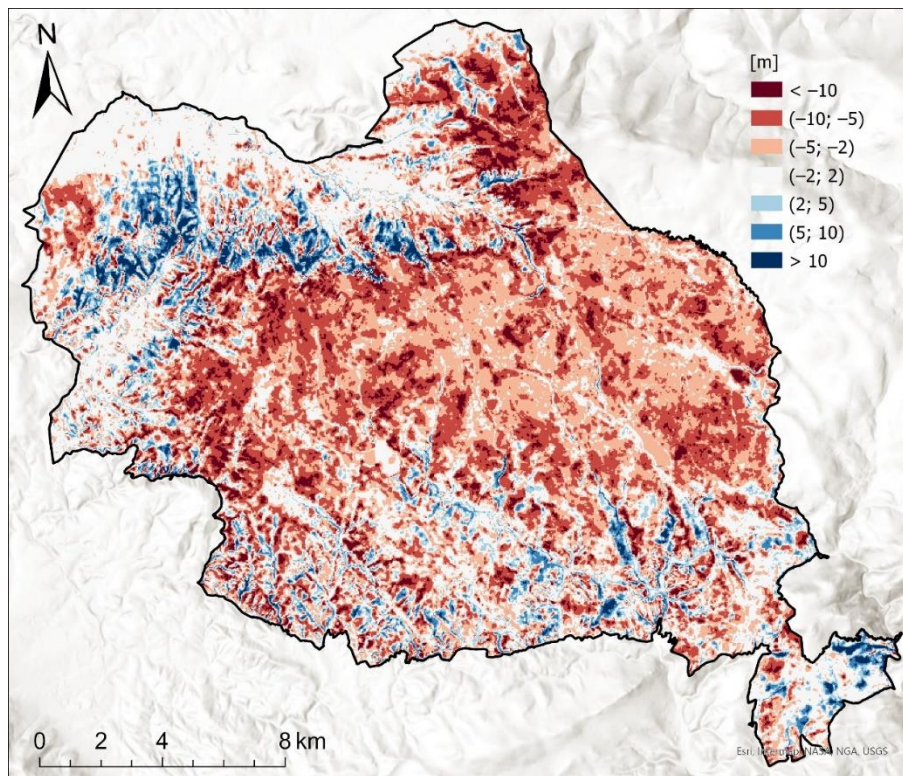


Obrázek 9 Mapa odchylek výšek modelu MERIT od referenčního modelu DMR5G



Obrázek 10 Mapa odchylek výšek modelu FABDEM od referenčního modelu DMR5G





Obrázek 11 Mapa odchylek výšek modelu CEDTM od referenčního modelu DMR5G

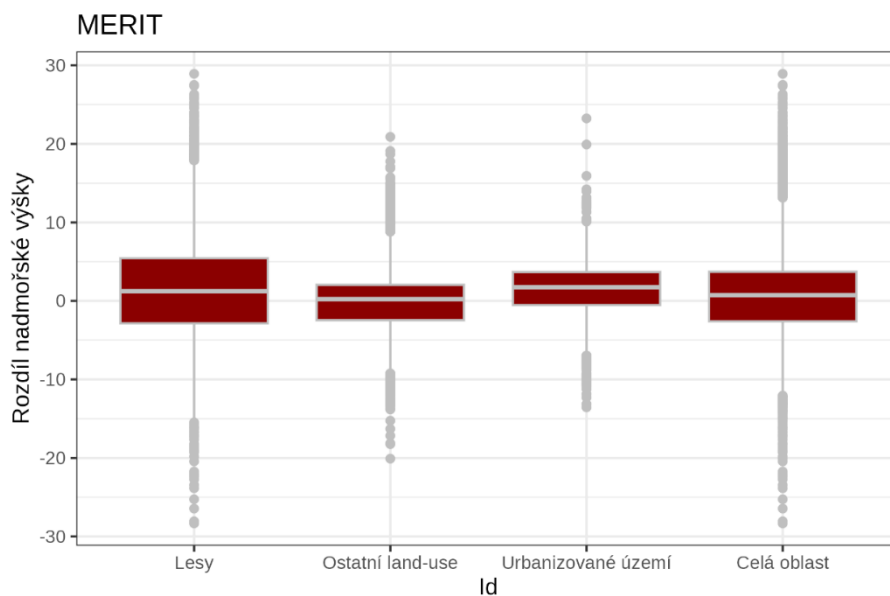
Mapy představují výsledky srovnání testovaných DEM s referenčním, výstup funkce Minus. Zobrazované hodnoty jsou tedy výsledné rozdíly mezi povrchem terénu dle testovaného DEM a reálným povrchem terénu dle DMR. Hodnoty na mapách jsou uvedeny v metrech.

