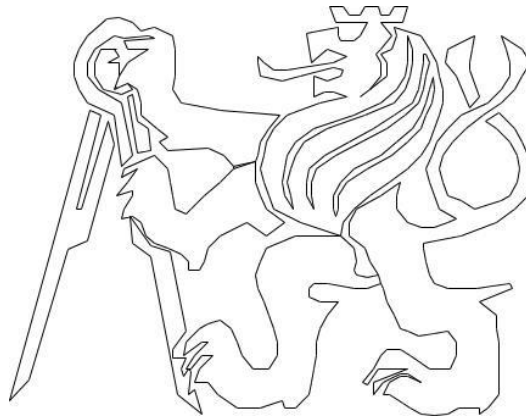


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v Praze

Fakulta stavební

Katedra speciální geodézie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika
Vedoucí práce: Ing. Michal Seidl, Ph.D.

2019

Jan Štuiber


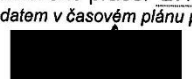


ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE


I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Štuiber	Jméno: Jan	Osobní číslo: 440794
Zadávací katedra: K154 - katedra speciální geodézie		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Porovnání přesnosti veřejně dostupných digitálních modelů terénu	
Název bakalářské práce anglicky: Comparison of accuracy of public available digital elevation models	
Pokyny pro vypracování: <ol style="list-style-type: none">Zpracování přehledu existujících DEM pro území ČR (SRTM, ASTER, ČÚZK DMR 5G, ...)Stanovení postupu pro porovnání modelů a výpočet základních statistických parametrů<ol style="list-style-type: none">transformace modelůtest modelu na množinu kontrolních bodůporovnání dvou modelů v profilu a plošeVýpočet porovnání pro data z vybrané lokality	
Seznam doporučené literatury: Böhm, J. - Radouch, V. - Hampacher, M.: Teorie chyb a vyrovnávací počet, Praha 1990. ISBN 80-7011-056-2. Cimbálník M., L. Mervart: Vyšší geodézie 1. ČVUT 2002. ISBN 80-01-02527-6.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Michal Seidl, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 19.3.2019	Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2019
	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
<u>27.3.2019</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Porovnání přesnosti veřejně dostupných digitálních modelů terénu* vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne

.....
Jan Štuiber

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalovi Seidlovi, Ph.D. za poskytnutá data, odborné vedení této bakalářské práce a za jeho cenné rady, trpělivost a vstřícnost.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá porovnáním přesnosti digitálních modelů reliéfu SRTM, SRTM CGIAR, ASTER, DMR 5G a digitálního modelu terénu z naměřených dat v okolí Železné hůrky. Obsahem práce je získání dat, jejich zpracování a výsledné porovnání. Pro zpracování úlohy byl použit program ArcMap.

Klíčová slova

Digitální model terénu (DMT), Porovnání přesnosti, SRTM, ASTER, DMR 5G, ArcMap, transformace

Abstract

This bachelor thesis is focused on comparison of accuracy of digital elevation models SRTM, SRTM CGIAR, ASTER, DMR 5G and digital elevation model from measured data in area around Železná Hůrka. The content of this bachelor thesis is acquisition, processing and final comparison of elevation data. Data were processed in the ArcMap software.

Key words

Digital elevation model (DEM), Comparison of accuracy, SRTM, ASTER, DMR 5G, ArcMap, transformation

Seznam použitých zkratk

ASTER - z angl. Advance Spaceborne Thermal Emission

SRTM - z angl.. Shuttle Radar Topography Mission

CGIAR - z angl. Consultative Group for International Agricultural Research

CSI - z angl. Consortium for Spatial Information

DMR 5G - Digitální model reliéfu 5. generace

WGS84 - z angl.. World Geodetic Systém 1984

ETRS89 - z angl. European Terrestrial Reference System 1989

UTM - z angl. Universal Transverse Mercator

S-JTSK - Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

Bpv - Balt po vyrovnání

EGM96 - z angl. Earth Gravitational Model 1996

DMT - Digitální model terénu

TIN - z angl. Triangulated irregular network

NASA - z angl. *National Aeronautics and Space Administration*

NGA - z angl. National Geospatial – Intelligence Agency

METI - z angl.. Messaging Extraterrestrial Intelligence

ČÚZK – Český úřad zeměměřičský a katastrální

ITRF – z angl. *Interation Terrestrial Reference Frame*

Obsah

1	Úvod	9
2	Digitální model terénu (DMT).....	10
2.1	Druhy digitálního modelů terénu podle typu ploch.....	10
2.1.1	Rastrový model terénu	10
2.1.2	Plátový model terénu	10
2.1.3	Polyedrický model terénu (TIN).....	11
3	Veřejně dostupné digitální modely terénu	11
3.1	SRTM CGIAR-CSI	11
3.2	DMR 5G (Digitální model reliéfu 5. generace).....	12
3.3	SRTM.....	13
3.4	ASTER.....	13
4	Referenční systémy	14
4.1	Světový geodetický referenční systém (WGS84).....	14
4.2	Evropský terestrický referenční systém (ETRS89)	15
4.3	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK)	15
4.4	Výškový systém Balt po vyrovnání	16
4.5	Gravitační model Země EGM96.....	16
5	Transformace mezi systémy.....	17
5.1	Transformace WGS84 <-> ETRS89 <-> S-JTSK	17
5.2	Transformace EGM96 <-> Bpv	18
6	Software pro zpracování	20
6.1	ESRI ArcMap	20
6.2	Zpracování dat.....	21
6.2.1	Měřená data	21
6.2.2	Data SRTM CGIAR, SRTM a ASTER	22
6.2.3	Data DMR 5G	23
7	Metodika porovnání.....	24
7.1	Skupinou měřených bodů	24
7.2	V ploše	24
7.3	Profily.....	24
8	Porovnání modelů ASTER, SRTM CGIAR, SRTM , DMR 5G a měřených dat	25
8.1	Porovnání skupinou měřených bodů	25
8.2	Porovnání v ploše	26
8.2.1	Porovnání vyjádřené histogramy.....	26

8.2.2	Porovnání vyjádřené graficky	27
8.3	Porovnání pomocí profilů	29
8.3.1	Severní profil, západ - východ	29
8.3.2	Jižní profil, západ - východ.....	30
8.3.3	Východní profil, sever - jih.....	30
9	Závěr	31
10	Seznam použité literatury a zdrojů	33
11	Seznam obrázků	35
12	Seznam tabulek	36
13	Seznam grafů.....	36
14	Přílohy.....	36
14.1	Tištěné	36
14.2	Digitální.....	36

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je porovnání přesnosti digitálních modelů terénu ASTER, SRTM, SRTM CGIAR a DMR 5G.

Digitální modely terénu byly porovnávány vůči naměřeným datům, která byla poskytnuta Ing. Michalem Seidlem, Ph.D. Měřená data se nachází v okolí národní přírodní památky Železná hůrka. Železná hůrka je jednou z nejmladších sopek na území České republiky a nachází se v blízkosti obce Mýtina.

U modelů ASTER, SRTM, SRTM CGIAR a DMR 5G se jedná o digitální modely reliéfu a u měřených dat o digitální model terénu. Modely jsou porovnávány několika způsoby a to skupinou měřených bodů, plošně a pomocí profilů.

Získaná data byla zpracována v programu ArcMap, který je aplikací softwaru od ESRI ArcGIS Desktop. V programu ArcMap probíhalo vyhotovení výkresů a příprava dat pro finální porovnání.

Výsledkem jsou grafy a výkresy, které znázorňují rozdíly mezi modely.

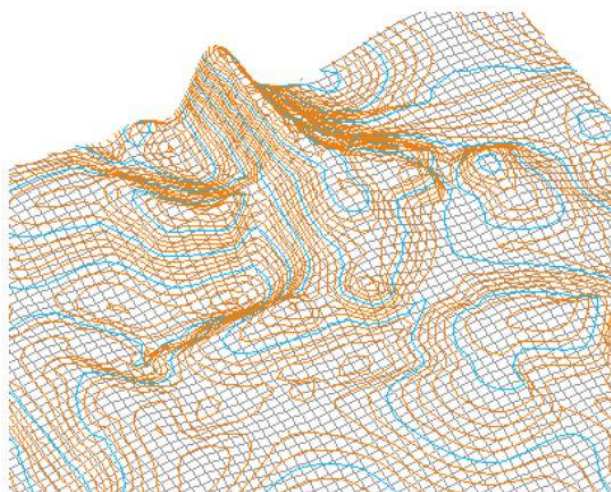
2 Digitální model terénu (DMT)

Digitální model terénu je nedílnou součástí zpracování v GIS a digitálně popisuje matematicky nevyjádřitelný zemský povrch. Poskytuje možnost různých topografických operací. DMT definují body se třemi souřadnicemi. Je to plocha vytvářena nad množinou bodů, která musí procházet všemi body a co nejlépe zobrazovat terén. Mimo zadané body je plocha dopočítávána tak, aby se co nejdříve blížila skutečnému terénu.[1]

2.1 Druhy digitálních modelů terénu podle typu ploch

2.1.1 Rastrový model terénu

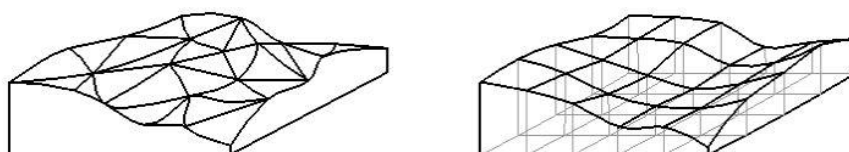
Rastrový model terénu je tvořen pravidelnými ploškami se společnými hranami. Body rastrového modelu mezi sebou mají konstantní rozestupy a díky tomu se snadno manipuluje s buňkami rastru. Nad tímto modelem se lépe provádí výpočty, ale vzhledem k tomu, že se volba bodů nepřizpůsobuje terénu, může nastat situace, kdy na některých místech je bodů přebytek a na některých nedostatek. [1]



Obr. 1 : Rastrový model terénu[1]

2.1.2 Plátový model terénu

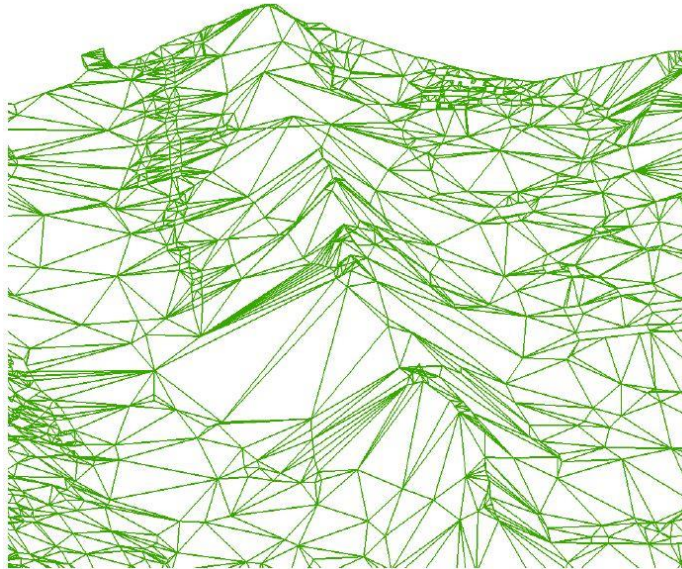
Plátový model je oproti ostatním modelům výhodnější z estetického hlediska, neboť vymodelovaný terén může být ostrých přechodů. Pláty se proloží každou z plošek a vyhlazují model v místech, kde je hladký i původní terén. Plátové modely nad polyedrickým modelem mají tvar trojúhelníků a nad rastrovým mají čtvercový tvar.[1]



