

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO  
PLÁNOVÁNÍ**



**PŘESNOST CHARAKTERISTIK VODNÍCH TOKŮ ODVOZENÝCH  
Z DIGITÁLNÍCH MODELŮ TERÉNU RŮZNÉHO ROZLIŠENÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí práce: Ing. VÍTĚZSLAV MOUDRÝ, Ph.D.

Bakalant: IVA BATRLOVÁ

2017

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Iva Batrlová

Aplikovaná ekologie

Název práce

Přesnost charakteristik vodních toků odvozených z digitálních modelů terénu různého rozlišení

Název anglicky

Accuracy of stream characteristics derived from digital elevation models of various resolution

---

Cíle práce

Cílem práce je posoudit použitelnost digitálních modelů terénu pro odvození charakteristik vodních toků (např. svažítost).

- Jak se liší přesnost volně dostupných globálních modelů terénu (např. SRTM) od v Česku dostupného DMR5G?
- Dosahuje DMR5G přesnosti udávané CUZK?
- Lze modely s hrubým rozlišením použít pro odvození charakteristik vodních toků?

Metodika

Digitální modely terénu (DEM) jsou zásadním vstupem v mnoha odvětvích environmentálního modelování (např. modelování druhové distribuce). V současné době lze nalézt různé zdroje DEM, které jsou obvykle získány odlišnými metodami (a tudíž mají různé rozlišení a vertikální přesnost). Mezi globálně a volně dostupné patří SRTM (rozlišení 30m). Na území ČR je navíc dostupný model terénu DMR5G (rozlišení 2m) a pro KRNP také velmi přesná data leteckého laserového skenování (LiDAR). Autorka se v literární rešerši zaměří na dostupné digitální modely terénu, jejich kvalitu a použití v modelech druhové distribuce (zejména druhů obývajících vodní toky). Vybrané modely terénu porovná s vlastním měřením na území Krkonošského národního parku a zhodnotí jejich vhodnost pro odvození charakteristik vodních toků (např. svažítost).

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

---

Doporučené zdroje informací

- Deng, Y., Wilson, J. P., & Bauer, B. O. (2007). DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(2), 187-213.
- Domisch, S., Jähnig, S. C., Simaika, J. P., Kuemmerlen, M., & Stoll, S. (2015). Application of species distribution models in stream ecosystems: the challenges of spatial and temporal scale, environmental predictors and species occurrence data. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 186(1-2), 45-61.
- Józsa, E., Fábrián, S. Á., & Kovács, M. (2014). An evaluation of EU-DEM in comparison with ASTERGDDEM, SRTM and contour-based DEMs over the Eastern Mecsek Mountains. *Hung. Geog. Bull*, 63, 401-423.
- Kuemmerlen, M., Schmalz, B., Guse, B., Cai, Q., Fohrer, N., & Jähnig, S. C. (2014). Integrating catchment properties in small scale species distribution models of stream macroinvertebrates. *Ecological Modelling*, 277, 77-86.
- Tarquini, S., Vinci, S., Favalli, M., Doumaz, F., Fornaciai, A., & Nannipieri, L. (2012). Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph-mode exploration via the web. *Computers & geosciences*, 38(1), 168-170
- Vaze, J., Teng, J., & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software*, 25(10), 1086-1098.
- 

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 4. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 09. 04. 2017

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze 25.4.2017

.....

podpis

## **Poděkování**

Poděkování patří mému vedoucímu, Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za jeho čas a ochotu při řešení mé práce a za odborné rady a poskytnutou literaturu.

Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům za trpělivost a podporu.

## Abstrakt

Digitální modely terénu reprezentují topografický povrch a často i veškeré stavby a objekty, které se na něm nachází. V současné době roste počet digitálních modelů, které mají potenciál získat přesné digitální informace o skutečném světě, které jsou nezbytné pro správné uvažování při tvorbě a aplikaci následných výstupů. Tato práce se zabývá analýzou veřejně dostupných dat DTM na území České republiky a jejich praktickým využitím při určování charakteristik vodních toků jako například svažitosti nebo odvozování sítě vodních toků. Také posuzuje výškovou přesnost těchto modelů a zkoumá možnosti agregace DTM. Hlavními datovými zdroji byly modely SRTM30 (28 x 28 m), DMR 4G (5 x 5 m) a DMR 5G (2 x 2 m). K porovnávání přesnosti těchto modelů byla použita data terénního měření pomocí GPS stanice Leica 1200. Dle zjištěných výsledků se jako vhodný datový zdroj jeví DMR 5G, který nejlépe zachycuje rozmanitost terénu. DMR 5G v zájmovém území Krkonošského národního parku dosahoval celkové přesnosti (RMSE) 0,40 m, konkrétně 0,3 m v odkrytém terénu a 0,45 m v zalesněném terénu. Tyto hodnoty se neshodují s hodnotami, které udává ČÚZK (0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu). DMR 4G dosahoval přesnosti 0,84 m v odkrytém terénu a 0,94 m v zalesněném terénu, s údaji z ČÚZK (0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu) se tak shodují jen data ze zalesněných oblastí. SRTM30 dosahoval RMSE 15,82 m, která nespĺňuje udávaný předpoklad necelých 10 m. To bylo způsobeno především členitým charakterem terénu a tím, že SRTM30 v zalesněných oblastech udává výškové hodnoty porostu. DTM o větší přesnosti jsou vhodné jak pro výpočet odvozených charakteristik terénu, tak i pro agregaci těchto na nižší rozlišení. Neboť zachycují reálný terén lépe než DTM o nižším výchozím rozlišení.

Klíčová slova: digitální model terénu, digitální výškový model, modelování druhové distribuce, agregace, rozlišení, RMSE

## Abstract

Digital terrain models represent topographic surface and in many cases buildings and objects on top of it. Nowadays the number of digital terrain models is increasing. These models show great potential in accessing precise digital information about the real world, which is necessary for correct thinking when it comes to making and application of subsequent outputs. This thesis focuses on the analysis of publicly accessible digital terrain models in area of the Czech Republic. It deals with its practical use in determining derived stream characteristics such as slope or modelling of the watercourse network. It also evaluates the elevation accuracy of these models and examines the possibilities of data aggregation. Main data sources used in this thesis were SRTM30 (28 x 28 m), DMR 4G (5 x 5 m) and DMR 5G (2 x 2 m). To compare accuracy of these models digital data collected from terrain with GPS station Leica 1200 measuring were used. Per the results DMR 5G is the most suitable data source as it represents the variety of the terrain the best. DMR 5G data in the Krkonoše mountains national park reached the total accuracy (RMSE) of 0,40 m, specifically 0,3 m in non-forested terrain and 0,45 m in forested terrain, which does not meet the accuracy information from ČÚZK (0,18 m in non-forested terrain and 0,3 m in forested terrain). DMR 4G m reached the accuracy of 0,84 m in non-forested terrain and 0,94 m in forested terrain, only the values from the forested terrain matched the data from ČÚZK (0,3 m in non-forested terrain and 1 m in forested terrain). SRTM30 RMSE came out to be 15,82 m, which does not meet the stated assumption of less than 10 m. This was mainly due to the rugged nature of the terrain and by the fact that SRTM30 indicates the height values of the forested cover. More precise DTMs are useful for determining derived stream characteristics and for aggregation of these data to lower resolution, as it represents the real terrain characteristics better than DTMs with lower resolution in default.

Key words: digital terrain model, digital elevation model, species distribution modelling, aggregation, resolution, RMSE

## Obsah

Seznam použitých zkratké.....	10
1 Úvod.....	11
2 Cíle práce.....	12
3 Literární rešerše .....	13
3.1 DTM (Digital terrain model) .....	13
3.1.1 Terminologie DTM .....	13
3.2 Vektorová reprezentace .....	14
3.3 Rastrová reprezentace .....	16
3.4 Odvozené charakteristiky terénu.....	17
3.4.1 Svažitosť (slope) .....	18
3.4.2 Expozice ke světovým stranám (aspect) .....	19
3.4.3 Zakřivení (curvature).....	20
3.5 Metody sběru digitálních dat:.....	21
3.5.1 LiDAR (Light Detection and Rangig) .....	21
3.6 Tvorba DTM.....	22
3.7 Dostupné DEM .....	23
3.7.1 ASTER GDEM .....	23
3.7.2 SRTM DEM .....	24
3.7.3 DEM v České republice.....	25
3.7.4 ZABAGED ® .....	26
3.8 SDM (Species distribution modelling).....	27
4 Metodika.....	29
4.1 Zájmové území .....	29
4.2 Vstupní data .....	29
4.3 Získání terénních dat.....	30
4.4 Úprava dat.....	31
4.5 Výšková přesnost dat.....	31
4.6 Analýzy prováděné v prostředí ArcGIS.....	32
4.6.1 Rozdíl SRTM30 a DMR 5G .....	32
4.6.2 Agregace DMR 5G .....	33
4.6.3 Analýzy vodních toků .....	33
4.6.4 Svažitosť vodních toků .....	34
5 Výsledky .....	36
5.1 Digitální model terénu .....	36



5.2	Rozdíl SRTM30 a DMR 5G .....	36
5.3	Agregace DMR 5G .....	38
5.4	Analýzy vodních toků .....	39
5.5	Svažitost .....	42
5.6	Výsledné hodnoty přesnosti výškových dat.....	45
6	Diskuse .....	47
7	Závěr.....	50
8	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	51

## Seznam použitých zkratk

ALS	Airborne laser scanning
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ČUZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
DEM	Digital elevation model – digitální výškový model
DHM	Digital height model
DMP	Digitální model povrchu
DMP 1G	Digitální model povrchu 1. generace
DMR	Digital relieve model – digitální model reliéfu
DMR 4G	Digitální model reliéfu 4. generace
DMR 5G	Digitální model reliéfu 5. generace
DPZ	Dálkový průzkum Země
DSM	Digital surface model – digitální model povrchu
DTM	Digital terrain model – digitální model terénu
GDEM	Global digital elevation model – globální výškový model
GIS	Geographic information system
GNSS	Global navigation satellite system
GPS	Global positioning system
KRNAP	Krkonošský národní park
LIDAR	Light Detection and Ranging
MAV	Mean absolute value
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
RMSE	Root mean square error
SDM	Species distribution modelling
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangulated Irregular Network
ZABAGED <sup>®</sup>	Základní báze geografických dat

# 1 Úvod

Digitální modely terénu, jakožto nástroj moderní doby, reprezentují zemský povrch a umožňují uskutečňování stále více topografických technik, analýz a vizualizací. Jejich přesnost a kvalita se nadále vyvíjí současně s rozvojem technologií, které umožňují jejich tvorbu. Jelikož je zemský povrch propojen s ostatními vlivy a procesy, které se na něm odehrávají, umožňuje jeho znalost lepší pochopení povahy a rozsahu atmosférických, geomorfologických či například hydrologických procesů (Wilson, 2012). Geografické informační systémy umožňují získávání, ukládání, analýzu a vizualizaci dat digitálních modelů terénu a snaží se o co nejvěrnější zachycení reálných charakteristik terénu, neboť přesnost výstupů odvozených z těchto modelů se odvíjí od kvality i kvantity vstupních informací (Martin et al., 2005). V posledních letech vzniklo několik výškových modelů, které jsou dostupné zdarma pro celý svět a mohou být využívány v mnoha odvětvích (Santillana et al., 2016). Aktuálně dochází ke stále větší oblibě LiDARových dat, která disponují vysokou přesností. Jejich sběr je však finančně náročný a uplatňuje se především při řešení problémů lokálního charakteru. Digitální modely terénu se s velkým úspěchem uplatňují například v modelování druhové distribuce (Lassueur et al., 2006), ve vojenství, v plánování měst, managementu a ochraně životního prostředí, hydrologickém modelování, nebo v plánování dopravy a telekomunikačních sítí (Hubacek et al., 2014).

Bakalářská práce se zabývá možným využitím digitálních modelů terénu různého původu a rozlišení v analýzách odvozených charakteristik vodních toků. První část práce se věnuje literární rešerši, která osvětluje pojmy spojené s problematikou digitálních modelů terénu a popisuje jejich základní charakteristiky, je objasněn pojem DTM a další základní pojmy užívané v digitálním modelování. Dále popisuje dostupné digitální modely terénu a představuje pojem modelování druhové distribuce, který v současné době nabývá na popularitě. Druhá část je zasvěcena praktickým analýzám těchto modelů v prostředí geografických informačních systémů, konkrétně v programu ArcGIS. Práce využívá tři druhy digitálních modelů, a to globální model SRTM30 (28 x 28 m) a pro Českou republiku dostupný DMR 4G (5 x 5 m) a DMR 5G (2 x 2 m). Porovnává udávanou přesnost (RMSE) s vlastními daty terénního měření. Dále je zkoumán potenciál využití DMR 5G v modelování sítí vodních toků. Z této jsou následně srovnávány výsledné hodnoty svažitosti.

## 2 Cíle práce

Cílem práce je posoudit použitelnost digitálních modelů terénu pro odvození charakteristik vodních toků (např. svažitosti) a zhodnocení, zda k těmto úkonům lze použít modely s hrubým rozlišením. Dále:

- zhodnocení rozdílů přesnosti volně dostupného globálního modelu terénu SRTM30 od v České republice dostupného DMR 5G
- zhodnocení, zda DMR 5G dosahuje přesnosti udávané ČÚZK
- porovnání přesnosti sítě vodních toků DIBAVOD s toky odvozenými z DTM DMR 5G a SRTM30.

### 3 Literární rešerše

#### 3.1 DTM (Digital terrain model)

Zemský povrch hraje základní roli při regulaci atmosférických, geomorfologických, hydrologických a ekologických procesů, které na něj působí (Hutchinson et Gallant, 2000). Geografické informační systémy (GIS) umožňují provádět rozličné analýzy a simulace procesů reálného světa v digitálním prostředí a na základě těchto výsledků tvořit teorie a předpovědi pro danou oblast. Digitální modely terénu, anglicky digital terrain models (dále DTM), se často využívají především v zemědělství a vodním managementu, v průmyslu, při plánování měst a dopravy, v dálkovém průzkumu Země a ve vojenství (Hubacek et al., 2014), přesto jejich možností využití nadále přibývá a stávají se tak nedílnou součástí každodenních životů.

Digitální modely terénu se používají v geoinformatice již od 50. let 20. století, kdy byly poprvé představeny technickými inženýry v Massachusettském technologickém institutu. Jejich definice tehdy zněla (Kennie et Petrie (1990) in Rahman,1994)):

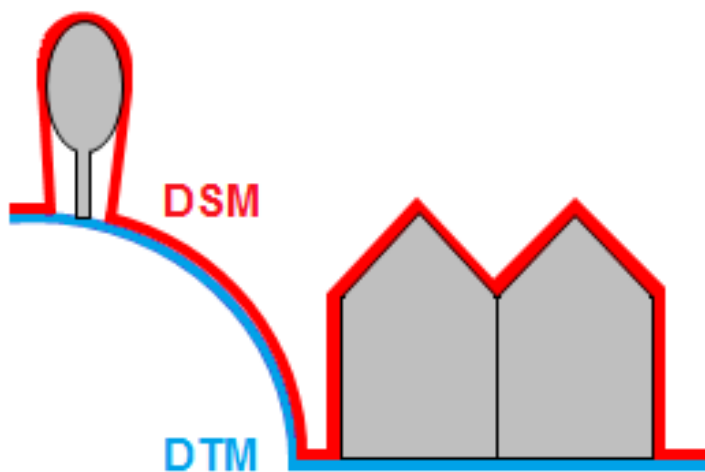
*„Digitální model terénu je jednoduše statistická reprezentace spojitého zemského povrchu pomocí vysokého počtu vybraných bodů se známými souřadnicemi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  v libovolném souřadnicovém poli“*

Kolejka (2013) popisuje DTM jako nosnou plochu, která slouží jako podklad statické reprezentaci a simulaci dynamických jevů. Datové vrstvy naložené na takový podklad pak zařazují sledovaný či modelovaný jev do souvislosti s parametry prostředí.