Když se hodnoty na mapách zobrazují jako záporné, znamená to, že povrch terénu podle testovaného DEM je podhodnocený, což je zobrazeno červenou barvou. Naopak, když jsou hodnoty kladné, znamená to, že povrch terénu podle testovaného DEM je nadhodnocený, což je zobrazeno modrou barvou. Bílá barva symbolizuje minimální rozdíly mezi oběma modely.

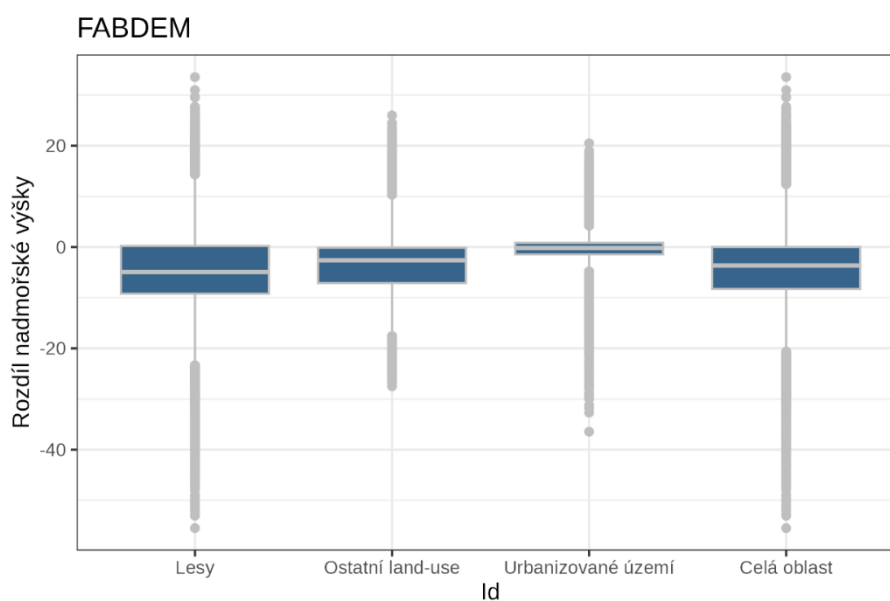
Lze analyzovat, kde se vyskytují největší a nejmenší rozdíly mezi testovanými DEM a referenčním DEM. Největší rozdíly se nacházejí v lesních oblastech, může to naznačovat, že testované DEM nedokážou přesně modelovat výškové profily pod lesním porostem (vegetace).

Při srovnání obrázků 11 (model MERIT), 12 (model FABDEM) a 13 (model CEDTM) je zřejmé, že model MERIT má největší zastoupení modrých odstínů, tedy ze všech tří modelů nejvíce nadhodnocuje terén. Naopak model FABDEM terén nejvíce podhodnocuje, což je patrné z největšího zastoupení lokalit s nejsytějšími odstíny červené.