Obr. 2: Zobrazení plátového modelu nad TIN a rastrem[1]

2.1.3 Polyedrický model terénu (TIN)

Plošky jsou nepravidelné trojúhelníky a jejich síť je vytvořena za použití triangulačních algoritmů. Proložíme-li vrcholy jednotlivých trojúhelníků rovinami získáme nepravidelný mnohostěn tzv. polyedr, který se přimyká terénu. Pro lepší aproximaci lze zadat povinné spojnice (údolnice, hřbetnice, spádnice). Hustota bodů nebývá na celém území stejná, protože pro členitější terén se volí větší počet bodů na jednotku plochy, kdežto u méně členitého terénu je to naopak.[1]



Obr.3: Polyedrický model terénu[1]

3 Veřejně dostupné digitální modely terénu

3.1 SRTM CGIAR-CSI

Jedná se o upravená data digitálního modelu terénu SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) od firmy CGIAR (*Consultative Group for International Agricultural Research*), která nabízí 3 vteřinový digitální model terénu pro celou Zeměkouli. Původní data SRTM byla upravena tak, aby poskytovala hladké a kompletní výšky pro celý svět, neboť původní model SRTM obsahoval oblasti bez dat, konkrétně nad vodními plochami a v místech, kde nebylo možné z pořízených dat vytvořit digitální model terénu např. horské nebo pouštní oblasti (Himaláje, Sahara). Pro vyplnění děr využívá CGIAR-CSI algoritmus, který poskytuje souvislé výškové plochy. Model SRTM CGIAR je k dispozici v souřadnicovém systému WGS84 a pro výšky je použit model geoidu EGM96. Model byl pořízen s rozlišením cca 90 metrů ze zdroje [2].

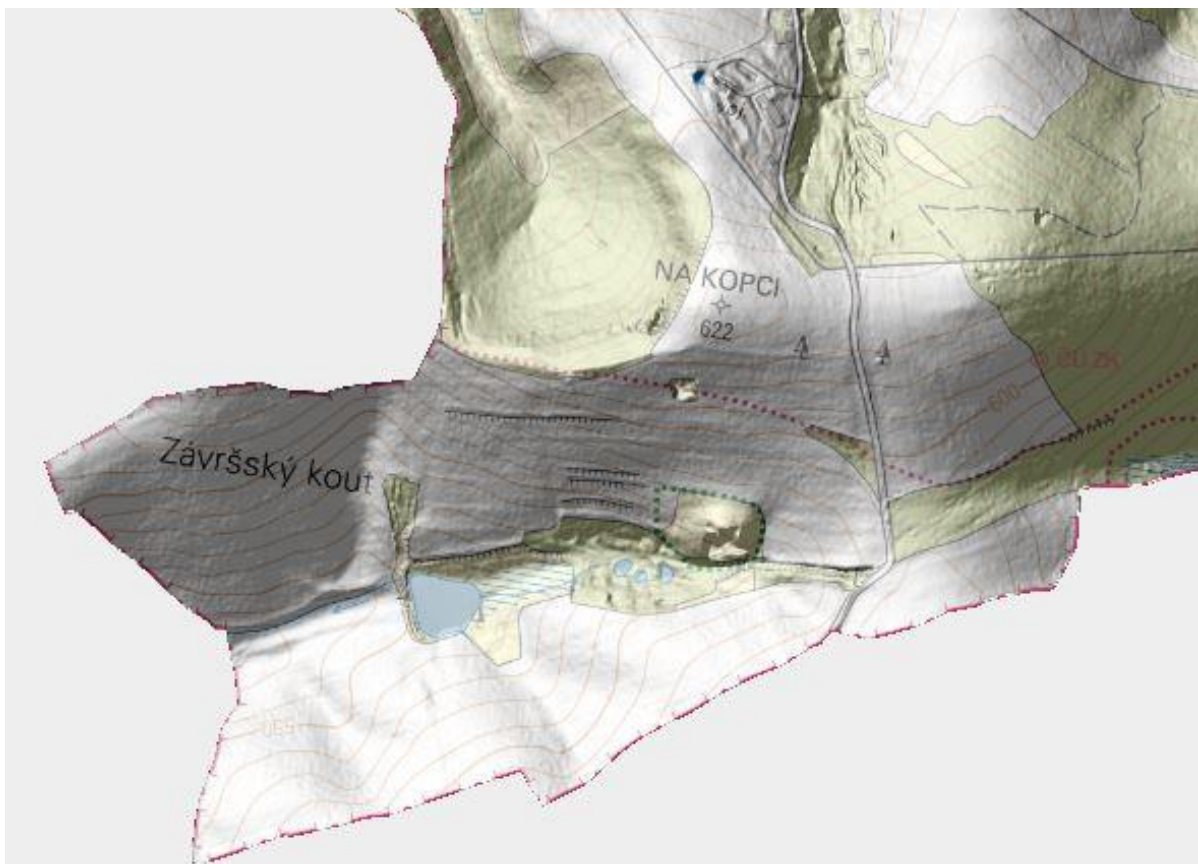
3.2 DMR 5G (Digitální model reliéfu 5. generace)

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace zobrazuje přirozený i lidskou činností upravený zemský povrch. Model vznikl z dat pořízených pomocí leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky. Model je určen k analýze terénních poměrů např. při pozemkových úpravách nebo plánování a projektování dopravních, vodohospodářských a pozemních staveb. DMR 5G je základním zdrojem dat pro tvorbu vrstevnic určeným pro mapy velkých měřítek, nebo také pro počítačovou vizualizaci výškopisu.

Digitální model reliéfu je tvořen z dat, která jsou filtrována a následně manuálně kontrolována a editována. Konečný model DMR 5G je „vyhlazován“ ve třech fázích. Nejprve je vybrán nejnižší bod v pravidelném gridu 1x1m, tím je zredukován počet bodů v místech, kde se stýká několik bloků. Vyrovnáním měřičských pásů je odstraněn zbytkový šum. Při druhém kroku je model vyhlazen odstraněním nežádoucích nerovností a ve třetí fázi je zředěno mračno bodů (musí být dodržena stanovená střední výšková chyba).

Data jsou dostupná v digitálním tvaru, ve formě výšek diskrétních bodů z nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN) o souřadnicích X,Y,H, kde H je nadmořská výška ve výškovém systému Balt po vyrovnání. [3].

Data DMR 5G byla zapůjčena Zeměměřickým úřadem , kde je lze i zakoupit, nebo jsou dostupná i v online verzi [4].



Obr. 4: Online verze modelu DMR 5G[5]

3.3 SRTM

Model SRTM byl vytvořen v rámci amerického projektu vedeného organizacemi NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a NGA (*National Geospatial – Intelligence Agency*). V roce 2000 byl do vesmíru vypuštěn raketoplán Endeavour, který na sobě nesl speciální radar pro snímání povrchu. Díky němu byla pořízena interferometrická data celého světa. To bylo možné, protože radar pracuje na frekvencích, které umožňují pořizovat data nezávisle na denní době nebo meteorologických podmínkách. Tato mise použila jednopružkovou interferometrii, která přijímá dva signály současně pomocí dvou různých radarových antén. Anténa umístěná na palubě raketoplánu shromáždila jednu datovou sadu a druhý datový soubor byl shromážděn druhou anténou umístěnou na konci šedesáti metrového stožáru, který vyčníval z raketoplánu. Rozdíly mezi oběma signály umožňují výpočet výšky povrchu. Byl zde použit C- pásmový InSAR senzor a radar X-pásmový X-SAR. Po zpracování vznikl celosvětový digitální model terénu s vysokým prostorovým rozlišením a výškovou přesností. Model SRTM je dostupný ve dvou verzích a to 3“ s rozlišením cca 90 metrů a verze 1“ s rozlišením 30 metrů, která byla dostupná jen pro USA, ale v roce 2015 bylo do této verze zahrnuto pokrytí Asie a Austrálie a nyní zahrnuje i Evropu a Afriku.

Digitální model terénu SRTM byl pořízen ze zdroje [5] v souřadnicovém systému WGS84 a pro výšky byl použit model EGM96. Získaný model je v 1“ verzi s rozlišením 30metrů ve formátu GeoTIFF (soubor TIFF s vloženými geografickými informacemi). Jedná se o standardní formát obrazu pro aplikace GIS. Velikost pořízeného souboru je přibližně 25 MB.[6][7]

3.4 ASTER

Organizace METI (Messaging Extraterrestrial Intelligence) ve spolupráci s NASA vydaly v roce 2011 celosvětový digitální model terénu ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) druhé verze. První verze ASTER vyšla v roce 2009 a byla vytvořena pomocí stereoskopické dvojice snímků, pořízených multispektrálním barevným skenerem ASTER, který je umístěn na družici Terra. Systém ASTER pořizuje data ve čtrnácti spektrálních pásmech (viditelné - infračervené). Jak již bylo zmíněno, ASTER využívá stereoskopickou dvojici snímků, to je možné, protože v blízkém infračerveném pásmu lze snímat data v šikmém směru vzad s rozlišením 15 metrů. Díky stereoskopickým dvojicím lze vypočítat výškové poměry a také je lze použít k prostorovému zobrazení. Model ASTER vznikl zpracováním 1,5 milionu družicových scén. Vylepšení první verze přidává dalších 260 000 stereo dvojic, snižuje výskyt chyb a zlepšuje pokrytí. Vylepšený algoritmus poskytuje lepší prostorové rozlišení, vyšší horizontální a vertikální přesnost a lepší pokrytí a detekci vodních ploch. Sice druhá verze vykazuje významné zlepšení oproti předchozí verzi, ale i tak data mohou obsahovat různé anomálie a chyby.

Digitální model terénu ASTER druhé verze (1“ verze s rozlišením cca 30m) byl pořízen v souřadnicovém systému WGS84 a výškami v EGM96 ze zdroje [5]. Pořízený model je ve formátu GeoTIFF .[7] [8]

4 Referenční systémy

V této kapitole budou stručně popsány referenční systémy, ve kterých byla získána testovací data. Polohové referenční systémy: WGS84 pro modely SRTM CGIAR, SRTM a ASTER

ETRS89 pro měřená data

S-JTSK pro model DMR 5G

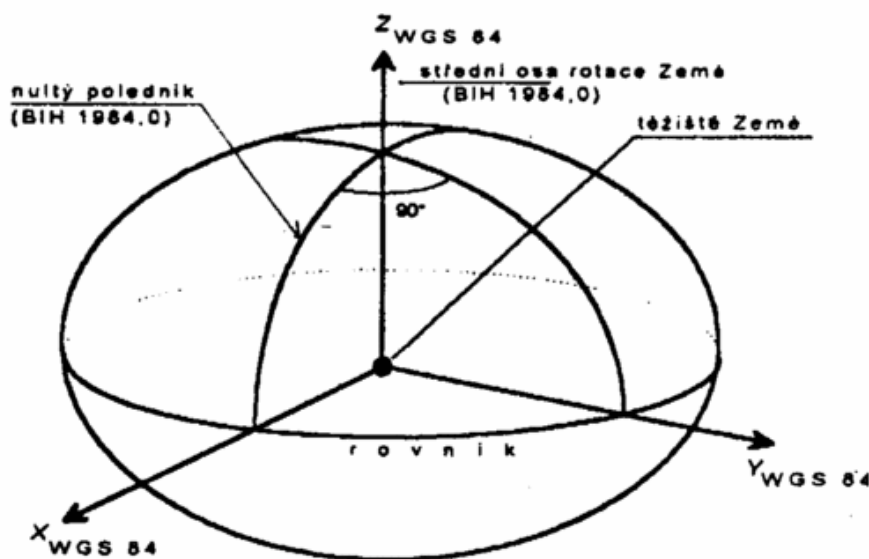
Výškový referenční systém: Bpv pro model DMR 5G a měřená data.