##### 3.1.1 Terminologie DTM

Od počátků DTM bylo vyhrazeno několik dalších pojmů jako DEM (digital elevation model) – digitální výškový model se synonymem DHM (digital height model), dále DSM (digital surface model) – digitální model povrchu (česky DMP), který popisuje terén i s vegetací a objekty, které se na něm nachází. V České republice je pro termín DTM užíván český ekvivalent digitální model reliéfu (DMR). Přes rozdílné pojmenování však všechny reprezentují stejný fenomén, a to topografii zemského povrchu (Rahman,1984). Pojmy DTM a DEM patří mezi nejčastěji užívané a jsou často používány jako synonyma. V mnoha případech dochází k záměně jejich významu. Správně je DEM užíván jako nadřazený pojem pro DTM a DSM a při jeho

užívání je nezbytné zmínit, jaký typ povrchu konkrétně popisuje. DTM reprezentuje reliéf terénu bez vegetace a objektů (Köthe et Bock, 2009). Pod pojmem DTM se může chápat i zobrazení odvozených charakteristik terénu jako svažítost nebo expozice ke světovým stranám (El-Sheimy et al., 2005). Dnes už jsou DTM nedílnou součástí zpracování dat v prostředí GIS i mimo něj. Jelikož se v posledních 30 letech rapidně vyvinuly zdroje i metody zpracování terénních dat, došlo současně k nárůstu přesnějších modelů terénu s lepším rozlišením, které jsou dostupné globálně například Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) a Shuttle radar topography mission (SRTM). Také rychle roste spolehlivost a obliba Light detection and ranging (LiDAR) dat díky své přesnosti a nyní tento zdroj dat dominuje v projektech po celém světě (Wilson, 2012). Datová struktura DTM může být jak pravidelná v podobě pravidelného rastru, tak nepravidelná v podobě nepravidelné trojúhelníkové sítě (Triangulated Irregular Network – TIN), další prvky této struktury mohou být vyjádřeny vektorovou reprezentací (Rahman, 1984).



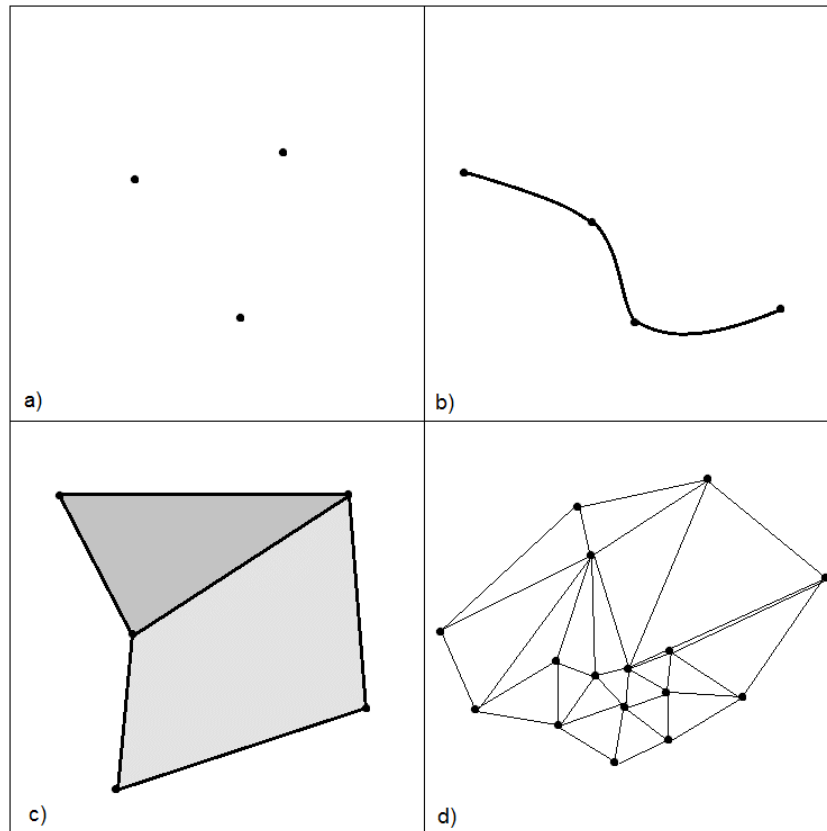
Obr. 1 Znáznornění výškových modelů: DSM – digitální model povrchu začleňující objekty a vegetaci, DTM – digitální model terénu

### 3.2 Vektorová reprezentace

Vektorová reprezentace udává prostorová data v bodech, které jsou dány jednoznačnými souřadnicemi. Seznamy těchto bodů tvoří linie, plochy neboli polygony a povrchy (Jedlička et Mentlík 2002).

Definici vektorových prvků udává Rapant (2002) a Hrubý (2006) následovně:

- Bod (0D objekt) - je základní bezrozměrný geometrický prvek vektorových objektů. Je udán souřadnicemi a jeho topologickou reprezentací je uzel. Body představují místa výskytu určitého jevu nebo umístění malých objektů.
- Linie (1D objekt) - je tvořena posloupností vektorů s definovaným počátkem i koncem. Počáteční a koncové body linie se označují jako uzly. Mezilehlé body, kde se potkávají dvě hrany jsou vertexy neboli vrcholy. Liniové objekty se mohou navzájem propojovat či protínat pouze v uzlech. Reprezentují řeky, vodovodní a silniční sítě, vrstevnice či rozvody energií.
- Polygon (2D objekt/plocha) - je tvořen uzavřenou posloupností linií, jejichž koncový a počáteční uzel je shodný. Dva polygony musí být odděleny pouze jedinou linií. Polygony mohou představovat katastrální pozemky či vodní a lesní plochy.
- TIN (3D objekt) - (Triangulated Irregular Network) – nepravidelná trojúhelníková síť je vektorová reprezentace povrchu. Jednotlivé trojúhelníky sítě jsou definovány třemi body se specifickou nadmořskou výškou, umístěnými kdekoli v prostoru. Jejich hrany kopírují důležité orografické linie, například linie vodních toků, hřbetnice a údolnice (Jedlička et Mentlík 2002).

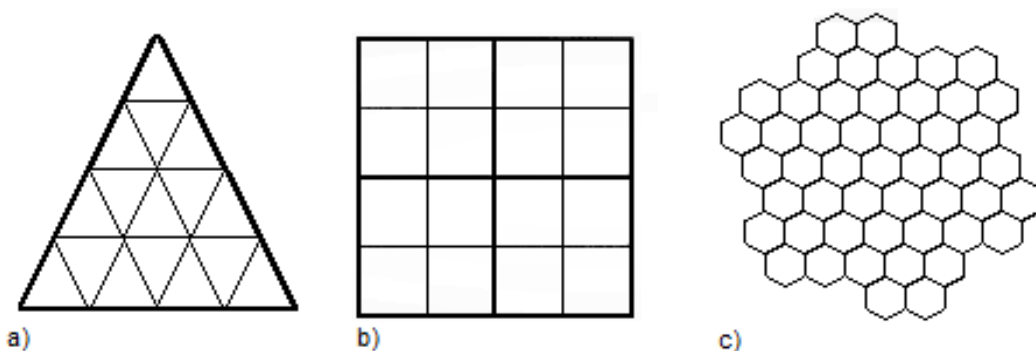


Obr. 2 Typy vektorové reprezentace: a) body, b) linie, c) polygony, d) TIN

### 3.3 Rastrová reprezentace

Rastrové struktury jsou využívány k reprezentaci spojitého jevu nad zvolenou oblastí. Základním stavebním prvkem rastrové struktury je buňka neboli cell, pixel. Tyto buňky jsou organizovány do mozaiky, kde jednotlivě obsahují atributové hodnoty, které reprezentují daný jev. Může se jednat o nadmořskou výšku, vyjádření terénu, osvětlení, teplotu, obrazy dálkového průzkumu Země či rozložení půdy a vegetace. Velikost buňky udává rozlišení rastru, tedy jak velké je ve skutečnosti území, které reprezentuje. Používají se trojúhelníkové, čtyřúhelníkové a hexagonální tvary buněk. Nejčastějším typem rastru je pravidelný čtvercový, díky snadné reprezentaci. (Pacina et Brejcha, 2014). Čtvercová mřížka je kompatibilní se strukturami datových typů běžně používaných v informatice, se způsobem práce periferních počítačových zařízení používaných v GIS jako skener, monitor či tiskárna a s pravoúhlými karteziánskými systémy (Hrubý, 2006).





Obr. 3 Možné typy buněk rastrové reprezentace: a) trojúhelníková, b) čtvercová, c) hexagonální, upraveno (Hrubý, 2006)

Prostorová souřadnice rastrové buňky je dána jejím středem. Jednotlivé buňky rastru jsou jasně prostorově spjaty se svými sousedními buňkami. Počet těchto sousedních buněk se stanovuje podle zvolené konektivity. Sousední buňky mohou být rozlišeny na (Hrubý, 2006):

- plné – dokonalé sousedy, jedná se o buňky, které mají s buňkou stejný řádek nebo sloupec. Každá buňka má 4 plné sousedy (kromě buněk na okraji vrstvy).
- diagonální sousedy, což jsou další 4 buňky dotýkající se vrcholy.

Tato vnitřní propojenost rastrů umožňuje z okolí každé buňky provádět intuitivní analýzy, které mohou být využity k odvozeným výpočtům povrchu jako svažítost, aniž by došlo k projekční deformaci (Raposo et Samsonov, 2014).

### 3.4 Odvozené charakteristiky terénu

Morfometrické charakteristiky terénu jsou klíčové pro následné GIS analýzy. Mezi nejčastěji používané se řadí svažítost svahu a jeho orientace vůči světovým stranám či zakřivení.

Odvozené charakteristiky terénu se počítají pomocí funkce  $z(x,y)$ , která přiřazuje buňce  $(x,y)$  elevaci  $z$ . Diskretizace derivací je provedena pomocí odhadu vystředěných konečných rozdílů. Vzorce pro výpočet pomocných veličin těchto charakteristik podle Gallant a Wilson (1996):

$$Z_x = \frac{\partial z}{\partial x} \cong \frac{z_2 - z_6}{2h}$$

$$Z_y = \frac{\partial z}{\partial y} \cong \frac{z_8 - z_4}{2h}$$

$$Z_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \cong \frac{z_2 - 2z_9 + z_6}{h^2}$$

$$Z_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \cong \frac{z_8 - 2z_9 + z_4}{h^2}$$

$$Z_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \cong \frac{z_7 - z_1 - z_5 + z_3}{4h^2}$$

kde:

$z_i$  je elevace buňky  $i$ ,

$h$  je rozlišení vertikální výšky

další často užívané veličiny:

$$p = z_x^2 + z_y^2 \qquad q = p + 1$$

### 3.4.1 Svažitost (slope)

Udává změnu výšky reliéfu ve směru největšího spádu. Definuje se jako gradient výšky a obvykle se její hodnoty udávají ve stupních či procentech. 100 % svažitost odpovídá svažitosti o 45°, ve strmých oblastech tak může svažitost přesahovat hodnotu 100 %. Od velikosti svažitosti se odvíjí pohyb vody a jiných materiálů. Jedná se o eminentní vlastnost reliéfu ovlivňující hydrologii a geomorfologii (Penížek et al., 2014).

Následně je pomocí výše uvedených veličin vyjádřena svažitost buňky rovnicí podle Gallant a Wilson (1996):

$$S = \sqrt{p}$$

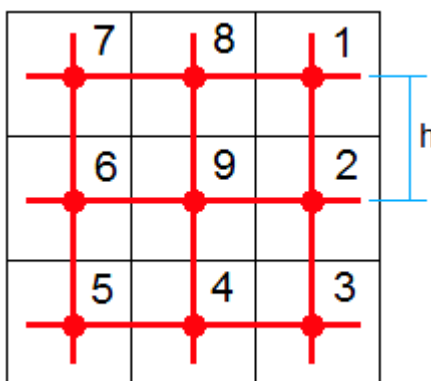
Jednodušší aproximace (D8) umožňuje vyjádření svažitosti pouze pomocí maximální svažitosti v jednom z osmi směrů od dané buňky:

$$S_{D8} = \max_{i=1,8} \frac{z_9 - z_i}{h\phi(i)}$$

kde:

$\phi(i) = 1$  pro plné sousedy ( $i = 2,4,6,8$ ) a

$\phi(i) = \sqrt{2}$  pro diagonální sousedy ( $i = 1,3,5,7$ ).



Obr. 4 Označení jednotlivých buněk a vertikálního rozlišení  $h$  ve schématu okna o velikosti 3x3 buňky (Barták, 2008)

Tyto metody výpočtu vrátí výsledek svažitosti v procentech, úhel svažitosti  $\beta$  se vypočítá pomocí rovnice:

$$\beta = \arctan(S)$$

### 3.4.2 Expozice ke světovým stranám (aspect)

Je stanovena orientací svahu podle jeho největšího spádu, obvykle se měří od severu ve směru hodinových ručiček. Využívá se v první řadě k určování množství dopadajícího slunečního záření, často také k vizualizaci reliéfu. Význam těchto analýz má smysl především v oblastech s větší svažitostí (Penížek, et al., 2014).

Odhad hodnoty expozice podle Gallant a Wilson (1996):

$$\psi = 180^\circ - \arctan\left(\frac{z_y}{z_x}\right) + 90^\circ \left(\frac{z_x}{|z_x|}\right)$$

### 3.4.3 Zakřivení (curvature)

Zakřivení povrchu může být chápáno jako zakřivení linie, tvořené průsečíkem roviny a topografického povrchu. Zakřivení linie je převrácená hodnota poloměru křivosti, jemné křivky tak mají nízkou hodnotu zakřivení, zatímco úzké křivky nabývají vysokých hodnot (Gallant et Wilson, 1996).

Horizontální zakřivení – určuje se jako velikost změn expozice podél vrstevnice, určuje směr a sbíhání toku vody v krajině (Penížek, et al., 2014). Vzniká protnutím vodorovné roviny povrchem terénu. A je vyjádřeno rovnicí (Gallant et Wilson, 1996):

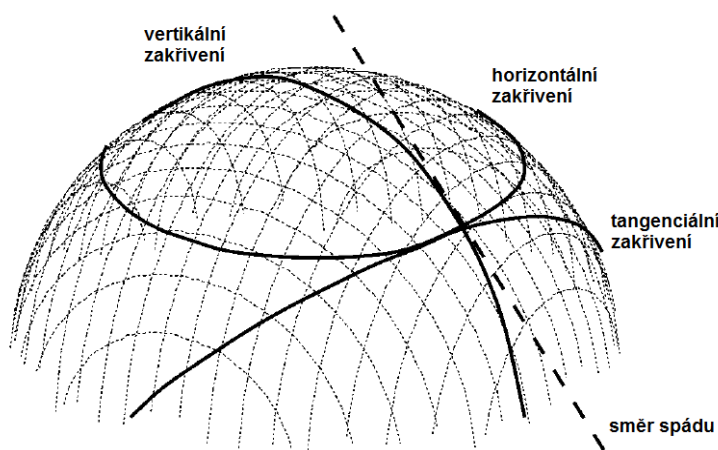
$$K_h = \frac{z_{xx}z_y^2 - 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_x^2}{p^{\frac{3}{2}}}$$

Vertikální zakřivení – je velikost změny sklonu svahu podél vertikální roviny. Má například vliv na změnu rychlosti proudění a sedimentačních proces. Je vyjádřena rovnicí (Gallant et Wilson, 1996):

$$K_v = \frac{z_{xx}z_x^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_y^2}{p^{\frac{1}{2}}q^{\frac{3}{2}}}$$

Tangenciální zakřivení – je zakřivení získané použitím kolmé roviny ke sklonu svahu (Gallant et Wilson, 1996):

$$K_t = \frac{z_{xx}z_x^2 + 2z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_y^2}{p^{\frac{1}{2}}q^{\frac{3}{2}}}$$



Obr. 5 Znárodnění křivosti na kulovité ploše (Schmidt et al., 2003)

### 3.5 Metody sběru digitálních dat:

Volba vhodné metody sběru dat hraje klíčovou roli ve zpracování zájmové oblasti. Při jejím výběru se musí zohlednit velikost území, účel výsledného modelu, požadovaná polohová a výšková přesnost, požadovaná hustota bodů i časové a finanční prostředky. Každá z metod je více či méně vhodná pro některé aplikace (Pacina et Brejcha, 2014).