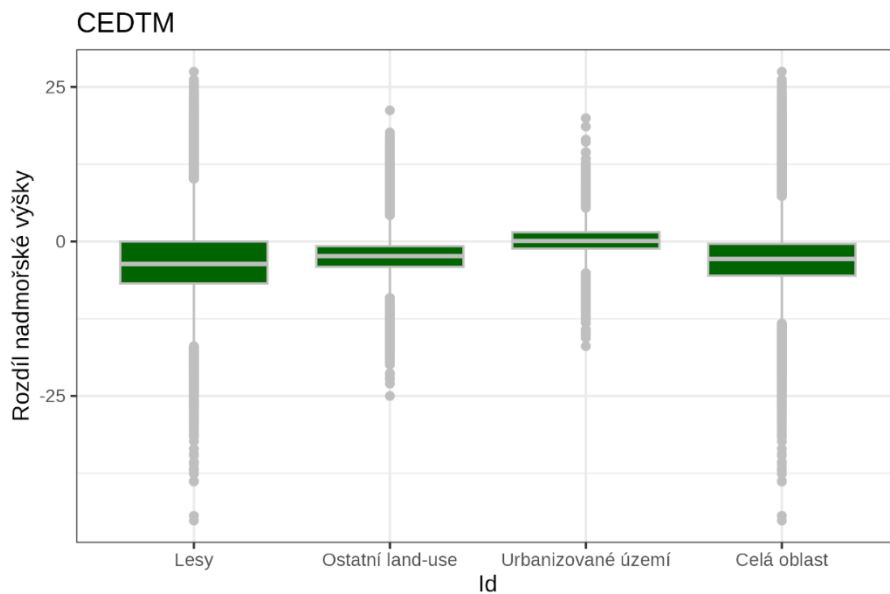
Dále jsou zobrazeny grafy ve formě krabicových grafů (obrázky č. 14, 15, 16), které ukazují odchylky v nadmořských výškách pro každý z analyzovaných DEM a také rozdíly mezi jednotlivými land use.



Obrázek 12 Krabicový graf odchylek výšek modelu MERIT od referenčního modelu DMR5G



Obrázek 13 Krabicový graf odchylek nadmořských výšek modelu FABDEM od referenčního modelu DMR5G



Obrázek 14 Krabicové grafy odchylek nadmořských výšek modelu CEDTM od referenčního modelu DMR5G

Zobrazené krabicové grafy pomáhají ještě lépe pochopit DEM z hlediska toho, zda testovaný model terénu výšky podhodnocuje nebo nadhodnocuje a v jakém rozpětí se odchylky pohybují.

Lze pozorovat, že modely FABDEM a CEDTM podhodnocují výsledky pro lesní, ostatní plochy a celé zájmové území, zatímco pro urbanizované plochy jsou odchylky prakticky nulové. Naproti tomu model MERIT povrch terénu větší míry nadhodnocuje, což je více patrné v lesních a urbanizovaných oblastech, zatímco u ostatních kategorií land use a také v rámci hodnocení celé zájmové oblasti odchylky modelu MERIT směřují k nulovým hodnotám.

Přestože dle střední chyby odchylek by se dal jako nejpřesnější považovat model MERIT, krabicový graf na obrázku č. 14 dokládá, že celkově tento model, ale vykazuje největší rozptyly odchylek ve srovnání s ostatními modely, což je potřeba brát v úvahu.

### 6.3 Výsledky podle RMSE a ME

Níže uvedené tabulky (tab. č. 5, 6) ukazují odmocninu střední kvadratické chyby (RMSE) a rovněž rekapitulují střední chybu (ME) studovaných DEM.

Střední chyba (mean error, ME), jak již bylo zmíněno, poskytuje přehled o přesnosti modelu - čím je ME blíže nule, tím je model přesnější. Navíc poskytují informaci o tom, zda model výšky podhodnocuje nebo nadhodnocuje. Nevýhodou

tohoto kritéria je skutečnost, že záporné a kladné odchylky se mohou vzájemně anulovat. Proto je hodnocení kvality posuzovaných modelů doplněno ještě odmocninou střední kvadratické chyby (RMSE), která vyjadřuje celkový rozptyl mezi odhadnutými a skutečnými hodnotami. Nižší hodnota RMSE znamená vyšší přesnost modelu. Kladné a záporné odchylky se u tohoto kritéria neanulují, ale na druhou stranu toto kritérium zase neposkytuje informaci o celkovém podhodnocení či nadhodnocení testovaných výšek terénu. Obě kritéria je proto nutné posuzovat komplexně.