EGM96 pro modely SRTM, SRTM CGIAR a ASTER

4.1 Světový geodetický referenční systém (WGS84)

WGS84 je vojenský souřadnicový systém, který využívají státy NATO. Jako kartografické zobrazení je zde použito Univerzální transversální Mercatovo zobrazení (UTM) a referenční plochou je elipsoid WGS84. Vzhledem k tomu, že se jedná o geocentrický systém, je počátek umístěn do hmotného středu Země. Osy X a Y leží v rovině rovníku a osa Z je ztotožněna s osou rotace Země. Počátek a orientace os jsou realizovány pozemskými stanicemi, které monitorují dráhy družic systému GPS-Navstar. [9]

Schéma geocentrického souřadného systému WGS84



Obr. 5: Schéma souřadného systému WGS84 [9]

Zobrazení UTM je konformní válcové zobrazení v transversální poloze. Při zobrazení zemského povrchu do roviny je zemský povrch rozdělen na poledníkové pásy. Poledníkový pás je určen osovým poledníkem a každý poledníkový pás je zobrazen na jednu válcovou plochu jejíž osa leží v rovině rovníku a je kolmá k ose poledníku. [10]

4.2 Evropský terestrický referenční systém (ETRS89)

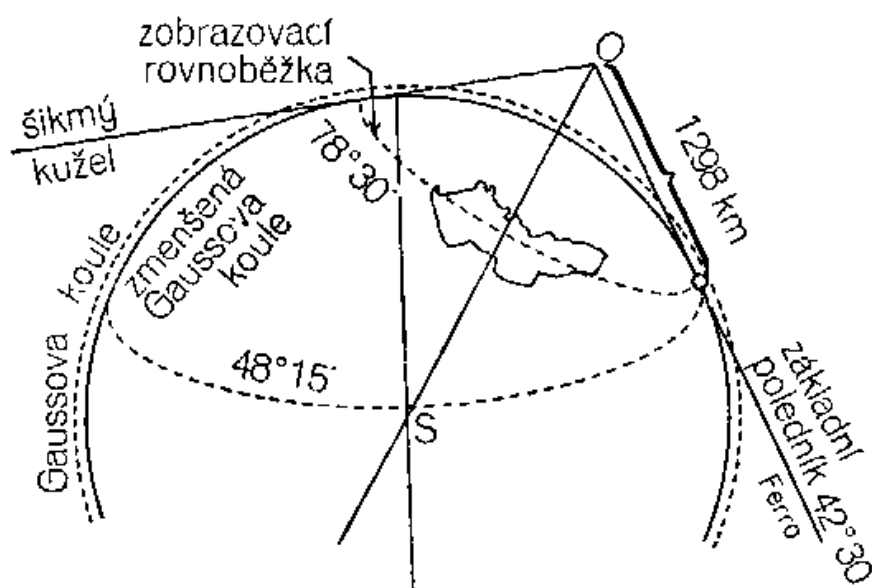
Počátek souřadnicového systému ETRS89 leží v hmotném středu Země, jedná se tedy o geocentrický systém. Referenční plochou je elipsoid GRS80, který je svými parametry podobný elipsoidu WGS84.

Využívá Mercatorovo válcové konformní zobrazení se základním poledníkem 15° (UTM zone 33N).

Jedná se o závazný souřadnicový referenční systém na území EU a vychází z technologií kosmické geodézie. Souřadnicový rámec byl odvozen z rámce ITRF (International Terrestrial Reference Frame) a je spojen s eurasijskou kontinentální deskou. [11]

4.3 Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK)

Je to souřadnicový systém, který je definován Křovákovo zobrazením, Besselovým elipsoidem, převzatými prvky sítě vojenské triangulace a jednotnou trigonometrickou katastrální sítí. Křovákovo zobrazení je kuželové konformní zobrazení v obecné poloze, navržené Ing. Josefem Křovákem. Počátek pravoúhlé rovinné soustavy byl vložen do obrazu vrcholu kužele. Kladný směr osy X směřuje k jihu a je tvořena obrazem základního poledníku $\lambda = 42^\circ 30'$ na východ od Ferru. Osa Y je orientována na západ a je kolmá na osu X, díky tomu se nachází celá republika v 1. kvadrantu, tím pádem jsou všechny souřadnice kladné. [9]



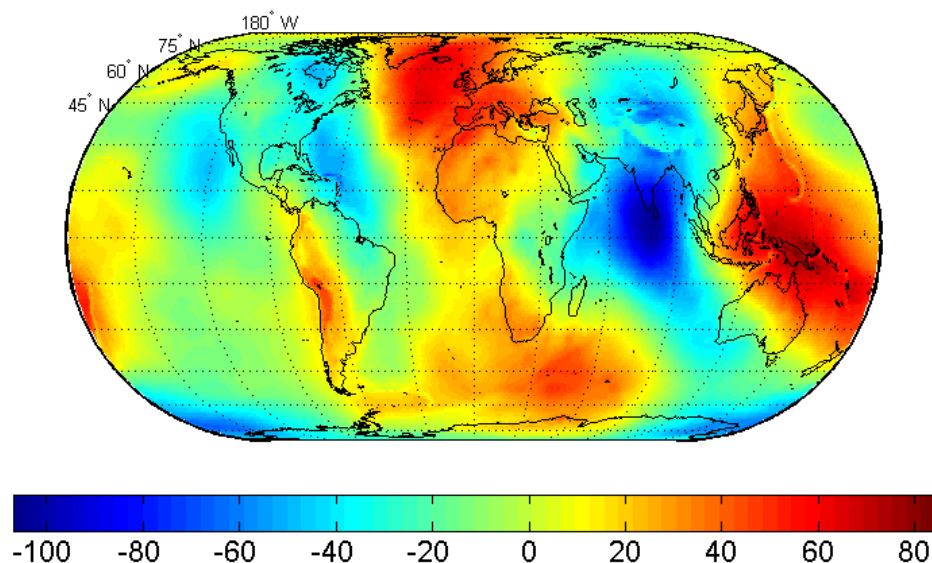
Obr. 6: Schéma Křovákova zobrazení[9]

4.4 Výškový systém Balt po vyrovnání

Od roku 2000 je jediným uznávaným výškovým systémem na území ČR. Používá normální Moloděnského výšky, které jsou vztaženy k střední hladině Baltského moře s nulovým bodem v Kronštadu. Vlivem toho, že Moloděnského výšky neuvažují rozložení zemské hmoty mezi geoidem a bodem, vzniká plocha nazývaná kvazigeoid, která se s geoidem shoduje na hladině oceánů, jinak se ale liší v řádech centimetrů (v rovinách) a v horských oblastech to může být i v řádu 2 metrů. Výškový systém Balt po vyrovnání byl zaveden pro státy tehdejší Varšavské smlouvy, tyto země měly do té doby jiné výškové systémy, proto byly vyrovnány a byl zaveden jednotný systém. Síť byla tedy vyrovnána v rámci socialistických států. Dříve byl na území České republiky používán Jadranský výškový systém, který zde platil od dob Rakouska-Uherska. Jadranský výškový systém měl nulový bod v Terstu a používal normální ortometrické výšky, které neuvažují nepravidelné rozložení hmot a jejich hustot v okolí tížnice.[9]

4.5 Gravitační model Země EGM96

Globální gravitační model je definován Stokesovými koeficienty do stupně a řádu 360. Tento model je výsledkem spolupráce mezi NIMA (National Imagery and Mapping Agency), NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a Státní univerzitou v Ohio. Společný projekt využívá data z mnoha různých oblastí světa včetně nově vydaných dat z archivů NIMA. Hlavním přínosem společnosti NIMA jsou letecky zaměřovaná data nad Grónskem a částí Antarktidy a Arktidy. Prostorové rozlišení modelu EGM96 je 30x30 úhlových minut. V roce 2008 byl vydán globální gravitační model Země EGM08, který nahradil EGM96. Model EGM08 obsahuje oproti EGM96 Stokesovy koeficienty do stupně a řádu 2160. EGM08 má prostorové rozlišení 5x5 úhlových minut. [17][18]



Obr. 7 Výšky geoidu EGM96 v metrech [19]

5 Transformace mezi systémy

5.1 Transformace WGS84 \leftrightarrow ETRS89 \leftrightarrow S-JTSK

K transformaci se nejčastěji používá 3D Helmertova sedmiprvková transformace. Jedná se o prostorovou podobnostní konformní transformaci.

Nejprve je třeba převést rovinné souřadnice X, Y (kartografickým zobrazením) na geografické souřadnice φ, λ (zeměpisná šířka a délka) a ty následně převést (sférickou trigonometrií) na kartézské X, Y, Z . Poté proběhne transformace a následuje převod geocentrických souřadnic X', Y', Z' (sférickou trigonometrií) na zeměpisné φ', λ' a nakonec kartografickým zobrazením zeměpisných souřadnic do rovinných X', Y' .

Transformace využívá sedm parametrů. Jde o posuny na osách $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ (posun počátku souřadné soustavy), dále o rotaci kolem jednotlivých os $\mathbf{R}^X \varepsilon_1, \mathbf{R}^Y \varepsilon_2, \mathbf{R}^Z \varepsilon_3$ a jako posledním parametrem je změna měřítka m .

Transformaci lze zapsat maticově jako:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = q * R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}$$

Kde měřítko transformace je $q = 1 + m$, $\mathbf{R}^i \varepsilon_j$ jsou matice rotace a X', Y', Z' jsou souřadnice nového systému a X, Y, Z původního. [12]

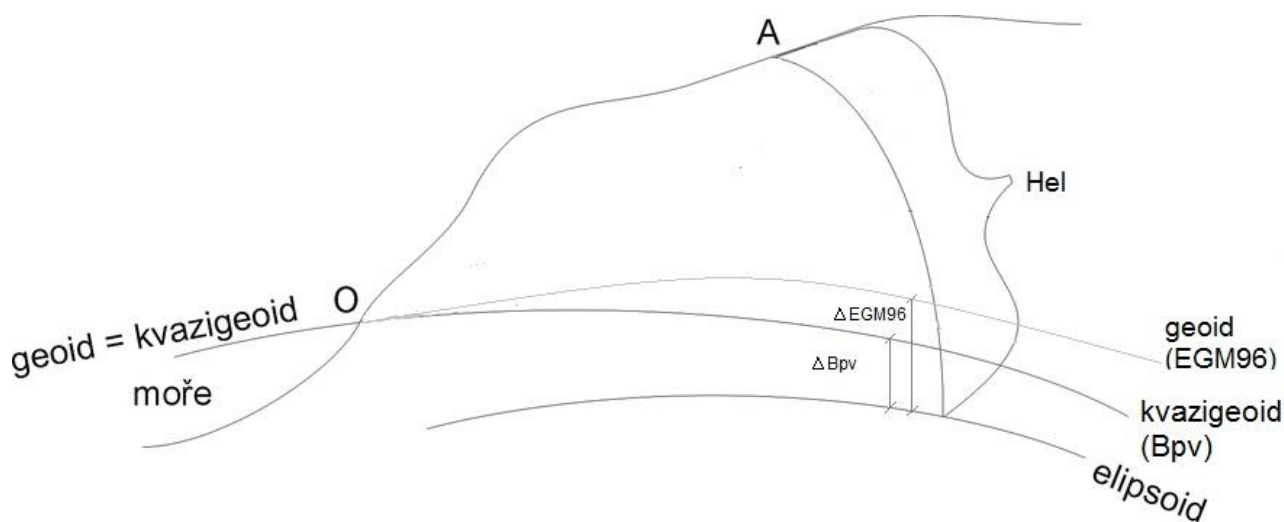
Matice rotace a podrobnější popis transformace lze najít například v [13].