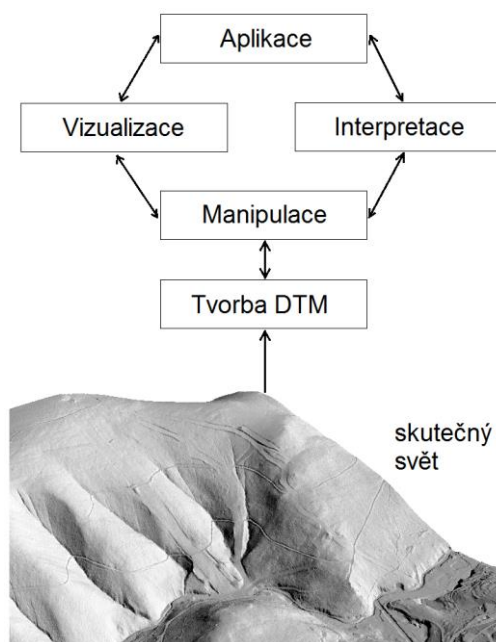
- Přímé metody – primární data získána měřením v terénu. Taková data vznikají za účelem modelování terénu.
  - Kontaktní – data získaná pomocí nivelace, tachymetrie, GNSS (globální družicový polohový systém). Dosahují přesnosti již několika milimetrů a jsou vhodná především pro menší území.
  - Bezkontaktní – data získaná z DPZ (dálkový průzkum Země) – fotogrammetrie, laserové skenování, radarové snímání. Jejich přesnost je v desítkách centimetrů až metrů, hodí se pro mapování rozsáhlých území.
- Nepřímé metody – data vznikají zpracováním již existujících modelů terénu, které nemusí být digitální. Vznikají především pomocí vektorizace a digitalizace výškopisu analogových map. Digitalizaci lze provádět manuálně, s určitým stupněm automatizace či zcela automatizovaně. Přesnost je závislá na měřítku a přesnosti zdrojových map.

#### 3.5.1 LiDAR (Light Detection and Rangig)

LiDAR neboli laserové skenování je metoda využívaná již od 70. let minulého století, ale až v posledních letech se stává čím dál více užívanou. Výhodou laserového skenování je vysoká hustota vzorkování, vysoká vertikální přesnost a možnost oddělení DTM a DSM, což je užitečné při modelování například v zalesněných či zastavěných oblastech, nevýhodou však jsou poměrně vysoké náklady (Wilson, 2012). Užití LiDARových dat je možné pro mapování historických památek, průmyslových provozů, pro tvorbu 3D modelů měst či sledování elektrických vedení. LiDAR funguje na principu dálkoměrného měření pomocí laserového svazku paprsků emitovaných

pulsním nebo fázovým laserem. Svazek paprsků se odrazí zpět od povrchu a senzor zaznamená dobu mezi jeho vysláním a přijetím odrazu. Je potřeba znát přesnou polohu skeneru a přesný směr vyslaného paprsku (Pacina et Brejcha, 2014). V současné době jsou systémy LiDAR schopny detekovat několik odrazů z jednoho laserového paprsku. To se stane, když paprsek narazí na objekt, například vegetační pokryv, který zcela neblokuje průnik paprsku a jeho část pokračuje níž (Reutebuch et al., 2005). Tím, jak efektivně oddělit data terénu od dat povrchu se zabývá například Zhang et al. (2003)

### 3.6 Tvorba DTM



Obr. 6 Hlavní typy práce s DTM (El-Sheimy et al., 2005)

Prvním krokem při tvorbě DTM je získání dat z terénu, která reprezentují reálný svět, jednou z výše uvedených metod sběru dat. Získání dat je ovlivněno mnoha faktory, a mnohdy musí být udělán kompromis mezi požadovanou přesností výsledného modelu a možnými náklady na jeho vytvoření. Následuje manipulace s DTM, kdy dochází k odstranění chyb, filtrování a vyhlazování povrchu a ke konverzi mezi datovými typy. Tyto kroky mohou značně snížit nároky na kapacitu úložného prostoru a čas zpracování. Interpretace zahrnuje analýzu DTM určenou k získání informací pro další zpracování dat nebo modelaci terénu. Následná vizualizace je hlavním prostředkem pro interpretaci výsledků a hraje významnou roli v pochopení

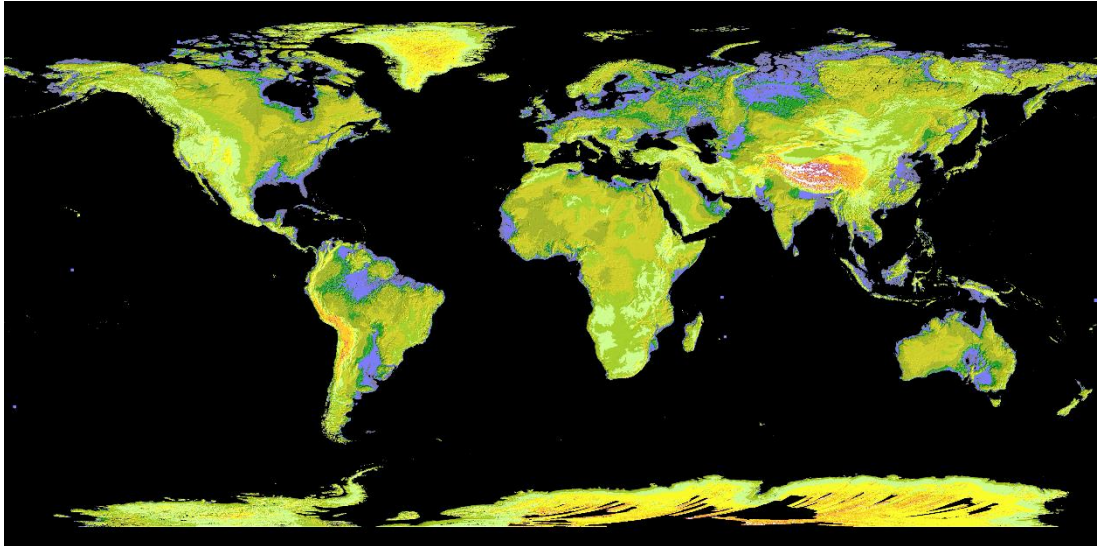
a hodnocení výsledných charakteristik. Může zobrazovat jak DTM jako takový, tak i jeho odvozené charakteristiky. Konečná aplikace představuje uplatnění výsledného modelu, které může být velmi široké, neboť v současné době lze aplikovat DMT na různé problémy v digitálním světě, které pracují s výškovými daty (El-Sheimy et al., 2005).

### **3.7 Dostupné DEM**

#### **3.7.1 ASTER GDEM**

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) neboli multispektrální barevný skener byl nainstalován na družici Terra, jež byla vyslána do vesmíru v prosinci 1999. Sběr dat pro 1. verzi probíhal až do roku 2008 a pro verzi 2 do roku 2010. Podařilo se získat data pro oblast pevniny od 83° severní šířky do 83° jižní šířky s přesností 1 úhlové vteřiny, odpovídající necelým 30 m. Model tak pokrývá 99 % souše s udávanou vertikální přesností 20 m. Aster byl představen veřejnosti v květnu roku 2009, na jeho vývoji se podílelo japonské Ministerstvo ekonomie, obchodu a průmyslu a americká kosmická agentura NASA (Tachikawa et al., 2011).

Senzor ASTER pořizuje data ve čtrnácti spektrálních pásmech – od viditelného až po infračervené záření. Umožňuje stereoskopické snímání dat s prostorovým rozlišením 15 m. Stereoskopické dvojice se dají následně využít k prostorovému zobrazení daného území a k výpočtu výškových poměrů. Tímto způsobem bylo za cca 1 rok zpracováno 1.5 milionu družicových scén. Výsledný produkt ve formě rastrového výškového modelu je volně dostupný například na LP DAAC servu NASA, podmínkou je však registrace a splnění licenčních podmínek (Gisat, 2017).



Obr. 7 Snímek z ASTER GDEM (Aster, 2004)

### 3.7.2 SRTM DEM

Shuttle radar topography mission (SRTM) digital elevation model (DEM) je mezinárodní výzkumný program vytvořený pod záštitou Laboratoře proudového pohonu v NASA a NGA, který funguje na principu radarové interferometrie. Ta umožňuje sběr údajů o nadmořských výškách, ze kterých jsou následně generovány digitální výškové modely terénu a topografické databáze o vysokém rozlišení. Jedním z hlavních cílů SRTM bylo, aby výsledné modely měly globálně konsistentní a známé chyby (Rodriguez et al., 2006). Mise byla zahájena v únoru 2000, jejím cílem bylo získat digitální výšková data povrchu mezi 60° severní šířky a 56° jižní šířky, představující zhruba 80 % zemského povrchu. Raketoplán Endeavour, na němž byly umístěny dvě antény, byl na oběžné dráze po dobu 11 dní.

SRTM datové sady jsou dostupné ve dvou rozlišeních:

- SRTM30 – rozlišení 1 úhlové vteřiny
- SRTM90 – rozlišení 3 úhlových vteřin

1 úhlová vteřina odpovídá na rovníku pixelu o hraně přibližně 30 m.

Přesnost SRTM by měla dosahovat polohové přesnosti 20 m a absolutní chyby výšky menší než 16 m, což odpovídá necelým 10 m úplné střední výškové chyby s 90 % intervalem spolehlivosti (Farr et al., 2007). Data SRTM jsou veřejnosti dostupná ke stažení například přes webové stránky NASA.



### 3.7.3 DEM v České republice

Digitální model reliéfu (DMR) představuje zjednodušený model reálného zemského terénu, bez vegetačního pokryvu, staveb a jiných objektů na zemském povrchu v digitální podobě, ve specifické podrobnosti a přesnosti (Pacina et Brejcha, 2014). V České republice byl v roce 2008 zahájen mapovací projekt snímání celého území metodou leteckého laserového skenování (airborne laser scanning – ALS), na projektu se podílel ČÚZK, Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo obrany. Snímání bylo dokončeno v roce 2013. Laserové skenování umožňuje průchod paprsku vegetací, což značně zvyšuje pravděpodobnost určení výšky skutečného georeliéfu. (Pavelka, 2013) V současné době jsou pro ČR k dispozici 2 typy DMR (ČÚZK, 2016a):

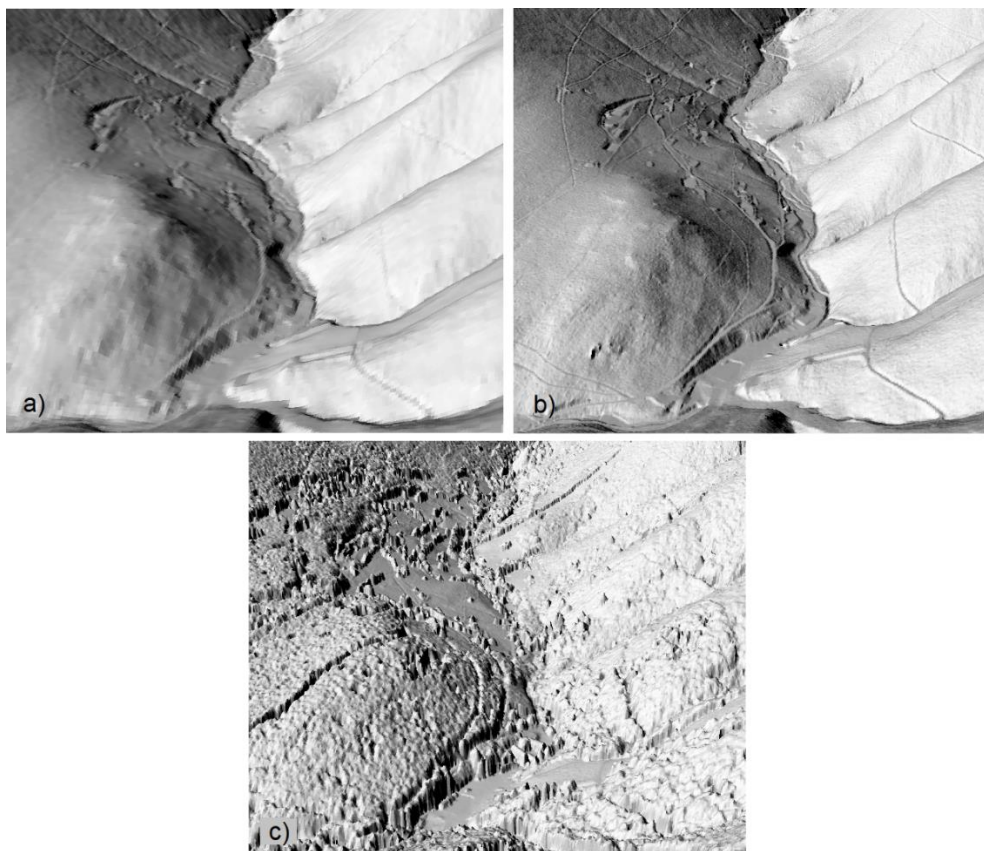
- DMR 4G – digitální model reliéfu České republiky 4. generace o mřížce s rozlišením 5x5 m, definovaný souřadnicemi X, Y, H, kde H představuje nadmořskou výšku. Udávaná přesnost (RMSE) je 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. Model je určen především k analýzám terénních poměrů regionálního charakteru a rozsahu např. při modelování přírodních jevů či rozsáhlých vodohospodářských záměrů.
- DMR 5G – digitální model reliéfu České republiky 5. generace, jehož výšky jsou definovány v nepravidelné trojúhelníkové síti TIN se souřadnicemi X, Y, H, kde H představuje nadmořskou výšku. Je ovšem dostupný i v pravidelné síti s rozlišením 2 x 2 m. Udávaná přesnost (RMSE) je v odkrytém terénu pouhých 0,18 m a 0,3 m v zalesněném terénu. Tento model je vhodný k analýzám terénních poměrů lokálního charakteru, při plánování vodohospodářských a pozemních staveb, nebo modelování přírodních jevů. Je také zdrojovou databází pro tvorbu vrstevnic určených pro mapy velkých měřítek či pro počítačové vizualizace výškopisu na vysoké úrovni podrobnosti.

Pro Českou republiku je dále v rámci stejného projektu dostupný digitální model povrchu (DMP, anglicky DSM) (ČÚZK, 2016a):

- DMP 1G – digitální model povrchu České republiky 1. generace, který je tvořen nepravidelnou trojúhelníkovou sítí TIN a zobrazuje území včetně staveb a rostlinného pokryvu. Je ovšem dostupný i v pravidelné síti o stejném rozlišení jako DMR 5G 2 x 2 m. Udávaná přesnost (RMSE) je 0,4 m pro přesně

vymezené objekty jako budovy a 0,7 m pro neohraničené objekty jako jsou lesy. Tento model je určen k analýzám výškových poměrů terénu a geografických objektů regionálního i lokálního charakteru, např. k analýzám viditelnosti, modelování šíření radiových vln, škodlivých látek v ovzduší nebo pro virtuální simulace pohledů na terén.

Výše uvedené modely terénních dat jsou dostupné ke koupi nebo k prohlížení na webových stránkách ČÚZK.



Obr. 8 a) Porovnání modelů laserového skenování: DMR 4G, b) DMR 5G, c) DMP 1G

#### 3.7.4 ZABAGED®

Základní báze geografických dat České republiky je spravována Zeměměřičským úřadem ve veřejném zájmu. Jedná se o digitální topografický model území ČR odvozený ze Základní mapy České republiky 1: 10 000. V současné době je tvořena 120 typy geografických objektů a obsahuje dvourozměrné prostorové a popisné informace například o sídlech, rozvodných sítích, komunikacích, vodstvu či

chráněných území. Proces tvorby ZABAGED byl zahájen v roce 1995 vektorizací tiskových podkladů. Od roku 2012 je navíc v procesu cílené systematické zpřesňování vybraných typů objektů. Výškopisná část ZABAGED se skládá ze 3 typů vrstevnic se základním intervalem 5, 2 a 1 m, dle charakteru terénu a z výškopisného gridu 10 x 10 m. (ČÚZK, 2016b). Tematickou nástavbou ZABAGED je Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) vzniklá z odpovídajících vrstev ZABAGED, jež je určena pro tvorbu výstupů s vodohospodářskou tematikou (Zbořil et al., 2005).