Tabulka 5 Odmocnina střední kvadratické chyby

Odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE) [m]	MERIT	FABDEM	CEDTM
lesní plochy	6,41	8,26	6,40
urbanizované plochy	4,01	3,48	2,56
ostaní land-use	3,85	6,09	3,93
celé zájmové území	5,50	7,39	5,48

Tabulka 6 Střední chyba

Střední chyba (ME) [m]	MERIT	FABDEM	CEDTM
lesní plochy	1,63	-4,28	-3,03
urbanizované plochy	1,46	-0,61	0,21
ostaní land-use	-0,25	-3,70	-2,54
celé zájmové území	0,90	-3,95	-2,74

V analýze DEM ve vybrané oblasti bylo zjištěno, že nejnižší hodnotu RMSE pro celou studovanou oblast Jizerských hor dosahuje model CEDTM (RMSE = 5,48 m), těsně následovaný modelem MERIT (RMSE = 5,50 m). Model FABDEM s hodnotou RMSE = 7,39 m zaostává. Model CEDTM se tak jeví jako nejpřesnější.

Model CEDTM dosahuje průřezově nejlepších výsledků s nejnižší hodnotou RMSE také pro skoro všechny typy ploch land use a land cover, tj. pro lesní a urbanizované plochy. Například, pro lesní plochy má MERIT RMSE = 6,41 m, FABDEM 8,26 m, zatímco CEDTM má RMSE = 6,40 m. Nicméně model MERIT těsně následuje a v rámci oblastí s ostaním land use a land cover dosahuje jeho RMSE dokonce nejnižší hodnotou: 3,85 m.

Dle měřítka ME dosahuje nejlepších výsledků model MERIT, jak již bylo zmíněno výše. MERIT zde má hodnoty blíže nule pro lesní plochy, ostaní land-use i celé zájmové území. Model CEDTM dosahuje hodnoty ME blíže nule pro

urbanizované plochy. Naopak, model FABDEM vykazuje nejhorší RMSE a ME pro všechny typy ploch.

Tyto výsledky jednoznačně ukazují na větší přesnost a spolehlivost CEDTM a MERIT ve srovnání s modelem FABDEM.

Výsledky naznačují, že modely MERIT DEM a Continental Europe DEM jsou vhodnější pro aplikace, které vyžadují vyšší přesnost prostorových dat, zejména v lesních oblastech.

## 7. Diskuze

Při porovnání výsledků v kapitole 5. byly uvedeny tabulky RMSE a ME, pro jednodušší orientaci byly zpracovány tabulky (tab. č. 7) s bodovým hodnocením každého modelu, které jsou uvedeny níže.

*Tabulka 7 Bodové hodnocení dle RMSE a ME*

<b>Odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE) [m]</b>	MERIT	FABDEM	CEDTM
lesní plochy	1	0	2
urbanizované plochy	0	1	2
ostatní land-use	2	0	1
celé zájmové území	1	0	2

<b>Střední chyba (ME) [m]</b>	MERIT	FABDEM	CEDTM
lesní plochy	2	0	1
urbanizované plochy	0	1	2
ostatní land-use	2	0	1
celé zájmové území	2	0	1

Bodové hodnocení je přiděleno na základě relativních výsledků, kde nižší hodnota RMSE a nejbližší nule hodnota ME získává více bodů, což naznačuje lepší přesnost modelu (0 = nejhorší hodnota, 2 = nejlepší hodnota).

Díky bodovému hodnocení např. lze snadno usoudit, že v případě RMSE tabulky model MERIT se ukazuje jako nejlepší pro land use kategorie ostatních hodnocených ploch, zatímco model CEDTM ukazuje nejlepší výsledky pro lesní a urbanizované plochy a také pro celé zájmové území.



V případě ME tabulky MERIT ukazuje lepší výsledky ve srovnání s ostatními modely v lesních a ostatních oblastech a také v rámci celého zájmového území. Zároveň CEDTM také ukazuje dobré výsledky zejména v urbanizovaných oblastech.

Model FABDEM ve většině případů ukazuje horší výsledky, i když jsou vidět relativně lepší výsledky pro urbanizované oblasti.