5.2 Transformace EGM96 <-> Bpv

Získaná data SRTM CGIAR, SRTM a ASTER mají společný výškový systém EGM96, což by při jejich vzájemném porovnání nemělo činit žádné potíže, nicméně problém nastává, kdybychom chtěli porovnat tyto modely s měřenými daty nebo modelem DMR 5G, jejichž výšky jsou v souřadnicovém systému Balt po vyrovnání. Bylo proto potřeba převést výšky z EGM96 do Bpv. Vzhledem k přesnosti modelů a vzhledem k tomu, že se v našem případě jedná o relativně malé území, byl převod výšek z EGM96 na Bpv proveden tak, že byly vyhledány body základního polohového bodové pole v okolí zájmového území, které měly jak elipsoidické výšky tak výšky v Bpv. Z těchto bodů byly provedeny rozdíly výšek $H_{el} - H_{Bpv}$, rozdíly byly zprůměrovány a tím se vypočetlo převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem (ΔBpv). Výpočet převýšení geoidu EGM96 nad elipsoidem proběhl v online kalkulačce [14]. Do online kalkulačky byly zadány zeměpisné souřadnice vybraných bodů z okolí a následně spuštěn výpočet. Vypočtené výšky z online kalkulačky byly zprůměrovány a tím bylo získáno převýšení geoidu nad elipsoidem ($\Delta EGM96$). Pokud známe výšku v systému EGM96, a převýšení ΔBpv a $\Delta EGM96$, můžeme jednoduše přepočítat výšky z EGM96 na výšky v Bpv, jak vyplývá z rovnice (1).

$$H_{Bpv} = H_{EGM96} - \Delta Bpv + \Delta EGM96 \quad (1)$$

Kde H_{Bpv} je výška v Baltu po vyrovnání, H_{EGM96} je výška v EGM96, ΔBpv je převýšení kvazigeoidu nad elipsoidem a $\Delta EGM96$ je převýšení geoidu nad elipsoidem.



Obr. 8: Zobrazení převýšení geoidu (EGM89) a kvazigeoidu (Bpv) nad elipsoidem WGS84

ČB	B	L	H _{el} [m]	H _{Bpv} [m]	Δ Bpv [m]	Δ EGM96[m]
209	49°59'11.2168"	12°26'26.5829"	633,33	586,53	46,80	47,05
210	49°59'28,7146"	12°27'06,9361"	641,51	594,72	46,79	47,04
5	49°59'28,2604"	12°25'36,4153"	629,42	582,61	46,81	47,06
3	49°59'44,4917"	12°26'35,8959"	668,94	622,15	46,79	47,04
				PRŮMĚR	46,80	47,05
				Δ EGM96 - Δ Bpv = 0,25 m		

Tab. 1: Výpočet odchylky mezi geoidem EGM96 a kvazigeoidem Bpv

Zadejte souřadnice a stiskněte tlačítko Spustit

	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka
Stupně:	<input type="text" value="49."/>	<input type="text" value="12."/>
Minut:	<input type="text" value="59."/>	<input type="text" value="26."/>
Sekundy:	<input type="text" value="11."/>	<input type="text" value="26."/>

Vyberte jednotky geoidu v metrech nebo stopách:

Metry Nohy

NGA EGM96 GEOIDOVÝ KALKULAČ

	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka
Stupně:	49.	12.
Minut:	59.	26.
Sekundy:	11.	26.

Geoid Výška:
47.05 Meters

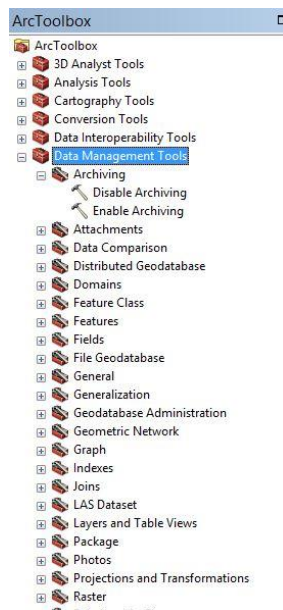
Obr. 9 Ukázka online kalkulátoru (podklad z [14])

6 Software pro zpracování

V této kapitole je popsáno jak byla data připravena pro výsledné porovnání. Dále jsou zde uvedeny základní informace o použitém programu ArcMap od ESRI ArcGIS Desktop.

6.1 ESRI ArcMap

ArcMap je aplikace ArcGIS Desktop, která slouží pro zpracování, analýzu, editaci a výslednou vizualizaci geografických dat. Pro zpracování a analýzu dat nalezneme v ArcMap mnoho tzv. geoprocessingových nástrojů. Tyto nástroje se nachází v přehledné hierarchizované aplikaci ArcToolbox.



Obr.10: Ukázka prostředí ArcToolbox

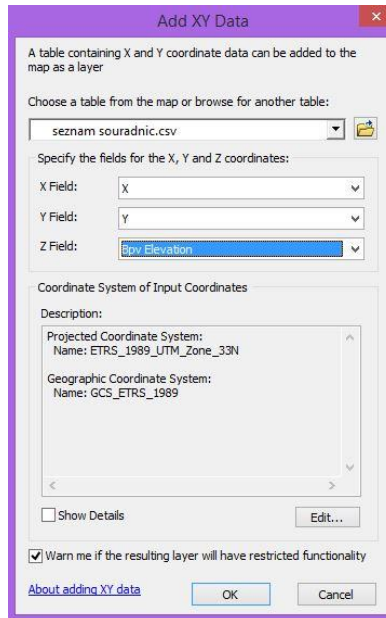
V ArcMap lze využívat různé možnosti vykreslení a klasifikování výsledných dat a tím tvořit mapové výstupy na vysoké kartografické úrovni, nebo vytvářet grafy na základě dat z atributových tabulek. Velmi praktické jsou i nástroje pro prostorovou analýzu, např. kolik měst se nachází ve vzdálenosti 50km od určitého místa. Pro zpracování získaných dat v této úloze, byla nejvíce využita práce s rastrovými daty, jako například rozdíl rastrů, nebo převzorkování. Další důležitou součástí ArcMap je práce se souřadnicovými systémy.

ArcMap nabízí i dávkové zpracování dat. Pro automatizaci lze vkládat aplikace do skriptů v programovacím jazyce Python, nebo využít prostředí ModelBuilder, které nevyžaduje znalost programovacího jazyka. ModelBuilder nabízí grafické prostředí, ve kterém lze pomocí přetahování a propojení jednotlivých nástrojů z ArcToolbox sestavit výsledný model. Výhodou této metody je jednoduchost a rychlost při sestavování modelů. [15]

6.2 Zpracování dat

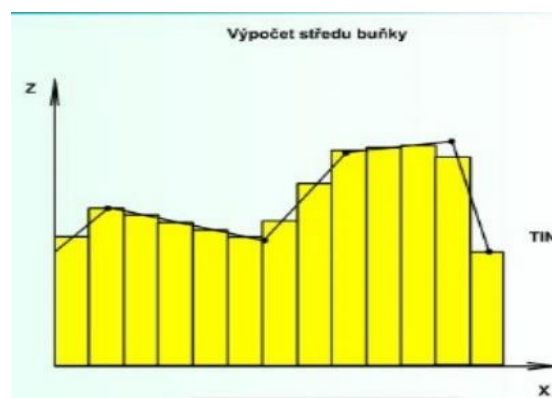
6.2.1 Měřená data

Měřená data byla nahrána do ArcMap přes *Add XY Data* a jako vstupní soubor byl zvolen seznam souřadnic ve formátu *.csv*, dále byl nastaven souřadnicový systém a vybrány hodnoty pro X,Y,Z viz. obr 11.



Obr. 11: Vstupní hodnoty při importu X,Y,Z dat do ArcMap

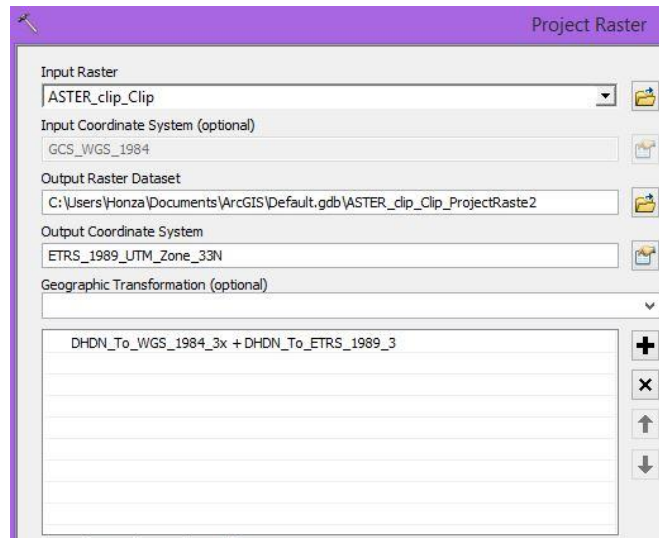
Pomocí funkce *create TIN* byla z měřených bodů vytvořena trojúhelníková síť. Po vizuální kontrole byly zjištěny na několika bodech výškové anomálie, vzhledem k tomu, že tyto anomálie nekorespondují se skutečným terénem, byly proto tyto body vymazány. Poté bylo třeba převést již upravený TIN na rastr a to funkcí *TIN to Raster*. Jako parametr pro převod byla zvolena velikost buňky na 14x14 metrů a jako interpolační metoda pro vytvoření rastru byla zvolena metoda lineární. Lineární metoda funguje tak, že z rovnice roviny $Ax+By+Cz+D=0$ vypočte hodnotu Z pro střed každé buňky interpolovaného rastru, jak je znázorněno na obr.16. V této fázi byla naměřená data připravena k plošnému porovnávání.[16]



Obr. 12: Princip lineární metody [16]

6.2.2 Data SRTM CGIAR, SRTM a ASTER

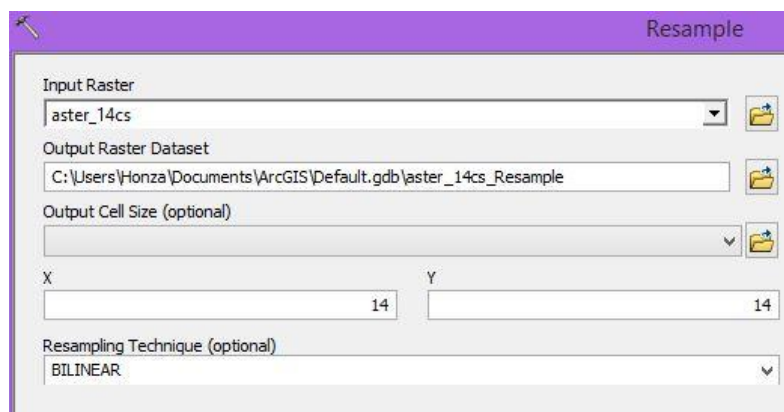
Data byla po získání v souřadnicovém systému WGS-84, tudíž je bylo třeba převést do ETRS 1989 UTM Zone 33N, to bylo provedeno funkcí *Project Raster*, kde byl použit transformační klíč: DHD_To_WGS_1984_3x + DHDN_To_ETRS_1989_3.