### **3.8 SDM (Species distribution modelling)**

Species distribution modelling (SDM) neboli modelování (také modely) druhové distribuce slouží jako numerické nástroje, které kombinují pozorování výskytu, respektive abundance druhů s ekologickými odhady. Tyto výstupy jsou používány jako závislé proměnné, které lze vysvětlit různými charakteristikami prostředí neboli faktory. Druhová distribuce tak odráží souhru geografických a ekologických procesů na daném stanovišti. SDM se používají k získání ekologického a vývojového náhledu a k predikci výskytu druhů v různém prostředí, prostoru a čase. Mají využití jak v pozemních, tak i ve sladkovodních a mořských oblastech napříč druhy různých biologických skupin (Elith et Leathwick, 2009) a jsou s relativně velkým úspěchem využívány v různých vědeckých pracích, a to nejen v aplikované ekologii, ochranné populární biologii a genetice, ale i v základních vědách. Nejlépe se s těmito modely manipuluje v prostředí GIS (Guisan et Thuiller, 2005). V pozemním prostředí jde především o analýzy cévnatých rostlin a suchozemských živočichů včetně bezobratlých, které jsou poměrně běžné. Analýzy v mořských a sladkovodních oblastech jsou záležitostí až posledních 5–10 let. Organismy obývající půdy jsou zatím modelovány jen zřídka. Obecně lze u přisedlých živočichů charakterizovat jejich prostředí snadněji i přes širší vliv krajiny. Naproti tomu pohyblivé druhy mají tendenci k využívání zdrojů, které jsou nejednotně rozmístěny v krajině a je tak obtížnější určit konkrétní zdroj a vliv jednotlivých faktorů (Elith et Leathwick, 2009).

Cílem SDM je popsat stanoviště druhu tak přesně, jak jen to je možné za využití nejšetrnějšího modelu. Je však důležité brát v potaz všechny faktory, které mohou mít přímý či nepřímý vliv na druhovou distribuci. SDM by společně s hydrologickými modely mohly být v budoucnu využívány v rámci mezinárodní spolupráce, pokud jde o zachování biodiverzity ve sladkovodních stanovištích a jejich management. Pro

SDM ve sladkovodních ekosystémech je důležitá kvalita a rozlišení vstupních dat. Po zohlednění správných faktorů mají modelové projekce velký potenciál sloužit jako spolehlivé nástroje pro účely managementu a ochrany (Domisch et al., 2015).

Mezi běžně užívané zdroje dat k měření proměnných patří průzkumy přímo v terénu, aktivní a pasivní dálkový průzkum Země, DTM nebo změny půdních, hydrologických, geologických a klimatických poměrů. Rozdělení místa výskytu do trojrozměrného prostoru je velmi podstatné pro vzájemný způsob interakce mezi druhy a životním prostředím. Nedílnou součástí modelování je testování výkonnosti výsledného modelu. Dalším krokem v tvorbě SDM je tedy vytvoření statistického modelu, který předpovídá výskyt a mapuje pravděpodobnost výskytu druhu napříč zájmovou oblastí doprovázený následným testem modelu pro vyčíslení jeho predikční síly. Optimalizovaný model je pak využit k managementu a ochraně daných druhů (Vierling et al., 2008). SDM se těší velké oblibě a jsou zatím jediným dostupným nástrojem k modelování druhové distribuce. Přesto tyto modely zatím nedokážou být zcela přesné a správné, protože není možné zachytit vzájemnou interakci a rozptýlení druhů tak, jak je tomu ve skutečnosti, velký vliv má i vybraný způsob následného testování modelu. (Bahn et McGill, 2013).

Využití DTM v modelování druhové distribuce hraje klíčovou roli, důležitým faktorem je především rozlišení daného modelu. V současné době mnoho aplikací využívá modelů s hrubším rozlišením, které nezohledňují důležité environmentální prediktory a ekologické procesy detekovatelné při užití jemnějšího rozlišení (Kuemmerlen et al., 2014). Tuto domněnku potvrzuje i Lassueur et al. (2006), nicméně dodává, že přesto, že s DTM o větším rozlišení dojde k určitému zpřesnění výsledných modelů, zůstává nejdůležitější faktor – teplota téměř neměnný napříč rozlišeními. Pozornost by tak měla být zaměřena na zpřesňování jednotlivých environmentálních proměnných in-situ jako je například teplota, vlhkost či sněhová pokrývka.

## **4 Metodika**

### **4.1 Zájmové území**

Zájmovým územím této práce je nejstarší národní park České republiky Krkonošský národní park, jež se nachází v geomorfologickém celku Krkonoše. Leží na severní hranici s Polskem na pomezí Libereckého a Královéhradeckého kraje. KRNAP o rozloze 36 300 ha byl vyhlášen v roce 1963 a roku 1986 mu bylo zřízeno ochranné pásmo o rozloze 18 400 ha, celková rozloha tedy činí téměř 55 000 ha.

Krkonoše jsou jedním z nejvýznamnějších center geobiodiverzity České republiky. Stojí za tím jejich ojedinělá poloha uprostřed evropských nížin a pahorkatin, jež v průběhu přirozeného vývoje způsobila vznik neobyčejně pestré mozaiky vysokohorského a severského reliéfu. Tím byl podmíněn i vznik stejně pestrého světa živočichů, rostlin a jejich společenstev. Přítomnost krkonošské arкто-alpínské tundry činí z Krkonoš výjimečný ostrov severské a vysokohorské přírody v srdci Evropy. KRNAP se tak řadí mezi biosférické rezervace UNESCO a patří do soustavy Natura 2000. Většina území spadá do krkonoško-jizerského krystalinika, které je budováno starohorními a prvohorními krystalickými břidlicemi. Krkonoše jsou proslulé svými mrazem třídnými formami reliéfu v podobě skalních hradeb, girland, putujících kamenných bloků, hlubokých říčních údolí či periglaciálních sutí. Mohutné žulové těleso neboli Krkonoško-jizerský pluton měl za následek vznik tvrdého kontaktního pásma, který měl zásadní vliv na další vývoj reliéfu některých částí hor. Nejvyšším bodem parku i celé republiky je Sněžka (1603 m n. m.). Nadmořská výška území se pohybuje od 400 m n. m. do 1603 m n. m. (Krnep, 2017).

### **4.2 Vstupní data**

Pro analýzy této práce byly vybrány tři hlavní sady existujících digitálních dat, které jsou veřejně dostupné. Podkladová data DMR České republiky dostupná na webu ČÚZK přes prohlížečskou službu AGS, která je poskytována technologií Esri ArcGIS Server zdarma a bez registrace, konkrétně DMR 4. generace a DMR 5. generace. Dále globální výšková data SRTM30 získána ze serveru USGS Earthexplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) s nutností registrace. Data byla porovnáována s daty z vlastního GPS měření.

Tab. 1 Přehled vstupních dat

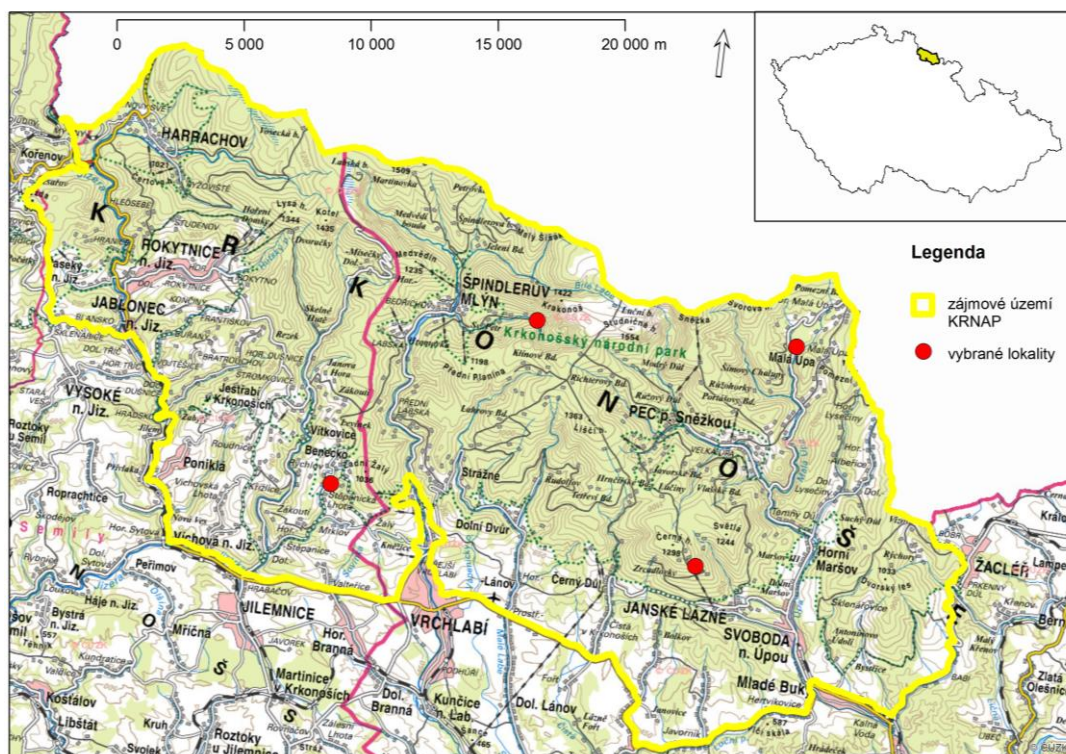
<b>Data</b>	<b>Velikost buňky (m)</b>
SRTM30	28 x 28
DMR 4G	5 x 5
DMR 5G	2 x 2
GPS	bod

#### **4.3 Získání terénních dat**

Sběr dat probíhal v zájmovém území Krkonošského národního parku na čtyřech vybraných lokalitách. Byly použity GPS stanice Leica 1200, kdy jedna stanice sloužila jako referenční bod. Referenční stanice slouží pro korekci polohy mobilních stanic a zvyšuje vertikální přesnost na centimetry. Průměrná výšková přesnost terénního měření byla 0,06 m, která byla zatížena nejméně přesným měřením na zalesněné sjezdovce s hodnotou 0,16 m. Ostatní data měla přesnost v průměru 3,5 cm.

Vzniklé sady digitálních dat rozdělené podle typu terénu:

- Vodní tok v zalesněném terénu – Svatý Petr
- Vodní tok v odkrytém terénu – Malá Úpa
- Sjezdovka v zalesněném terénu – Černá Hora
- Sjezdovka v odkrytém terénu – Benecko
- Kopec s nízkým porostem – Malá Úpa



Obr. 9 Oblasti sběru dat

#### 4.4 Úprava dat

Praktické provedení analýzy dat bylo uskutečněno v programu ArcGIS Desktop verze 1.5, licence programu je pro studenty zdarma. Pro práci s daty bylo potřeba sjednotit souřadnicové systémy všech vstupů. Data DMR 4G, DMR 5G a data vlastního GPS měření byla v systému S-JTSK Křovák EastNorth. Data SRTM dostupná v systému WGS 84 byla potřeba přetransformovat do systému S-JTSK pomocí nástroje *Project raster*. Velikost buněk výstupní vrstvy byla v nastavení funkce upravena na pravidelnou velikost cca 28 x 28 m, Metoda převzorkování (*Resampling technique*) byla zvolena bilineární.

#### 4.5 Výšková přesnost dat

Výšková přesnost jednotlivých DMR oproti referenčním bodům terénního měření byla zjištěna pomocí rovnice pro úplnou střední chybu výšky (střední kvadratická chyba – RMSE). Dále byly počítány další charakteristiky, a to systematická chyba (CH) a průměrná absolutní velikost chyby (MAV). Vzorce uvádí Mayer et Zemek (2015).

Bylo porovnáváno 1426 bodových terénních měření v různých typech terénu s daty SRTM30, DMR 4G A DMR 5G.

Výpočet výškového rozdílu:

$$\Delta H = H_{DMR} - H_{GPS}$$

kde:

$H_{DMR}$  je hodnota výšky DMR v daném bodě v metrech

$H_{GPS}$  je hodnota bodu zaměřená v terénu v metrech.

Následné dosazení do rovnice pro výpočet úplné střední chyby výšky:

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

kde:

$\Delta H_i$  je výškový rozdíl v daném bodě v metrech

$n$  je počet bodů.

Systematická chyba:

$$CH = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i}{n}$$

Průměrná absolutní velikost chyby:

$$MAV = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta H_i|}{n}$$

## 4.6 Analýzy prováděné v prostředí ArcGIS

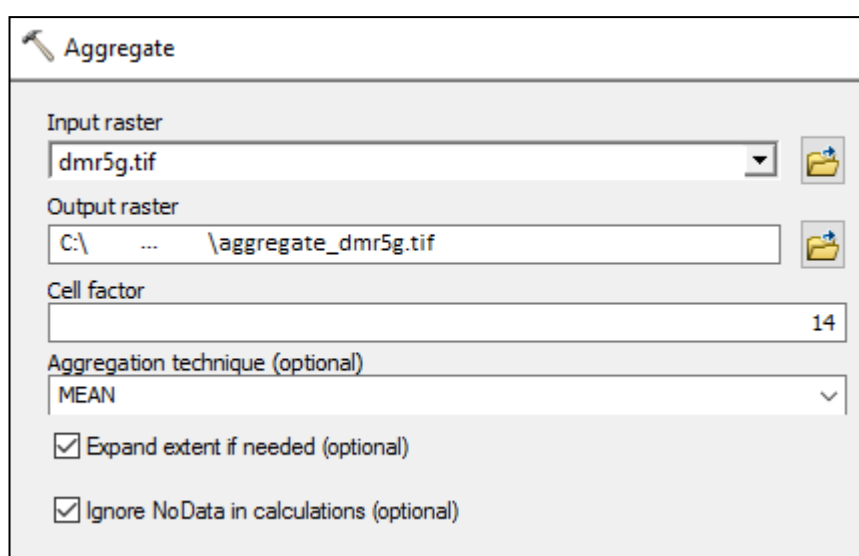
### 4.6.1 Rozdíl SRTM30 a DMR 5G

Vrstva rozdílů těchto dat byla vytvořena pomocí nástroje *Minus*. Rastrová vrstva DMR 5G byla odečtena od vrstvy SRTM 30. Vznikla tak nová vrstva obsahující výškové rozdíly těchto rastrů.



#### 4.6.2 Agregace DMR 5G

Pomocí nástroje *Aggregate* se změnilo rozlišení rastrové vrstvy DMR 5G, tak aby odpovídalo rozlišení vrstvy SRTM30. Vstupní rozlišení buňky je 2 x 2 m, cílem je hrubší rozlišení o velikosti buňky 28 x 28 m, které odpovídá rozlišení SRTM30. Funkce nabízí dvě nastavení (viz obr. 10). Faktor buňky (cell factor), je číslo, které udává, kolikrát se má vstupní rozlišení zvýšit. Tento byl nastaven na 14, aby odpovídal požadovanému rozlišení o hraně buňky 28 m. Druhým nastavením je zvolení techniky agregace, které nabízí maximální a minimální hodnotu, sumu, průměr nebo medián buněk. Pro účely práce byla vybrána technika, která shlukuje průměrné hodnoty buněk.

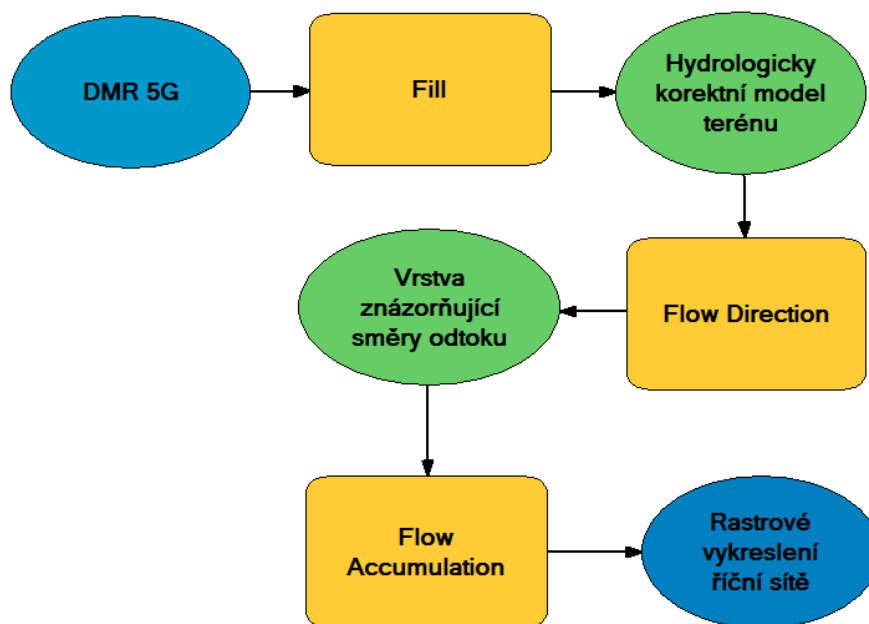


Obr. 10 Nastavení funkce Aggregate

#### 4.6.3 Analýzy vodních toků

Pro porovnání byly brány v úvahu dva modely sítí vodních toků. Liniová síť vodních toků DIBAVOD a generovaná síť vodních toků z dat DMR 5G. Postup tvorby rastrové vrstvy vodní sítě z DMR 5G je znázorněn na obr. 11. Pro odstranění bezodtokých oblastí byl využit nástroj *Fill*, pro výpočet směrů odtoku nástroj *Flow direction* a následně nástroj *Flow accumulation*, jehož výstupem je rastrová vrstva vykreslující síť vodních toků. Výsledná rastrová vrstva byla pomocí nástroje *ArcScan* převedena na vrstvu liniovou. Síť vodních toků byly modelovány pouze pro oblasti dvou vodních toků, ke kterým byla k dispozici terénní měření.