Takže pokud sečteme body získané v první tabulce (MERIT = 4; FABDEM = 1; CEDTM = 7), vidíme, že model CEDTM ukazuje jasně nejlepší výsledky napříč všemi hodnocenými kategoriemi land use, zatímco podle druhé tabulky (ME) se ukazuje jako mírně přesnější model MERIT (MERIT = 6; FABDEM = 1; CEDTM = 5). Celkové skóre pro každý model lze vypočítat součtem bodů z obou kritérií: MERIT = 10; FABDEM = 2; CEDTM = 12. Celkově tedy model CEDTM ukazuje největší přesnost, poměrně těsně následovaný modelem MERIT.

Jedním z možných důvodů pro nižší přesnost modelu FABDEM může být kvalita vstupních dat použitých k jeho vytvoření. Rozdíly v přesnosti modelů také mohou být ovlivněny topografickými charakteristikami zkoumané oblasti. Například hustota lesního porostu nebo složitost terénu mohou mít vliv na schopnost modelů přesně reprodukovat nadmořské výšky.

Pro porovnání a vyhodnocení výsledků získaných v rámci této bakalářské práce lze zvážit publikaci autorského týmu Borgohain et al. (2023), kteří srovnávali modely MERIT a FABDEM prostřednictvím geomorfologických parametrů odvozených z těchto modelů. Výsledkem této studie bylo pozorování, že MERIT DEM poskytoval ve srovnání s FABDEM lepší výsledky, pokud jde o vymezení odtokových linií a morfometrické analýzy povodí. Tyto závěry plně korespondují s výsledky této bakalářské práce.

K podobným závěrům dospěli i Saberi et al. (2023), kteří ve své práci provedli srovnání přesnosti modelů SRTM, ASTER, FABDEM a MERIT DEM v rámci případové studie v Íránu. Výsledky studie ukazují, že průměrná absolutní chyba (MAE) pro FABDEM je 4,28 m, zatímco pro MERIT je 3,87 m. Tímto způsobem tyto závěry potvrzují, že model MERIT je i v těchto podmínkách přesnější než model FABDEM.

Nicméně v publikované práci Osama et al. (2023) došli k závěru, že drobná vylepšení FABDEM z tohoto modelu dělají nejlépe filtrovaný digitální model terénu z hlediska reprezentace nadmořských výšek v různých typech krajinného pokryvu.

Je důležité si uvědomit, že hodnocení přesnosti digitálních modelů reliéfu není zcela jednoznačné. Srovnání modelů je potřeba provádět komplexně, a to zohledněním více chybových kritérií a metrik. Dále je důležité si uvědomit, že různé digitální modely terénu mohou být vhodné pro odlišné účely. Například modely s nižší

přesností mohou být akceptovatelné pro hrubší analýzy nebo pro aplikace, které nevyžadují vysokou úroveň detailů. Na druhou stranu, pro aplikace vyžadující vyšší přesnost a detailnost by bylo vhodnější zvolit model s lepší vyhodnocenou přesností.

Také je důležité brát v úvahu, že každý model může mít své silné a slabé stránky v závislosti na charakteristikách terénu a typu aplikace. Proto je nezbytné pečlivě zvážit účel, pro který daný digitální model terénu bude použit, a provést podrobné zhodnocení jeho vhodnosti a přesnosti v daném kontextu.

## 8. Závěr

V rámci této bakalářské práce bylo provedeno srovnání přesnosti vybraných globálních digitálních modelů terénu na území Jizerských hor s cílem identifikovat nejvhodnější model výškopisných dat v této oblasti. Posuzovány byly následující tři modely terénu: MERIT DEM, FABDEM a Central Europe DTM. Na základě provedených analýz a porovnání metodiky měření bylo vyvozeno několik klíčových závěrů.

Modely CEDTM a MERIT DEM vykazaly výrazně menší odchylky mezi předpokládanými a skutečnými hodnotami nadmořských výšek než model FABDEM, což naznačuje jejich vyšší přesnost ve sledované oblasti. Model MERIT nadmořské výšky z větší míry mírně nadhodnocuje, zatímco zbylé dva posuzované modely je většinou podhodnocují.