Obr.13 Ukázka funkce Project raster

Transformovaná data SRTM CGIAR, SRTM a ASTER bylo třeba nejprve ořezat na velikost zájmového území, k tomu byla použita geoprocessingová funkce *Clip (Data Management Tools)* z ArcToolbox. Funkce *Clip* funguje tak, že se zadá vstupní rastr, který se bude ořezávat a poté oblast, podle které se má rastr ořezat. V tomto případě byly na vstupu rastry SRTM CGIAR, SRTM a ASTER a jako vrstva pro ořezání byl zvolen rastr vytvořený z měřených bodů.

Dále bylo třeba ořezané rastry převzorkovat, aby bylo možné je následně porovnat. Převzorkování bylo provedeno funkcí *Resample*, kde byla zadána velikost buněk na 14x14 metrů, aby byly buňky stejně velké jako u rastru z měřených dat. Jako metoda převzorkování byla zvolena metoda bilineární, která provádí bilineární interpolaci a určuje novou hodnotu buňky na základě váženého průměru vzdáleností ze čtyř nejbližších center vstupních buněk.

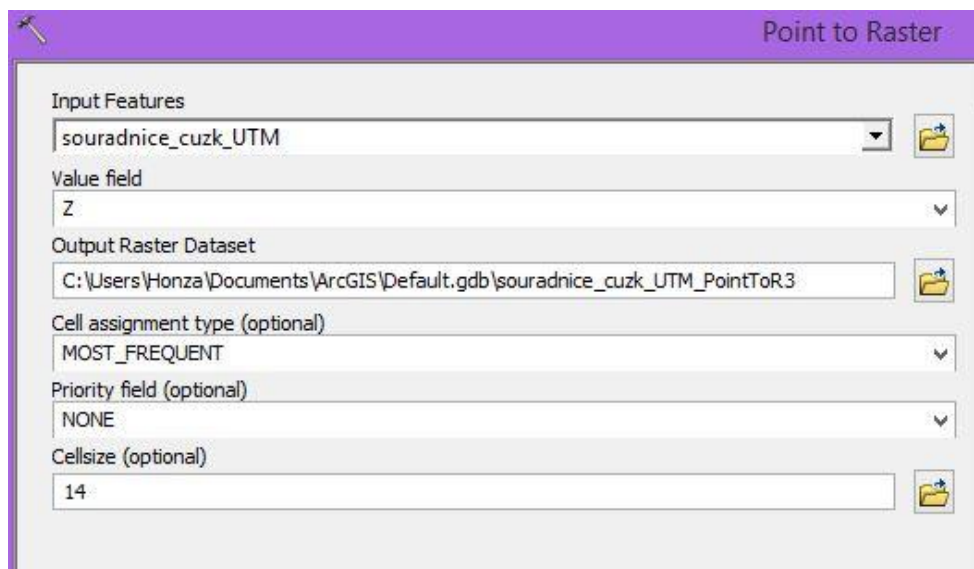


Obr.14 Ukázka funkce Resample

6.2.3 Data DMR 5G

Vzhledem k tomu, že byla data DMR 5G získána ve formátu .xyz bylo je třeba před nahráním do ArcMap upravit. Do programu Excel byla data naimportována tak, aby byly rozlišeny sloupce X,Y,Z a následně vyexportována do .csv, který byl do ArcMap nahrán přes *Add Data XY*, obdobně jak je uvedeno v podkapitole 6.2.1 Měřená data.

Nahrané body byly převedeny na rastr funkcí *Point to raster*, ve které se do vstupu zadává bodová vrstva, v našem případě to byly body DMR 5G, dále bylo nastaveno, aby výstupnímu rastru byly přiřazeny hodnoty Z (nadmořské výšky) a velikost buněk byla 14x14 metrů. Metoda jak bude buňce přiřazena hodnota, pokud se v buňce nachází více než jeden atribut, byla nastavena na *Most_Frequent*. Tato metoda vybere hodnotu s nejběžnějším atributem.



Obr.15 Ukázka funkce Point to raster

Data DMR 5G byla pořízena v souřadnicovém systému S-JTSK, proto musela být transformována do ETRS 1989 UTM Zone 33N, k tomu byla využita funkce *Project raster* s transformačním klíčem: *S_JTSK_To_WGS_1984_NGA + ETRS_1989_To_WGS_1984*.

V této fázi byl přetransformovaný rastr oříznut funkcí *Clip*, jak je uvedeno v podkapitole 6.2.2 Data SRTM CGIAR, SRTM a ASTER a tím byl připraven k porovnání.

7 Metodika porovnání

7.1 Skupinou měřených bodů

Pro porovnání skupinou měřených bodů bylo třeba nejdříve docílit toho, aby se k měřeným bodům připsaly výšky z ostatních modelů. Tím získáme tabulku, ve které bude u každého z měřených bodů výška ze všech modelů. Dále bylo provedeno porovnání výšek a to tak, že od výšky měřených bodů byly odečteny výšky jednotlivých modelů. Pro prezentaci výškových rozdílů byl ke každému modelu vyhotoven histogram a tabulka se statistickými hodnotami jako například maximum (nejvyšší kladný rozdíl), minimum (nejvyšší záporný rozdíl), průměr atd.

7.2 V ploše

U plošného porovnání byly vyhotoveny dva výstupy pro znázornění rozdílů. Jedním z výstupů jsou histogramy a druhým jsou výkresy s rozdílovými rastry v měřítku 1: 10 000. U této metody byly jednotlivé modely porovnány vůči modelu DMR 5G, protože naměřené body byly rovnoměrně rozmístěny jen na části zájmového území. Pro tvorbu histogramů bylo třeba vytvořit pravidelnou bodovou síť nad rastrem modelu DMR 5G a poté byl zvolen obdobný postup jako u metody 7.1 Skupinou měřených bodů. Výkresy byly vyhotoveny v prostředí programu ArcMap tak, že od sebe byly odečteny porovnávané rastry a tím byl vytvořen výsledný rozdílový rastr, který byl doplněn o legendu, měřítko a tiráž. Podkladová mapa byla získána z [20].

7.3 Profily

Při této metodě porovnání byly vytvořeny tři profily, dva horizontální a jeden vertikální viz. Obr. 16. Nejprve bylo třeba nad vrstvou měřených bodů vytvořit pravidelnou vrstvu bodů a poté vyselektovat vhodné body pro vytvoření profilů. Díky tomu, že se body vytváří ve středu buňky a velikost buněk je 14x14 metrů víme, že staničení bude narůstat po 14 metrech. K vybraným bodům byly přiřazeny výšky z ostatních modelů, tím byla získána tabulka se staničeními a výškami jednotlivých modelů. Následně od sebe byly jednotlivé výšky odečteny a pro lepší vizualizaci zde probíhal rozdíl opačně než v předchozích případech. Odečítala se výška jednotlivých modelů od modelu z měřených hodnot. Nakonec byl vytvořen spojnicový graf ke každému z profilů.



Obr. 16: Zobrazení umístění profilů (podkladová mapa z [20])

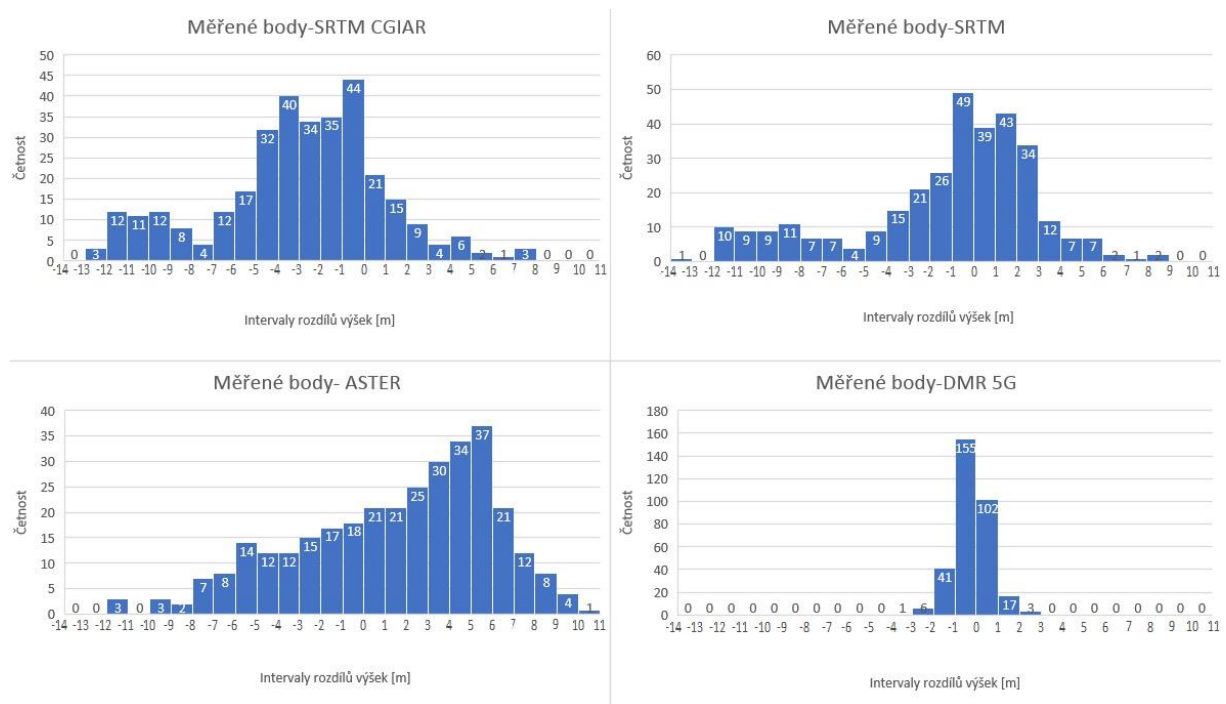
8 Porovnání modelů ASTER, SRTM CGIAR, SRTM, DMR 5G a měřených dat

V následujících podkapitolách je uvedené zpracování a porovnání výšek jednotlivých modelů. Porovnání bylo provedeno pomocí skupiny měřených bodů, plošného porovnání a porovnání v profilech.

8.1 Porovnání skupinou měřených bodů

Pomocí funkce *extract multi values to points* byly do atributové tabulky k jednotlivým měřeným bodům přiřazeny výšky z ostatních modelů. Atributová tabulka byla následně vyexportována do programu Excel, kde byly převedeny výšky modelů SRTM CGIAR, SRTM a ASTER do výškového systému Bpv tak, že k výškám byla přičtena hodnota 0,25m z Tab. 1. Dále byly provedeny rozdíly výšek a z rozdílů vyhotoveny histogramy a vypočteny základní statistické hodnoty.