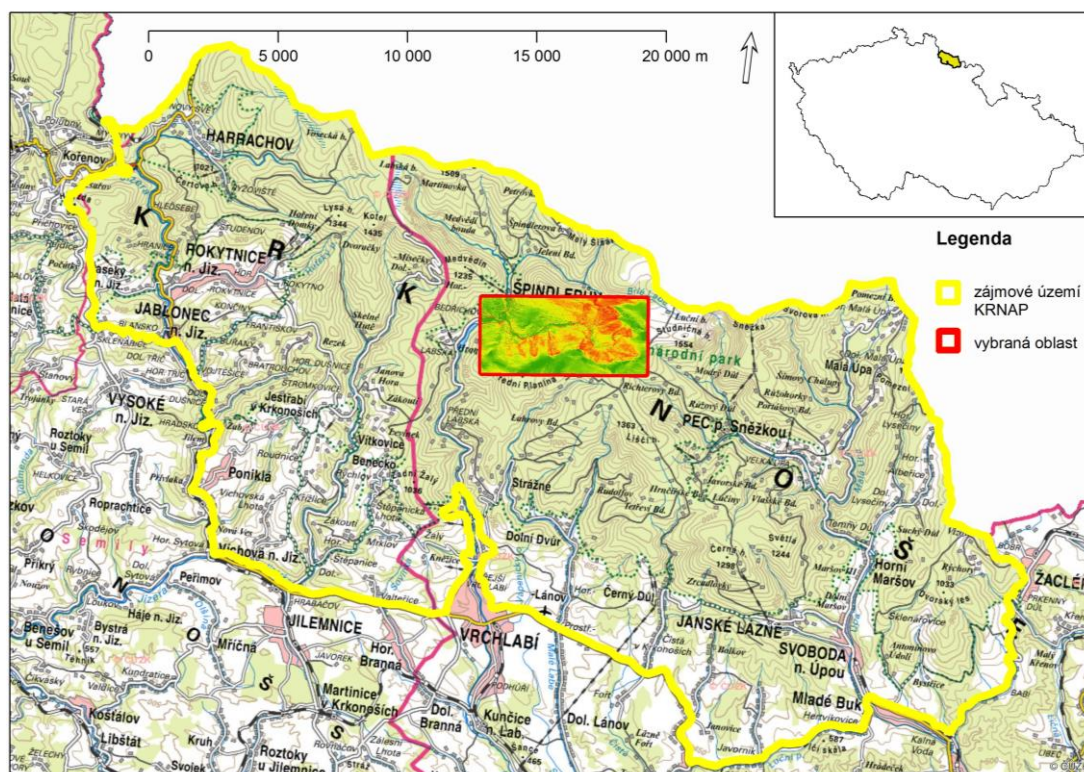
Pro zjištění průměrné vzdálenosti mezi toky DIBAVOD a generovanou sítí z DMR 5G byly obě liniové vrstvy převedeny na vrstvy bodové o intervalu bodů 2 m pomocí funkce *Construct points* nástroje *Editor*. Vzdálenost vrstev byla počítána nástrojem *Near*, kdy byla každému bodu spočítána nejkratší vzdálenost od bodu druhé vrstvy. Pro následné analýzy vodních toků byla využívána poloha toku generovaná z DMR 5G.



Obr. 11 Model postupu vytvoření říční sítě pomocí funkcí programu ArcGIS

#### 4.6.4 Svažitost vodních toků

Svažitost celého území byla počítána pomocí nástroje *Slope*. Vstupními vrstvami byl výškový rastr SRTM30, DMR 4G a DMR 5G, výstupem jsou rastrové vrstvy o stejném rozlišení jako vstupní vrstva s informací o svažitosti. Lze zvolit výsledné hodnoty ve stupních nebo v procentech. Pro účely práce byla svažitost počítána ve stupních. K porovnání byly navíc vytvořeny rastrové vrstvy svažitosti pro menší území v okolí toku Svatý Petr (viz obr. 12).



Obr. 12 Vybraná oblast kolem toku Svatý Petr

Dále byl zkoumán vliv agregace, kde byla porovnávána svažitost v korytě toku Svatý Petr vzniklá z těchto vrstev:

- DMR 5G (2 x 2 m) → vrstva svažitosti (2 x 2 m)
- SRTM30 (28 x 28 M) → vrstva svažitosti (28 x 28 m)
- DMR 5G (2 x 2 m) → DMR 5G (28 x 28 m) → vrstva svažitosti (28 x 28 m)

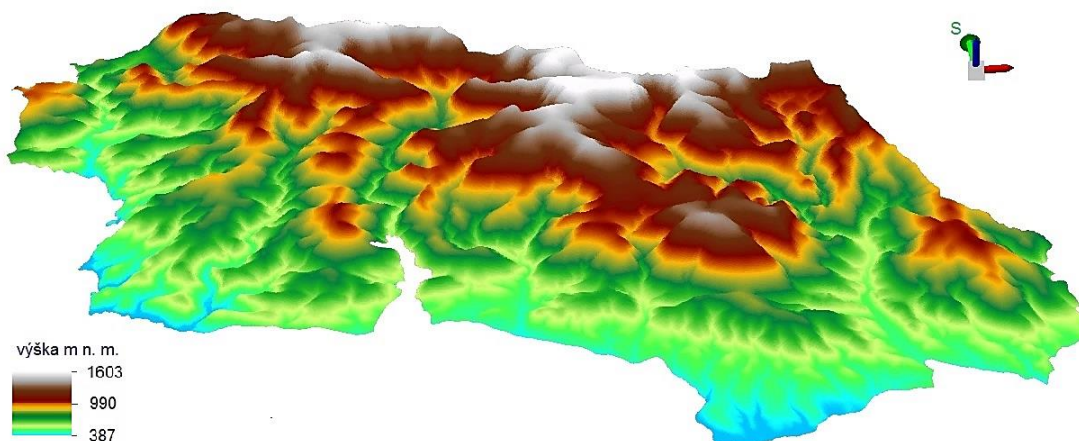
zde byla vytvořena agregovaná vrstva DMR 5G, došlo tak ke zprůměrování hodnot jednotlivých buněk a vytvoření nového DMT o hrubším rozlišení (28 x 28 m), z tohoto byla následně počítána svažitost jejíž rozlišení bylo stejně hrubé (28 x 28 m).

- DMR 5G (2 x 2 m) → vrstva svažitosti (2 x 2 m) → vrstva svažitosti (28 x 28 m)
- zde byla vrstva svažitosti odvozena z DMR 5G, vznikla tak vrstva svažitosti o jemném rozlišení (2 x 2 m), která byla následně agregována na rozlišení hrubší (28 x 28 m).

## 5 Výsledky

### 5.1 Digitální model terénu

Digitální model terénu zájmového území byl vytvořen z dat DMR 5G o rozlišení 2 x 2 m. 3D vizualizace území je znázorněna na obr. 13.



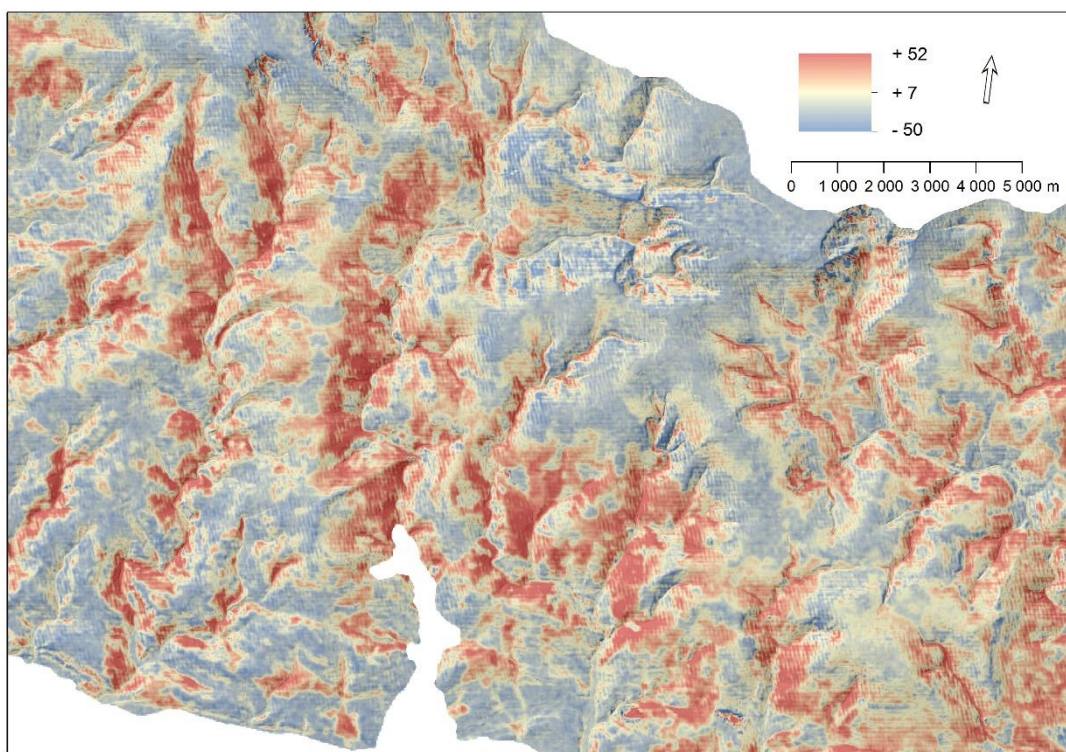
Obr. 13 3D model území vizualizován z dat DMR 5G v prostředí ArcScene

### 5.2 Rozdíl SRTM30 a DMR 5G

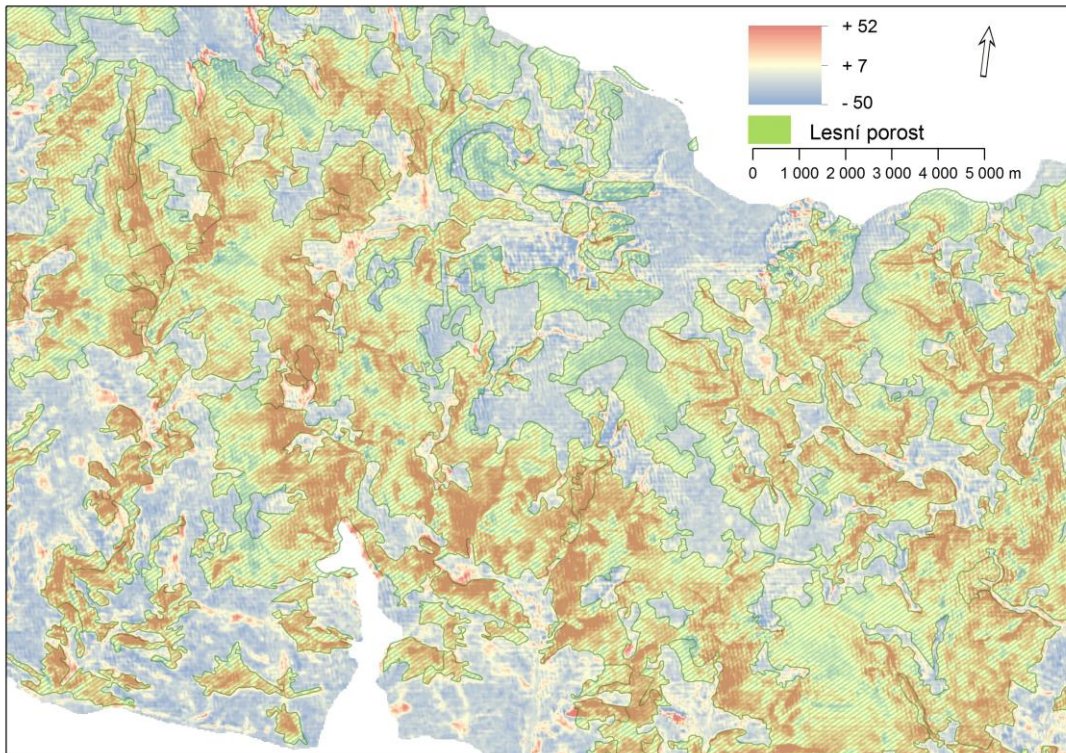
Díky výběru vhodné grafické reprezentace je z obr. 14 patrné, že SRTM30 výrazně nadhodnocuje zařízle údolní oblasti, především koryta vodních toků a strmé strany kopců s vysokou svažitostí. Naproti tomu dochází k podhodnocování hřebenů hor a výškových dominant. Nejpřesnější zobrazení je pozorováno na rozsáhlých rovinných oblastech bez skoků ve svažitosti. Obr. 15 ukazuje stejnou vrstvu rozdílů překrytou vrstvou lesních porostů, je patrné, že k největšímu nadhodnocování dochází v oblastech s lesním porostem, jelikož SRTM30 zachycuje v těchto oblastech výšku porostu.

Tab. 2 Základní charakteristika rozdílů vrstev SRTM30 a DMR 5G

<b>Rozdíl</b>	<b>(m)</b>
Min	-50
Max	52
Průměr	7
Směrodatná odchylka	7,5



Obr. 14 Výsledná vrstva vzniklá odečtením rastru DMR5G od SRTM30



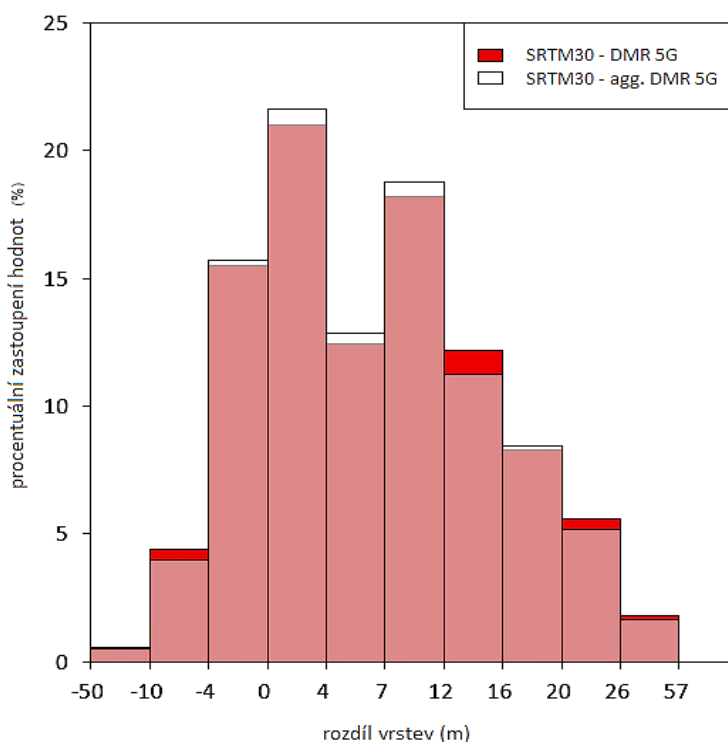
Obr. 15 Přidání vrstvy lesních porostů (CORINE Land Cover) na vrstvu rozdílů DMR 5G od SRTM30