Bylo také zjištěno, že přesnost DEM se liší v závislosti na přítomném land use a land cover: hodnocenými kategoriemi byly primárně lesní oblasti a urbanizované lokality; všechny ostatní kategorie byly sloučeny do třetí posuzované skupiny. Nejmenší přesnost byla u všech modelů dosahována na lesních pozemcích, zatímco nejlepších výsledků modely terénu dosahovaly na urbanizovaných plochách. Tato skutečnost ukazuje na nutnost zohlednění konkrétních podmínek prostředí při výběru a použití DEM.

Výsledky tohoto výzkumu poskytují ucelený pohled na přesnost a kvalitu posuzovaných globálních digitálních modelů terénu na území Jizerských hor. Tyto informace mohou být využity pro lepší porozumění reliéfu regionu a efektivnější využití posuzovaných DEM v geografických a environmentálních studiích. Lze konstatovat, že provedené srovnání poskytuje cenné poznatky pro výběr optimálního modelu terénu pro konkrétní aplikace na území Jizerských hor.

## 9. Seznam zdrojů a použité literatury

Ajvazi, B., & Czimber, K. (2019). A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo. *Geodesy and Cartography*, 45(1), 43-48. <https://doi.org/10.3846/gac.2019.7921>.

ArcGIS Desktop [online], 2016. USA: ESRI [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources>

Barták, V., 2008. Algoritmy pro zpracování digitálních modelů terénu s aplikacemi v hydrologickém modelování. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. (diplomová práce). Dep. SIC ČZU v Praze.

Brázdil, K.: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace DMR 5G [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA\\_ZPRAVA\\_DMR\\_5G.pdf](https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf)

CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly - version 2020\_20u1, May 2020. DOI (raster 100 m): <https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac>

Dandabathula, G., Hari, R., Ghosh, K. et al. Accuracy assessment of digital bare-earth model using ICESat-2 photons: analysis of the FABDEM. *Model. Earth Syst. Environ.* 9, 2677–2694 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01648-4>

Danielson, J.J., and Gesch, D.B., 2011, Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073, 26 p.

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. 2017, ČÚZK. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(isdmslslejuke31kelctuwjij\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(isdmslslejuke31kelctuwjij))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)

El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A. (2005): Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and application. Artech House remote sensing library. Artech House, Inc., Canton Street, Norwood.

European Space Agency, Sinergise (2021). Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography. Dostupné z: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Accessed: 2024-03-15

Guth PL, Van Niekerk A, Grohmann CH, Muller J-P, Hawker L, Florinsky IV, Gesch D, Reuter HI, Herrera-Cruz V, Riazanoff S, et al. Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. *Remote Sensing*. 2021; 13(18):3581. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13183581>

Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>

Hložek, M. Regionální morfologické rozdíly údolní sítě jizerských hor. Diplomová práce. Varnsdorf, 2012.

Intermap Technologies. NEXTMap World 30 Digital Surface Model. Dostupné z: [https://www.intermap.com/hubfs/NEXTMap\\_World30\\_Technical\\_Review\\_web.pdf](https://www.intermap.com/hubfs/NEXTMap_World30_Technical_Review_web.pdf)

Kazdová, B. Terénní vyučování zeměpisu v Jizerských horách. Online, diplomová práce. 2022-12-17T18:52:12Z. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/166459>.

Li, Zhilin, 1990. Sampling Strategy and Accuracy Assessment for Digital Terrain Modelling. Ph.D. Thesis. University of Glasgow

Marsh et al 2023: Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment. Environ. Res. Commun. 5 (3), DOI 10.1088/2515-7620/acc56d

Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. (1991): Digital Elevation Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Ecological Applications. Hydrological Processes 5, s. 3-30.

Mouratidis A, Ampatzidis D. European Digital Elevation Model Validation against Extensive Global Navigation Satellite Systems Data and Comparison with SRTM DEM and ASTER GDEM in Central Macedonia (Greece). ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019; 8(3):108. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijgi8030108>

Osama, N., Shao, Z., & Freeshah, M. (2023). The FABDEM Outperforms the Global DEMs in Representing Bare Terrain Heights. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.