Rozdíly výšek byly provedeny vždy mezi měřenými výškami a výškami z jednotlivých modelů.



Grafy 1-4: Histogramy rozdílů výšek

Z grafů 1-4 je patrné, že nejmenších výškových rozdílů dochází u modelu DMR 5G, kde v intervalu (-2)m – 2m leží 96,9% bodů. Naopak k největším rozdílům dochází u modelu ASTER, kde v tomto intervalu leží 23,7% bodů. U modelu SRTM CGIAR se v tomto intervalu nachází 35,4% bodů a u modelu SRTM je to 48,3%. V intervalu od (-5) do 5 metrů se nachází 73,8% bodů u modelu SRTM CGIAR, 78,5% bodů u modelu SRTM a 63,1% u modelu ASTER.

Konkrétní statistické hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

STATISTICKÉ HODNOTY	MĚŘENÉ – SRTM CGIAR	MĚŘENÉ- SRTM [m]	MĚŘENÉ- ASTER	MĚŘENÉ- DMR 5G [m]
MAXIMUM	7,97	8,97	10,23	2,89
MINIMUM	-12,46	-13,05	-11,70	-3,95
PRŮMĚR	-3,03	-1,28	1,46	-0,22
STŘEDNÍ HODNOTA	-2,65	-0,29	2,58	-0,21
SMĚRODATNÁ OOODCHYLKA	4,01	4,33	4,57	0,81

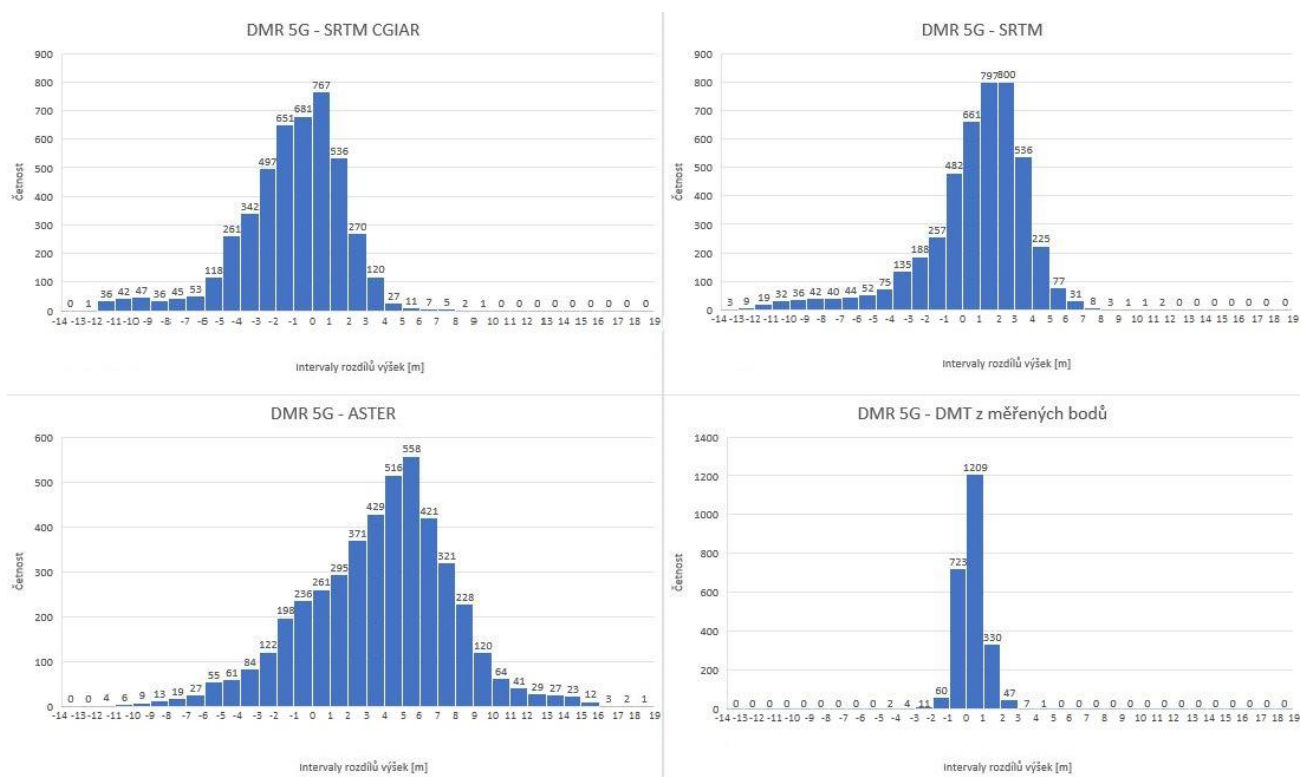
Tab. 2: Statistické hodnoty pro rozdíly výšek mezi měřenými hodnotami a modely SRTM CGIAR, SRTM , ASTER a DMR 5G

8.2 Porovnání v ploše

Pomocí funkce *Raster calculator* od sebe byly odečteny jednotlivé rastry a byly vytvořeny nové *shapefiles*, které graficky znázorňují výsledné porovnání. Z těchto *shapefiles* byl vytvořen výkres 1:10 000. Dále byla pomocí funkce *Raster to point* vygenerována pravidelná síť bodů nad modelem DMR 5G (jeden bod nad každou buňkou). Funkcí *Extract multi values to points* byly přiřazeny do atributové tabulky, k vygenerovaným bodům, výšky z ostatních modelů.

Atributová tabulka byla následně vyexportována do programu Excel, kde byly z rozdílů výšek vyhotoveny histogramy. Převedení výšek u modelů ASTER, SRTM CGIAR a SRTM do Bpv proběhlo přičtením hodnoty 0,25m k výškám z modelů viz Tab. 1.

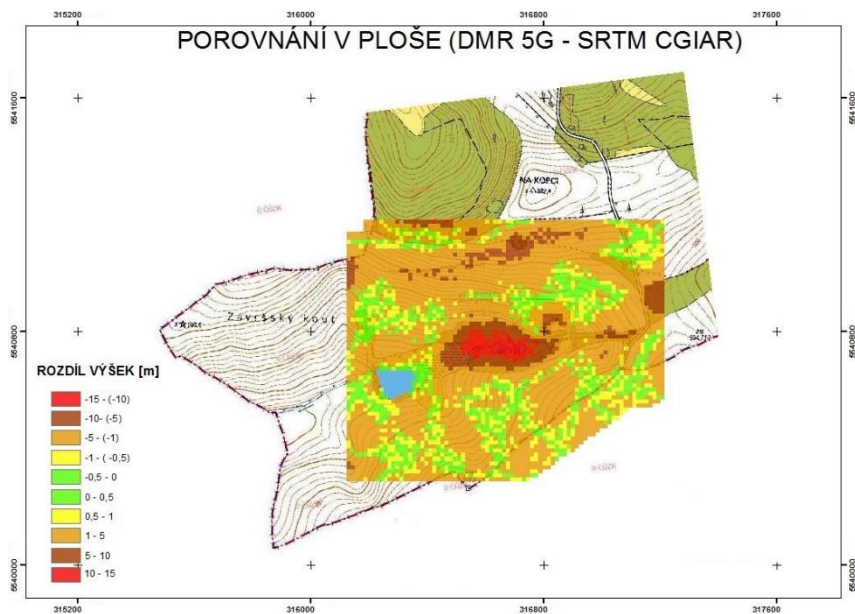
8.2.1 Porovnání vyjádřené histogramy



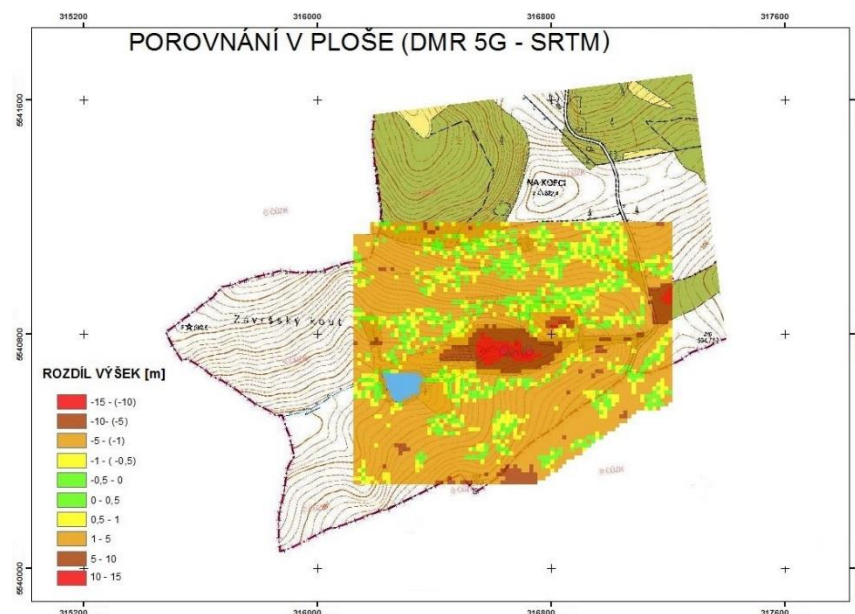
Graf 5-8: Histogramy pro intervaly rozdílů výšek mezi modely DMR 5G a SRTM CGIAR

Z grafů 5-8 je vidět, že nejmenší rozdíly výšek se vyskytují v porovnání s modelem z měřených hodnot, kde se v intervalu (-2)m – 2m nachází 97,0% bodů. U modelů SRTM a SRTM CGIAR se v tomto intervalu nachází 48,2% bodů u modelu SRTM a 57,8% u modelu SRTM CGIAR. Nejhorší výsledky vykazuje model ASTER, kde v tomto intervalu leží 21,7%. V intervalu od (-5) do 5 metrů leží u modelu SRTM CGIAR 91,1% bodů, u modelu SRTM 91,2% bodů a 56,5 % bodů u modelu ASTER.