### 5.3 Agregace DMR 5G

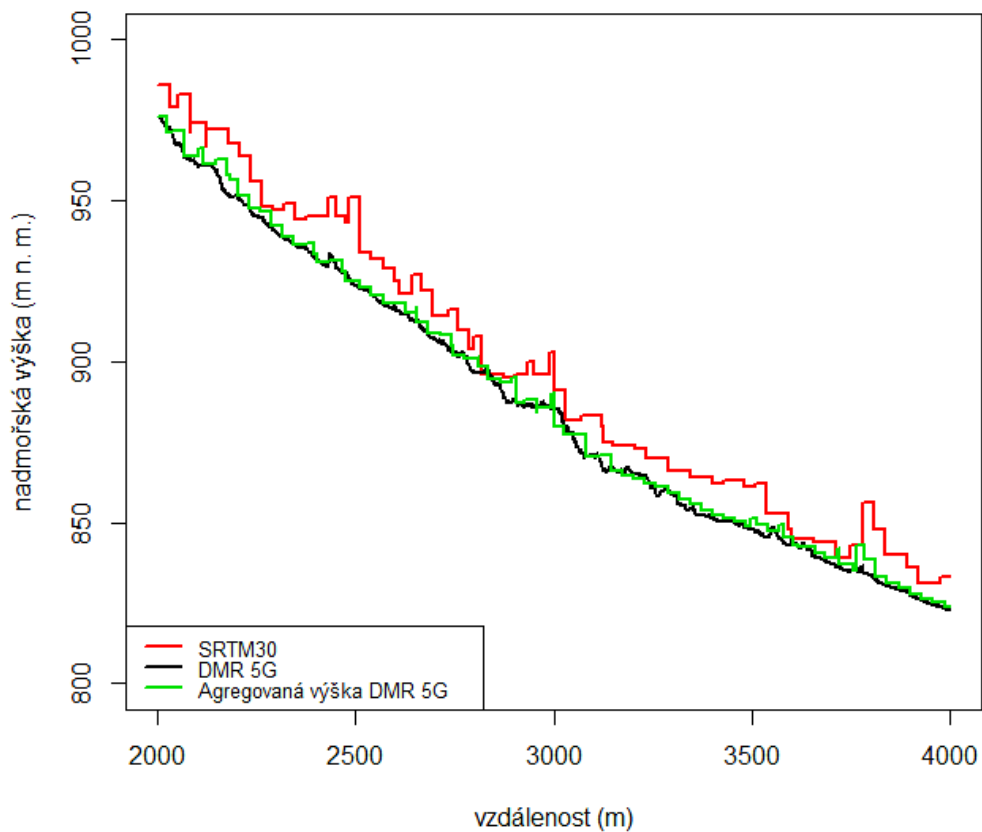
Na obr. 16 Je porovnání dvou výsledných vrstev zájmového území, které vznikly odečtením vrstvy DMR 5G a agregované vrstvy DMR 5G od vrstvy SRTM30. Ukazuje procentuální zastoupení výškových rozdílů mezi těmito vrstvami. V grafu je vidět, že při odečtení agregované vrstvy DMR 5G se snížily velmi vysoké i záporné hodnoty rozdílů a zvýšilo se zastoupení hodnot rozdílů blízkých nule. Agregovaná vrstva o nižším rozlišení má stejné tendence zahlazovat výškové extrémy jako vrstva SRTM30. Dále je patrné, že vrstva SRTM30 nadhodnocuje výškové hodnoty, jelikož většina rozdílů má hodnotu vyšší než 0. To je patrné zejména v zalesněných oblastech.

Tab. 3 Srovnání ukazatelů agregované vrstvy DMR 5G a SRTM30

Ukazatele	DTM	
	SRTM30	Agregovaná vrstva DMR 5G
Min	387	389
Max	1598	1579
Průměr	852	844
Směrodatná odchylka	246	244



Obr. 16 Porovnání výsledných rozdílů po odečtení vrstev v zájmovém území

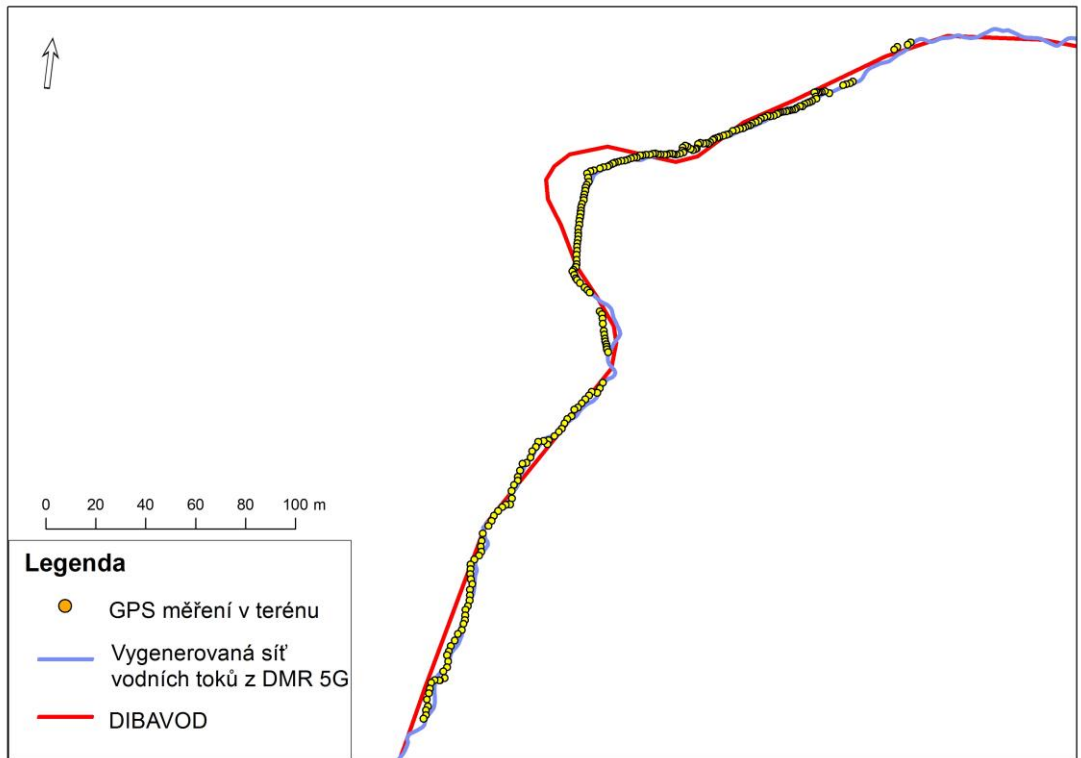


Obr. 17 Porovnání elevací v korytě toku Svatý Petr

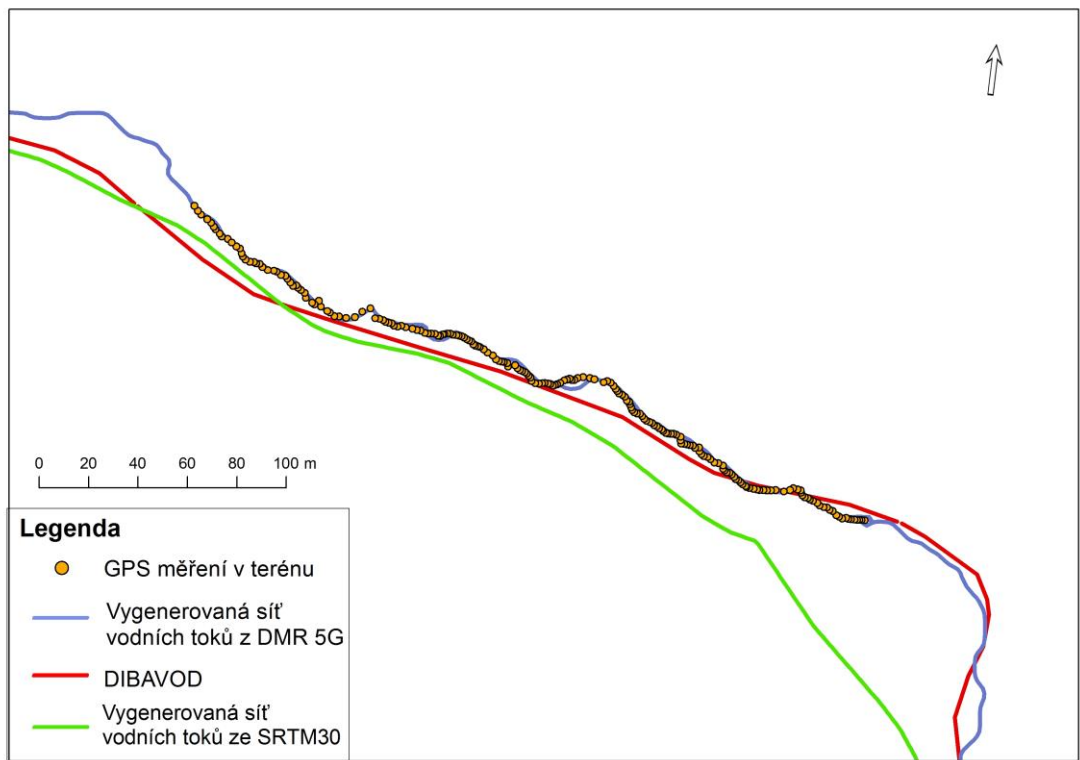
Na obr. 17 Je znázorněn průběh elevací v korytě toku Svatý Petr. Data vrstvy DMR 5G byla brána jako referenční. Agregovaná vrstva výšek upravená na stejné rozlišení jako SRTM30 udává přesnější hodnoty a téměř kopíruje hodnoty vrstvy DMR 5G. Model SRTM 30 terén opět značně nadhodnocuje.

#### 5.4 Analýzy vodních toků

Výsledné porovnání generovaného toku z vrstvy DMR 5G a dat DIBAVOD s daty terénního měření je na obr. 18 Na obr. 19 je navíc znázorněna i generovaná linie vodního toku z dat SRTM30. Linie DMR 5G kopíruje body terénního měření a shoduje se s reálným tvarem koryta, zatímco data DIBAVOD představují vektorizované linie z podkladů ZABAGED. Rozdíly ve vzdálenosti těchto linií jsou uvedeny v tab. 4. Histogram vzdáleností SRTM30 a DIBAVOD linií od linie DMR 5G je na obr. 21.

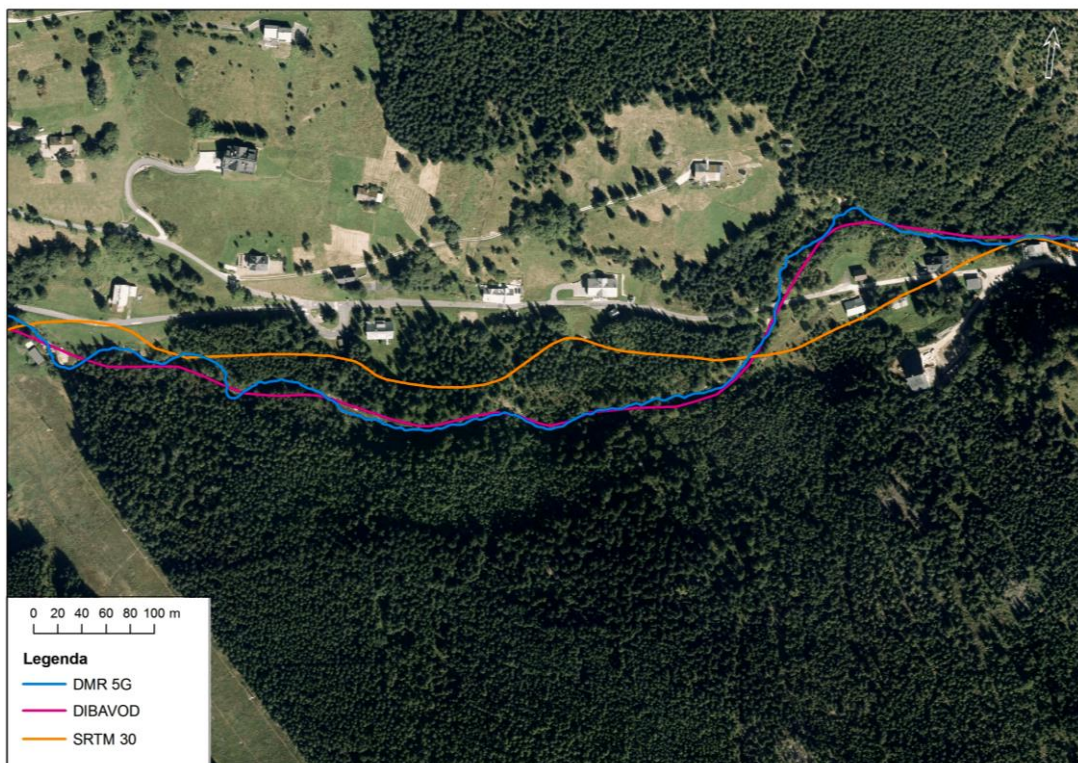


Obr. 18 Vykreslení úseku toku Malá Úpa

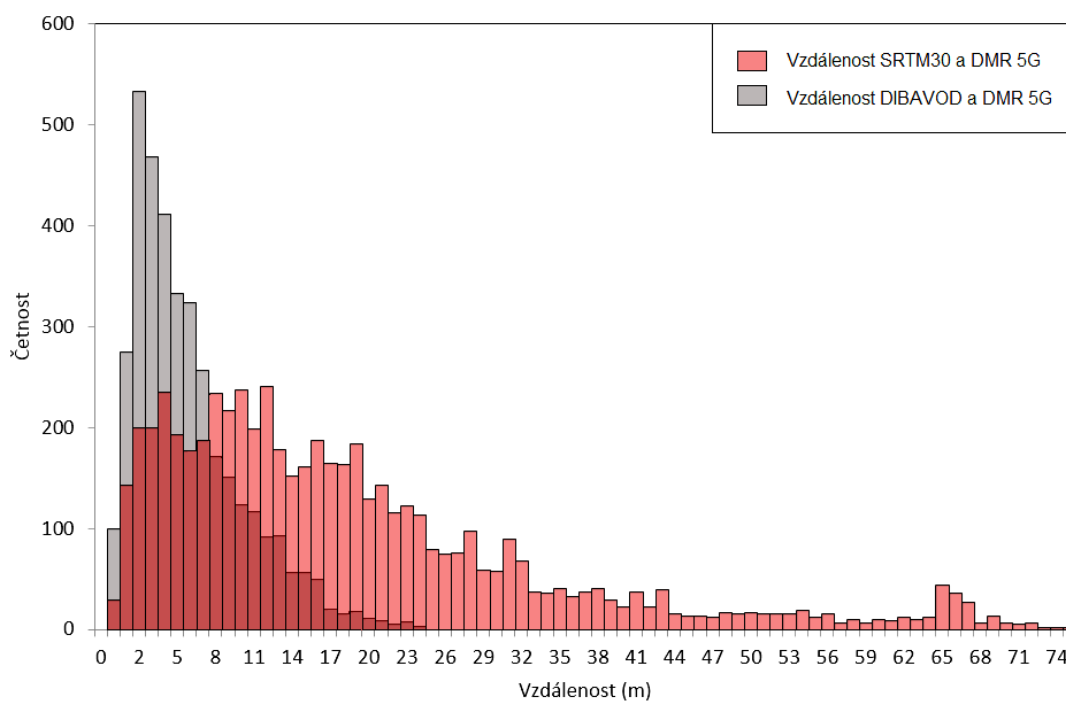


Obr. 19 Vykreslení úseku toku Svatý Petr





Obr. 20 Porovnání linií vodního toku na ortofoto snímku



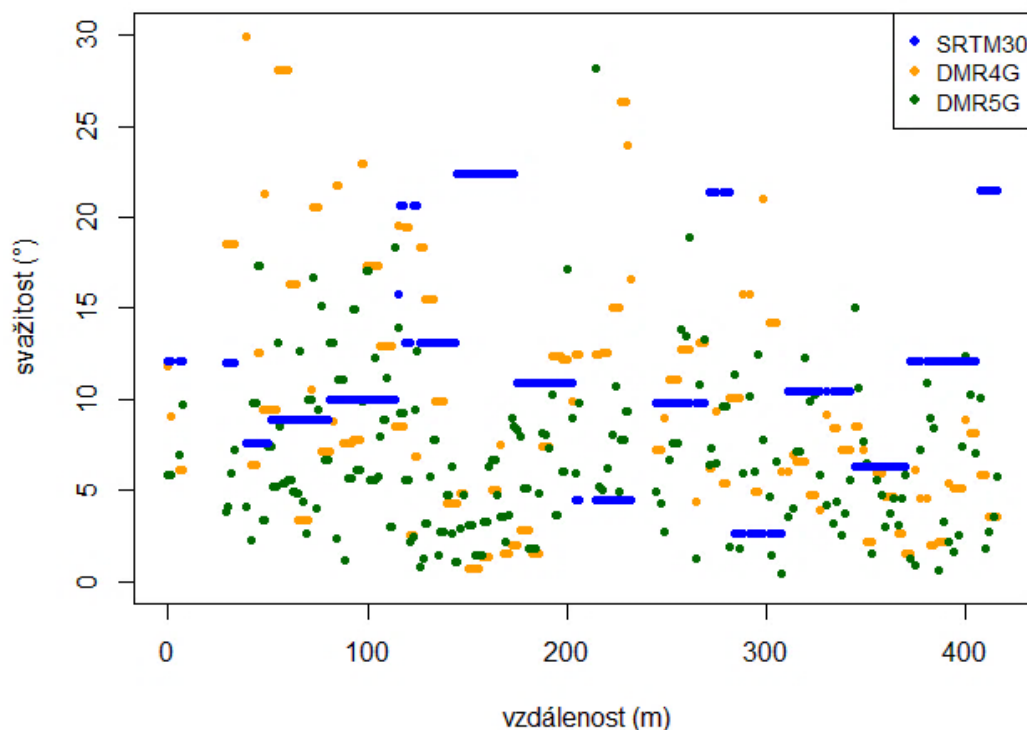
Obr. 21 Histogram vzdáleností DIBAVOD a generované linie toku SRTM30 od generované linie toku DMR 5G