Pacina, J. & Ing. Brejcha, M., 2014. Digitální modely terénu. [Online]. Dostupné z: [http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/28e\\_final\\_tisk.pdf](http://envimod.fzp.ujep.cz/sites/default/files/skripta/28e_final_tisk.pdf)

Polidori L, El Hage M. Digital Elevation Model Quality Assessment Methods: A Critical Review. Remote Sensing. 2020; 12(21):3522. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs12213522>

Potapov, P., X. Li, A. Hernandez-Serna, A. Tyukavina, M.C. Hansen, A. Kommareddy, A. Pickens, S. Turubanova, H. Tang, C.E. Silva, J. Armston, R. Dubayah, J. B. Blair, M. Hofton (2020). Mapping and monitoring global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112165>

Procházková, M., 2016. Přírodovědná a historická charakteristika Jizerských hor. Nature and Historical Characteristics of the Jizera Mountains. Praha.

Saberi, A., Kabolizadeh, M., Rangzan, K., & Abrehdary, M. (2023). Accuracy assessment and improvement of SRTM, ASTER, FABDEM, and MERIT DEMs by polynomial and optimization algorithm: A case study (Khuzestan Province, Iran). Open Geosciences, 15.

Semerák, R. a Hynek, A. Analýza přírody Jizerských hor a její hodnocení pro cestovní ruch. Technická Univerzita v Liberci, 2010. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/2090>.

Singla, P., Duhan, M., Saroha, S. (2022): 10 - Different normalization techniques as data preprocessing for one step ahead forecasting of solar global horizontal irradiance. Pages 209-230, ISBN 9780323903967.

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. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.017>

Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000): Terrain Analysis" Principles and Applications. John Wiley and Sons., 479 s.

Yamazaki, D., D. Ikeshima, R. Tawatari, T. Yamaguchi, F. O'Loughlin, J. C. Neal, C. C. Sampson, S. Kanae, and P. D. Bates (2017), A high-accuracy map of global terrain elevations, Geophys. Res. Lett., 44, 5844–5853, doi: [10.1002/2017GL072874](https://doi.org/10.1002/2017GL072874)

Zhilin Li, Qing Zhu, a Chris Gold, 2005. Digital terrain modeling: principles and methodology. ISBN 0-415-32462-9

## 10. Seznam Obrázků

Obrázek 1 Vzorec pro výpočet RMSE a ME .....	20
Obrázek 2 Mapa oblasti Jizerských hor .....	23
Obrázek 3 funkce Project Raster .....	27
Obrázek 4 funkce Project Raster (Environment) .....	27
Obrázek 5 funkce Resample .....	28
Obrázek 6 funkce Minus.....	28
Obrázek 7 Mapa oblasti Jezerských hor (se 3 kategoriemi: urbanizované, lesní a ostatní plochy).....	29
Obrázek 8 funkce Dissolve .....	30
Obrázek 9 funkce Clip.....	30
Obrázek 10 funkce Zonal statistics as table.....	31
Obrázek 11 Mapa odchylek výšek modelu MERIT od referenčního modelu DMR5G.....	35
Obrázek 12 Mapa odchylek výšek modelu FABDEM od referenčního modelu DMR5G .....	35
Obrázek 13 Mapa odchylek výšek modelu CEDTM od referenčního modelu DMR5G .....	36
Obrázek 14 Krabicový graf odchylek výšek modelu MERIT od referenčního modelu DMR5G .....	37
Obrázek 15 Krabicový graf odchylek nadmořských výšek modelu FABDEM od referenčního modelu DMR5G.....	37
Obrázek 16 Krabicové grafy odchylek nadmořských výšek modelu CEDTM od referenčního modelu DMR5G.....	38
Tabulka 1 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro lesní oblasti .....	32
Tabulka 2 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro urbanizované oblasti .....	32

Tabulka 3 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro ostatní oblasti.....	33
Tabulka 4 Rozdíly výšek MERIT/FABDEM/CEDTM a DMR5G pro celé území Jizerských hor ..	33
Tabulka 5 Odmocnina střední kvadratické chyby.....	39
Tabulka 6 Střední chyba .....	39
Tabulka 7 Bodové hodnocení dle RMSE a ME.....	40