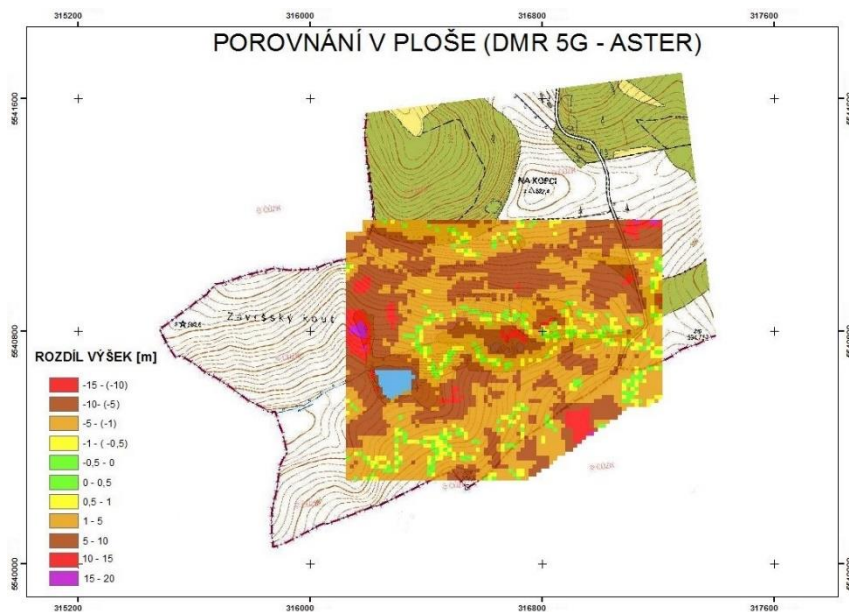
8.2.2 Porovnání vyjádřené graficky



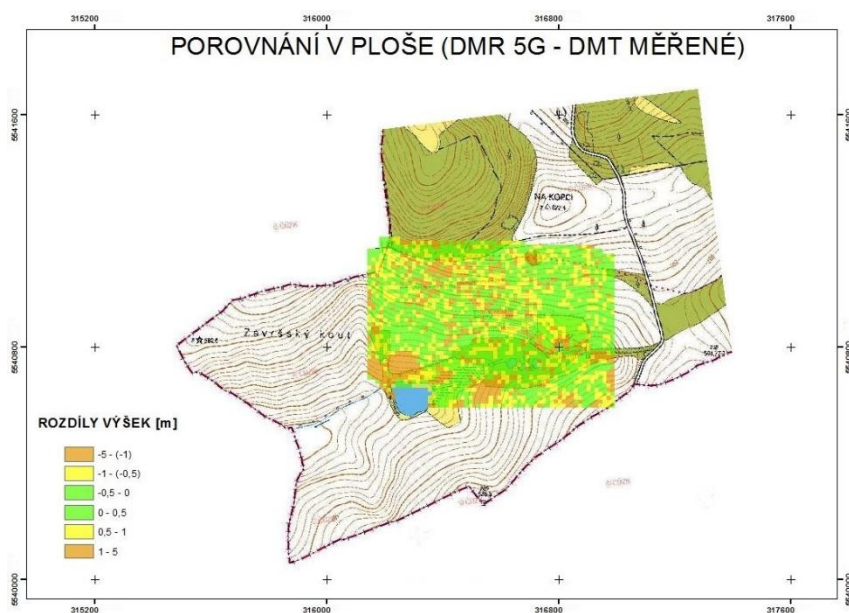
Obr. 17: Znázornění rozdílu DMR 5G – SRTM CGIAR



Obr. 18: Znázornění rozdílu DMR 5G – SRTM



Obr. 19: Znázornění rozdílu DMR 5G – ASTER



Obr. 20: Znázornění rozdílu DMR 5G – DMT MĚŘENÉ

Podkladová mapa pro obr.17 – 20 byla získána z WMS služby z [20].

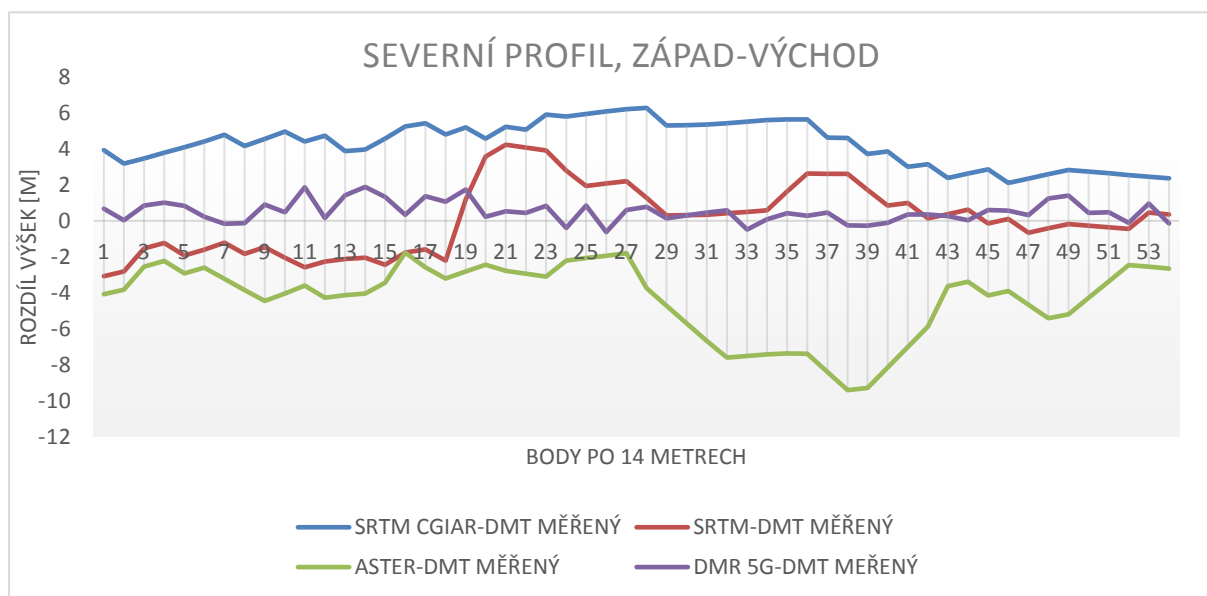
8.3 Porovnání pomocí profilů

Pomocí funkce *raster to point* byla vygenerována pravidelná síť bodů nad digitálním modelem terénu z měřených bodů a poté pomocí grafické selekce vybrány body, jimiž profily prochází. Aby se s vybranými body profilů dalo dále pracovat, bylo třeba je uložit jako samostatný *shapefile* (pro každý profil jeden).

Pro připsání jednotlivých výšek z ostatních modelů do atributové tabulky profilů, byla použita funkce *Extract multi values to point*.

Atributové tabulky profilů byly vyexportovány do programu Excel, kde od sebe byly odečteny výšky z jednotlivých modelů od výšek DMT z měřených bodů. Z těchto rozdílů byl vytvořen pro každý profil porovnávací graf.

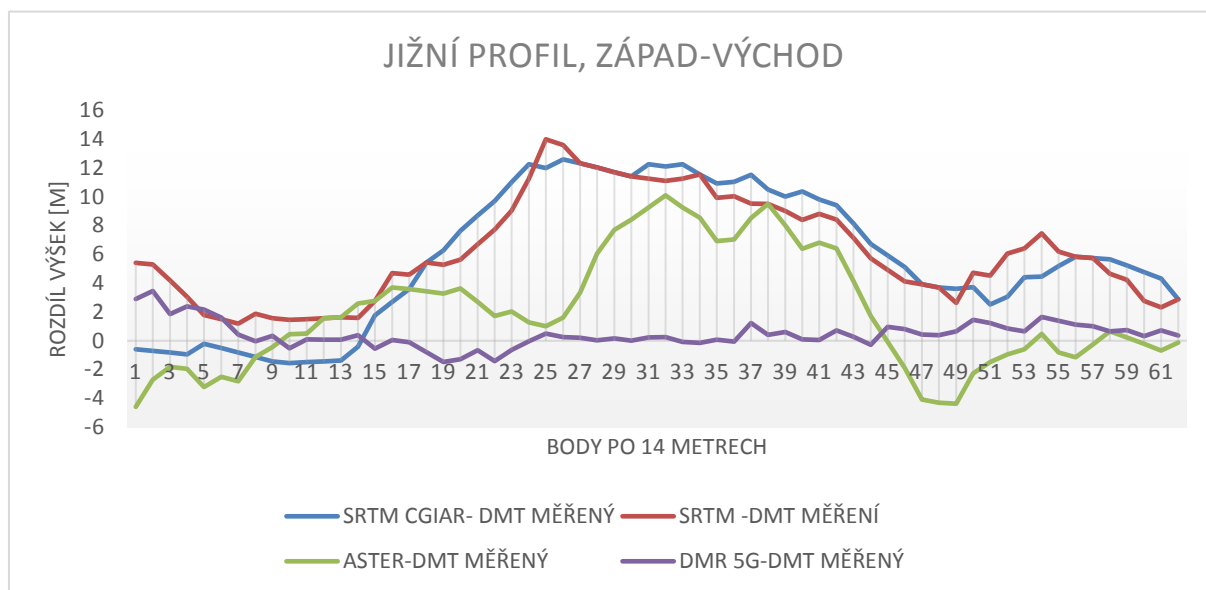
8.3.1 Severní profil, západ - východ



Graf 9: Porovnání rozdílů výšek v severním profilu, západ-východ

Z grafu severního profilu západ-východ je vidět, že model DMR 5G nabývá nejméně výškových odchylek od modelu z měřených hodnot. Největších hodnot nabývá model ASTER.

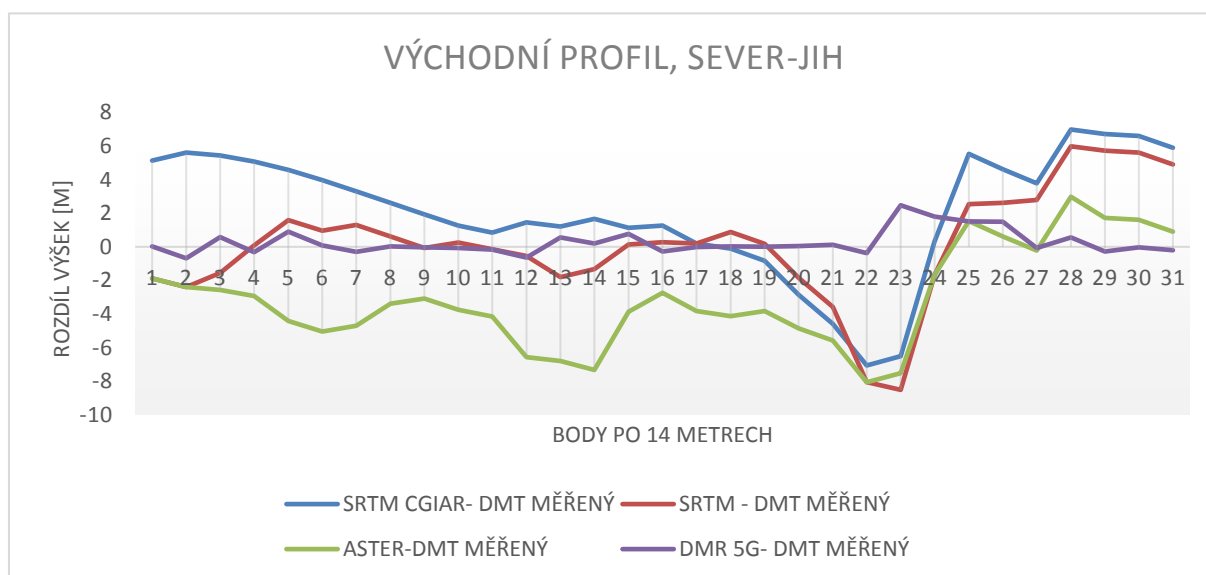
8.3.2 Jižní profil, západ - východ



Graf 10: Porovnání rozdílů výšek v jižním profilu, západ-východ

Největších výškových rozdílů dosahuje dle grafu č.10 model SRTM a nejmenších model DMR 5G.

8.3.3 Východní profil, sever - jih



Graf 11: Porovnání rozdílů výšek ve východním profilu, sever-jih

Z grafu východního profilu sever jih je patrné, že model DMR 5G má nejmenší odchylky od modelu z měřených dat. Nejvyšší odchylky nabývá model SRTM, ale jen v jednom úseku, kdežto model ASTER má vysoké odchylky téměř po celém profilu, proto ho lze považovat za méně přesný.