Tab. 4 Vzdálenosti DIBAVOD a generované linie toku SRTM30 od generované linie toku DMR 5G

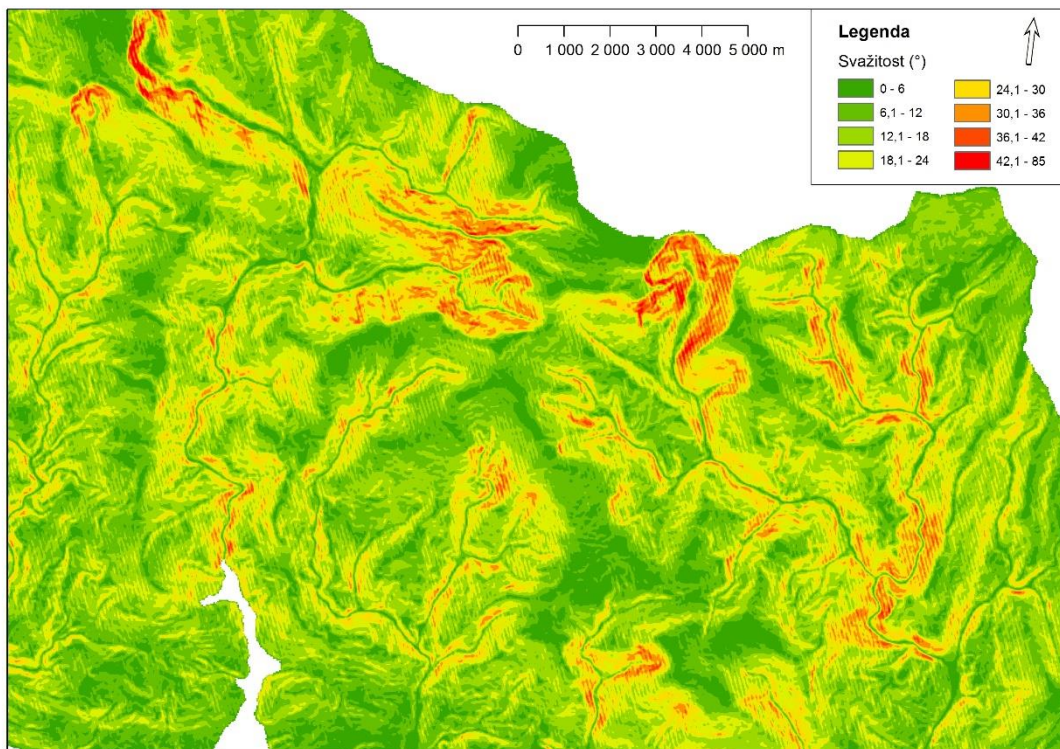
Vzdálenost	(m)	
	DIBAVOD	SRTM30
Průměrná	5,34	17,91
Minimální	0,01	0,04
Maximální	23,84	74,26
Směrodatná odchylka	4,27	15,02

## 5.5 Svažitost

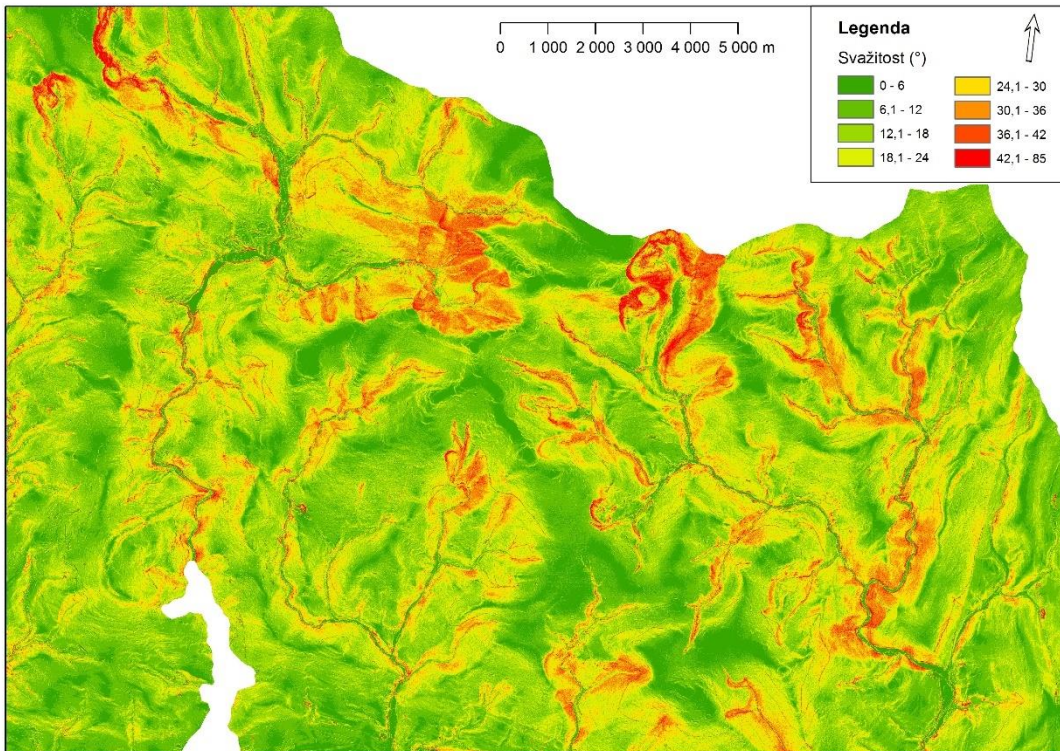
Výsledky zastoupení svažitosti v zájmovém území a ve vybrané oblasti toku Svatý Petr jsou zaznamenány v tab. 5. SRTM30 díky velikosti buňky ukazuje pro několik bodů v řadě stejné hodnoty, zatímco přesnější vrstvy s větším rozlišením ukazují hodnoty různorodé. DMR 4G a DMR 5G přesněji modelují rozmanitost terénu v krátkém měřeném úseku. Ukázka výstupních vrstev z DMR 5G a SRTM30 je na obr. 23 a 24. Na obr. 25 je patrný rozdíl ve výsledné svažitosti při agregování výsledků v jednotlivých krocích.



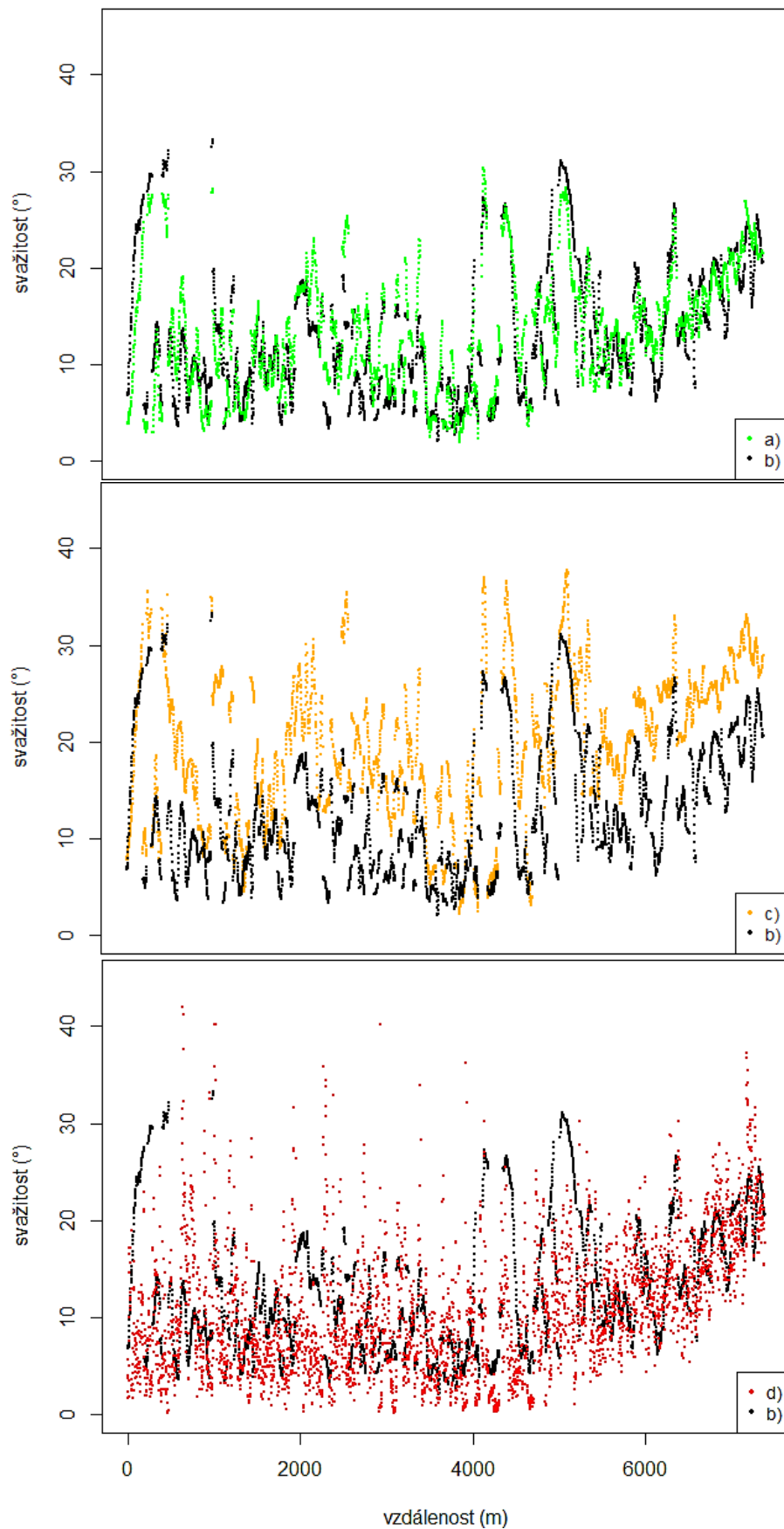
Obr. 22 Graf svažitostí v 400 m úseku koryta vodního toku Malá Úpa



Obr. 23 Vrstva svažitosti odvozená z vrstvy SRTM30



Obr. 24 Vrstva svažitosti odvozená z vrstvy DMR 5G



Obr. 25 Výsledné svažitosti v korytě toku Svatý Petr: a) svažitost počítaná z agregovaného DMR 5G, b) svažitost SRTM30, c) agregovaná svažitost z DMR 5G, d) svažitost DMR 5G

Tab. 5 Zastoupení svažitostí na území KRNAP a ve vybrané oblasti kolem toku Svatý Petr

Svažitost	DMR 5G		DMR 4G		SRTM 30	
	KRNAP	vybraná oblast	KRNAP	vybraná oblast	KRNAP	vybraná oblast
0° - 6°	12,34 %	10,20 %	11,22 %	9,11 %	14,81 %	8,57 %
6,1° - 12°	27,39 %	17,82 %	27,79 %	19,13 %	29,86 %	20,84 %
12,1° - 18°	27,23 %	18,21 %	29,34 %	18,23 %	27,52 %	21,94 %
18,1° - 24°	17,73 %	16,46 %	18,31 %	17,40 %	16,56 %	18,45 %
24,1° - 30°	9,22 %	14,94 %	8,53 %	15,42 %	7,40 %	15,31 %
30,1° - 36°	4,21 %	15,45 %	3,60 %	15,76 %	2,75 %	10,15 %
36,1° - 42°	1,32 %	5,88 %	0,91 %	4,59 %	0,86 %	3,88 %
42,1° - 86°	0,57 %	1,03 %	0,29 %	0,35 %	0,24 %	0,86 %
maximální hodnoty	85,00	74,00	80,00	57,00	60,00	52,00
průměrná hodnota	15,25	19,94	14,95	19,67	14,10	18,56

## 5.6 Výsledné hodnoty přesnosti výškových dat

Tab. 6 Celkové porovnání výškové přesnosti

DMR	Chyby výšek v metrech					
	min	max	rozpětí	CH	MAV	RMSE
DMR 5G	-3,8758	1,8318	5,7077	0,0421	0,3050	0,4070
DMR 4G	-4,8959	3,3758	8,2716	-0,2402	0,7104	0,9615
SRTM 30	-12,3026	34,7264	47,0290	13,2221	13,5798	15,8214

*min* – nejnižší chyba, *max* – nejvyšší chyba, *rozpětí* – rozdíl nejvyšší a nejnižší chyby  
*CH* – systematická chyba, *MAV* – průměrná absolutní velikost chyby, *RMSE* – úplná střední chyba výšky

Tab. 7 Porovnání výškové přesnosti v jednotlivých oblastech

Oblast	Chyby výšek v metrech			
	DMR	CH	MAV	RMSE
Vodní tok – odkrytý terén	DMR 5G	0,1921	0,2246	0,2901
	DMR 4G	0,4258	0,5272	0,7606
	SRTM 30	18,8531	18,8531	19,8257
Zalesněný vodní tok	DMR 5G	-0,1914	0,2205	0,2838
	DMR 4G	0,3897	0,5511	0,7867
	SRTM 30	9,8354	9,8354	10,7989
Sjezdovka – odkrytý terén	DMR 5G	-0,1692	0,2448	0,3125
	DMR 4G	-0,4414	0,6895	0,9196
	SRTM 30	1,9071	4,2569	5,6643
Kopec s porostem	DMR 5G	0,2495	0,3459	0,4344
	DMR 4G	-0,5157	0,8339	1,0877
	SRTM 30	17,7768	17,7768	19,0383
Sjezdovka – zalesněný terén	DMR 5G	-0,4210	0,4381	0,6155
	DMR 4G	-0,7054	0,7215	0,9475
	SRTM 30	5,0383	5,4973	6,4266

*CH – systematická chyba, MAV – průměrná absolutní velikost chyby, RMSE – úplná střední chyba výšky*

## 6 Diskuse

Reliéf zobrazený pomocí SRTM30 má tendenci zahladit výškové extrémy a drobné nuance vyskytující se na malém území a může tak mít významný vliv na výsledné analýzy a zobrazení skutečnosti především v oblastech s různě vertikálně členěným reliéfem a v zalesněných oblastech. DMR 4G a DMR 5G mnohem lépe zachycují jemné terénní charakteristiky. Siart et al. (2009) tuto domněnku potvrzuje, dodává, že k největším ztrátám v rozmanitosti terénu dochází při rozlišení nad 10 x 10 m. Po agregaci DMR 5G na rozlišení 28 x 28 m a následném porovnání skutečností (viz obr. 17) se SRTM30 se potvrdilo, že DTM vytvořené agregací z modelů s vysokým rozlišením popisují terénní charakteristiky přesněji, než modely jejichž výchozí rozlišení je nižší, to také potvrzuje Thielen et al. (1999).