9 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnání přesnosti volně dostupných digitálních modelů reliéfu s digitálním modelem terénu z naměřených dat v okolí sopky Železná hůrka. Tyto modely používáme pro topografickou redukci měřených gravimetrických dat.

Pro vyhotovení práce bylo třeba nejdříve získat digitální modely reliéfu ve vhodném formátu (GeoTIFF). Poté se musel určit jednotný souřadný a výškový systém. Souřadný a výškový systém byl zvolen na základě měřených dat a to souřadný systém ETRS 1989 UTM Zone 33N a výškový systém Balt po vyrovnání. Vzhledem k rozdílnosti souřadných a výškových systémů bylo třeba provést transformaci. Poté byly data zpracována tak, aby mezi nimi bylo možné provést porovnání. Při porovnání v ploše, nastal problém v rozlišení mezi modely SRTM CGIAR, SRTM a ASTER oproti modelu DMR 5G. Vzhledem k rozlišení globálních modelů a velikosti porovnávaného území, bylo kvůli lepšímu zobrazení rozdílů provedeno převzorkování těchto modelů.

První metodou porovnání bylo porovnání skupinou měřených bodů. V tomto porovnání byly od výšek měřených bodů odečteny výšky jednotlivých modelů.

Nejlepší výsledky prokazoval digitální model reliéfu DMR 5G, kde se v intervalu (-2) – 2 metry nachází 96,9% bodů. Nejvyšší rozdíl byl -3,95 m. Nejhorší výsledky byly zjištěny u modelu ASTER, kde se na stejném intervalu nachází 23,7% bodů a nejvyšší rozdíl je -11,70 metrů. Model SRTM CGIAR měl na stejném intervalu 35,4% bodů s největším rozdílem -12,46 metru a model SRTM má na tomto intervalu 48,3% bodů a největší rozdíl je -13,05 metrů. V intervalu (-5)m – 5m leží u modelu SRTM CGIAR 91,1% bodů, u modelu SRTM 91,2% bodů a u modelu ASTER 56,5% bodů. Model DMR 5G nebyl do porovnání v tomto intervalu zahrnut, neboť nedosahuje takových výškových rozdílů.

Při porovnání modelů skupinou měřených bodů můžeme říct, že nejlépe pokrývá zájmové území model DMR 5G poté model SRTM a SRTM CGIAR a nejhůře model ASTER.

Druhá metoda byla plošné porovnání, kde můžeme po vizuálním porovnání rozdílových rastrů usoudit, že nejlepších hodnot nabývá model DMR 5G, poté model SRTM, následně SRTM CGIAR a nejhorší výsledky vykazuje model ASTER. V intervalu (-2) – 2 metry leží 97,0% bodů u rozdílů modelu DMR 5G a DMT z měřených bodů. U rozdílů mezi DMR 5G a SRTM CGIAR se v tomto intervalu nachází 57,8% bodů, 48,2% bodů leží v tomto intervalu u modelu SRTM a 21,7% bodů se v intervalu nachází u modelu ASTER.

Z plošného porovnání modelů je patrné, že největších rozdílů nabývají modely v zalesněných oblastech a k větším rozdílům dochází také na strmých svazích.

Třetí metodou bylo porovnání pomocí vytvoření tří profilů.

Ze severního profilu západ-východ je vidět, že modely SRTM a DMR 5G mají nejmenší výškové rozdíly, z toho model DMR 5G je přesnější. Modely SRTM CGIAR a ASTER je pokrytí v místě profilu o dost horší. Model SRTM CGIAR se zde pohybuje v kladných rozdílech, kdežto model ASTER v záporných .

U jižního profilu západ-východ je jednoznačně nejpřesnější model DMR 5G. Modely SRTM CGIAR a SRTM se s rozdíly pohybují velmi podobně a model ASTER prokazuje menší

rozdíly než modely SRTM a SRTM CGIAR. Vzhledem k tomu, že tento profil vede skrz zalesněné území, lze usoudit, že na testovaném území má model ASTER lépe zpracované pokrytí zalesněných ploch než modely SRTM a SRTM CGIAR.

U západního profilu sever-jih se výškové rozdíly pohybují u modelů SRTM CGIAR a SRTM velice podobně, ale ve výsledku nabývá horších hodnot model SRTM CGIAR. Nejlepší výsledky prokazuje model DMR 5G a nejhorší model ASTER.

Nejlepší pokrytí terénu tedy nabízí model DMR 5G. Kvalitní výsledky nabízí také model SRTM ovšem s horším zpracováním v zalesněných oblastech. Model SRTM CGIAR nedosahuje až takové přesnosti jako SRTM a v zalesněných plochách dochází k vysokým rozdílům výšek. U modelu ASTER dochází k nejhorším výsledkům na svazích, ovšem v zalesněných oblastech má lepší výsledky než modely SRTM a SRTM CGIAR.

10 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] GEY2 [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
http://www.k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GEY2/pred_4_Metrologie_DMT.pdf
- [2] SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1 – CGIAR-CSI. *CGIAR-CSI – Consortium for Spatial Information* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
<https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>
- [3] 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
- [4] Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. 2017, ČÚZK. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(isdmbsejuka31kelctuwjji\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(isdmbsejuka31kelctuwjji))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)
- [5] EarthExplorer – Home. *EarthExplorer – Home* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
<https://earthexplorer.usgs.gov>
- [6] USGS EROS Archive – Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. USGS.gov/ Science for a changing world [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- [7] Digitální model terénu [online]. 2007, GISAT. [cit. 2019.05.21.]. Dostupné z:
<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu>
- [8] ASTER Global Digital Elevation Map. *ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- [9] ČADA, V., Doc. Ing., CSc. *Přednáškové texty z geodézie* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupný z:
<https://kgm.zcu.cz/studium/gen1/html/index.html>
- [10] Kaplan, V. Keprtová, K. Konečný, M. Stachoň, Z. Tajovská. K. *Multimediální učebnice*. [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
<http://oldgeogr.muni.cz/ucebnice/kartografie/obsah.php?show=80&&jazyk=cz>

- [11] ETRS89 — Školení Úvod do (Open Source) GIS. [online]. [cit. 2019-05-20] Dostupné z:
<http://training.gismentors.eu/open-source-gis/soursystemy/etrs89.html>
- [12] Chlup, O.: *Přesné řešení transformace souřadnicových referenčních systémů pomocí PotGIS* [online]. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, katedra matematiky. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
<https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/9855/1/dp.pdf>
- [13] Cimbálník, M.; Mervart, L.: *Vyšší geodézie 1*. ČVUT, 2002, ISBN 80-01-02527-6.
- [14] NGA EGM96 Geoid Calculator [online]. Dostupný z:
<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html?>
- [15] ArcMap - Geografické informační systémy (GIS) - ARCDATA PRAHA. Geografické informační systémy (GIS) - ARCDATA PRAHA [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcmap>
- [16] Studijní článek: Ostatní převody mezi reprezentacemi – Úvod do geografických informačních systémů (GIS). [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z:
<http://old.gis.zcu.cz/studium/ugi/elearning/msgisu06s07cz/default.htm>
- [17] VÚGTK, v.v.i. [online]. Copyright ©3U [cit. 2019-05-23]. Dostupné z:
http://www.vugtk.cz/ingeocalc/media/documents/transformace-vysek_doc.pdf
- [18] CDDIS [online]. [cit. 2019-05-23] Dostupné z:
<https://cddis.nasa.gov/926/egm96/gendesc.html>
- [19] EGM96 - Wikipedia. [online]. [cit. 2019-05-23] Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/EGM96>
- [20] Prohlížečské služby- WMS - úvod [online]. 2017, ČÚZK. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z:
[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(nsau2mkb432ivqf4wr3simhe\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&text=WMS.verejne.uvod&head_tab=sekce-03-gp&menu=311](https://geoportal.cuzk.cz/(S(nsau2mkb432ivqf4wr3simhe))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&text=WMS.verejne.uvod&head_tab=sekce-03-gp&menu=311)

11 Seznam obrázků

Obr. 1 : Rastrový model terénu[1]	10
Obr. 2: Zobrazení plátového modelu nad TIN a rastrem[1]	10
Obr.3: Polyedrický model terénu[1].....	11
Obr. 4: Online verze modelu DMR 5G[5]	12
Obr. 5: Schéma souřadného systému WGS84 [9]	14
Obr. 6: Schéma Křovákova zobrazení[9]	15
Obr. 7 Výšky geoidu EGM96 v metrech [19]	16
Obr. 8: Zobrazení převýšení geoidu (EGM89) a kvazideoidu (Bpv) nad elipsoidem WGS84	18
Obr. 9 Ukázka online kalkulátoru (podklad z [14]).....	19
Obr.10: Ukázka prostředí ArcToolbox	20
Obr. 11: Vstupní hodnoty při importu X,Y,Z dat do ArcMap.....	21
Obr. 12: Princip lineární metody [16].....	21
Obr.13 Ukázka funkce Project raster.....	22
Obr.14 Ukázka funkce Resample.....	22
Obr.15 Ukázka funkce Point to raster	23
Obr. 16: Zobrazení umístění profilů (podkladová mapa z [20])	24
Obr. 17: Znázornění rozdílu DMR 5G – SRTM CGIARG.....	27
Obr. 18: Znázornění rozdílu DMR 5G – SRTM	27
Obr. 19: Znázornění rozdílu DMR 5G – ASTER	28
Obr. 20: Znázornění rozdílu DMR 5G – DMT MĚŘENÉ	28

12 Seznam tabulek

Tab. 1: Výpočet odchylky mezi geoidem EGM96 a kvazigeoidem Bpv	19
Tab. 2: Statistické hodnoty pro rozdíly výšek mezi měřenými hodnotami a modely SRTM CGIAR, SRTM , ASTER a DMR 5G.....	26

13 Seznam grafů

Grafy 1-4: Histogramy rozdílů výšek.....	25
Graf 5-8: Histogramy pro intervaly rozdílů výšek mezi modely DMR 5G a SRTM CGIAR.....	26
Graf 9: Porovnání rozdílů výšek v severním profilu, západ-východ	29
Graf 10: Porovnání rozdílů výšek v jižním profilu, západ-východ	30
Graf 11: Porovnání rozdílů výšek ve východním profilu, sever-jih.....	30

14 Přílohy

14.1 Tištěné

- Příloha 1: Výkres rozdílových rastrů DMR 5G-SRTM
- Příloha 2: Výkres rozdílových rastrů DMR 5G-SRTM CGIAR
- Příloha 3: Výkres rozdílových rastrů DMR 5G-ASTER
- Příloha 4: Výkres rozdílových rastrů DMR 5G- DMT z měřených bodů

14.2 Digitální

- Příloha 5: Tabulka výšek pro plošné porovnání DMR5G - ASTER, SRTM, SRTM CGIAR
- Příloha 6: Tabulka výšek pro plošné porovnání DMR5G - DMT z měřených bodů
- Příloha 7: Originál DMR ASTER
- Příloha 8: Originál DMR SRTM
- Příloha 9: Originál DMR SRTM CGIAR (jen DVD)
- Příloha 10: Tabulka výšek pro porovnání měřených bodů - ASTER, SRTM, SRTM CGIAR
- Příloha 11: Tabulka výšek pro porovnání měřených bodů – DMR 5G

Pozn. Model DMR 5G nemohl být kvůli smlouvě s ČÚZK poskytnut.