Pro správné modelování charakteristik vodních toků byla porovnávána dostupná síť vodních toků DIBAVOD se sítěmi generovanými ze SRTM30 a DMR 5G. Generovaná síť vodního toku z DMR 5G nejvíce odpovídá reálnému stavu vodního koryta, což potvrzuje i ortofoto snímek na obr. 20 a téměř přesně kopíruje body terénního měření. Uplatněním DMR České republiky v hydrologických aplikacích se zabývá například Uhlířová et Nováková (2012). V tab. 4 je přehled vzdáleností mezi liniemi toku z DIBAVOD, generovanou linií SRTM30 a generovanou linií DMR 5G pro celou délku toku Svatý Petr. Průměrná vzdálenost DIBAVOD od skutečného koryta vyšla 5 m a nejčastější vzdálenost linií se pohybovala v rozmezí od 2 do 5 m. Maximální vzdálenost 24 m už je poměrně markantní, i přesto vzdálenost „pouhých“ 2–5 metrů může posouvat teoretickou linii toku do oblasti silnice či zástavby, což může být pro následné analýzy nepřijatelné. Linie generovaná z dat SRTM30 byla vytvořena pouze pro porovnání, průměrná vzdálenost od skutečného toku činila 18 m a maximální dokonce 74 m. Lze říci, že DMR 5G je vhodný pro přesné hydrologické analýzy díky jemnému rozlišení a vysoké vertikální přesnosti. Liniová vrstva DIBAVOD ovšem vznikala z odpovídajících vrstev ZABADED a je určena pro tvorbu výstupů ve větším měřítku (1:10 000), kde najde své uplatnění (Zbořil et al., 2005). Pro velkoplošné analýzy s menším důrazem na přesnost je dostačující. Pro lokální analýzy, kde je třeba znát přesnou polohu toku budou mít lepší využití co nejpřesnější data jako DMR 5G, což potvrzuje Hubáček et al. (2016) a Zhang et Montgomery (1994).

Následné výsledky svažitostí v tab. 5 ukazují procentuální zastoupení hodnot svažitosti na celém území Krkonošského národního parku a také ve vybrané oblasti kolem toku Svatý Petr. Hodnoty svažitosti v průměru dosahovaly u všech DTM cca 15° v celém zájmovém území a 19° ve vybrané oblasti. Svažitosti DMR 4G a DMR 5G však dosahovaly vyšších maximálních hodnot než SRTM30 a lišily se o 20°. Porovnání svažitostí v korytě celé délky vodního toku Svatý Petr (viz obr. 25) ukazuje vliv rozlišení na výslednou analýzu. Svažitost DMR 5G nabývá rozličných hodnot v každém místě měření a je zde velká variabilita jak nízkých, tak vysokých hodnot. Oproti tomu svažitost SRTM 30 není tak variabilní a nedosahuje extrémních hodnot. Svažitost počítaná z agregovaného DMR 5G téměř kopíruje hodnoty svažitosti SRTM30 a agregovaná svažitost z DMR 5G nadhodnocuje. K těmto analýzám je vhodnější používat DTM s velkým rozlišením agregované na rozlišení menší než DTM s menším rozlišením v základu, zároveň tak dojde k urychlení analýz i k úspoře objemu dat, to ve své studii uvádí i Thieken et al. (1999).

Dále byly porovnávány výsledné hodnoty výškové přesnosti DMR 5G (viz tab. 7). ČÚZK udává RMSE u DMR 5G 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Nejnižší hodnota nebyla dosažena v žádné ze série měření, což může být dáno charakterem členitého vysokohorského terénu zájmového území a výběrem konkrétních oblastí. U vodního toku a sjezdovky v odkrytém terénu vyšla RMSE 0,3 m, v zalesněném terénu pak průměrně 0,45 m. Konkrétně u vodního toku v zalesněné oblasti vyšla 0,28 m, což odpovídá udávané hodnotě. Na kopci s nízkým porostem vyšla RMSE 0,43 m a na sjezdovce v zalesněném terénu 0,61 m. I když hodnoty neodpovídají udávané přesnosti, stále jsou i ve členitém reliéfu přesné v řádu desítek centimetrů a podávají velmi uspokojivé znázornění skutečnosti.

RMSE u DMR 4G je na ČÚZK udávána 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. Jak je patrné v tab. 7, udávané hodnoty 0,3 m nebylo dosaženo ani jednou. Průměrná RMSE v odkrytém terénu je 0,84 m. V zalesněném terénu hodnoty průměrně odpovídají přesnosti 0,94 m a dosahují udávané přesnosti 1 m.

Udávaná hodnota přesnosti SRTM30 je absolutní chyba 16 m, což odpovídá úplné střední chybě výšky 9,73 m (Mukul et al., 2016). Tato hodnota byla dosažena ve většině z měřených oblastí s rezervou několika metrů. Ovšem v oblastech s náhlými změnami ve svažitosti, jako jsou vodní toky nebo strmý kopec, dosahovaly hodnoty RMSE 19 m.



Výsledky z tab. 6 potvrzují předpoklad, že DMR 5G je nejpřesnější z modelů, s nejnižšími hodnotami chyb. Celková RMSE (0,40 m) i MAV (0,3 m) se pohybují v desítkách centimetrů, CH vyšla 4 cm. U DMR 4G ukazuje CH (-0,24 m) tendenci k podhodnocování výškových hodnot, celková RMSE vyšla 0,96 m. Zatímco SRTM30 má podle CH (13,22 m) tendenci výškové hodnoty výrazně nadhodnocovat, a to v desítkách metrů. Tento fenomén převládá především v zalesněných oblastech, neboť zde SRTM30 zachycuje i porost. Celková RMSE činila 18,8 m, SRTM30 tak nedosáhl své udávané přesnosti 9,73 m. Ukázalo se, že SRTM30 je vhodný především pro větší území rovinného charakteru bez vegetace a porostu, kde může dosahovat uspokojivých přesností. V příštích letech však bude k dispozici globální SRTM30, který bude za pomoci algoritmů upraven právě v oblastech s lesním porostem (Gallant et Read, 2016). Zatímco LiDARové modely o vyšší přesnosti jsou vhodné pro analýzy lokálního charakteru i členitého reliéfu s velkým důrazem na přesnost. V případě časové náročnosti či nutnosti snížení objemu dat, se tak vhodným řešením jeví agregace přesnějších DTM s vysokým rozlišením, na rozlišení nižší, toto řešení navrhuje i Vaze et al. (2010).

## 7 Závěr

Bakalářská práce se zabývala problematikou využití DTM různého původu a rozlišení v analýzách odvozených charakteristik vodních toků. Byly využívány tři DTM, a to globální model SRTM 30 (28 x 28 m) a pro Českou republiku dostupný DMR 4G (5 x 5 m) a DMR 5G (2 x 2 m). Byla porovnáována výšková přesnost těchto modelů a výsledné charakteristiky následných analýz, především svažitosti. DMR 5G se jeví jako nejvhodnější a zároveň nejpresnější model vhodný pro analýzy lokálního charakteru, kde je důležité vystihnout co nejreálnější charakter terénu. Přesnost (RMSE) tohoto modelu po porovnání s daty terénního měření z různých lokalit v Krkonošském národním parku vyšla 0,4 m. Přesnost DMR 4G dosahovala 0,96 m a přesnost SRTM30 15,82 m. Nejméně přesný byl SRTM30, který nedostal udávané RMSE (necelých 10 m). To bylo způsobeno především charakterem vysokohorského terénu, který je velmi členitý a nedaří se tak vystihnout jednotlivé charakteristiky malého měřítka. Velký vliv hrál i přítomný lesní porost, jelikož SRTM30 v těchto oblastech udává výškové hodnoty pokryvu, které nadhodnocují povrch až v desítkách metrů. U výpočtů svažitosti se ukázala neschopnost modelů s malým rozlišením zachytit drobné nuance, kdy hodnoty svažitosti SRTM30 neukazují náhlé změny v terénu a mají tendenci povrch vyhlazovat. Zatímco hodnoty svažitosti DMR 4G a DMR 5G zachycují rozmanitost terénu. Potvrdil se tím předpoklad, že modely s jemnějším rozlišením jsou vhodné pro lokální a přesné analýzy členitého terénu a mohou být uplatněny například v modelování druhové distribuce, jelikož dokáží podat přesnější informaci o jednotlivých faktorech prostředí. DMR 5G může být s úspěchem využit k vygenerování přesné sítě vodních toků, avšak zpracování těchto dat může být náročné na výpočetní technologie. Pomocí metod agregace DTM však lze snížit objem dat. I když dojde ke ztrátě některých prostorových charakteristik, ukazují se tyto modely jako přesnější než dostupné modely o stejném výchozím rozlišení. Nelze však říci, který DTM je nejlepší, vždy je třeba dbát na požadovanou přesnost a rozlišení, či měřítko v jakém budou výsledky interpretovány. Volba DTM tak závisí na konkrétním řešeném problému.

## 8 Přehled literatury a použitých zdrojů

ASTER Global Digital Elevation Map, ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, 2004: [online]. Dostupné z: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

BAHN, V. et MCGILL, B. J., 2013: Testing the predictive performance of distribution models. *Oikos* (3): 321-331.

BARTÁK, V., 2008: Algoritmy pro zpracování digitálních modelů terénu s aplikacemi v hydrologickém modelování. Diplomová práce (Ing.). ČZU, Fakulta životního prostředí. Praha: 12 s.

ČÚZK, Geoportál ČÚZK, ZABAGED® - polohopis – úvod, 2016a: [online]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(10psdudox2gejbtmzkzq0u0w\)\)/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady\\_zabaged&side=zabaged&menu=24](http://geoportal.cuzk.cz/(S(10psdudox2gejbtmzkzq0u0w))/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24)

ČÚZK, Geoportál ČÚZK, ZABAGED® - výškopis – úvod, 2016b: [online]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(kpfqedwlckrkk4mln5ylscia\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=30](http://geoportal.cuzk.cz/(S(kpfqedwlckrkk4mln5ylscia))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&head_tab=sekce-02-gp&menu=30)

DOMISCH, S., JÄHNIG, S. C., SIMAIKA, J. P., KUEMMERLEN, M., et STOLL, S., 2015: Application of species distribution models in stream ecosystems: the challenges of spatial and temporal scale, environmental predictors and species occurrence data. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 186 (1-2): 45-61.

ELITH, J. et LEATHWICK, J. R., 2009: Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 40: 677-697.

EL-SHEIMY, N., VALEO, C. et HABIB, A., 2005: Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications. Artech House.

FARR, T. G., ROSEN, P. A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., ... et SEAL, D., 2007: The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, 45(2).

- GALLANT, J. C. et READ, A. M., 2016: A Near-Global Bare-Earth dem from SRTM. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B4: 137-141.
- GALLANT, J. C. et WILSON, J. P., 1996: TAPES-G: a grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. Computers et Geosciences, 22(7): 713-722.
- GISAT: ASTER GDEM, 2017: [online]. Dostupné z:  
<http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/aster-gdem>
- GUISAN, A. et THUILLER, W., 2005: Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology letters, 8(9): 993-1009.
- HRUBÝ M., 2006: Geografické Informační Systémy (GIS) - Studijní opora. VÚT v Brně: 35–40.
- HUBACEK, M., BRENOVA, M., CEPLOVA, L. et ZERZAN, P., 2014: Verification of Accuracy of the New Generation Elevation Models. Advances in Military Technology, 9(2): 21-31.
- HUBÁČEK, M., KOVAŘÍK, V. et KRATOCHVÍL, V., 2016: Analysis of influence of terrain relief roughness on DEM accuracy generated from lidar in the Czech Republic territory. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B4: 25-30.
- HUTCHINSON, M. et GALLANT, J., 2000: Digital elevation models and representation of terrain shape. Terrain analysis: principles and applications: 29-50.
- JEDLIČKA, K. et MENTLÍK, P., 2002: Hydrologická analýza a výpočet základních morfometrických charakteristik povodí s využitím GIS. Geoinformatika: sborník z XX. sjezdu ČGS, Ústí nad Labem, UJEP: 46-58.
- KOLEJKA, J., 2013: Digitální model krajiny. Životné prostredie 47: 38-42.
- KÖTHE, R. et BOCK, M: 2009: Preprocessing of Digital Elevation Models–derived from Laser Scanning and Radar Interferometry–for Terrain Analysis in Geosciences. Proc. Geomorph: 155-161.
- KRNAP, Správa Krkonošského národního parku – přírodní poměry, (2017): [online]. Dostupné z: <http://www.krnep.cz/prirodni-pomery/>

- KUEMMERLEN, M., SCHMALZ, B., GUSE, B., CAI, Q., FOHRER, N., et JÄHNIG, S. C., 2014: Integrating catchment properties in small scale species distribution models of stream macroinvertebrates. *Ecological Modelling*: 277, 77-86.
- LASSUEUR, T., JOOST, S., et RANDIN, C. F., 2006: Very high resolution digital elevation models: Do they improve models of plant species distribution?. *Ecological Modelling*, 198(1): 139-153.
- MARTIN, P. H., LEBOEUF, E. J., DOBBINS, J. P., DANIEL, E. B., et ABKOWITZ, M. D., 2005: Interfacing GIS with water resource models: A state-of-the-art review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(6): 1471-1487.
- MAYER, Z. et ZEMEK, F., 2015: Digitální model reliéfu jako podklad pro návrh vodohospodářských opatření v pozemkových úpravách: The digital relief model as a basis for the design of water management measures in landscaping projects. *Vodní Hospodářství* 65: 5-10.
- MUKUL, M., SRIVASTAVA, V. et MUKUL, M., 2016: Accuracy analysis of the 2014–2015 Global Shuttle Radar Topography mission (SRTM) 1 arc-sec C-Band height model using international Global Navigation Satellite System Service (IGS) network. *Journal of Earth System Science*, 125(5): 909-917.
- PACINA, J. et BREJCHA, M., 2014: Digitální modely terénu. Vydání první. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí: 73.
- PAVELKA, K., 2013: Letecké laserové skenování v ČR a možnosti využití dat pro dokumentaci historické těžby nerostných surovin, ČVUT, Praha.
- PENÍŽEK, V., ZÁDOROVÁ, T., KODEŠOVÁ, R., et KLEMENT, A., 2014: Optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků, ČZU, Praha.
- RAHMAN, A. A., 1994: Digital terrain model data structures. *Bulletin Ukur, JIB*, 5: 61-74.
- RAPANT, P., 2002: Úvod do geografických informačních systémů. HGF VŠB-TU, Ostrava.
- RAPOSO, P. et SAMSONOV, T., 2014: Towards general theory of raster data generalization. In 17th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation, Vienna, Austria.

- REUTEBUCH, S. E., ANDERSEN, H. E. et MCGAUGHEY, R. J., 2005: Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. *Journal of Forestry*, 103(6): 286-292.
- RODRIGUEZ, E., MORRIS, C. S. et BELZ, J. E., 2006: A global assessment of the SRTM performance. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing*, 72(3): 249-260.
- SANTILLANA, J. R., MAKINANO-SANTILLANA, M., AMPAYON, B. C., et DEL NORTE, A., 2016: Vertical Accuracy Assessment of 30-M Resolution Alos, Aster, and Srtm Global Dems Over Northeastern Mindanao, Philippines. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: 149-156.
- SCHMIDT, J., EVANS, I. S. et BRINKMANN, J., 2003: Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(8): 797-814.
- SIART, C., BUBENZER, O. et EITEL, B., 2009: Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*, 112(1): 106-121.
- TACHIKAWA, T., HATO, M., KAKU, M., et IWASAKI, A., 2011: Characteristics of ASTER GDEM version 2. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2011 IEEE International: 3657-3660.
- THIEKEN, A. H., LUÈCKE, A., DIEKKRÜGER, B. et RICHTER, O., 1999: Scaling input data by GIS for hydrological modelling. *Hydrological processes*, 13(4): 611-630.
- UHLÍŘOVÁ, K. et NOVÁKOVÁ, H., 2012: Využití dat leteckého laserového skenování pro revizi datových sad rozvodnic a vodních toků. *VTEI*, 54: 1-4.
- VAZE, J., TENG, J. et SPENCER, G., 2010: Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling et Software*, 25(10): 1086-1098.
- VIERLING, K. T., VIERLING, L. A., GOULD, W. A., MARTINUZZI, S. et CLAWGES, R. M., 2008: Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2): 90-98.
- WILSON, J. P., 2012: Digital terrain modeling. *Geomorphology* 137: 107-121.

ZBOŘIL, A. a kolektiv, 2005: Digitální báze vodohospodářských dat – DIBAVOD. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha.

ZHANG, K., CHEN, S. C., WHITMAN, D., SHYU, M. L., YAN, J. et ZHANG, C., 2003: A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 41(4): 872-882.

ZHANG, W. et MONTGOMERY, D. R., 1994: Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. Water resources research, 30(4): 1019-1028.